

フライアッシュを混和したプレキャストコンクリートの
製造効率化に関する研究

平成 29 年 9 月

入江 正明

論文要旨

コンクリート構造物は、現場打ちコンクリート又はプレキャストコンクリートのいずれかの手法により構築される。中でもプレキャストコンクリートは管理された工場で製造するため、運搬時の品質変動、配筋・締固めに係る技術力、さらに養生時の外部環境条件等に影響されず、比較的低廉で高性能かつ品質ばらつきが小さいコンクリートが実現できることが知られている。このプレキャストコンクリートの建設思想は、すでに100年以上も前から採用されており、規格化された床や柱等を組み合わせた住宅建築に、土木施設では杭・側溝等に用いられてきた。今日では国土交通省による i-construction プロジェクトとして、熟練技術者の退職や若手の建設分野からの離職など、人材不足によるコンクリート構造物のプレキャスト化の推進が進められているところである。

土木分野のプレキャストコンクリートは、JIS 製品として高品質を確保した上で低廉製品として求められているが、セメントや骨材といった構成材料や蒸気養生用燃料等の製造費の高騰があり、コスト縮減の対策として製造効率化が求められている。こうした背景を踏まえてプレキャストコンクリートの製造における制度や基準、使用材料、製造工程及び養生まで現状を徹底的に調査し、製造過程の問題点の抽出と改善点を整理した結果、効率的に製品製造を行うためには製造工程の約9割を占める蒸気養生履歴の最適化とともに、以下に示す2つの相反する性能（強度）を同時に満足することが必要であることが明らかになった。

(A) 製品としての**出荷時強度**（出荷時材齢14日又は7日）

(B) 製造硬化過程での**脱型時強度**（脱型時材齢4～10時間）

この2つの性能要求を同時に満足するためには、市販のセメント材料及び標準的蒸気養生履歴を採用する一般的な製造法では、単位セメント量が増大し不経済になることに加え、収縮ひび割れ等の不具合が発生しやすく品質の低下につながる。また、近年の社会的要求としてリサイクル材のうち、CO₂ 排出削減効果が高くセメント硬化体の収縮特性に優れているフライアッシュの混和が求められているが、ポズラン反応による強度発現が遅いことから、2つの相反する性能を同時に満足するためにはますます単位セメント量を増やすことになり、高コスト化・非効率化となり、新たな製造効率化の技術開発が求められているところである。

そこで、本研究では、環境負荷低減対策や収縮特性に優れているフライアッシュセメントを採用したうえで、現行 JIS 制度を逸脱しないプレキャストコンクリートの製造効率化の技術開発を行ったものであり、その手法は、2つのステップから構成されている。第一ステップはフライアッシュセメントを用いた場合の (A) 製品強度を満足するための示方配合と最適な蒸気養生履歴を見出す。これにより基本的製造法を確定する。第二

ステップは、基本的製造法に対して不足する（B）脱型強度のみを向上させるために独自開発した速硬性混和材の添加を行う。この2つのステップにより、（A）製品強度及び（B）脱型強度を満足する合理的な強度発現曲線が得られることになる。つまり、本手法は、強度性能を発現する水和反応のメカニズムを化学的特性に着目してかつ合理的に利用したもので、蒸気養生履歴の最適化まで踏み込んだ製造効率化の先行事例は存在しない。

本論文を構成する各章の内容を簡単に紹介し、本論文の構成を説明する。

第1章「はじめに」では、本研究の背景について概説し、プレキャストコンクリートの製造効率化の必要性を社会的背景及び製造企業のニーズから整理し、本研究の目的を明確化した。

第2章「プレキャストコンクリートに関する現状及び既往の研究」では、プレキャストコンクリートの規格や基準の現状をJISの歴史的変遷の視点からまとめ、問題点の抽出や昨今の環境対策の要求に対する各自治体の制度設計についてまとめた。さらに、コンクリート構築におけるプレキャストコンクリートと現場打ちコンクリート工法と比較し、プレキャストコンクリートは、品質及び性能等多くの項目で優位性があるが、技術基準や積算基準がないことが、採用機会の障壁となっていることが明らかになった。

第3章「コンクリート構造物に関する技術基準」では、コンクリート構造物の設計に関する技術基準を法体系から整理した。これにより、コンクリート構造物の要求機能及び要求性能とその性能の評価指標が明確になり、国等の設計要求に対する性能評価手法や適用できる材料等を明確化した。

第4章「プレキャストコンクリートの製造効率化における課題の抽出」では、プレキャストコンクリートの要求性能を明確にし、使用される材料と示方配合さらに設計及び製造手法について現状を把握し、プレキャストコンクリートの製造方法の効率化に対する具体的改善点について見出した。その結果、プレキャストコンクリートの製造効率化では、使用材料に応じた蒸気養生履歴の最適化による（A）出荷時強度が必要であること、さらに（B）脱型時強度を向上させる速硬性混和材が不可欠であることを見出した。特に、リサイクル材としてフライアッシュを適用するためには、この2つの手法の組み合わせは不可欠であることを示した。

第5章「プレキャストコンクリートの速硬性混和材による製造効率化」では、プレキャストコンクリートの製造時の要求性能である（B）脱型強度を確保するために独自に開発した「速硬性混和材」の製造方法及び各種特性について明らかにした。速硬性混和材による強度増加は、セメント材料の空間を埋めるフィラー効果と比表面積拡大による水和反応の促進の2つの効果によることを明らかにした上で、比表面積と添加率の関係を見だし、脱型時強度増に寄与する配合の設定法を示した。

これらの成果により、プレキャストコンクリートの速硬性混和材による製造効率化を

実現した。

第6章「フライアッシュ混和型プレキャストコンクリートの蒸気養生履歴の最適化による製造効率化」では、使用セメントと最適蒸気履歴を見出すため、普通及び早強ポルトランドセメントとそれにフライアッシュを混和したセメントに対する基本特性の試験を行い、フライアッシュ混和セメントにおける最適な蒸気養生履歴を見出した。

これらの成果により、プレキャストコンクリートの蒸気養生履歴の最適化による製造効率化を実現した。

第7章「プレキャストコンクリートの製造効率化の構築」では、第5章で示した速硬性混和材による製造効率化及び第6章で示した蒸気養生履歴の最適化の2つの手法を組み合わせたプレキャストコンクリートの製造効率化の設定フローを示し、製造効率化のシステムについて提案した。

第8章「結論」では、本研究で明らかにしたプレキャストコンクリートの製造効率化に関する技術を整理するとともに、さらなる市場拡大の問題点と解決法を提案し本論の結びとした。

Thesis Summary

Concrete structures can be constructed by either casting the concrete on-site or using pre-cast concrete. Between these, it is known that the use of pre-cast concrete ensures concrete with high performance and low variation in quality at relatively inexpensive prices. Because pre-cast concrete is manufactured in a controlled factory environment, it is unaffected by factors including quality variations during transport, technical skills related to the arrangement of reinforcing bars and compacting fresh concrete, and the ambient environmental condition such as the temperature at during curing. The idea of construction using pre-cast concrete has been applied for over 100 years. As examples, pre-cast concrete is used for residential construction by combining standardized floors, columns, and other elements, and for piles and street gutters in civil engineering facilities. Today, a switchover to pre-cast concrete in concrete structures is being promoted by the i-construction project of the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism due to labor shortages arising from retirement by experienced engineers, young people leaving the construction industry, and other factors.

For use in the field of civil engineering, pre-cast concrete must be inexpensive but match the high quality needed of JIS products. Steep rises in manufacturing costs, such as the cost of constituent materials (cement and aggregate) and the cost of fuel for steam curing have created a demand for more efficient manufacturing as a way to reduce costs. Against this background, we thoroughly investigated the systems, criteria, used materials, manufacturing processes, and states until curing was complete in the manufacture of pre-cast concrete. From the results of elucidating problems in the manufacturing process and determining points for improvement, we both optimized the steam curing profile (which accounts for around 90% of the manufacturing process) and showed that it is necessary to simultaneously satisfy two contradictory strength goals to perform efficient product manufacturing. These strengths are the following.

(A) **Concrete Strength required for design** as a manufactured product (material age at delivery of 14 days or 7 days)

(B) **Concrete Strength at cast removal** during the manufacturing and cement hardening process (material age at cast removal of 4 to 10 hours)

Simultaneously satisfying these two performance requirements in general manufacturing methods that use commercial cement material and employ a standard steam-curing profile would cause the amount of cement per unit increase to the point where it is uneconomical and lead to faults such as shrinkage and cracking, which reduce the product quality. A related problem is that admixture with fly ash is highly effective at reducing CO₂ emissions and offers excellent shrinkage properties as a cement hardening agent. Because of this, and because fly ash is a recycled material that can meet the future demands of society at the cost of delaying the

achievement of strength due to the pozzolanic reaction, the amount of cement per unit product needed to simultaneously achieve the two competing strengths increases even further, which increases the cost and decreases efficiency. There thus is demand for the development of new technology that can increase manufacturing efficiency.

In this research, I developed technology for increasing the efficiency of manufacturing of pre-cast concrete that meets existing JIS standards, employing fly ash cement as a measure for reducing environmental load and obtaining excellent shrinkage properties. This method is composed of two steps. The first step is to create the indicated composition and optimal steam curing profile to satisfy the product strength (criterion A) using fly ash cement. This confirms the basic manufacturing method. The second step, which is not performed during basic manufacturing, is to add a custom-developed fast-hardening hydration agent that improves the strength at cast removal (criterion B). These two steps provide a rational strength gain curve that satisfies both criteria. In other words, since this method focuses on the chemical properties and rationally uses the mechanism of the hydration reaction that produces the strength. There are no earlier cases of increasing the efficiency of manufacture based on optimizing the steam curing profile in this way.

I now give a brief introduction to the content of each of the chapters that make up this thesis, and describe the composition of the thesis.

Chapter 1 “**Introduction**” gives an overview explanation of the background to this research, summarizes the need for increasing the efficiency of manufacturing pre-cast concrete from a social background and the demands of the manufacturing industry, and shows the aims of this research.

Chapter 2 “**Current State of and Previous Research into Pre-Cast Concrete**” summarizes the current state of pre-cast concrete specifications and standards from the perspective of historical changes in JIS, and summarizes the system designs of various autonomous bodies with regard to elucidated problems and previous demands for environmental measures. Furthermore, the fabrication methods of pre-cast concrete and on-site cast concrete used in concrete structures are compared, and it is shown that although pre-cast concrete is superior on many metrics, such as quality and performance, the lack of The Technical Standards and The order Price calculation Standards by country are an obstacle to wider adoption.

Chapter 3 “**Technical Standards Related to Concrete Structures**” summarizes technical standards related to the design of concrete structures in terms of the law hierarchy. This confirms the required functions, the required performance, and the evaluation indicators for concrete structures, and clarifies the performance-evaluation methods and the applicable materials etc. for the design requirements of the country.

Chapter 4 “**Extraction of Problems in Improving the Manufacturing Efficiency of**

Pre-Cast Concrete” clarifies the required performance of pre-cast concrete, gives an overview of the current state of the materials that are used, the indicated composition, and also the design and manufacturing methods, and highlights the specific points for improvement to increase the efficiency of pre-cast concrete manufacturing methods. As a result, it is shown that when increasing the efficiency of manufacturing pre-cast concrete, it is essential to achieve the strength at delivery by optimizing the steam-curing profile according to the materials used, and to achieve the strength at cast removal by adding a fast-hardening hydration agent. In particular, it is shown that a combination of these two methods is essential when using fly ash as a recycled material.

Chapter 5 “**Improving the Manufacturing Efficiency Using Fast Hardening Hydration Agent in Pre-Cast Concrete**” shows the manufacturing method and various properties of a “fast-hardening hydration agent” developed specifically for ensuring the strength at cast removal, which is a required performance indicator during the manufacturing of pre-cast concrete. I show that the increased strength from the fast-hardening hydration agent is due to two effects: the filler effect, in which holes in the cement material are filled, and promotion of the hydration reaction by increasing the specific surface area. I also highlight the relation between the specific surface area and the admixture proportion, and show a method of setting a composition that contributes to increasing the strength at cast removal.

These results yield increased manufacturing efficiency of pre-cast concrete by using a fast-hardening hydration agent.

In Chapter 6 “**Improving the Manufacturing Efficiency by Optimizing the Steam Curing Profile of Fly Ash Admixed Pre-Cast Concrete**”, I perform testing of the basic properties of regular and fast-setting Portland cement and these cements with fly ash added in order to determine the cement to use and the optimal steam profile. The optimal steam-curing profile for cement with added fly ash is obtained.

The described method delivers improved manufacturing efficiency of pre-cast concrete by optimizing the steam-curing profile.

Chapter 7 “**Mechanisms for Improving the Manufacturing Efficiency of Pre-Cast Concrete**” shows a setting flow for improving the manufacturing efficiency of pre-cast concrete through a combination of the two methods: improving the manufacturing efficiency by fast hardening hydration agent as shown in Chapter 5; and optimizing the steam curing profile as shown in Chapter 6. A system for improving the manufacturing efficiency is proposed on the basis of these results.

Chapter 8 “**Conclusion**” summarizes the technology related to improving the manufacturing efficiency of pre-cast concrete as shown in this research, presents problems and proposes solutions for market expansion, and concludes this thesis.

目 次

論文要旨

図表リスト

第1章 はじめに	1
1.1 はじめに	1
1.2 研究の背景と目的	6
1.3 本論文の構成	9
第2章 プレキャストコンクリートに関する現状及び既往の研究	14
2.1 はじめに	14
2.2 プレキャストコンクリートの歴史変遷	15
2.3 プレキャストコンクリートの規格及び基準等の現状	19
2.3.1 製造規準としての JIS 規格の現状	19
2.3.2 適合基準としての設計施工基準の現状	24
2.3.3 環境対策としてのリサイクル認定制度の現状	26
2.3.4 要求性能の現状	34
2.4 プレキャストコンクリートの製造方法に関する既往の研究	36
2.4.1 製造方法に関する既往の研究	36
2.4.2 材料に関する既往の研究	38
2.5 プレキャストコンクリートの活用に関する国等の施策	39
2.5.1 国土交通省における施工合理化対策 i-construction	39
2.5.2 超高強度繊維補強コンクリートの施工	40
2.5.3 建築分野でのプレキャスト化への取り組み	40
2.5.4 秋田県におけるフライアッシュコンクリートの適用	41
2.6 まとめ	41
第3章 コンクリート構造物に関する技術基準	44
3.1 はじめに	44
3.2 設計に関する技術基準の法的位置づけ	45
3.2.1 法律階層	45
3.2.2 分野ごとの技術基準体系と位置づけ	46
3.2.3 材料設計に関する法的位置付け	51
3.2.4 日本工業規格の法的位置づけ	52
3.3 仕様規定と性能規定の違い	54
3.4 構造物設計による安全裕度の考え方	56

3.4.1 許容応力度設計法による安全裕度	57
3.4.2 限界状態設計法と部分係数による安全裕度	58
3.4.3 信頼性設計法による安全裕度	59
3.5 機能及び性能評価に関する現行基準	60
3.5.1 構造耐荷性能	61
3.5.2 物質安定性能	63
3.6 性能評価に関する指標	64
3.6.1 時代変遷と要求機能の変遷	64
3.6.2 構造抵抗性を示す指標	66
3.6.3 物質安定性を示す指標	66
3.7 まとめ	69
第4章 プレキャストコンクリートの製造効率化における課題の抽出	71
4.1 はじめに	71
4.2 プレキャストコンクリートの分類	72
4.3 プレキャストコンクリートに用いられる材料と配合計画	76
4.3.1 使用材料	76
4.3.2 示方配合	78
4.4 プレキャストコンクリートの製造方法	81
4.4.1 蒸気養生履歴と製造サイクル	81
4.4.2 打設及び締固め方法	81
4.4.3 後養生と保管	82
4.5 プレキャストコンクリートの要求性能と評価手法	83
4.5.1 物理的性能／寸法及び規格	86
4.5.2 力学的性能／強度及び曲げ耐力	87
4.5.3 耐久的性能／ひび割れ抵抗性	87
4.5.4 コスト評価／積算体系と製造コスト	92
4.6 プレキャストコンクリートの製法改善法	95
4.7 まとめ	100
第5章 プレキャストコンクリートの速硬性混和材による製造効率化	101
5.1 はじめに	101
5.2 速硬性混和材使用による製造効率化対策	101
5.3 微粉碎セメント型速硬性混和材の製造システムの構築	108
5.3.1 製造環境	108
5.3.2 製造システムの構築	109
5.3.3 製造コスト	115

5.3.4 常圧常温環境下での基本性状	116
(1)物理特性	116
(2)力学特性	133
(3)化学特性	158
5.3.5 基本性状のまとめ	174
5.4 まとめ	175
第6章 フライアッシュ混和型プレキャストコンクリートの蒸気養生履歴の最適化による製造効率化	177
6.1 はじめに	177
6.2 蒸気養生を受けるフライアッシュセメント硬化体の基本特性	178
6.2.1 試験概要	178
6.2.2 圧縮強度特性	180
6.2.3 収縮抵抗性	191
6.2.4 未燃カーボン対策	198
6.2.5 基本特性のまとめ	202
6.3 蒸気養生を受けるフライアッシュセメント硬化体の長期特性	204
6.3.1 試験概要	204
6.3.2 圧縮強度特性	208
6.3.3 硬化体の相組成	209
6.3.4 エーライト(C3S)の反応率	210
6.3.5 ビーライト(C2S)の反応率	211
6.3.6 フライアッシュ(FA)の反応率	212
6.3.7 ケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)生成量	213
6.3.8 ケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)のケイ酸鎖長の重合度	214
6.3.9 特性のまとめ	217
6.4 蒸気養生を受ける早強フライアッシュセメント硬化体の長期特性	218
6.4.1 試験概要	218
6.4.2 圧縮強度特性	221
6.4.3 硬化体の相組成	222
6.4.4 エーライト(C3S)の反応率	224
6.4.5 ビーライト(C2S)の反応率	225
6.4.6 フライアッシュ(FA)の反応率	226
6.4.7 ケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)生成量	226
6.4.8 特性のまとめ	227
6.5 まとめ	228

第7章 プレキャストコンクリートの製造効率化の構築	230
7.1 はじめに	230
7.2 プレキャストコンクリート製造システムの提案	232
7.2.1 プレキャストコンクリートの新製造システム	232
(1)設備の増設	232
(2)配合設計	232
7.2.2 コスト縮減効果	236
7.3 品質管理	238
7.3.1 目視検査	238
7.3.2 反発硬度法による品質管理	238
7.3.3 実蒸気養生装置による実証確認	241
7.4 まとめ	243
第8章 結論	244

謝辞

図表リスト

第 1 章	はじめに	1～13 頁
図 1.1.1	コンクリート販売量の変遷	2
表 1.1.1	プレキャストコンクリート市場へのニーズ	4
図 1.1.2	プレキャストコンクリートの蒸気養生履歴の規定	4
表 1.1.2	プレキャストコンクリートの現場打コンクリート に対する技術的優位性	5
表 1.2.1	プレキャストコンクリートの製造上のクリティカルポ イント	7
図 1.2.1	蒸気養生したプレキャストコンクリートの強度発現	7
図 1.2.2	本研究の対象とするプレキャストコンクリート	8
図 1.3.1	本論文の構成	12
第 2 章	プレキャストコンクリートに関する現状及び既往の研究	14～43 頁
表 2.2.1	土木・建築分野でのプレキャストコンクリートの規 格・基準	16
表 2.2.2	土木分野におけるプレキャストコンクリートと現場打 ちコンクリートの違い	17
図 2.2.1	プレキャストコンクリートと現場打ちコンクリートの 工事工程の違い	18
図 2.2.2	コンクリート販売量の変遷	18
図 2.3.1	JIS 認証の法的位置づけ	21
表 2.3.1	主なプレキャストコンクリートに関する基準・規格の 制定	22
表 2.3.2	プレキャストコンクリートの JIS 規格の変遷	23
表 2.3.3	現場打設コンクリート及びプレキャストコンクリート の現行の技術基準	25
表 2.3.4	各自治体のプレキャストコンクリートに関するリサイ クル認定制度と適用原材料	30
表 2.3.5	セメント材料によるグリーンマネージメント	28
表 2.3.6	混和材としてのフライアッシュの特長	29
図 2.3.2	社会的便益性を考慮した要求性能の概念	34
図 2.3.3	社会基盤施設における要求性能の概念	35
図 2.3.4	性能照査の手段	35
表 2.4.1	JIS プレキャストコンクリートの蒸気養生パターン の歴史的分類	36

図 2.4.1	蒸気養生と標準養生における材齢 28 日強度 (セメント協会)	38
表 2.5.1	土木学会コンクリートライブラリー148 からの提案	39
第 3 章 コンクリート構造物に関する技術基準		44～70 頁
図 3.2.1	法制度の階層と橋、道路等の技術基準の例	46
表 3.2.1	規制行政の法体系とコンクリート構造物等の設計に関する技術基準の位置づけ	48
表 3.2.2	建築基準法での建築材料規定について	53
図 3.2.2	JIS 規格の制度上の問題点	54
図 3.3.1	国内の設計基準の変遷	56
図 3.4.1	構造物設計における不確実性の大きさ	57
図 3.4.2	許容応力度法による安全性照査の考え方	58
図 3.4.3	限界状態設計法による安全性照査の考え方	58
図 3.4.4	部分係数と安全裕度	59
図 3.4.5	構造物設計における安全裕度	59
表 3.5.1	国土交通省が掲げる土木・建築に係る設計の基本	60
表 3.5.2	道路法における橋、高架等に関する技術上の基準に関する規定	62
図 3.6.1	社会的便益性を考慮した要求性能の変遷	66
図 3.6.2	コンクリート構造物の状態変化	67
図 3.6.3	concrete pathologies 分類と劣化進展	68
図 3.6.4	コンクリート構造物の性能評価システムの事象及び評価指標の関係性	69
表 3.6.1	構造性能に及ぼす材料変化の影響評価	69
第 4 章 プレキャストコンクリートの製造効率化における課題の抽出		71～100 頁
図 4.1.1	一般的なプレキャストコンクリート工場の工程	71
表 4.2.1	平成 16 年に行われたプレキャストコンクリートの分類変更	73-75
図 4.3.1	離型剤後のノロ付着例	77
図 4.3.2	プレキャストコンクリートの配筋例	78
表 4.3.1	試験練配合	79
図 4.3.3	普通セメント使用による強度発現	79
図 4.3.4	早強セメント使用による強度発現	79
表 4.3.2	単位セメント量の差による製造単価	80

図 4.3.5	普通セメントと早強セメントの同一強度発現	80
図 4.3.6	単位水量の違いによる強度発現	81
表 4.4.1	プレキャストコンクリートの養生方法	81
表 4.4.2	プレキャストコンクリートの打設と締固め方法の分類	82
表 4.5.1	現行基準におけるプレキャストコンクリートの要求性能と評価指標	84
表 4.5.2	プレキャストコンクリートの性能評価指標	85
表 4.5.3	JIS プレキャストコンクリート製品 (I 種) の性能評価指標と評価値	88
図 4.5.1	土木工事積算体系	92
図 4.5.2	プレキャストコンクリートの費目別製造原価	93
表 4.5.4	プレキャストコンクリートの製造費目と製造改善対象費目	94
図 4.6.1	プレキャストコンクリートの一般的製造プロセス	95
図 4.6.2	プレキャストコンクリートの製造工程時間割	95
図 4.6.3	プレキャストコンクリートの強度発現性能とクリティカルポイントの関係	97
表 4.6.1	プレキャストコンクリートの製造上のクリティカルポイント	98
表 4.6.2	脱型時強度発現性を求める手段	99
第 5 章 プレキャストコンクリートの速硬性混和材による製造効率化		101~176 頁
図 5.2.1	セメントの粒度分布と累積粒度分布	102
図 5.2.2	ボールミルによるセメント粉砕工程 (仕上げ工程)	104
表 5.2.1	乾式セメント粉砕装置とその特徴	105
図 5.2.3	各種粉砕装置によるセメントの粒度分布	105
表 5.2.2	各種粉砕装置によるセメント粉砕能力一覧	106
図 5.2.4	異なる工場のセメントの水和発熱量の違い	107
表 5.2.3	セメント粉砕装置の性能比較	108
表 5.3.1	本粉砕システムでのセメント粉砕環境	109
図 5.3.1	4 つの基本装置	109
図 5.3.2	微粉砕セメント型速硬性混和材の実用型製造装置	110
図 5.3.3	コンプレッサーと圧力空気タンク	111
図 5.3.4	圧力制御弁	111
図 5.3.5	送風ホース (φ 7mm)	111
図 5.3.6	湿気除去装置本体と配管用湿気除去装置	112

図 5.3.7	湿り空気 $h \sim x$ 線図 (空気調和・衛生工学会)	112
図 5.3.8	セメント粉砕装置と粉砕イメージ	113
表 5.3.2	粉砕パスとセメント比表面積の関係	113
図 5.3.9	試験用粉砕装置の全景	114
図 5.3.10	圧力空気タンク	114
図 5.3.11	粉砕メイン装置	114
図 5.3.12	粉砕セメントの収集部	114
図 5.3.13	湿気除去装置	114
表 5.3.3	中国青島工場での微粉砕セメント製造コスト	115
表 5.3.4	日本秋田(大館)工場での微粉砕セメント製造コスト試算結果	116
表 5.3.5	微粉砕セメントの粒度特性	117
図 5.3.14	微粉砕セメントの粒度分布	117
図 5.3.15	中心粒径 D_{50} と比表面積の関係	118
図 5.3.16	普通ポルトランドセメント(OPC/C)の SEM 像	119
図 5.3.17	比表面積 $10,000(\text{cm}^2/\text{g})$ 微粉砕セメント FG10/C の SEM 像	120
図 5.3.18	FG10/C の内、 $3 \mu\text{m}$ 以下の微粉砕セメント (FG10E/C) の SEM 像	121
図 5.3.19	コンクリートの理想的最密粒度分布	122
図 5.3.20	混合粉体の充填率の測定	123
表 5.3.6	最密充填試験に用いた材料とその諸元	124
表 5.3.7	最密充填試験の配合組合せ	124
表 5.3.8	プレキャストコンクリート製造に用いられている実機配合の粉体量	125
図 5.3.21	粉体投入量と粉体沈降体積の関係	127
図 5.3.22	微粉砕セメントを置換した場合の微粒度分布	128
図 5.3.23	普通セメントに各種粉体を置換した場合の空隙率	130
図 5.3.24	換算比表面積と空隙率の関係	130
表 5.3.9	微粉砕セメントの物理特性のまとめ	132
表 5.3.10	使用材料	133
表 5.3.11	ペースト実験の配合及び組合せ	133
表 5.3.12	普通セメントを用いたペースト実験の配合組合せ	134
表 5.3.13	早強セメントを用いたペースト実験の配合組合せ	135
表 5.3.14	フライアッシュ置換普通セメントを用いたペースト実験の配合組合せ	136
表 5.3.15	フライアッシュ置換早強セメントを用いたペースト実験の配合組合せ	137

	ト実験の配合組合せ	
図 5.3.25	ペースト実験のフロー	138
図 5.3.26	普通セメントに微粉砕セメントを置換したペースト強度	140
図 5.3.27	早強セメントに微粉砕セメントを置換したペースト強度	141
図 5.3.28	FAセメントに微粉砕セメントを置換したペースト強度	141
図 5.3.29	早強FAセメントに微粉砕セメントを置換したペースト強度	142
表 5.3.16	ペースト配合	143
表 5.3.17	使用材料の比表面積	143
図 5.3.30	材齢1日圧縮強度	145
図 5.3.31	材齢3日圧縮強度	145
図 5.3.32	材齢7日圧縮強度	146
図 5.3.33	材齢28日圧縮強度	146
図 5.3.34	微粉砕セメント(FG10)のフィラー効果と水和活性効果	147
図 5.3.35	微粉砕セメント(FG7)のフィラー効果と水和活性効果	147
図 5.3.36	微粉砕セメント(FG5)のフィラー効果と水和活性効果	147
図 5.3.37	微粉砕セメント(FG10)の材齢毎の強度増加	148
図 5.3.38	微粉砕セメント(FG7)の材齢毎の強度増加	148
図 5.3.39	微粉砕セメント(FG5)の材齢毎の強度増加	148
表 5.3.18	使用材料	149
表 5.3.19	配合組合せ	149
図 5.3.40	普通セメントと微粉砕セメントの材齢1日圧縮強度	149
図 5.3.41	長さ変化試験	150
図 5.3.42	微粉砕セメント(FG5)置換による長さ変化	152
図 5.3.43	微粉砕セメント(FG7)置換による長さ変化	152
図 5.3.44	微粉砕セメント(FG10)置換による長さ変化	152
図 5.3.45	微粉砕セメント(FG5)置換によるペーストの水分逸散特性	154
図 5.3.46	微粉砕セメント(FG7)置換によるペーストの水分逸散特性	154
図 5.3.47	微粉砕セメント(FG10)置換によるペーストの水分逸散特性	154
表 5.3.20	断熱供試体の配合	155

図 5.3.48	熱伝導率計測用供試体	155
図 5.3.49	熱伝導率と密度の関係	156
表 5.3.21	力学特性のまとめ	157
表 5.3.22	ポルトランドセメント及び微粉砕セメントの化学組成	158
表 5.3.23	ボグ式による鉱物組成分析結果	159
図 5.3.50	粉砕レベルの違いによる鉱物組成	160
図 5.3.51	各水準の微粉末セメントの粉末 X 線回折	161
表 5.3.24	回折装置と測定条件	163
図 5.3.52	バナジウム製容器と粉末中性子回折試料	163
図 5.3.53	微粉砕セメント(FG10)の粉末中性子回折チャート	163
図 5.3.54	Si バックグラウンド成分分析	164
図 5.3.55	微粉砕セメント(FG10)の粉末 X 線回折チャート	164
表 5.3.25	中性子回折における各相の R-factor	164
表 5.3.26	微粉砕セメント(FG10)の中性子回折における R-factor	165
表 5.3.27	リートベルト解析結果と同定に用いた各相の結晶系	166
図 5.3.56	日本原子力研究開発機構 JRR-3 にある粉末中性子回折装置	166
表 5.3.28	コンダクションカロリメーターで測定した試料の配合条件	167
図 5.3.57	微粉砕セメント(FG5)置換による水和発熱速度	168
図 5.3.58	微粉砕セメント(FG7)置換による水和発熱速度	168
図 5.3.59	微粉砕セメント(FG10)置換による水和発熱速度	168
図 5.3.60	微粉砕セメントの水和発熱特性	169
表 5.3.29	微粉砕セメントペースト置換の凝結時間	170
図 5.3.61	蒸気養生履歴とセメント凝結時間	170
表 5.3.30	TMS 試料の諸元	171
図 5.3.62	TMS 法による鎖長分布	172
表 5.3.31	カルシウムイオン濃度	173
表 5.3.32	化学特性のまとめ	173

第 6 章 フライアッシュ混和型プレキャストコンクリートの蒸気養生履歴の最適化による製造効率化 177～229 頁

表 6.2.1	使用材料	179
表 6.2.2	モルタル配合	179
表 6.2.3	材齢 1 日までの蒸気養生履歴パターン	180
図 6.2.1	代表的な蒸気養生パターン図	180
図 6.2.2	蒸気養生装置	180

図 6.2.3	前置時間の影響	183
図 6.2.4	前置時間と降温速度の影響	183
図 6.2.5	前置時間と昇温速度の影響	184
図 6.2.6	前置時間と昇温・降温速度の影響	184
図 6.2.7	前置時間と最高温度継続時間の影響	184
図 6.2.8	前置時間と最高温度継続時間、降温速度の影響	185
図 6.2.9	前置時間と昇温速度の影響(短最高温度)	185
図 6.2.10	前置時間と昇温速度の影響(短最高温度、昇温なし)	185
図 6.2.11	標準蒸気養生に対する圧縮強度増加比	186
図 6.2.12	各材齢の圧縮強度増加比	187
図 6.2.13	蒸気積算温度と圧縮強度の関係	187
図 6.2.14	積算温度と圧縮強度の関係	188
図 6.2.15	封緘養生に対する蒸気養生の強度比	189
図 6.2.16	普通セメントの強度発現	190
図 6.2.17	フライアッシュセメントの強度発現	190
表 6.2.4	使用材料	192
表 6.2.5	モルタル配合	192
表 6.2.6	蒸気養生パターン	192
図 6.2.18	インバール鋼リング試験機と寸法	193
図 6.2.19	供試体下部のテフロンシートと拘束体	193
図 6.2.20	モルタル硬化状況	193
図 6.2.21	外リング脱型状況	193
図 6.2.22	常温環境下でのひずみ	196
図 6.2.23	常温環境下でのひずみ(若材齢)	196
図 6.2.24	標準蒸気養生下でのひずみ	196
図 6.2.25	常温環境下での最大引張応力	197
図 6.2.26	標準蒸気養生下での最大引張応力	197
図 6.2.27	発泡型 AE 減水剤	198
図 6.2.28	ロットが異なるフライアッシュ	199
図 6.2.29	フライアッシュの SEM 写真	199
表 6.2.7	使用材料	199
表 6.2.8	コンクリート配合	199
図 6.2.30	蒸気養生履歴	200
図 6.2.31	圧縮強度試験結果	201
図 6.2.32	相対動弾性係数の変化	201
図 6.2.33	蒸気養生履歴と細孔径分布	202
表 6.3.1	使用材料	204

表 6.3.2	モルタル配合	204
図 6.3.1	蒸気養生履歴パターン	205
表 6.3.3	材齢 1 日までの蒸気養生履歴パターン	205
図 6.3.2	圧縮強度への影響	209
図 6.3.3	XRD パターン	210
図 6.3.4	エーライト(C3S)反応率の影響	211
図 6.3.5	ビーライト(C2S)反応率の影響	212
図 6.3.6	フライアッシュ(FA)反応率の影響	213
図 6.3.7	ケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)生成量の影響	214
図 6.3.8	ケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)のケイ酸鎖長の重合度の影響	215
図 6.3.9	C-S-H 生成量	216
図 6.3.10	圧縮強度と C-S-H 生成量及び重合度の関係	216
図 6.3.11	C-S-H 生成量と C-S-H 平均重合度との関係	216
表 6.4.1	使用材料	218
表 6.4.2	モルタル配合	218
図 6.4.1	蒸気養生履歴パターン	219
表 6.4.3	材齢 1 日までの蒸気養生履歴パターン	219
図 6.4.2	圧縮強度試験結果	222
図 6.4.3	相組成	223
図 6.4.4	XRD パターン	223
図 6.4.5	エーライト(C3S)反応率	224
図 6.4.6	ビーライト(C2S)反応率	225
図 6.4.7	フライアッシュ(FA)反応率	226
図 6.4.8	ケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)生成量	227
第 7 章	プレキャストコンクリートの製造効率化の構築	230～243 頁
表 7.1.1	プレキャストコンクリートの製造上のクリティカルポイント	231
図 7.1.1	蒸気養生したプレキャストコンクリートの強度発現	231
図 7.2.1	プレキャストコンクリートのコンクリート製造設備図	232
表 7.2.1	プレキャストコンクリートの要求性能の設定項目	233
表 7.2.2	微粉碎セメント型速硬性混和材の仕様	233
図 7.2.3	配合設計法	234
図 7.2.2	本研究によるプレキャストコンクリートの製	235

	造効率化フロー	
表 7.2.3	ボックスカルバートの積算単価	236
図 7.2.4	L型擁壁のコスト比較	237
図 7.2.5	ボックスカルバートのコスト比較	237
図 7.3.1	プレキャストコンクリートの不具合例	238
図 7.3.2	脱型及び及び吊上げ	239
図 7.3.3	試験配合	239
図 7.3.4	供試体と養生	239
図 7.3.5	反発法の打点マーカ	239
図 7.3.6	シリンダー圧縮試験	239
図 7.3.7	シュミットハンマー試験	240
図 7.3.8	若材齢時コンクリートの反発度～強度関係	240
表 7.3.1	使用材料	241
表 7.3.2	モルタル配合	241
表 7.3.3	蒸気養生パターン	241
表 7.3.4	標準蒸気パターンでの強度発現結果	242
図 7.3.9	類似製造機器による速硬性混和材 1 %置換による強度改善効果	243
第 8 章	結論	244～249 頁
図 8	本論文の構成	249

第1章 はじめに

1.1 はじめに

今から遡ること100年前の大正時代初期、第一次世界大戦の戦禍で荒廃したフランドル地方の田園都市復興計画のひとつとして「メゾン・ドミノ」と呼ばれる集合住宅のユニット空間構法が提案されている。ル・コルビュジェは、部品の大量生産を前提とした床・柱等に分解し、それぞれを規格化された鉄筋コンクリートのパーツとして工場で製造する画期的な建築システムを構築した。このシステムにより大量の住宅を安く短期間に建てることを可能にした。このシステムこそが、現代社会のプレキャストコンクリートそののもであり、ル・コルビュジェはその原点ともいえる建築家である。その後、ル・コルビュジェは、マルセイユのユニテ・ダビタシオンにプレファブ化した棚状の構造体を採用し建築の工業化と規格化を実現した。また、門下生である前川國男は、そのシステムを国内の晴海高層アパートに採用し、合理化及び工場化並びに工事費削減を実現しユニテの発想を受け継ぎ発展させた。一方、土木分野では、明治時代後半にオーストラリアからヒューム管が導入され、高度成長へと発展する過程で土木部材でのコンクリートの製品化が必要となり昭和25(1950)年からJIS制定が精力的に進められた。当時は、まだ国内の建設技術に乏しい時代であり国による直営直轄方式が主流を占めていたが工事請負へと変わりつつある時代変遷に伴いコンクリートのJIS製品化が必要に迫られた時代であった。

現代の社会基盤施設の建設に用いられる材料の多くはセメント及びコンクリートである。これらの構成材料で構築されるコンクリート構造物は、様々な現場で求められる形状に対応可能で構造性能や耐久性などの要求される性能を満足できる特徴を有している。この特徴が、多様性が求められる今日の成熟社会で有効で比較的安価な材料として多量のコンクリート構造物を作りだしてきた。セメントの生産量は、高度成長時代から社会の右肩上がり成長に比例して増加し1990年代初頭にピークを迎え80,000千万トンを超える販売量に達したが、その後のバブル崩壊と社会の成熟とともに社会基盤施設は新規建設から維持管理時代に突入し、毎年使用量が減少し平成22(2010)年にはピーク時の約半分の約40,000千万トンまで落ち込んだ[1.1] (図1.1.1参照)。その後、平成23(2011)年に発生した東日本大震災により国の国土強靱化計画[1.2]が始まり、さらに、平成28(2016)年熊本地震もあり益々国土強靱化計画が強化される事態となっている。これにより、再び建設予算が向上し、それに応じてセメント使用量も増加している。コンクリート構造物は、コンクリートの製造方法により、レディーミックスコンクリート(以下「生コン」という。)を用いた「現場打ちコンクリート」と「プレキャストコンクリート」の2つに大きく分類される。前者は、生コンプラントで製造され建設現場に運搬され打設されるコンクリートである。

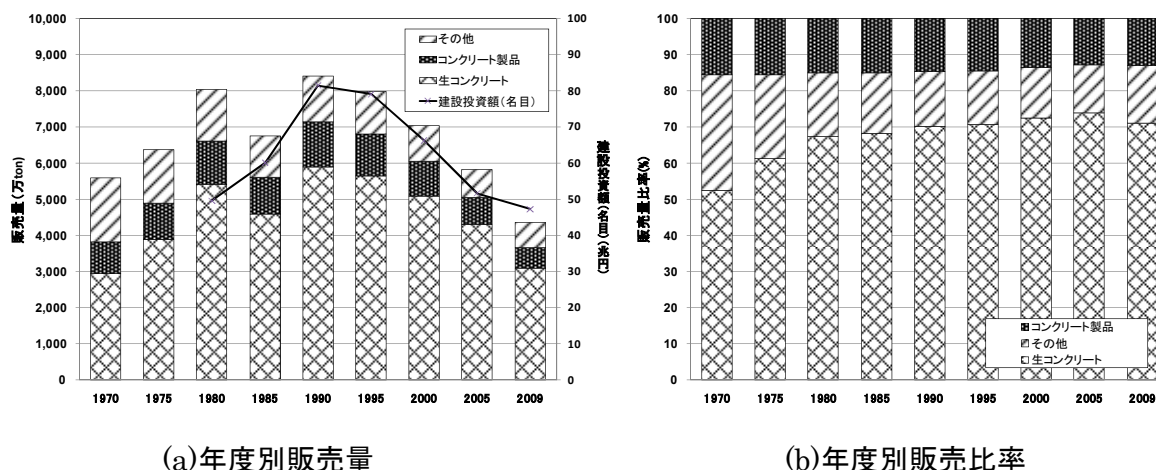


図 1.1.1 コンクリート販売量の変遷[1.1,1.2]

したがって、コンクリートの性能は運搬による品質変動や打設後の環境雰囲気に影響を受けるが、現場で多様な施工形態に対応できる非常に優れたコンクリートである。一方、後者は、生コンの製造までは同一であるが、主に工場内で型枠を設置してコンクリートを打設し蒸気養生を施して製品化したコンクリートである。したがって、工場ラインで製造するため品質管理が容易で現場環境に応じた熟練した高度な技術者を必要とせず多量廉価に製造することが可能なコンクリートである。しかし、コンクリート形状・寸法が規定された規格製品の製造が一般的であるため多彩な形状や変化寸法など現場状況に合わせたコンクリート構造物を製造することは型枠製作などのコスト増等により対応が難しい。これら現場打ちコンクリート及びプレキャストコンクリートは、それぞれ長所と短所を有しているため適材適所に採用することで建設の効率化や品質向上など社会の多様性に対応することができると考えられる。

現在の建設分野では、熟練技術者の退職や少子化問題等に伴い建設従事者が減少し、コンクリートに求められる高品質及び多様なコンクリートの建設が困難になりつつあり、プレキャストコンクリートの採用が一つの解決策として脚光を浴びており、国土交通省では「i-construction プロジェクト」を立ち上げ、施工効率化を進めているところである。

日本国内でのコンクリートの製造方法の市場を見ると、生コン打設が約 85%、プレキャストコンクリートが約 15%であるが、プレキャストコンクリートの占有率は年々減少の一途をたどっている（図 1.1.1 参照）。この理由は、現場での多様性に対応できる利点を有している生コンが有利であることは当然であるが、それ以外にプレキャストコンクリートを構造設計する基準が整備されていないこと、さらにプレキャストコンクリートの積算体系が施工性（短い工期など）の優位性の実勢を反映していないためコスト高となり、計画及び設計段階でのプレキャストコンクリートの採用や施工段階での設計変更が認められ難い点がプレキャストコンクリートの市場占有が低い理由と考えら

れる。また、生コンを使用する場合、建設現場での打設であることから運搬・圧送や環境雰囲気に対する養生過程での品質管理を厳しくする必要から現場技術者に対するコンクリート技士・主任技士の育成教育・技術指導を行うなど積極的な技術力向上を行っていることも生コンへの信頼が高く、その結果市場占有が高く保持されていると思われる。一方、プレキャストコンクリート会社は相対的に零細企業が多いこともあるが、規格鋼製型枠に打設すれば形状が満足できる、さらに出荷時の圧縮強度を満足すれば JIS 製品であるという見なし規定が、一見すると技術力が必要ないという間違った認識を生みだしそれに伴い技術開発や技術者育成を怠ってきた経緯がありコンクリート技士・主任技士が少なく、これら経営者の技術軽視が生コンとの技術格差として現れ市場を減らしていることも市場占有が低い原因の1つと考えられる。

本来土木分野での投資は、「社会のため、市民(civil)のため」の道路や橋の建設投資であるが、時代変遷の中で成熟社会では過剰な箱物建設へと変遷した経緯も一部存在する。こうした背景に対応するため建設業界でも生活寄与や環境対策、さらにコスト縮減など精力的に取り入れられているところであるが、時に社会基盤整備は「コンクリートから人へ(2009)」「コンクリートから人へ、再び(2017)」とあたかもコンクリートが悪の根源のように例えられ、本来は「施設などの物への投資より人・福祉への投資」とすべきスローガンが政争になるなど、建設投資に対する国民の理解は進んでいない部分もある。こうした背景もありプレキャストコンクリート分野においては、製品出荷額が平成 20 年末で 50%減（平成 9 年比較）まで落ち込み、表 1.1.1 に示す生き残りのためにさまざまな構造改革が講じられてきたが、蒸気養生に用いる燃料やセメント材料費の高騰などが追い打ちをかけて、コスト縮減に対する方策が遅れを取り、瀕死の状態まで追い込まれている状況である。こうした中、本研究テーマである「製造サイクルの効率化」は、直接製品コストの削減ができる唯一の手段であり生き残りのために残された最後の手段として起死回生を狙っている方策であると言われている。しかしプレキャストコンクリートは JIS 製品であることが基本であることから、まずプレキャストコンクリート会社は JIS 製品工場認証を取得することが求められている。この制度は、材料の品質や製造方法さらに品質管理方法等を JISQ1012[1.3]の規定に満足しているかどうかを認証する制度で、これらの各種規定は性能規定型となっておりプレキャストコンクリート製造会社が自社の状況に合わせて設定することができる規定であるが、先にも述べたが、技術軽視や実際に技術力不足なため、性能規定化に必要なデータの蓄積や新たな開発力も不足しており、従来から実績ある製造に関する仕様（具体的には、蒸気養生履歴）を提示して JIS 認証を取得する状況にある。特に、製造過程の効率化に大きく影響する、前置時間、昇温速度、最高温度などの蒸気養生履歴の仕様は性能に直接影響することから使用する材料や性能に応じ厳密に規定しなければならない（図 1.1.2 参照）が、単一的な蒸気養生履歴の採用に留まっている現状である。

表 1.1.1 プレキャストコンクリート市場へのニーズ

ニーズ	プレキャストコンクリート製造メーカーの現状	工事現場の要求
コスト縮減	<ol style="list-style-type: none"> 1. 材料費の高騰 (外部要因) <ul style="list-style-type: none"> ・セメント価格、燃料費の高騰 ・高品質骨材の枯渇 ・化学混和剤の高級化、多量化 2. 販売価格の低下 (外部要因) <ul style="list-style-type: none"> ・物価版、過当競争、(元請) 低入札 3. 製造サイクルの効率化 <ul style="list-style-type: none"> ・型枠、仮置き場、蒸気(温度)履歴 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 工期短縮 <ul style="list-style-type: none"> ・直接経費の削減(施工時間の短縮) ・間接経費の削減(養生期間の削減) 2. 品質管理の簡素化 <ul style="list-style-type: none"> ・初期欠陥補修の削減 3. 低コスト製品の採用
環境対策 品質向上 制度	<ol style="list-style-type: none"> 1. 環境対応型の要求(発注者から) <ul style="list-style-type: none"> ・リサイクル認定制度 ・グリーン調達制度 2. 技術力の低下(技術移転なし) <ul style="list-style-type: none"> ・熟練技術者の退職、若年層の離職 ・経営者の技術軽視 3. JISによる弊害(外部要因) <ul style="list-style-type: none"> ・多様化への対応(技術基準の仕様規定) ・積算体系の未整備 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 環境対応型の社会からの要求 <ul style="list-style-type: none"> ・CO2削減など 2. 高性能化、高品質化の要求 <ul style="list-style-type: none"> ・収縮量の低減、ひび割れ発生減 ・高強度化、軽量化

一方、土木学会コンクリート標準示方書「施工編／工場製品」の条項に出荷時強度の材令を14日にする規定[1.4]や蒸気養生履歴の仕様が参考に示されるなど、未だ製造方法に関する仕様規定が存在していることから、製造効率化及び性能に関する研究がほとんど進んでいない現状もある。特に、近年の環境負荷削減によるCO₂排出のため、コンクリート混和材としてリサイクル材の採用が求められる社会状況のなか、多種多様な材料に応じた蒸気養生履歴等の製造法が求められるが、これらの研究もほとんど存在しない状況にある。表1.1.2はプレキャストコンクリートの優位性を整理したもので、プレキャストコンクリートには多くの優位性が存在するにも係らず制度設計の不備により採用の機会が狭められており、現行制度化では蒸気養生履歴の最適化は重要な課題であることが明確である。

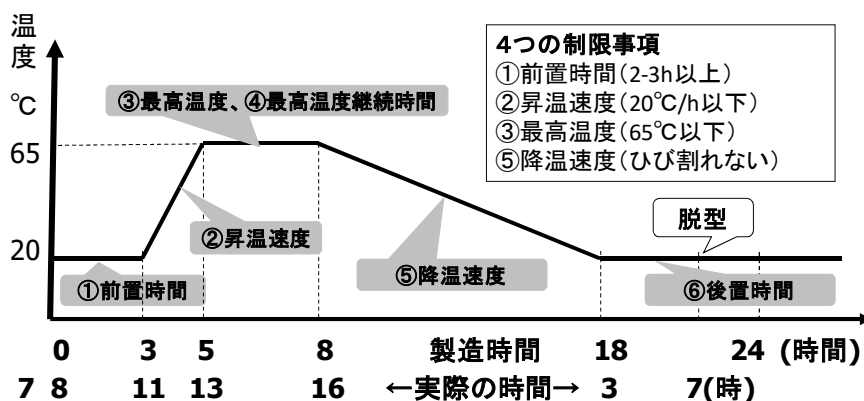


図 1.1.2 プレキャストコンクリートの蒸気養生履歴の規定[1.4]

表 1.1.2 プレキャストコンクリートの現場打コンクリートに対する技術的優位性

項目		プレキャストコンクリートの優位性 (→現場打コンクリートの状態)
優位性	品質 (製品ばらつき)	管理された工場ラインで製造することから製品の品質ばらつきが小さい →生コン車ごとに材料の変化がある。外部環境や運搬等により品質変動が生じる。
	人材育成 (技術力の確保)	管理された工場ラインで打設～締固めの一連を行うことから、ルーティン作業となり限定された技術育成で対応可能 →部位の大きさや配筋、流動性の違いなど現場ごとに締固めに高度な技術が求められる
	外部環境変化 (打設～養生)	管理された工場内で製造することから、外部環境の影響を受けない →気温・湿度・風等の自然現象の変化により養生の管理方法が異なる。さらに養生期間が28日間と長期に渡り対応が必要。
	工期 (施工時)	製品の組立であるので短い (交通遮断期間が少ない) →配筋・型枠・打設と現場で行うことで工期が長くなる。また、リフト割り、ブロック打設となること、養生期間が長い
対応により優劣が変わる	性能 (強度・耐久性等)	性能は、蒸気養生履歴で決まる (JIS 製品では、蒸気養生履歴を仕様規定として一律に規定してきた経緯がある。) が、近年のセメント及び混和材の多様化に対して最適な蒸気養生履歴の構築が行われていない。 →生コンの配合計画により性能が発揮できるとする見なし規定を採用 (配合計画では、材料や配合、締固め等による性能の変化等について十分に検討されている)
	コスト	製造の効率化が課題。積算基準の整備が必要 (短工期等が考慮されるコスト高となっている。) →実態にあった積算体系が構築出来ている。
劣位性	○技術基準	JIS 製品であることから設計に関する技術基準がないため、設計段階から計画に入らない又は施工段階の設計変更も難しい (構造物への適用が出来ない) →国等の技術基準が構造物ごとに整備されている。
	○積算基準	設計及び工事に関する積算基準がないことから、短工期にも係らず反映されない (PCa の工期が短い等の優位性が反映されていない) →実態にあった積算体系が構築されている。

注) ○：制度設計に関する項目

そこで、本研究は、社会のニーズからコスト削減を念頭におきつつ「プレキャストコンクリートの製造効率化のシステム構築」を目指したものである。その手法は現在の環境政策を考慮しリサイクル材のうち、フライアッシュを混和するとともに、製造サイクルの効率化に最も影響を及ぼす蒸気養生履歴の最適化を行うもので、製造効率化に不可欠な脱型時強度の制御を行うために「微粉碎セメント型速硬性混和材」を開発し、これらの組合せを行うことで、コストパフォーマンスに長けた「プレキャストコンクリートの効率的製造システムの構築」を実現したことが、本研究のオリジナルティーである。なお、プレキャストコンクリートの蒸気養生履歴の最適化に着目した先行事例は存在しない。

1.2 研究の背景と目的

プレキャストコンクリートは、工場で製造するため短期間に高品質かつ多量廉価なコンクリートとして扱われている。このプレキャストコンクリートのメリットを生かして擁壁や積みブロックさらに側溝などさまざまなプレキャストコンクリートが製品ごとに JIS 規格化されてきた。しかし、社会規模の縮小に伴う社会基盤整備費の削減によりプレキャストコンクリートの出荷もピーク時の 50%まで減少してきた。そして現在の市場原理から製品コストの縮減がさらに求められる状況にあるが、製造に用いる良質な骨材の枯渇、セメント材料や蒸気養生に用いる燃料費などの高騰により益々厳しい環境下に曝されている。こうした現状を踏まえて設備の効率化から人員削減まであらゆる手段を講じてプレキャストコンクリート製造におけるコスト縮減策が行われた結果、現在では策は底を尽きもはや本丸である製造サイクルを効率化する方法しか残されていない状況である。しかし、本丸である製造サイクルの効率化は、プレキャストコンクリートを JIS 認定するための JIS 製品工場の認証制度 JISQ1012[1.3]が障壁となり難しい現状にある。この認証制度は JISQ1012 に規定されたすべての項目を満足することで、JIS 製品工場の認証が取得できる構図であるが、審査の内容は性能規定型で求めているにもかかわらず実施計画書では仕様を明確に記載する必要があり、特に、蒸気養生履歴に関して履歴を提示した場合、認証取得後、技術開発や新たなリサイクル材料の使用など技術革新が出来た場合でも認証の再取得が求められている。また、入荷状況により異なる骨材や混和材の性能が変化した場合は品質確保の視点で、本来、製造方法等の修正が必要であるが、JIS 認証で履歴を明示した場合は、履歴の変更が出来ない。一方、性能規定化での性能提示の場合は、その性能の妥当性等を示すことになる。また、性能規定化では、性能照査法を示す技術基準が必要であるが、この技術基準が整備されていないことも、対応等の技術開発が進まない要因と考えられる。このためプレキャストコンクリート会社のモチベーションを下げる一因となっており、製造サイクルの効率化は、本格的な性能規定型体系への移行または JISQ1012 に抵触しない手法の開発が求められている状況である。

プレキャストコンクリートの要求性能は、プレキャストコンクリート JIS[1.5,1.6]やコンクリート標準示方書[1.4]では出荷時(一般には材齢 14 日)において「製品の設計基準強度を満足していること」と規定されているが、これは出来型としての構造上の要求性能であって、実際のプレキャストコンクリートの製造では、型枠からの脱型時間の長短が製造サイクルの効率化に大きく寄与し製品原価に直接影響を及ぼすため早期脱型(一般には材齢 4 時間程度から 1 日以下)が求められている。プレキャストコンクリートの出荷時強度を得るためのコンクリート配合では、図 1.2.1 に示すように管理材齢 14 日に経済的に満足する強度発現となるが、この強度発現では脱型時に必要なコンクリート強度が得られないため、出荷時強度よりも脱型時強度を得るためのコンクリート配合が必要となってくる。なお、脱型時強度を満足させる配合では、出荷時強度が設計基準

強度に対して大幅に向上することから、会計検査において過剰強度と認定されることになることから、注意が必要である。このようにプレキャストコンクリートは、示方書等で求める要求性能と製造上での要求が存在し、この2つのクリティカルポイントを満足することが必要となってくる。したがって、脱型強度は一般の現場打ちコンクリートでの脱型強度問題とは比べ物にならないくらい重大な問題である。こうした背景からプレキャストコンクリートの特徴である製造過程を考慮した性能は表 1.2.1 に示すように2つのクリティカルポイントを満足する必要性があり、したがって、プレキャストコンクリートの最適配合は、「脱型強度を満足しかつ出荷時の目標強度に漸近する強度発現曲線が得られる経済的配合」であると考えられる。その結果「製造サイクルの効率化=プレキャストコンクリートのコスト削減」が可能となりプレキャストコンクリート市場の再起ができると考えられる。しかし、図 1.2.1 に示す最適強度発現が得られる配合は、現在の市販のセメント材料では実現出来ないため、新たな材料の開発が必要であった。

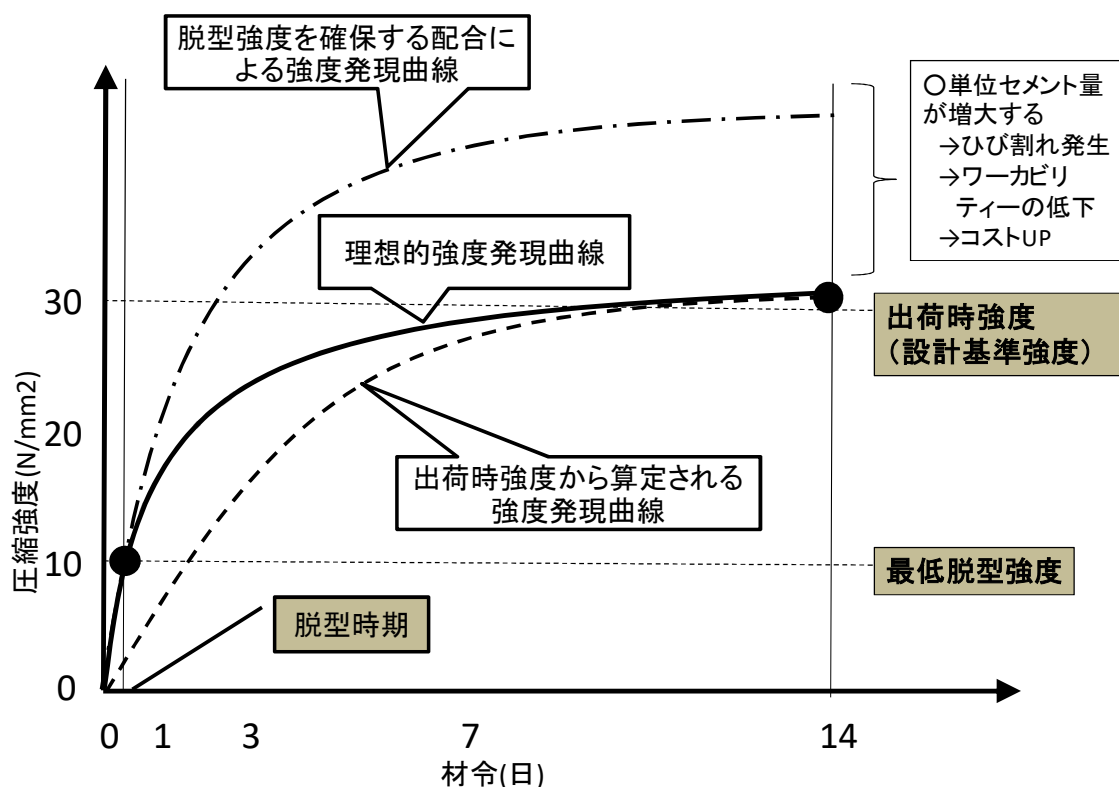


図 1.2.1 蒸気養生したプレキャストコンクリートの強度発現

表 1.2.1 プレキャストコンクリートの製造上のクリティカルポイント

クリティカルポイント	管理材令	評価指標及び管理値	要求性能	
①出荷時強度	製品性能	14日または7日	設計基準強度を満足する	使用性、耐久性
②脱型時強度	製造管理上の性能	4~10時間の間	圧縮強度 10・15N/mm ²	吊上げ、欠け

そこで、本研究の目的は、「脱型強度を満足しかつ出荷時の目標強度に漸近する強度発現曲線が得られる経済的配合」を実現するためにプレキャストコンクリートの効率的な製造方法を構築することにある。なお、本研究で対象とするプレキャストコンクリートは、製品市場の約7割[1.7]を占める薄肉部材であり、蒸気養生を施しても温度勾配が小さな部材厚さの土木系プレキャストコンクリート¹を対象とした（図 1.2.2 参照）。

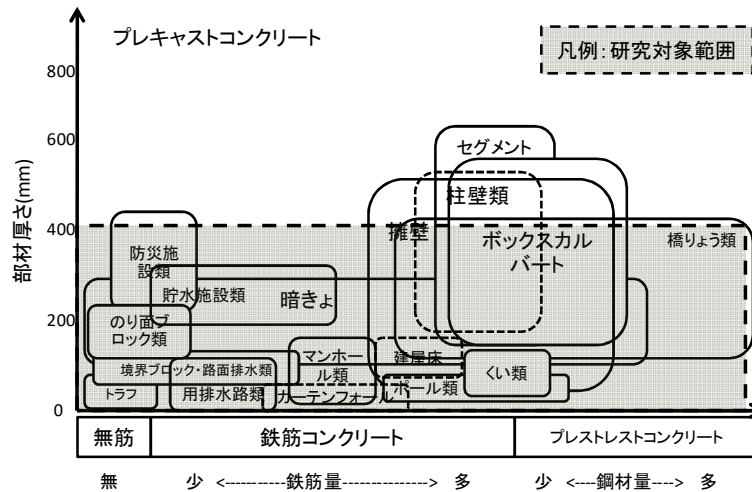


図 1.2.2(a) 本研究の対象とするプレキャストコンクリート（構造形式）

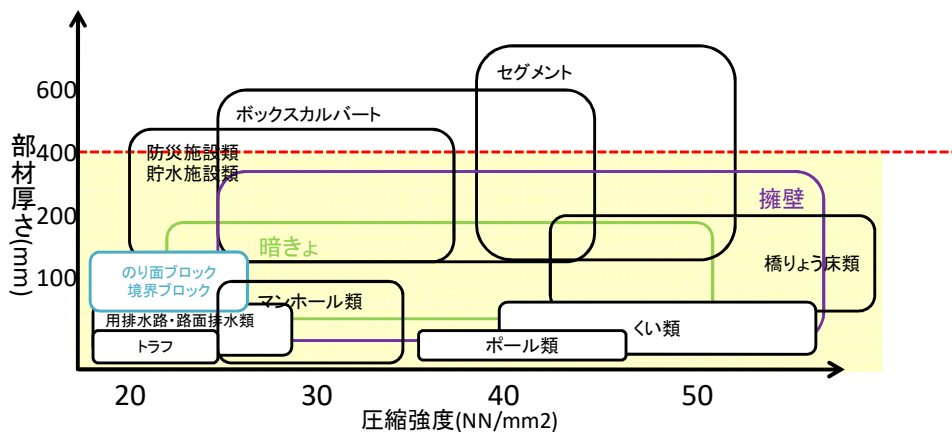


図 1.2.2(b) 本研究の対象とするプレキャストコンクリート（強度）

¹ 工場で製造されるプレキャストコンクリートは、建築分野及び土木分野で使用されている。建築分野では、国の法令要求に対する技術基準が整備されており、現場打ちコンクリートと同様に「構造部材」として用いられている。一方、土木分野では、技術基準が整備されず JIS により製品規定が整備されていることから、主に非構造部材であり「製品」として使用されている。なお、土木分野において構造部材として用いる場合には、学術専門委員会等を設置して構造部材としての設計手法や性能について審議して採用する手法が採られている。こうした背景から、建築分野では「プレキャストコンクリート」と呼ばれ、土木分野では「コンクリート製品」と呼ばれているが、本研究の内容は、どちらの分野にも適用可能な技術であることから、「プレキャストコンクリート」と呼ぶ。

1.3 本論文の構成

図 1.3.1 に本論文を構成する各章の内容と相互関連をまとめた。以下、各章の内容を簡単に紹介し、本論文の構成を説明する。

第1章「はじめに」では、本研究の背景について概説し、プレキャストコンクリートの製造効率化の必要性を社会的背景及び製造企業のニーズから整理し、本研究の目的を明確化した。

第2章「プレキャストコンクリートに関する現状及び既往の研究」では、プレキャストコンクリートの規格や基準の現状を JIS の歴史的変遷の視点からまとめ、問題点の抽出や昨今の環境対策の要求に対する各自治体の制度設計についてまとめた。さらに、コンクリート構築におけるプレキャストコンクリートと現場打ちコンクリート工法と比較し、プレキャストコンクリートは、品質及び性能等多くの項目で優位性があるが、技術基準や積算基準がないことが、採用機会の障壁となっていることが明らかになった。

第3章「コンクリート構造物に関する技術基準」では、コンクリート構造物の設計に関する技術基準を法体系から整理した。これにより、コンクリート構造物の要求機能及び要求性能とその性能の評価指標が明確になり、国等の設計要求に対する性能評価手法や適用できる材料等を明確化した。

第4章「プレキャストコンクリートの製造効率化における課題の抽出」では、プレキャストコンクリートの要求性能を明確にし、使用される材料と示方配合さらに設計及び製造手法について現状を把握し、プレキャストコンクリートの製造方法の効率化に対する具体的改善点について見出した。その結果、プレキャストコンクリートの製造効率化では、使用材料に応じた蒸気養生履歴の最適化による (A) 出荷時強度が必要であること、さらに (B) 脱型時強度を向上させる速硬性混和材が不可欠であることを見出した。特に、リサイクル材としてフライアッシュを適用するためには、この2つの手法の組み合わせは不可欠であることを示した。

第5章「プレキャストコンクリートの速硬性混和材による製造効率化」では、プレキャストコンクリートの製造時の要求性能である (B) 脱型強度を確保するために独自に開発した「速硬性混和材」の製造方法と各種特性について明らかにした。速硬性混和材による強度増加は、セメント材料の空間を埋めるフィラー効果と比表面積拡大による水和反応の促進の2つの効果によることを明らかにした上で、比表面積と添加率の関係を見だし、脱型時強度増に寄与する配合の設定法を示した。

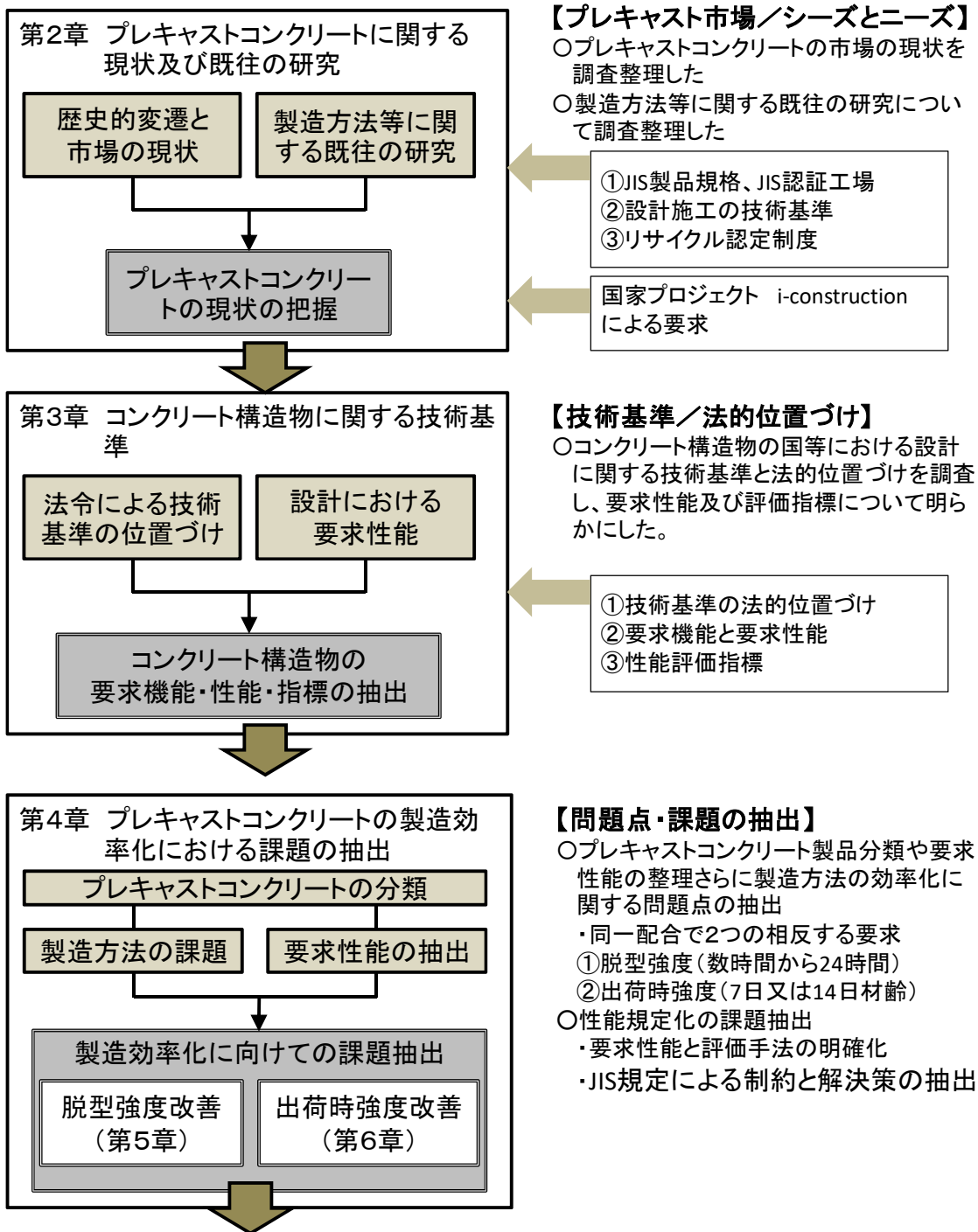
これらの成果により、プレキャストコンクリートの速硬性混和材による製造効率化を実現した。

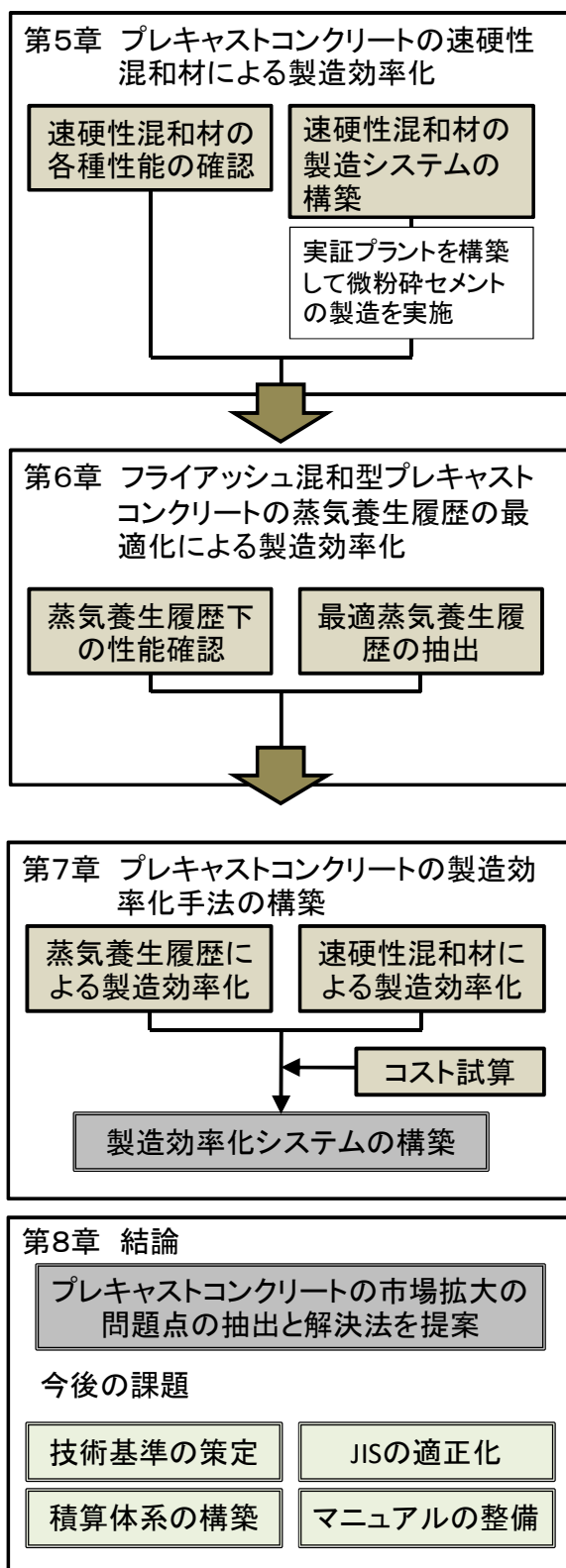
第6章「フライアッシュ混和型プレキャストコンクリートの蒸気養生履歴の最適化による製造効率化」では、使用セメントと最適蒸気履歴を見出すため、普通及び早強ポルトランドセメントとそれにフライアッシュを混和したセメントに対する基本特性の試験を行い、フライアッシュ混和セメントにおける最適な蒸気養生履歴を見出した。

これらの成果により、プレキャストコンクリートの蒸気養生履歴の最適化による製造効率化を実現した。

第7章「**プレキャストコンクリートの製造効率化の構築**」では、第5章で示した速硬性混和材による製造効率化及び第6章で示した蒸気養生履歴の最適化の2つの手法を組み合わせたプレキャストコンクリートの製造効率化の設定フローを示し、製造効率化のシステムについて提案した。

第8章「**結論**」では、本研究で明らかにしたプレキャストコンクリートの製造効率化に関する技術を整理するとともに、さらなる市場拡大の問題点と解決法を提案し本論の結びとした。





【課題の解決策(その1)】

- 製造効率化のための脱型時強度発現を実現する「新しい微粉碎セメント型速硬性混和材の開発」
 - ・脱型時強度の向上／最密充填と化学反応活性化による強度向上
 - ・ひび割れ等の収縮特性の制御
- 速硬性混和材の製造システムの構築
 - ・コストパフォーマンスを考慮した製造システム

【特許性】

- 新しい微粉碎セメント型速硬性混和材の製造方法で特許取得

【課題の解決策(その2)】

- 製造効率化のための最適蒸気養生履歴の抽出
- フライアッシュを混和した最適養生履歴の構築
 - ・リサイクル材への適用拡大

【新規性・オリジナルティー】

- JIS性能規定化に対応し、かつ、フライアッシュを用いた製造システムの構築に関して、
 - ①蒸気養生履歴の最適化(第6章)
 - ②新しく開発した速硬性混和材による脱型時強度向上(第5章)
 の2つの手法の組み合わせによる「プレキャストコンクリート製造効率化システムの構築」
- さらに、水和発現が遅い、
 - ③フライアッシュの適用が可能となった。

- 品質管理手法の提案

- 先行事例なし

【優位性】

- 品質確保した上で、
 - 製造効率化による製造時間の短縮
 - 製造効率化によるコスト縮減

【信頼性】

- 室内試験及び実機試験による実証
 - ・強度特性の検証
 - ・化学特性の検証

【今後の課題の抽出】

図 1.3.1 本論文の構成

【1章 参考文献】

- 1.1 セメント協会：2010.1.28 プレス発表
- 1.2 国土交通省：建設投資、<http://www.milt.go.jp/report/>
- 1.3 日本規格協会：JIS Q1012 適合性評価－日本工業規格への適合性の認証－分野別認証指針（プレキャストコンクリート製品）
- 1.4 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書[施工編：特殊コンクリート]14章 工場製品、2007.3、pp420-435
- 1.5 日本規格協会：JIS A5371-2004「プレキャスト無筋コンクリート製品」
- 1.6 日本規格協会：JIS A5372-2004「プレキャスト鉄筋コンクリート製品」
- 1.7 全国コンクリート製品協会：プライベートコミュニケーション
- 1.8 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書[構造設計編]、2007.3

第2章 プレキャストコンクリートに関する現状及び

既往の研究

2.1 はじめに

プレキャストコンクリートとは、一般に工場生産ラインにおいて製造されるコンクリートを呼ぶ総称であり、コンクリート構造物の建設において、現場打設のレディーミックスコンクリート（以下「現場打ちコンクリート」という。）と双璧をなすものである。また、プレキャストコンクリート構造物は土木及び建築分野の両方の分野で使用されるが、主に土木分野で使用されるものはプレキャストコンクリート製品と呼ばれている。このことから JIS プレキャストコンクリート製品規格ではプレキャストコンクリート製品は土木分野で使用するものに限っていると明示している。なお、本論文では、主に土木分野のプレキャストコンクリート製品を対象とするが、建築分野へも適用可能な技術であることから、プレキャストコンクリートと呼ぶことにする。

プレキャストコンクリートの特徴は、剛性と寸法精度が高い鋼製型枠を使用し、適切な蒸気養生履歴を負荷させ管理された室内工場で製造されるのが一般的である。したがって、コンクリートの寸法やかぶりなどの精度・品質が高く、さらに現場打ちコンクリートに比べ短期間に大量生産できるために廉価に製造できるメリットがある。特に、現場打ちコンクリートと違いプラントから現場への運搬過程や打設後の自然の外気温などの環境雰囲気に影響を受けずに人工的に管理された環境雰囲気により製作することができる、いわば「製造管理型製品」と考えることができる。このことは昨今の団塊世代の熟練技術者の大量退職や若年層のコンクリート現場離れなどによる高度技術者の不足による現場打ちコンクリートの品質低下問題に対して、プレキャストコンクリートは工場管理された環境下でマニュアルに従ってマニファクチャータブルに行うことが出来るため、短期間での人材教育により高品質のコンクリートの製造が可能であるなど今日の成熟した社会でのコンクリート界にとっての救世師になり得ると考えられる。

一方、世界的環境問題として CO₂ 排出削減が叫ばれている今日、コンクリート界でも当然、環境問題に対して背を向けることはできない。特にセメント業界ではセメント原材料へ産業副産物の使用が推進されており今日では1トンのセメント製造当たり 400kg を超える原材料及び燃焼材料が用いられている。また、グリーン調達としてリサイクル材の高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材料の多量添加も求められており、従来のバージン材料による高品質材料使用コンクリートからリサイクル材料使用コンクリートへの転換がコンク

リート界でも求められている。しかし、これらの添加物の多量混和は長期耐久性能の観点で品質低下問題[2.1]が危惧されており、特に、自然環境雰囲気下での現場打ちコンクリートでは複合的な劣化要因が存在することから厳しい状況に曝されている。一方、プレキャストコンクリートは、工場内で外気温、水温さらに蒸気養生履歴などすべての項目で人工的に管理して製造できる「製造管理型製品」であるため、これらさまざまな混和材料を添加してもその特徴を加味することが比較的容易にできると考えられており、今後はこのような成熟社会での救世主になりうるコンクリートになっていくものと期待される。なお、政府が平成 21 年国会に提出を予定していた地球温暖化対策基本法案（仮称）では、セメント業界全体で環境税負担が年間 300 億円程度(販売額の約 6%に相当)と見込まれ、プレキャストコンクリート業界でも年間 40 億円程度となり、ますます市場環境の悪化が見込まれ、プレキャストコンクリートのコスト縮減などの合理化が必要となってくると思われる。

2.2 プレキャストコンクリートの歴史変遷

(a)プレキャストコンクリートの歴史変遷

プレキャストコンクリートは、主に社会基盤施設の構築時に用いられ道路や橋梁さらに港湾河川などの土木分野と建物構造フレームや外壁、外構などの建築分野で使用されている。表 2.2.1 は、土木及び建築分野で使用されるプレキャストコンクリートの規格・基準を示したものである。この表にあるようにプレキャストコンクリートは、土木分野と建築分野ではその規格が異なっている。これは、土木系プレキャストコンクリートは、公共工事が基本であるため、全国に数多く設置するため製品に対して一律または標準化が求められてきた。また中小の製造会社を中心であるため、品質管理の観点から JIS 規格化へと発展してきた経緯がある。一方、建築分野では、民間を中心に個別案件による単一製品が基本であることから、構法などの一般評定や建築物の個別評定などの取得による建築確認が原則となり、コンクリートを得意とするゼネコンや専門コンクリートメーカーを中心として発展してきたと考えられる。このように土木と建築では、発展の過程が大きく異なるため、建築分野では JIS 製品はほとんど存在していない。本研究では、土木分野で使用される、いわゆる多量生産によるプレキャストコンクリートの製造方法の効率化を目的としているので、土木分野で使用されるプレキャストコンクリートを対象とする(図 1.2.3 参照)が、建築構造部材での工場製品等にも十分に応用できるものである。

コンクリートは、現場で打設する現場打ちコンクリートと工場で作成するプレキャストコンクリートに分類されている。これらの違いを項目ごとに表 2.2.2 に示す。この表から現場打ちコンクリートとプレキャストコンクリートは、完成時(系)の構造性能を同じとするならば、使用材料、配合、打設・締固め方

法は同じであるが、設計手法、施工方法または製造方法が異なりさらにフレッシュコンクリートの硬化過程も異なっていることがわかる。また、積算体系では、現場打ちコンクリートは、直接工事費と直接工事費に対する間接経費の和で全体工事費が算出されるが、プレキャストコンクリートは、製品価格とその据付費を直接工事費とし、間接経費は直接工事費に対する比率で算出されるが、間接経費の比率は、現場打ちコンクリートであってもプレキャストコンクリートであっても同じ経費率が用いられているため、プレキャストコンクリートの工期が相対的に短いにも関わらず割高の設定となっている。さらに、プレキャストコンクリートでは、工場製造過程での管理費と間接経費での管理費の2重計上が行われており、現行の積算体系は、プレキャストコンクリートの特徴や実勢が反映されておらず、その結果現場打ちコンクリートが相対的に安くなり、プレキャストコンクリートの採用が敬遠される原因ともなっている。図 2.2.1 は、プレキャストコンクリートと現場打ちコンクリートの違いによる工事工程の差を示した図である。プレキャストコンクリートは、予め工場で製造するため、現場では組立のみになるが、現場打ちコンクリートは、型枠設置、鉄筋配筋をした上でコンクリートの打設となり、さらに脱型や長期間の養生を行う必要があり、単純な工期の差だけでも一カ月以上の差があることが分かる。

表 2.2.1 土木・建築分野でのプレキャストコンクリートの規格・基準

分野	基準化の経緯	主な対象部材	規格・基準類
土木	土木案件は公共性が高いため、当初目的毎に製品が存在し、寸法等が各団体ごとに規格化され、1950年の法改訂により JIS 規格が制定された。その後、構造形態毎の JIS に体系変更された。	平板、境界ブロック、積みブロック	JISA5371-2016 プレキャスト無筋コンクリート製品
		鉄筋コンクリート管、側溝、鉄筋コンクリートくい	JISA5372-2016 プレキャスト鉄筋コンクリート製品
		プレストレストコンクリートボックスカルバート、くい	JISA5373-2016 プレキャストプレストレストコンクリート製品
建築	建築案件は個人が基本であるため、個々に寸法等が異なり規格化されずに大臣認定により確認申請を行ってきた。一定の範囲を定めて構法等を対象とする一般評定。	柱、梁、外壁カーテンオールなど	<ul style="list-style-type: none"> ・ JASS10 プレキャスト鉄筋コンクリート工事 2003年2月発行(日本建築学会) ・ 現場打ち同等型プレキャスト鉄筋コンクリート構造設計指針(案)・同解説(2002) 2002年10月発行(日本建築学会) ・ プレキャスト鉄筋コンクリート連層耐震壁の水平せん断耐力の評価法と設計例 2002年10月発行(日本建築学会) ・ プレキャスト複合コンクリート施工指針(案)・同解説 2004年4月発行(日本建築学会)

表 2.2.2 土木分野におけるプレキャストコンクリートと現場打ちコンクリートの違い

		プレキャストコンクリート		現場打ちコンクリート			
		積算体系					
JIS 規格		JISA5361-5365 JISA5371-5373		JISA5308			
使用材料	セメント	現場打ちと同じ		↑	↑		
	水	〃					
	混和材	〃					
	骨材	〃					
	化学混和剤	製品用混和剤				生コン用混和剤	
配合	管理材令	材令 14 日		↓	↓		
工場製造	製造場所	JIS 製品認証工場		↑	↑		
	型枠	一般に鋼製型枠				JIS 生コン工場	
	環境・養生	●	蒸気養生			—	
	打設	バケットシュート打設				—	
	締固め	●	振動台または棒及び型枠バイブレーター			—	
	脱型	4 時間～1 日				—	
	後養生	数時間～数日				—	
	(自主) 品質検査	強度、寸法				スランプ、空気量、強度	
技術基準	橋等	×	なし	↓	道路橋示方書		
	擁壁等	道路土工			道路土工		
	鉄道	×	なし		鉄道標準		
	ボックスカルバート	×	なし		共同溝設計施工指針(案) 鉄道標準		
施工	運搬	—		↑	● アジテーター車、90 分以内		
	型枠	—			一般には合板型枠		
	打設	—			● ポンプ圧送		
	打設環境	—			● 日平均 5℃以上 25℃以下		
	締固め	—			● 棒及び型枠バイブレーター		
	脱型	—			5～10 日		
	養生	—			● 散水、養生マット、灌水		
	仕上げ	—			鍍仕上げ(理想 3 回)		
	検査	場所	荷降し箇所、据付後		荷降し箇所		
項目	強度、外観、寸法		スランプ、空気量、強度				
積算	直接工事費	×	製品価格+据付費	↑	現場での直接工事費		
	間接工事費	×直接工事費に対する比率 (現場打ちと同じ)			直接工事費に対する比率		
	施工日数	×	約 9 日(ボックスカルバート B2500xH2500)		約 26 日(ボックスカルバート B2500xH2500)		

注) ←.....→ は、積算体系見直しが必要な部分

- : 性能・品質に直接影響する因子(外部環境や技術者の能力に左右されるもの)
- × : プレキャストコンクリートが不利な項目

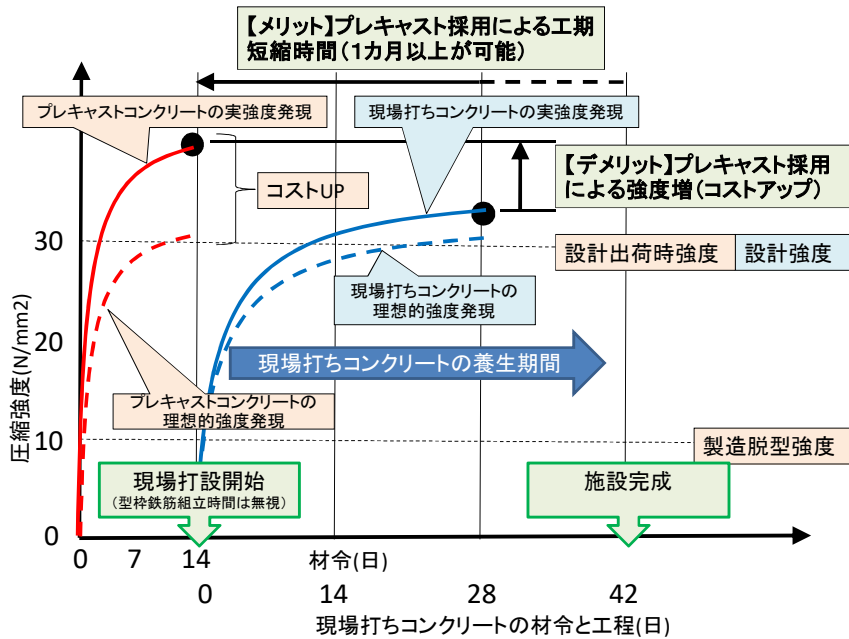


図 2.2.1 プレキャストコンクリートと現場打ちコンクリートの工事工程の違い

(b)プレキャストコンクリートの生産量の変遷

プレキャストコンクリートは、図 2.2.2 に示すように高度成長時代は毎年1,000 万トンを超えるコンクリートの販売量を確保してきたが、平成 20(2008)年末で約半減し、社会基盤整備費削減に対してその影響を大きく受けていると考えられ、現場打ちコンクリートよりも販売量の減少は大きい状況である。また、将来政府が検討している地球温暖化税が導入されれば、プレキャストコンクリート1 トン当たり 37円の税負担になることが全国コンクリート製品協会試算されており、益々製品市場が減少する可能性が高い。

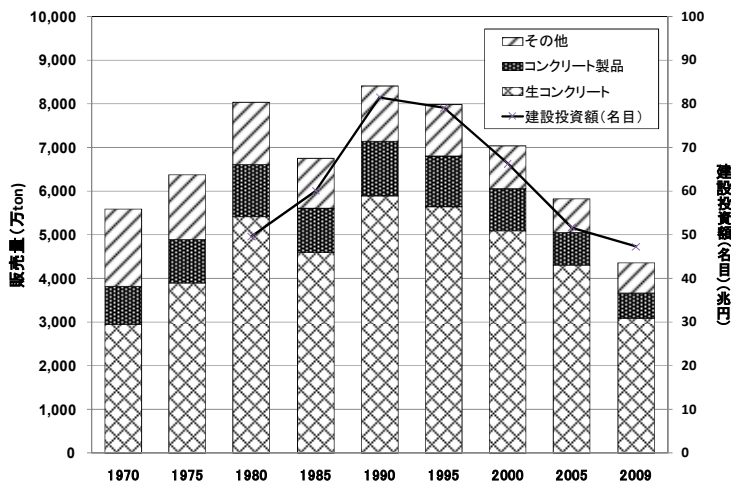


図 2.2.2 コンクリート販売量の変遷[2.2.2.3]

2.3 プレキャストコンクリートの規格及び基準等の現状

2.3.1 製造規準としての JIS 規格の現状

プレキャストコンクリートの発展は、明治 43(1910)年にオーストラリアの Hume 兄弟が現在のプレキャストコンクリートの基礎となった「遠心力鉄筋コンクリート管の製造方法」を発明し特許化されたことにより始まると言われている。この技術は直ちに日本にも導入され大正 14(1925)年に Hume らの特許を利用した遠心力鉄筋コンクリート管の製造が本格的に始まり今日まで発展してきた(表 2.3.1 参照)。

一方、プレキャストコンクリートの規格の始まりは、昭和 12(1937)年に制定された日本標準規格第 354 号類別 A14「下水道用鉄筋コンクリート管(昭和 12 年 2 月 15 日制定)」並びに水道協会の昭和 16 年 11 月に「水道用ヒューム管臨時規格遠心力鉄筋コンクリート管」を原点とすることができる。その後、昭和 24(1949)年 7 月工業標準化法の施行にともない、日本工業標準調査会の議決を経て昭和 25(1950)年に通商産業大臣が制定した経緯がある。さらに日本工業規格(以下「JIS」という。)の制定に伴い、JISA5302 鉄筋コンクリート管及び JISA5303 遠心コンクリート管が先行して制定され、順次、表 2.3.2 に示されるように新設・改訂・廃棄を繰り返しながら確立化され、平成 16(2004)年に行われたプレキャストコンクリートの再体系化による新 JIS への移行が行われ現在に至っている。また、平成 28(2016)年に性能を明確化するため、要求性能を見直すとともに照査指標を例示し、照査方法の詳細な規定を一部明確化した。

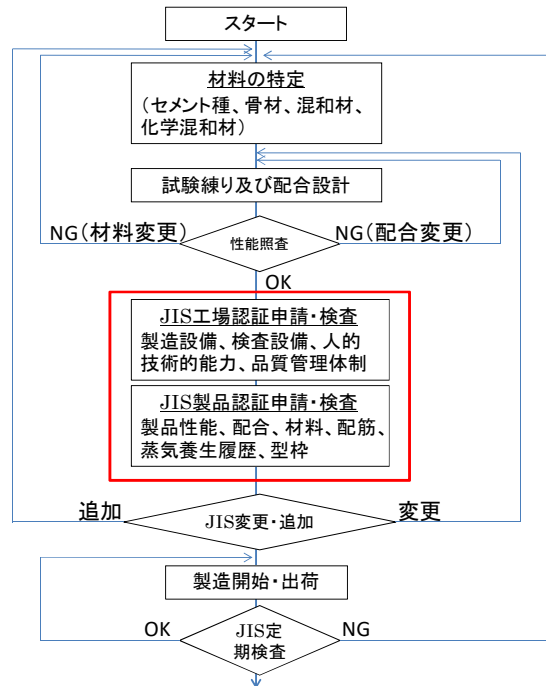
JIS プレキャストコンクリートはこの 60 年以上の変遷の中で大きな変革として 2 つの改正があげられる。1 つ目は、昭和 54(1979)年の工場製品の特徴である常圧蒸気養生履歴の自主規制化。2 つ目は、平成 15(2004)年性能規定型を踏まえた体系への移行である。前者は、プレキャストコンクリートの品質に大きく影響する製造過程で一番重要な「前置時間、昇温速度、最高温度など」の蒸気養生履歴を仕様規定から製造各社の自主規制(現在のシステムで言い換えれば、性能規定型)に改めたことにある。この背景には、①製造工場の設備や使用する材料が多様化したこと、さらに②プレキャストコンクリートの第一義的性能は、出荷時強度であること、から、製造途中の縛りはずし強度による管理を強化したことにある。しかし、プレキャストコンクリートの製造ではこの蒸気養生履歴とその後脱型後の養生が品質に直接的に影響を及ぼすため、JIS 製品工場認証の審査では、この養生履歴を明確に数値(仕様)として求めていることから、ほとんどのプレキャストコンクリート会社は、従来の常圧蒸気養生履歴を明記させられ、そのとおりに製造していることをもって、JIS 認定するため JIS での自主規制とした主旨が実態として実現できていない現状である。また、後者の性能規定型への移行については、平成 12 年に日本工業規格調査会において、プレキャストコンクリートの体系化変更が答申され、新たな体系化を

行ったことにより、数十種類にわたっていた JIS 製品の集約化が行われ、無筋コンクリート、鉄筋コンクリート及びプレストレストコンクリートの構造形態毎の3種類に分類され集約された。しかし、性能規定化への布石としても集約化は一步前進したが、個々の仕様が残されたこと、また、性能の提示が不明確など中途半端な改訂となっていた。平成 28(2016)年には、5年目の見直しとして要求性能の明確化されたが、かつ照査手法である技術基準が未だ整備されていない。

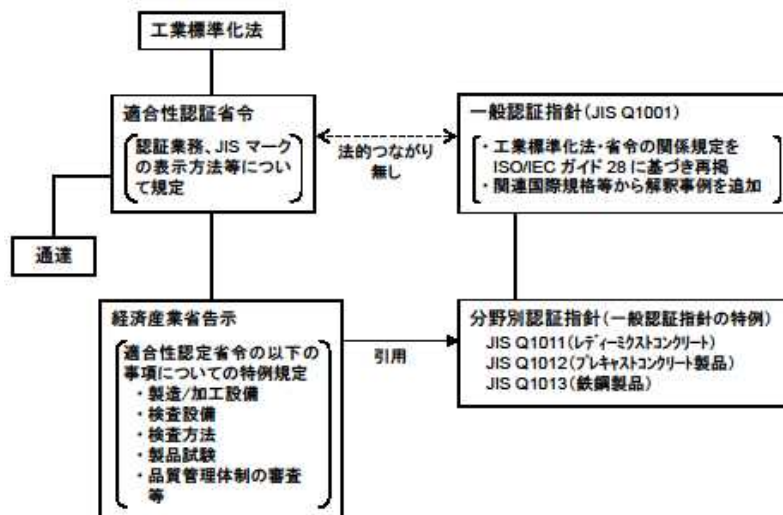
プレキャストコンクリートの設計施工基準の制定の歴史は、昭和 44(1969)年に土木学会において「鉄筋コンクリート工場製品設計施工指針(案)」(以下「製品指針(案)」という。)として初めて制定された。この製品指針(案)の製造に関する規定は、当時精力的に行われていた JIS 製品の規格策定のための実験が参照されたため結果的に JIS 製品規格の規定をそのまま取り入れられている。その後、製品指針(案)は、昭和 49(1974)年にコンクリート標準示方書にそのまま条項が移行され廃止となった。したがって、プレキャストコンクリートの基準はコンクリート標準示方書に引き継がれたが、コンクリート標準示方書の内容が許容応力度法から限界状態設計法、さらに性能照査型へと改訂を繰り返されているにも関わらずプレキャストコンクリートに関しては今日まで体系が大きく変更がなされないまま、現在の「2012 制定 コンクリート標準示方書・施工編 特殊コンクリート 第 11 章工場製品」として規定化されている。そして蒸気養生履歴の規定は、11.5.5 養生の【解説】(2)に一般的な養生履歴の例として示されており、要求性能が明確に示されないままの例示であり、他に具体的に示した基準・規格が存在しないことからほとんどのプレキャストコンクリート会社はこのコンクリート標準示方書の【解説】例示を絶対的な規定と捉えて製造しているのが実態である。

JIS 規定ではプレキャストコンクリートは、所定の性能を満足することが認証されることで JIS 製品マークを表示することができる。一方、JIS 製品を製造する工場も認証の対象となっている。図 2.3.1 は、平成 16 年 6 月改正された工業標準化法による適合性評価に係る JIS 制度認証体系を示したものである。適合性評価は WTO/TBT 協定発効に伴う加盟国の義務として国際整合化の要請を受けて改正されたもので、民間活力の一層の活用及び国が JIS マーク対象製品を指定するものである。登録基準や認証基準は、ISO/IEC のルールに基づき行われる。JIS 工場の認証は、分野別認証基準である JISQ1012「プレキャストコンクリート製品」に沿って、政府から認定された民間認証機関により行われている。そして、この JISQ1012 に規定されたすべての項目を満足することで、JIS 製品工場の認証がもらえる構図であるが、審査の内容はすべて性能規定型で記載されているが、実際の認証は、実施計画書に仕様を明確に示す必要があり、特に、蒸気養生履歴に関しては、時間や温度履歴を提示する必要があるため、

技術開発や新たなリサイクル材料の使用など技術革新が出来たとしても、変更ができず、新たな認証の取得が求められているため、技術革新の足かせになっていると考えられる。この点に関しては、制度の見直しが必要と考えられる。また、強度発現に及ぼす蒸気養生履歴の影響や混和材を使用した場合の強度発現などプレキャストコンクリートに関する研究も少なく技術発展が乏しいことも JISQ1012 において仕様を指定する必要がある理由と思われる。



(a)JIS 認証の流れ



(b)法的位置づけ

図 2.3.1 JIS 認証フローと法的位置づけ

表 2.3.1 主なプレキャストコンクリートに関する基準・規格の制定

年次	プレキャストコンクリートに関する基準・規格（*は関連基準類）	
1906	明治 39	鉄筋コンクリート管の使用（横浜築港埋立地の排水用）
1910	明治 43	遠心力鉄筋コンクリート管の発明（オーストラリア：Hume）
1925	大正 14	遠心力鉄筋コンクリート管（フューム管）の製造
1926	昭和元	遠心力鉄筋コンクリートボールの製造
1927	昭和 2 年	*ポルトランドセメント及び高炉セメントの日本標準規格制定
1929	昭和 4 年	*鉄筋コンクリート工事標準示方書（日本建築学会）
1931	昭和 6 年	*鉄筋コンクリート標準示方書（土木学会）
1934	昭和 9 年	遠心力鉄筋コンクリートクイの製造
1937	昭和 12 年 3 月	日本標準規格 354 号類別 A14「下水道用鉄筋コンクリート管」制定
1950	昭和 25 年 3 月	・ JISA5302 鉄筋コンクリート管の制定（製品に関する初めての JIS 規格） ・ JISA5303 遠心力鉄筋コンクリート管の制定
1953	昭和 28 年	* JISA5308 レディーミックストコンクリート制定
1955	昭和 30 年	JISA5310 遠心力鉄筋コンクリート管の制定
1968	昭和 43 年	JISA5335 プレテンション方式遠心力プレストレストコンクリートくい JISA5336 ポストテンション方式遠心力プレストレストコンクリートくい
1969	昭和 44 年 2 月	土木学会「鉄筋コンクリート工場製品設計施工指針（案）制定／コンクリート製品に関する初めての設計施工基準の制定（JIS で規定されている蒸気養生履歴を採用して規格化）
	昭和 44 年	日本下水道協会 JSWASA-1 下水道用鉄筋コンクリート管の制定
1970	昭和 45 年	JISA5309 遠心力プレストレストコンクリートおよび鉄筋コンクリートボール
1971	昭和 46 年	JISA5302(1971)第三回改正（蒸気温度履歴に関する規定を設ける）
1972	昭和 47 年	日本下水道協会 JSWASA-2 下水道用鉄筋コンクリート管の制定
1973	昭和 48 年	日本下水道協会 JSWASA-2 推進工法用コンクリート管の制定
1974	昭和 49 年 9 月	土木学会「コンクリート標準示方書（昭和 49 年度版）／4 編施工 3 3 章コンクリート製品を規定（設計施工指針（案）を取込む）
1978	昭和 53 年	国土開発技術研究センター：中空鋼管コンクリート合成(SC)くい設計指針
1979	昭和 54 年	JISA5302(1979)第五回改正（蒸気温度履歴は実態に合わないことからを自主規制とした）
1981	昭和 56 年	JISA5337 高強度 PC くい
1984	昭和 59 年	国土開発技術研究センター：PC ボックスカルパート道路埋設指針
1993	平成 5 年	道路保全技術センター：プレキャストコンクリート共同溝設計・施工要領（案）
2004	平成 16 年	JISA5371,A5372,A5373 性能規定化へ改正,JIS Q1012 適合性評価の制定
2010	平成 22 年 4 月	日本道路協会 道路土工 カルパート工
2016	平成 28 年	JISA5371,A5372,A5373 性能規定化へ改正

2.3.2 適合基準としての設計施工基準の現状

公共事業におけるプレキャストコンクリートの発注は、国土交通省、農林水産省など国の機関を初め各自治体により行われる。たとえば、コンクリート施設を建設する場合、発注者により構造物の計画及び設計が行われ、一般競争入札により施工者の選択を行うことが一般的である。計画及び設計段階では、設計基準に基づき詳細設計が行われ仕様書および図面が作成される。これら仕様書及び図面（以下「発注図書」という。）には、コンクリートに用いる材料や設計基準強度などの要求性能が示されている。詳細設計段階で用いられる設計基準には、建築限界、鉄筋配筋詳細や各種詳細が示されており、この基準に沿って詳細設計が行われる。しかし、これら基準類のほとんどがレディーミックスとコンクリート（以下「生コン」という。）を使用した場合を想定した規定となっているため、実態としては生コン使用を前提とした発注図書の作成となってしまう。また発注図書が生コン使用で発注された場合、施工者が受注してからプレキャストコンクリートへの設計変更を行おうとした場合、プレキャストコンクリートの技術基準¹が存在しないため、他の基準類を参照したり組み合わせたりして独自の考え方による設計変更の提案を行う必要があるが、そこまでして元請施工者が設計変更するメリットは存在しないため、この設計変更作業は下請もしくはプレキャストコンクリート会社が無償で請負うことになり、設計基準が存在しない弊害がここにもある。現行のコンクリートに関する基準を表2.3.3に示す。こうした背景から、プレキャストコンクリートの設計基準の整備が求められる。

¹ 技術基準とは、法律・政令・省令（法令等）要求に対して、具体的な検証方法及び照査方法を示した基準であり、国土交通省では、主に告示や通達などで規定している。

表 2.3.3 現場打ちコンクリート及びプレキャストコンクリートの現行の技術基準

項目		現場打ちコンクリート	プレキャストコンクリート
材料規格 製品・製造 規格	省令 等 (JIS ² 等)	JIS A5308 レディーミ ックスコンクリート/ 日本規格協会	○グループ I (基本規格・共通規格) JIS A5361 プレキャストコンクリート製品一 種類、製品の呼び方および表示の通則 JIS A5362 同一要求性能とその照査方法 JIS A5363 同一性能試験方法通則 JIS A5364 同一材料及び製造方法の通則 JIS A5365 同一検査方法通則 ○グループ II (構造別製品群規格) + 附属書/ 用途別性能・推奨仕様規格) JIS A5371 プレキャスト無筋コンクリート製品 JIS A5372 プレキャスト鉄筋コンクリート製品 JIS A5373 プレキャストプレストレスコンク リート製品
	省令 通知 等	たとえば ・鉄道に関する技術上の 基準を定める省令 ・(通知) 橋、高架の道路 等の技術基準の改定につ いて	たとえば ・道路土工-カルバート
設計基準	参考 基準 ³	たとえば ・土木学会コンクリート 標準示方書「設計編」	たとえば、 ・中部地区コンクリート2次製品構造規格(案) /建設省中部地方建設局 ・プレキャストL型擁壁設計施工マニュアル/ 国土交通省四国整備局・平成13年12月
	省令 等	土木工事共通仕様書 土木工事施工管理基準及び規格値(案) 道路土工	
施工基準	参考 基準	たとえば ・土木学会コンクリート標準示方書「施工編」	

² JIS は現在では民間機関の任意標準であるが、法令が引用すれば、強制標準として働くこともある。

³ 参考基準：土木学会等の民間団体の民間規格のこと。公共施設の発注では国等の技術基準が整備されているため、民間規格は原則採用されないが、新知見等で技術基準に示されていない場合など参考とする場合がある。

2.3.3 環境対策としてのリサイクル認定制度の現状

ごみ処理の歴史は江戸時代のふん尿を「金肥」として有価で引き取られたことに始まったと言われている。その後、明治 33(1900)年になって「汚物清掃法」が伝染病の公衆衛生の目的で制定された。戦後は、昭和 29(1954)年に「清掃法」さらに昭和 45(1970)年に廃棄物処理法制定へと時代変遷を経て今日に至っている。これにより、産業廃棄物の処理は生産者が責任を持って行い、一般廃棄物は市町村が処理する体系が出来上がった。

リサイクルの概念は、平成 3(1991)年の再生資源利用促進法（リサイクル法）として整備され、国土交通省においても「再生資源の利用の促進について（建設大臣官房技術審議官通達、平成 3 年 10 月 25 日）」が出され、同時期に改正された廃棄物処理法とあいまって、廃棄物の減量・リサイクルが推進されるようになり、平成 7 年に容器包装リサイクル法の制定から始まり、平成 10 年には家電リサイクル法が制定された。さらに、平成 12(2000)年は、「循環型社会元年」と言われるように、「循環型社会形成推進基本法」が制定され、リサイクルの前に、発生抑制（リデュース）、再利用（リユース）が優先する 3 R の考え方が取り入れられた。これにより再生資源利用促進法も資源有効利用促進法（3 R 法）に全面改正され、食品リサイクル法、建設リサイクル法、自動車リサイクル法と次々とリサイクル法が整備された。

こうした背景により、平成 9 年に岐阜県、平成 10 年石川県を皮切りに各自治体では、再生資源を利用するための条例として「リサイクル認定制度」が次々と整備された。また、平成 13 年のグリーン購入法の施行により、各自治体には環境物品等の調達方針の作成および当該方針に基づいて物品等の調達を行うよう努力義務が課せられた。これを受けて「リサイクル認定制度」は平成 20 年の長崎県まで平成 21 年 11 月末現在では 37 都道府県で実施されている。表 2.3.4 は、プレキャストコンクリートのリサイクル認定制度を示したものである。この表からわかるように各自治体でのプレキャストコンクリートへの採用の扱いは温度差があり、制度は整備したが採用が伴わない自治体も多く存在する。それは、各自治体での発生資源の量や種類が異なること、さらに資源の再資源化に対する考え方の違いが温度差を生じている原因と考えることができる。これら自治体の対応を分類すると以下に示す 4 つのパターンに分類できる。

①自治体として条例を制定して率先的採用や採用した場合のインセンティブを与えるなどしている自治体（たとえば、愛知県、茨城県、青森県）

②環境部と土木部で連携して促進している自治体（たとえば、富山県、秋田県、沖縄県）

③環境対策として環境部主体で整備実施している自治体（ほとんどの自治体）

④制度が存在しない自治体（たとえば、東京都、熊本県など 11 都府県）

つまり、この温度差は、プレキャストコンクリートの設計や調達は、一般に土木及び建設部で行われているため、環境部で認定されたプレキャストコンクリートが必ずしも採用される仕組みにはなっていないことに起因すると考えられる。再生資源を用いたいわゆるリサイクル製品は、廃棄物等の再生資源を利用していることから自然由来原材料を用いたバージン製品と比べて一般に品質が落ちるため、現状の積算体系では同一価格となりバージン製品が選ばれる傾向にある。したがって、優先的または率先的にリサイクル製品を採用するシステム作りをしなければ制度そのものが机上の空論になってしまい自治体間での温度差が生じたと言える。また、実際の製品製造コストを同等の品質条件下で比較した場合、バージン材料による製品とリサイクル材料を用いた製品ではリサイクル製品が高くなる傾向にあるので、製造者としてのメリットが少ないこともあり現在の採用基準である「経済性」を優先した場合にはリサイクル製品の採用が難しい状況にある。

これらの「①価格、②品質、③リサイクル性」の3つのファクターに対する優先順位を従来の基準とは異なるシステム、つまり「たとえば、①リサイクル性、②品質、③価格」に変えなければリサイクル製品の率先採用にはならないという制度上の問題があるということである。こうした背景から、一部の自治体では、採用の優先順位を変える条例を制定して、リサイクル対策または環境対策に取り組んでいると思われる。

また、リサイクル認定方法には、

(A) 再生資源の種類ごとに認定する方式

(B) プレキャストコンクリート毎に認定する方式

の2つが存在する。(A)方式は、排出される再生資源の材料の品質基準を制定し、その基準を満足していれば、その再生資源を利用したプレキャストコンクリートをすべてリサイクル認定製品とするものである。一方(B)方式は、再生資源を使用したプレキャストコンクリートがプレキャストコンクリートの品質基準を満足していればリサイクル認定製品とするものである。したがって、(A)方式は、どのプレキャストコンクリートに使用できるので認定が簡易的にでき、利用の促進に直接的につながると考えられる。一方、(B)方式は、プレキャストコンクリート毎に審査認定しなければならないのでプレキャストコンクリートの様に多種多様の製品が存在する場合には、審査に膨大な時間と費用を要するため、利用促進の弊害となっている。

リサイクル認定制度は、さまざまな再生資源を利用できるシステムであるがプレキャストコンクリートに採用されている再生資源は、一般廃棄物溶融スラグを細骨材として利用する場合が一番多い。これは、各自治体でのごみ処理問題が大きいと考えられる。その他の再生資源の利用では、環境対策つまりCO₂排出削減も兼ねた高炉スラグ骨材及び高炉スラグ微粉末、フライアッシュ

等の利用が多い。高炉スラグは、鉄鋼生成における廃棄物であるが、CO₂ 排出削減の目的で各省庁が率先して使用するように通達を出していることで利用が拡大している。一方、フライアッシュは、年間 1,000 万トン（平成 20 年度）の排出があるが、そのほとんどの用途先が埋立に利用され見かけ上の再生率は高いが決して有効利用とは言い難い。特に海岸埋め立てなどでは、自治体から補助金が交付されており、補助がないコンクリートへの利用よりも優先的に埋め立てに利用されている傾向がある。したがって、コンクリート及びプレキャストコンクリートへの適用では数%程度に留まっている。しかし、フライアッシュは、収縮特性に優れているため建築基準法を始め土木学会等でもコンクリートへの適用が推進されているが、ポゾラン反応による圧縮強度発現が約3カ月と長期性能改善効果は期待できるが短期性能発現が少ないために、実際としてはコンクリートへの採用が控えられている現状である。特にプレキャストコンクリートのように製造サイクルが短い場合にはその使用が難しく、プレキャストコンクリートへの実用化はほとんど行われていないのが現状であるが、富山県、福井県、石川県の北陸三県の自治体では、中部電力から排出されるフライアッシュの有効利用を電力会社とプレキャストコンクリート会社で連携して率先して採用を進めており、自治体が指導的に行うことで用途開発や活用が広がる典型的な事例として注目されている。表 2.3.5 はプレキャストコンクリートの合理的製造方法を開発する目的で筆者が設立したナノセメント研究会が検討した各種リサイクル材のプレキャストコンクリートへの適用性について「グリーンマネージメント」[2.4]と称して示したものである。プレキャストコンクリートの特徴を加味することで多くのリサイクル材が適用でき、プレキャストコンクリートの発展が望まれる。

表 2.3.5 セメント材料によるグリーンマネージメント[2.4]

処理		グリーンマネージメント												総合評価				
		材料				コスト		リサイクル性	環境負荷	コンクリート品質								
		代替	廃棄物	基準類	供給量	材料費	運搬費	利用価値	CO2排出低減効果	材料	フレッシュ	硬化性能						
				材料	製品			ばらつき	流動性	短期	長期							
										圧縮強度	ひび割れ	圧縮強度	ひび割れ	耐久性				
未加工	粉末	石炭焼却灰	JIS外	◎	◎	○	○	◎	◎	×	×	×	○	○	○	△		
		製鉄粉		△	◎	○	○	◎	◎	△	△	×	△	×	△	△	△	
分級	粉末	フライアッシュ	JIS外	◎	◎	○	○	◎	◎	△	△	△	○	◎	○	○	△	
			JIS A6201 II種	◎	○	○	○	◎	◎	○	△	○	△	◎	◎	◎	◎	◎
加工	骨材	JIS A6201 IV種	◎	◎	○	○	◎	◎	○	△	○	△	◎	◎	◎	◎	◎	
		高炉スラグ微粉末	高ブレ	◎	△	○	○	◎	△	○	○	○	×	◎	×	×	△	
			低ブレ	◎	△	○	○	◎	△	○	○	○	○	△	○	△	△	△
		製鋼スラグ微粉末		○	△	○	○	◎	△	○	○	○	◎	◎	○	○	○	○
		ガラスカレット微粉末		△	△	○	○	◎	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		鉄鋼スラグ	JIS A501101	○	△	○	○	◎	×	○	○	—	—	—	—	—	—	○
		フェロニッケルスラグ	JIS A5011-2	△	△	△	△	◎	×	○	○	—	—	—	—	—	—	○
		鋼スラグ	JIS A5011-3	△	△	△	△	◎	×	○	○	—	—	—	—	—	—	○
		融融スラグ	一般ゴミ	○	△	○	○	◎	×	○	○	—	—	—	—	—	—	○
			下水汚泥	○	△	○	○	◎	×	○	○	—	—	—	—	—	—	○
	ガラス	△	△	○	◎	◎	×	○	○	△	—	△	—	—	—	○		
	再生骨材(H, M, L)	JIS	○	△	○	○	◎	×	△	○	△	△	△	△	△	△	○	
判定指標		発生量	価格	比重	リサイクル性	インベントリ	球形	強度	収縮	強度	収縮	凍害						
適用性凡例		◎: 高い		○: 普通		△: 低い		×: 不適										

セメント・コンクリート構造物へのリサイクル材の使用は、表 2.3.5 に示されるように様々な材料がある。現在は社会基盤に用いられるコンクリート構造物に対して、品質向上が求められており、これらを解決する材料としてフライアッシュが期待されているところです。フライアッシュの長所は、収縮が小さいのでひび割れ発生が少なく、現在全国的に発生しているアルカリ骨材反応や塩害など耐久性が高いコンクリートが実現出来る点にある。また、CO₂ インベントリーが小さいことから環境負荷低減効果が高く、課題解決の手段として大きな利点を有しているといえる。しかし、フライアッシュ混和は、建設にとって最大の欠点を有している。それは、フライアッシュの反応であるポゾラン反応が常温下では材齢3ヶ月程度からスタートするため、建設工期が大きく延びる点にある。したがって、一般のコンクリート構造物には適用がなされていない現状がある。こうした欠点から、平成23年に起きた東日本大震災に伴う東京電力(株)福島第一原子力発電所停止により石炭火力発電所が増設され、現在では1000万トンを超えるフライアッシュの排出があるにも係らず、ほとんどはセメントの原材料に用いられており、コンクリートや製品等には5%程度しか用いられていない。しかし、フライアッシュは高温領域ではポゾラン反応が活性化する長所を有しており、プレキャストコンクリートは、製造過程を蒸気養生履歴という自己製造管理出来るという特長を最大限に利用することで、フライアッシュの有効利用の可能性がある。

表 2.3.6 混和材としてのフライアッシュの特長

フライアッシュ	長所	<ul style="list-style-type: none"> ・収縮が小さい(収縮ひび割れ対策) ・水和熱低減効果が高い(温度ひび割れ対策) ・アルカリ骨材反応抑止(30%程度の混和) ・緻密性の向上による塩化物浸透抑止(塩害防止) ・高い流動性・施工性(ボールベアリング効果) ・ポゾラン反応による長期強度の増加 ・高温域(45~75℃程度)でのポゾラン反応の活性化 ・CO2排出インベントリーが小さく環境負荷低減対策に有効
	短所	<ul style="list-style-type: none"> ・常温域(外気温下)ではポゾラン反応は材齢3ヶ月以降 ⇒短期に強度発現を求めるコンクリートへの採用は敬遠 ・未燃カーボンによる空気量の低下(カーボン吸着) ・品質ばらつき(原料石炭種、燃焼効率の違い)

表 2.3.4 各自治体のプレキャストコンクリートに関するリサイクル認定制度と適用原材料

自治体名	担当部課	リサイクル認定制度名	創設年	プレキャストコンクリートに適用できる原材料	根拠法令及び特徴
北海道	環境生活部環境局	北海道リサイクル製品認定制度	平成 16 年	一般廃棄物溶融スラグ 硫黄、石炭灰、フェローニッケルスラグ、製鋼スラグ、電炉スラグ、ホタテ等貝殻	<ul style="list-style-type: none"> 北海道リサイクル製品認定及び利用推進要領 配合率は、原則 50%以上。ただし、重量または容積換算かは協議
青森県	環境生活部	青森県リサイクル製品認定制度	平成 17 年 3 月	産業廃棄物溶融スラグ、一般廃棄物溶融スラグ	<ul style="list-style-type: none"> 青森県リサイクル製品の認定及び使用の推進に関する条例、同施行規則 リサイクル製品優先使用指針の整備 設計基準強度 35N/mm² 以下 スラグ骨材の混合率は細骨材の質量比 20%以上
岩手県	環境生活部	岩手県再生資源利用認定製品認定制度	平成 14 年	骨材：一般廃棄物溶融スラグ、高炉スラグ、フェローニッケルスラグ、銅スラグ、再生 混和材：高炉セメント、フライアッシュ、エコセメント	<ul style="list-style-type: none"> グリーン購入基本方針 配合率は、高炉セメントの場合、30%以上、フライアッシュの場合、10%以上
宮城県	環境生活部	宮城県グリーン製品認定制度	平成 11 年	骨材（砕石くず）、再生ペレット	<ul style="list-style-type: none"> グリーン購入促進条例 県内で発生した原材料
秋田県	生活環境文化部	秋田県リサイクル製品認定制度	平成 16 年 9 月	一般廃棄物溶融スラグ フライアッシュ（平成 24 年追加）	<ul style="list-style-type: none"> 秋田県リサイクル製品の認定及び利用の推進に関する条例、同施行規則 細骨材の配合率は重量比で 20～40% 凍害に関して A 法で確認が必要 交換ができる製品への適用
山形県	文化環境部	山形県リサイクル製品認定制度	平成 15 年	一般廃棄物および下水汚泥溶融スラグ、ガラスくず	<ul style="list-style-type: none"> 山形県リサイクル製品認定制度実施要綱 配合率 ガラスくず（質量）10%程度 配合率 溶融スラグ（質量）30%程度以上
福島県	環境生活部	うつくしま、エコ・リサイクル製品認定制度	平成 15 年 11 月	廃ガラス、ガラスくず、クリンカーアッシュ	<ul style="list-style-type: none"> うつくしま、エコ・リサイクル製品認定制度実施要綱 配合率は、「うつくしまグリーン購入ガイドラインによる」
茨城県	生活環境部	茨城県リサイクル製品認定制度	平成 11 年	リサイクル建設資材認定材	
	土木部	茨城県リサイクル建設資材評価認定制度	平成 16 年 10 月	<ul style="list-style-type: none"> 骨材：一般廃棄物溶融スラグ、高炉スラグ、電気炉酸化スラグ、下水汚泥溶融スラグ、再生骨材（H,M,L） 混和材：フライアッシュ、高炉 	<ul style="list-style-type: none"> 茨城県リサイクル建設資材評価制度実施要綱 率先利用指針を整備し、コスト 2 グループ、コスト 3 つのグループ仕分け。 配合率は、溶融スラグ細骨材（重量）30～50%以下、高炉スラグ粗骨材（重量）50%以上、高炉スラグ細

第2章 プレキャストコンクリートに関する現状及び既往の研究

				スラグ微粉末、砕石粉	骨材（重量）30～50%、混和材は、セメント（重量）10%以上
栃木県	環境森林部	栃木県リサイクル製品認定制度（とちの環エコ製品）	平成 16 年 8 月		<ul style="list-style-type: none"> ・栃木県リサイクル製品認定制度実施要綱 ・県内で発生した循環資源を原材料とする
富山県	生活環境文化 部	富山県リサイクル認定制度	平成 14 年	溶融スラグ、フライアッシュ、廃ガラス、廃プラスチック類、有色ガラスびん	<ul style="list-style-type: none"> ・富山県リサイクル認定事業実施要綱 ・「公共工事における富山県認定リサイクル製品利用方針（土木部）（平成 16 年 4 月）」により利用促進を図っている。 ・材料毎に認定 ・原則、県内発生廃棄物
石川県	環境部	石川県リサイクル製品認定制度	平成 10 年	溶融スラグ、フライアッシュ、ガラスカレット、再生骨材など	<ul style="list-style-type: none"> ・石川県リサイクル製品利用推進要綱 ・材料毎に認定 ・基準配合率は、重量の 5-6% ・環境マネジメントシステムの取得義務
福井県	安全環境部	福井県リサイクル製品認定制度	平成 11 年 12 月	溶融スラグ、フライアッシュ、間伐材、廃瓦、ガラス類、陶磁器くず	<ul style="list-style-type: none"> ・福井県リサイクル製品認定要綱 ・材料毎に認定 ・使用率 フライアッシュ 20%以上 溶融スラグ細骨材の 30-50% ・品質管理規定に基づいている
山梨県	森林環境部	山梨県リサイクル製品認定制度	平成 15 年 10 月	一般廃棄物溶融スラグ、ガラスカレット、再生骨材	<ul style="list-style-type: none"> ・山梨県リサイクル製品認定及び普及促進要綱
長野県	環境部	信州リサイクル製品認定制度	平成 16 年 3 月	再生骨材、陶磁器くず（レンガを除く）、ガラスくず、一般廃棄物溶融スラグ、下水汚泥溶融スラグ	<ul style="list-style-type: none"> ・信州リサイクル製品認定制度実施要綱 ・配合は、重量比で 10%以上で認定資材以外を含有しない。
岐阜県	環境生活部	岐阜県廃棄物リサイクル認定製品	平成 9 年 6 月	溶融スラグ、下水汚泥、陶磁器くず、ガラスカレット、古畳、再生骨材	<ul style="list-style-type: none"> ・岐阜県リサイクル認定製品の認定及び利用の推進に関する条例、同実施要項
静岡県	県民部環境局	静岡県リサイクル製品認定制度	平成 17 年 10 月		<ul style="list-style-type: none"> ・静岡県リサイクル製品利用推進要綱
愛知県	建設部	愛知県リサイクル資材評価制度（あいくる）	平成 14 年 4 月	高炉スラグ、フライアッシュ、フェローニッケルスラグ、銅スラグ、再生骨材、陶磁器くず（レンガを除く）、製鋼スラグ（電気炉還元スラグを除く）、一般廃棄物溶融スラグ、キューポラススラグ、下水道汚泥溶融スラグ、下水道汚泥焼却灰、産業廃棄物溶融スラグ、	<ul style="list-style-type: none"> ・愛知県リサイクル資材評価制度実施要領 ・材料毎に認定 ・重量比で 10%以上含有。 ・製品の認定および発注機関が建設部、再生原料の発生地やリサイクル資材の製造地を愛知県内に限定しない。
三重県	環境森林部	三重県リサイクル認定制度	平成 13 年 10 月	溶融スラグ、高炉スラグ微粉末	<ul style="list-style-type: none"> ・三重県リサイクル製品利用推進条例

第2章 プレキャストコンクリートに関する現状及び既往の研究

滋賀県	琵琶湖環境部	滋賀県リサイクル製品認定制度（ビワクルエコショップ）	平成 17 年 3 月	灰溶融スラグ、ガラスカレット、 汚泥（焼却灰）	<ul style="list-style-type: none"> ・滋賀県リサイクル製品利用推進要綱 ・溶融スラグ使用の場合は、凍害 A 法の試験が必要 ・配合率は、汚泥（焼却灰）概ね 40%以上、灰溶融スラグ概ね 20%以上、ガラスカレット概ね 10%以上
大阪府	環境農林水産部	大阪府リサイクル製品認定制度	平成 16 年	下水溶融スラグ	<ul style="list-style-type: none"> ・大阪府リサイクル製品認定要綱 ・プレキャストコンクリートの認定はない
奈良県	くらし創造部	奈良県リサイクル製品認定制度	平成 15 年	一般廃棄物溶融スラグ	<ul style="list-style-type: none"> ・奈良県リサイクル製品利用促進要綱
和歌山県	環境生活部	和歌山県リサイクル製品認定制度	平成 15 年		<ul style="list-style-type: none"> ・和歌山県リサイクル製品の認定及び利用の促進に関する条例、同施行規則
鳥取県	循環型社会推進課	鳥取県認定グリーン商品認定制度	平成 15 年		<ul style="list-style-type: none"> ・しまねグリーン製品認定要綱
島根県	環境生活部	しまねグリーン製品認定制度	平成 16 年 6 月	フライアッシュ	<ul style="list-style-type: none"> ・鳥取県グリーン商品認定要綱 ・配合率 フライアッシュはセメント重量の 10%以上。
岡山県	生活環境部	岡山県エコ製品認定制度	平成 13 年 12 月	高炉スラグ	
広島県	環境部	広島県リサイクル製品登録制度	平成 15 年	高炉スラグ	<ul style="list-style-type: none"> ・広島県生活環境の保全等に関する条例、同施行規則 ・広島県リサイクル製品登録制度実施要領
山口県	環境生活部	山口県リサイクル製品認定制度	平成 12 年 8 月	一般廃棄物溶融スラグ、廃発泡スチロール、がれき類	<ul style="list-style-type: none"> ・山口県リサイクル製品利用推進要綱 ・公共工事地産地消推進モデル事業の対象になる ・指名競争入札の指名の対象となる
徳島県		徳島県リサイクル認定制度	平成 16 年		<ul style="list-style-type: none"> ・徳島県リサイクル認定制度実施要綱
香川県	環境森林部	香川県認定環境配慮モデル	平成 13 年	一般廃棄物溶融スラグ、高炉スラグ	<ul style="list-style-type: none"> ・香川県環境配慮モデル普及促進要綱
愛媛県		愛媛県認定優良リサイクル製品	平成 13 年	溶融スラグ	
高知県	文化環境部	高知県リサイクル製品等認定制度	平成 16 年	一般廃棄物溶融スラグ	<ul style="list-style-type: none"> ・高知県リサイクル製品等認定要綱 ・ブロック製品のみ
福岡県	環境部	福岡県リサイクル製品認定制度	平成 17 年	コンクリート塊、下水汚泥溶融スラグ、一般廃棄物溶融スラグ、鉄鋼スラグ（高炉スラグ、電気炉酸化スラグ）、フライアッシュ	<ul style="list-style-type: none"> ・福岡県リサイクル製品認定制度実施要綱
佐賀県	くらし環境本	佐賀県認定リサイクル製品	平成 13 年 12 月	一般廃棄物溶融スラグ、下水汚泥溶融スラグ、廃ガラス瓶の発泡体、	<ul style="list-style-type: none"> ・佐賀県リサイクル製品利用推進要綱 ・配合率 溶融スラグ概ね 10%以上

第2章 プレキャストコンクリートに関する現状及び既往の研究

	部			焼却灰	・配合率 焼却灰概ね40%以上
大分県	生活環境部	大分県リサイクル製品認定制度	平成15年 12月	熔融スラグ	・大分県リサイクル製品利用推進要綱 ・配合率 熔融スラグ10%以上
長崎県	環境部	長崎県リサイクル製品等認定制度	平成20年 4月	一般廃棄物熔融スラグ、下水汚泥 熔融スラグ、コンクリート塊、陶 磁器くず	・長崎県リサイクル製品等認定制度実施要綱 ・配合率（重量）10%以上
沖縄県	土木建築部 文化環境部	沖縄県リサイクル資材評価認定制 度（ゆいくる）	平成16年 7月	熔融スラグ、廃瓦くず	・沖縄県リサイクル資材評価認定制度実施要綱 ・沖縄県産リサイクル製品使用促進制度 ・製品の認定および発注機関が土木建築部

リサイクル製品認定制度を整備していない自治体名：群馬県、埼玉県、千葉県、東京都、神奈川県、新潟県、京都府、兵庫県、熊本県、宮崎県、鹿児島県

平成21年11月末現在

2.3.4 要求性能の現状

構造物の要求性能は、構造性能、材料性能及び環境等外力への適用性など構造物の種類や要求によって異なるが、おおむね図 2.3.2 の概念図[2.1]にあるように示され、かつ社会情勢に大きく影響される。高度成長時期はドンドン作れ！の掛け声の中、構造性能つまり安全性の確保が第一義の性能であったが、現在のように成熟社会下では、環境への適用性をまず確保することが求められる。したがって、注意しなければならないことは、既存施設の性能照査を行おうとする場合は、その構造物が作られた社会情勢や基準類をまず調査して、さらに現在の要求性能との照らし合わせを行って、初めて既存構造物の性能照査ができると考えられる。特に、配筋詳細は、大地震を受けるごとに強化されている。

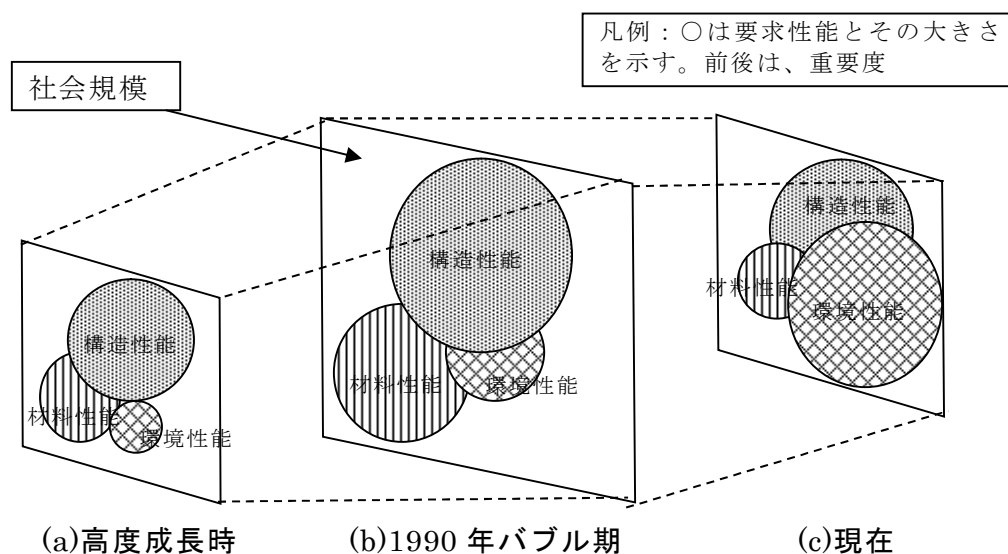


図 2.3.2 社会的便益性を考慮した要求性能の概念[2.1]

また、図 2.3.3 は、社会基盤施設における要求性能の概念を法階層とともに示したものである。発注者は構造物に求める社会的要求及び目的を示すこと（レベル1）から始まり、その目的にあった機能を示す（レベル2）必要がある。これらは法的拘束力がある。次に設計者は機能ごとの要求性能を具現化（レベル3）し、要求性能を検証又は照査（レベル4）する必要がある。この性能照査の手段は、図 2.3.4 に示されるように照査法と見なし規定に分けられる。前者の照査法はさらに照査式や有限要素解析などの高度な数値解析や実験により照査することができる。一方、見なし規定は、過去の経験や数多くの実験結果などから明らかに性能を満足できる仕様として明記できるものを規定したものであり、その代表的なものは「かぶり」である。

プレキャストコンクリートの要求性能は、主に製品寸法と所定強度の2つが求められる。これは工場製品であることから製造による品質管理が人工的に行われ高品質の製品となることから、製造過程での要求性能が省かれていると考

えられる。特に、製品寸法などは剛性が高い鋼製型枠の使用など精度良く製作できるので、プレキャストコンクリートの要求性能は多くが見なし規定でまとめることができると考えられる。特に、2次製品と呼ばれる側溝や歩車道境界などの部材厚さが比較的薄い非構造部材であるプレキャストコンクリートは、要求性能が所要の圧縮強度のみであることからみなし規定を適用することが可能で、多量製造廉価販売のシステムを広めることが必要と考えられる。一方、RCセグメントや大型ボックスカルバートなどは、構造部材でありひび割れ抵抗性や耐久性能、さらに地震時性能など現場打ちコンクリートと同様の要求性能が求められる実験や数値解析など性能照査を行う必要があると考えられる。このようにプレキャストコンクリートは、大型製品から小型製品まで、さらに圧縮強度のみの製品から高抵抗性を必要とする製品まで幅広く存在することから、要求性能毎の分類を行い、それぞれの照査法を明確にする必要がある。

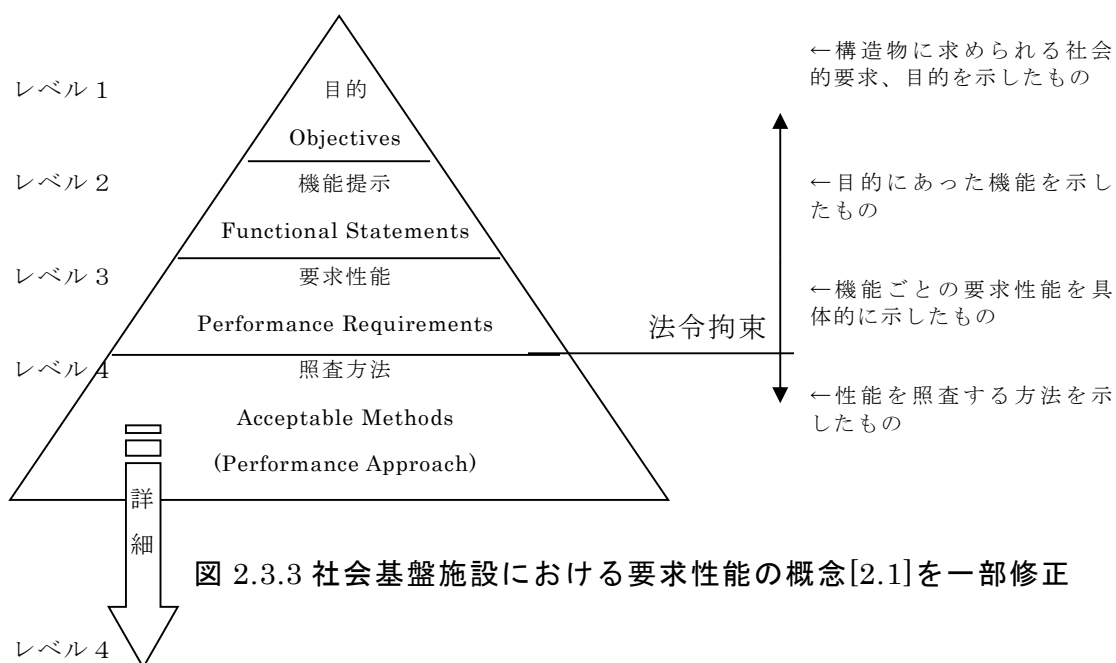


図 2.3.3 社会基盤施設における要求性能の概念[2.1]を一部修正



図 2.3.4 性能照査の手段

2.4 プレキャストコンクリートの製造方法に関する既往の研究

2.4.1 製造方法に関する既往の研究

プレキャストコンクリートの製造方法に関する研究は、プレキャストコンクリートの JIS 化の実験として昭和 20 年代前半に精力的に行われた。この時代のプレキャストコンクリートは、遠心力コンクリート管が主流であったために、フューム管会社を中心に加圧力下での蒸気促進養生いわゆるオートクレーブ養生の研究が行われた。一方、圧力をかけない常圧蒸気促進養生でのコンクリート管の研究も並行してプレキャストコンクリート製品会社で実験等が行われ、これらの結果は JIS プレキャストコンクリートの常圧蒸気養生履歴に反映され表 2.4.1 に示すように歴史的に分類される。蒸気養生履歴は、大きく A から E まで 5 パターン化され、圧縮強度等の性能を満足することが確認されているが、ここで一番重要なのは、使用されている材料が当時の材料であることを認識する必要がある。つまり、当時のセメントは、石灰石を原材料とする現在に比べ純粋セメントであり、骨材も河砂利など良質な骨材、さらに、高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の混和材料の添加は無い。また、化学混和剤もほとんど使用しない固練りのコンクリートであることである。したがって、現在のプレキャストコンクリートの性能確保を行う場合、当然、セメント等材料が異なることから、現在の使用材料による検証を行う必要がある。また、当時の要求性能は圧縮強度のみであったが、現在の性能規定化ではさまざまな機能要求があり、この点からも養生パターンの検証は不可欠な研究テーマである。

表 2.4.1 JIS プレキャストコンクリートの蒸気養生パターンの歴史的分類

パターン	前置時間 (h)	上昇温度速度(°C/h)	最高温度 (°C)	採用時代	代表的 JIS 製品 (管理団体)
A	2 時間以上	15°C/h 以下	35°C 以下	1955 ~ 1959	JISA5310 遠心力コンクリートくい(コンクリートポール・パイル協会)
B	2 時間以上	15°C/h 以下	65°C 以下	1956 ~ 1964	JISA5303 遠心力コンクリート管(全国フューム管協会)
C	3 時間以上	20°C/h 以下	65°C 以下	1960 ~ 1973	JISA5305 鉄筋コンクリート U 形、JISA5307 コンクリート境界ブロック (全国コンクリート製品協会)
D	2 時間以上	20°C/h 以下	75°C 以下	1971 ~ 1981	JISA5309 遠心力コンクリートポール (コンクリートポール・パイル協会)
E	2 時間以上	20°C/h 以下	65°C 以下	1966 ~ 1979	JISA5302 鉄筋コンクリート管、JISA5318 鉄筋コンクリートフリューム (全国コンクリート製品協会)

プレキャストコンクリートの研究は、昭和30年代から昭和40年始めには強度に着目した研究が精力的に行われ、高野[2.5]、郡ら[2.6,2.7]、河野ら[2.8,2.9]、木村ら[2.10,2.11]は、蒸気養生によるコンクリートの製品の養生方法と強度に関する研究を行っている。また、水セメント比、材料の計量、成形、養生の4つが品質管理上の大きなファクターであるが、その中でも養生の項が一番重要なファクターである。これら養生に関する研究は1950年代半ばから1960年代半ばの約10年間にJIS改訂に伴い研究がなされている。これらの総括的な研究として、篠沢[2.12]は、セメント、骨材の種類や水セメント比、養生温度・時間さらにコンクリート面の閉鎖・加圧条件などを変化させて蒸気養生コンクリートの圧縮強度に関する研究を行っている。また、海外に於いてはACI517委員会(Low Pressure Steam Curing)(Chairman J.J.Shideler)[2.13]やRILEM国際会議[2.14,2.15]により精力的に研究発表されている。以上のようにプレキャストコンクリートに関する研究は、昭和初期に精力的に行われたが、JIS制定により研究は終焉し、現在に至っている。

建築分野では、プレキャストコンクリートを柱や梁部材等の構造部材として利用することが基本とされている。杉山等[2.16]は、高温履歴による長期性能に及ぼす影響評価を行い、初期強度が高い場合は長期強度の伸びが小さいことなどを示した。これらの成果は日本建築学会 JASS10 の基礎研究として採用されている。

最近の研究では、筆者ら[2.17,2.18,2.19]は、昨今のセメント材料の品質の変化[2.1]に着目し、最近のセメント及び混和材を用いたプレキャストコンクリートの研究を行った。特に、蒸気養生履歴環境下では、履歴による圧縮強度の変化が大きく寄与するため圧縮強度を評価する新たな指標として蒸気積算温度[2.19]を提案している。さらに、フライアッシュセメントの場合の蒸気養生履歴の影響について研究[2.21,2.22]を行い蒸気養生下のポゾランについてまとめている。また、(財)セメント協会[2.23]では、図2.4.1に示すように普通セメント、早強セメントさらに高炉スラグセメントを用いた場合の養生履歴の影響を研究している。早強セメントの場合は、標準養生と蒸気養生の材令28日圧縮強度比はほぼ同じ水準であるが、普通セメント及び高炉セメントを用いた場合には、強度比が大きく低下することが示されている。また、セメント以外でも使用する骨材や空気量の設定などさまざまな要因により強度発現が大きく変化することも示されている。

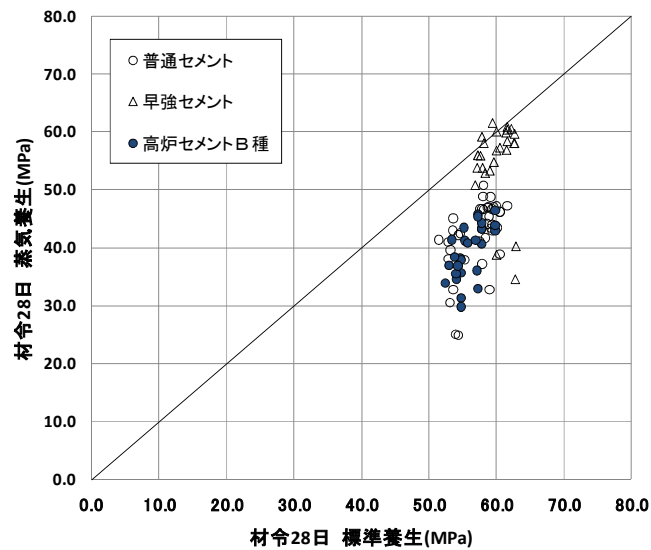


図 2.4.1 蒸気養生と標準養生における材齢 28 日強度（セメント協会）[2.22]

2.4.2 材料に関する既往の研究

プレキャストコンクリートの製造効率化に関する使用材料の研究は、ほとんど存在せず、他の用途に開発されたものを転用したものがいくつか存在するのみである。その代表的なものが、早期脱型に関する研究である。中でも（財）土木研究センターでは、超早強コンクリート利用技術マニュアル[2.23]が整備されており、本マニュアルの目的は、橋りょうジョイント部の補修工事や緊急工事などの早期交通開放が必要な部材への超早強コンクリートの適用を示したものである。なお、本マニュアルでは、プレキャストコンクリートの早期脱型への適用も示唆されているがコスト高であることと促進養生環境下での検証が出来ていないことから実用的にはほとんど採用されていない。なお、ここでは超早強コンクリートの特徴として材令 1 日圧縮強度を 30N/mm^2 以上で、生コンと同じ施工ができ練混ぜてから 1 時間以上の作業時間が確保できるコンクリートとしている。また、製法は、早強ポルトランドセメントに超早強性混和材及び超早強コンクリート用高性能 AE 減水剤を使用して製造するタイプの混和材系とカルシウムサルフェート系鉱物を主成分とする超早強セメントに JISA6204 に適合する高性能 AE 減水剤を用いるタイプのセメント系の 2 種類が存在する。なお、市販の超早硬コンクリート（商品名：ジェットセメント($\text{C}_{11}\text{A}_7\text{CAF}_2$)、スーパーセメントなど）は、硬化時間を早める役割であり強度を早めることは目的が異なると考えられる。

以上示したようにプレキャストコンクリートの製造方法に関する既往の研究

を示したが、現在、プレキャストコンクリートが直面した製造方法の効率化問題に適応する研究はほとんど行われていない現状である。

一方、既存のセメントを微粉砕することで比表面積を大きくし水和反応を向上させる手法がある。この微粉砕セメントに関する研究は、1980年代後半に山田ら[2.25]、岡林[2.26]による研究があるのみである。その後2000年になって、筆者ら[2.27]は、プレキャストコンクリートの初期圧縮強度向上の目的で微粉砕セメントの開発を行った。このように微粉砕セメントに関する研究が少ない理由は、微粉砕セメントの製造にかかる費用が高価で実用性に乏しいことが上げられる。なお、筆者らはこの問題に対して中国で製造システムを構築することで実用化できるコストまで削減に成功している。

2.5 プレキャストコンクリートの活用に関する国等の施策

2.5.1 国土交通省における施工合理化対策 i-construction

国土交通省は、建設分野において生産年齢人口の減少及び高齢化が極めて早いスピードで進んでいる現状を踏まえ建設現場における生産性を向上させるための革命の必要性を唱えて、平成27年12月に「i-construction～建設現場の生産性革命～」[2.28]を提唱した。この生産性革命には様々な提唱があり、中でも、コンクリート工の規格の標準化等をテーマとしたプレキャストコンクリートによる生産性向上を掲げている。

一方、土木学会コンクリート委員会でも同様の主旨から平成28年「生産性および品質の向上のためのコンクリート構造物の設計・施工研究小委員会」（石橋委員長）を設置し、コンクリート構造物の構築において、品質を確保したうえで生産性の向上を可能とすることを目的として、発注者の仕様書やコンクリート標準示方書等を変更していくための調査研究活動を1年間行い、その成果を取り纏めコンクリートライブラリー「コンクリート構造物における品質を確保した生産性向上に関する提案」[2.29]を発刊した。そして、国土交通省への提案として、表2.5.1に示される施策の提案を行った。これはプレキャストコンクリートに関する提案の抜粋であるが、生産性向上やリサイクル材の使用など現状の問題点が指摘されている。

なお、事例紹介の中で、適用理由のほとんどが工期の短縮であることが示されているが、問題点として工期の短縮の優位性に対して積算基準による対応がないことが指摘されている。

表 2.5.1 土木学会コンクリートライブラリー148 からの提案[2.29]

3章プレキャストコンクリート	3.1 プレキャストコンクリートの形状の規格化による生産性向上を図る	プレキャストコンクリートの形状の規格化により生産性向上を図る
	3.3 プレキャストコンクリートの設計法を明確にする	低水セメント比コンクリート使用時の耐久性照査を検討
	3.4 プレキャストコンクリートの使用材料の選択肢を拡大	リサイクル材料の活用の規定を検討
	3.6 プレキャストコンクリートの施工法・品質管理方法を明確化する	プレキャスト製品の強度管理方法を検討（温度追従養生による供試体で管理） 工場製品の適切な養生方法を選択できる環境を整備（コンクリート標準示方書の工場製品の養生法によらない）
4章発注、契約、その他	4.4 プレキャストコンクリートの活用を推進する仕組みを検討する	プレキャストコンクリート工法の積算方法を検討

2.5.2 超高強度繊維補強コンクリートの施工

コンクリートの高耐久性を目的に開発されたものが、「超高強度繊維補強コンクリート」であり、商品名として、ダクトル（開発者：太平洋セメント、大成建設）、サクセム（開発者：鹿島建設、住友大阪セメント）がある。これらは、いわゆるプレキャストコンクリートの高耐久版としての位置付けであり、材料の選定はもとより製造過程の養生等を特に厳密に行ったものである。

このダクトルを用いた国内最初の構造物が「酒田みらい橋」[2.30]であり、現在竣工後15年を経過しているが、物質移行特性はほぼ零の浸透深さである。また、収縮特性も 50×10^{-6} 程度であり安定性に優れた製品となっている。

なお、本工法は、羽田空港拡張工事のD滑走路の床版にも採用されており、今後は、超長期にわたり放射性核種移行抑制が求められる放射性廃棄物埋設分野でも有効と考えられる。

2.5.3 建築分野でのプレキャスト化への取り組み

建築分野では、従来から部材のプレキャスト化が進んでいる。日本建築学会では、昭和40(1965)年に「建築工事標準仕様書 JASS10 プレキャスト鉄筋コンクリート工事」が制定されたのを皮切りに、その後、1972年、1978年、1991年及び2003年に改定されてきており、プレキャスト鉄筋コンクリート構造に関しては、壁式からラーメン構造へと拡大され、近年では、柱、梁部材に適用するため高強度化がさらに進み、設計基準強度で 60N/mm^2 を超えるプレキャスト部材を用いた高層住宅の建設も多く行われており、現在は2013年版が最新であ

る。

このように建築分野では、構造部材として発展してきており、土木分野の非構造部材の製品とは大きく異なっている。したがって、冒頭でも述べたが JIS プレキャストコンクリートは、土木分野を対象とし、建築分野の製品は対象としない理由がここにある。

土木プレキャストコンクリートもこの建築分野の動向や技術基準を参考に、土木構造物の技術基準の制定に早急に向かうべきと考えられる。

2.5.4 秋田県におけるフライアッシュコンクリートの適用

フライアッシュセメントのプレキャストコンクリートへの適用は、フライアッシュによる強度発現が遅いことから、適用事例は非常に少ない。特に、国等の適用基準に最初に適用したのが秋田県による適用基準の整備である[2.31]。また、フライアッシュセメントの適用でもう一つの欠点は、フライアッシュの産出場所が石炭燃料火力発電所であり、運搬等の費用から約 60km 圏内での適用が限界である。秋田県内には、東北電力(株)能代火力発電所が立地しており、さらに、能代火力発電所から算出されるフライアッシュはセメント混和材としての性能が優れている特徴がある。筆者らは、平成 17 年頃、秋田県の補助事業においてプレキャストコンクリートへのフライアッシュセメントの提案を行い採択されている。これを契機に秋田県では、フライアッシュセメントの採用に向けた基準整備が進み、平成 24 年には、プレキャストコンクリート製品使用基準[2.31]整備した。

2.6 まとめ

プレキャストコンクリートの規格や基準の現状を JIS の歴史的変遷の視点からまとめ、問題点の抽出や昨今の環境対策の要求に対する各自治体の制度設計についてもまとめた。また、コンクリート構築におけるプレキャストコンクリートと現場打ちコンクリートの 2 つの手法の設計法から施工法、さらに性能等の違いを比較することでプレキャストコンクリートの利点や優位性を明らかにしたところ、性能の優位性の他、工期の優位性などが現行積算基準にまったく反映されていないことが判明し、採用機会の障壁となっていることが分かった。また、製造効率化のニーズの中で、技術基準が整備されていないなど現行 JIS 制度に不備があるものの、現行規定の中で適切な材料の使用や蒸気養生履歴の最適化ができる製造効率化に関する技術的対策のニーズがあることがわかった。

【2章 参考文献】

2.1 土木学会コンクリート委員会:混和材料を使用したコンクリートの物性変化と耐久性能評価研究小委員会(333)最終成果報告書 No.2、コンクリート技術

シリーズ 89、2010.5.24

- 2.2 セメント協会、2010.1.28 プレス発表
- 2.3 国土交通省、建設投資、<http://www.milt.go.jp/report/>
- 2.4 ナノセメント研究会報、美粉 2、2007.5.1 発行
- 2.5 高野俊介、柳川晃夫：初期養生がモルタルおよびコンクリートの強度に及ぼす影響、セメント技術年報 VII、昭和 28 年
- 2.6 郡道夫、井上肇：蒸気養生を施したコンクリートの二次養生方法と強度との関係についての一実験、セメント技術年報 XIII、昭和 34 年
- 2.7 郡道夫、井上肇、水野弘：蒸気養生時間と養生温度の変化がコンクリートの圧縮強度におよぼす影響、セメント技術年報 XV、昭和 36 年
- 2.8 河野清、江村建三、木下幸一：蒸気養生後の養生条件がコンクリート圧縮強度におよぼす影響、セメント技術年報 XIV、昭和 40 年
- 2.9 河野清、大塩明、江村建三、木下幸一：プレハブ部材用コンクリートの蒸気養生－セメント種類、単位セメント量および成型温度の影響－、セメント技術年報 XX、昭和 41 年
- 2.10 木村敬三、秋浜繁幸、宍戸良雄：蒸気養生コンクリートの実験研究（その 1）－前置時間、蒸気養生時間、温度上昇速度がコンクリートに与える影響について－、建築学会論文報告集、号外、昭和 41 年 10 月
- 2.11 木村敬三、武井吉一、中島武：蒸気養生コンクリートの実験的研究（その 2）－積算温度と強度発現率－、建築学会論文報告集、号外、昭和 41 年 10 月
- 2.12 篠沢和久：蒸気養生コンクリートの圧縮強度に関する研究、建築研究報告、建設省建築研究所、第 52 号、昭和 43 年 3 月
- 2.13 ACI Committee 517、Low Pressure Steam Curing、Journal of ACI、No.8、1963
- 2.14 河野清：コンクリートの硬化促進に関する RILEM 国際会議における諸論文の紹介①コンクリートの硬化促進の方法とその物理・化学的基礎、コンクリート・ジャーナル、Vol.13、No.5、昭和 40 年 6 月
- 2.15 河野清：コンクリートの硬化促進に関する RILEM 国際会議における諸論文の紹介②100℃までの常圧蒸気養生および加熱処理とその改善、コンクリート・ジャーナル、Vol.13、No.6、昭和 40 年 6 月
- 2.16 杉山央、舛田佳寛、岩井信彰、中川侑治、大断面プレキャストコンクリート部材製造時の温度履歴特性、日本建築学会技術報告集、第 14 号、pp13-18、2001.12
- 2.17 富樫宏二、中島毅大、入江正明、梅村靖弘：フライアッシュコンクリート製品の強度発現に及ぼす促進養生の影響、土木学会第 62 回年次学術講演会概要集、Vol.63、2007.9、pp467-468

- 2.18 入江正明、梅村靖弘、小泉公志郎、露木尚光：微粉セメントを混和した硬化体の強度発現と収縮の特性、第 63 回セメント技術大会、2009、pp20-21、(財)セメント協会
- 2.19 野口堯世、入江正明、梅村靖弘：微粉碎セメントによる初期圧縮強度の改善効果、土木学会第 64 回年次学術講演会(平成 21 年 9 月)、V-302、2009.9、pp601-602
- 2.20 入江正明、鏡健太、梅村靖弘：高温養生履歴を受けるフライアッシュコンクリート製品の圧縮強度特性、土木学会混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会(NO.2)報告書およびシンポジウム論文集、2010.5.24、pp371-378、コンクリート技術シリーズ 89
- 2.21 鏡健太、入江正明、小泉公志郎、梅村靖弘：フライアッシュモルタルの強度に及ぼす蒸気養生履歴の影響、日本コンクリート工学協会年次(2010)論文報告集、Vo.32、No.1、pp1481-1486、2010
- 2.22 鏡健太、入江正明、小泉公志郎、梅村靖弘：蒸気養生したフライアッシュモルタルの強度に及ぼす温度履歴の影響、第 64 回セメント技術大会、2010、(財)セメント協会、pp186-187
- 2.23 セメント協会 F-53、蒸気養生条件がコンクリートの強度発現に及ぼす影響、コンクリート専門委員会報告、2006.3
- 2.24 財団法人土木研究センター：超早強コンクリート利用技術マニュアル、平成 12 年 8 月
- 2.25 山田雅稔、森部紀晴、中島浩二：微粉碎セメントに関する研究、セメント技術年報 41、昭和 62 年、pp82-85
- 2.26 岡林茂生：高微粉碎セメントの物性、セメント技術年報 42、昭和 63 年、pp60-63
- 2.27 入江正明他：特願 2006-142268「セメント微粉末およびそれを利用するプレキャストコンクリート用組成物」
- 2.28 たとえば、国土交通省：i-Construction ～建設現場の生産性革命～、平成 28 年 4 月、i-Construction 委員会
- 2.29 土木学会コンクリート委員会：コンクリートライブラリー148「コンクリート構造物における品質を確保した生産性向上に関する提案」、2016.12
- 2.30 【報道機関向け配布資料】超高強度繊維補強コンクリートを用いた日本初のプレストレストコンクリート歩道橋酒田みらい橋竣工 10 年目の耐久性検証調査 2013 年 5 月 28 日、大成建設・太平洋セメント・前田製管
- 2.31 秋田県建設部、フライアッシュ混合プレキャストコンクリート製品使用基準、平成 24 年 9 月

第3章 コンクリート構造物に関する技術基準

3.1 はじめに

社会基盤整備におけるコンクリート構造物（以下「コンクリート構造物」という。）は、一般に国土交通省等の国や地方自治体（以下「国等」という。）が整備することから、構造物に求められる機能（以下「要求機能」という。）は国により法律等に規定されている。また、構造物の要求機能に対する性能目標や規格等についても政令や省令・告示等の下位規定に制度化され公開されている。

コンクリート構造物の構造設計は、国等が直接行うことから要求機能に対する要求性能や仕様について具現化した基準も国等により制度化されている。この制度は戦前の内務省時代の直営直轄方式がもたらしたもので、技術レベルは時代変遷とともに向上しているものの制度はそのまま今も残っている。なお、近代社会では国等は行政を司ることを主な業務としていることから技官制度は現存するものの純粋技術を網羅的にかつ最新知見を習得及び把握することは実質的に困難であることから、国等の補助者として建設コンサルタントを充てて設計業務を補助させている¹。したがって、法制度的には設計者はあくまで国等であり建設コンサルタントは補助者にすぎない。また、設計監理においても同様で、そのため、国等は発注者であり設計者でありかつ設計監理者の3者を兼ね、責任の所在とともに公平性・透明性が高く求められる状況にある。一方、工事に関しては、高度成長による建設量の増大等に伴い民間へ委任する請負方式へ移行し制度化されたところである。この制度は、民間開放の観点では評価されるが一方で民間であるがゆえに経済性が優先され必ずしも品質確保の観点では機能しない場合があり、特に近年の下請階層化が進む現状では手抜き・施工不良等の施工管理が難しく、不具合の発生や補修等によるライフサイクルコストの増大をもたらしている。こうした観点から、設計施工の制度化の見直しが必要で、行政＝発注者、設計＝技術者、設計監理＝第三者機関、など責任の所在の明確化が必須と考えられ、たとえば、設計における対策として建設コンサルタントを法的に設計者とするなどの省令等の制度改正が必要である²。

現行の国等の設計に関する性能や照査方法を示した基準は、技術上の基準（以下「技術基準」という。）と呼ばれ、所管分野ごとに整備が行われている。それは、構造物の

¹ 国の法制度では、国民の負託を受けた国等が発注者であり、かつ、設計者となっている。しかし、実際の設計図書（図面及び計算書並びに仕様書等）の作成は、設計請負の建設コンサルタント等が行う。請負業務であることから、設計発注仕様書に沿った設計業務を行い、基本的に提案業務等は存在しない。したがって、建設コンサルタントは、設計の品質を確保することが最大の目的となる。

² 調査・設計等分野における品質確保に関する懇談会（主査 小澤東大教授）が設置され審議されているが、本来、設計等の品質を向上させるためには、資格の付与よりも責任の明確化が重要な視点であり、そういった観点では、省令等により建設コンサルタントを設計者と明確に規定し責任をもたせる必要がある。

要求機能は一義的に人命の確保であり構造物ごとには変わらないが、構造物の役割ごとに機能が追加要求される必要がある。このため構造物ごとの追加要求機能を規定するために、構造物の所管ごとに技術基準を整備することになってくる。具体的には、道路構造物は、法律として道路法が整備され道路の設置目的が示されている。また政令として道路施行令及び道路構造令が規定され、省令には道路施行規則及び道路構造令施行規則が規定されて道路構造の基本的な考え方が示されている。しかし、基本的考え方だけでは具体的に道路橋の設計が出来ないことから「橋、高架の道路等の技術基準」（以下「道路橋示方書」という。）として具体的な目標性能を作成し、地方整備局や関係機関へ通知又は通達として周知徹底させている。なお、この目標性能に対する仕様や性能照査法を示したのが道路橋示方書のうち、同解説で示したもの（以下「道示解説」という。）である。つまり、この示方書の□（四角）で囲まれた部分が通知（＝道路橋示方書）で示された目標性能で、□の下に示されている解説（＝道示解説）が、具体的性能照査手法や検証法、場合によっては仕様を示したものとなっている³。また、港湾施設に関しては「港湾の施設の技術上の基準を定める省令」が制定され、同様に河川、道路、港湾、営繕、鉄道ごとの所管ごとにこれらの技術基準が整備されている。これらの技術基準の法整備の位置づけは各所管毎に多少異なるが、設計の基本的考え方は同じ思想となっている。

構造物の設計体系は、時代の変遷に合わせて変化し、従来の許容応力度設計法から世界的に性能規定型体系が主流になりつつあり、土木構造物の分野では、港湾構造物がいち早く平成 19(2007)年に、鉄道施設が平成 21(2009)年に性能規定型に移行し、道路橋示方書は、平成 29(2017)年に一部移行が予定されている。なお、土木学会コンクリート標準示方書【設計編】は国内で最も早い平成 14(2002)年に性能規定型に移行したが、土木学会等の民間団体は、法制度的にはあくまで民間規格であり、国等が直接適用する基準ではない。

3.2 設計に関する技術基準の法的位置づけ

3.2.1 法律階層

国内における法律は、どの分野においても法律、政令及び省令（以下「法令等」という。）の階層構造となっている（図 3.2.1 参照）。法律は国会決議により、政令は政府決議（閣議決定等）により、省令は所管官庁の大臣等により制定されることとなっている。また、特殊なケースとしては国家行政組織法第 3 条により設置された原子力規制委員会等では、省令と同階層の委員会規則として制定できることになっている。

法令等の位置づけは、図 3.2.1 に示すように法律（レベル 1 階層）は目的、政令（レベル 2 階層）は目的に合った機能を提示したもの、省令及び規則（レベル 3 階層）は機

³ 道路橋示方書の目標性能と解説の関係は、建設コンサルタントの設計補助者でも法的位置付けを意外と知らない技術者が多い。

能ごとの要求性能を具体的に示したもので、これら法令等は法的拘束力をもっており、国等の発注者が提示するものである。また、これらの法令等で示された機能及び要求性能を検証及び照査するための適合性の方法を示したものがレベル4階層である。このレベル4階層は、法的拘束力を持つ告示や所管からの通知・通達、さらに法的拘束力のない民間規格による検証・照査法などの基準などで構成されている。なお、図 3.2.1 には、道路施設を例にとり、該当する法令等も併記した。

海外では構造物の設計における法体系を階層レベルで表現したもので代表的なものが、昭和 53(1978)年の NORDIC 基準[3.1]である。この NORDIC 基準は建築構造物を対象としているが、いわゆる Structure を示したもので、日本では土木構造や建築構造を対象としたものである。

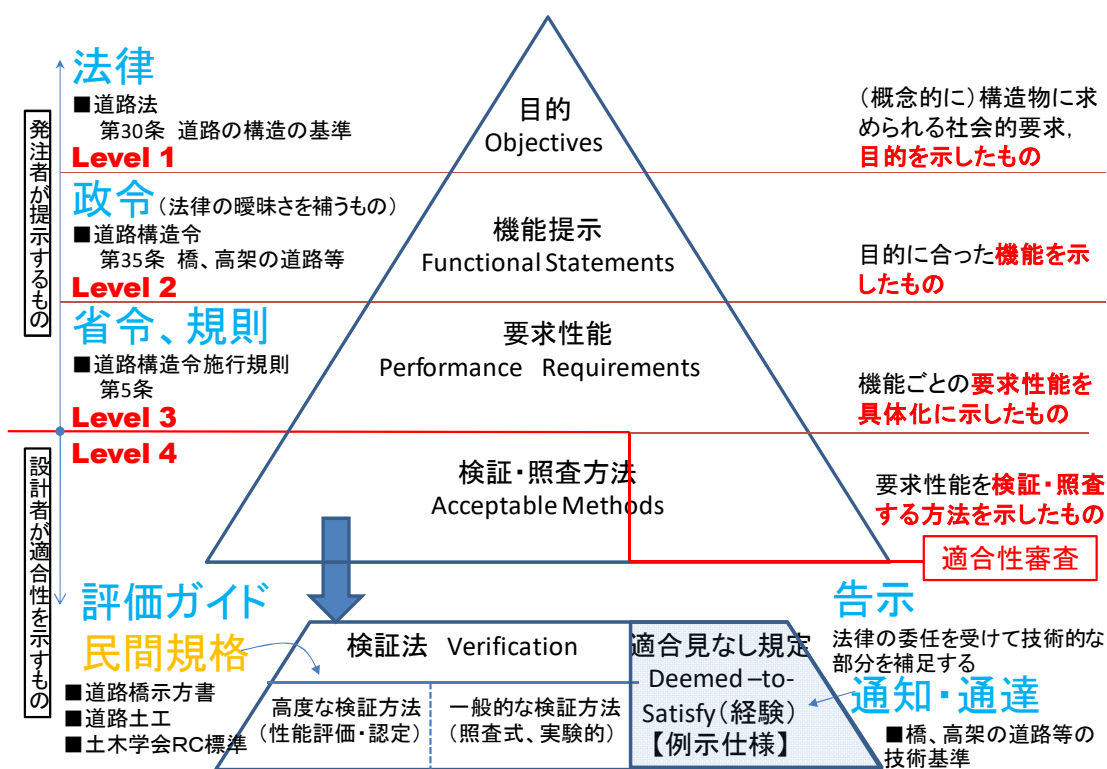


図 3.2.1 法制度の階層と橋、道路等の技術基準の例

3.2.2 分野ごとの技術基準と位置付けの違い

図 3.2.1 に示した法令等の階層を行政部局ごとに構造物の設計基準を具体的に示したものが表 3.2.1 である。この表から分かるように社会基盤整備を担当する国土交通省では、所管ごとに技術基準を整備している。しかし、技術基準の法令上の立ち位置は異なっていることが分かる。

土木構造物の設計基準体系は、道路に関する設計で代表されるように法令等に基本的考え方及び機能等を規定したものを、通知通達により各発注部署に周知徹底し、具体的

検証法として技術基準を整備している。技術基準は、法的位置づけにより設計基準の適用が異なり、省令・告示等で規定された場合は、必ず守るべき規定となるが、いわゆる内規での規定であれば技術的要件を満足する一例を示したもので、設計者は十分な技術的根拠を示すことが出来れば法令要求に対して適合と判断するものであり、したがって、新知見等に関しては個別対応、発注仕様書等や行政判断で変更追加可能である制度となっている。なお、新知見等が法令要件等に適合しているかどうかの判断は、一般には専門的学術有識者による委員会を設置して決定されている。一方、建築営繕に関しては、法律（建築基準法）そのものが技術基準となっている点が興味深い。したがって、最新知見や追加規定などは、個別の告示により規定しているため、他の部局に比べ告示の数が非常に多い。これは、営繕は、発注者が必ずしも国等ではなく、民間事業がメインであることから、「建築確認」による制度を構築しているからである。つまり、個々の建屋性能について告示等技術基準を満足していることを自治体の建築主事が「確認」⁴する体系で、道路等の公共土木と法体系が異なっている。また、現在の鉄道は、民間事業になったことで、事業認可となっているが、構造物の設計の技術基準を国が整備しており、これは、国鉄時代からの名残であり、道路と建築の中間的制度と考えられる。

また、これらの制度の違いは、設計者資格にも表れている。建築営繕の資格制度は、設計者に国家資格の一級建築士（国土交通省所管）等の業務独占資格の取得を義務付けている。したがって、一般に個人が設計者となり、その責任も負う制度である⁵。一方、土木設計の場合は設計者が国等であるため資格要件は存在せず、国等の担当者個人にも国家資格は必要としない。しかし、実際の設計図書等を作成する設計補助者の建設コンサルタントに対しては、技術士⁶登録や個人の技術士等の資格を求めることがある。この技術士は業務独占の国家資格ではなく、旧科学技術庁（現在は文部科学省）の国家認定資格であり、所定の技術的能力を有していることを認定したものである。このように、国の技術基準は、設計者が誰であるかによって制度や責任の所在が異なることがわかる。

⁴ 建築確認は、現行では国が決定した「確認登録機関」において確認を受けることができる。

⁵ 組織建築設計事務所の場合は、一級建築士の登録を代表建築士が行う。

⁶ 技術士資格は、文部科学省の国家認定資格であり、医師や一級建築士、測量士等の業務独占資格でない。技術者が所定の能力を有していることを認定する「認定資格」であり、公共土木設計においては、法令等で要求する必ずしも必要な資格ではない。一般には、発注仕様書等で技術士等の専任又は登録等の要件が示されている。なお、国土交通省では、「公共工事に関する調査及び設計等の品質確保に資する技術者登録規程」を設け、告示により法的拘束力をもたせて、品質向上を制度化したが、「品質確保＝資格登録」としており、本来あるべき人材育成としての「技術力向上」に対して、必ずしも直接的に機能しないと思われる。

表 3.2.1 規制行政の法体系とコンクリート構造物等の設計に関する技術基準の位置づけ

行政部局		河川・ダム・下水 (水管理・国土保全局)	道路 (道路局)	港湾・海岸 (港湾局)	営繕 (住宅局)	鉄道 (鉄道局)	放射性廃棄物埋設施設 (原子力規制委員会)	
法階層	許認可	都市計画事業認可 (包括的な施設の許認可)			届出・認可	(基準適合認可)	事業認可 (基準適合認可)	事業許可 (許可基準適合)
事業者	設計者	国、地方自治体等			民間事業者	鉄道事業者	電力事業者	
設計補助者		建設コンサルタント等技術士			一級建築士等	—	—	
法体系	法律	河川法 (昭和 39 年法第 167 号)	道路法 (昭和 27 年法第 180 号)	港湾法 (昭和 25 年法第 218 号) 海岸法 (昭和 31 年法第 101 号) 運河法 (大正 2 年法第 16 号)	○建築基準法 (昭和 25 年法第 201 号)	鉄道事業法 (昭和 61 年法第 92 号)	電気事業法 (昭和 39 年法第 170 号) 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規則に関する法律 (原子炉規制法) (昭和 32 年法第 166 号)	
	政令	・河川法施行令 (昭和 40 年政令第 14 号) ○河川管理施設等構造令 (昭和 51 年政令第 199 号)	・道路法施行令 (昭和 27 年政令第 479 号) ○道路構造令 (昭和 45 年政令第 320 号)	・港湾法施行令 (昭和 26 年政令第 4 号) ・海岸法施行令 (昭和 31 年政令第 332 号)	・建築基準法施行令 (昭和 25 年政令第 338 号)	—	・原子炉規制法施行令 (昭和 32 年政令第 324 号)	
	省令規則	・河川法施行規則 (昭和 40 年建設省令第 7 号) ○河川管理施設等構造令施行規則 (昭和 51 年建設省令第 13 号) ・河川法施行細則 (昭和 48 年規則第 3 号)	・道路法施行規則 (昭和 27 年建設省令第 25 号) ○道路構造令施行規則 (昭和 46 年建設省令第 7 号)	・港湾法施行規則 (昭和 26 年運輸省令第 98 号) ○港湾の施設の技術上の基準を定める省令 (昭和 49 年運輸省令第 30 号) ・海岸法施行規則 (昭和 31 年農林省・運輸省・建設省令第 1 号) ・海岸保全施設の技術上の基準を定める省令 (平成 16 年農林水産省・国土交通省令第 1 号) ・運河法施行規則 (大正 2 年内閣府令第 17 号)	・建築基準法施行規則 (昭和 25 年建設省令第 40 号)	・鉄道事業法施行規則 (昭和 62 年運輸省令第 6 号) ○鉄道に関する技術上の基準を定める省令 (平成 13 年国交省令第 151 号)	・核燃料物質又は核燃料物質によつて汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則 (昭和 63 年総理府令第 1 号) ○第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則 (平成 25 年原子力規制委員会規則第 30 号)	
	告示	・河川法施行規則第 2 7 条の 2 第一項第一号及び第二号に規定する国土交通大臣の定める要件等を定める告示	・一定の規模以上の空間及び高い開放性を有する通路その他の部分の構造方法を定める件 (国土交通省告示)	○港湾の施設の技術上の基準の細目を定める告示 (運輸省告示第 181 号)	○国家機関の建築物及びその附帯施設の位置、規模及び構造に関する基準 (平成 6 年建設省告示第 2 3 7 9 号)	・特殊鉄道に関する技術上の基準を定める告示 ・鉄道に関する技術上の基準を定める省令の施行	○核燃料物質等の第二種廃棄物埋設に関する措置等に係る技術的細目の告示 (昭和 63 年科学技術庁告示第 2	

	示（国土交通省告示第 400 号）	第 786 号） ・道路法第 46 条第三項並びに道路法施行令第 19 条の十二及び第 19 条の十三の規定に基づく危険物を積載する車両の水底トンネルの通行の禁止又は制限（関東地方整備局告示第 345 号） ・大深度地下の公共的使用に関する基本方針（国土交通省告示第 467 号）		○基準法施行令の告示 <u>構造関連告示</u> ○壁式ラーメン鉄筋コンクリート造の建築物又は建築物の構造部分の構造方法（国交省告示第 1025 号） に関する安全上必要な技術的基準を定める等の件 ○壁式鉄筋コンクリート造の建築物又は建築物の構造部分の構造方法に関する安全上必要な技術的基準を定める件（国交省告示第 1026 号） ○防火構造の構造方法を定める件（建設省告示第 1359 号） ○壁等の構造方法を定める件（国交省告示第 250 号） ○建築物の基礎、主要構造部等に使用する建築材料並びにこれらの建築材料が適合すべき日本工業規格又は日本農林規格及び品質に関する技術的基準を定める件（建設省告示第 1446 号）	及びこれに伴う国土交通省関係省令の整備等に関する省令第一条第三号の規定による廃止前の普通鉄道構造規則第 4 4 条第二項、第 4 6 条から第 4 8 条まで、第 6 0 条から第 1 3 9 条第二項の基準を定める告示（運輸省告示第 177 号）	号）
内規	・ダム検査規程（建設省訓令第 2 号）		○防波堤の耐津波設計ガイドライン（平成 27 年 12 月）	○官庁施設の基本的性能基準（平成 27 年国営整第 299 号） ○建築構造設計基準（平成 25 年国営整第 39 号） ○建築構造設計基準の資料（平成 27 年国営整第 288 号）		○第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈 ・第二種廃棄物埋設事業に係る廃棄物埋設施設における保安規定の審査基準 ・第二種廃棄物埋設施設の定期的な評価等に関する運用ガイド ・廃棄物埋設施設確認に関する運用要領 ・廃棄物確認に関する運用要領 ・核燃料施設等保安検査実施要領
通知通達	○（通達）河川管理施設等構造令及び同令施行規則の運用について	○（通知）橋、高架の道路等の技術基準 ○（通達）第二東海自動車道及び近畿自動車道名古屋	○（通達）改正港湾法の施行について	○（通知）建築物の構造耐力上の安全確保に係る措置について（建設省住指発第 176 号） ○（通達）建築基準法の一部を	○（通知）鉄道に関する技術上の基準を定める省令等の解釈基準	

			神 戸線に係る構造基準等につ いて ○(通達)道路構造令の施 行について(建設省道発第 303号) ○(通達)道路トンネル技 術基準(一部改正)について ○(通達)駐車場設計・施 工指針について(道企発第 40号)		改正する法律等の施行につ いて			
	その他	<ul style="list-style-type: none"> ・土木工事共通仕様書(国土交通省) ・国土交通省制定 土木構造物標準設計(全日本建設技術協会) ・大深度土留め設計・施工指針(案)(先端建設技術センター) 						
民間規格	強制規格又は 委任規格	○河川防災技術基準・同解 説(日本河川協会) ○ダム・堰施設技術基準(ダ ム・堰施設技術協会) ○改訂 解説・河川管理施設 等構造令(日本河川協会)	○道路構造令の解説と運用 (日本道路協会) ○道路橋示方書・同解説(日 本道路協会) ○道路トンネル技術基準・ 同解説(日本道路協会) ○道路土工・同解説(日本 道路協会) ○シールドトンネル設計・ 施工指針(日本道路協会)	○港湾の施設の技術上の基 準・同解説((一財)沿岸 技術研究センター)		○鉄道構造物等設計標 準・同解説(鉄道総合技 術研究所)		
		○J I S(日本規格協会)						
	参考基 準	<ul style="list-style-type: none"> ・土木学会コンクリート標準示方書【設計編】 ・土木学会トンネル標準示方書 ・土木学会鋼・合成構造標準示方書 ・地中送電線用深部立坑、洞道の調査・設計・施工・計測指針(日本トンネル技術協会) ・地中構造物の建設に伴う近接施工指針(改訂版)(日本トンネル技術協会) 						<ul style="list-style-type: none"> ・JEAC ・JEAG ・日本原子力学会標準

注) 政令, 省令, 基準などは代表的なものを示した。「通知」は行政同士の助言、「通達」は行政下位に対する命令(義務)

ここに示す法令に於いては、バックフィット規定はない。現状法令でバックフィット規定がある法律は、消防法(昭和23年法律第186号)第17条の2第二項と原子炉等規制法第43条の3の23。

○: 構造物設計の技術基準

【参考情報】国等の行政行為は、以下のよう分類できる。

許可(permission): 法律に基づき一般的に禁止されている行為について、特定の場合又は相手方に限ってその禁止を解除するという法律効果を有する行政行為をいう。

認可(approval): 行政法学において、行政行為のうち行為を補充して法律行為の効力要件とするもの。認可の申請があった場合、行政は、当事者が必要とする要件を満たしていると認めれば認可を行う。

確認(confirm): 規定に適合しているかどうかを審査する行政行為

3.2.3 材料設計に関する法的位置付け

現行の国等の道路橋や港湾栈橋等のコンクリート構造物の設計では、材料設計の概念は存在しない。現行制度では、構造設計では材料は「設定」又は「選択」であり、設定される必要強度を JIS 生コンから選択することで性能を満足とする「見なし規定」⁷となっている。これは、構造物の供用期間がおおむね 80 年⁸以内であることから、「材料の変質が構造性能には及ぼさない」こと的前提が存在するからである。また、塩害環境化での塩化物イオンの拡散及び鋼材腐食が挙げられるが、前者は物質の変化（＝化学的变化）を伴わない物理現象であり、変質に加える必要はない。後者の鋼材腐食は、列記とした化学的腐食現象であり材料劣化の位置づけであるが、材料の設計の位置付けにはない。一方、中性化現象はセメント材料の化学的劣化であり、材料の変質を伴うが、この場合の対応は、特殊的に材料の設定を見直すことになるが、材料の品質や性能を加味した材料設計を行うのではなく、経験的に強度増（単位セメント量の増加の意味で）として設定の変更を行っているに過ぎず、あくまで、「材料設定」の域を超えない体系であり、この場合も材料設計は行わない。したがって、道路橋示方書では、一部塩害環境下における考え方を導入する方向にあるが、要求機能として明確に要求したものではない。

なお、現行において材料設計を要求する唯一の施設は、原子力分野における中深度処分放射性廃棄物埋設施設のセメント系工学バリアの設計である[3.2,3.3]。この施設設計に於いては、閉鎖措置後の約 400 年間（廃棄体定置から 450 年程度）の放射性核種の封じ込め（ゼロリリース）を要求することから、放射性核種の実効拡散や透水さらに吸着特性等を考慮した材料設計は必須のものとなっている⁹。したがって、数百年間におよぶセメント硬化体の物質安定性（ここでは、トバモライト結晶の安定性）を評価する必要があり、従来の評価手法である熱力学的データベースを利用した評価は、C-S-H 結晶の進展や劣化等の時間変化などの解析が出来ないことから、この手法では長期に渡ってのセメント硬化体が安定であることの技術的評価法とはならない。つまり、評価手

⁷ 見なし規定：かぶり○mm、鉄筋間隔@○mm等の規定は仕様規定となっている。これは、この仕様を満足することで所定の要求性能を満足する見なしであり、過去の実績や実験データからすでに解明又は証明されているからの規定である。なお、見なし規定も性能規定型設計体系の一部に含まれる（図 3.2.1 参照）。

⁸ 供用期間：法令等で供用期間を示した規定は存在しない。なお、財務省「減価償却資産の耐用年数等に関する省令」の規定は存在し、上水道施設が 80 年と規定されており、土木構造物で最大の期間である。なお、平成 27 年道路橋示方書から耐久想定期間として 100 年が明記されたが、要求事項ではない。

⁹ 原子力規制委員会、炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について、平成 28 年 8 月 31 日、<https://www.nsr.go.jp/data/000162173.pdf>（放射性廃棄物処分施設は、放射性核種を閉じ込める機能を求めセメント系工学バリアにおいては、物質透過性能を求めている。性能指標としては拡散性能及び透水性能である。この拡散性能は、約 400 年間の維持が求められることからセメント結晶の安定性を示すことが要求機能を証明する唯一の手段となり、ヴァージン材料使用や有機化学混和剤を使用しないなどが最善の策である。）

法としては、量子力学等の速度論を考慮した核生成と成長モデルを考慮したセメント結晶安定性評価が必要[3.4]となり、具体的には、想定される環境場における C-S-H 結晶の変遷とともに、安定結晶であるトバモライトの長期安定性評価を行うことになる。

なお、土木学会では、民間規格ではあるが、最新の技術的知見を導入することを原則に、2014 制定複合構造示方書がいち早く材料特性に関する考え方を導入し、コンクリート標準示方書（設計編）では、2017 制定に材料設計の規定が盛り込まれることになっている¹⁰。

3.2.4 日本工業規格の法的位置づけ

プレキャストコンクリートや生コンなどは、日本工業規格（以下「JIS」という。）に規格が存在する。JIS は、工業標準化法に基づき、政府審議会である日本工業標準調査会¹¹の答申を受けて、主務大臣が制定する工業標準であり、日本の国家標準の一つと言われている。工業標準化法にいう工業標準化は、「全国的に統一し、又は単純化すること」を意味している（第2条）。しかし、JIS それ自体は、基本的に任意標準であるが、国等が材料等の選択として技術基準等の法令で仕様明記又は引用した場合には、JIS は強制標準に準じることになり、見なし規定となり他の基準を用いることは法令違反となる。

JIS は、工業標準化法第2条に示すように、全国统一仕様及び単純化が目的で、決して高性能の工業品であることを保証したものではない。つまり、言い換えれば、最低の性能を確保した上での標準品を意味していると解釈すべきである。JIS の制定は昭和25年から精力的に規定化され、当時の社会情勢、環境を鑑みるとその設立主旨としての JIS 制定は、有意義と考えられる。しかし、現代の成熟社会、さらに多様性が求められる今日の時代背景では、必ずしも JIS 規格が必要かは疑問である。つまり、技術基準での JIS 引用の強制的採用は慎重にすべきで、技術的検討を要しない場合の選択肢の最低の条件との位置付けや JIS 相当以上の性能を確保できかつ技術的根拠を示すことが出来れば採用しなくても良いとする任意規定との選択制とすべきである。JIS はあたかも優れた技術であるがごときに誤解されており、もともと任意標準であることも踏まえ技術基準の中での位置づけを明確にすべきと考える。

こうした考えに基づいて、建築基準法第37条の建築材料の品質では、原則 JIS 等認定材料の仕様を求めているが、第二項規定には、大臣認定を取得することで JIS 以外を使用出来ることが規定化されており、技術の発展や設計等の技術レベルに合わせた選択が出来る制度となっている（表 3.2.2 参照）。

なお、以上示した法的位置づけや社会背景や状況等を鑑みるとや JIS 化の審議におけ

¹⁰ 土木学会コンクリート常任委員会委員とのプライベートコミュニケーション

¹¹ 工業標準化法（昭和24年法律第185号）第3条第1項の規定により経済産業省に設置される審議会。日本政府の標準化管理部署：経済産業省産業技術環境局基準認証ユニット

る委員の選定に関しても、学術専門家は別扱いとしても、公平・透明な審査ができかつ平等な委員構成¹²を行うなど配慮が必要と考える。

表 3.2.2 建築基準法での建築材料規定について

<p>建築基準法 (建築材料の品質)</p> <p>第三十七条 建築物の基礎、主要構造部その他安全上、防火上又は衛生上重要である政令で定める部分に使用する木材、鋼材、コンクリートその他の建築材料として国土交通大臣が定めるもの（以下この条において「指定建築材料」という。）は、次の各号の一に該当するものでなければならない。</p> <p>一 その品質が、指定建築材料ごとに国土交通大臣の指定する日本工業規格又は日本農林規格に適合するもの</p> <p>二 前号に掲げるもののほか、指定建築材料ごとに国土交通大臣が定める安全上、防火上又は衛生上必要な品質に関する技術的基準に適合するものであることについて国土交通大臣の認定を受けたもの</p>

プレキャストコンクリートに関する JIS は、昭和 25(1950)年から製品別の仕様規定 JIS として制定され今日まで改正を繰り返した。そして、平成 24(2012)年には、従来製品として扱っていたものを構造部材として扱うため3つの構造分野に整理し、国等の技術基準で要求する性能に適合する仕様を示した。これにより従来現場打ちコンクリートによる設計がなされていたものに対して、現場の状況に応じてプレキャストコンクリートに変更出来る道筋ができた。そして、次の5年後の改正において、性能を照査する手法又は性能を検証する規定を追加することで完全に現場打ちコンクリートに対抗できる構造部材へと変革する予定であった。しかし、平成 28(2016)年の改正では、JIS 法は第2条で示すように「全国的に統一し、又は単純化すること」が目的であるにもかかわらず、図 3.2.1 に示すようにあたかも JIS が技術基準であるかのように要求性能を示すものとなり、改正の趣旨とは違った改正が行われたことで、照査の手法を示さない非常に中途半端な立ち位置の JIS となってしまった。この改正は、プレキャストコンクリートが現場打ちコンクリートと同様の構造体としての立ち位置を狙ったものと思われるが、法令の要求等の体系をまったくもって無視した制度化をしたことで、ますます使われない JIS へと変遷してしまった感がある。つまり、性能規定化した場合、その性能を満足する照査基準や見なし規定を下位基準に制定する必要があるため、たとえば、道路橋示方書に代表されるように技術基準を性能規定化した場合には、道路橋示方書・同解

¹² たとえば、土木学会電力土木委員会の津波に関する委員会では、委員構成として、主に電力出身の学術専門家及び電力会社の社員で構成され、必ずしも公平かつ透明な技術基準となっていないとの指摘が福島原発事故の国会事故調査委員会等から指摘されている。

説として照査法等を規定して対応をとっているが、プレキャスト関連 JIS では、本来性能を満足する照査法や見なし規定を満足した仕様規定を明示する役目から逸脱して、JIS 性能性能規定化の下位基準を整備せずに性能規定化したことは、他の所管官庁の技術基準との斉一性から鑑みても不適切な措置としか捉えることは出来ない。法制度や技術基準の制度を無視した基準整備は慎むべきである。

○道路橋の技術基準とJIS製品の位置づけ

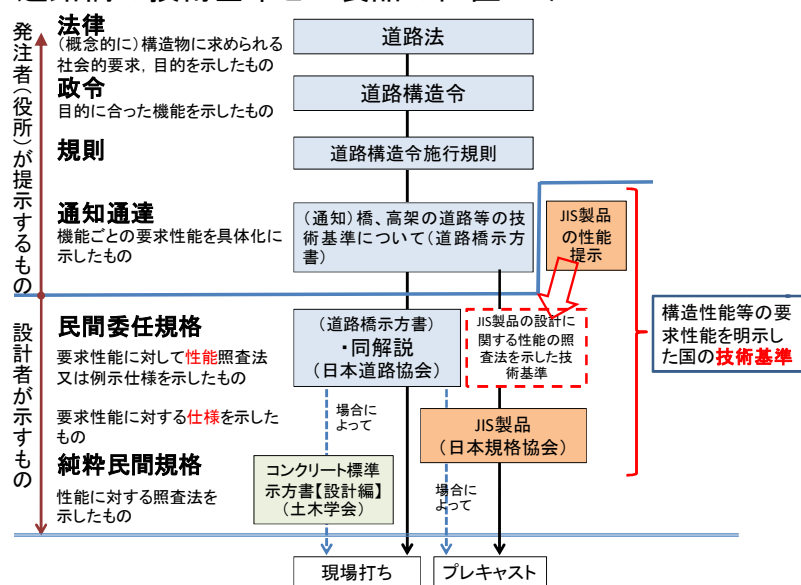


図 3.2.2 JIS 規格の制度上の問題点

3.3 仕様規定と性能規定の違い

構造物の設計基準の明示方法は、仕様規定と性能規定がある。前者は、性能目標値や性能を数値など具体的に仕様を示したもので、代表的なものに、かぶり厚さ○mm や鉄筋の最低間隔などがある。この仕様を示した規定は、過去の実績や実験等により所定の性能を満足することが明らかであり、この仕様とおりに設計することが求められる規定である。一方、性能規定とは、機能要求に対してそれを満足する要求性能又は性能指標については、規定を満足する指標等を設計者が導き出し証明することが必要な規定で、新たな技術や材料などを用いる場合などは、規定を満足していることを証明することで採用されることになる。その反面、検証や照査については、設計者がその妥当性を示す必要があることから、設計者の技術的能力や検証能力が問われることになる。

性能規定型による技術基準には、2つのアプローチがある[3.5]。1つは、技術基準を発注者が規定し、照査の方法やデータの提示など要求性能に対する指標又は算定式を明記する「性能照査パターンA」と言われるものである。一方、技術基準を全く作らず設計者が全てを証明する「性能照査パターンB」と言われるものである。本来、性能規定

型の良さは、多様性や自由度を求めた設計体系であることから性能照査パターンBを選択する必要があるが、現行の公共土木施設の設計体系では、全て性能照査パターンAを採用している。この理由は、前節でも示したが、日本の土木設計は、全て国等が発注し、かつ、設計も国等が行うことから、設計の煩雑さや責任の所在も考慮されていると考えられる。しかし、特殊構造物など初めての構造物の設計などは、技術基準の整備が出来ていないことなどから、学術委員会の設置や大臣認定など認定制度も法的に制定されている。この大臣認定は、主に建築分野では多く利用されており、60mを越える高層建築物の評定などはこの制度を利用した典型的な制度である。

性能規定型体系は、他に性能照査型、性能目標型などさまざまな表現で呼ばれることがある。これらは同じ手法又は体系を別の形で呼んでいると思われるが、それぞれの目的が異なるものであることに注意する必要がある。性能規定型設計体系は、必要とする性能を規定した技術基準を示す体系であり、性能を国等が規定したものである。性能照査型設計体系は、要求性能を満足する照査手法を示した技術基準を示すもので、土木学会コンクリート標準示方書【設計編】は、まさしくこの性能照査型基準である。したがって、目的や体系に沿った呼び名をして、それが法的な位置付けがどこにあるかを認識することが大事である。

また、性能規定化で重要な点として、JISがある。JISは前節で示したように任意標準であるにもかかわらず、技術基準で引用された場合は強制標準となる。コンクリート構造物の設計では、耐荷力や耐久性等の物質安定性が要求性能として求められるが、プレキャストコンクリートに限るとJIS規定がより高い性能の確保に対して弊害となる場合がある。それは、リサイクル材の使用や効率的養生履歴などを開発した場合JIS認定外となり、強制規定に不適合となり採用されない。したがって、性能規定化体系の中ではJISの位置づけは非常に重要である。解決策としては、JISは任意標準であることを明記した上で、①JISを選択する、②JISと同等以上の性能を技術的根拠を示すことが出来れば必ずしもJISを採用しなくても良い。の2者選択の技術基準とすべきである。従来通りのシステムを選択する会社は①を選択、リサイクル材の使用や革新的技術を持つような会社は②を選択するシステムである。こうしたことが現代社会の多様化に対応出来、高品質にもつながると考えられる。実効的には、セメントや骨材など使用材料に関しては①のJISを選択し、構造設計や施工に関しては、②の任意規定を選択することが考えられる。

図3.3.1は、国内の設計基準の変遷を示したもので、現行制度としては、おおむね性能規定型に移行していると考えられるが、性能の規定や限界状態の設定などは、各基準ごとに異なっているので注意を払う必要がある。

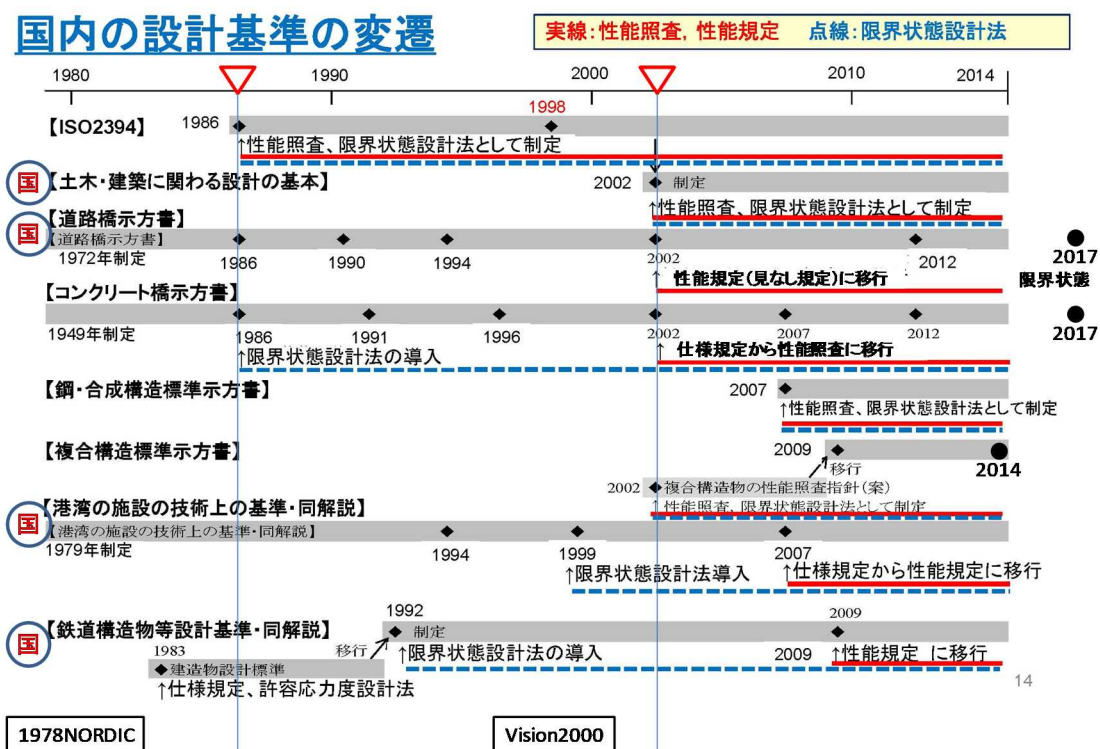


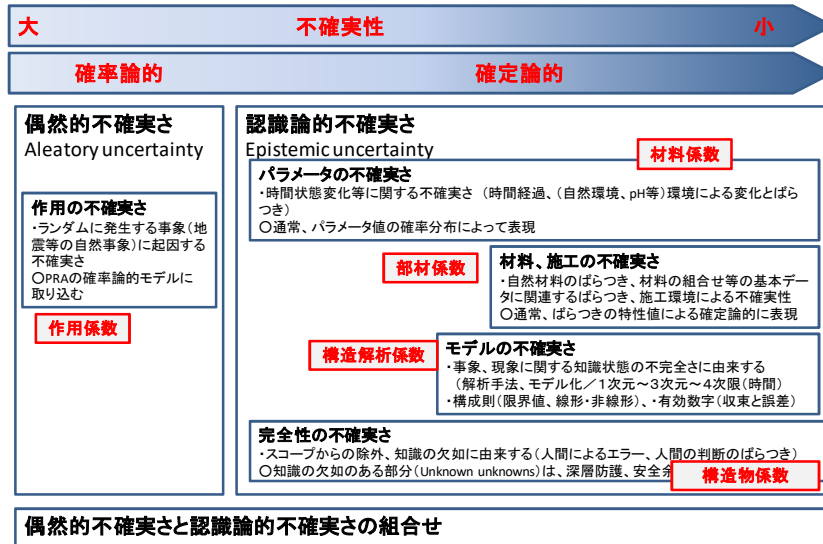
図 3.3.1 国内の設計基準の変遷[3.6]に加筆

3.4 構造物設計による安全裕度の考え方

構造物の設計で重要なことは、安全裕度をどのような考え方で設定し、そしてその信頼度がどれほどあるかを認識することである。近年は、設計法として、性能規定型や限界状態設計法が許容応力度法にとって変わろうとしているが、安全裕度の観点からは許容応力度設計法によるものが一番大きいことを認識しておくべきである。それは、許容応力度法は弾性設計法を基本とし材料裕度を大きくとる特徴があることから安全裕度が必然的に大きくなる。一方、最新の設計法は、より高い技術によりかつより精確に構造物の挙動を確認することができる代わりに、材料特性を弾性範囲を超える領域まで利用するなど安全裕度を小さくするトレードオフの関係があることを認識すべきである。社会基盤施設は、国民の税金で設置されることから、経済性は重要な選択要因であることは否定しないが、一方で安全裕度をどのように設定するか、安全裕度をどのレベルに設定するかを十分議論し設計者自身も認識するとともに国民に示すことも重要な役割である。

構造物の安全裕度を認識するためには、さまざまな不確実性を認識することに等しい。そこで、構造物の設計における不確実性を体系的に示したものが図 3.4.1 である。不確実性は主に「偶然的な不確実さ」と「認識論的な不確実さ」の2つに分けられる。前者は、地震時の荷重などの作用の不確実性を示すもので、確率論的な指標で示す必要がある。一方、後者は、材料のばらつきやモデル化等の不確実性を示すもので、確定論的に部分

係数を用いた特性値により算出される。このように事象や現象等による不確実性をどのように扱うかで、構造物の設計の安全裕度の信頼度が決まってくる。いづれにしても、どのような事象について、どのように想定し、その安全裕度の確度がどれくらいかを明確にすることが重要である。



※：不確実性とは、発生確率が不明で計算出来ない。一方、リスクとは、何が起こると、発生確率が分かっている。

図 3.4.1 構造物設計における不確実性の大きさ

3.4.1 許容応力度設計法による安全裕度

構造物の設計は、材料や構造及び作用外力のばらつきや不確実性をどのように考慮するかで手法が異なる。一般的設計手法として、許容応力度設計法がある。この設計法は、ばらつきや不確実性を包括的に評価する、いわゆる、個々の裕度は分からないがすべてを込込で評価する手法であり、たとえば、作用側と抵抗側の様々な不確実性要因に係る裕度を安全率 3 とする包括的な構造安全裕度を求めている。この場合、応力の状態を弾性範囲として、材料強度のピークの 3 分の 1 をもって、予想や想定を上回る作用に対して断面力を制御するものである。コンクリート構造物の場合、おおむね弾性範囲の設計であるが、ひび割れは一部許容する状態設定となる(図 3.4.2 参照)。

許容応力度法は、材料強度の 3 分の 1 程度の制御することから大きな安全裕度を有することになるが、費用も過大にかかる欠点を有している。また、新たな材料の開発や性能の向上に対してその特徴を反映し難い設計法である。

また、この許容応力度法は、静力学による計算法であることから、地震力の静的考慮等はあるものの、動的挙動に正確に対応している訳ではない。許容応力度法は、その他の耐久性等の劣化要因は、基本的に考慮されないため、長期性能を加味した施設設計には不向きな設計体系である。

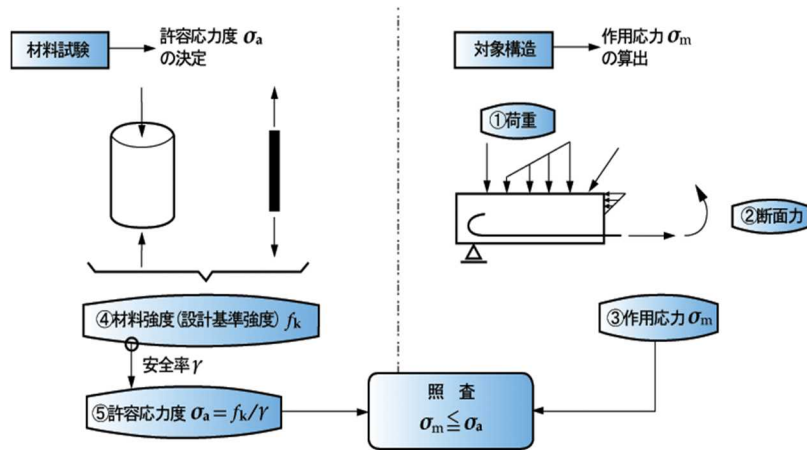


図 3.4.2 許容応力度法による安全性照査の考え方[3.7]

3.4.2 限界状態設計法と部分係数による安全裕度

許容応力度設計法が包括的に安全裕度を設定するに対して、使用性や安全性及び疲労性などの限界状態を設定し、それぞれの限界状態に対する性能目標を設定し設計する設計法を限界状態設計法という。一般に、材料、部材、構造、構造解析などに部分安全係数を用いることで品質ばらつきや不確実性を考慮した特性値の設定が出来る特徴を有する。しかし、本来、部分係数の設定は、常時、地震時などの状態設定や構造形式等により異なるべきで、また、そのばらつきや不確実性をどのように設定し、設計特性値を見出すか多くの問題点も持ち合わせている。さらに、各限界状態での安全裕度は算定できても、その他の想定外等の限界状態や限界状態の相互関係については、評価しない。そして、時間変遷についても考慮し難いことから、長期安定性や材料劣化等の評価は、別途行う必要がある。

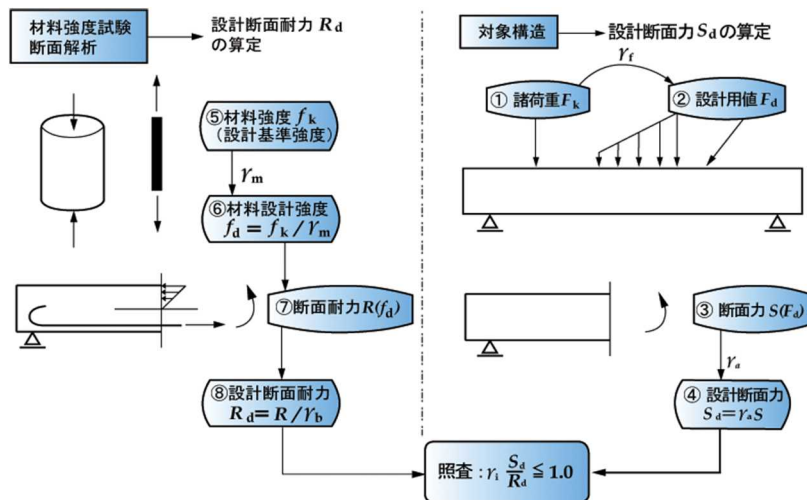


図 3.4.3 限界状態設計法による安全性照査の考え方[3.7]

3.4.3 信頼性設計法による安全裕度

現行の土木構造物の設計法では、ばらつきや不確実性を統計的に示したうえで、特性値を設定した確定論的に設計が行われている。しかし、ばらつきや不確実性を一義的に特性値に変換せず、確率論的に評価したものが信頼性設計法である。特に、使用する材料や地震力等の作用は、不確実性が高く、確定論的に特性値を求めることが必ずしも安全であることが示されず、確定論的設計法の欠点でもある。これらを解消する目的で材料等を確率分布で示し、かつ、その確率分布による設計を行うことが試みられている。図 3.4.4 は、抵抗及び作用をそれぞれ確率分布で示し、材料、環境等の特性値により安全裕度を算定したものである。また、図 3.4.5 は、応答値の分布と保有性能の分布の関係により構造物の安全裕度が異なることを示したイメージ図である。つまり、安全裕度を得るためには、応答と保有の両方で得ることができることを示している。

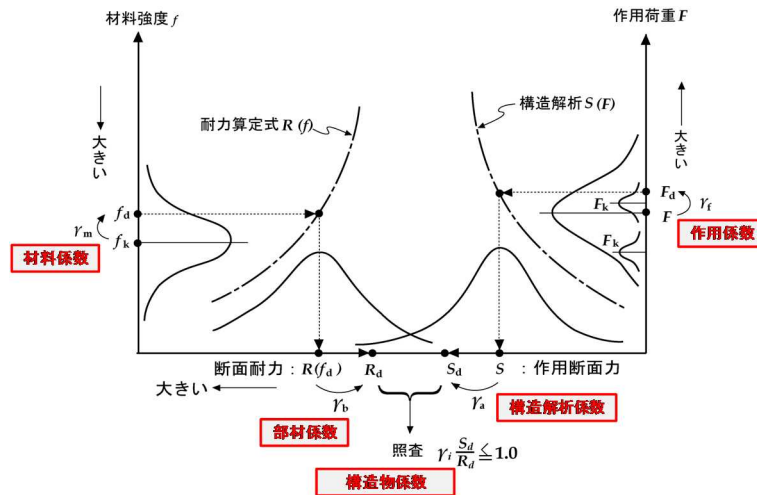


図 3.4.4 部分係数と安全裕度

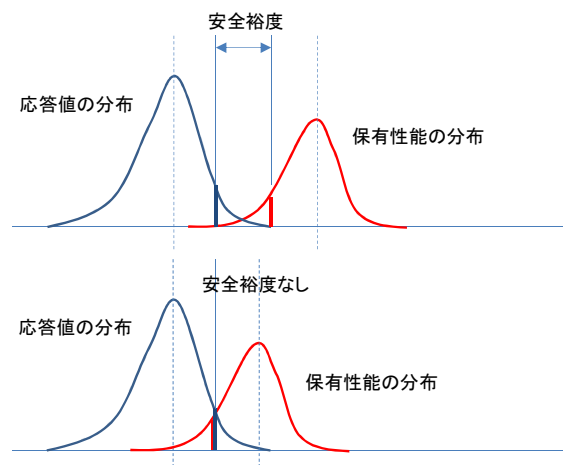


図 3.4.5 構造物設計における安全裕度

3.5 機能及び性能評価に関する現行基準

現行の道路法や港湾法等の法律は、自然事象等の作用に対する人命の確保を第一義に構造物の技術上の基準¹³を規定している。この要求を満足するための性能としては、構造物の設計上においては「構造耐荷力」を求めることとなる。

構造設計では、この構造耐荷性能を断面力と抵抗性能の大小で比べることとなる。一方、近年では、耐荷力以外の性能として耐久性と言われる材料の物性変化に対する抵抗性（以下「物質安定性」という。）が求められるようになってきているが、まだ、構造計画段階での任意要求であり、法令上の要求とはなっていない。これは構造物の供用期間が60～80年程度と比較的材料劣化が生じ難い期間であることから、直接的には性能としては求めている。こうした背景により、構造設計では、構造耐荷性能のみを機能要求している。表3.5.1は、国土交通省が掲げる土木・建築に係る設計の基本を示したものである。

表 3.5.1 国土交通省が掲げる土木・建築に係る設計の基本[3.8]¹⁴

設計の基本		設計においては、設計対象とする構造物の設計供用期間を定め、設定した期間において以下の(1)～(3)の基本的要求性能を確保することを基本
構造に関する基本的要求性能	安全性	(1)想定した作用に対して構造物内外の人命の安全性等を確保する
	使用性	(2)想定した作用に対して構造物の機能を適切に確保する
	修復性	(3)必要な場合には、想定した作用に対して適用可能な技術でかつ妥当な経費および期間の範囲で修復を行うことで継続的な使用を可能とする
念のための要求		構造物の設計に際して、局所的な破壊が構造システム全体に対して致命的な影響を及ぼすことなど、原因に対して不釣り合いに大きな被害を招くことないようにする（構造ロバスト性の確保：structural integrity requirement）といった概念がある。この概念は、ISO2394 において

¹³道路法（道路の構造の原則）

第二十九条 道路の構造は、当該道路の存する地域の地形、地質、気象その他の状況及び当該道路の交通状況を考慮し、通常の衝撃に対して安全なものであるとともに、安全かつ円滑な交通を確保することができるものでなければならない。

港湾法（港湾の施設に関する技術上の基準等）

第五十六条の二の二 水域施設、外郭施設、係留施設その他の政令で定める港湾の施設（以下「技術基準対象施設」という。）は、他の法令の規定の適用がある場合においては当該法令の規定によるほか、技術基準対象施設に必要とされる性能に関して国土交通省令で定める技術上の基準（以下「技術基準」という。）に適合するように、建設し、改良し、又は維持しなければならない。

¹⁴ 設計の基本では、以下のとおり定義している。

○作用とは以下のものをいう。

- ・ 構造物に集中あるいは分布して作用する力学的な力の総称（直接作用）
- ・ 構造物に課せられる変形や構造物内の拘束の原因となるもの（間接作用）
- ・ 構造物の材料を劣化させる原因となるもの（環境作用）

○荷重とは、構造物に働く作用を必要に応じて、構造物の応答特性を評価するモデルを介して、断面力や応力や変位等の算定という設計を意図した静的計算の入力に用いられるために構造物に直接載荷される力学的力の集合体に変換したものをいう。

		も基本的要求事項(fundamental requirement)で示されているものである。こうした概念も基本的要求性能である安全性および修復性に含めて考慮すべき事項である。	
限界状態	終局限界状態	想定される作用により生ずることが予測される破壊や大変形等に対して、構造物の安定性が損なわれず、その内外の人命に対する安全性等を確保する限界の状態	
		特定作用限界状態	疲労限界状態 変動作用が繰り返し作用することに伴う疲労損傷で発生
		耐久限界状態	環境作用の影響に伴う損傷で発生 (一般建築物、橋梁等において、選択的)
		耐火限界状態	火災に伴う損傷で発生 (一般建築以外では、状態設定なし)
	使用限界状態	想定される作用により生ずることが予測される応答に対して、構造物の設置目的を達成するための機能が確保される限界の状態	
		特定作用限界状態	疲労限界状態 変動作用が繰り返し作用することに伴う疲労損傷で発生
		耐久限界状態	環境作用の影響に伴う損傷で発生 (橋梁以外では、状態設定なし)
		耐火限界状態	火災に伴う損傷で発生 (橋一般建築でも、選択的)
	修復限界状態	想定される作用により生ずることが予測される損傷に対して、適用可能な技術でかつ妥当な経費および期間の範囲で修復を行えば、構造物の継続使用を可能とすることができる限界の状態 (土木分野においては、地震発生後に、土木構造物(社会基盤)の持つ機能を短期間に回復でき、継続的な使用ができる状態に着目する。例えばコンクリート標準示方書では「地震後に機能が短時間で回復でき、補強を必要としない」と規定されている。)	

設計の基本では、作用についても明確に分類している。作用には、永続作用、変動作用、偶発作用¹⁵に区分し、それぞれ以下のとおり示している。

<p>(1)永続作用 構造物の設計供用期間を通して絶えず作用するであろう作用でその時間的変動が平均値に比較して小さいもの。または、その大きさの変動が、一定の限界値に達するまでは、設計供用期間中に一定傾向で単調に増加もしくは減少する傾向にある作用。 ○代表的なもの：構造物の自重、プレストレス等</p> <p>(2)変動作用 その大きさの設計供用期間内の時間的変動が平均値に比べて無視できず、かつ一方向的な変化をしない作用 ○代表的なもの：風、雪、地震動等</p> <p>(3)偶発作用 確率統計的手法による予測は困難であるが、社会的に無視できない作用。 ○代表的なもの：落石、衝突、最大級地震動、断層変位等</p>

3.5.1 構造耐荷性能

現行の道路法では、第29条(道路の構造の原則)として、安全確保を求めている。これを受けて表3.5.2に示すように政令、省令さらに設計基準において、具体的技術基

¹⁵ 偶発的作用は、「発生頻度が小さな作用に対して安全であるかを検証する」という設計ではなく、「社会的に備えなければならないと考えられている例外的な作用(偶発作用)に対して機能する」設計がなされる。即ち、社会的に対応するリスクといった概念で考える。

準が明確に規定されている。これらの技術基準では、構造耐荷性能のみを求めていることがわかる。つまり、「安全確保＝構造耐荷」を階層で示したものである。

表 3.5.2 道路法における橋、高架等に関する技術上の基準に関する規定

法令	技術上の基準
<p>(法) 道路法(昭和 27 年法律第 180 号)</p>	<p>第二節 道路の構造 (道路の構造の原則)</p> <p>第二十九条 道路の構造は、当該道路の存する地域の地形、地質、気象その他の状況及び当該道路の交通状況を考慮し、通常の衝撃に対して安全なものであるとともに、安全かつ円滑な交通を確保することができるものでなければならない。 (道路の構造の基準)</p> <p>第三十条 高速自動車国道及び国道の構造の技術的基準は、次に掲げる事項について政令で定める。</p> <ul style="list-style-type: none"> 一 通行する自動車の種類に関する事項 二 幅員 三 建築限界 四 線形 五 視距 六 勾配 七 路面 八 排水施設 九 交差又は接続 十 待避所 十一 横断歩道橋、さくその他安全な交通を確保するための施設 十二 橋その他政令で定める主要な工作物の自動車の荷重に対し必要な強度 十三 前各号に掲げるもののほか、高速自動車国道及び国道の構造について必要な事項 <p>2 都道府県道及び市町村道の構造の技術的基準(前項第一号、第三号及び第十二号に掲げる事項に係るものに限る。)は、政令で定める。</p> <p>3 前項に規定するもののほか、都道府県道及び市町村道の構造の技術的基準は、政令で定める基準を参酌して、当該道路の道路管理者である地方公共団体の条例で定める。</p>
<p>(政令) 道路構造令(昭和 45 年政令第 320 号)</p>	<p>(橋、高架の道路等)</p> <p>第三十五条 橋、高架の道路その他これらに類する構造の道路は、鋼構造、コンクリート構造又はこれらに準ずる構造とするものとする。</p> <p>2 橋、高架の道路その他これらに類する構造の普通道路は、その設計に用いる設計自動車荷重を二百四十五キロニュートンとし、当該橋、高架の道路その他これらに類する構造の普通道路における大型の自動車の交通の状況を勘案して、安全な交通を確保することができる構造とするものとする。</p> <p>3 橋、高架の道路その他これらに類する構造の小型道路は、その設計に用いる設計自動車荷重を三十キロニュートンとし、当該橋、高架の道路その他これらに類する構造の小型道路における小型自動車等の交通の状況を勘案して、安全な交通を確保することができる構造とするものとする。</p> <p>4 前三項に規定するもののほか、橋、高架の道路その他これらに類する構造の道路の構造の基準に関し必要な事項は、国土交通省令で定める。</p>
<p>(省令) 道路構造令施行規則(昭和 46 年建設省令第 7 号)</p>	<p>(橋、高架の道路等)</p> <p>第五条 橋、高架の道路その他これらに類する構造の道路(以下「橋等」という。)の構造は、当該橋等の構造形式及び交通の状況並びに当該橋等の存する地域の地形、地質、気象その他の状況を勘案し、死荷重、活荷重、風荷重、地震荷重その他の当該橋等に作用する荷重及びこれらの荷重の組合せに対して十分安全なものでなければならない。</p>
<p>(通知)</p>	<p>各地方整備局長、北海道開発局長宛</p>

(国都街第 98 号国道企第 87 号)	橋、高架の道路等の技術基準について (国土交通省都市局長、道路局長)
設計基準	道路橋示方書 I 共通編、II 鋼橋編、III、コンクリート橋編、IV 下部構造編および V 耐震設計編 ※道路橋示方書は国が新設する橋梁についての設計基準であるが、地方公共団体が新設する際においても、一般的には当該基準が使用されており、橋の設計において標準的な基準として利用されている。 http://www.mlit.go.jp/report/press/road01_hh_000242.html

3.5.2 物質安定性能

コンクリートの物質安定性という言葉は、いままで全く使われてこなかった言葉である。3.5.1 節で示したようにコンクリートの性能と言えば構造耐荷とされてきた。私が大学時代の約 40 年前のコンクリートの講義では、「コンクリート構造物は、メンテナンスフリーで長期に供用できる材料である」と教えられた。したがって、耐荷力を算定することがコンクリート構造物の設計とされてきた。しかし、近年の学術研究やコンクリート工事では、既存施設の補修やメンテナンスに対する発注が多くを占めている。これは、数十年の供用において、作用及び自然事象による性能低下が進み、補修及びメンテナンスに対する工事発注が増えたためである。この原因の一つは従来からの耐荷力に対して、交通量の増大や地震力の大型化など作用力の変化問題も存在するが、一方、酸性雨や環境変化による材料物性の変化、いわゆる材料劣化が生じたことでの性能低下と考えられる。また、従来想定した供用期間よりも長く使い続けるための長期供用化も含まれている。こうした長期に対する評価を行う一つの指標がコンクリートの安定化又は安定性能の確保である。特に材料劣化は中性化や溶脱などさまざまな現象が知られているが、このような物性変化が生じなければ、セメント硬化体は安定と考えられ、ミクロ的にはセメント結晶構造の変化が少ないことを「物質安定性」と呼ぶことが妥当である。

セメント結晶の変質を伴う要因としては、塩基や酸による結晶構造の変化が代表的であり化学的侵食と呼ばれてきた。これ以外では CO₂ による中性化や炭酸化、溶脱がある。この 40 年間にコンクリートの研究等の方向性は様変わりしており、学生時代には想像もしなかった研究分野が進められている状況である。この状況に対して、外部環境変化による劣化を上げる研究者も数多く存在するが、果たしてそれ程までに環境が変化したのだろうか。巷では地球温暖化が叫ばれ環境負荷低減の名の下で CO₂ 排出削減が叫ばれている。確かに、年平均気温が 1℃上がったとの議論が進んでいるがコンクリートにとっての環境変化(=変動要因)と言えるのか疑問である。地球の気象変化は約 10 万年のサイクルで氷河期と間氷期サイクルを繰返し、すでに数十回も繰り返している。北京原人が誕生してからはすでに 6~7 回である。こうしたゆったりした環境変化を想定し、メンテナンスフリーのキーワードが出来たのも不思議ではない。

では、一体、コンクリートの劣化の要因は何か? 科学的に解明する必要がある。コンクリート構造物は、骨材をセメント材料により接着した複合材料であり、コンクリ

ートの長期性能は、このセメント接着剤の性能確保が必須な材料である。しかし、セメント材料は、石灰石を焼成したもので、水との化学反応により硬化したもので、したがって、有機材や化学物質によりこの結合が切断されることは自明で、この化学作用を明確に評価することが必要である。こう考えると、環境の変化は第一義の原因ではなく、セメント硬化体の宿命が最初から存在したということではないか。確かに外部環境がこの変質現象を助長したと考えられるが、変化しない環境でもセメント硬化体の物質変化は生じると考えるべきである。

社会基盤施設の供用は、財務省[3.9]の査定でも最大80年であり、化学作用による性能変化の影響は、ほとんど無いと考えられるが、100年を超える供用や放射性廃棄物処分施設のように長期使用の施設では、この化学作用による変遷を明確に評価することが求められている。こうした背景で、長期性能を要求する放射性廃棄物処分では、長期安定性を要求する原子力規制委員会規則[3.2,3.3]が制定された。

コンクリートの物質安定性への評価は、一般には時間軸を考慮し、時間変遷による化学反応の変化を捉える必要はある。しかし、物性の時間軸を考慮すれば実験データがある部分では評価可能であるが、それ以降の評価は外挿となり超長期評価の場合は信頼性が大幅に低下する。したがって、超長期性能の評価を行う場合は、この安定性評価を時間軸ではなく、外部環境を変化しない範囲に留め、想定される環境の範囲での物性変化により評価することを考えるべきである。そして、長期物質安定性の評価は、「環境変動による影響」と「時間進展による影響」の2つを明確に分けて考える必要がある。特に、後者の時間進展による影響は、セメント硬化体は、水和反応によりセメント結晶構造が変遷することから、従来から進められている「熱力学的データベース」を用いた速度論を考慮しない解析法ではなく、時間を考慮した手法を用いることが必須と考えられる。

3.6 性能評価に関する指標

3.6.1 時代変遷と要求機能の変遷

構造物に要求する機能は、供用期間中において第一義的には、人命の確保である。他に建築の場合、財産の保全や居住性の確保がある。道路等では、走行安定性などがある。これらは、常時作用力及び地震を含む自然事象等のあらゆる外力に対して構造物が崩壊することによる人命へ及ぼす影響を無くす設計及び施工並びに維持管理を求めたものである。そして、この要求機能を満足するための性能としては、3.5節で示したように「構造耐荷性」や使用材料の「物質安定性」である。前者は構造物の力学的作用による影響の変動を少なくすることを示したものであり、後者は化学的及び生物学的作用による影響、つまり、外部環境による影響の変動を少なくすることを示した性能である。そして、これら进行评估するものが性能評価指標である。

構造物に要求する性能は社会の成熟度や時代背景によりその要求レベル¹⁶が変化し、さらに構造及び材料に対する重みや重要度が変化する。図 3.6.1 は、時代変遷とともに構造物に要求される性能について社会規模を考慮して模式的に示したものである。構造性能を高く求める時代、環境負荷低減に力を入れる時代まで、社会規模の大きさや社会が求める背景により、その重要度が異なっている。○の大きさはその期待の大きさ、前後は、手前ほどその重要度が高いことを示している。

近年の 50 年間の要求性能の変遷を見ると、十勝沖地震や兵庫県南部地震のように構造物に与える影響が生じた場合には、構造設計基準の強化と共にその重要度が増す傾向にある。一方、成熟社会では、環境への配慮から CO₂ の排出削減が問題視され、設計等における環境への配慮が重要度が増す。このように時代背景や社会に求められる要求により変化することは社会のニーズとして捉え建設されてきたきたことを物語、その時代に応じた技術基準の性能目標値は変化している。今後の最も重要な視点は、莫大に建設された社会資本を維持管理する必要な現代社会では、その保全への対策や供用の延長を判断するとき、これらの時代変遷により変化した設計要求又は設計基準がどのようになっているか、つまり構造物の安全裕度はどれくらいあるのかをしっかりと吟味する必要があるということである。設計法や施工された時期により構造物の安全裕度が異なるため、全ての構造物を同一の性能として評価出来ないということである。構造物の診断¹⁷において、これらを念頭に行う必要があるということである。構造物の長期延命は近々の課題であるが、診断技術は益々向上し高度化しているが、基本となる初期の構造物の性能（今後「計画性能」という。）を認知した上で、現在保有する性能（今後「現存性能」という。）をどのように評価するか明確に分けて評価する必要がある。

性能低下（劣化）＝計画性能－現存性能

ここで、計画性能：設計時の基準に基づいて持っている初期の構造性能

現存性能：構造性能低下や材料劣化等を加味して現存状態の構造性能

また、構造物の性能は、設計及び施工により安全裕度が存在し、このそれぞれの裕度は、設計者及び施工者の能力により変化することも自明であることを認識すべきである。

¹⁶ 要求レベル：構造物のもつ、耐力、強度、変形性、じん性などの構造特性や材料のばらつきや品質等さまざま存在する。

¹⁷ たとえば、現行耐震診断基準による既存施設の診断を行う場合、当然、現行基準で満足していなければならない配筋詳細があるが、当然当時の配筋詳細で建設されていることから、現行の配筋詳細は満足していない。こうした点を考慮した診断が必要である。

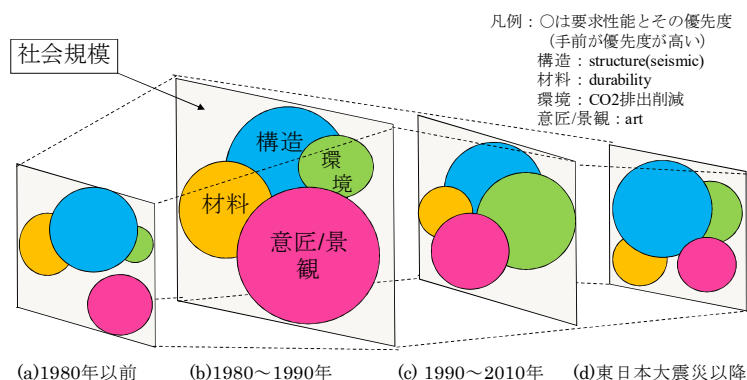


図 3.6.1 社会的便益性を考慮した要求性能の変遷

3.6.2 構造抵抗性を示す指標

現行のコンクリート構造物の設計に関する技術基準では、構造物に作用する自重及び外力等と部材等の抵抗性能を比べて、構造物の耐荷力として評価することとしている。こうした考えをここでは、構造抵抗性と読み替えることとする。本来コンクリートの性能は、一義的に構造物としての性能を評価することであるが、使用したセメントや骨材等のセメント材料及び鋼材等の環境による性能変遷も存在することから、構造抵抗性に加えて、材料特性変化に対して物質安定性を評価することも必要と考えられる。

3.6.3 物質安定性を示す指標

現行のコンクリート構造物の設計に関する技術基準では、長期物質安定性についての規定は存在しない。つまり、公共構造物の供用期間は60年程度で最大でも水道用ダム80年とされており[3.9]¹⁸、供用期間中は材料劣化による影響はないとしているからである。セメントの製造では、供用60年を基本としていることから、原材料にリサイクル材を用いるなど供用期間を鑑みて材料設計がなされていることを認識すべきである。もし、社会基盤施設の供用期間を越えて使用する場合は、材料劣化が生じることを認識して適用すべきである。実際、土木学会コンクリート標準示方書【維持管理編】で示されている指標である加速期及び劣化期¹⁹であっても、耐力の性能低下はほとんど無く、安全裕度の中に入っていると言える(図3.6.2)。したがって、ここでいう長期物質安定性とは、構造物の長期供用を評価する指標として定義するもので、一般には耐久性

¹⁸ 鉄筋コンクリート構造物の減価償却資産の耐用年数として、たとえば、水道用ダム80年、トンネル75年、橋60年、事務所用建物50年、住宅用建物47年、放射性同位元素の放射線を直接受けるもの15年、と規定している。

¹⁹ 土木学会コンクリート標準示方書【維持管理編】では、劣化過程を潜伏期、進展期、加速期、劣化期の4つの状態に分類しているが、これらの劣化程度は、設計や施工の安全裕度に含まれており、現実問題として、劣化の評価法としては不適。

能とも呼ばれているが、耐久性能は何を求める性能かが不明確である言葉であり、あまりにも抽象的表現であることから、ここでは、長期供用期間に使用出来る性能と言う意味で「長期物質安定性」を定義する。

図 3.6.2 はコンクリート構造物の劣化状態を示している。この図にあるようにコンクリート構造物の劣化は①地震被災による性能低下が大きく、一方、材料の劣化による構造性能の低下は供用期間中ではほとんどないことが分かる。したがって、コンクリート構造物の保全では、性能低下の要因を認識した上で、性能低下を正確に照査することが重要で、それらの性能低下の状況に応じて補修や補強を考えることが必要である。こうした要因分析することを医学界の言葉を借りて「コンクリートトリアージ」と呼ぶことが良い。

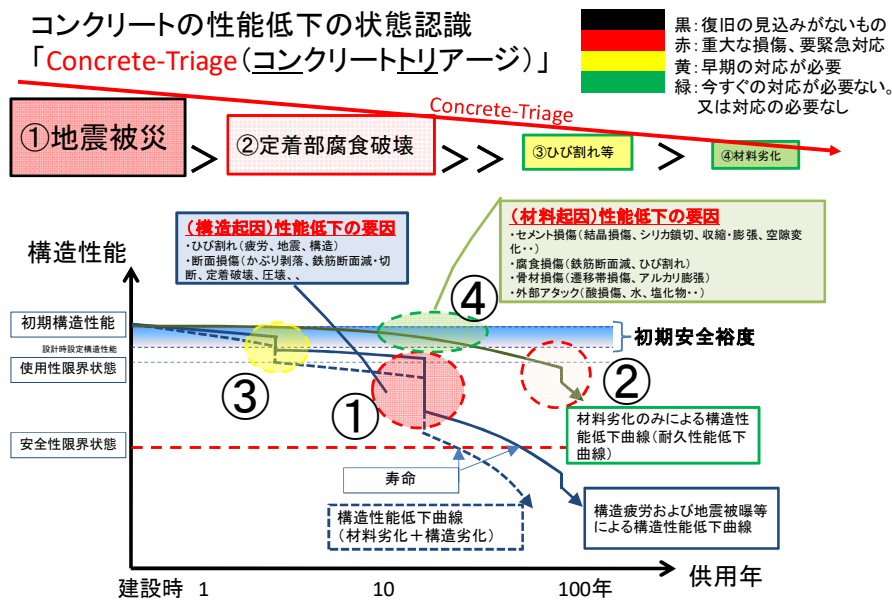


図 3.6.2 コンクリート構造物の状態変化[3.10]に一部加筆

コンクリート構造物の劣化事象は、塩害や中性化など外部アタックの現象による現象論的に示されてきたが、これは作用（塩化物飛来、CO₂など）によりコンクリートの抵抗性を評価しようとしたものであるが、つまり、補修等の対症療法を見出す手法として開発されたものである、この方法の最大の欠点は、複合作用にまったく対応出来ないことである。本来、コンクリート構造物の劣化評価は、構成材料がどのように変質するかメカニズム把握が重要であるが、この手法の最大の欠点は、材質の変質は、非常にミクロ的で構造性能への影響するに寸法オーダーが10乗以上もの差があることが、直接的な評価指標としての役割を呈しなかったことにある。

コンクリート構造物の長期性能を評価するには、外部環境による材料の変質を評価し、構造性能にどのような影響をもたらすかを示す必要がある。材料の変質とは、言い換え

れば、セメントの変質である。セメントは水和反応によりセメント結晶を生成し結合力を形成している。図 3.6.3 は、コンクリート構造物の長期性能評価を行う上での曼荼羅を示したものである。従来のコンクリート分野で示されたものとは、大きく異なっている。従来のコンクリートの劣化の評価は、劣化事象毎に評価するもので、対症療法的対策と連像したものになっている。こうしたコンクリートの性能変化を「concrete pathologies」分類とすることが適切と考える。一方、図 3.6.4 は、従来の劣化事象からメカニズム的に立脚した分類し、構成材料のセメント、骨材、鋼材の評価を行う分類となっている。また、特徴的には、現行の法令体系に合わせて分類したところである。いわゆる、法令の要求機能及び性能に対して、性能を評価する指標を抽出して、個々の分析技術とリンケージを図ったことである。構造物の劣化を考える上で、材料の変質をどのように評価するかが重要な視点である。しかし、材料の変質は、セメント結晶構造の変遷から構造物の変形まで、寸法オーダーを10桁以上の異なる寸法をリンケージするマルチスケール解析が必要であることから、現在まで評価が出来ていなかったが、長期安定性を評価する上で、重要な視点は、まず、法的に要求機能及び性能を明確にすること、さらに、構造性能を評価するための材料等の指標に対してオーダーが大きく差があること、の2点を解決する必要がある。前者は、前節で示したように、法階層に基づいて機能提示することで比較的容易であるが、後者は、直接的な指標が現段階で存在しないことから、機能を評価する複数の指標により間接的又は総合的に評価する必要がある。表 3.6.1 は、構造性能に及ぼす材料変化の影響評価するための1例を示したものである。

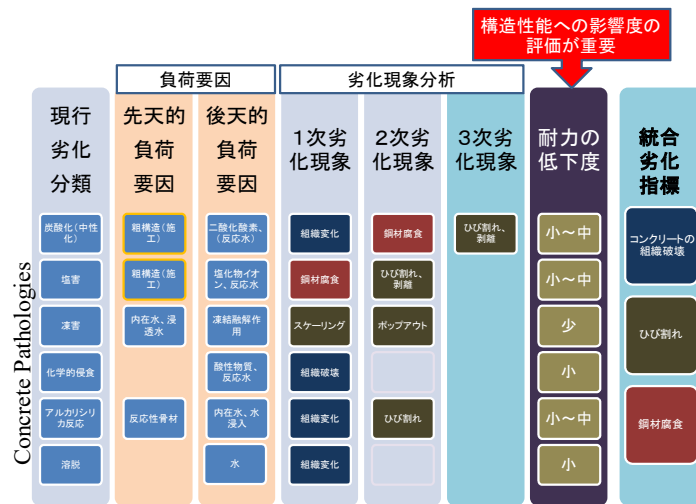


図 3.6.3 concrete pathologies 分類と劣化進展[3.10]に一部加筆

なお、物質安定性の評価では、物質のミクロ的構造、たとえば、結晶形態や結晶構造を解明することが必要であり、そのためには、中性子散乱やNMRといった分析装置を用いた分析が必要である。これらの分析法については、土木学会コンクリート委員会 [3.10,3.11]に示されており参考となる。

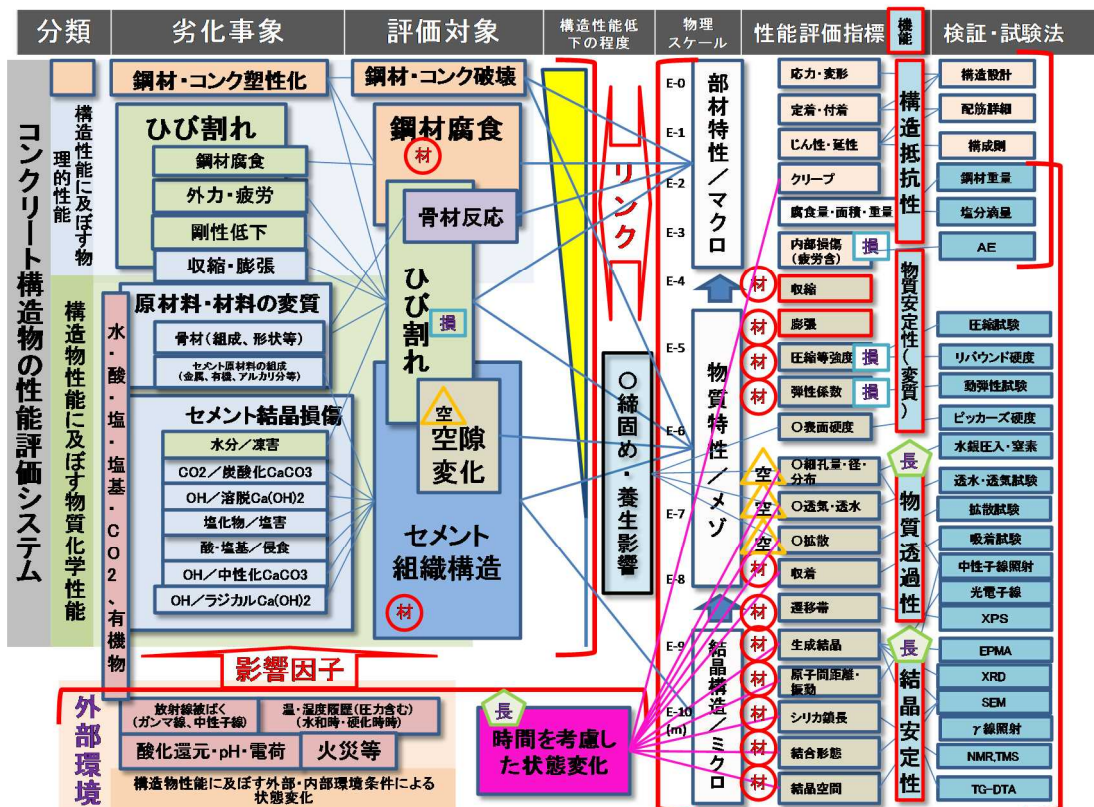


図 3.6.4 コンクリート構造物の性能評価システムの事象及び評価指標の関係性

表 3.6.1 構造性能に及ぼす材料変化の影響評価

	基本的状態設定					
	物理的性質		化学的性質		力学的性質	
	外部環境影響	時間影響	外部環境影響	時間影響	外部環境影響	時間影響
構造物に求める機能 (レベル2)	物質移行 (遮断) 機能		物質安定機能		構造抵抗機能	
機能を評価する性能 (レベル3)	拡散性能、透水性能、吸着性能		収縮安定性能、結晶安定性能		安全性能、使用性能、疲労性能	
性能を示す指標 (レベル4)	物質	ゲル空隙	結晶構造、Si 重合度		強度 弾性係数 変位・変形	クリープ係数
	構造	拡散係数、透水係数、細孔特性、遷移帯特性、移行空隙率	収縮係数、収着、腐食度			

3.7 まとめ

国内の社会基盤施設の設計におけるコンクリート構造物の技術基準は、各分野ともに法階層に沿ったものとなっている。また、設計法については、許容応力度法から限界状態設計法へ移行されてきているが、いずれの方法も法的要求機能に対する目標性能を満たす構図は変わらない。

コンクリート構造物の設計において、性能照査する項目は、近年、構造耐荷力を示す構造安定性に加えて物質構造の変化を示す物質安定性を求める傾向があるが、物質安定性に関して具体的な技術基準の制定までには至っていない。その理由は、コンクリート

構造物の供用期間中は物質の変化が想定し得ない期間であることから機能要求を行ってこなかった経緯があるが、近年の劣化実績や研究等により物質の変遷が報告[3.10,3.11]されており、今後物質安定性に関する機能要求が追加されると考えられる。その基礎となる研究については、土木学会コンクリート委員会に初めて物性変化に関する委員会として設置された「混和材料を使用したコンクリートの物性変化と耐久性評価小委員会（Ⅰ）（Ⅱ）（委員長：名和北大教授、幹事長：石田東大教授）[3.10,3.11]及び「混和材料を使用したコンクリートの物性評価技術と性能規定型材料設計に関する研究小委員会（委員長：梅村日大教授、幹事長：著者）」で精力的に行われており、おおむね評価指標等の整理が行われたところであり、十年以内にはこの成果に基づいて国の技術基準化されると考えられる。これにより、本来あるべき姿としてのコンクリート構造物の性能照査が完結し、時間軸を考慮した体系化となる見通しである。

【3章 参考文献】

- 3.1 Strukturering av byggregler, Structure for building regulations, November, NKB-skriftserie Nr.34, 1978
- 3.2 原子力規制委員会、第27回原子力規制委員会、資料3 第二種廃棄物埋設に係る規制基準等の骨子案、資料5 中深度処分における廃棄物埋設地の設計プロセス及び線量評価に係る審査ガイドの骨子案、平成29年7月31日
- 3.3 原子力規制委員会、第29回原子力規制委員会、別添2「炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について（原子力規制委員会決定）」、平成28年8月31日
- 3.4 名和豊春、プライベートコミュニケーション、平成29年6月1日
- 3.5 土木学会 包括設計コード策定基礎調査委員会、包括設計コード（案）（性能設計概念に基づいた構造物設計コード作成のための原則・指針と用語 第1版）、2003.3
- 3.6 道路橋の性能設計、関西道路研究会 道路橋調査研究委員会 道路橋の性能設計に関する研究小委員会、平成27年
- 3.7 吉川弘道、改めて考える性能設計、http://c-pc8.civil.tcu.ac.jp/RC/doc/pdf_word/sekkeiseinou1.ppt
- 3.8 国土交通省、土木・建築にかかる設計の基本、平成14年、
http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha02/13/131021_.html
- 3.9 減価償却資産の耐用年数等に関する省令（昭和40年大蔵省令第十五号）
- 3.10 土木学会コンクリート委員会：混和材料を使用したコンクリートの物性変化と耐久性評価小委員会(333)報告書、コンクリート技術シリーズ74、平成19年3月
- 3.11 土木学会コンクリート委員会：混和材料を使用したコンクリートの物性変化と耐久性評価小委員会(333)報告書 No.2、コンクリート技術シリーズ89、平成22年5月24日

第4章 プレキャストコンクリートの製造効率化における 課題の抽出

4.1 はじめに

プレキャストコンクリートは、一般的に図 4.1.1 に示される工程により製造される。つまり、工場ラインと呼ばれる「型枠設置→鉄筋配筋→コンクリート打設→蒸気養生→脱型→型枠設置」をベルトコンベア的に移動しながら製造される。まさしく自動車の組立工場と同じマニファクチャースystemである。自動車の組立ラインの場合は部品を組立てるだけでコンベアの最後には製品（自動車）が完成するが、プレキャストコンクリートの場合は生ものであるまだ固まらないコンクリートを硬化させながら製品化を行うものであり、特に「蒸気養生」という強制的に硬化させる工程を踏まなければならないことが特徴である。この「蒸気養生」を経ずに自然環境下で「自然養生」により硬化させることは可能であるが、この場合現場打ちコンクリート同様に硬化に 28 日程度の時間を要するため、プレキャストコンクリートは強制的に蒸気養生を施すことで硬化時間を約 14 日（又は 7 日）の半分に短縮させ、いわゆる、製造工程の短縮化を蒸気養生を行うことで実現しているのである。この硬化時間の短縮こそがプレキャストコンクリートの最大の利点特徴である。

本章では、プレキャストコンクリートの製造に関する特徴を記すとともに、製造過程における課題について抽出する。なお、ここでは、土木分野の工場製造のコンクリート製品を中心に述べるが、建築やサイト製造等についても適用可能であることから、一般名称のプレキャストコンクリートと呼ぶことにする。

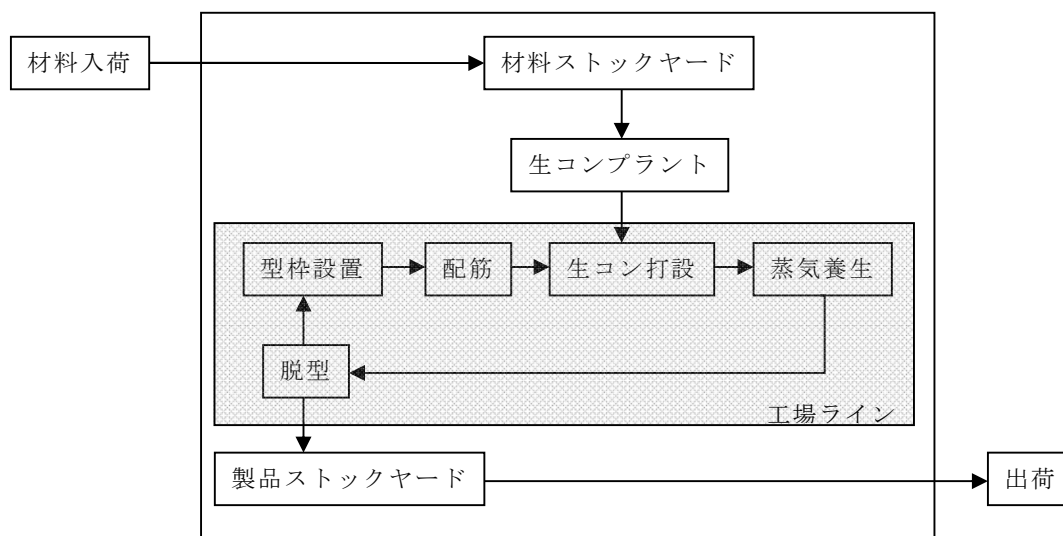


図 4.1.1 一般的なプレキャストコンクリート工場の工程

4.2 プレキャストコンクリートの分類

プレキャストコンクリートは、平成 16(2004)年以前は製品種類毎に JIS 規格が制定されていたが、平成 16(2004)年の JIS 体系化の変更により構造形態ごとの分類[4.1,4.2,4.3]にまとめられた。表 4.2.1 にプレキャストコンクリートの分類と JIS 規格の分類変更を示す。

JIS 規格の分類変更の目的は、従前の分類は使用する目的に応じて、必要な形状・寸法の製品に対して規格化したもので、いわゆる、個別の製品毎に仕様規定を示したものであった。一方、JIS 改正後の考え方は、性能規定化することで、製品の多様性への対応と利用者の要求する形状・寸法への拡大をし易くしたものである。仕様規定では、すでに性能が満足し個々に性能を照査する必要がないことから、プレキャストコンクリート製造会社の負担が少なく製造することが可能なことから技術力等の必要性がない。しかし、性能規定化は、利用者による形状・寸法に加えて性能も個別に設計又は照査することになり技術力が必要となり、旧態依然の技術力を軽視した企業はその対応が困難となり淘汰が進んでいくものと考えられる。こうした JIS 改正は、社会成熟した今日における多様性の要求や高度成長時代と異なり発注数も少ないことからある意味時代にマッチした考えともいえる。

一般に国等が発注する施設等における技術の性能規定化では、機能や性能を上位基準により提示され、そしてその性能を照査する技術基準を下位に整備する必要があるが、今回の JIS 製品改正では、この技術基準が制定されていない。こうした技術基準を制定しない完全性能規定化の手法も世界的には存在するが、国内ではこの形態は採っていないと必ず技術基準が制定されている。したがって、設計者やプレキャストコンクリートメーカーは、製品の性能が設計基準を満足しているかどうかを科学的技術的に示して、その妥当性を評価する必要があり、現実的に不可能な要求を行っていることから、早急に再度改正するか、又は技術基準を整備することが求められる。

表 4.2.1 平成 16 年に行われたプレキャストコンクリートの分類変更[4.1,4.2,4.3]

土木コンクリート製品の種類			主な用途	
大分類	小分類 (旧 JIS)	新 JIS 分類 ¹		
暗きょ類	・無筋コンクリート管(A5330→A5302)	A5371	道路などの下に設置される下水道、用排水路、通路（歩行者、自転車などの車両）などの構成部材。農業用水、工業用水、上水など圧力管路の構成部材。地下鉄道、地下道路、地下河川、共同溝、上下水道などシールド工事における覆工部材。	
	・鉄筋コンクリート管(A5302) ・遠心力鉄筋コンクリート管(A5304) ・組合せ暗きょブロック(A5328) ・鉄筋コンクリートボックスカルバート ・アーチカルバート、組立式アーチカルバート ・推進管、シールド用セグメント	A5372		
	・プレストレストコンクリートボックスカルバート ・プレストレストコンクリート管	A5373		
舗装・境界ブロック	・平板(A5304) ・境界ブロック(A5307) ・インターロッキングブロック	A5371	道路の舗装、境界などの構成部材。	
路面排水溝類	・L形側溝(A5306) ・U形側溝(A5305) ・上ぶた式U形側溝(A5334) ・落ちふた式U形側溝 ・皿形側溝 ・排水性舗装用側溝縦断管 ・浸透透水性側溝	A5372	道路の側面に設置される路面排水路の構成部材。	
擁壁類	ブロック式（分割式）	・積みブロック(A5323) ・大型積みブロック ・組立土留め、井げた組擁壁、補強土壁	A5371	用排水路・河川・港湾などの護岸、道路、宅地造成などの土留め壁の構成部材。
	壁体式（一体式）	・鉄筋コンクリート矢板 ・L形擁壁(A5338)、逆T形擁壁、控え壁式擁壁	A5372	

¹ JIS A5371-2016 プレキャスト無筋コンクリート製品（平成 16 年改定時は、無筋コンクリート製品）
 JIS A5372-2016 プレキャスト鉄筋コンクリート製品（同上 鉄筋コンクリート製品）
 JIS A5373-2016 プレキャストプレストレストコンクリート製品（同上 プレストレストコンクリート製品）

		<ul style="list-style-type: none"> ・プレストレストコンクリート矢板 ・PC 壁体 	A5373	
くい類		<ul style="list-style-type: none"> ・鉄筋コンクリートくい ・節くい ・鋼管複合くい 	A5372	各種構造物の基礎くいの構成部材。
		<ul style="list-style-type: none"> ・プレストレストコンクリートくい ・プレストレスト鉄筋コンクリートくい 	A5373	
マンホール類		<ul style="list-style-type: none"> ・マンホール側塊 ・組立マンホール ・電気通信用マンホール ・地下埋設物用マンホール 		下水道、電気通信などのマンホールの構成部材。
用排水路類		<ul style="list-style-type: none"> ・矢板(A5325) ・フリューム(A5318) ・組立土留め ・L型水路 ・組立さく(柵)きよ 		ほ(圃)場整備、野地造成における用排水路の構成部材。
共同溝類		<ul style="list-style-type: none"> ・ケーブルトラフ 		地中、地表などに敷設する各種ケーブルを保護するための溝形の構成部材。
		<ul style="list-style-type: none"> ・共同溝、電線共同溝、洞道 		防護管きよ(電気、ガス、水道)、配管、配線などの構成部材
ポール類		<ul style="list-style-type: none"> ・プレストレストコンクリートポール 		送電、通信などの各種電線露用ポール。
		<ul style="list-style-type: none"> ・照明用化粧ポール 		
橋りょう類	橋げた	<ul style="list-style-type: none"> ・道路橋用橋げた ・道路橋橋げた用セグメント ・軽荷重スラブ用橋げた 	A5373	道路橋の橋げたなど、橋りょうの構成部材。
	床板	<ul style="list-style-type: none"> ・道路橋用プレキャスト床版 ・剛性床板プレキャスト板 		
貯水施設類		<ul style="list-style-type: none"> ・雨水貯留施設 ・農業用貯水槽 ・防火水槽 ・耐震性貯水槽 		防火用水、飲料水など各種用水を貯蔵・貯留するための施設の構成部材。
防災施設類		<ul style="list-style-type: none"> ・ロックシェッド 		落石、雪崩などから道路などを保護するための防

	<ul style="list-style-type: none"> ・スノーシェッド ・スノーシェルター 		災施設の構成部材。
のり（法）面被覆ブロック類	・張りブロック	A5371	河川堤防ののり面、切土・盛土ののり面の被覆の構成部材。
	<ul style="list-style-type: none"> ・のり枠ブロック ・連節ブロック 		
緑化ブロック類	<ul style="list-style-type: none"> ・植栽コンクリート ・ブロックマット 		河川堤防ののり面、切土・盛土ののり面の緑化（植栽）のためのブロックなど
鉄道施設類	<ul style="list-style-type: none"> ・まくらぎ(E1201,E1202) ・プラットフォーム用製品、壁高欄 		鉄道（軌道、駅舎など）を構成する部材
その他	小分類に記載されていない製品		

注) 旧 JIS とは、2004 年改訂以前の規格を言う

4.3 プレキャストコンクリートに用いられる材料と配合計画

プレキャストコンクリートに用いられる材料は、基本的にレディーミックスコンクリート（以下「生コン」という。）で用いられる材料と同じであるが、施工過程での養生温度が生コンは一般環境雰囲気下（＝外気温）での養生を行うことに対してプレキャストコンクリートは最高温度65℃を含む蒸気養生履歴[4.4]を負荷させるため、従来から化学混和剤の組成が異なっていた。また、高温依存性が高いフライアッシュも採用の可能性は高い。しかし昨今の高流動化コンクリートの採用が増えるにしたがって、化学混和剤の組成も同じものになってきている傾向にある。

プレキャストコンクリートに使用する材料で特に注意すべき点は、高温蒸気養生環境の違いによる材料の収縮膨張特性や鉄筋・型枠等による拘束ひび割れの発生に注意を払う必要がある。以下にプレキャストコンクリートの特徴や現場打ちコンクリートとの違いについてまとめた。

4.3.1 使用材料

(a)セメント及び混和材料

プレキャストコンクリートに用いられるセメントは、現場打設コンクリートと同じ普通ポルトランドセメントが用いられる。それは、プレキャストコンクリート会社に中小零細企業が多いことからセメントメーカー等の支援を受けたりして安価な材料を選択し製品製造コストを削減しなければならない背景があり、当然設備やセメントサイロの数が少ないこと、さらに用途や製品によりセメント材料を分けるなどの手段はほとんど取られていない。

また、高炉セメント微粉末やフライアッシュ等の混和材料は一般には使用されていないが、周辺環境への振動騒音への配慮や施工性を考慮した高流動コンクリート化による石灰石微粉末使用が一部で用いられている。なお、北陸三県など一部の地域では、発注者、電力メーカーとコンクリート製品メーカーの3者が連携してフライアッシュの使用に努めている。フライアッシュは収縮特性に優れているが、若材齢時強度発現に乏しいため、配合上、セメント代替品の内割置換ではなく外割置換となりコスト削減のメリットが期待できないことからリサイクル認定やグリーン調達などの環境対策としての取り扱いに限られている。

(b)天然骨材及びリサイクル骨材

プレキャストコンクリートに用いられる骨材は、原則天然骨材に限られている。その理由は蒸気養生履歴を負荷させるため、リサイクル骨材（高炉スラグ骨材、一般溶融スラグ骨材、再生骨材など）の使用による性能変化について未だ知見が得られていないためである。天然骨材において注意すべき点は吸水率

が大きい骨材を使用した場合、強度低下が生じるなどの問題が発生し易いことがある。また昨今の社会事情からリサイクル認定制度の下で一般廃棄物溶融スラグ骨材の使用を推奨する自治体が全国的に存在するが、コンクリートの性能評価手法が確立されていないことや技術的に高温履歴での性能品質の確立ができていないため構造部材への使用には時期尚早と思われる。近年、神奈川県では建築構造物に当時 JIS 認定されていない高炉スラグ骨材が用いられ、外壁にポップアウトなどが生じ問題化したことは記憶に新しい。

(c) 離型剤及び化学混和剤

プレキャストコンクリートに用いられる化学混和剤は、型練り及び蒸気養生履歴を施す特殊事情が存在することから、安価で練混ぜ時間が短く、熱履歴に鈍いナフタリン系混和剤が用いられてきた。最近では単位水量の低減や高流動化への転換の中でポリカルボン酸系が増えているが、ポリカルボン酸系は分散性能を満足するためにはナフタリン系に比べ2～3倍の練混ぜ時間を要するなど技術的に考慮すべき点があるにも関わらず、現場打ちコンクリートの普及に合わせて、特にプレキャストコンクリートの蒸気養生等を考慮せずに採用される現状は、練混ぜ時間や練混ぜ機器の仕様変更など行っていない中での採用となっており、その結果、分散ができず混和剤の偏りなどで不具合が生じたりする例も報告されている。

また、型枠にコンクリートノロを付着させない離型剤も図 4.3.1 に示すように高温を受けることで成分の固化や性能変化があることから一般のものとは異なるものを選択する場合が多い。

プレキャストコンクリートは、現場打ちコンクリートと比べ多くの製造上の違いがあり、これらを考慮した材料の選定が必要である。



図 4.3.1 離型剤後のノロ付着例

(d)鋼材

プレキャストコンクリートに設置する鋼材は、図 4.3.2 に示すように現場打ちコンクリート構造物に比べ細径の鉄筋が使用される場合が多い。その理由は製品自体の寸法が小さいことや作用力が低いことも起因している。なお、現場打ちコンクリート構造物の配筋ディテールは、阪神淡路地震以降かなり密なディテールとなっているが、プレキャストコンクリートの場合は、設計基準が存在しないこともあり、従来そのまま現在も使用されている現状である。特に、定着方法、付着長さや溶接方法などの配筋ディテールが技術基準に対して不適格である可能性が高く、プレキャストコンクリートが構造部材での使用なのか境界石等としての役割なのか不明確であることもプレキャストコンクリートの発展を遅らせている原因の一つと思われる。



(a)L型擁壁打設面

(b)L型擁壁配筋

(c)鉄筋定着／溶接

図 4.3.2 プレキャストコンクリートの配筋例

4.3.2 示方配合

プレキャストコンクリートの出来型の要求性能は、JIS 等により材令 14 日での出荷時強度を満足することである。表 4.3.1 は材令 14 日圧縮強度を満足するための配合を決定するために行った試験配合である。プレキャストコンクリートは製品毎に設計基準強度が異なるため、設計基準強度毎に配合を持っている必要があるため、W/C を大きく変化させた試験練が必要となってくる。また表 4.3.1 には早強セメントを用いた場合の配合も示し、普通セメントと早強セメントの違いについても検討した。

図 4.3.3 及び 4.3.4 は、表 4.3.1 に示した普通および早強セメントを用いた場合の配合による圧縮強度発現を示したものである。普通セメント使用の場合は、材齢が進むに従って強度が漸増する傾向にある。一方、早強セメント使用の場合、強度発現は材齢 7 日までは強度の伸びが見られるがその後の 14 日材齢までの強度の伸びは少ない傾向を示した。これらの図からセメント種の特徴が強度発現に現れたと考えられる。

表 4.3.1 試験練配合

配合番号	セメント	W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m ³)								コンクリート温度(°C)	スランブフロー(cm)	空気量(%)	
				W	C	PW	FA	S	G15	G20	AE1				AE2
N1-2	普通	50	40	167	335	136	136	591	504	413	4.7	1.5	14.1	69.5x69	3.4
N1-3		45	40	167	371	118	118	586	507	415	4.7	1.5	13.5	77x74	3.5
N1-4		40	40	167	418	84	84	601	511	418	4.7	1.5	13.6	75.5x74	2.7
N1-5		35	40	167	477	65	65	606	515	422	4.7	1.5	13.7	73x71	2.2
N2-2		45	40	151	335	136	136	607	518	424	4.9	1.5	13.6	69x67.5	3.3
N2-3		40	40	134	335	136	136	625	533	436	7.4	1.5	13.7	74x73.5	2.8
N2-4		35	40	117	335	136	136	644	548	448	14.9	1.5	13.6	76x75	1.5
H1-1		早強	55	40	167	304	151	151	590	502	410	4.5	1.5	14.1	69x62.5
H1-2	50		40	167	335	136	136	591	504	413	4.7	1.5	15.5	70.5x70	3.1
H1-3	45		40	167	371	118	118	596	507	415	4.7	1.5	13.5	74.5x72	3.7
H1-4	40		40	167	418	84	94	601	511	418	4.7	1.5	17.7	71.5x70.5	3.5
H1-5	35		40	167	477	65	65	606	515	422	4.7	1.5	16.7	67.5x67	4.0
H2-1	52		40	175	335	136	136	584	497	406	3.95	1.5	15.7	63.5x61.5	4.2
H2-2	45		40	151	335	136	136	609	518	424	5.52	1.5	14.9	69.5x68	3.6
H2-3	40		40	134	335	136	136	627	533	436	7.24	1.5	15.7	70.5x69	4.7
H2-4	35	40	117	335	136	136	644	548	448	14	1.5	15.2	72.5x72.5	2.3	

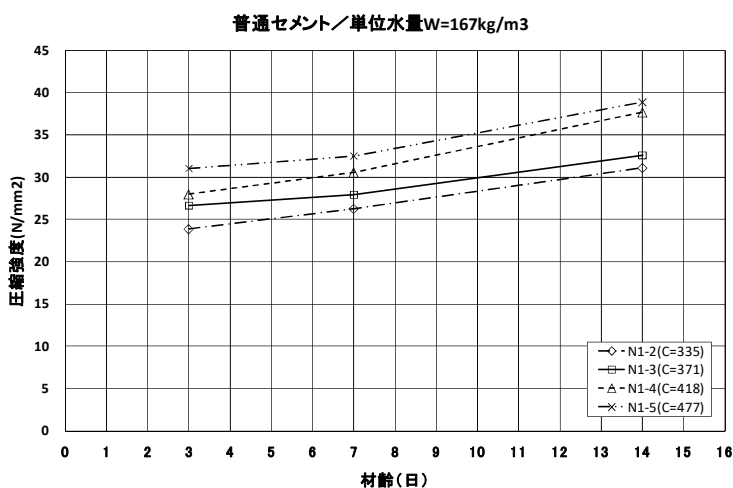


図 4.3.3 普通セメント使用による強度発現

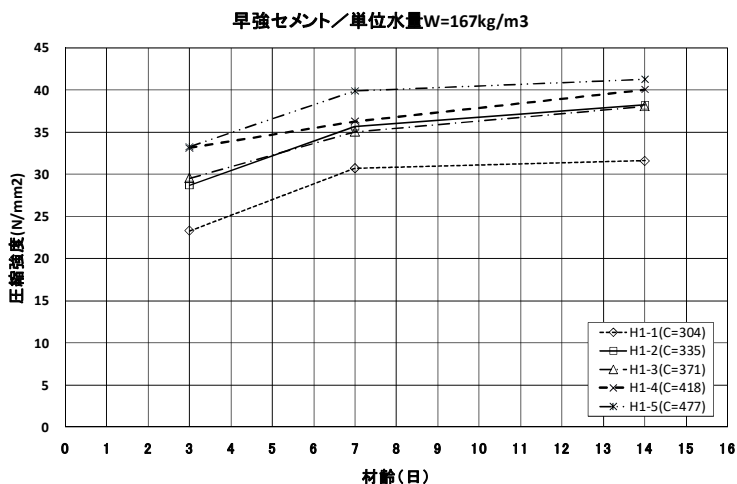


図 4.3.4 早強セメント使用による強度発現

図 4.3.5 は、同一強度発現を得るための普通セメントと早強セメントの配合を示したものである。設計基準強度 36N/mm^2 の場合、早強セメント $C=371\text{kg/m}^3$ に対して普通セメント $C=418\text{kg/m}^3$ となり、単位セメント当りで約 47kg の差が生じた。また、設計基準強度 30N/mm^2 の場合も単位セメント当り 31kg の差が生じた。これらを費用換算すると表 4.3.2 に示すように、普通セメントと早強セメントの単価は約 $2,000\sim 2,500$ 円の差があるため、使用セメント種や地区により 1m^3 当り $250\sim 550$ 円程度の差が生じることから、一般にプレキャストコンクリート会社では普通セメントが使用される理由と考えられる。

また、図 4.3.6 は同一セメント量に対して単位水量を変化させた場合の強度発現である。今回の単位水量の範囲では強度発現に大きな傾向の違いは生じていないことから、この試験配合をベースにしても問題はないと思われる。プレキャストコンクリート工場では同一製品の見込み生産時や限定製品工場の場合などは工場ラインに同一製品を連続して製造するため打設コンクリートの配合の変化はないが、一般にはさまざまな製品群が流れて製造するため、製品毎に所要強度や流動性が異なるためバッチごとに配合も変えなければならない非常に煩雑となると同時に配合違いも生じることがあり管理を十分に行う必要である。

表 4.3.2 単位セメント量の差による製造単価

設計基準強度(14日材齢)(N/mm^2)	セメント種	単位セメント量 (kg/m^3)	セメント単価 ¹⁾ (円/ton)	1m^3 当りのセメント価格 (円/ m^3)	差額 (円/ m^3)
36	普通	(477)~418	10,800	(5,151)~4,514	(-607)~+234
	早強	(335)~371	12,800	(4,544)~4,748	[542] ²⁾
30	普通	335	10,800	3,618	+274
	早強	304	12,800	3,892	[506] ²⁾

注 1)物価版(2010.7)金沢地区価格、

2)秋田大館地区実勢価格 (普通 8,200 円/t、早強 10,700 円/t)

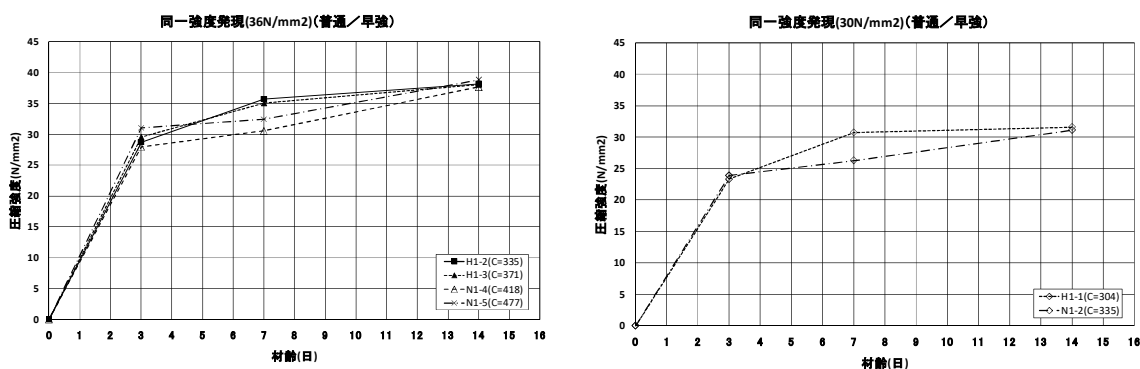


図 4.3.5 普通セメントと早強セメントの同一強度発現

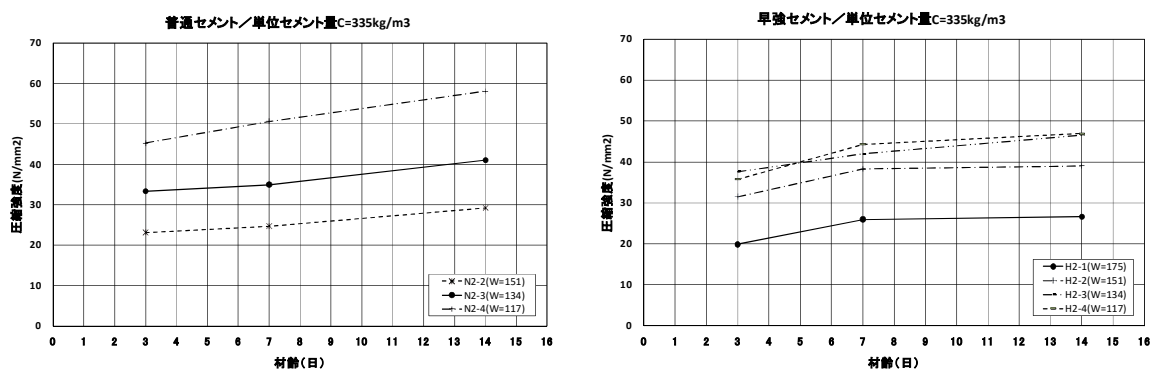


図 4.3.6 単位水量の違いによる強度発現

4.4 プレキャストコンクリートの製造方法

プレキャストコンクリートの製造方法は、現場打ちコンクリートと大きく異なり強制的高温養生[4.4]及び加圧の有無により行われることにある。ここでは、プレキャストコンクリートの多くで採用されている「常圧蒸気養生」について示すものである。

4.4.1 蒸気養生履歴と製造サイクル

プレキャストコンクリートの養生には、圧力を高めた状態で蒸気養生を行う「オートクレーブ養生法」と常圧下で行う「常圧蒸気養生」の2つに分類される。表 4.4.1 にその特徴を示す。

表 4.4.1 プレキャストコンクリートの養生方法

養生方法		特徴
人為的	オートクレーブ養生	圧力下において蒸気養生を行う方法。主にパイロ製造などに用いられる。常圧蒸気養生に比べ長期強度特性の低下が少ない[4.5]
	(常圧) 蒸気養生	蒸気養生層内で、「前置時間、昇温速度、最高温度、最高温度継続時間、降温速度」の蒸気履歴を負荷させて製造する方法でプレキャストコンクリートの多くはこの手法で製造されている。
自然環境	自然養生	屋内又は屋外で自然環境下に放置して強度発現を得る養生方法で、一般に現場打ちコンクリートの養生方法であるが、RCセグメントなどのプレキャストコンクリートのサイト製造等でも採用されている。

4.4.2 打設及び締固め方法

プレキャストコンクリートは、打設方法とその締固め方法により、表 4.4.2 に

示すように分類される。コンクリートの状態として流動性を持ったフレッシュコンクリートから単位水量がほとんどない硬練りコンクリートまで幅広く、さらに締固め方法も多彩である。しかし、これらの打設及び締固め方法は、製品ごとにその手法がほとんど決まっており、製品の特徴を加味した方法を採用しているということである。

表 4.4.2 プレキャストコンクリートの打設と締固め方法の分類

種類 ^{注)}	コンクリート状態	締固め方法	主な製品
振動締固め (流し込み)	フレッシュコンクリート	型枠にフレッシュコンクリートを投入し、振動台（低周期、高周期）及び棒バイブレーターで振動を与えて締固める。	U形側溝、鉄筋コンクリートボックスカルバート
加圧締固め	フレッシュコンクリート	型枠にフレッシュコンクリートを投入した後に、ふたをして圧力を加えて締固める。	加圧コンクリート矢板、セグメント
振動・加圧締固め（即脱） (バイコン)	硬練りコンクリート	振動をかけながら型枠に硬練りコンクリートを投入し、圧力と振動によって成形し、その直後に脱型する。	平板、インターロッキングブロック、積みブロック
遠心力締固め	フレッシュコンクリート	筒状の型枠にフレッシュコンクリートを投入した後に、または投入しながら型枠を回転させることによって成形する。	遠心力鉄筋コンクリート管、マンホール、遠心力高強度プレストレストコンクリートくい(PHC くい)
ロール転圧締固め	硬練りコンクリート	筒状の型枠を回転させながら硬練りコンクリートを投入し、ロールによる強力な圧力と振動によって成形する。	遠心力鉄筋コンクリート管、マンホール、プレストレストコンクリートくい
その他の製造方法	高流動コンクリート	高流動コンクリートを用いて成形する。	—

注) () 内名称は、一般名称又は呼称

4.4.3 後養生と保管

プレキャストコンクリートは、脱型後屋外又は屋内施設に出荷時まで放置保管される。出荷までの期間が長い場合は、自然環境下で後養生を行うことになり、その間に所定強度まで発現を期待することになる。一方、出荷までの期間が短い場合は、その出荷時点までに強度発現を完了しておく必要がある。なお、鉄筋コンクリート造セグメントは、後養生期間中は水中養生を行うものもある[4.6]。

4.5 プレキャストコンクリートの要求性能と評価手法

プレキャストコンクリートに関する要求性能は表 4.5.1 に示されるようにさまざまな基準で規定されている。材料の規格としての要素が高い JIS 規格では JISA5371-2016「プレキャスト無筋コンクリート製品」、JISA5372-2016「プレキャスト鉄筋コンクリート製品」、JISA5373-2016「プレキャストプレストレストコンクリート製品」の3つの構造形態別の規格及び JISA5361～JISA5365 プレキャストコンクリート製品の基本規格に分類され基本的には性能規定型体系となっているが、現実には個別製品ごとに推奨仕様が有り、要求性能や評価手法は製品個別毎に従うことになっている。また、設計基準として道路橋示方書や道路土工、参考基準としての土木学会コンクリート標準示方書などが存在する。これらの基準を鑑み総括的に要求性能をまとめると、表 4.5.2 に示すように、限界状態（使用状態、終局状態）性能、耐久性能の力学的性能に加え外観・形状などの物理的性能と施工性能にまとめることができる。プレキャストコンクリートの使用状態性能とは使用時に想定される常時の荷重に対して安全であり、ひび割れが発生してはならないもしくは許容ひび割れ幅以内である性能で、主たる評価指標は圧縮強度やヒューム管などの曲げ強度である。耐久性能とは想定される劣化作用に対して、耐久性を保持しなければならない性能で評価指標は寒冷地域での耐凍害抵抗性などである。また施工性能とは運搬、設置、組立などの施工性を確保しなければならない性能であり、躯体に関しては鉄筋間隔やかぶりなどの規定がある。なお、プレキャストプレストレストコンクリートに関しては、一般のプレキャスト無筋及び鉄筋コンクリート製品と比べ要求性能が多く現場打ちコンクリート構造物と同等の性能を求められている。また、物理的性能として、外観（きず、ひび割れ、欠け、反り、ねじれ（板状製品の場合））や形状・寸法などがある。これら評価指標をまとめると表 4.5.2 に示すように表現できるが、実際の個別製品ごとの目標性能はプレキャストコンクリートの特徴を加味した形で照査の荷重が規定されている。

また、プレキャストコンクリートは工場で製造されるため、使用状態性能の内、圧縮強度や曲げ強度などは、製造上の品質管理として規定されている。特に JIS 認証工場取得時の規格として JISQ1012 適合性評価－日本工業規格への適合性の認証－分野別認証指針（プレキャストコンクリート製品）により厳密に管理されている。これにより製品の強度などが担保されるシステムである。

表 4.5.1 現行基準におけるプレキャストコンクリートの要求性能と評価指標

法体系	基準規格類		要求性能	評価指標
法律	道路法など		規定なし	規定なし
政令	道路法施行令、道路構造令など		規定なし	規定なし
強制規格 又は 委任規格	構造別製品群規格	JISA5371 プレキャスト無筋コンクリート製品	a)使用状態性能 b)耐久性能 c)施工性能 d)透水性性能	外観、曲げ耐力または圧縮強度、形状及び寸法
		JISA5372 プレキャスト鉄筋コンクリート製品	a)使用状態性能 b)終局状態性能 c)耐久性能 d)施工性能	
		JISA5373 プレキャストプレストレストコンクリート製品	a)使用状態性能 b)終局状態性能 c)耐久性能 d)施工性能 e)変形性能	I種 曲げ耐力 II種 変形
	基本規格・共通規格	JIS A5361 プレキャストコンクリート製品一種類、製品の呼び方および表示の通則 JIS A5362 同一要求性能とその照査方法 JIS A5363 同一性能試験方法通則 JIS A5364 同一材料及び製造方法の通則 JIS A5365 同一検査方法通則	—	—
		JISQ1012 適合性評価—日本工業規格への適合性の認証—分野別認証指針(プレキャストコンクリート製品)	製造に関する仕様	蒸気温度履歴 品質管理
技術基準	道路橋示方書・同解説(日本道路協会)		規定なし	規定なし
	道路土工—カルバート工指針(日本道路協会 平成22年3月)		限界状態設計法 a)安全性 b)供用性 c)修復性	変形照査、安定性照査・支持力照査、強度(断面力)、変位(変位照査)
	土木工事共通仕様書(平成21年度版)第2編材料編第7節セメントコンクリート製品(国土交通省)		JISA5361,5364,5365,5371,5372,5373に適合するもの	—
参考基準 (民間規格)	土木学会2007年制定コンクリート標準示方書・施工編:特殊コンクリート(14章 工場製品)		JISQ1012に適合するもの	圧縮強度(管理材令14日)、曲げ強度、ひび割れ抵抗性、外観、形状および寸法
	コンクリート製品規格(全国コンクリート製品協会)又は各地の製品技術協会		用途別性能・推奨仕様規格、技術基準	圧縮強度、曲げ強度、ひび割れ抵抗性、外観、形状および寸法

表 4.5.2 プレキャストコンクリートの性能評価指標

性能項目		具体的評価指標	照査方法	
製品製造過程	物理的製品性能	(a)外観（きず、ひび割れ、欠け、反り、ねじれ）がない (b)形状 (c)寸法	(a)目視により検査する (b)(c)計測して許容誤差以内であること	
	供用期間中	使用状態性能 ¹⁾	使用時に想定される常時の荷重に対して (a)安全である (b)ひび割れ幅が許容値以内 (c)たわみ（変形性）が許容値以内	(a)圧縮強度（製品と同一養生を行った供試体の圧縮強度又はその他適切な方法によって管理した圧縮強度で検証し、所定の材齢において所定の強度以上とする）。 (b)(c)曲げ強度（ひび割れ曲げモーメントを加えた時、規定以上のひび割れが発生しない）
		終局状態性能 ²⁾	終局時に想定される荷重に対して、 (a)破壊しない	(a)曲げ強度（ひび割れモーメントの2倍に相当する荷重を載荷して破壊しないこと）。
	耐久性能 ³⁾	想定される劣化作用に対して、 (a)耐久性を保持しなければならない	(a)W/C、空気量 (b)かぶり (c)応力腐食割れ	
施工中	施工性能	施工時に想定される運搬、設置、組立などの施工性を確保しなければならない		

注 1)使用状態性能の内、ひび割れ幅は要求がある場合に行う。また、内水圧に対する強度が要求される場合は、内水圧についても照査を行う。マンホール類では、発生応力度が許容応力度以下でなければならない。また、無筋製品ではひび割れ発生してはならない

2)終局状態性能は、購入者から要求があった場合に行う。

3) 水セメント比及び/又は（空気量が同等で、）並びに鉄筋のかぶりが同等な類似製品の実績によって判断してもよい。なお、ボール類に使用するPC 鋼材は、受渡当事者間で協議して、応力腐食割れに対する耐久性能が確認されたものを使用する。

4.5.1 物理的性能／寸法及び規格

プレキャストコンクリート JIS[4.1,4.2,4.3]では、現状は性能規定化されているが、以下に示す規定を守る必要がある。

(a)外観

外観試験は、目視によって行い、使用上有害な、きず、ひび割れ、欠け、反り、ねじれ（板状製品の場合）などの有無を調べる。また、水路用RC 製品の流水面は、実用上支障のない程度に滑らかでなければならない。

(b)形状、寸法及び寸法の許容誤差

形状、寸法及び寸法の許容誤差は、製品附属書がある場合はその規定で、附属書がない場合は、受渡当事者間による協議で決められる。

(c)配筋及び配筋の許容差

プレキャスト無筋及び鉄筋コンクリート製品は、配筋の測定を行い、次のa)及びb)の規定に適合しなければならない。

a) 配筋 配筋（鉄筋の最小かぶりを含む。）は、製品毎の附属書による。ただし、受渡当事者間の合意に基づき、PC 製品の性能を損なわない範囲で、附属書以外の配筋方法を採用しても差し支えない。また、製造業者は、配筋設計図を製品ごとに作成し、購入者から要求があった場合には、その内容を提示しなければならない。

b) 配筋の許容差 配筋の許容差は、部材の力学的特性及び耐久性が、所定の性能を満足する範囲内で、製品の種類ごとに製造業者が定める。なお、許容差は、配筋設計図に示された鉄筋及びPC 鋼材の位置と製品の鉄筋及びPC 鋼材の位置とのずれの限度値とする。

なお、配筋設計を行う場合の一般的注意事項は、次によることが望ましい。

－ 鉄筋及びPC 鋼材の最小あきは、粗骨材最大寸法の5/4 倍以上とするのがよい。
－ 必要な鉄筋及びPC 鋼材の断面積は、構造計算又は構造細目から決まるが、その断面積を満足するための鉄筋及びPC 鋼材の径と本数の組合せは一つではない。鉄筋及びPC 鋼材の径と本数は、部材の厚さ、用いる粗骨材の最大寸法などを考慮し、鉄筋及びPC 鋼材とコンクリートとの付着が十分に得られるよう、また、コンクリート部材のひび割れ分散性が良好になるように選定し、これを配置する。

配筋の測定は、鉄筋及びPC 鋼材の径、本数及び最小かぶりについて行うものとし、その方法は、次のいずれかによる。

1) 非破壊試験による測定方法 非破壊試験による測定は、電磁誘導法、レーダー法などを用いて行い、それぞれ指定された測定マニュアルに従い、鉄筋及びPC 鋼材の径、並びに本数及び最小かぶりを測定する。

2) 破壊試料による測定方法 破壊試料による測定は、曲げ強度などの性能試験を終了した試料を用いて行い、その試料のコンクリート部分をはつり、鉄筋を露出させた後、鉄筋及びPC 鋼材の径、並びに本数及び最小かぶりを測定する。

c) 打設前配筋による測定方法 コンクリート打設前後の鉄筋及びPC 鋼材の位置が、鉄筋及びPC 鋼材の組立方法、型枠への鉄筋及びPC 鋼材の固定方法、かぶりの確保方法などによって、変化しないものであるときは、コンクリート打設前の鉄筋及びPC 鋼材の径、並びに本数及び最小かぶりを測定することによって、完成品の鉄筋及びPC 鋼材の位置とみなすことができる。

4.5.2 力学的性能／強度及び曲げ耐力

無筋及び鉄筋コンクリート製品の力学的性能の具体的な性能項目の選択・指定は、JIS A 5362「プレキャストコンクリート製品－要求性能とその照査方法」によって受渡当事者間の協議による。なお、性能と製品仕様（寸法、材料など）との相関性が明らかな場合には、製品仕様を指定することによって、代替してもよいこととなっている。その性能代替仕様は、1) 寸法、2) コンクリートの圧縮強度、である。また、プレストレストプレキャストコンクリート製品の力学的性能の具体的な性能項目の選択・指定は、JIS A 5362 によって受渡当事者間の協議による。なお、性能と製品仕様（寸法、材料、構造など）との相関性が明らかな場合には、製品仕様を指定することによって、代替してもよいこととなっている。その性能代替仕様は、1) 寸法、2) コンクリートの圧縮強度、3) 配筋状況、4) 有効プレストレス、である。

なお、表 4.5.3 にプレキャストコンクリート（I 種）の性能評価指標と評価値を一覧にした。ほとんどの製品が推奨仕様が存在し規定されている。なお、II 種製品に関しては受渡当事者間で協議することになっている。

4.5.3 耐久的性能／ひび割れ抵抗性

プレキャストコンクリートの耐久性能に関して鋼材腐食及びコンクリート劣化について要求しているが、具体的要求水準は示されていない。その理由は、プレキャストコンクリートの位置づけによるところが大きいと思われる。プレキャストコンクリートは大型ボックスカルバートなどのように構造部材として取り扱う場合と歩車道境界などの簡易的部材として扱う場合と幅広い構成である。したがって、前者の構造部材は現場打ちコンクリートと同等の仕様で扱われるが、後者の簡易的非構造部材は製品が損傷を受けたら取り替えるといった考えがありそれほど耐久的な部材である必要性がないとの認識があると考えられる。しかし、昨今プレキャストコンクリートは寒冷地などの凍害に対して被害や損傷が目立つようになったことから、2010 改訂 JIS 製品から寒冷地での凍害に対して W/C や空気量の設定に注意喚起されるようになった経緯がある。

表 4.5.3 JIS プレキャストコンクリート製品（I類）の性能評価指標と評価値¹⁾

大分類	構造	小分類	性能評価指標と評価値					推奨仕様			
			圧縮強度(N/mm ²)			曲げ強度			ひび割れ		
			18-24	24-30	30 以上	荷重 (kN/m)	強度 (N/mm ²)		荷重 (kN)		
暗きょ類	無	無筋コンクリート管	製品の曲げ強度を満足する圧縮強度			20~36		ひび割れ発生なし	A-1		
	有	鉄筋コンクリート管								1種 0.25mm 2種 0.05mm	C-1
		遠心力鉄筋コンクリート管								0.05mm	C-2
		組合せ暗きょブロック		24 以上		21~30kN		0.05mm	C-3		
		鉄筋コンクリートボックスカルバート			35 以上			0.05mm	C-4		
		アーチカルバート							—		
		推進管							—		
		シールド用セグメント							—		
	組立式アーチカルバート							—			
	PC	プレストレストコンクリート管（モルタル）			50 以上 (35 以上)			ひび割れが発生してはならない	D-1		
プレストレストコンクリートボックスカルバート				40 以上			0.05mm	D-2			
舗装・境界ブロック ²⁾	無	平板		—			3 又は 4 以上	ひび割れが発生してはならない	B-1		
		境界ブロック		24 以上			—		B-2		
		インターロッキングブロック	17 以上		32 以上		3 又は 5 以上		B-3		
路面排水溝類	無	L形側壁		27 以上		26~33kN		ひび割れが発生	C-1		

		皿形側溝		27 以上				してはならない	－
	有	U 形側溝		24 以上				0.05mm	E-1
		上ぶた式 U 形側溝		24 以上(1 種) 27 以上(2 種)				0.05mm	E-2m または E-3
		落ちふた式 U 形側溝		27 以上				0.05mm	
		L 形側溝		27 以上				0.05mm	E-4
		皿形側溝							－
		排水性舗装用側溝。縦断管							－
		縦断こう（勾）配可変側溝							－
		浸透・透水性側溝							－
擁壁類	有	L 形擁壁							－
		逆 T 形擁壁							－
		控え壁式擁壁							－
		鉄筋コンクリート矢板			60 以上				B-2
		組立土留め							－
		井げた組擁壁							－
		補強土壁							－
		大形積みブロック		24 以上					B-1
	PC	PC 壁体			70 以上				－
	矢板			70 以上			0.05mm	C-1	
くい類	有	鉄筋コンクリートくい			40 以上			* 外径および長さで決まるひび割れ曲げモーメント	A-1

第4章 プレキャストコンクリートの製造効率化における課題の抽出

		PC	プレストレストコンクリート くい (PC くい、ST くい、 節くい)			A 種 80 以上 B,C 種 85 以上			ひび割れ曲げモーメントおよびせん断強度を加えた時、ひび割れは発生してはならない	E-1
			プレストレスト鉄筋コンクリート くい (PRC くい、PRC 節くい)							—
マンホール類	有		マンホール側塊		24 以上					D-1
			組立マンホール		24 以上					—
用排水路類	有		フリューム			30 以上			0.05mm	F-1
			ベンチフリューム			30 以上			0.05mm	F-1
			組立土留め			30 以上				F-2
			L 形水路							—
			組立さく (柵) きよ							—
			矢板							—
共同溝類 4)	有		共同溝							—
			電線共同溝							—
			洞道							—
			ケーブルトラフ		24 以上				0.05mm	G-1
ポール類	PC		プレストレストコンクリート ポール			50 以上 (PC 導入時 25 以上)	50~110	1.5~15	0.25mm (残留 0.05mm)	A-1
			照明用化粧ポール							
橋りょう	橋	PC	スラブ橋げた			50 以上			ひび割れが発生してはならない	B-1

類 ³⁾	けた	輪荷重スラブ橋げた			70以上				B-1
		けた橋げた			50以上				B-1
		道路橋橋げた用セグメント			50以上				B-2
	床版	合成床版用プレキャスト板			50以上			ひび割れが発生してはならない	B-3
		道路橋用プレキャスト床版			50以上				B-4
貯水施設類 ⁵⁾					○				-
防災施設類 ⁵⁾					○				-
のり(法)面被覆ブロック類 ⁴⁾	無	積みブロック	18以上						D-1
		大型積みブロック	21以上						D-2
緑化ブロック類 ⁴⁾			○ (積みブロック)	○ (大型積みブロック)					-
鉄道施設類 ⁶⁾					○				-

注1)「JIS A 5371 プレキャスト無筋コンクリート製品」、「JIS A 5372 プレキャスト鉄筋コンクリート製品」、「JIS A 5373 プレキャストプレストレストコンクリート製品」を参考。

2)インターロッキングブロックは、製品の圧縮強度をコンクリートの圧縮強度として代用してもよい。平板、インターロッキングブロックは、製品の曲げ強度をコンクリートの曲げ強度として代用してもよい。ブロックの透水係数 $1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ 以上、保水性 0.15b/cm^3 以上、吸水性 30 分後の吸い上げ高さ 70%以上

3)品質保証時。別途プレストレス導入時の規定あり。

無筋・鉄筋・プレストレスによって圧縮強度が変わる製品がある。

4)のり面(法)面被覆ブロック類・緑化ブロック類は大きさによって、積みブロックまたは大型積みブロックになる。

5)貯水施設類・防災施設類・共同溝類は、形状が暗渠の場合は暗渠類のボックスカルバートを適用し、U形+蓋の形状の場合は路面排水溝(用排水路類)を適用。

6)鉄道施設類において、トラフの場合は貧配合になる。

4.5.4 コスト評価／積算体系と製造コスト

(a)積算体系

公共工事における工事価格は、一般に国土交通省等発注機関の土木工事積算基準により算定される。図 4.5.1 に国土交通省の積算体系[4.7]を示す。この体系では工事価格は、直接工事費、共通仮設費および現場管理費からなる間接工事費、並びに一般管理費等と消費税等相当額から構成されている。この中で、諸経費（共通仮設費、現場管理費、一般管理費等）の積算は、直接工事費、純工事費、工事原価におのこのの諸経費率を乗じて算出する方法が用いられている。この体系にプレキャストコンクリートを当てはめると、製品の直接工事費は製品製造費と据付費で算定され、資材単価の部分でプレキャストコンクリート単価になり据付費は機械経費に含まれていると考えられる。また、一般管理費と間接工事費の経費率に関しては、現場打ちコンクリートと同じ経費率が用いられている。よってプレキャストコンクリートに関しての独自の積算体系は厳密には存在せず、現場打ちコンクリートの積算体系の一部を代替していると考えられる。したがって、たとえばプレキャストコンクリートを据え付けて工期短縮が図れたとしてもその短縮分はカウントされていない。また直接工事費の内、労務単価なども実際には現場での打設や配筋、型枠等がないため相当削減できるなど、プレキャストコンクリートの最大のメリットが積算に反映されていないことになる。少なくとも間接工事費に関しては、大がかりな仮設や重機の運搬等が軽減されることから経費率を実勢にすることは可能で、その結果発注金額の削減が行え、税金の無駄をなくすことができるため、プレキャストコンクリート独自の積算体系を設定する必要があると考えられる。

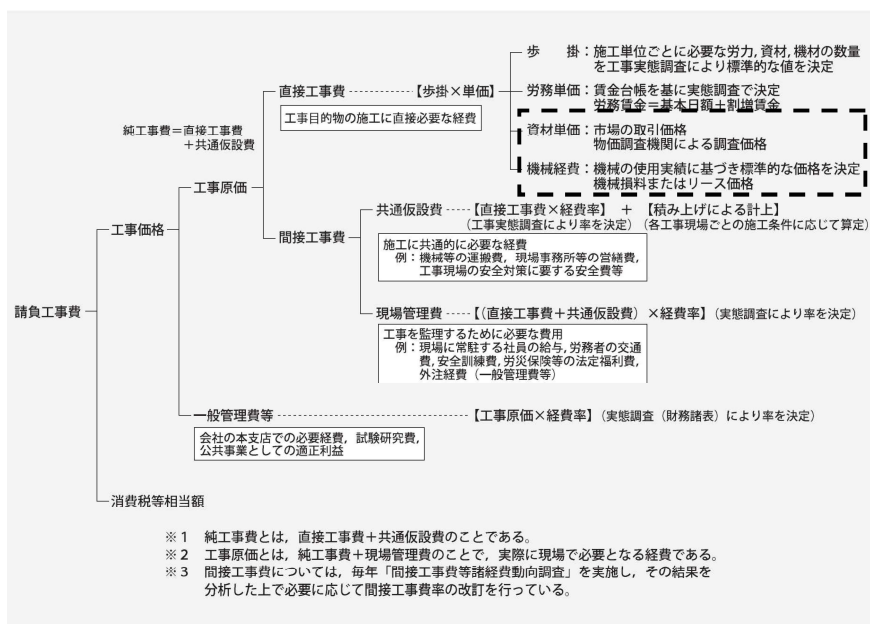


図 4.5.1 土木工事積算体系[4.8]

(b)製造コスト

プレキャストコンクリートの製造コストは、製造ラインでの連続製造のため製品一個一個での費用の算定は難しいので、会社当りの1年間の全コストの仕分けから割り戻す方法で算定した。したがって、製品の販売数や製作難易度などのファクターは一切入っておらず、あくまで材料的なコストの平均的価格と捉える必要があるが、図 4.5.2 に5工場で生産した製品の費目別製造原価を示した。プレキャストコンクリートの製造コストに占める割合は、材料費(57.6%)と製造費(27.3%)合わせて約85%を占めている。材料費は、購入材料であり昨今の高品質材料の枯渇問題や燃料費高騰などの社会情勢から高騰し続けており、材料費のコスト削減は難しい項目である。なお、混和材料として廃棄物またはリサイクル材を用いることが材料費削減の策として存在するが大きく2つの問題がある。1つは高温履歴を負荷させたとき所要の性能が確保できるかや材料のばらつきが大きいため品質管理手法の確立などの技術的課題が多いこと。2つ目は、材料費は比較的安価(たとえばフライアッシュ 200 円/ton)であるが、工場までの運搬費用を加味すると必ずしも安いとは言えない部分がある。などすぐに採用するには解決しなければならない問題がある。一方、製造費は、自分自身の製造のやり方を工夫することで出来る部分であることや特に製造工程の約9割の時間を占める常圧蒸気養生履歴が自主規制でできるため大きなコスト削減が可能と考えることができる。その他の費用に関しては、工場での管理費であることから若干の削減はできるものの大きな削減は難しいと考える必要がある。

コンクリート製品の費目別製造原価

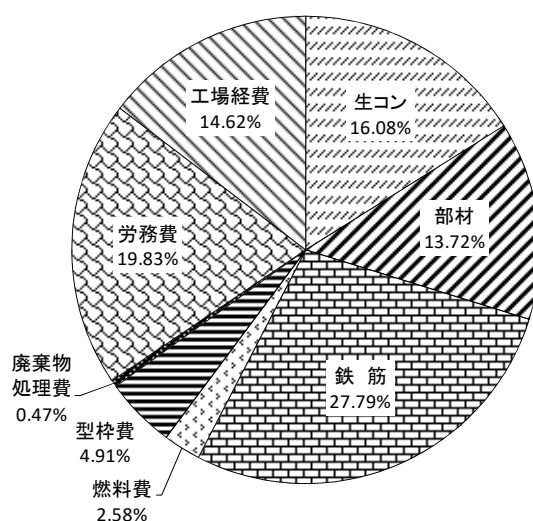


図 4.5.2 プレキャストコンクリートの費目別製造原価

以上のことからプレキャストコンクリートのコスト削減策は、製造コストの観点からも製造工程の効率化がコスト削減による効果が高いと位置づけられる。また、表 4.5.4 は、本研究で提案する製造方法の改善によるコスト削減が見込める科目部分である。出荷時強度を確保するための最適な蒸気養生履歴を設定することで単位セメント量の削減や微粉砕セメント型速硬性混和材の添加により脱型時強度を向上させ蒸気養生履歴時間の短縮などが主な改善点である。つまり、蒸気養生履歴を通常の日から 1 / 3 または 1 / 2 に時間短縮することで、型枠の回転率の向上、蒸気燃料費の削減ならびに人件費の削減に直接的につながると考えられる。

表 4.5.4 プレキャストコンクリートの製造費目と製造改善対象費目

分類	費目	占有比(%)		製造方法の改善効果
材料費	生コン	16.08	57.59	○ (使用量減)
	鉄筋	27.79		△
	その他 (スペーサー、離型剤、補修材など)	13.72		△
製造費	労務費 (補修も含む)	19.83	27.32	○ (サイクル短)
	燃料費	2.58		○ (サイクル短)
	型枠費	4.91		○ (サイクル短)
その他の経費	工場経費 (品質管理費を含む)	14.62	15.09	△
	廃棄物処理費	0.47		△
合計		100		—

4.6 プレキャストコンクリートの製法改善法

プレキャストコンクリートの製造は、図 4.6.1 に示すように効率的な製造ラインが組み立てられており、一般的製造ラインの時間配分は図 4.6.2 に示すようになる。この図から分かるようにコンクリート製造過程における最も時間的拘束を受ける工程は蒸気養生であり約 9 割を占めていることがわかる。なお、蒸気養生以外の工程では、ラインの配置や人員構成など効率化が図られておりこれ以上の時間短縮は難しい状況にある。このためこの蒸気養生を効率化することが出来れば、プレキャストコンクリートの製造サイクルが大幅に短縮されることは自明である。そして、この時間短縮こそがプレキャストコンクリート製造コストの削減に直接つながると考えられる。

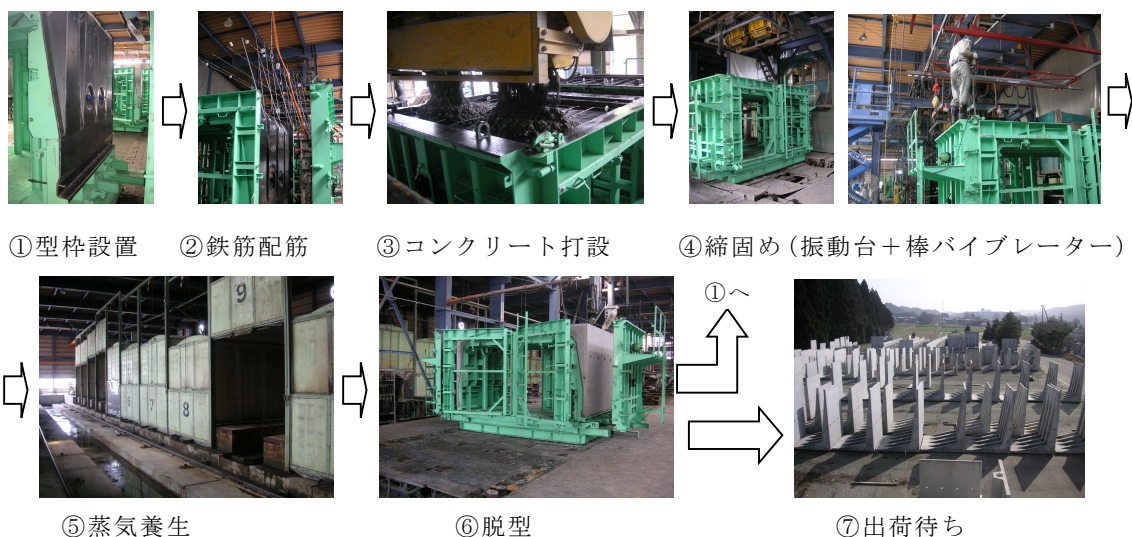


図 4.6.1 プレキャストコンクリートの一般的製造プロセス

工程	実労務時間													
	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
準備工														
型枠設置														
鉄筋配筋														
打設														
締め														
蒸気養生 前置														
〃 昇温														
〃 最高温度														
〃 降温														
〃 自然養生														
脱型、清掃														
補修、移動														

図 4.6.2 プレキャストコンクリートの製造工程時間割

(1)蒸気養生履歴

蒸気養生は、図 4.6.2 に示されるように、5つの温度履歴で構成されている。「前置時間」は、セメントを練混ぜしてから凝結開始までの時間であり、一般には2～3時間[4.4]とされている。「昇温時間」は、前置温度から最高温度までの温度上昇の時間であり、一般には15～30℃/時間の速度であり、昇温速度が速いと異常硬化の恐れがあるとされている。「最高温度および継続時間」は、蒸気養生による最高温度とその継続する時間であり、一般には最高温度65℃以下で3～4時間とされている。コンクリートは温度が60℃以上になるとシリカの溶解度が急速に増大するためカルシウムシリケートの反応が著しく促進され、逆にCa(OH)₂は直接的に減少することから、蒸気養生温度を60～70℃に設定されている理由である。なお水和反応のメカニズムから90℃程度までは基本的に変わらないためこの最高温度が限界温度と考えられる。「降温」は、最高温度から常温まで温度を下げる下降速度であり、一般には急激な温度下降はひび割れ発生などの不具合を生じる恐れがあることから、5℃/時間程度とされているが、鉄筋量が少ない製品では収縮拘束帯がないため必ずしも急激な降温によりひび割れが発生するとは限らない。最終養生の「自然養生」は、常温まで下げた状態で自然環境下で養生を行う行為であり、出荷までの時間を示す。これら蒸気養生過程での温度管理の背景は、1979年以前のJIS製品[4.9]では規定がなされていたが、1979年のJIS改訂時において自主規制になり、現行のJIS[4.1,4.2,4.3]では特に規定していない。しかし、JIS製品を製造する工場を認証する現行のJIS製品工場認証の審査では、JISQ1012[4.10]に規定されている「製造方法」について詳細に提示することが求められており、この内容は、基本的に製品メーカーが自己管理のもとでプレキャストコンクリートの「要求性能を満足する蒸気養生履歴」を与えることができる、いわゆる性能規定型の規定となっているが、このシステムを採用できる製品メーカーは資本力と技術力を兼ね備えた一部の大手製品メーカーのみで、現実には各製品メーカーが独自に蒸気養生履歴を提案することは困難な状況である。したがって、蒸気養生履歴の設定は、土木学会コンクリート示方書施工編[4.4]に示されている蒸気養生履歴をよりどころとし、結局のところ図 4.6.2 に示した各工程での時間割を厳密に守る仕様規定となってしまっている。またJIS認証を一端受けると蒸気養生履歴の変更は再認証の対象となることから、このJIS製品工場認証制度は、製造時間の短縮などの技術発展の妨げになっていると言っても過言ではない。

こうした背景から本研究では、プレキャストコンクリートの製造サイクルの9割を占める蒸気養生過程を短縮するためのシステムを提案するものである。

(2)製造過程を考慮した性能のクリティカルポイント

プレキャストコンクリートの要求性能は、一義的には出荷時強度を満足する

ことであるが、実際の製造過程を考慮した場合は、出荷時強度以外でもクリティカルポイントが存在する。図 4.6.3 は蒸気養生履歴を受けたプレキャストコンクリートの強度発現曲線である。設計基準強度 30N/mm^2 の製品の場合、材齢 14 日での出荷時強度を経済的に満足する配合設計を行うと単位セメント量 335kg/m^3 で最適配合となる。しかし、この配合設計では、脱型材齢を 1 日で行う場合には約 10N/mm^2 程度の強度であるため脱型は可能であるが、それ以前に脱型する場合は、 10N/mm^2 以下となるため脱型した場合、端欠損が生じたり吊りのための作業が出来ない状況となる。一方、材齢 1 日以前に脱型強度を約 10N/mm^2 以上を満足するための配合設計を行うと、材齢 14 日の出荷時強度は、 40N/mm^2 近くまで強度発現し非常に不経済な富配合となる。なお、この配合は出荷時材令を 7 日に設定しても十分に対応ができる配合である。つまり、蒸気養生履歴を負荷させるプレキャストコンクリートは、表 4.6.1 に示す強度に関するクリティカルポイントとして脱型時強度と出荷時強度の 2 つが存在し、この 2 つのポイントを通過する強度発現が理想的強度曲線となるが、脱型時強度と材齢 14 日強度を満足する配合設計は在来のセメント材料を用いた場合では不可能と考えられる。

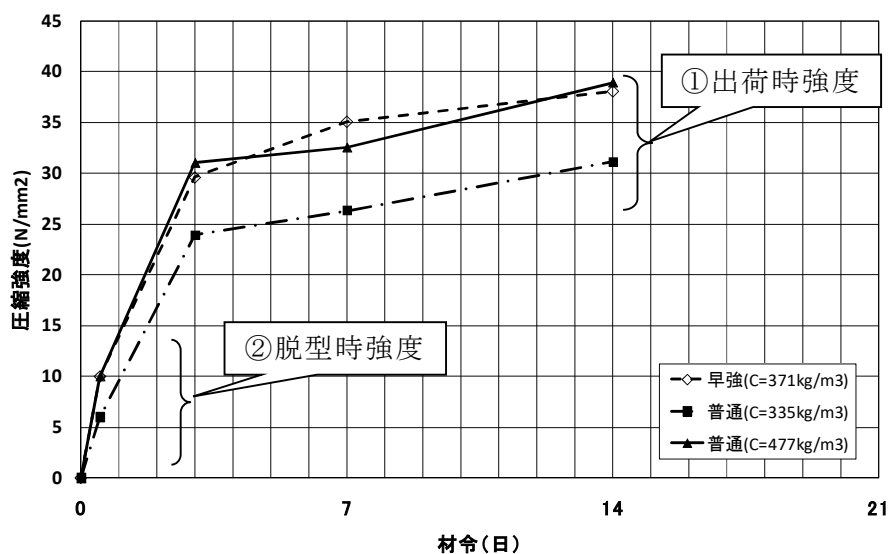


図 4.6.3 プレキャストコンクリートの強度発現性能とクリティカルポイントの関係

表 4.6.1 プレキャストコンクリートの製造上のクリティカルポイント

クリティカルポイント	管理材令	要求性能と評価指標	機能
①出荷時強度	14日または7日	設計基準強度の満足	使用性、耐久性
②脱型時強度	4から10時間	圧縮強度 10-15N/mm ²	吊上げ強度、欠け防止

(3)製造効率化手法の抽出

現在市販されているセメント材料及び混和材料等を組み合わせることでは、2つのクリティカルポイントを満足する配合が得られないことがわかった。2つのクリティカルポイントを満足するための手法として、出荷時強度は、配合、いわゆる、単位セメント量の調整で可能である。問題は、脱型時強度を如何にコントロールするかに着目される。まず出荷時強度を経済的に満足する配合設計を行い、その配合に対して脱型時強度のみを向上させる混和材を添加することでプレキャストコンクリートの最適強度発現を得る手法が考えられる。表 4.6.2 は、脱型時強度を向上させる手法の一覧である。セメント、混和材さらに化学混和剤による手法が存在するが、これらの手法をプレキャストコンクリートの製造システムと照らし合わせて、

①材料コストアップが少ない（システムとしてはコスト縮減）

②JIS 製品化が可能（JIS の再取得が必要ない）

③現状の技術力および設備で対応できる

④夏場、冬場での配合変更に対応できる（または、外気温変化に対応が容易である）

の4つの観点から適切な手段の選定を行う必要がある。どの手法もメリット・デメリットが存在するが、新 JIS への移行義務期間が終了した現在では、新たに JIS を取得するにはあまりにも負担（1申請 300万円程度）が多すぎることから、JIS を取得した工場への適用を鑑みて、JIS セメントの付加材料 5%規定²が適用できる市販のポルトランドセメントを粉砕して製造できる「微粉砕セメント型速硬性混和材」を用いる手法が最適であると判断される。

² JISR5210 ポルトランドセメントでは、少量混合成分として、5%まで認めている。

表 4.6.2 脱型時強度発現性を求める手段

手法		手法の利点欠点		プレキャストコンクリートへの適用性				総合評価
材料	具体的例	利点	欠点	コスト増が少ない	JIS製品への対応	技術力が必要なし	気候変動等への対応(配合修正)	
セメント	普通セメントから早強セメントへの変更	・配合の見直しのみで対応できる	<ul style="list-style-type: none"> ・セメント価格がUPする。 ・大サイロの増築が必要(夏場 OPC、冬場早強) 	×	△	◎	○	○
	普通セメントから速硬性セメントへの変更		<ul style="list-style-type: none"> ・セメント価格がUPする。 ・大サイロの増築が必要 ・JIS製品工場の再認証が必要(主要材料の変更) ・構造部材への適用の実績がない ・蒸気養生環境下での制御が難しい 	×	×	△	○	△
混和材	ジェットセメントなど速硬性混和材の混和	<ul style="list-style-type: none"> ・セメント内割混和で対応できる ・JIS 5%ルールが適用できる 	<ul style="list-style-type: none"> ・混和材価格がUPする ・小サイロの増築が必要 ・蒸気養生環境下での制御が難しい ・一般 PCa メーカーでは配合設計が難しい。 ・JIS製品工場の再認証が必要(主要材料の変更) 	△	△	△	◎	△
	微粉碎セメント型速硬性混和材の混和		<ul style="list-style-type: none"> ・混和材価格がUPする。 ・混和材製造に手間がかかる ・小サイロの増築が必要 	○	◎	○	◎	◎
化学混和剤	水和促進剤	<ul style="list-style-type: none"> ・水量置換で対応できる 	<ul style="list-style-type: none"> ・混和剤価格がUPする。 ・混和材容器の増築が必要 ・蒸気養生環境下での制御が難しい ・一般 PCa メーカーでは配合設計が難しい。 ・JIS製品工場の再認証が必要(主要材料の変更) 	△	×	△	○	△

注) ◎：適用が高い、○：適用、△：適用が低い、×：不適

4.7 まとめ

本章では、プレキャストコンクリートの製造方法とその課題について整理した。プレキャストコンクリートは JIS 制定以来すでに 60 年以上の歴史を持っており、歴史が古いからこそ仕様ががっちりしており改正されてこなかった部分も数多く存在する。特に、プレキャストコンクリートの要である蒸気養生履歴は履歴の仕様が決められ、昭和 54(1979)年自主規制となった現在でも従来仕様を踏襲しており、独自の仕様に変更する会社もいくつか存在するものの全国 4,000 社のうち、一桁の数の会社に過ぎない。さらに新 JIS 認証制度が発足した今日の取得会社は約 1,600 社であり、この蒸気養生履歴の変更はますます不可能に近い状況となり、技術開発や更新が遅れたことがプレキャストコンクリートの発展を阻害しており、現在取得済みの新 JIS の再認証なしでプレキャストコンクリートの製法改善は大きな意義があると考えられる。

本章では、プレキャストコンクリートの製造管理の中で、出荷時強度と脱型強度の 2 つのクリティカルポイントが存在し、現在のセメント材料では同一配合では実現出来ないことを明確にした。その対策としては、使用材料による最適な蒸気養生履歴を行うことに加え、脱型強度を増加する混和材の添加が必要なことを示した。

【4章 参考文献】

- 4.1 一般財団法人日本規格協会：JISA5371-2016「プレキャスト無筋コンクリート製品」
- 4.2 一般財団法人日本規格協会：JISA5372-2016「プレキャスト鉄筋コンクリート製品」
- 4.3 一般財団法人日本規格協会：JISA5373-2016「プレキャストプレストレストコンクリート製品」
- 4.4 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書[施工編：特殊コンクリート]14 章工場製品 14.5.5 養生、2007.3、pp429-431
- 4.5 たとえば、篠原和久：蒸気養生コンクリートの圧縮強度に関する研究、建築研究報告、建設省建築研究所、第 52 号、昭和 43 年 3 月、pp49-102
- 4.6 東京地下鉄（株）：シールド工事設計施工基準
- 4.7 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書[施工編：特殊コンクリート]14 章工場製品 14.2.2 コンクリート強度(1)(a)、2007.3、pp421-423
- 4.8 国土交通省土木工事積算基準、財団法人建設物価調査会、平成 20 年度版
- 4.9 たとえば、日本規格協会：JISA5303-1956「遠心力鉄筋コンクリート管 4.3 養生 4.3.2(2)」
- 4.10 日本規格協会：JIS Q1012 適合性評価－日本工業規格への適合性の認証－分野別認証指針（プレキャストコンクリート製品）

第5章 プレキャストコンクリートの速硬性混和材による 製造効率化

5.1 はじめに

プレキャストコンクリートは、建設現場の環境や技術者の能力に作用されずに製品化できることから、高品質のコンクリート構造部の構築に有用である。しかし、現行積算体系が構築されていないことから、現場打ちコンクリートと対抗出来る状況にない。特に、製造効率化等を行い、製造コストの削減が必須の状況である。しかし、現行では製造において JIS 化されており、必ずしも製造効率化が十分にできない状況にある。

そこで、本章では、コスト縮減を念頭におきつつ「プレキャストコンクリートの効率的製造システムの構築」を目指す手段として、

- ①脱型時の品質・性能に着目した微粉碎セメント型速硬性混和材を用いた対策
- ②出荷時の品質・性能に着目した蒸気養生履歴の最適化

の2つの手法を検討した。以下に、それぞれの検討結果を示す。

5.2 速硬性混和材使用による製造効率化対策

セメントは、水和反応により水和生成物を生成してセメント硬化体を形成する非常に古典的な無機材料である。つまり、セメント粒子表面の鉱物組成と水との接触により水和反応が起こるためその接触度合や鉱物組成の溶出具合により水和反応の程度が変わることを意味している。こうした特徴からセメントは、粒子の大きさ（粒径、比表面積）や形状を適度に加工することで反応（凝結）時間が制御されてきた。一般にはクリンカー組成の量を変化させることにより普通セメントや早強セメントなどが作られてきた。さらにカルシウムサルフェート系鉱物などを混和させた超早強セメントなど鉱物組成等[5.1]を制御したセメントなどさまざまな形で硬化時間の制御や凝結時間の制御がなされてきた。こうした水和反応の特徴を利用してセメントの硬化時間や凝結時間を制御することは可能であるが、クリンカー鉱物からの早強型セメントなどの製造は大規模なセメント製造装置を有するいわゆるセメント製造会社のみができる手段であり、一般ユーザーが行うことは施設の面で難しい。一方、市販セメントを微粉碎することでセメント粒子の比表面積を大きくしたり形状を加工することは最新の粉碎装置を用いれば一般ユーザーでも可能である[5.2]。

そこで本章では、プレキャストコンクリートの若材齢時強度を向上させる目的のため市販セメントをジェットミルで粉碎加工した、いわゆる「微粉碎セメント」を用いることを発案し、その基本性状について示したものである。なお、

本研究で開発した微粉碎セメントをプレキャストコンクリートに適用する場合、他の微粉碎セメントと区別するため「微粉碎セメント型速硬性混和材」と称した。

(1) 速硬性混和材の製法

現在、市販されているセメントは、JISA5210（ポルトランドセメント）、JISA5211（高炉セメント）、JISA5213（フライアッシュセメント）や最近ではJISA5214（エコセメント）などが規格化されているがセメント粒子の大きさは図 5.2.1(a)(b)にあるように平均粒径(D50)20 μm 程度で粒度分布は 1~100 μm の幅広い分布を有している。また比表面積もこれらの粒径や粒度分布に比例して 3,000~4,000 cm^2/g 程度である。このセメント径や粒度分布はその時代のセメントへの要求性能の変化に追従して変遷[5.3,5.4,5.5]しているが、大方、図 5.2.1(a)(b)に示す粒度分布と考えることができる。

また、「微粉末セメント」とは、市販のポルトランドセメントに対して微粉の部分を称する呼称であるが、科学的には、

- ①セメントを粉碎することで粒径を小さくした微粉末セメント
- ②セメント粒径の小さな部分を分級などにより集めた微粉末セメント

の2種類が存在し、粒径や粒度分布などの物理的特性は同じであっても、水和などの化学特性が異なる特徴を有している。以下にこれらの特徴を示す。

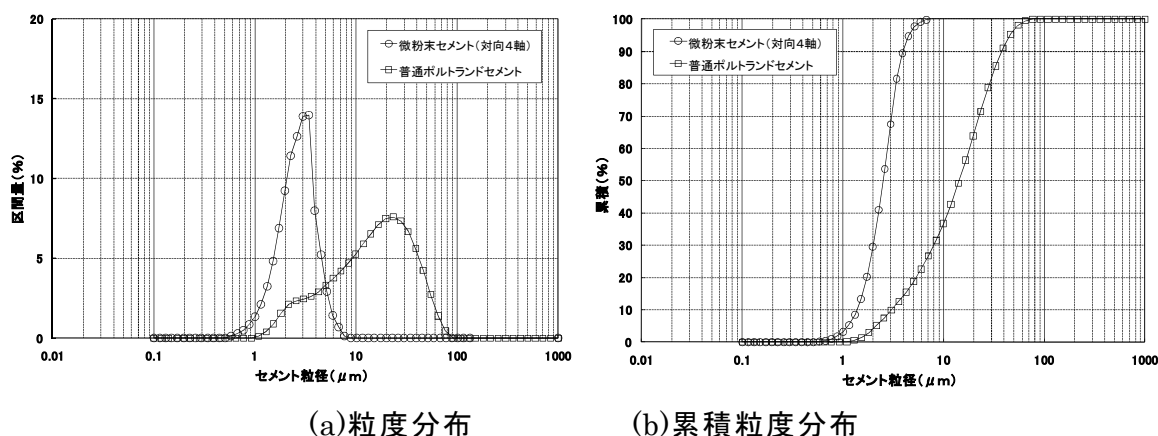


図 5.2.1 セメントの粒度分布と累積粒度分布

(2) セメント粉碎による速硬性混和材の製造と特徴

微粉末セメントの内、市販ポルトランドセメント（以下「市販セメント」という。）を粉碎した微粉末セメント（以下「微粉碎セメント」という。）の製造は、ポルトランドセメントを物理的に粉碎することで製造することが出来るが、

この手法は市販の一般セメントを製造する過程でも用いられている手法である（図 5.2.2 参照）。それは拳ほどの大きさを持っているクリンカーを鋼製のボールが入ったミル（ボールミル）を用いて所定の大きさ（比表面積 3,000～4,000cm²/g 程度／JIS 規格値）まで粉砕して製造する手法である。したがって、この粉砕行為をさらに進めることで高比表面積の微粉砕セメントを製造することが可能であるが一般には行われていない。それは、粒度分布からさらに進めて微粉砕セメントを製造するには多大な粉砕エネルギーが必要となり当然コストがアップすることに加えて、もともと微粉砕セメントの比表面積の粒度分布を要求していないこと、ボールミルの粉砕性能が高比表面積の μm オーダーのセメント粒子を製造する能力に乏しいことなどから現実問題として行われていない。なお、ひび割れ注入用のセメントや地盤注入用コロイダルセメントなどは微粉末セメントとして製造されているが、これらは特殊なセメントであり用途がはっきりした場合のみ製造されているもので汎用品でない。

物質の粉砕手法には、湿式と乾式が存在する。一般に超微粉砕（ナノオーダー）粒子を製造する場合は湿式粉砕装置が用いられる。湿式粉砕は水の力を利用した粉砕方法であり、水に圧力をかけてジェット水流を作り、その衝突のエネルギーで物質を粉砕する手法でコピーターナーに用いられる炭素や化粧品に添加される真珠殻粉などはこの手法を用いて製造されている。この手法の特徴は、乾式粉砕に比べて少ないエネルギーで小さな粒子に粉砕できる点にある。したがって、多くの鉱物粉砕に用いられているが、粉砕行為が最終行為である場合に用いられる手法である。一方、粉砕行為が最終工程でないセメントや水と反応する物質の粉砕の場合は、高圧力水内での粉砕では物質の変化（水和など）が生じるため採用できない手法である。乾式粉砕は粉砕媒体が鋼製ボールや鋼製壁さらに空気（ジェット流）であり、乾燥状態での粉砕であるため、水の存在を嫌うセメント粉砕に適した手法である。乾式によるセメント粉砕の代表的な装置は表 5.2.1 に示されるようにジェットミルとローラミルの2種類に分類できる。ジェットミルは、ジェット気流を発生させその気流と一緒に物質を移動させ衝突させることで粉砕する方法である。さらに衝突は、壁に衝突させるタイプと気流同士を衝突させる対向タイプが存在する。また、壁衝突と気流衝突の複合タイプも存在する。これらの衝突タイプによる違いは、セメント粒子の粉砕面が異なることである。直接物質同士が衝突するジェットミルタイプでは、粒子が衝突・衝撃により割れることを繰り返して小さくなっていくため粉砕面は鋭角であり、さらに鉱物の硬度が弱いところから粉砕されていく傾向にある。一方、ローラミルタイプはミルに取りつけられた突起や鋼製ボールとの摩擦により粉砕するため、粒子の表面から皮を剥いでいくように削られて小さくなっていく。これらの特徴から粉砕物質が単一または単一組成である場合は硬さが一定であるので粉砕に影響しないが、従来のセメント粉砕で行われてい

た混合粉砕の場合には、アルミネートや石こうなどの柔らかい鉱物が混合されているため、これら柔らかい物質が先に粉砕されるため微粉部分とそうでない部分で品質のばらつきが発生する可能性がある。そのため従来のセメントの粉砕は混合粉砕が主流であったが現在では分離粉砕に変更されようとしている。以上示したように、物質の粉砕にはその物質の特徴を加味して粉砕装置を選択する必要がある。

一般のセメントは若材令から長期材齢まで長期間に渡ってセメント水和を活性化させなければならないため、セメントに粒度分布を幅広く持たせる必要があるが、本研究の目的は若材令時の強度発現機能を有した速硬性セメントの開発であることから、粒度分布幅が狭く特定の粒子を集めた微粉砕セメントが製造できる粉砕装置を選択する必要がある。図 5.2.3 および表 5.2.2 は、4種類のジェットミル粉砕装置を用いた粉砕セメントの粒度分布と粉砕能力を示したものである。ここに示す4種類の粉砕装置はいずれもジェットミルタイプであるが、ジェット流の発生軸の数と衝突方法が異なるものである。タイプA、Bは、4軸からジェット流を発射させ2軸ずつ対になって異なる方向に噴射して中心部で衝突させるタイプである。なかでもタイプAは、発射軸を回転させながら4軸噴射を行うタイプである。タイプCは、2軸噴射で対向衝突させて粉砕するタイプである。タイプDは1軸噴射でミルの壁（ライナー）に衝突させて粉砕するタイプである。これらのジェットミルにより粉砕したセメント粒度分布は、図 5.2.3 に示されるようにタイプCとDは同等の性能を有していることが分かり粒径ピーク値は $5\sim 10\mu\text{m}$ が粉砕の限界である。またタイプA、Bは同等の粉砕能力を有しており粒径分布のピーク値は、 $1\sim 3\mu\text{m}$ と非常に小さな粉砕セメントが製造可能で粉砕能力に卓越した装置であることがわかった。したがって、ここではより高い粉砕能力を持っているタイプBの粉砕装置を採用した。

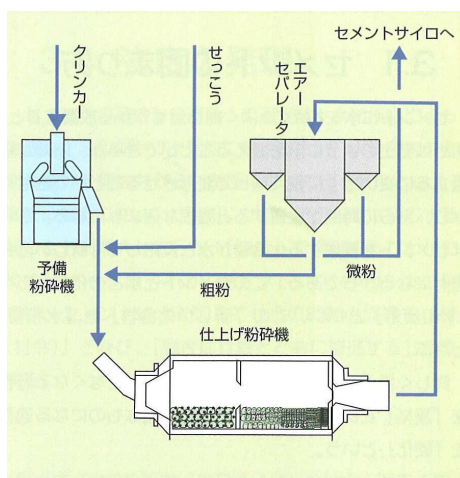


図 5.2.2 ボールミルによるセメント粉砕工程（仕上げ工程） [5.6]

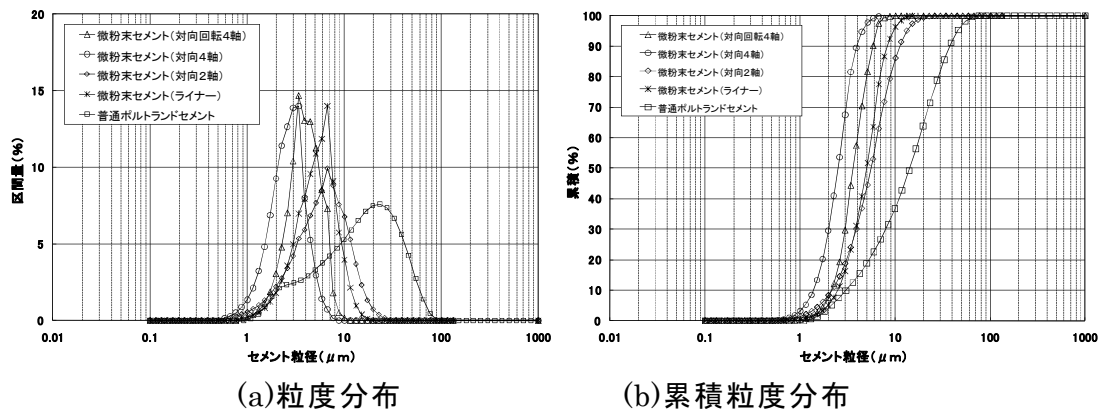


図 5.2.3 各種粉砕装置によるセメントの粒度分布

表 5.2.1 乾式セメント粉砕装置とその特徴

対象試料	粉砕方式		主な粉砕力 (主:◎○、補助△)				粒子 硬度	メンテナンス			粉砕面と 表面形状	粒度分布 (粒径ピーク下限 値と)最大粒径)	備考
	方式	機器参考図	衝撃・衝突	圧縮	せん断	摩擦		可能 硬度 (ヌーブ硬 度) (kgf/mm ²)	処理量 (kg/h)	動力 消費			
セメント	対向ジェットエア式試料間衝突粉砕		◎				2000以下	50-350	低	少	簡単		・温度上昇が少ない ・薄片状試料の粉砕も適している
	ジェットエア式ライナー衝突粉砕		○			△	500以下	20-200	低	多	簡単		・ライナーのコンタミネーションが多い ・柔鉱物の柔表面のみ、もしくは柔鉱物が粉砕される
	ジェットエア式ライナー摩擦粉砕		△			○	300以下	20-100	低	多	難		・ライナーのコンタミネーションが多い ・柔鉱物表面のみが粉砕される ・セメントの粉砕に用いられている
ローラミル	圧縮式粉砕			△		○	500以下	200-500	高	多	難		・機器が大型となる ・分級が難しい ・高炉スラグの粉砕に用いられている

表 5.2.2 各種粉砕装置によるセメント粉砕能力一覧

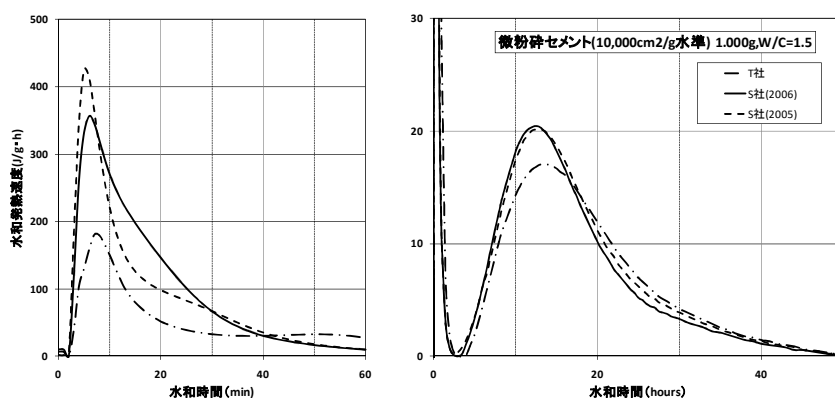
型	粉砕方式	機器容量(m ³)	粒径分布(%)			生産能力(kg/h)	電気使用量
			d40/um	d95/um	d100/um		
A	対向回転4軸型	3	3.3	6.4	10.1	150	多
B	対向4軸型	10	2.2	4.5	7.7	100	多
C	対向2軸型	<3	4.7	13.2	26.1	120	多
D	ライナー型	10	4.4	10	17.1	200	少
セメント原料(ベース材)			14.4	41.1	77.3	—	—

(3) セメント分級による速硬性混和材の製造と特徴

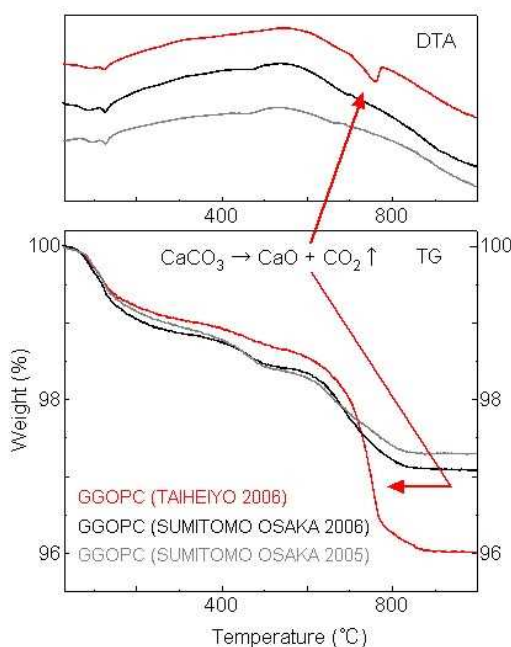
分級による微粉末セメントの製造は、市販セメントの粒度が小さな部分のみを集めることで製造でき、一般には分級装置が用いられる。セメント粒子はマクロ的に見れば比表面積が異なるだけで鉱物組成は同じであると考えられている。しかし、もともとクリンカーから粉砕されて製造されたセメントは、複数の鉱物を燃焼粉砕したものであるため、ミクロ的には鉱物組成は異なると考えられる。特に、クリンカーの粉砕は、70年代までは混合粉砕であったため、複数の鉱物や石こうなどを混合した後に粉砕されていたため、アルミニウムや石こうなど鉱物としての硬度が低いものは粉砕過程で先にかつ小さく粉砕される傾向にある。つまり、混合粉砕の場合は、粒径の小さな部分に石こうなどの硬度や柔らかい鉱物が集まっている可能性が高くなる。このように混合粉砕されたセメントは、分級により微粉末セメントを製造する場合は、鉱物組成を計測するなどして品質が一定であることを確認する必要がある。なお、最近のセメント粉砕では分離(または単独)粉砕が主流となっているため、それぞれ硬度が同じ鉱物が粉砕され、その後に混合されるため成分の偏りなどが無いと言われている。

一方、JIS規格等で規定されたセメントであっても、不純物の混合や添加物が認められているものがある。2009年に改訂されたJISセメント[5.7]では、鉱物の添加が5%の範囲で明確に認められたことや粘土鉱物の代替として高炉スラグ微粉末やフライアッシュさらに石灰石微粉末が添加されているなどセメントメーカーの工場毎に異なっており一般ユーザーはどの添加物が混和されたかを特定することは難しい。さらに中国産の普通ポルトランドセメント(OPC)の規定[5.4]でも、重量の5~15%シリカ鉱物を添加することが認められており、これらのセメントを分級する場合には、比表面積の小さなシリカ微粉末分、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどが集められてしまう恐れがあるので、分級により微粉末セメントを加工する場合には、組成分析や熱量分析を行うことで判定することが必要である。図5.2.4は、異なるセメントメーカーのセメントの水和

発熱量を測定した結果である。この図から分かるように同じセメントメーカーであっても水和発熱量が異なること、さらにセメントメーカーが異なれば大きく水和発熱量が異なることが分かる。セメントメーカー発行のミルシートは全国の工場を網羅した、つまりこれらの幅を包含したデータであることから、水和反応などの研究資料に直接用いる場合は注意が必要である。特に、昨今はCO₂排出量削減と称した環境対策が進められ産業廃棄物の原材料化が率先して行われていることから、JISセメント製品とは言えJISの規定では表現されないセメント水和や物理的性能が変化していることを念頭において使用しなければならない。



(a)コンダクションカロリメーター



(b)TG-DAT

図 5.2.4 異なる工場のセメントの水和発熱量の違い

(4) 速硬性混和材製造の粉砕装置の選定

前節までに粉砕装置やセメント特徴を示した。ここでは、プレキャストプレキャストコンクリートの若材齢（脱型）時強度のみを向上されることを目標とするため、粉砕セメントの分布幅が狭い、いわゆる特定の分布幅を持ったセメントを構築したいため、以下の粉砕装置を選択することとした。

表 5.2.3 セメント粉砕装置の性能比較

	粉砕性能				メンテナ ンス	価格		総合 評価
	粉砕 能力	平均 粒径	粒度分 布幅	環境 設定		機器	ランニ ング	
ジェットミル 対向回転4軸型	○	◎	◎	◎	△	○	○	△
ジェットミル 対向4軸型	○	◎	◎	◎	○	○	○	◎
ジェットミル 対向2軸型	○	○	○	◎	○	○	○	○
ジェットミル ライナー型	◎	○	△	◎	◎	○	○	△
ボールミル	◎	△	△	△	◎	◎	◎	△
ローラミル	◎	△	△	△	○	△	△	△

注) ◎：良好、○：普通、△：注意が必要、×：問題あり

5.3 微粉砕セメント型速硬性混和材の製造システムの構築

プレキャストコンクリートの脱型時強度向上を行うために必要なセメント混和材は、前節で示した理由から粉砕による手法により製造した「微粉砕セメント」が有効であると考えられる。ここでは、「微粉砕セメント型速硬性混和材」（以下「微粉砕セメント」という。）の製造システムを構築したので以下に述べる。

5.3.1 製造環境

微粉砕セメントを製造する手法として、4軸対向型ジェットミル（タイプB）（以下「ジェットミル」という。）を選定した。このジェットミルによるセメント粉砕は、ジェット気流による対向衝撃力によるもので、気中で常圧または高気圧下で粉砕作業を行うことになる。このため、空気中の水分が水和反応を進行させる恐れがある。特に、今回採用したシステムでは、粉砕効率を向上させるために高圧下での粉砕を行うこととした。一般家庭でも使われている高圧釜は、釜の内圧を上げることで、燃焼効率を向上させるもので、今回採用したセ

メントの場合でも高圧下でなおかつ水分が存在することで水和が即時に進行することが想定されたので、本システムでは表 5.3.1 に示すように気中の水分を除去した粉砕環境を設定して品質管理を行った。

表 5.3.1 本粉砕システムでのセメント粉砕環境

項目	仕様			
材料	普通ポルトランドセメント			
セメント粉砕時条件	圧縮空気 (条件①または② のどちらかを満足 すること)	条件①	相対湿度	30%以下
			空気温度	20°C以下
		条件②	絶対湿度	0.005kg/kg(DA)以下
			その他	不純物を含まない
セメント梱包時条件	環境	外気と触れない		
	梱包袋	湿気を遮断できる包装		

5.3.2 製造システムの構築

本研究により設計設置したセメント粉砕システム装置は図 5.3.1 に示す4つの装置により構成されており、特に、粉砕装置に4軸対向型粉砕機を用いることで目標のセメント粒子径と比表面積が高くなる微粉砕セメントが製造できる点にある。また、低温無湿気圧縮空気を採用したことにより粉砕時のセメント水和の進行を止め所定のセメント品質を確保できたことにある。図 5.3.2 に製造装置のシステムを示す。なお、本システムは、装置費用や微粉砕セメント製造コストなどの点を鑑み中華人民共和国の山東省青島に工場を建設した。

以下にそれぞれの装置の特徴を示す。

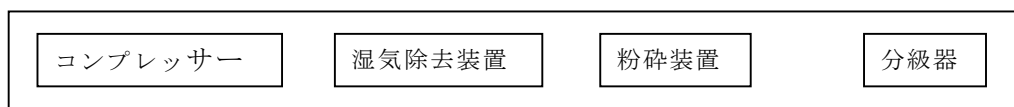


図 5.3.1 4つの基本装置



図 5.3.2 微粉碎セメント型速硬性混和材の実用型製造装置

1)コンプレッサー装置

コンプレッサー装置は、ジェット流（圧縮空気）を製造する装置である（図 5.3.3 参照）。鉍物系のセメントを粉砕する場合、非常に硬度が高いシリカを多く含んでいるため圧縮空気圧を図 5.3.4 に示す圧力制御装置を用いて 0.7MPa に設定して所定の大きさへの粉砕や粉砕（量）能力を向上させた。なお、空気圧を増加させるためにはコンプレッサー装置の能力を向上させる他に圧力タンクの強度向上や圧縮空気の送風ホース（図 5.3.5）を頑丈なものにするなどの手法と併用する必要があり、それぞれの性能向上を行い、圧縮空気ホースはφ7mm 直径（図 5.3.5 参照）とすることで実現した。

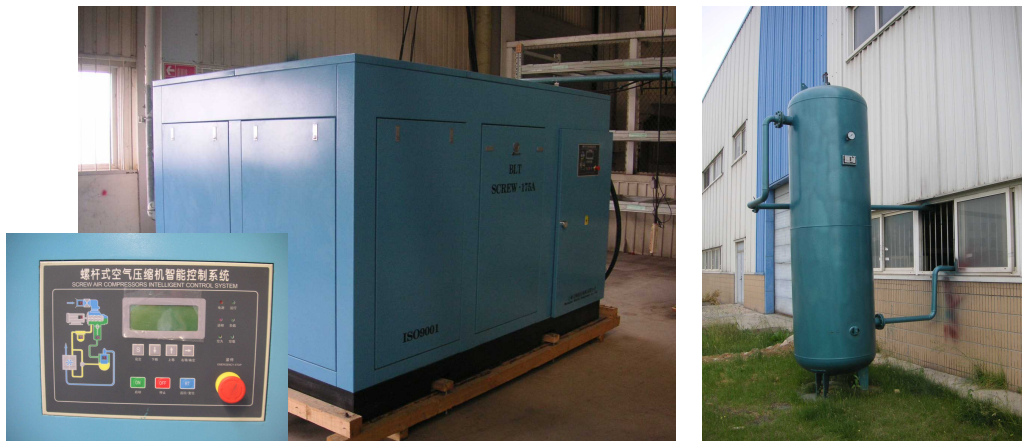


図 5.3.3 コンプレッサーと圧力空気タンク



図 5.3.4 圧力制御弁



図 5.3.5 送風ホース(φ7mm)

(2) 湿気除去装置

圧縮空気中の湿気は、セメントの粉砕環境にとって水和を進行させる最悪の条件となるため、図 5.3.6 に示す湿気除去装置を設置して所定の湿度まで低下させた。また、それぞれの配管には外気温等の変化により結露が発生する恐れがあることから配管用湿気除去装置を設置した。なお、圧縮空気中の湿度は、建築空調システムの構築に用いられている図 5.3.7 の温度－湿度関係図から温度と結露の関係から 0.005kg/kg(DA)以下を目標として設定した。



図 5.3.6 湿気除去装置本体と配管用湿気除去装置

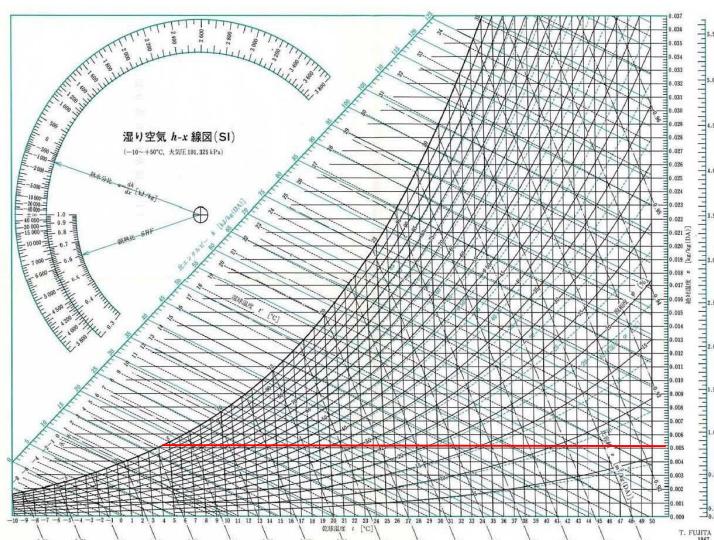


図 5.3.7 湿り空気 h - x 線図 (空気調和・衛生工学会)

(3)粉砕装置

粉砕装置は、ジェット気流を発生させセメントを粉砕する本システムのメイン装置である。今回採用した粉砕装置は、独立した4軸からジェット気流が噴射し、それぞれ2軸が対になりジェット流が筒内中央部で衝突し、そのジェット流交差（衝突部）にセメントを落下させることでジェット流に乗ってセメント同士が衝突するシステムである（図 5.3.8 参照）。この4軸対向型ジェット流に1度かけると比表面積 $3,200\text{cm}^2/\text{g}$ 程度のセメントは比表面積 $7,000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度までに粉砕される。そしてこの行為を繰り返すことでさらに細かいセメント粉砕が可能となった。表 5.3.2 は、粉砕パスとセメント比表面積の関係を試験したものである。この表から分かるように、粉砕装置の基本的粉砕能力は、1回当りの粉砕として表現することができ、その回数を増やすことで必要なセメン

ト粒径まで小さく粉碎出来る。したがって、粉碎装置に分級装置を連動させることにより、連続的にセメントの微粉碎が可能となる。

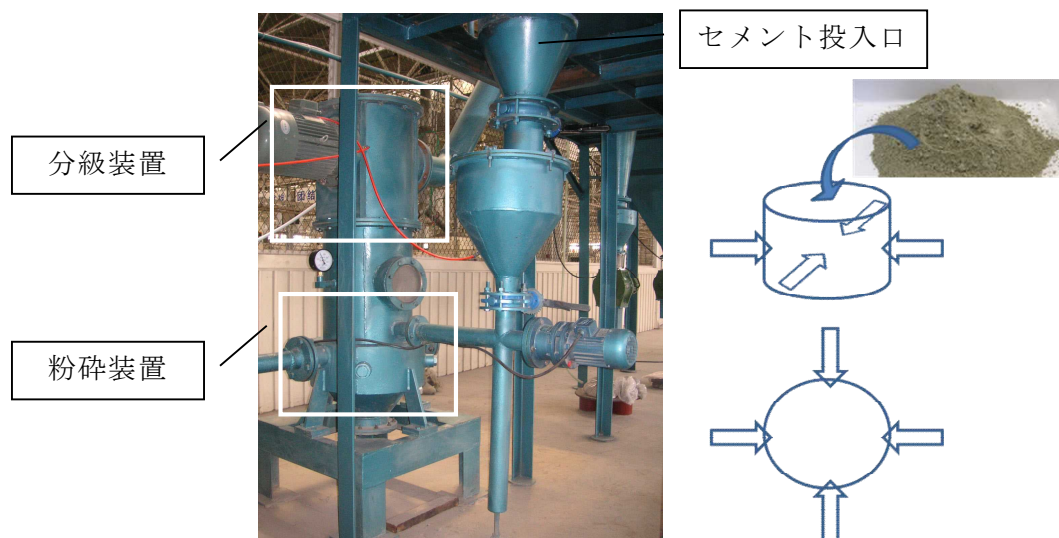


図 5.3.8 セメント粉碎装置と粉碎イメージ

表 5.3.2 粉碎パスとセメント比表面積の関係

単位	オリジナル	1PASS	2PASS	3PASS	4PASS	備考	
ノズル圧	MPa	—	0.7				
使用風量	m ³ /min	—	2.7				
処理量	kg/hr	—	8	6	4	4	
回収量	kg	—	25	24	23.8	23.4	
比表面積	cm ² /g	3,229	6,879	8,686	10,189	10,345	空気透過粉末測定器 (JIS R5201 に準拠)

(4) 分級装置

分級装置は、粉碎されたセメントが所定の粒子径になった場合に通過できるフィルターメッシュを空気排出口に設置することにより分級される装置である。したがって、所定の粒子径より大きい場合は、フィルターを通過できずに再度粉碎装置で粉碎できるように連動しているものである。

(5) 品質管理用製造装置

この実用型製造システムは、一旦停止させると再起動までに、ジェットミル内や分級装置さらにセメント搬送配管などの清掃や機器・配管内の温度や湿度が一定になるまで品質管理上の試運転を要するため、原則数カ月単位での連続

運転を行う必要がある。そこで、使用するセメント材料が所定の品質を確保しているのか、品質のばらつきはどうかなどの微粉碎セメントとしての性能を予め確認するために、品質管理用の微粉碎製造システムを同時に構築し運用した。実用型製造システムは、20kg/hour以上の製造を想定しているが、試験用製造装置は、約1kg/hour製造できる実用型装置の縮小モデルである。

図5.3.9は、品質管理用粉碎装置の全景である。実用型装置に比べ設置面積で1/10である。図5.3.10は、圧力空気タンクであり、容量は実用型の半分の大きさである。図5.3.11はジェット粉碎のメイン装置、図5.3.12は粉碎セメントの収集口、図5.3.13は、湿気除去装置である。いずれの装置も実用型装置の小型版であり、粉碎したセメントの品質も同等である。



図 5.3.9 試験用粉碎装置の全景



図 5.3.10 圧力空気タンク

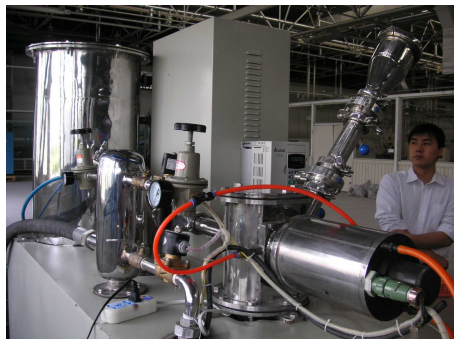


図 5.3.11 粉碎メイン装置



図 5.3.12 粉碎セメントの収集部



図 5.3.13 湿気除去装置

5.3.3 製造コスト

微粉碎セメントの製造コストは、図 5.3.2 に示した中国青島工場に設置した実用型製造システムを用いて、微粉碎セメント 10,000cm²/g 水準(FG10C)を 8 時間当り 100kg を製造する条件で稼働させて試算を行なった。その結果、表 5.3.3 に示すように、微粉碎セメント 1kg 製造当り\$1.718/kg (約 155 円/kg (1\$=90 円換算)) となった。本工場でのコスト内訳では、機器費用や直接的な粉砕価格が占める割合よりも電気代が高く約半分を占めており、中国での電力不足による電気代の高騰などの事情を反映していると考えられる。なお本格的製造の場合は、粉砕の連続稼働となるスケールメリットによるコストダウンや深夜電力 (または深夜電力の蓄電)・自家発電などの対策を施すことでさらなる低コスト化が可能と思われる。

一方、本システムを日本国内に構築した場合の試算を行った結果、装置費用と人件費で70%を占めており微粉碎セメント 1kg 製造価格は約 8 倍の\$13/kg (約 1,170 円/kg (1\$=90 円換算)) となった (表 5.3.4 参照)。また日本国内でセメント微粉碎のみを専門業者 (たとえば、セイシン企業、ホソカワミクロン) に依頼した場合はアカデミー価格 (原価) で約 6,000 円/kg (実績値) となり、1kg 当り 10 円のセメントを微粉碎して利用する発想そのものが成り立たなくなるため、これまで日本では研究がされなかった理由であると思われる。

表 5.3.3 中国青島工場での微粉碎セメント製造コスト¹⁾

項目	直接費			間接費					合計 ⁷⁾
	セメント ²⁾	電気代 ³⁾	人件費	管理費 ⁴⁾	原価償却費 ⁵⁾	搬送費 ⁶⁾	包装費	事務所費等	
コスト (\$/ton)	109	800	187	200	148	80	10	184	1718
比率 (%)	6.3	46.6	10.9	11.6	8.6	4.7	0.6	10.7	100

1)100kg/8hours の試算

2)北京から青島への運送コスト(50\$/ton)込

3)0.125\$/KWh*6400KWh/ton (昼夜の平均)

4)品質管理者の移動宿泊費込

5)機器購入費 56,000\$、償却期間 10 年、利子 5%で試算

6)青島から秋田港船代込

7) (参考) 日本で微粉碎セメント製造を製造 (外注) すると、67,000\$/ton (実績)

表 5.3.4 日本秋田（大館）工場での微粉碎セメント製造コスト試算結果¹⁾

項目	直接費			間接費					合計
	セメント ²⁾	電気代 ³⁾	人件費	管理費 ⁴⁾	原価償却費 ⁵⁾	搬送費 ⁶⁾	包装費	事務所費等	
コスト (\$/ton)	120	4000	2805	1000	2960	240	50	1840	13015
比率 (%)	0.9	30.7	21.6	7.7	22.7	1.8	0.4	14.1	100

1)100kg/8hours の試算

2)バラ普通ポルトランドセメント（実績）

3)0.125\$/KWh*6400KWh/ton（昼夜の平均）

4)品質管理者の移動宿泊費込

5)機器購入費 1,120,000\$、償却期間 10 年、利子 5%で試算

6)構内移動費・管理費

5.3.4 常圧常温環境下での基本性状

微粉碎セメントの性状を把握する目的で物理試験、力学試験さらに化学分析を行った。なお、試験は 20℃一定の常圧常温環境下で行った。

(1) 物理特性

(a)微粉碎セメントの粒度分布

実験に用いた微粉碎セメントは、純粋な石灰石のみを原材料に用いた日本産の普通ポルトランドセメント（住友大阪セメント社特注品）（JIS 規格品）を比表面積が 5,000、7,000、10,000(cm^2/g)の 3 水準になるように微粉碎したものと中国産（北京セメント社製）の市販普通ポルトランドセメント（P・Oタイプ）（GB175 規格品）を比表面積 10,000(cm^2/g)水準になるように微粉碎したものの 4 種類の微粉碎セメントを製造した。それらの粒度特性を表 5.3.5 に示す。また、図 5.3.14 に微粉碎セメントと普通ポルトランドセメントの粒度分布、図 5.3.15 にセメントの平均粒径(D50)と比表面積の関係を示す。これらの結果から本システムで製造した微粉碎セメントの特徴は、以下に示す 3 つの特性で表現できる。

①粒度分布の幅

粉砕する前のベースセメントである普通ポルトランドセメントは、 $1\mu\text{m}$ から $100\mu\text{m}$ までの 2 オーダー幅の比較的広い分布幅を有し中国産の方が分布幅は広い。一方、粉砕後の微粉碎セメントは前節で示した粉砕システムの特徴から粒度分布幅が 1 オーダー幅の狭い特定範囲のセメントとなっていることが分かる。また、微粉碎セメントは平均粒径が小さくなるほど、尖がった分布を有していることも確認される。

②平均粒径

セメント粒子の平均粒径は、比表面積が大きくなるに従って小さくなる。

③比表面積

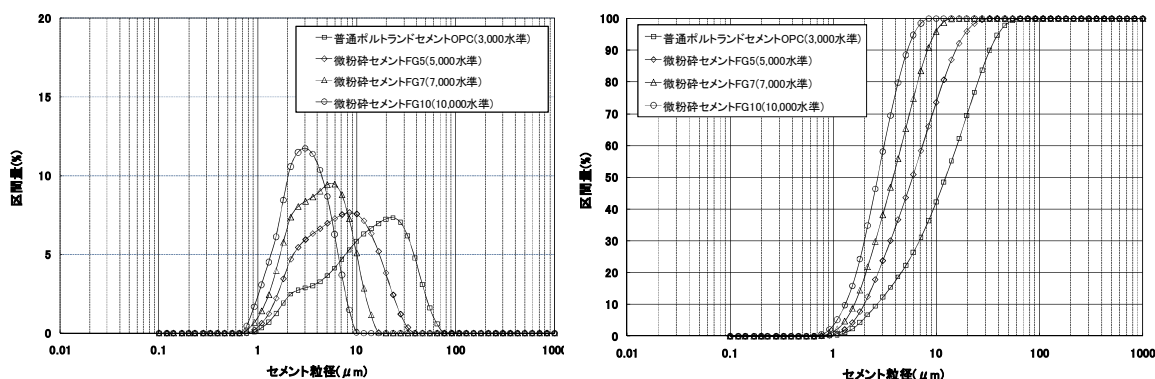
比表面積は、セメント粒径とほぼ線形関係（対数軸）になる。

これらの特徴は、粉砕するベース材として普通ポルトランドセメントを使用しているため、粉砕を進めるほど粒度分布が狭まることを意味し、本粉砕システムの特徴と言える。なお、これらの関係は、必要とする粒径の微粉砕セメントを製造する時の簡易品質管理手法として用いることができる。

表 5.3.5 微粉砕セメントの粒度特性

セメント名 (呼び名)				比表面積 (cm ² /g)	最小粒径 (μm)	D50 粒径 (μm)	最大粒径 (μm)
ベース	日本産 普通ポルトランドセメント	OPC	3,408	0.77	10.0	64.8	
	中国産 普通ポルトランドセメント	OPC/C	4,559	0.1	15.3	117.1	
粉砕後	5,000 水準 微粉砕セメント	FG5	5,484	0.77	5.56	32.8	
	7,000 水準 微粉砕セメント	FG7	7,676	0.65	3.65	16.6	
	10,000 水準 微粉砕セメント	FG10	10,359	0.65	2.62	9.95	
	10,000 水準 微粉砕セメント	FG10/C-X	10,245	0.1	3.12	8.97	

注) 日本の OPC と中国の OPC は規格が異なる。/C 印は中国産セメントを示す。



(a)粒度分布

(b)累積粒度分布

図 5.3.14 微粉砕セメントの粒度分布

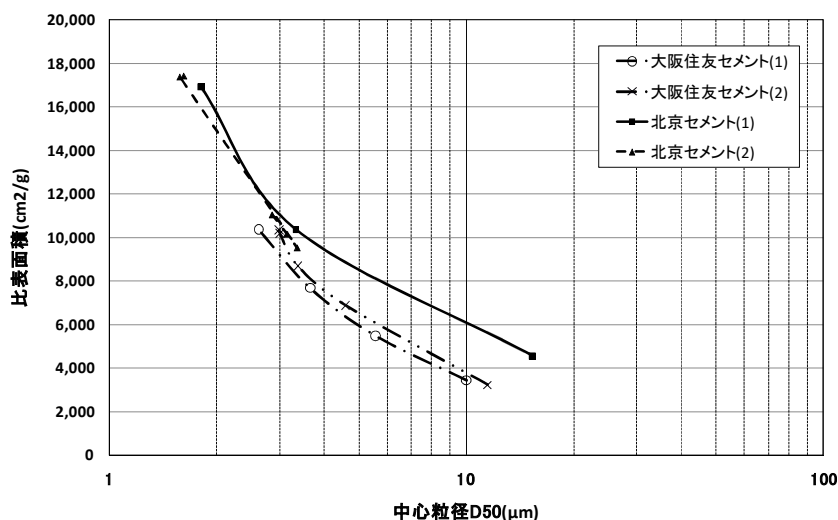


図 5.3.15 中心粒径 D50 と比表面積の関係

(b)微粉碎セメントの粒子形状

微粉碎セメントの粒子形状は、前節表 5.2.1 に示されるように粉砕装置により大きく異なることがわかっている。そこで、本粉砕システムで粉砕した微粉碎セメントの粒子形状を確認するために、走査型電子顕微鏡(以下「SEM」という。)を用いて観察した。観察したセメントは、普通ポルトランドセメント(OPC)、比表面積 10,000(cm²/g)の微粉碎セメント FG10/C および FG10/C の内、粒子直径が 3 μ m 以下の微粉碎セメント FG10E/C の 3 種類である。これらの SEM 写真を図 5.3.16～5.3.18 に示す。

図 5.3.16 は、普通ポルトランドセメント(OPC/C)の 500 倍、2,000 倍および 5,000 倍 SEM 写真である。これらの写真からセメント粒子の粒度が様々であり扁平の粒子が多いことがわかる。また一般に普通ポルトランドセメントは、ボールミルを用いて粉砕[5.6]されているためセメント粒子は角が摩耗し比較的丸い粒子形状であると言われておりこれらが確認される。図 5.3.17 は、比表面積 10,000cm²/g 水準まで粉砕した微粉碎セメント FG10/C の 500 倍、2,000 倍および 5,000 倍 SEM 写真である。これらの写真からジェットミル粉砕によるセメント粒子の角が鋭角であることが確認される。また同一粒径のセメント粒子の集合になっており、粉砕により分布幅が狭められていることが確認される。さらに、粒子の形状が扁平から球状となっていることもわかる。図 5.3.18 は、比表面積 10,000cm²/g 水準まで粉砕した微粉碎セメント FG10/C の内、粒径が 3 μ m 以下を分級により収集した FG10E/C の 500 倍、2,000 倍および 5,000 倍 SEM 写真である。これらの写真からさらに同一粒径の集合体になっているのが分かる。

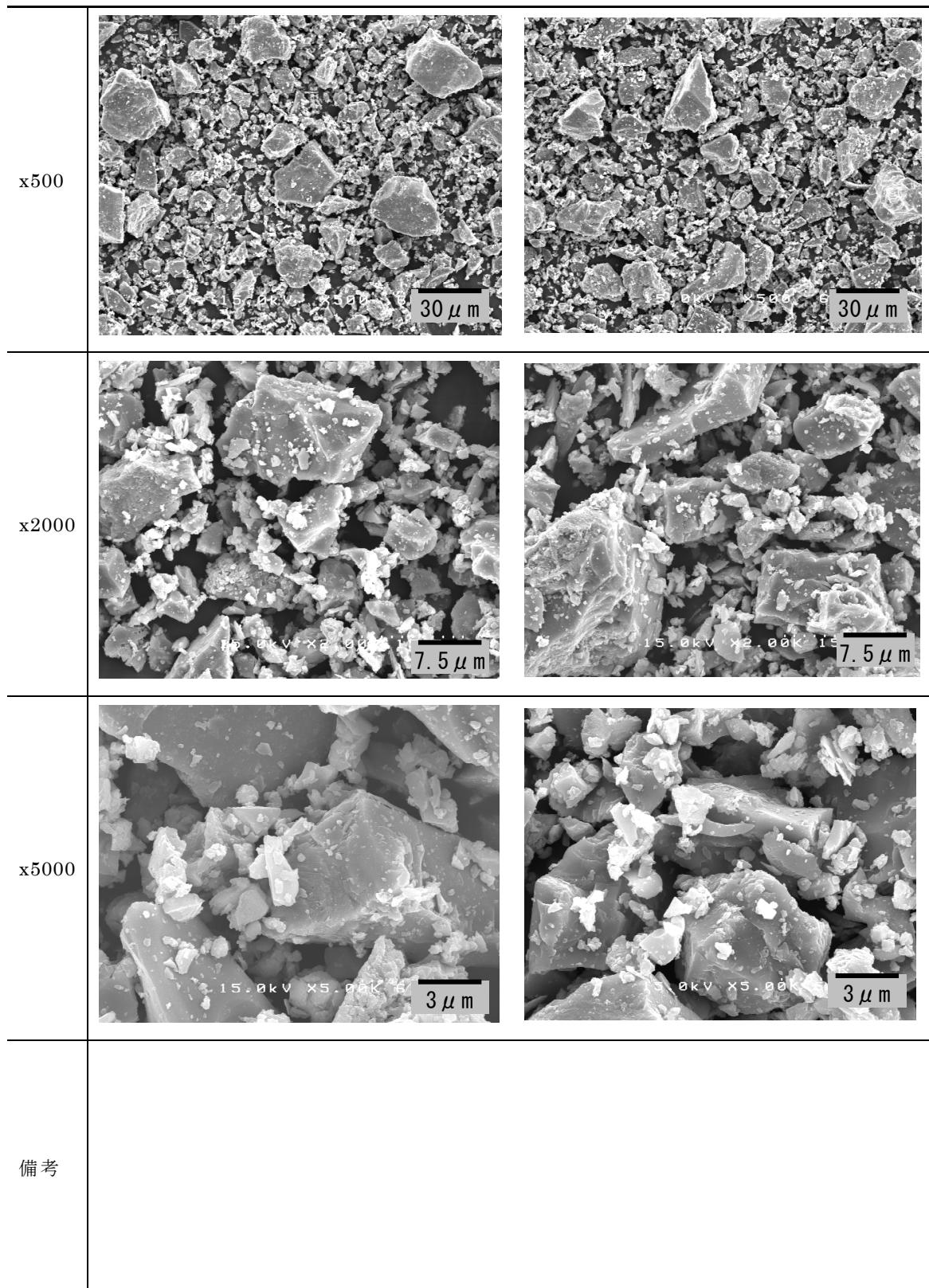


図 5.3.16 普通ポルトランドセメント(OPC/C)の SEM 像

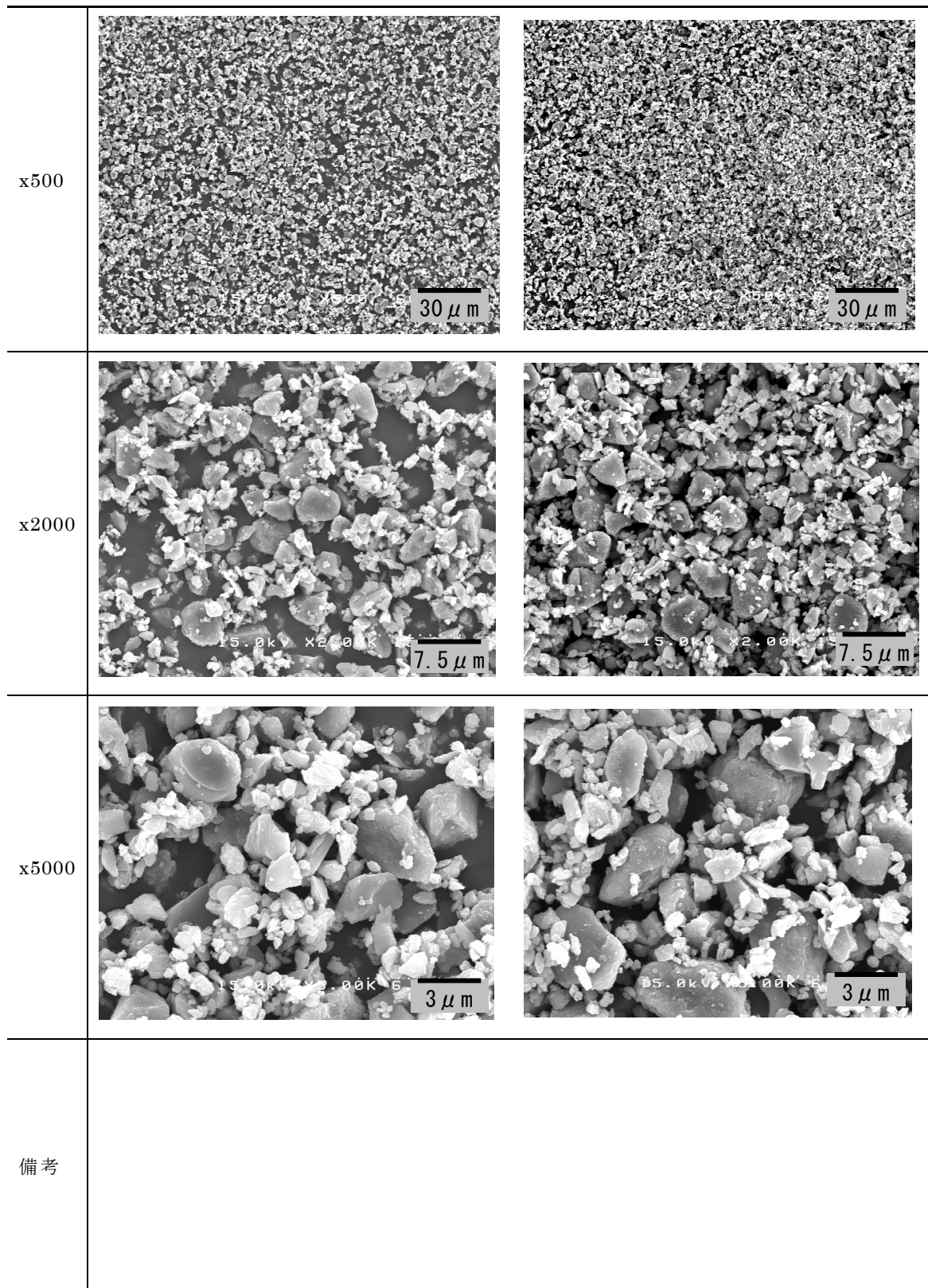


図 5.3.17 比表面積 10,000(cm²/g)微粉碎セメント FG10/C の SEM 像

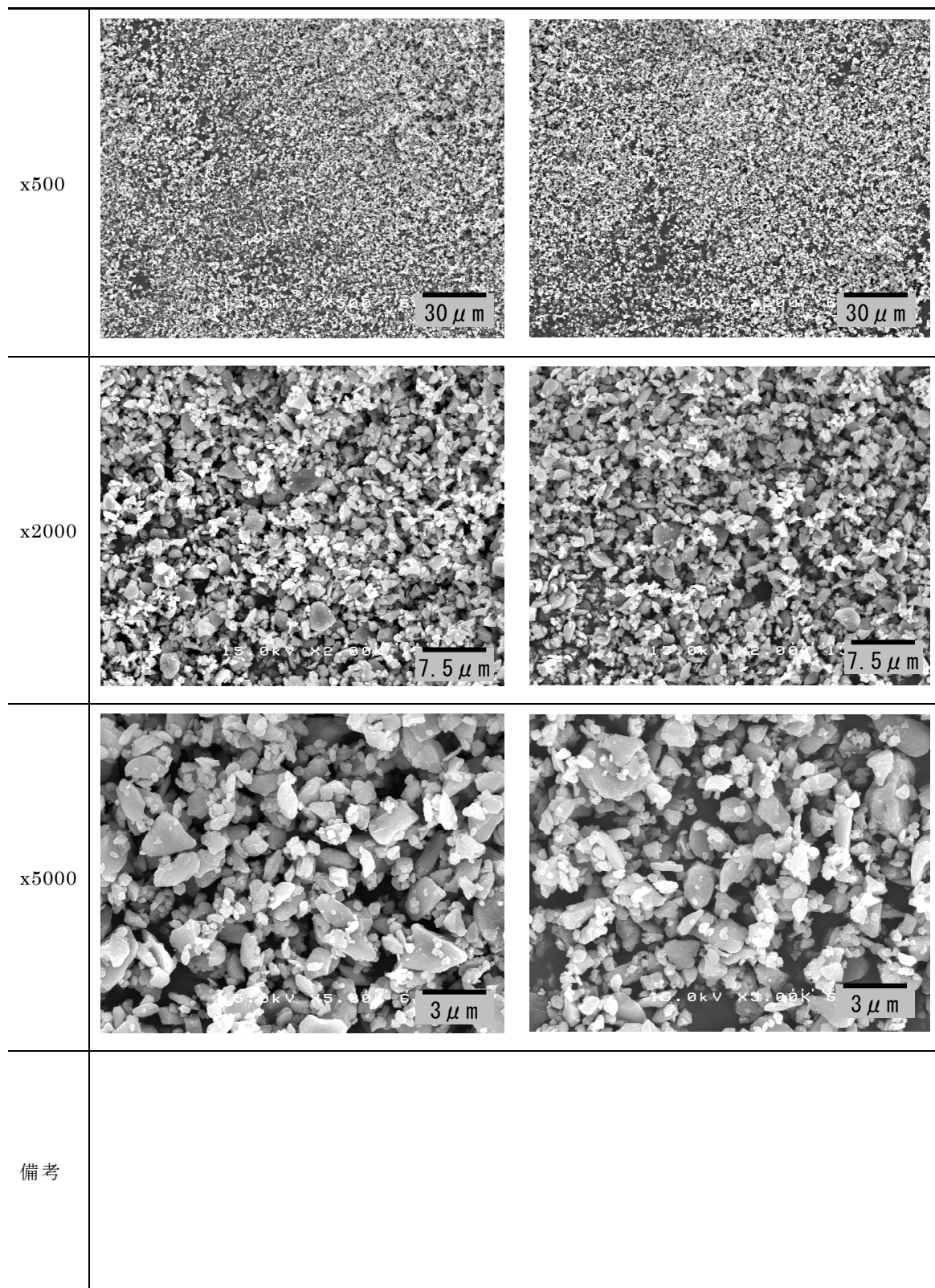


図 5.3.18 FG10/C の内、 $3\mu\text{m}$ 以下の微粉碎セメント FG10E/C の SEM 像

(c) 微粉砕セメントおよび混和セメントの最密充填

コンクリートは、セメント等の粉体と骨材により構成されており、これらの強度特性や耐久性は如何に緻密な充填構造とするかに帰着すると考えられている[5.8]。そこでコンクリートの粒度分布は、セメントおよび骨材の粒径を等比級数的に変化する球からなると仮定すれば、図 5.3.19 に示される Fuller-Thompson の理想的な最密粒度曲線[5.8,5.9]を得ることができヨーロッパではこの最密充填による配合設計の考え方が多く採用されている[5.10]。

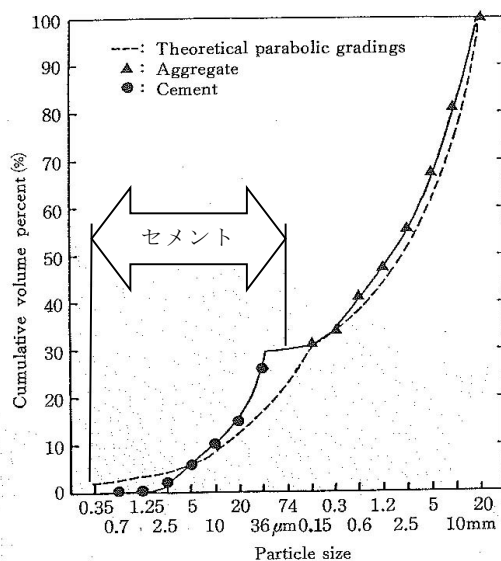


図 5.3.19 コンクリートの理想的な最密粒度分布[5.9]

一方、国内では骨材の粒度分布にこの理想粒度曲線が適用され、コンクリート製造者が JIS 範囲内で骨材の粒度分布を自在に調整し最適配合設計を行うことで骨材の粒度分布を最密充填曲線に漸近させている。しかしセメントの製造ではセメント粒度分布は必ずしも最密充填性で決定されておらず、図 5.3.19 に示されるように 5 μm 以上は過剰みで 5 μm 以下の微粒部分が不足して理想的な最密粒度曲線とは大きく欠け離れている状況である。この理由は一般にセメントはレディーミックスコンクリートの目標性能を対象に製造されているからと考えられる。つまり、セメントの強度性能は現場打設コンクリートの要求性能である 28 日（または 56,92 日長期）強度管理に視点がおかれ、プレキャストコンクリートの製造時要求性能である若材齢（脱型 4 時間～1 日材齢）時強度を強度管理の対象としていないこと、さらに養生期間中の収縮ひび割れ等の発生を少なくすることを優先させセメントの比表面積を 3,500cm²/g 程度[5.7]に抑えるなどの制御を行っていることから微粉分が少なくなり最密充填曲線と乖離していると考えられる。このようにヨーロッパでの配合設計の考え方の違いは、日

本では、ヨーロッパにはない工期短縮や初期強度向上など現場要求性能が優先されることでセメントの材料特性が決定されていることに起因しているとかんがえられ、JIS規格も現場性能により決定されているためセメントの最密充填は考慮されていないと言っても過言ではない。また昨今のコンクリート工事では施工者の要求として過密配筋や熟練技術者不足からコンクリートの施工性の向上などの目的で高流動コンクリートや自己充填コンクリートを採用する傾向にあり石灰石微粉末などを混和し材料分離などの施工現象の改善が行われているがこれらのコンクリートは微粉材料を混和しているにも関わらず施工性の議論のみで最密充填の観点からの議論は全くなされていないといえる。なお高強度コンクリートなどの一部の分野では、より高い強度を必要とする場合のみに、この $5\mu\text{m}$ 以下の微粉量としてシリカフームなどを混和し最密充填効果を期待する手段を取っているものもある。

このような背景からプレキャストコンクリートに必要な若材齢時強度は微粉分が不足する市販セメントのみでは必ずしも適合せず効率的製造の構築を行うためには本粉砕システムで開発した微粉末セメントを混和または置換することで最密充填とし若材齢時強度の向上させることを考えた。

(i)実験方法と配合

実験は図 5.3.20 に示すように 500cc メスシリンダーに 300cc の灯油(JISK 2203)を入れ、これに算定する粉体を 20g ずつ投入し空気を抜くためにガラス棒で攪拌、灯油上面および沈降粉体が安定するまで 10 分間静置後、灯油上面と粉体の沈降体積を目盛から読み取る。この操作を繰り返し灯油上面と粉体沈降高さがほぼ同一になるまで行った。なお、本手法は、セメントの比重を計測する JIS R5201「セメントの物理試験方法」のセメント比重の測定手法と原理的には同じ手法である。

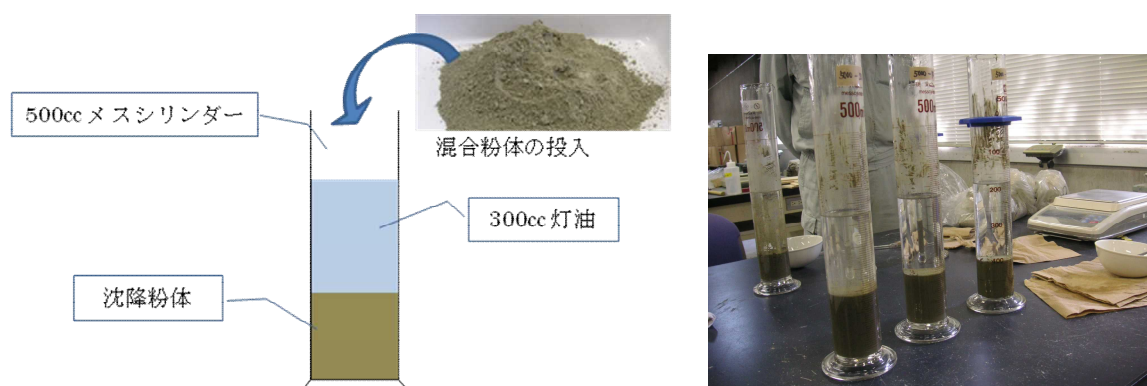


図 5.3.20 混合粉体の充填率の測定

最密充填試験を行った粉体は表 5.3.6 に示すように、ベースセメントの普通ポルトランドセメントと混和材としての微粉砕セメントおよびフライアッシュを用いた。配合の組合せは表 5.3.7 に示すように、単独粉体として普通ポルトランドセメント(OPC)と微粉砕セメントは FG5(5,000 水準)、FG7(7,000 水準)、FG10(10,000 水準)の 3 水準の 4 ケース。また、混合粉体の試験として普通ポルトランドセメント(OPC)に微粉砕セメント置換の場合と微粉砕セメントとフライアッシュを組み合わせ置換した場合の 10 ケースを行った。なお、実際のプレキャストコンクリート製造で行われている実機配合による検証を行うため表 5.3.8 に示す 2 種類の配合も併せて実験した。

表 5.3.6 最密充填試験に用いた材料の諸元

材 料		比重 ¹⁾ (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	備 考
普通ポルトランドセメント	OPC	3.43	3,440	住友大阪セメント社製(バー ジン原材料仕様)
微粉砕セメント	FG5	3.29	5,484	
微粉砕セメント	FG7	3.20	7,676	
微粉砕セメント	FG10	3.10	10,359	
フライアッシュ II 種	FA	2.21	3,750	北陸電力敦賀火力発電所産
石灰石微粉末	FC	2.71	6,600	敦賀セメント社製

表 5.3.7 最密充填試験の配合組合せ

配合名		微粉砕セメント		フライアッ シュの置換 率(%)	備 考
		水準	置換率(%)		
1	OPC	—	0	0	単体
2	OPC+FG5(5)	FG5	5	0	
3	OPC+FG5(10)		10	0	
4	OPC+FG5(20)		20	0	
5	FG5		100	0	単体
6	FG7	FG7	100	0	単体
7	OPC+FG10(5)	FG10	5	0	
8	OPC+FG10(10)		10	0	
9	OPC+FG10(20)		20	0	
10	FG10		100	0	単体
11	OPC+FG10(10)+FA(10)		10	10	
12	OPC+FG10(10)+FA(20)		10	20	
13	OPC+FG10(20)+FA(10)		20	10	
14	OPC+FG10(20)+FA(20)		20	20	

表 5.3.8 プレキャストコンクリート製造に用いられている実機配合の粉体量

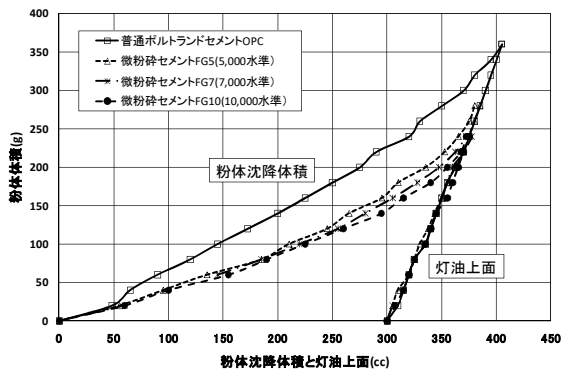
配合名	W/C (%)	W/(C+P) (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	混和材 P(kg/m ³)		
					FG10	FA	石粉
M 1	-	-	-	380	0	95	110
M 2	-	-	-	376	4	95	110

(ii)試験結果

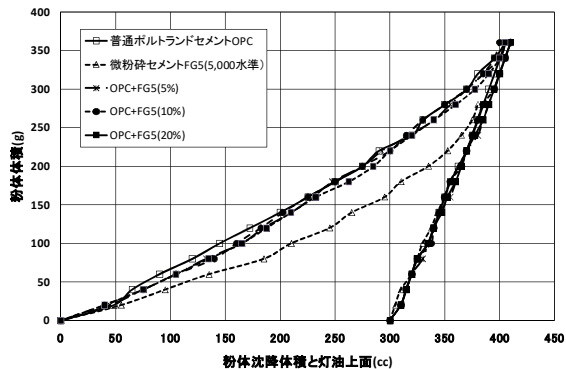
使用した材料の粉体投入量と粉体沈降体積の関係を図 5.3.21 に示す。この図からどの粉体の場合でも灯油上面の測定値は一定で直線関係にあり投入された粉体の体積が一定であることが確認される。一方、投入した粉体と沈降体積の関係は、いずれのケースでも投入粉体が増すにつれて若干凹状を示しているが右肩上がりほぼ直線関係にある。そして投入した粉体の種類により傾きが異なることが分かる。これは粉体の粒度分布や大きさにより充填性が異なるためであり、本試験が粉体の充填度を図る手法として適切であることが確認される。図 5.3.21(a)は、単独粉体による試験結果を示したものである。この図から普通ポルトランドセメントに対して微粉砕セメントは傾きが緩やか、つまり充填性が上がっていることを示唆しており、比表面積が大きくなるにつれてますます傾きが緩やかになる傾向にある。図 5.3.21(b)は、比表面積 5,000 水準の微粉砕セメントを置換した場合の粉体投入量と粉体沈降体積の関係である。この図から普通ポルトランドセメントに微粉砕セメントを置換することで傾きがより緩やかになり、置換量が増すにつれて傾きがより緩やかになる傾向を示した。これは、普通セメントの度分布幅が大きいため微粉砕セメントを置換することで、普通セメントの最密充填度が向上していることを示していると考えられる。しかし、置換率 5~20%と増やしても普通セメントと大きな差が生じていない。これは微粉砕セメントの比表面積が 5,000 水準と普通セメントと比べ大きく変わらないため、充填性がそれほど向上していないことを示唆している。図 5.3.21(c)は、比表面積 10,000 水準の微粉砕セメントを置換した場合の関係である。この図では、5,000 水準と傾向は同じであるが、置換率が増えるにしたがって微粉砕セメント単独の傾きに大きく近寄ってくるのが分かる。これは、微粉砕セメントの比表面積が普通セメントに比べかなり大きいため、普通セメントの空隙部に微粉砕セメントが入り込み充填性が向上したと考えられる。図 5.3.21(d)は、異なる粉体を混合置換した場合である。粉体は 10,000 水準の微粉砕セメントとフライアッシュを用い、それぞれ置換率を 10%と 20%の組合せで試験を行った。その結果、置換率が大きくなる毎に傾きも緩やかになっている。しかし、

図 5.3.21(e)に示すように同一置換量 20%であっても、使用する材料の違いにより傾きが大きく変化することも分かった。この理由は、細かい粉体を置換すれば充填度が上がるということではなく、ベース粉体の粒度分布に対して空隙を埋める大きさの粉体を混和置換する必要があることを示唆するもので最適充填を行うためには、最適な大きさが存在することを示唆していると考えられる。図 5.3.21(f)は、実配合の粉体に対する試験結果である。この図から分かるように、微粉砕セメントをたかが 1%置換しただけで関係は大きく変化することが確認された。

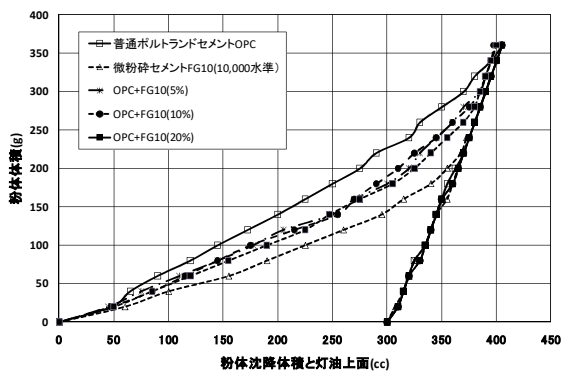
図 5.3.22 は、Fuller-Thompson の理想的最密粒度曲線に対する普通ポルトランドセメント単独および普通セメントに微粉砕セメントを置換した場合の $10\mu\text{m}$ 以下の粒度分布を示したものである。どの微粉砕セメントを置換しても粒度分布は理想曲線に近づく傾向にあり、置換率が増えることでより漸近することもわかる。また、比表面積が大きな微粉砕セメントを多く置換した場合の方がその傾向が高くなることも分かる。



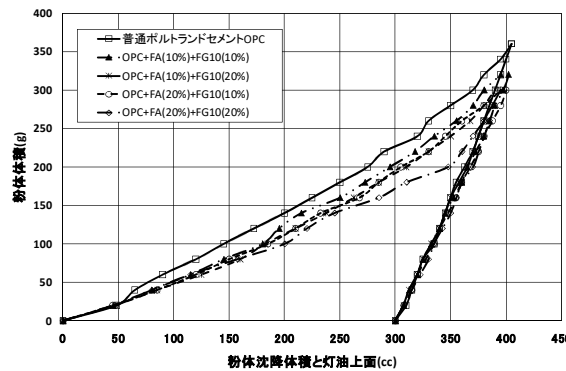
(a) 粉体単体の場合



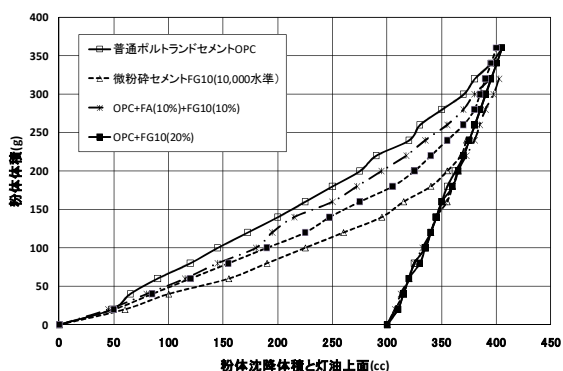
(b) FG5(5,000 水準) 置換の場合



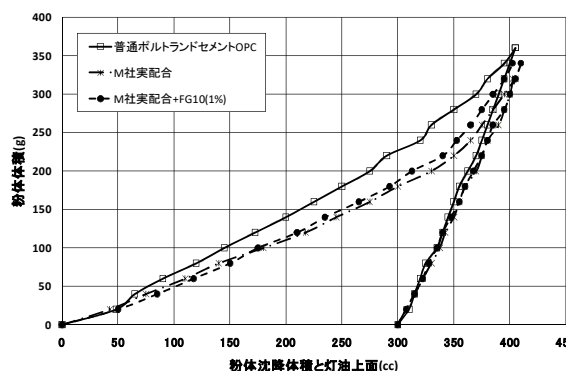
(c) FG10(10,000 水準) 置換の場合



(d) FG10 と FA を置換した場合

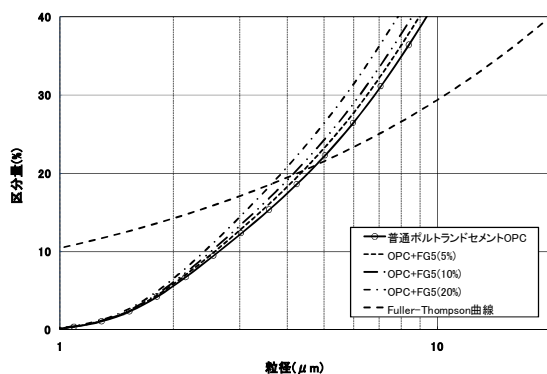


(e) 置換率 20% の場合

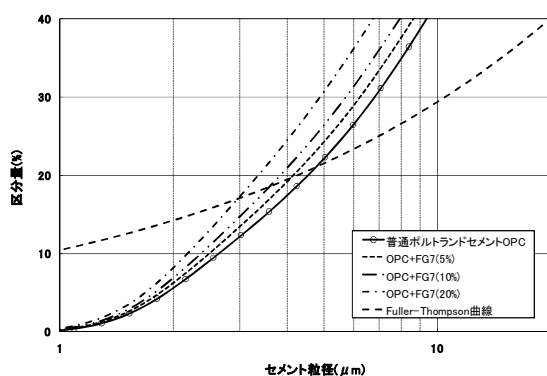


(f) 実配合の場合

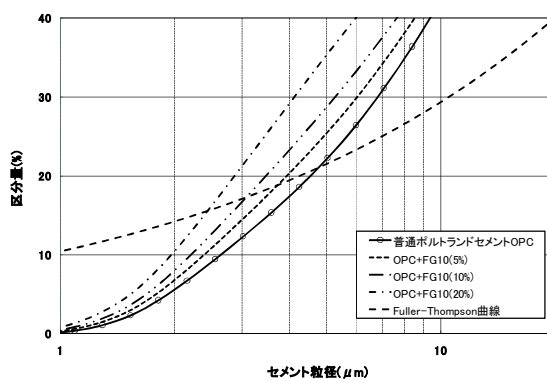
図 5.3.21 粉体投入量と粉体沈降体積の関係



(a) 微粉碎セメント FG5 を置換した場合



(b) 微粉碎セメント FG7 を置換した場合



(c) 微粉碎セメント FG10 を置換した場合

図 5.3.22 微粉碎セメントを置換した場合の微粒度分布

(iii) 微粉砕セメント混和置換による最密充填度

実験で得られた粉体投入量と粉体沈降体積の関係（図 5.3.21 参照）から、空隙率を以下の式により算定した。

$$\text{空隙率} = 100 - \text{充填率} \quad (\text{式 5.1})$$

$$\text{充填率} = V_p / V_s = \rho_p / (V_s \times S_p) \times 100(\%) \quad (\text{式 5.2})$$

ここに、 V_s ：充填粉体の実体積

V_p ：粉体の沈降（みかけの）体積

ρ_p ：充填粉体の質量

S_p ：粉体の比重

図 5.3.23 は、普通ポルトランドセメントに微粉砕セメントを置換した場合の空隙率を示したものである。今回使用した普通ポルトランドセメントは、空隙率約 74%であり、この普通ポルトランドセメントに比表面積 5,000(cm^2/g)微粉砕セメント(FG5)を混和した場合、徐々に空隙率が下がりち密になっていくことが分かる。しかし、置換率が 10%を超えると今度は空隙率が大きくなる傾向となり置換率 40%を超えると普通ポルトランドセメントの初期の空隙率 74%より大きくなることが分かった。一方、比表面積 10,000(cm^2/g)微粉砕セメント(FG10)を置換した場合も同様に置換率 10%前後で最小の空隙率を呈したが、FG5 微粉砕セメントに比べて充填性は低かった。なお、比表面積 7,000(cm^2/g)微粉砕セメント(FG7)は FG5 と FG10 の中間的位置づけであった。また、微粉砕セメント単独での空隙率は、普通セメントの 74%よりはるかに大きく約 78～80%となり、比表面積が大きいから緻密であるとは限らないことを確認することができた。さらにフライアッシュセメント A 種相当(10%置換)および B 種相当(20%置換)の空隙率も算定したが普通ポルトランドセメントよりも高い空隙率を示した。これは、フライアッシュの比表面積が普通セメントと同程度であることから最密充填の効果が発揮できなかったことが原因と考えられる。さらに M 社で実際に用いられている配合(表 5.3.8)でも最密充填度を計測したところ、M1 配合では普通セメントの 74%より空隙が大きくなったのに対して、微粉砕セメント(FG10)を 1%置換した M2 配合では、逆に普通セメント 74%より少ない空隙率を示した。このように、微粉砕セメントの僅か 1%置換で大きく空隙率が変化することから、粉体の種類や量、粒度分布などにより最密充填効果が変わることがわかった。

図 5.3.24 は、普通ポルトランドセメントに各種粉体を置換した場合の比表面積を算定し空隙率との関係を示したものである。この図から分かるように、置

換率が同じでも粉体の比表面積は異なることが分かる。言い換えれば、空隙を埋めている物理量は同一であっても比表面積が異なることは水和反応が異なることを示唆しており、このように微粉砕セメントを混和置換する場合には、物理的充填度の他に水和による効果を考慮する必要があることを示している。

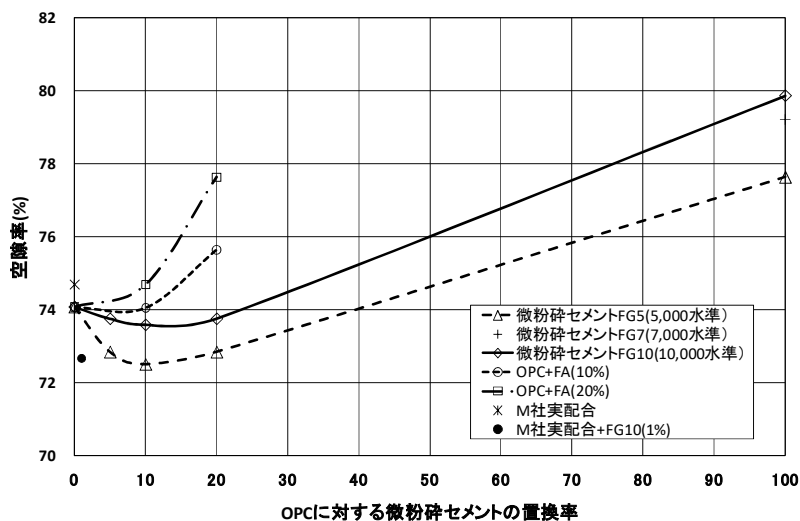


図 5.3.23 普通セメントに各種粉体を置換した場合の空隙率

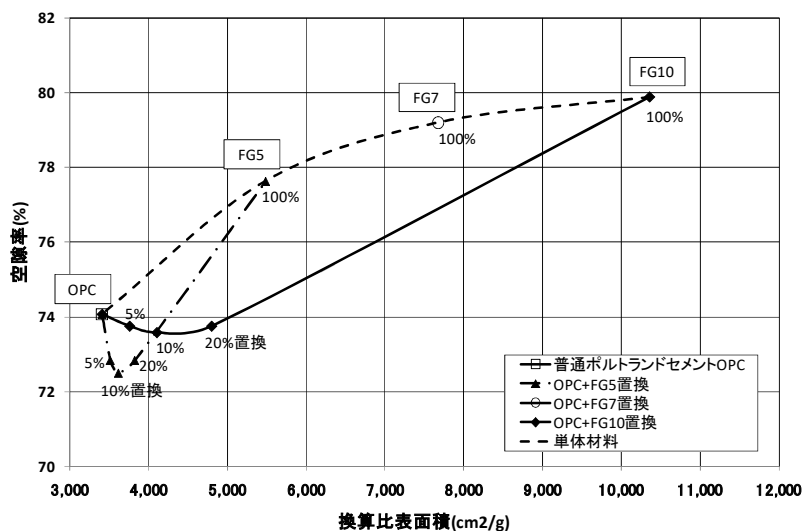


図 5.3.24 換算比表面積と空隙率の関係

(iv) 微粉砕セメント混和置換による効果の考え方

最密充填試験により微粉砕セメントの置換による空隙率の変化が示された。しかし微粉砕セメントの置換による効果は、物理的間詰め効果以外にも水和反応による効果も期待できることが予測される。そこで、微粉砕セメント置換による効果として、以下に示す2つの効果とし表現することを考えた。

- (i) 物理的手法 (フィラー効果) : セメント粒度分布が最密充填になることで得られる効果
- (ii) 化学的手法 (水和活性効果) : セメント粒子の比表面積が大きくなることで水和が活性して得られる効果

なお、微粉材料によるフィラー効果に関しては既往の研究では一部指摘されているが明確な物理量としての算定式の提案までには至っていない。さらに、比表面積による水和活性についてもいくつかの既往の研究が存在するがこちらも若材齢時の水和活性についての研究は存在しないことから、本研究ではフィラー効果と水和活性効果の2つの効果を加味した若材齢時の強度特性について以下に示すように提案を行う。

プレキャストコンクリートの製造過程での若材齢時強度増加量は、式 5.3 で表せる。

$$\Delta F_c = f_c(B, Ad) - f_c(OPC) \quad (\text{式 5.3})$$

ここに、

ΔF_c : 微粉砕セメント置換による強度増加量

$f_c(B, Ad)$: 混和材使用時の強度

B : 微粉砕セメントの比表面積水準

Ad : 微粉砕セメントの置換量

$f_c(OPC)$: 普通ポルトランドセメント(OPC)単独による強度

また、強度増加量の内訳は、式 5.4 に示されるように算定する。

$$\text{水和活性効果} = \text{強度増加量} - \text{フィラー効果} \quad (\text{式 5.4})$$

これは、フィラー効果は、最密充填度により物理的に評価することができるが、水和活性による効果は、特にセメント原材料の相違やセメント粉砕の有無さらに水量等により変化するため算定することが複雑であるため、ここでは、(式 5.4) に示すように強度増加量の内、フィラー効果を差し引いたものを、簡

易的に水和活性効果とした。

(d)微粉砕セメントの物理的特性のまとめ

本粉砕手法により製造した微粉砕セメントの物理特性に関する実験結果を表 5.3.9 にまとめる。

表 5.3.9 微粉砕セメントの物理特性のまとめ

項目	物理特性
粒度分布	普通ポルトランドセメントに比べ粒度分布幅が狭く、同一粒径レベルのセメント粒子の集合体となっている
粒径	比表面積 10,000(cm ² /g)水準で平均粒径が 3~5 μ m である。また、平均粒径と比表面積の関係はほぼ線形で表せる。
比表面積	普通ポルトランドセメントの比表面積は、3,500(cm ² /g)水準であるが、微粉砕することで、比表面積 5,000~10,000(cm ² /g)水準まで粉砕することが可能で、粉砕 PASS 及び分級を連動することで必要な比表面積の水準の制御可能である。
粒子形状	微粉末セメントは、対向型ジェットミルでの衝突粉砕なため、一般セメントの粉砕に用いられるローラミル等と比べ角張った形状である
最密充填および空隙率	普通ポルトランドセメントに対して微粉砕セメントを置換した場合、比表面積 5,000(cm ² /g)水準及び 10,000(cm ² /g)水準を 10%前後置換した場合が最密充填となり、微粉砕セメント単独での空隙率は、均一な径の集合体になることから空隙が大きくなり、普通ポルトランドセメントよりも大きな空隙であることがわかった。また、同一置換率であっても、比表面積が異なる粉体を混合置換した場合は、充填度が異なること、さらにさまざまな粉体との組合せによっては、微粉砕セメント 1%置換でも最密充填度が大きく変化することがわかった。なお、普通ポルトランドセメントに微粉砕セメントを置換する場合、比表面積が大きな 10,000 水準よりも相対的に小さな 5,000 水準を置換した場合の方が最密充填度が高いこともわかった。 したがって、微粉末セメントの役割は、粒度分布を有するセメント粉体における充填されていない空間を満たすことである。

(2) 力学特性

(a) 圧縮強度特性

(i) ベースセメント種および W/C の違いによるペーストの圧縮強度特性

微粉砕セメントを置換したペーストの圧縮特性を求めるために微粉砕セメントの置換率を変化させて実験を行った。なお、ベースセメント種および W/C が変化した場合の圧縮特性も併せて実験を行った。実験に用いたベースセメント、微粉砕セメント及びフライアッシュの諸元を表 5.3.10、配合を表 5.3.11 に示す。

表 5.3.10 使用材料

材料		諸元	備考
セメント	普通ポルトランドセメント(N)	密度=3.16(g/cm ³)、 比表面積=3,260(cm ² /g)	住友大阪セメント社製 (八戸工場)
	早強セメント(H)	密度=3.20(g/cm ³)、 比表面積=4,200(cm ² /g)	宇部三菱セメント社製 (黒崎工場)
混和材	微粉砕セメント(FG5)	比表面積=5,484(cm ² /g)	
	微粉砕セメント(FG7)	比表面積=7,676(cm ² /g)	
	微粉砕セメント(FG10/C)	比表面積=10,459(cm ² /g)	
	フライアッシュ II 種(FA)	密度=2.30(g/cm ³)、 比表面積=3,090(cm ² /g)	東北電力能代火力発電所産

実験は、表 5.3.12 に示す普通セメントをベースに微粉砕セメントを置換した場合、表 5.3.13 に示す早強セメントをベースに微粉砕セメントを置換した場合、表 5.3.14 に示す普通セメントに微粉砕セメントとフライアッシュを置換した場合、さらに表 5.3.15 に示す早強セメントに微粉砕セメントとフライアッシュを置換した場合の 4 種類のセメントペーストを製作して、圧縮強度の関係を求めた。

表 5.3.11 ペースト実験の配合および組合せ

名称	ベースセメント	W/(C+P) (%)	W (kg)	C (kg)	混和材 P	
					フライアッシュ FA 置換率 (%)	微粉砕セメント FG 置換率 (%)
N40-FG**	普通(N) 早強(H)	40	680	1700-0	0,10,20,30	0,1,3,5,10,20, 50,70,100
N50-FG**		50	850			
N55-FG**		55	935			
N70-FG**		70	1190			

表 5.3.12 普通セメントを用いたペースト実験の配合組合せ

名称*)		セメント種	W/(C+F) G (%)	W/C (%)	W (kg)	C (kg)	微粉碎セメント FG	
							置換率(%)	置換量 (kg)
1	N40-FG10(0)	普通 (N)	40	40	680	1700	0	0
2	N40-FG10(1)		40	40.4	680	1683	1	17
3	N40-FG10(3)		40	41.2	680	1649	3	51
4	N40-FG10(5)		40	42.1	680	1615	5	85
5	N40-FG10(10)		40	44.4	680	1530	10	170
6	N40-FG10(20)		40	50	680	1360	20	340
7	N40-FG10(50)		40	80	680	850	50	850
8	N40-FG10(70)		40	133	680	510	70	1190
9	N40-FG10(100)		40	-	680	0	100	1700
10	N55-FG10(0)		55	55	935	1700	0	0
11	N55-FG10(1)		55	55.6	935	1683	1	17
12	N55-FG10(3)		55	56.7	935	1649	3	51
13	N55-FG10(5)		55	57.9	935	1615	5	85
14	N55-FG10(10)		55	61.1	935	1530	10	170
15	N55-FG10(20)		55	68.8	935	1360	20	340
16	N55-FG10(50)		55	110	935	850	50	850
17	N55-FG10(70)		55	183	935	510	70	1190
18	N55-FG10(100)		55	-	935	0	100	1700
19	N70-FG10(0)		70	70	1190	1700	0	0
20	N70-FG10(1)		70	70.7	1190	1683	1	17
21	N70-FG10(3)		70	72.2	1190	1649	3	51
22	N70-FG10(5)		70	73.7	1190	1615	5	85
23	N70-FG10(10)		70	77.8	1190	1530	10	170
24	N70-FG10(20)		70	87.5	1190	1360	20	340
25	N70-FG10(50)		70	140	1190	850	50	850
26	N70-FG10(70)		70	233	1190	510	70	1190
27	N70-FG10(100)		70	-	1190	0	100	1700

注*) 名称は、「ベースセメント種－微粉碎セメント種(置換率)－材齢」

表 5.3.13 早強セメントを用いたペースト実験の配合組合せ

名称*)		セメント種	W/(C+F) G (%)	W/C (%)	W (kg)	C (kg)	微粉碎セメント FG	
							置換率(%)	置換量(kg)
1	H40-FG10(0)	早強(H)	40	40	680	1700	0	0
2	H40-FG10(1)		40	40.4	680	1683	1	17
3	H40-FG10(3)		40	41.2	680	1649	3	51
4	H40-FG10(5)		40	42.1	680	1615	5	85
5	H40-FG10(10)		40	44.4	680	1530	10	170
6	H40-FG10(20)		40	50	680	1360	20	340
7	H40-FG10(50)		40	80	680	850	50	850
8	H40-FG10(70)		40	133	680	510	70	1190
9	H40-FG10(100)		40	-	680	0	100	1700
10	H55-FG10(0)		55	55	935	1700	0	0
11	H55-FG10(1)		55	55.6	935	1683	1	17
12	H55-FG10(3)		55	56.7	935	1649	3	51
13	H55-FG10(5)		55	57.9	935	1615	5	85
14	H55-FG10(10)		55	61.1	935	1530	10	170
15	H55-FG10(20)		55	68.8	935	1360	20	340
16	H55-FG10(50)		55	110	935	850	50	850
17	H55-FG10(70)		55	183	935	510	70	1190
18	H55-FG10(100)		55	-	935	0	100	1700
19	H70-FG10(0)		70	70	1190	1700	0	0
20	H70-FG10(1)		70	70.7	1190	1683	1	17
21	H70-FG10(3)		70	72.2	1190	1649	3	51
22	H70-FG10(5)		70	73.7	1190	1615	5	85
23	H70-FG10(10)		70	77.8	1190	1530	10	170
24	H70-FG10(20)		70	87.5	1190	1360	20	340
25	H70-FG10(50)		70	140	1190	850	50	850
26	H70-FG10(70)		70	233	1190	510	70	1190
27	H70-FG10(100)		70	-	1190	0	100	1700

注*) 名称は、「ベースセメント種－微粉碎セメント種(置換率)－材齢」

表 5.3.14 フライアッシュ置換普通セメントを用いたペースト実験の配合組合せ

名称		セメント種	W/(C+P) (%)	W/C (%)	W (kg)	C (kg)	混和材 P			
							微粉砕セメント FG		フライアッシュ FA	
							置換率 (%)	置換量 (kg)	置換率 (%)	置換量 (kg)
1	N40-FA(10)-FG10(0)	普通	40	44.4	680	1530	0	0	10	170
2	N40-FA(10)-FG10(1)		40	44.9	680	1513	1	17	10	170
3	N40-FA(10)-FG10(3)		40	46	680	1479	3	51	10	170
4	N40-FA(10)-FG10(5)		40	47.1	680	1445	5	85	10	170
5	N50-FA(10)-FG10(0)		50	55.6	850	1530	0	0	10	170
6	N50-FA(10)-FG10(1)		50	56.2	850	1513	1	17	10	170
7	N50-FA(10)-FG10(3)		50	57.5	850	1479	3	51	10	170
8	N50-FA(10)-FG10(5)		50	58.8	850	1445	5	85	10	170
9	N70-FA(10)-FG10(0)		70	77.8	1190	1530	0	0	10	170
10	N70-FA(10)-FG10(1)		70	78.7	1190	1513	1	17	10	170
11	N70-FA(10)-FG10(3)		70	80.5	1190	1479	3	51	10	170
12	N70-FA(10)-FG10(5)		70	82.4	1190	1445	5	85	10	170
13	N40-FA(30)-FG10(0)		40	57.1	680	1190	0	0	30	510
14	N40-FA(30)-FG10(1)		40	58	680	1173	1	17	30	510
15	N40-FA(30)-FG10(3)		40	59.7	680	1139	3	51	30	510
16	N40-FA(30)-FG10(5)		40	61.5	680	1105	5	85	30	510
17	N50-FA(30)-FG10(0)		50	71.4	850	1530	0	0	30	510
18	N50-FA(30)-FG10(1)		50	72.5	850	1513	1	17	30	510
19	N50-FA(30)-FG10(3)		50	74.6	850	1479	3	51	30	510
20	N50-FA(30)-FG10(5)		50	76.9	850	1445	5	85	30	510
21	N70-FA(30)-FG10(0)		70	100	1190	1530	0	0	30	510
22	N70-FA(30)-FG10(1)		70	101	1190	1513	1	17	30	510
23	N70-FA(30)-FG10(3)		70	104	1190	1479	3	51	30	510
24	N70-FA(30)-FG10(5)		70	108	1190	1445	5	85	30	510

注*) 名称は、「ベースセメント種-フライアッシュ(混和率)-微粉砕セメント種(置換率)-材齢」

表 5.3.15 フライアッシュ置換早強セメントを用いたペースト実験の配合組合せ

名称		セメント種	W/(C+P) (%)	W/C (%)	W (kg)	C (kg)	混和材 P			
							微粉砕セメント FG		フライアッシュ FA	
							置換率 (%)	置換量 (kg)	置換率 (%)	置換量 (kg)
1	H55-FA(10)-FG10(0)	早強	55	61.1	935	1530	0	0	10	170
2	H55-FA(10)-FG10(1)		55	61.8	935	1513	1	17	10	170
3	H55-FA(10)-FG10(3)		55	63.2	935	1479	3	51	10	170
4	H55-FA(10)-FG10(5)		55	64.7	935	1445	5	85	10	170
5	H55-FA(30)-FG10(0)		55	78.6	935	1190	0	0	30	510
6	H55-FA(30)-FG10(1)		55	79.9	935	1173	1	17	30	510
7	H55-FA(30)-FG10(3)		55	82.1	935	1139	3	51	30	510
8	H55-FA(30)-FG10(5)		55	84.6	935	1105	5	85	30	510

注*) 名称は、「ベースセメント種－フライアッシュ混和率－微粉砕セメント種(置換率)－材齢」

供試体の作製は、「JIS A1132 コンクリートの圧縮強度試験、曲げ強度試験及び割裂引張強度試験のための供試体の作り方」に準拠した。供試体は、早期脱型が必要であることからサミットモールド缶(φ 50x100mm)を用い約 2 時間後にブリージング水を除去し、塩化ビニール製ラップで打設部を覆い封緘し、温度 20℃、相対湿度 60%一定の環境で管理した。図 5.3.25 に実験のフローを示す。

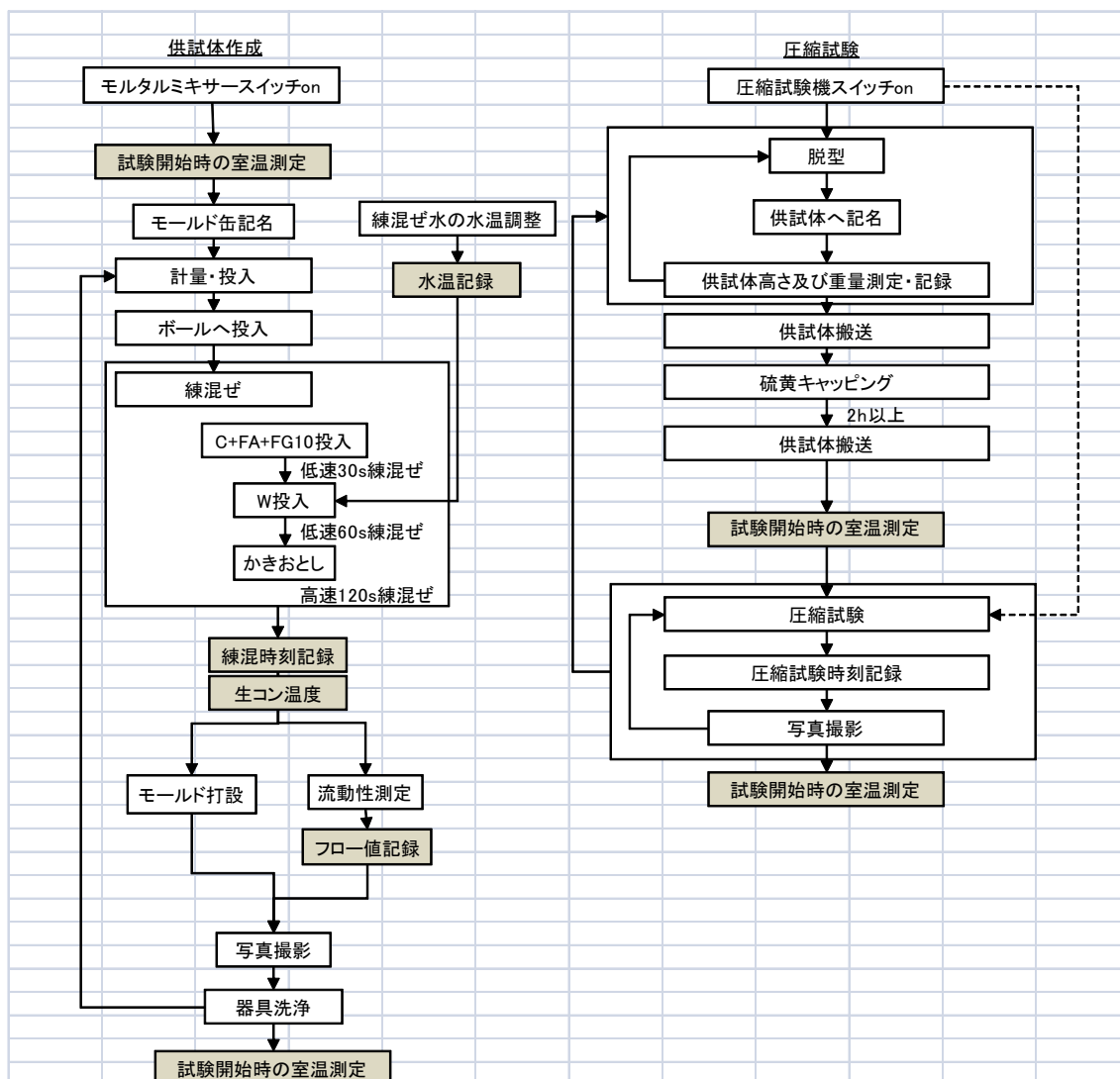


図 5.3.25 ペースト実験のフロー

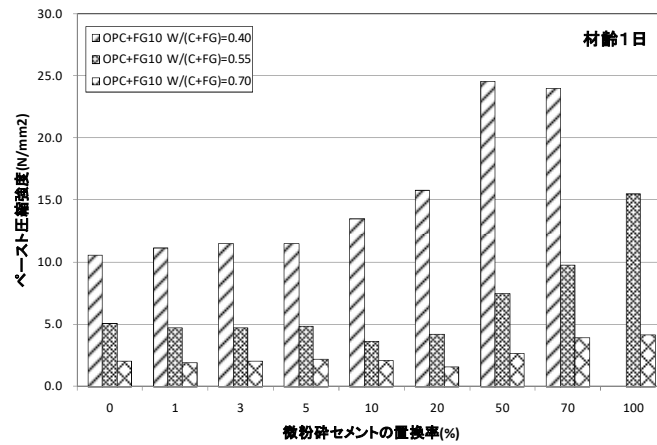
図 5.3.26 は普通ポルトランドセメントに比表面積 $10,000\text{cm}^2/\text{g}$ 水準の微粉碎セメント(FG10)を置換した場合の材齢 1 日と 3 日の圧縮強度を示したものである。この図から $W/C=70\%$ と大きな場合は、FG10 の置換率が増加しても圧縮強度の増加が小さいが、 $W/C=55\%$ では FG10 の置換率が増加するにしたがって強度増加も大きくなる傾向にある。しかし、 $W/C=40\%$ と小さくなった場合は、材齢 1 日強度は置換率増加に対して強度も増加するが、材齢 3 日強度は置換率が 20% までは放物線的に増加したにもかかわらずその後の強度増加は微増に留まっており、置換率 50% 以上では粘性が高く練混ぜが出来なかった。

図 5.3.27 は、早強セメントに比表面積 $10,000\text{cm}^2/\text{g}$ 水準の微粉碎セメント(FG10)を置換した場合の材齢 1 日と 3 日の圧縮強度を示したものである。この図から W/C が大きな 70% の場合は、FG10 の置換率が増加しても圧縮強度は変

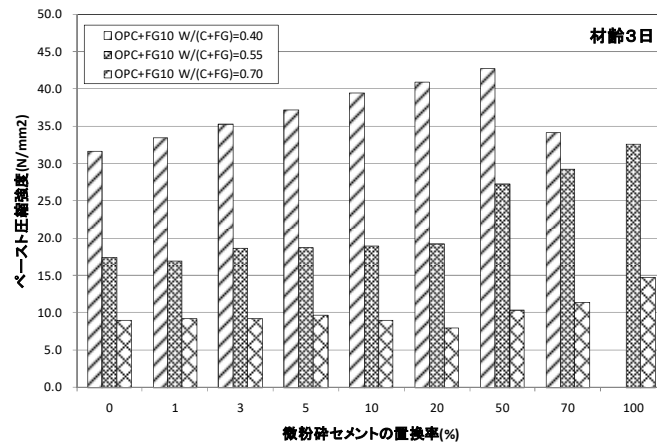
化せず一定であった。 $W/C=55\%$, 40% いずれの場合も置換率 5~20%の領域において圧縮強度のピークが生じるが、それ以上の置換率では強度が低下する傾向を示した。なお、強度ピークは W/C が小さくなるほど置換率が小さな領域で生じる傾向にある。早強セメントの場合も最密充填によるフィラー効果であると解釈される。

図 5.3.28 は、普通ポルトランドセメントにフライアッシュを置換しさらに $10,000\text{cm}^2/\text{g}$ 水準の微粉砕セメント(FG10)も置換した場合の圧縮強度特性である。この図から微粉砕セメントの置換率が増加しても強度発現はまったく変わらなかった。また、強度の絶対値はいずれの W/C においてもフライアッシュの置換率が大きくなるごとに強度が下がり若材令時のポゾラン反応がないことが示された。また W/C が小さいほど、強度差が大きくなる傾向も示した。この理由は、フライアッシュを置換していることで空隙率が大きくなり微粉砕セメントの少量置換ではフィラー効果が期待できないためと考えられる。

図 5.3.29 は、早強セメントにフライアッシュを置換しさらに $10,000\text{cm}^2/\text{g}$ 水準の微粉砕セメント(FG10)を置換した場合の圧縮強度特性である。早強セメントを用いた場合でも普通セメントと同様に置換率が増加しても強度発現がなかったが、 $W/C=40\%$ の小さな場合には、若干強度増加が見られた。これは、普通セメントより最密充填が高いことと、 W/C が小さいことで空隙内に水が入りにくかったためと解釈される。

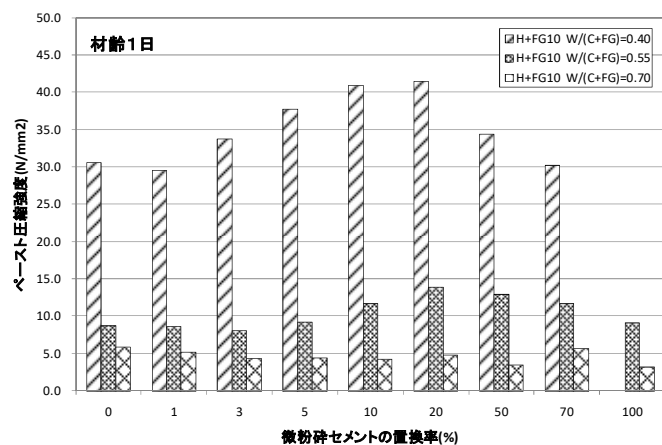


(a)材齢1日強度

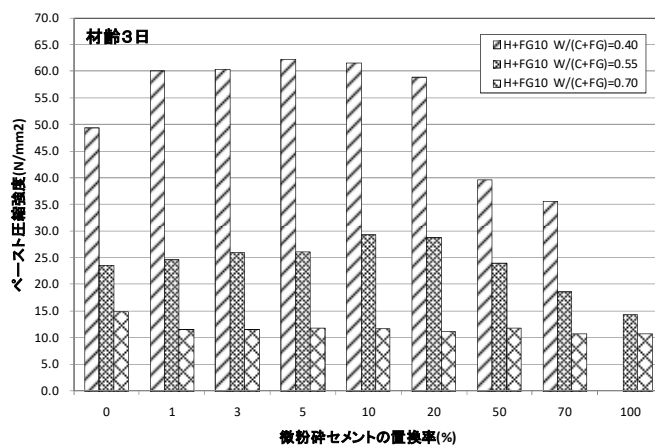


(b)材齢3日強度

図 5.3.26 普通セメントに微粉砕セメントを置換したペースト強度



(a)材齢 1 日強度



(b)材齢 3 日強度

図 5.3.27 早強セメントに微粉砕セメントを置換したペースト強度

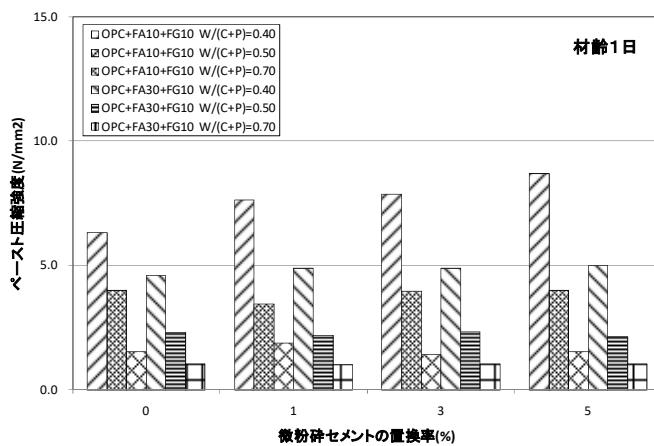
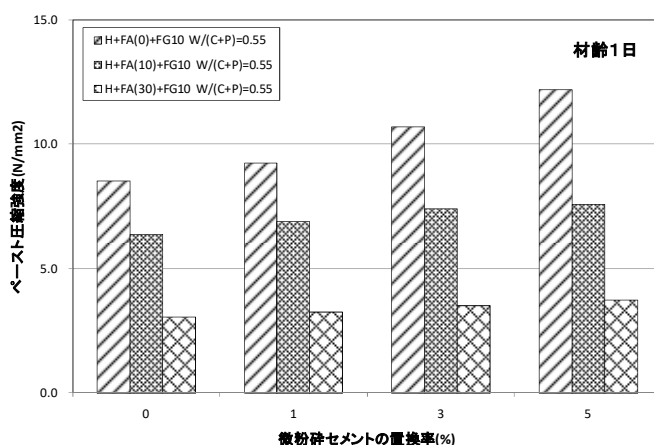
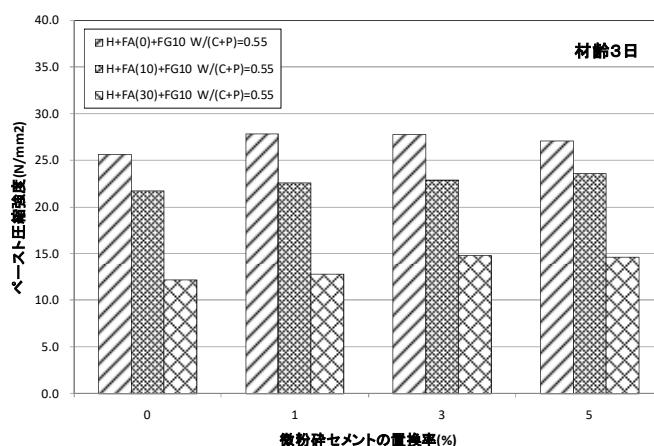


図 5.3.28 FA セメントに微粉砕セメントを置換したペースト強度



(a)材齢 1 日強度



(b)材齢 3 日

図 5.3.29 早強 FA セメントに微粉砕セメントを置換したペースト強度

(ii)比表面積と圧縮強度発現特性

比表面積が異なる微粉砕セメントを普通ポルトランドセメントに置換した場合の圧縮強度特性を把握する目的で、W/C=50%一定、単位水量 W 一定で実験を行った。使用した微粉砕セメントは、比表面積 5,000(FG5)、7,000(FG7)および 10,000(FG10)の 3 水準であり、置換率は、1、3、5、10、20、40%の 6 水準とした。また、試験材令は 1、3、7、28 日とし比較検討のため普通セメントおよび早強セメント単体の場合の圧縮強度も求めた。表 5.3.16 に配合を示す。供試体は、「JIS A1132 コンクリートの圧縮強度試験、曲げ強度試験及び割裂引張強度試験のための供試体の作り方」に準拠し作成し、早期脱型が必要であることからサミットモールド缶(φ 50x100mm)を用いた。なお、打設約 2 時間後にブリージング水を除去し、塩化ビニール製ラップで打設面を覆い封緘し、温度 20°C、相対湿度 60%一定の環境下で管理した。表 5.3.17 に使用した材料の諸元を示す。

図 5.3.30～5.3.33 に各材令におけるペースト強度を示した。

表 5.3.16 ペースト配合

	置換率 (%)	W/C (%)	W (kg)	セメント C(kg)					
				普通セメント	微粉砕セメント FG			早強セメント	
					FG5	FG7	FG10		
普通セメント(N)	—	50	595	1190					
早強セメント(H)	—							1190	
混和材	微粉砕セメント (FG5)			1	1178.1	11.9			
				3	1154.3	35.7			
				5	1130.5	59.5			
				10	1071	119			
				20	952	238			
				40	714	476			
	微粉砕セメント (FG7)			1	1178.1		11.9		
				3	1154.3		35.7		
				5	1130.5		59.5		
				10	1071		119		
				20	952		238		
				40	714		476		
	微粉砕セメント (FG10)			1	1178.1			11.9	
				3	1154.3			35.7	
				5	1130.5			59.5	
				10	1071			119	
				20	952			238	
				40	714			476	

表 5.3.17 使用材料の比表面積

材料		比表面積(cm ² /g)	備考
セメント	普通ポルトランドセメント(N)	3,440	住友大阪セメント社 (バージン原材料仕様)
	早強セメント(H)	4,490	
混和材	微粉砕セメント(FG5)	5,484	
	微粉砕セメント(FG7)	7,676	
	微粉砕セメント(FG10)	10,359	

図 5.3.30 は材齢 1 日の圧縮強度特性を示したものである。圧縮強度発現は微粉砕セメントの置換率によって大きく異なるが、その強度発現は、一見バラバラに見えるが最密充填の結果と同じ傾向を示した。つまり、図 5.3.19 の最密充填の実験で示されたように、微粉砕セメント(FG5)の場合は、置換率が 10～20% で充填率ピークが生じ 40%程度の置換まで充填率が向上したのと全く同じ強度発現を示している。一方、微粉砕セメント(FG10)の場合は、置換率 5～10%前後で充填率ピークでそれ以上は空隙率が増加しているが、強度発現もまったく同

じ傾向を示した。このことから材齢1日の強度発現はフィラー効果による強度発現が卓越していると考えられる。また微粉碎セメント FG5 および FG7 ではどの混和率であっても同等水準の強度発現を示す傾向にあり置換率 20%の場合にピーク強度を示している。しかし、微粉碎セメント FG10 の場合は、混和率が5%以下と5%~40%の範囲では異なる強度発現の傾向にあり、置換率5%~40%の範囲では置換率が多くなるほど強度低下が生じている。一方置換率が5%以下の場合には、微粉碎セメントの種類にかかわらず強度発現が低く普通セメント(N)単独の強度よりも低い値を示した。これらの結果から材齢1日の強度特性は化学反応が初期状態であるためまだ水和による強度発現が小さく、フィラー効果による強度増加が強度特性として表れていると考えられる。なお、置換率5%以下ではフィラー効果が小さいためと水和活性による効果がまだ材齢的に期待できないため強度発現は普通セメントのよりも微粉碎セメントを置換した分だけ低くなったと考えられる。

図 5.3.31 は材齢3日での強度発現である。材齢3日の強度発現は、材齢1日の強度発現の傾向と異なり、微粉碎セメントの置換率が多くなるほど強度発現が高くなっている。さらに、比表面積が異なっても強度発現がほとんど同じ水準を示している。しかし、材齢1日からの差分を取ると、FG10 の場合が強度増加が卓越していることが分かる。これは材齢3日になると微粉碎セメントの水和活性が進行するが水和は比表面積に比例して活性化するため FG10 が材齢1日からの伸びが大きく生じたからと推測される。

図 5.3.32 は材齢7日での強度発現である。材齢7日では微粉碎セメント種や置換率にかかわらず同等の強度発現を示している。

図 5.3.33 は材齢28日での強度発現である。材齢28日では材齢7日同様に微粉碎セメント種や置換率にかかわらず同等の強度発現を示している。そして、普通セメント(N)の強度とも同じ水準となった。もはや材齢28日強度は、微粉碎セメントや置換率の影響が全くなくなった材令と考えられる。

図 5.3.34 から図 5.3.36 はそれぞれ微粉碎セメント(FG10)(FG7)(FG5)を置換した場合の材齢1日強度と材齢3日までの強度増加の差分で表現したものである。これらの図から材齢1日の強度発現は、図 5.3.30 と同じ分布であることが分かる。つまりこの材齢1日強度分をフィラー効果と考えることができる。一方、材齢3日強度増加は置換率に応じて増加していることから水和活性効果によるものと考えられる。

また図 5.3.37~図 5.3.39 は材齢28日までの強度増加を示したものである。図には普通セメント(N)および早強セメント(H)仕様の場合の強度増加も示している。これらの図から、微粉碎セメント種と置換率によりいつ強度発現しているかが読み取れる。たとえば微粉碎セメント(FG10)使用の場合は、材齢3日増加分で置換率の増加に比例して強度増加が卓越しているし、微粉碎セメント

(FG5)使用の場合は、置換率 5~10%で材齢 7 日増加分で強度増加しているなどが読み取れる。

以上のことからまとめると、脱型時期を 1 日に設定した場合、微粉砕セメント(FG10)を使用した場合は置換率 5%が最適となり、微粉砕セメント(FG5)を使用した場合 5%以上であれば同等の強度が得られることが言える。また、微粉砕セメントを置換しても最終的な強度発現は同じことから、本開発の微粉砕セメントを置換しても力学的性能に大きく影響を及ぼさないと判断される。

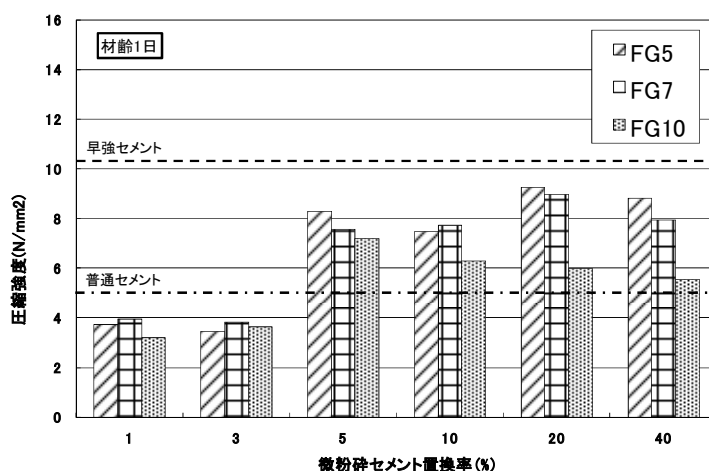


図 5.3.30 材齢 1 日圧縮強度

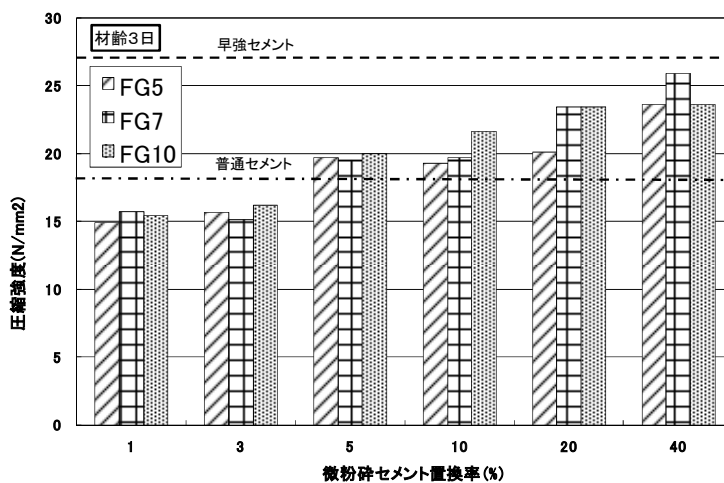


図 5.3.31 材齢 3 日圧縮強度

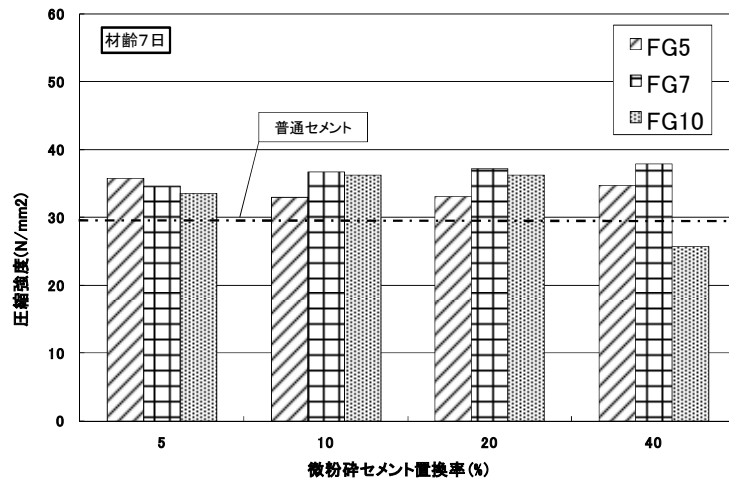


図 5.3.32 材齢 7 日圧縮強度

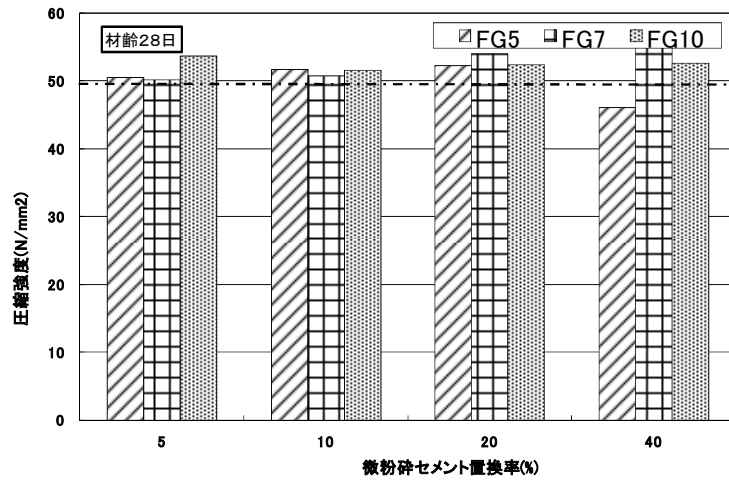


図 5.3.33 材齢 28 日圧縮強度

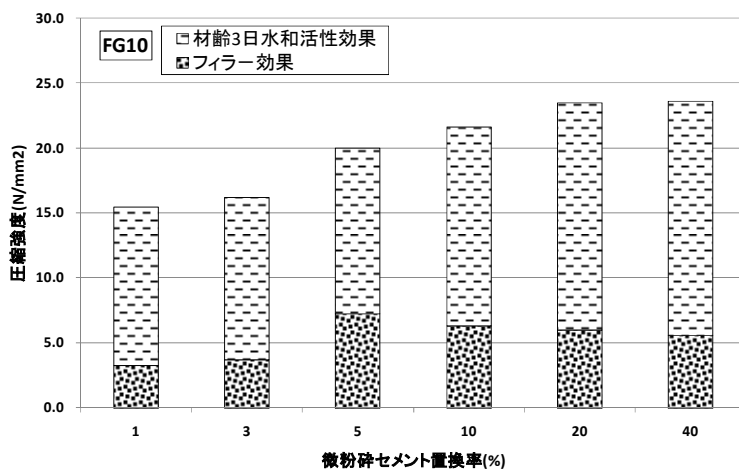


図 5.3.34 微粉砕セメント(FG10)のフィラー効果と水和活性効果

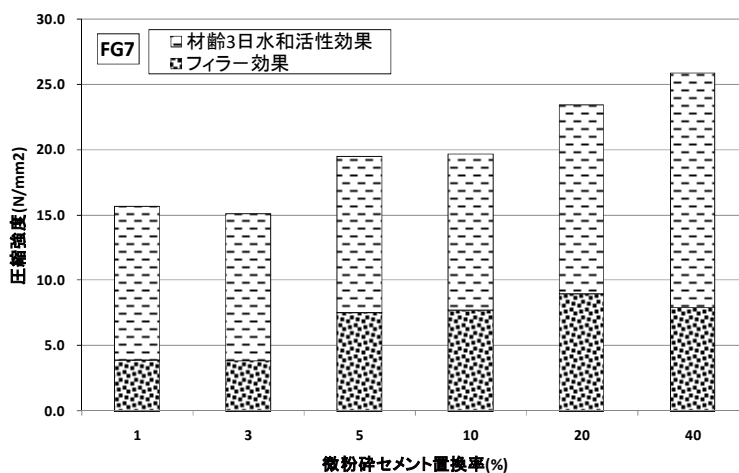


図 5.3.35 微粉砕セメント(FG7)のフィラー効果と水和活性効果

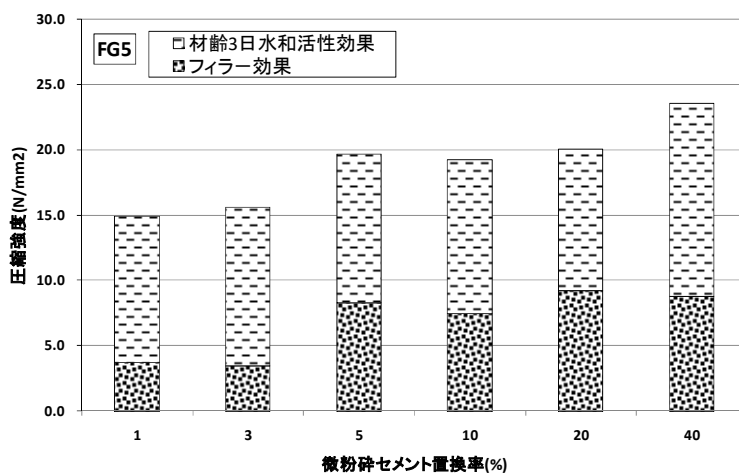


図 5.3.36 微粉砕セメント(FG5)のフィラー効果と水和活性効果

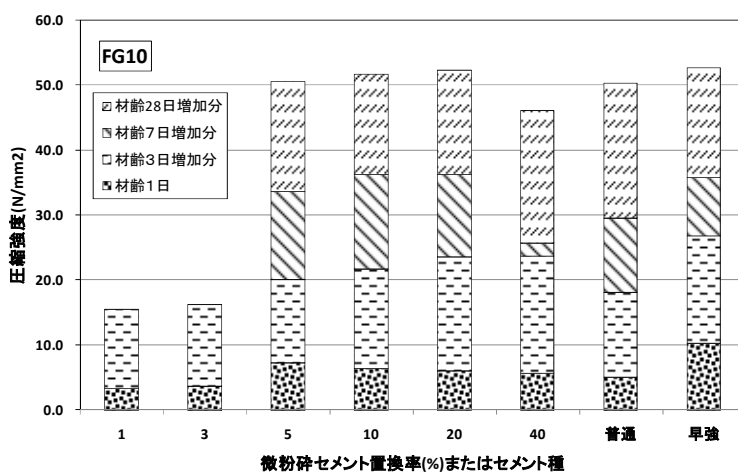


図 5.3.37 微粉碎セメント(FG10)の材齢毎の強度増加

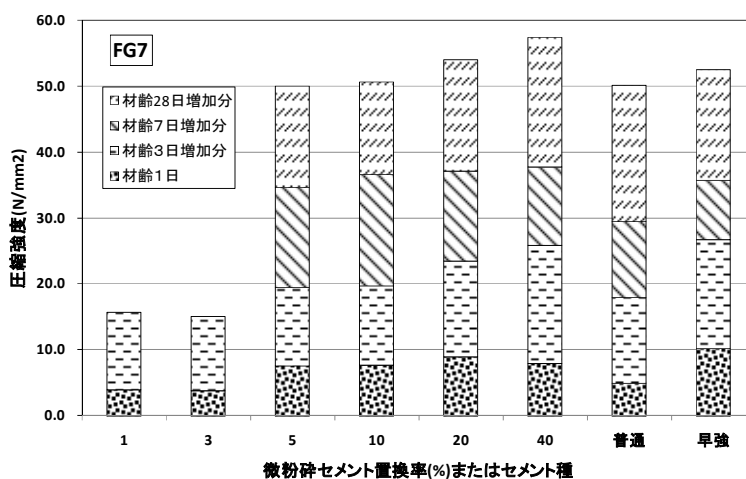


図 5.3.38 微粉碎セメント(FG7)の材齢毎の強度増加

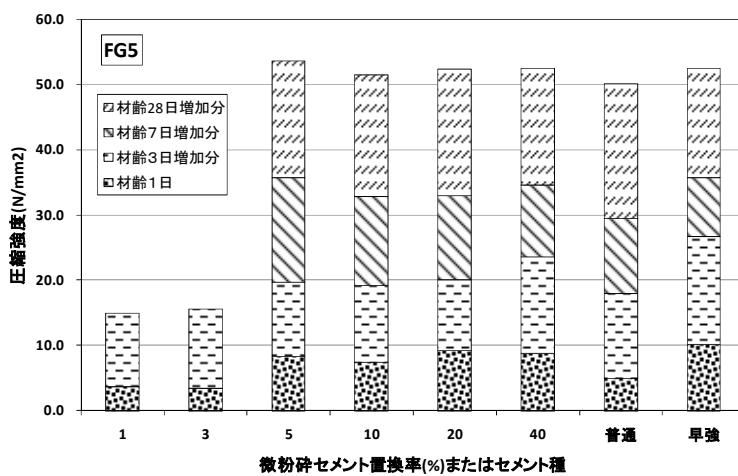


図 5.3.39 微粉碎セメント(FG5)の材齢毎の強度増加

(iii)練混ぜ水の違いによるペーストの強度特性

微粉碎セメントは、普通ポルトランドセメントに比べて比表面積が大きいため水和が活性される。この特性を確認するために、各種練り混ぜ水を用いて強度特性を実験した。使用した練混ぜ水は、蒸留水と Si イオン水（ケイ酸イオン濃度 8,000ppm:SiO₂換算で 16,000ppm） [5.11]（以下「シリカ溶液」という。）である。表 5.3.18 及び 5.3.19 に使用材料および配合組合せを示す。

表 5.3.18 使用材料

材料		pH	諸元	備考
セメント	普通ポルトランドセメント	—	密度=3.16(g/cm ³)、 比表面積 =3,440(cm ² /g)	住友大阪セメント社製（バーজন原材料仕様）
	微粉碎セメント (FG10/C)	—	比表面積 =10,459(cm ² /g)	
練混ぜ水	蒸留水		7.0	参考文献[5.9]
	Si 溶液	タイプ A	3.0	
		タイプ B	9.0	

表 5.3.19 配合組合せ

ケース名	W/C	セメント C	練混ぜ水 W		
			蒸留水	Si 溶液 A (pH=3.0)	Si 溶液 B (pH=9.0)
1	0.85	普通セメント	○		
2				○	
3					○
4		微粉碎セメント (FG10/C)	○		
5				○	
6					○

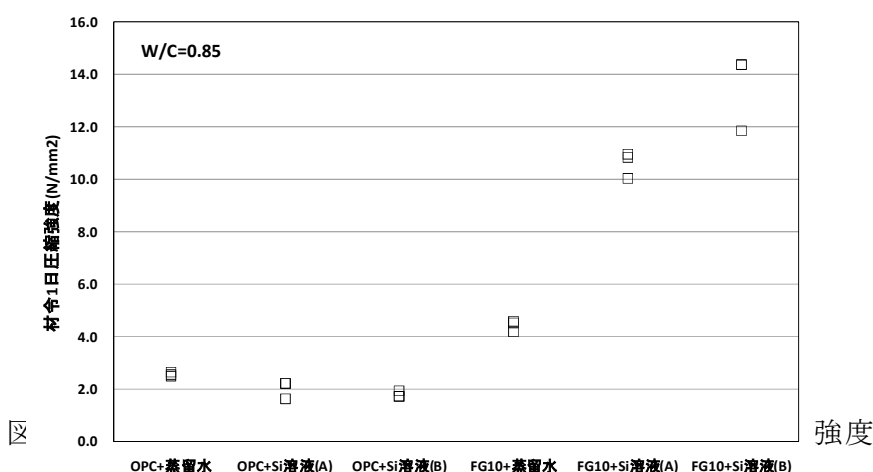


図 5.3.40 普通セメントと微粉碎セメントの材齢 1 日圧縮強度

図 5.3.40 は、練混ぜ水として蒸留水とシリカ溶液を用いた場合の普通ポルトランドセメントと微粉砕セメント(FG10/C)の材令 1 日圧縮強度試験結果である。普通ポルトランドセメントは、蒸留水およびシリカ溶液どちらの練混ぜ水を用いても材令 1 日圧縮強度は低くかつ同等の強度を示した。一方、微粉砕セメント(FG10/C)は蒸留水を用いた場合、普通セメントに比べて 2 倍程度強度が向上した。さらにシリカ溶液を用いた場合は普通セメントに比べ 5~7 倍の強度発現が得られた。これは、普通セメントは、材令 28 日で所定の強度を満足するために粒度分布や比表面積が調整されておりそのため材齢 1 日でのセメント粒子からの鉱物溶出が少ないため水和進行が鈍く圧縮強度発現は小さいと考えられる。したがって、たとえシリカ溶液を用いたとしてもカルシウム溶出が少ないため水和が進行しないと考えられる。一方、微粉砕セメント(FG10/C)は、鉱物溶出を促進させるために比表面積を大きくしているため蒸留水を用いた場合でも若干水和活性され強度増加が見られ、シリカ溶液を用いた場合には、より多くの水和が進展して強度増加が得られたと考えられる。これらの現象から微粉砕セメントは、若材令時において水和活性を促進する能力を持ち合わせていると考えることができる。

(b)長さ変化特性

微粉砕セメントの長さ変化特性を把握するために実験を行った。供試体に用いた配合と材料諸元は表 5.3.16、5.3.17 に示すとおり圧縮強度特性試験と同じである。計測は、JIS A 1129-1 「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法 第 1 部コンパレータ方法」に準拠し、供試体の製作は JISA5201 「セメントの物理試験方法」に準拠して鋼製型枠により 40×40×160mm の供試体を作製した。ペースト打設後、材齢 1 日で脱型し、供試体は温度 20℃、相対湿度 60%に保った恒温恒湿室で気中養生し、長さ変化量をダイヤルゲージにて測定した(材齢 1 日に測定した値を基長とした) (図 5.3.41 参照)。なお試験材齢は 1、3、5、7、28 日において測定した。

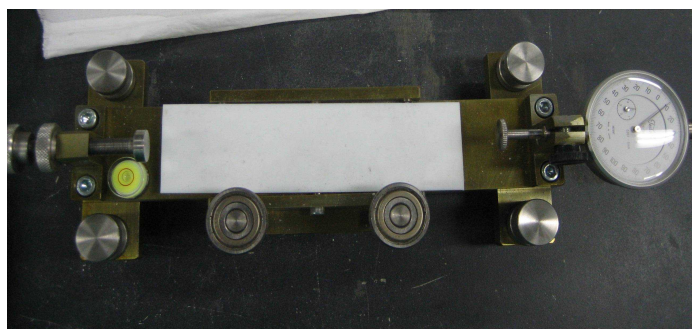


図 5.3.41 長さ変化試験

図 5.3.42 は、微粉砕セメント(FG5)を置換した場合の供試体の長さ変化率を材齢で示したものである。この図から微粉砕セメント(FG10)の置換率が 5%~40%に変化しても長さ変化率は同等の値を示しており、普通セメント(N)や早強セメント(H)の長さ変化率とほとんど変わらない変化量を示した。この理由は微粉砕セメント(FG5)は、比表面積が 5,000 水準であることから普通セメント 3,000 水準より若干大きい程度であることから置換しても長さ変化に大きく影響をしなかったと考えられる。

図 5.3.43 は、微粉砕セメント(FG7)を置換した供試体の長さ変化率を示したものである。この図から微粉砕セメント(FG7)の置換率が増えることで長さ変化率が増加する傾向を示し普通セメント(N)および早強セメント(H)より大きな長さ変化率となった。この理由は微粉砕セメント(FG7)は比表面積が 7,000 水準であることから置換率が高くなるについてその影響が出てきた結果、長さ変化に影響がでたと考えられる。

図 5.3.44 は、微粉砕セメント(FG10)を置換した供試体の長さ変化率を示したものである。この図から微粉砕セメント(FG10)は FG7 同様に置換率が増えることで比例して長さ変化が増加する傾向を示した。そして、普通セメント(N)および早強セメント(H)より大きな長さ変化率を示した。この理由も同じで、微粉砕セメント(FG19)は比表面積が大きいことで影響も大きくなったと考えられる。

以上結果から、微粉砕セメント置換による長さ変化率は、比表面積が大きくなる毎におよび置換率が高くなる毎に長さ変化率が大きくなる傾向にある。これらの原因は、微粉砕セメント表面積が相対的に増えることでセメント水和反応が促進され硬化収縮したのと考えられる。

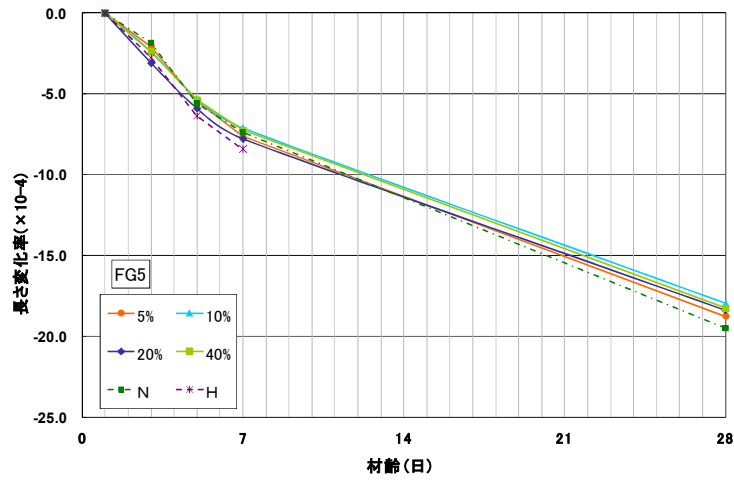


図 5.3.42 微粉碎セメント(FG5)置換による長さ変化

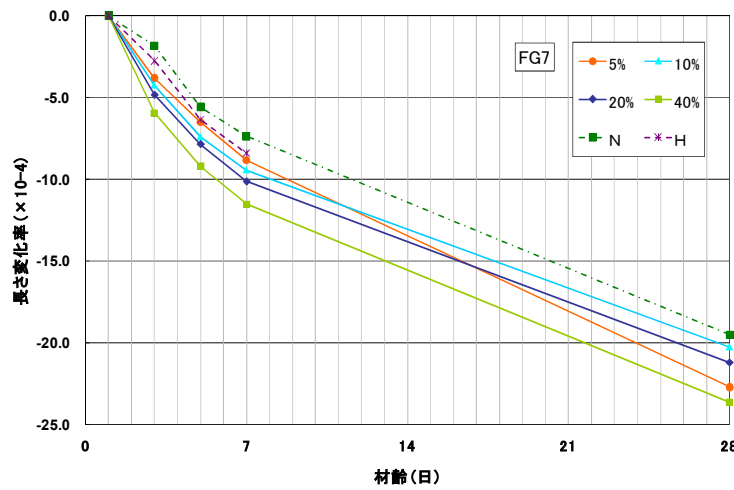


図 5.3.43 微粉碎セメント(FG7)置換による長さ変化

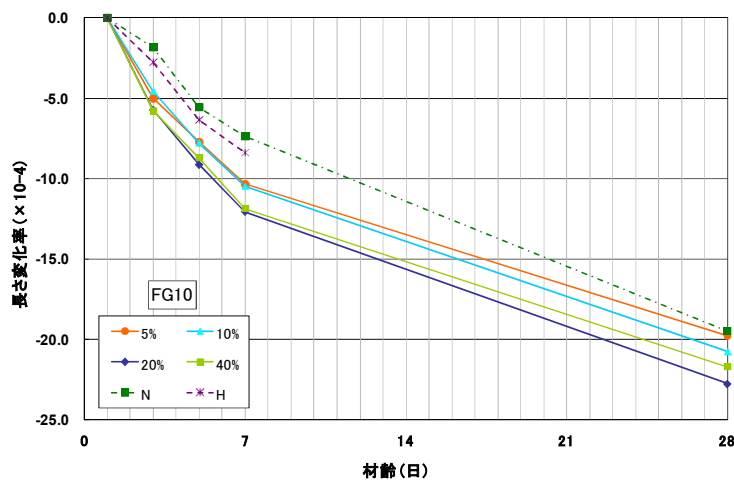


図 5.3.44 微粉碎セメント(FG10)置換による長さ変化

(c)水分逸散特性

微粉碎セメントの水分逸散特性を把握するために実験を行った。供試体に用いた配合と材料諸元は表 5.3.16、5.3.17 に示すとおり圧縮強度特性試験と同じである。水分逸散量の計測は、長さ変化を計測する供試体を用いて各材齢毎に行った。

図 5.3.45 は、微粉碎セメント(FG5)を置換した場合の供試体の水分逸散量を示したものである。この図から置換量の違いにより水分逸散量が大きく異なっていることが分かる。そして置換率が高いほど水分の逸散が少なく、置換率 5% の場合は普通セメント(N)と同等であった。なお普通セメント(N)および早強セメント(H)の水分逸散は、微粉セメント(FG5)置換よりも大きいことが分かる。

図 5.3.46 は、微粉碎セメント(FG7)を置換した場合の供試体の水分逸散量を示したものである。この図から置換量が異なっても水分逸散量はほとんど同じ量であることが分かる。なお、材齢 5 日までは普通セメント(N)と同等の逸散量を示しているが 5 日以降は普通セメント(N)の方が大きな逸散量を示している。

図 5.3.47 は、微粉碎セメント(FG10)を置換した場合の供試体の水分逸散量を示したものである。この図から置換量 20%以下では水分逸散量はほとんど同じ量を示しているが置換率 40%の場合は逸散量が少ないのが分かる。なお、材齢 5 日までは普通セメント(N)と同等の逸散量を示しているが 5 日以降は普通セメント(N)の方が大きな逸散量を示している。

以上結果から、微粉碎セメント置換による水分逸散量は、比表面積および置換率が高くなると水分逸散量が少なくなっている。この原因は、セメントの比表面積が相対的に増加するに伴いセメント粒子に吸着（保水）する水分量が増加したためと考えられる。

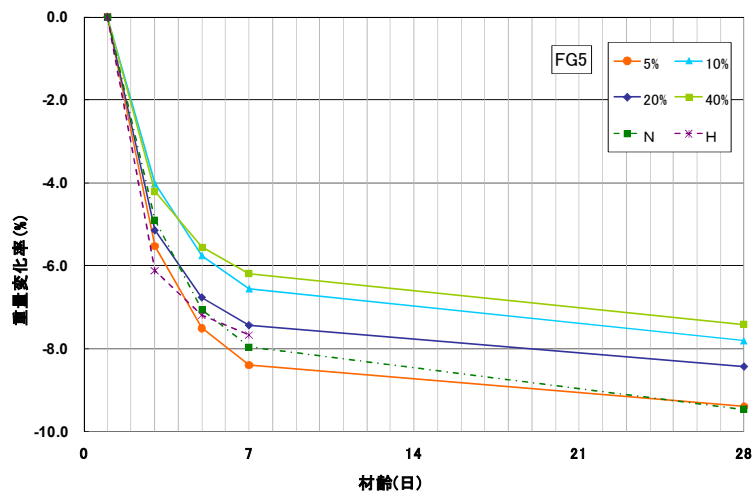


図 5.3.45 微粉碎セメント(FG5)置換によるペーストの水分逸散特性

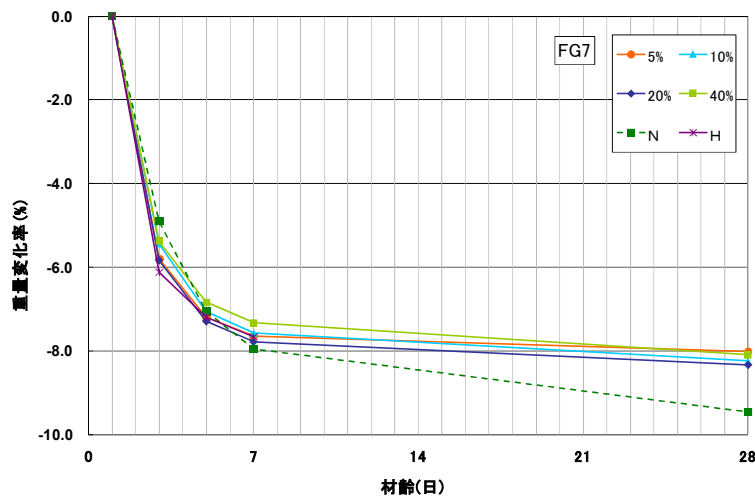


図 5.3.46 微粉碎セメント(FG7)置換によるペーストの水分逸散特性

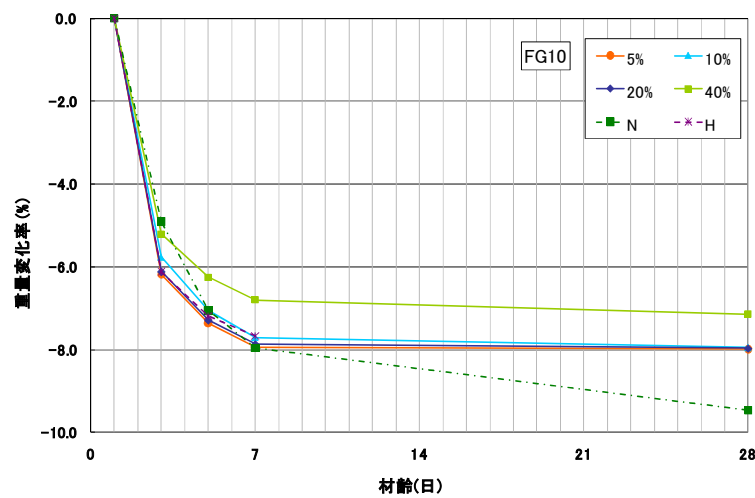


図 5.3.47 微粉碎セメント(FG10)置換によるペーストの水分逸散特性

(d)断熱特性

微粉碎セメントは、比表面積が大きいいため水と接触と同時に水和反応が進行する。そして、短時間に水和反応が終結するために、セメントペーストの場合、空隙が多い多孔質な硬化体が形成される。多孔質のセメント硬化体で代表的なものはALC版であり、アルミ粉を混和することで急激な水和反応を強制的に発生させ硬化させるもので、熱伝導率が低いために断熱性に優れており断熱材として使用されている。今回開発した微粉碎セメントも同様な硬化性状を生じることから、断熱特性を計測した。表 5.3.20 に配合を示す。熱伝導率は、ASTM E1530 保護熱流計法にて測定した。試料はΦ50x100mm シリンダー (図 5.3.48) を作製し、乾式カッターで所定の厚さに成形した。

図 5.3.49 は、密度と熱伝導率を示したものである。一般にグラスウール等は繊維間に空間を形成するため熱伝導率が小さいとされ建築物の断熱材などに利用されている。一方、鋼板は熱伝導率が建設材料の中でも高く、モルタルやコンクリートはこれらの中間的な位置づけにある。微粉碎セメントの熱伝導率は、モルタル・コンクリートに比べ 1/10 程度であり石こうボードや ALC 版と同等の性能であることがわかった。

表 5.3.20 断熱供試体の配合

セメント	W/C (%)	W (g)	C (g)	試料厚さ (mm)	圧縮強度(N/mm ²)	
					14 日	28 日
微粉碎セメント (FG10)	80	800	1000	3,10,30	13.2	14.73
	120	1200			7.8	4.59
	160	1600			3.11	3.11
	200	2000			1.53	1.02



図 5.3.48 熱伝導率計測用供試体

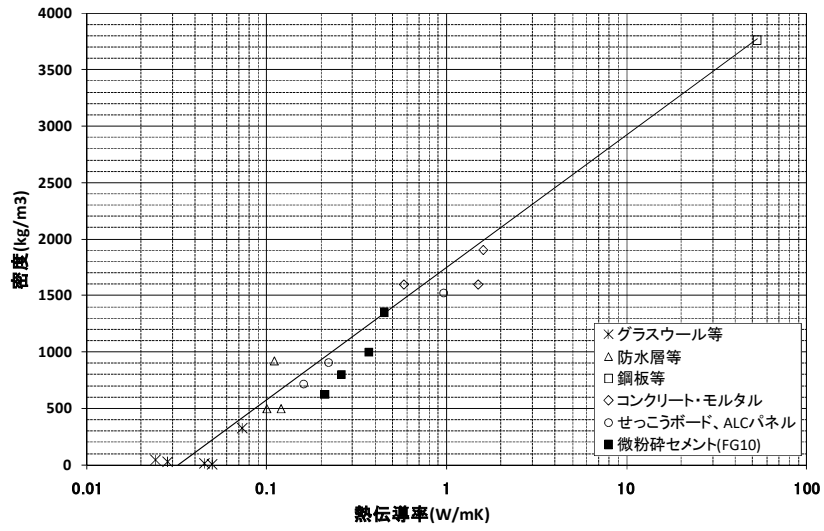


図 5.3.49 熱伝導率と密度の関係

(e) 微粉砕セメントの力学特性のまとめ

微粉砕セメントの力学特性に関する結果を表 5.3.21 にまとめる。

表 5.3.21 力学特性のまとめ

項目	力学特性
圧縮強度	<p>□ 普通セメントの場合</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ W/C が大きな場合は、粒子間空隙に水分が充満され、微粉砕セメントによるフィラー効果がなく強度増加は期待できない。 ・ 材齢 1 日強度は、FG5>FG7>FG10 の順序で高い強度を示した。これは普通セメントの空隙率の結果と一致することからフィラー効果によるものと推測される。 ・ 材齢 3 日強度は、置換率 20%以下では、FG10>FG7>FG5 の順序で強度が高いが、置換率 40%では、FG7>FG5>FG10 となる。これは、水和活性効果による影響と考えられる。 <p>□ 早強セメントの場合</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ W/C が大きな場合は、粒子間空隙に水分が充満され、微粉砕セメントによるフィラー効果がなく強度増加は期待できない。 ・ W/C が 50%前後の場合、微粉砕セメント置換率 5～20%領域において圧縮強度のピークを生じるが、それ以上の置換率では強度が低下する。 ・ 強度ピークは W/C が小さくなるほど置換率が小さな領域で生じる。 <p>□ フライアッシュセメントの場合</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ フライアッシュの置換分の強度低下が生じるが、微粉砕セメントの置換でも強度発現はほとんど生じない。これはすでにフライアッシュによるフィラー効果が存在するため、微粉砕セメントの少量置換では効果がないことを示唆するものである
長さ変化	比表面積が大きく置換率が大いほど、長さ変化が大きい。
水分逸散	比表面積が大きく置換率が大いほど、水分逸散が小さい。
熱伝導率	W/C が大きくなるほど熱伝導率が小さくなり、一般モルタル・コンクリートの約 1/10 である。

(3) 化学特性

(a) 化学組成

微粉砕セメントの化学組成を把握するために JISR5204「セメントの蛍光 X 線分析方法」及びセメント協会標準試験方法により分析した。微粉砕セメントは、比表面積 10,000cm²/g 水準に微粉砕したセメント(FG10) と微粉砕セメント(FG10)の内、3 μm 以下を分級したセメント(FG10E)について分析した。これらの結果を表 5.3.22 に示す。この表から普通ポルトランドセメントを比表面積 10,000cm²/g 水準に微粉砕した微粉砕セメント FG10 は、普通ポルトランドセメントと大きな化学組成の変化がないことが確認できる。なお、ig.loss が若干増えているが、これは CaO が減少していることから粉砕過程で炭酸化したことで増えたと判断される。また、微粉砕セメントの内、3 μm 以下を分級した微粉砕セメント FG10E の場合は、SO₃が増えているが、これは鉱物として相対的に柔らかいため他の鉱物より小さく粉砕されたために生じた現象と考えられる。これらの結果から普通ポルトランドセメントを本手法により粉砕した場合、JISR5204 による化学組成は大きく変化しないことが確認され同等と見なすことが出来ると考えられる。

表 5.3.22 ポルトランドセメント及び微粉砕セメントの化学組成

	ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	f-CaO
普通ポルトランドセメント	0.95	21.11	5.37	2.77	64.70	1.62	1.94	0.28	0.42	0.24	0.20	0.08	1.0
微粉砕セメント(FG10)	2.56	20.76	5.26	2.72	63.71	1.60	1.93	0.30	0.42	0.24	0.20	0.08	—
微粉砕セメント(FG10E)(3 μm以下)	4.85	19.59	4.86	2.46	61.71	1.50	3.37	0.31	0.56	0.24	0.19	0.07	0.6
注1) JIS R5204 セメントの蛍光X線分析方法及びセメント協会標準試験方法による													
注2) JCAS-101 遊離酸化カルシウム(f-CaO)の定量方法のB法による													

(b) 鉱物組成

微粉砕セメントの鉱物組成は、以下に示す3つの手法を用いて算定した。

i) Bogue 式による算定

セメントの鉱物組成を算定する最も一般的なのが R.H.Bogue によって提案された算定式である。Bogue 式によるポテンシャル成分の算定手法は、セメントの化学分析値から近似的に求められるが、基本的に純粋な原材料を用いた混和材のないセメントに適用されるものと考えられるが今回使用した普通ポルトランドセメントは純粋原材料で製造されたものであることから適用を試みた。また微粉砕セメントは比表面積が大きい適用した。それらの結果を表 5.3.23 に示す。普通ポルトランドセメント並びに微粉砕セメントの鉱物組成はほとんど同じ結果が得られた。微粉砕セメント(FG10E)では、石こうが増えているが鉱物が柔らかい石こうが微粉砕され多く含まれたためと考えられるが、ボーグ式の特徴である普通セメントに対する規定鉱物の割合から算定する簡易的な方法で

あることから、いずれの試料も鉱物組成は大きく変化しないと考えることが妥当であると思われる。

表 5.3.23 ボーグ式による鉱物組成分析結果

	C3S	C2S	C3A	C4AF	Gypsum
普通ポルトランドセメント	57.32	17.37	9.55	8.42	3.30
微粉碎セメント(FG10)	56.79	16.76	9.34	8.27	3.28
微粉碎セメント(FG10E)(3 μ m以下)	56.49	13.63	8.72	7.48	5.73
C3S=4.07xCaO-(7.60xSiO2+6.72xAl2O3+1.43xFe2O3+2.85xSO3)					
C2S=2.87xSiO2-0.754xC3S					
C3A=2.65xAl2O3-1.69xFe2O3					
C4AF=3.04xFe2O3					
CaSO4=1.70xSO3					

ii) 粉末 X 線回折による算定

昨今の精密機器の進歩に伴い鉱物組成の算定では、粉末 X 線解析装置による回折チャートも用いたリートベルト解析による方法が汎用的になってきた。粉末 X 線回折/リートベルト解析(TOPAS)を行い鉱物組成解析を行った。X線回折における鉱物の定量化は、内部標準として α -Al₂O₃を10%添加することで定量化した。使用機器はブルカーエイエックスエス社製(D8 Focus)、検出器には一次元半導体検出器(PSD)を用いた。しかし、セメント結晶構造の同定では、非晶質が多く含まれることから各相の結晶系については、決定的な手法ではない。また、セメント粒子の大きさによって解析結果が変化することも報告されているが、参考のために、粉末 X 線回折を試みた。図 5.3.50 及び 5.3.51 は、微粉末セメントの比表面積の違いによる違いを解析したものである。このレベルの粉碎では、基本的な鉱物組成は大きく変わらないことが分かる。

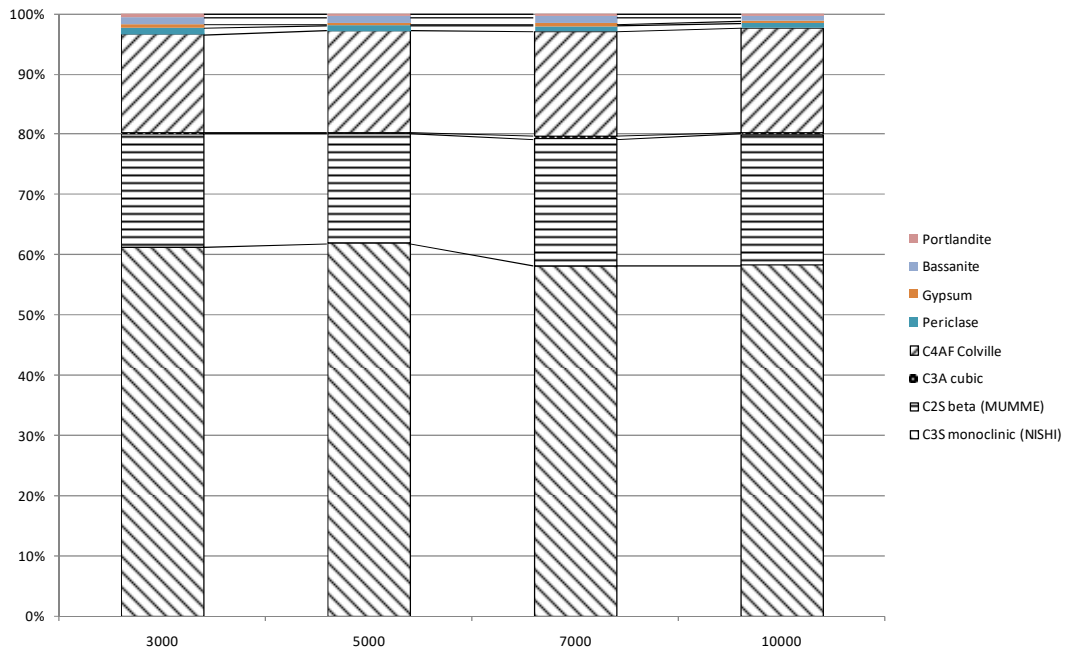
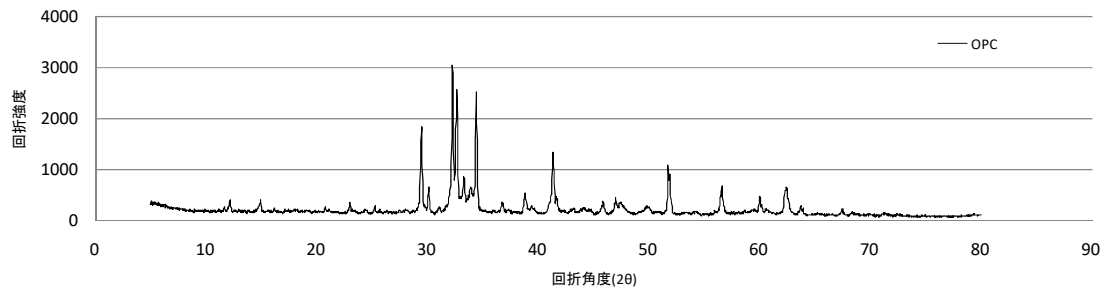
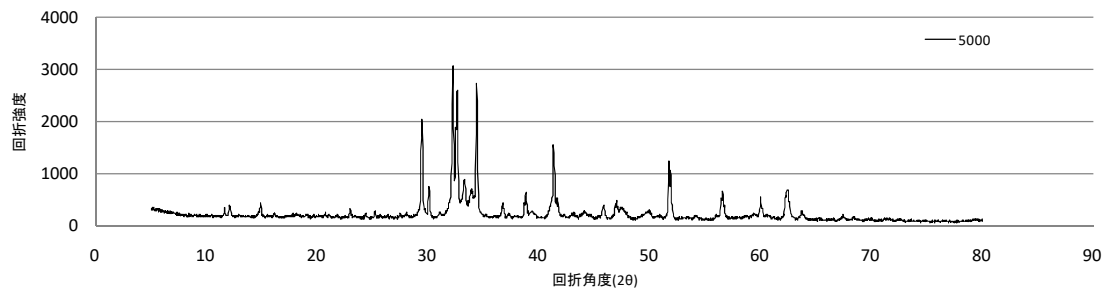


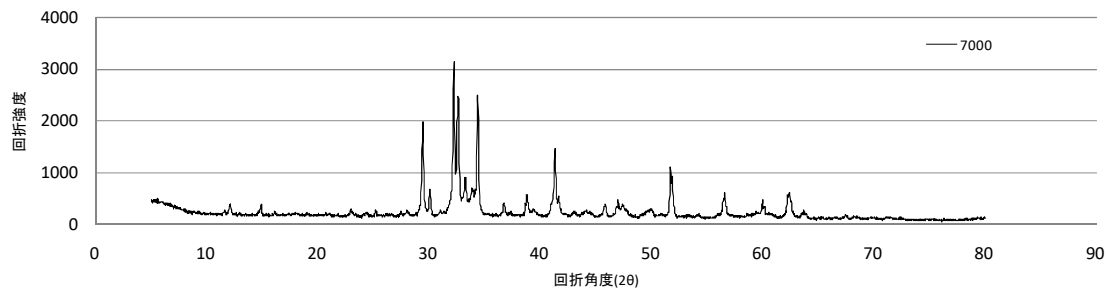
図 5.3.50 粉砕レベルの違いによる鉱物組成



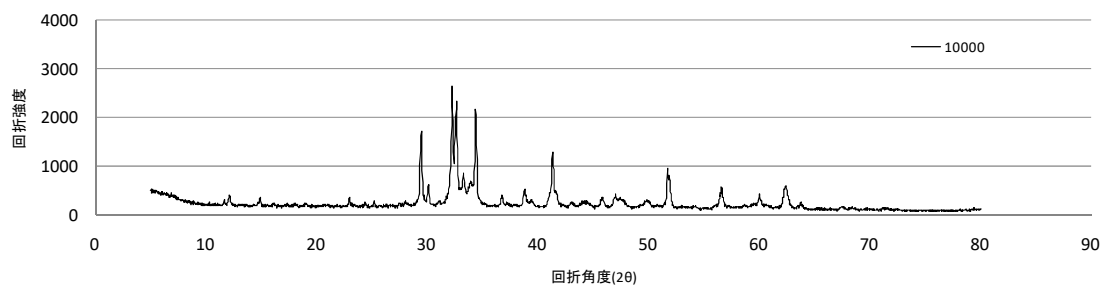
(a)OPC の X 線回折チャート



(b)5,000 水準微粉碎セメント(FG5)の X 線回折チャート



(c)7,000 水準微粉碎セメント(FG7)の X 線回折チャート



(d)10,000 水準微粉碎セメント(FG10)の X 線回折チャート

図 5.3.51 各水準の微粉碎セメントの粉末 X 線回折

iii)粉末中性子回折による算定

セメント結晶構造など非晶質が多く含まれる鉱物では、X線による回折は適用が難しいことが知られている。そこで、ここでは、軽元素に感度が良い粉末中性子回折装置も用いて鉱物組成の算定を試みた。

粉末中性子回折/リートベルト解析(Rientan2000)を行い鉱物組成解析を行った。粉末中性子回折は、(独)日本原子力研究開発機構 JRR-3 の高性能粉末中性子回折装置(HRPD) (図 5.3.56 参照) を用いて行った。なお、粉末中性子回折は予備測定から、

①Bragg 回折ピークが明瞭であったこと、

②バックグラウンドが高い $\text{Intensity}(\text{max})/\text{background} \approx 1.2/1$

(Si の場合、background は、50count 程度)であり含水による水素原子からの非干渉性散乱(散漫散乱)が寄与している。

であったため表 5.3.24 に示す条件を設定し、供試体は図 5.3.52 に示すバナジウム製容器に試料約 6g を充填して行った。

図 5.3.53 は、粉末中性子回折により得られた回折チャートである。これらの回折チャートからリートベルト解析を行った。同定に用いた各相の結晶系と解析結果を表 5.3.27 に示す。なお、中性子回折では得られた観測強度が小さいため各相を単相とみなし解析を実施した。観測強度が小さい理由はバックグラウンドが大きいためと考えられるが、非晶質やセメント粒子への水吸着(湿気)などが影響していると考えられる。なお、他の結晶系の構造パラメータをモデルとして解析を試みたが、発散傾向にあり解析からは除外した。リートベルト解析において、観測強度データと結晶構造パラメータから導き出した計算値との整合性を示す R 因子を表 5.3.25 に示す。今回得られた解析での数値解析上の信頼度を表 5.3.26 に示す。これらより、S 値がほぼ“1”であることから、今回の設定モデルは、精密化が真値に近いと考えられる。

図 5.3.54 は、測定データからバックグラウンド関数(ルシャンドの直交多項式)を用いて観測強度プロファイルからバックグラウンドの Si 成分を抽出したものである。この図から分かるように Si 成分の場合は、低角側に上昇することが分かる。また、バックグラウンドが高いのは、 H_2O による散漫散乱によるものと考えられる。なお、Halo が生じているが、これは均一的な非晶質(ガラスは均一な Middle or Short Rang Order)とは違った、不均一微細結晶が存在することを示唆していると推測される。

一方、粉末 X 線回折により得られた解析チャートを図 5.3.55 に示す。また、リートベルト解析(TOPAS)により得られた結果を表 5.3.27 に示す。この表から同定に用いる各相の結晶系により鉱物組成は異なる結果が得られたが、リートベルト解析では、同定する各相の結晶系が研究機関や研究者でまちまちであるため、比較検討することが出来ないが、微粉砕セメントは普通ポルトランドセ

メントと鉱物組成は同じであると判断し、水和速度は比表面積によるものとして取り扱いを行うこととした。

表 5.3.24 回折装置と測定条件

測定条件	粉末中性子回折	粉末 X 線回折
第一モノクロメータ	12'	-
測定波長	1.8234(A)	1.5406(A)/CuK α
2θ° 範囲	5~150°	5~80°
検出器移動ステップ角	0.05°	0.03° /sec
測定時間	1700min	262sec
ビーム出射口 Cd Slit	15x45mm	-



図 5.3.52 バナジウム製容器と粉末中性子回折試料

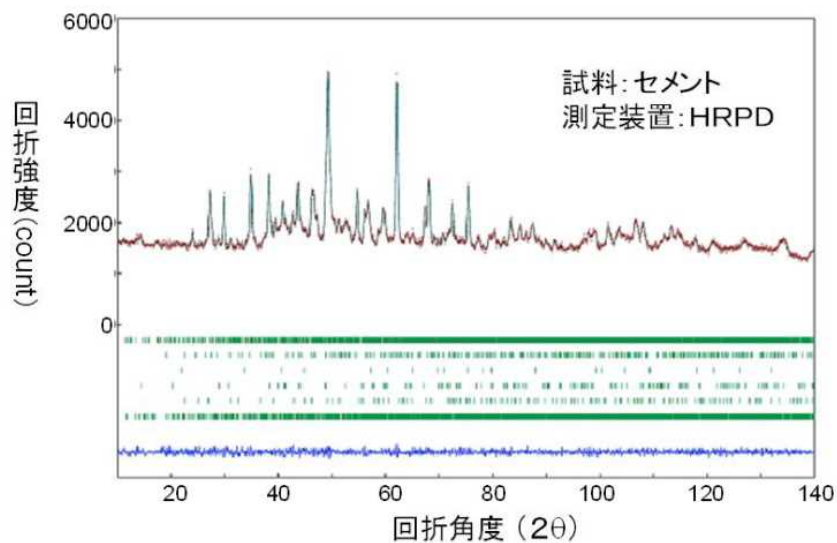


図 5.3.53 微粉碎セメント(FG10)の粉末中性子回折チャート

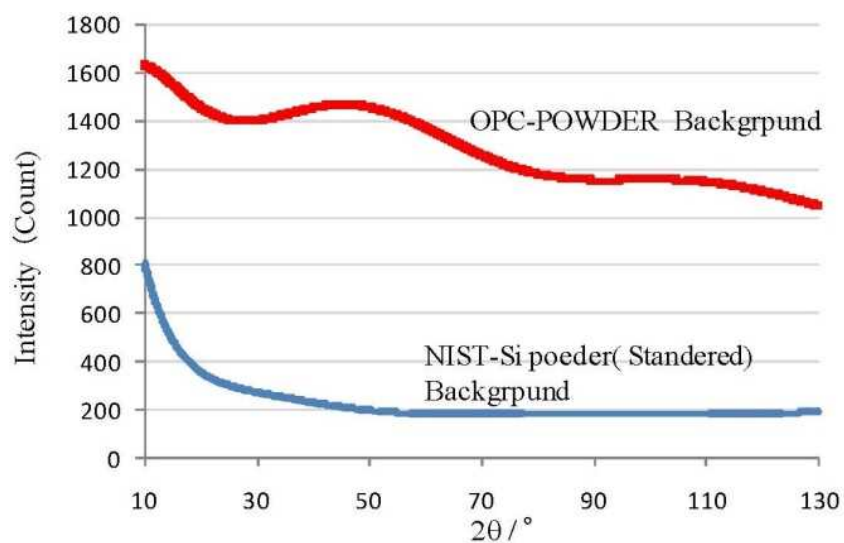


図 5.3.54 Si バックグラウンド成分分析

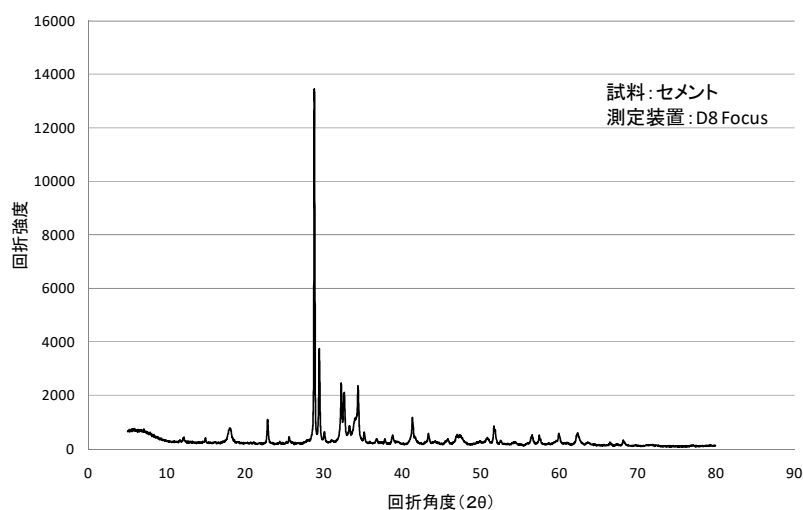


図 5.3.55 微粉碎セメント(FG10)の粉末 X 線回折チャート

表 5.3.25 中性子回折における各相の R-factor

各 Phase	R _I	R _F
C ₃ S	0.96	0.4
C ₂ S	1.02	0.43
C ₄ AF	1.17	0.49
C ₃ A	0.99	0.47
C(OH) ₂	0.75	0.38
CaCO ₃	1.38	0.56

表 5.3.26 微粉碎セメント(FG10)の中性子回折における R-factor

信頼性指標	Rwp	Re	S
値	2.47	2.37	1.041

注) Rwp:バックグラウンド情報やプロファイル関数、結晶構造パラメータ全てを考慮した信頼性指標、Re:構造パラメータから導出した計算強度と実測 Bragg 回折強度との整合性を評価する信頼性指標、S:Rwp/Re で、S=1 の時、精密化が完璧であることを示す。

表 5.3.27 リートベルト解析結果と同定に用いた各相の結晶系

装置	試料	リートベルト解析結果				結晶系			
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
中性子回折	No.2	79.20	10.40	7.31	2.50	Triclinic	Monoclinic	Monoclinic	Orthorhombic
X線回折	No.1	68.03	15.40	4.48	12.09	Triclinic	Monoclinic	cubic + Orthorhombic	Orthorhombic
		42.74	36.20	4.77	16.30	Monoclinic			
	No.2	76.58	11.69	3.34	8.39	Triclinic			
		51.01	31.01	4.14	13.84	Monoclinic			

注) No.1 は、微粉碎セメント(FG10/C)の分析結果。No.2 は、FG10/Cに CaO を 10%添加したもの

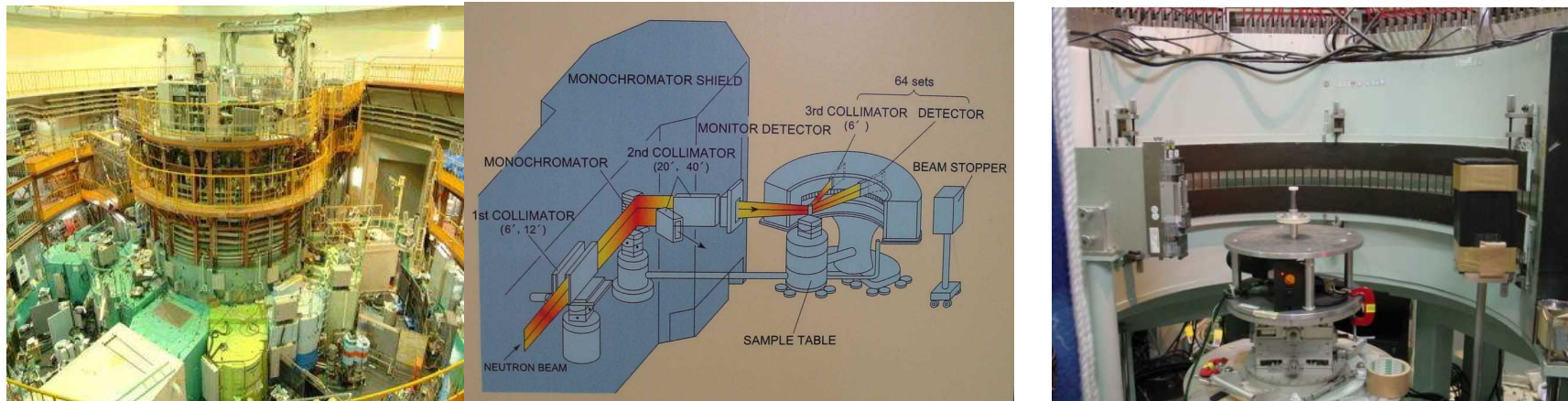


図 5.3.56 日本原子力研究開発機構 JRR-3 にある粉末中性子回折装置

(c)水和発熱速度特性

普通ポルトランドセメント及び微粉砕セメントを置換した場合の水和発熱速度特性を調べるために、(株)東京理工製マルチマイクロカロリメーターを用いて水和発熱速度を測定した。微粉砕セメントは比表面積が大きいいため非常に発熱量が高く、また吸水性がかなり激しいため微粉砕セメント 1.000g に対し純水を W/C=1.5 の条件で加えることにより測定を行った。表 5.3.28 に測定試料の諸元を示す。

図 5.3.57 は比表面積 5,000 水準の微粉砕セメント(FG5)を置換した場合の水和発熱速度である。微粉砕セメント置換率が 3、5%と少ない場合は、普通セメント(OPC)より若干発熱があるものの水和発熱速度は大きく変化しない。なお、100%置換つまり微粉砕セメント(FG5)単独の場合は、2次ピークで大きく発熱しさらにピーク発生時間も遅れる傾向にある。

図 5.3.58 は比表面積 7,000 水準の微粉砕セメント(FG7)を置換した場合の水和発熱速度である。FG5 同様に微粉砕セメント置換率が 3、5%と少ない場合は普通セメント(OPC)より若干発熱があるものの水和発熱速度は大きく変化しない。したがって、水和発熱速度曲線は FG5 の場合とほぼ同じである。

図 5.3.58 は比表面積 10,000 水準の微粉砕セメント(FG10)を置換した場合の水和発熱速度である。FG5 および FG7 同様に微粉砕セメント置換率が 3、5%と少ないは普通セメント(OPC)より若干発熱があるものの水和発熱速度は大きく変化しない。なお、100%置換つまり微粉砕セメント(FG10)単独の場合は、2次ピークで大きく発熱しさらにピーク発生時間も大幅に遅れる傾向にある。

これらの結果から、水和発熱速度は、置換する微粉砕セメントの比表面積と置換率により大きく影響を受けることがわかった。

表 5.3.28 コンダクションカロリメーターで測定した試料の配合条件

ベースセメント	微粉砕セメント		W/C (%)	備考
	種類	置換率(%)		
普通ポルトランドセメント(OPC)	—	0	150	住友大阪セメント社製
	微粉砕セメント(FG5)	3,5,100		比表面積=5,484(cm ² /g)
	微粉砕セメント(FG7)	3,5,100		比表面積=7,676(cm ² /g)
	微粉砕セメント(FG10)	3,5,100		比表面積=10,459(cm ² /g)

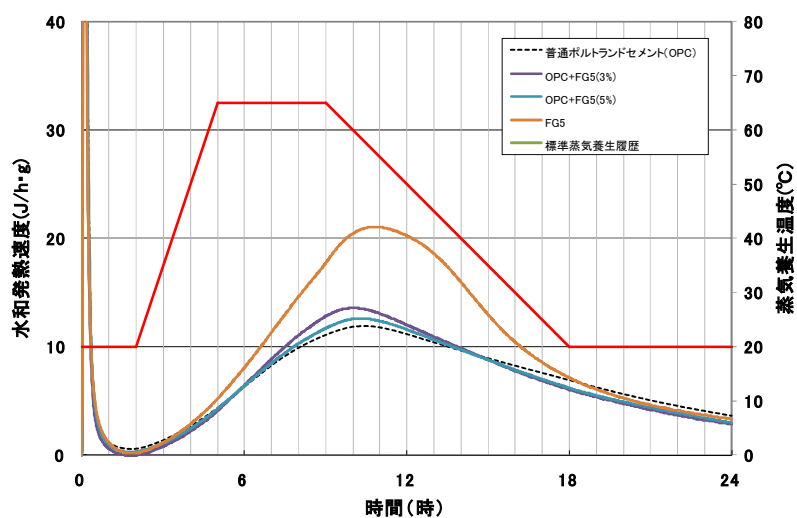


図 5.3.57 微粉碎セメント(FG5)置換による水和発熱速度

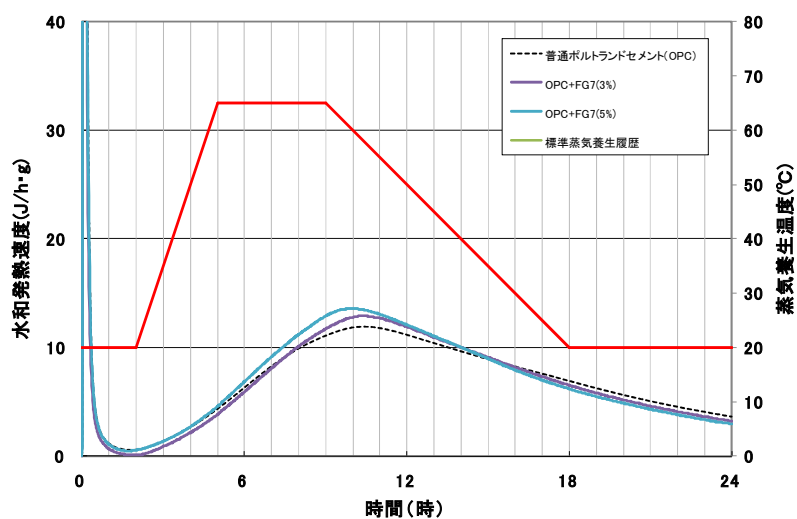


図 5.3.58 微粉碎セメント(FG7)置換による水和発熱速度

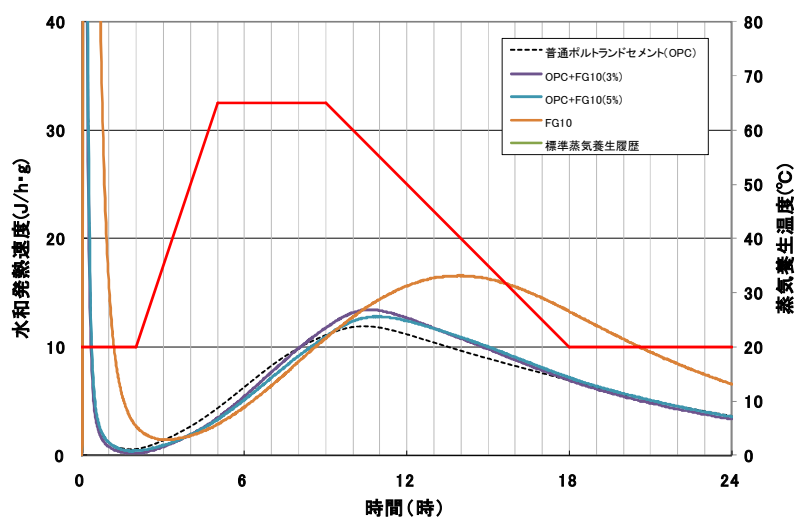


図 5.3.59 微粉碎セメント(FG10)置換による水和発熱速度

また、図 5.3.60 は、微粉碎セメント 10,000 水準(FG10)と $3\mu\text{m}$ 以下を分級した FG10E の水和発熱速度である。FG10E は、表 5.3.22 に化学組成を示すように SO_3 が若干多く存在するためエトリンガイトが生成し発熱が大きくなったと考えられる。

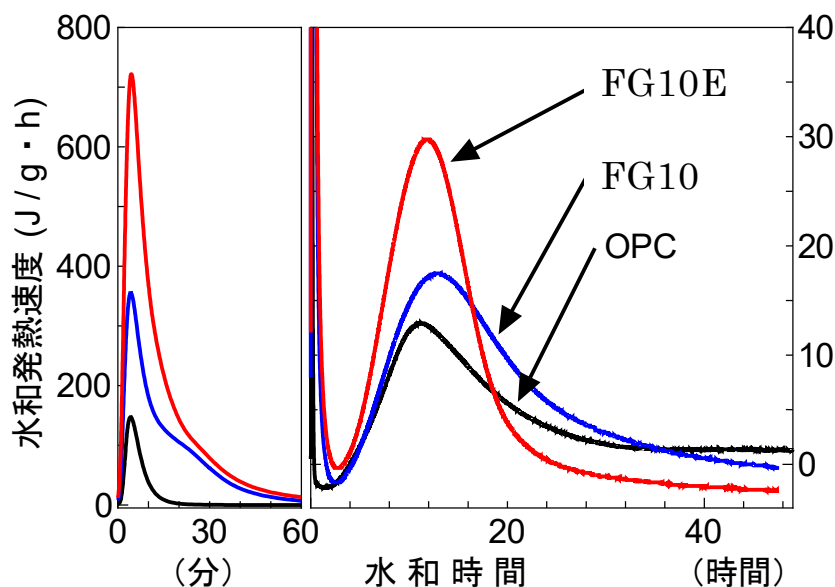


図 5.3.60 微粉碎セメントの水和発熱特性

(d)凝結時間

プレキャストコンクリートの蒸気養生開始時間は、セメントの凝結始発開始以降に行うことが決められているため、普通ポルトランドセメント使用の場合は、練混ぜ後2～3時間の前置時間を設定し蒸気負荷を行っている[5.12]。今回製造した微粉碎セメントは比表面積が大きいため普通ポルトランドセメントに置換した場合についてどのように凝結時間が変化するか検討した。試験は、JISR5201「セメントの物理試験方法」に沿って行った。

表 5.3.29 は、凝結時間の計測結果である。これらの結果から微粉碎セメント(FG5)混和の場合は、普通ポルトランドセメントに対して、始発、終結時間共に若干の遅延はあるものの変化がない結果が得られた。一方、微粉碎セメント(FG10)の場合は置換率が上がると始発開始時間の遅れがあり、置換率5%以上では大きく遅延していることが分かる。また、始発から終結までの凝結継続時間はFG10を5%以上置換した場合は長く凝結が継続していることが分かった。これらの結果から、普通ポルトランドセメントへの微粉碎セメントの置換は、比表面積が普通セメントより若干大きな微粉碎セメント(FG5)の場合は、10%程度の置換でも凝結時間は変化しないが、比表面積の大きな微粉碎セメント(FG10)では、5%以上の多量置換では大きな凝結時間の遅れが生じることがわかった。

表 5.3.29 微粉碎セメントペースト混和の凝結時間

ベースセメント	微粉碎セメント		凝結時間		終結 - 始発 (h:min)
	種類	置換率(%)	始発(h:min)	終結(h:min)	
普通ポルトランドセメント	—	—	2.29	3.40	1.11
	FG5	1	2.30	3.38	1.08
		5	2.34	3.43	1.09
		10	2.32	3.46	1.14
	FG10	1	2.31	3.43	1.12
		5	2.54	4.32	1.38
		10	3.02	5.12	2.10
(参考) 早強	—	—	1-55	2-55	—

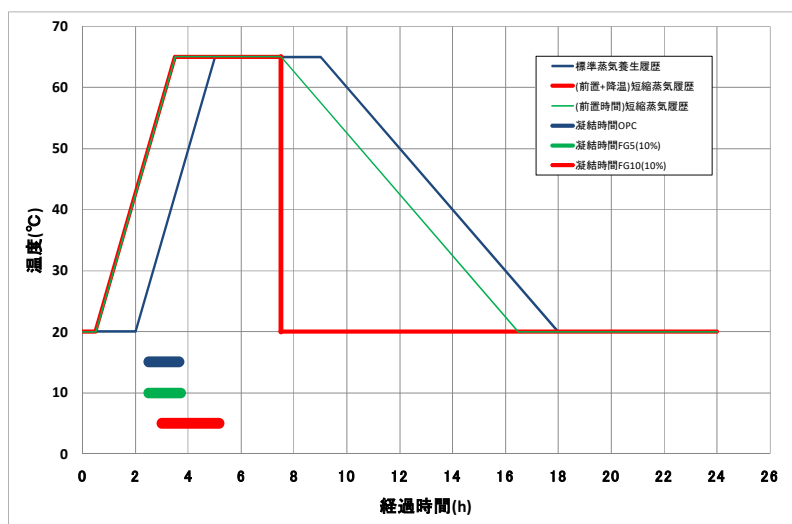


図 5.3.61 蒸気養生履歴とセメント凝結時間

(e)ケイ酸アニオン（陰）イオンの鎖長分布

微粉碎セメントを置換したセメント硬化体の水和生成物の特徴をトリメチルシリル誘導体化(以下「TMS」という。)法を用いてケイ酸アニオンイオンの鎖長分布を計測することで確認した。一般には粉末 X 線回折等を用いることが多いが、混和材料を混和した場合は極めて結晶性が悪く、非晶質の水和物が生成することもあって粉末 X 線回折等では解析が困難であることから本手法を選択した。なお、水和性能の判断は、微粉碎セメント水和物と一般セメントである普通ポルトランドセメント水和物のケイ酸構造（シリケートアニオンの鎖長分布）を相対比較することで判断した。

試験は、各試料を W/C=20(=5g/100mL) (%)にて分散・攪拌することにより粉末のまま水和反応させた。水和後の試料は吸引濾過にて回収の後、メタノール

及びアセトンにより脱水・乾燥（水和停止）し、所定の材令で TMS 法を用いたケイ酸アニオンイオンの鎖長分布を計測した検討した。試験材令は、3、7、14、28、56 日とした。

図5.3.62は、普通ポルトランドセメント(OPC)及び微粉砕セメント(FG10/C)の水和試料に対してTMS 法によりケイ酸陰イオン骨格の鎖長分布を測定した結果である。一般的にはセメントは、未水和時はほぼ単量体(*monomer* ; 図中の○△)で構成され、水和の進行と共に重合し二量体(*dimer* ; 図中の●▲)等の長鎖長成分が増える傾向にあり、微粉化によりケイ酸アニオンイオンの重合速度があがることが知られている。今回の試験では普通ポルトランドセメント(OPC)は、水和進行とともに重合速度が上がり材齢28日以降に単量体と二量体の比率が逆転しているのに対して、微粉砕セメント(FG10/C)は材齢7日以降にすでに逆転しており、大幅に反応速度が上がっていることがわかる。なお、FG10/Cは、材齢28日及び91日の鎖長分布が一定でありことから反応はほぼ飽和に達したと判断される。同様な現象が、露木、小泉[5.13]の研究で明らかにされており、アルカリで刺激した高炉水砕スラグ微粉末(BFS)の水和における比表面積の違いでも生じ、比表面積が大きいほど反応速度が速くなる傾向が確認されている。ただし、BFS 微粉末の場合は比表面積が大きいケースであっても、水和時間が90 日を超えてもさらに高鎖長化する傾向にあり、長期の性状についてはBFS 微粉末とFG10/Cでは異なる性質を示すことが考えられる。また、微粒成分を優勢に集めたFG10E/C についても同様の測定を行い比較したが、ケイ酸アニオンイオンの鎖長分布はOPCよりも遅い反応を示した。これは表5.3.22に示す化学組成にあるようにSO₃が多くなっているため若材令時でアルミネート相の反応が卓越しケイ酸の反応が遅延したためセメント水和におけるシリケート鎖の重合を抑制したためと考えられる。

表 5.3.30 TMS 試料の諸元

試料	諸元	W/C(%)
普通ポルトランドセメント(OPC)	比表面積=3,440(cm ² /g)	20
微粉砕セメント(FG10/C)	比表面積=10,459(cm ² /g)	
微粉砕セメント(FG10E/C)		

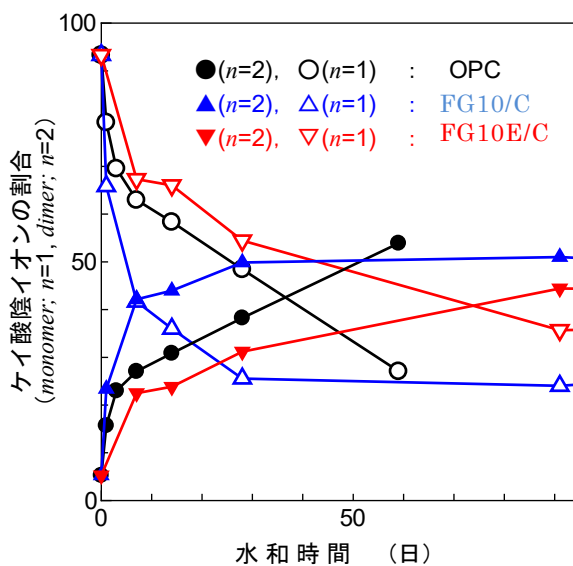


図 5.3.62 TMS法による鎖長分布

(f)カルシウム溶脱性能

セメント粒子の比表面積は、大きくなると水との接触面が増えるため、Caの溶出が早くなる。液相中におけるCa溶出は、化学平衡により約1.2g/L (CaO換算)が飽和して最大と言われている。この飽和によりCa溶出は止まり水和反応も停滞または停止すると考えられている。

微粉末セメントは、比表面積が大きいため水和反応が早期に生じることを利用して若材令時強度を向上されることができ。しかし、化学平衡により一定水量に溶出できるCa量は規定されているので、比表面積を大きくすることが必ずしも水和を早めることにはならない可能性がある。そこで、微粉砕セメントのCa溶出量を計測して確認した。

実験は、イオン交換水100ccに粉体2gを密封容器に入れて水分散50倍希釈を行い1分間混ぜる。その後、ろ紙(5C)を用いてロートによりろ過し、ろ過した液体を希塩酸を混ぜ固定化させて、ICP (Inductively coupled plasma) 発光分光分析法により水酸化カルシウム濃度を計測した。

表 5.3.31 は、Ca溶出濃度の一覧である。比表面積が大きく異なってもCaイオン濃度はほとんど変化ない結果が得られた。

表 5.3.31 カルシウムイオン濃度

セメント種	ベースセメント	比表面積 (cm ² /g)	Ca イオン濃度 (mg/L)	
			経過時間 (min)	飽和値
			10	
普通ポルトランドセメント	住友大阪セメント社純正製	3,440	304	864
	北京セメント社製	4,559	268	
微粉砕セメント (FG5)	住友大阪セメント社純正製	5,484	384	
微粉砕セメント (FG7)		7,676	356	
微粉砕セメント (FG10)		10,359	332	
微粉砕セメント (FG10C)	北京セメント社製	10,459	364	

(g)微粉砕セメントの化学特性についてのまとめ

微粉砕セメントの化学特性に関する結果を表 5.3.32 にまとめる。

表 5.3.32 化学特性のまとめ

項目	化学特性
化学組成	普通セメントを微粉砕しても化学組成は大きく変化しないが、ベースセメントの原材料の種類により若干変化する傾向がある。
鉱物組成	普通セメントと微粉砕セメントは、ボーグ式及びリートベルト解析により鉱物組成はほぼ同じと判断される
水和発熱速度	ベースセメントや比表面積と置換率の違いにより大きく変化する
凝結時間	比表面積が大きな 10,000 ブレーンでは置換率が 5% を超えると大きく遅延する傾向にある。なお 5,000 ブレーンでは 10% 置換でも遅延はない
Si 鎖長分布	微粉砕セメントは、若材齢時に重合が進展するが、材齢 28 日程度で水和が終了する
カルシウム溶脱	比表面積の違いにより 10 分時 Ca 溶脱量に違いは出なかった

5.3.5 基本性状のまとめ

微粉砕セメント型速硬性混和材について各種試験を行った結果、以下の知見を得た。

(1) 材料特性に関するまとめ

- ・普通ポルトランドセメントを粉砕して製造した場合、粒径が小さくなるにつれて比表面積も大きくなるが、純粋原材料によるセメントを用いた場合、化学組成および鉱物組成は変化しない。

(2) 物理特性に関するまとめ

- ・普通ポルトランドセメントに微粉砕セメントを置換することで、最密充填でできることがわかった。充填度は粉体の比表面積と置換率により変化し、比表面積 5,000(FG5)及び 10,000(FG10)微粉砕セメントの場合、置換率 10%前後で最密であることがわかった。

(3) 力学特性に関するまとめ

- ・普通セメントに微粉砕セメントを置換することで、フィラー効果と水和活性効果の2つの効果で強度増加が見込めることがわかった。
- ・微粉砕セメントの強度増加は、材齢 1 日までは主にフィラー効果、それ以降は水和活性効果として算定することができる。
- ・W/C が大きくなるとセメント粒子間に水が入り込み、微粉砕セメントによる最密充填効果が期待できなくなる。
- ・微粉砕セメント置換によるペーストの圧縮強度特性は、比表面積の大きさと置換率により異なるが、材齢 1 日では比表面積 5,000(FG5)微粉末セメントが強度増加は大きい。材齢が進むにつれて、比表面積 7,000(FG7)または 10,000(FG10)微粉末セメントの置換が卓越する。
- ・微粉砕セメントの長さ変化率は、比表面積が大きく置換率が高いと収縮が大きくなる傾向である
- ・微粉砕セメントの水分逸散は、比表面積が大きく置換率が高いと水吸着して水分逸散が小さくなる傾向である。

(4) 化学特性に関するまとめ

- ・微粉砕セメントは純粋原材料によるセメントを用いた場合、化学組成や鉱物組成が普通セメントと同じと考えても差し支えない。
- ・微粉砕セメントの水和発熱速度は、比表面積と置換率により変わるが、5%置換程度ではほとんど変化がない。
- ・微粉砕セメント(FG10)は、5%以上置換すると凝結遅延が大きくなる。
- ・微粉砕セメントは比表面積が大きくなると若材令時に重合が進展するが材齢 28 日ではほぼ水和は終了している。

以上のことから、本製造システムによる微粉碎セメントを使用することで強度向上が得られ、セメントの水和を阻害するものではないことがわかった。

5.4 まとめ

速硬性混和材は、比表面積が大きくなることで水和反応を助長する効果に加え、他のセメント等粉体との最密粒度分布を考慮することによりフィラー効果が期待出来ることが分かった。以上のことから、使用する粉体及び骨材による配合を決定した後に、より初期強度を向上させるために、最密粒度分布を考慮した速硬性混和材を適切に添加することで、水和反応による強度とフィラー効果による強度増加を得られることになる。特に、材齢1日強度は、フィラー効果による強度増加が卓越することも分かった。なお、比表面積が大きな微粉末は、一方で、Ca飽和等により水和反応を阻害する要因も同時に持ち合わせていることから、これらを考慮した適切な添加量の選定が必要であることから、速硬性混和材の最敵配合に関して、比表面積と添加率の関係を見だし、脱型時強度増に寄与する配合の設定法を示した。

これらの成果により、プレキャストコンクリートの速硬性混和材による製造効率化を実現した。

【5章 参考文献】

- 5.1 たとえば、住友大阪セメント社「ジェットセメント」、小野田ケミコ社「スーパージェットセメント」、カタログ
- 5.2 入江正明他：特願 2006-142268「セメント微粉末およびそれを利用するプレキャストコンクリート用組成物」
- 5.3 村橋均次郎：セメント規格と最近のセメント品質、セメント・コンクリート、No.320、Oct.1973、pp35-43
- 5.4 土木学会コンクリート委員会：混和材料を使用したコンクリートの物性変化と耐久性評価小委員会(333)報告書、コンクリート技術シリーズ 74、平成 19 年 3 月
- 5.5 土木学会コンクリート委員会：混和材料を使用したコンクリートの物性変化と耐久性評価小委員会(333)報告書 No.2、コンクリート技術シリーズ 89、平成 22 年 5 月 24 日
- 5.6 セメント協会：セメントの常識
- 5.7 日本規格協会：JIS R5211-2009「普通ポルトランドセメント」
- 5.8 内川浩：わが国におけるセメント／コンクリートの将来、小野田研究報告、第 42 巻(1990)第 122 号、pp33
- 5.9 Fuller, W.B., and Thompson, J.E., : The Laws of Proportioning Concrete,

ASCE Transactions, Vol. LIX, pp. 67-172, 1926

- 5.10 Feret, R., : Sur la Compactite des Mortiers Hydrauliques., Soc d'Ind. Natl, 1892-1897, Le Genie Civil, 1936
- 5.11 特願2009-102398「ケイ酸ナトリウム水溶液の脱アルカリケイ酸水溶液の製造方法、及び製造装置」、出願者 (有)日本素材工学研究所他、発明者 露木尚光、三浦鉄朗、出願日 平成21年3月30日
- 5.12 たとえば、日本規格協会 : JISA5303-1956「遠心力鉄筋コンクリート管 4.3 養生 4.3.2(2)」
- 5.13 小泉公志郎、露木尚光 : 高炉水砕スラグ微粉末のケイ酸構造に及ぼす炭酸化の影響、セメント・コンクリート論文集、No.56、pp.58-63 (2002)

第6章 フライアッシュ混和型プレキャストコンクリートの 蒸気養生履歴の最適化による製造効率化

6.1 はじめに

プレキャストコンクリート製造工程は、図 4.6.2 で示したように蒸気養生履歴を負荷させる時間が全体の9割を占めており、この蒸気養生履歴の短縮が直接的に製造効率化に繋がる。しかし、前章までに示したように、昭和 25(1950)年に JISA5303 鉄筋コンクリート管[6.1]等が制定され蒸気養生履歴の規定が仕様規定化され、仕様を守ることで品質を確保してきた。その後、JIS 製品は昭和 54(1979)年改正まで仕様規定が続き自主規定化された。一方、土木学会において昭和 44(1969)年に鉄筋コンクリート工場製品設計施工指針(案)が JIS 製品を引用する形で制定された。この指針(案)は、昭和 49(1974)年制定の土木学会コンクリート標準仕様書(昭和 49 年制定)に工場製品として条文が移行し廃止された。その後、土木学会コンクリート標準示方書は限界状態設計法や性能規定化を導入したにも関わらず、コンクリート工場製品に関してはコンクリート標準示方書【施工編】に改訂されずに現状に至っており、解説に仕様規定が明示されていることから、仕様を採用することが定着している。

本章は、フライアッシュ混和型プレキャストコンクリートにおける製造効率化を実現するために、前置時間、昇温速度、最高温度及び最高温度継続時間、降温速度の各蒸気養生項目に着目して出荷時強度発現を得ることができる最適な蒸気養生パターンを実験的に検討したものである。

6.2 蒸気養生を受けるフライアッシュセメント硬化体の基本特性

蒸気養生履歴による基本特性を確認するために、常温常圧下でモルタルによる実験を行った。なお、蒸気養生履歴はコンクリート標準示方書施工編[6.2]の規定を参考に前置時間や昇温速度、最高温度継続時間、降温速度を変化させた16ケースの履歴により行った。

6.2.1 実験概要

(a) 実験概要

プレキャストコンクリートの製造における蒸気養生は、①前置時間、②昇温速度、③最高温度、④最高温度継続時間、⑤降温速度、⑥後置時間、の5つの温度履歴を負荷させる構成となっている（図 1.1.2 参照）。ここでは、その内の前置時間、昇温速度、最高温度継続時間、降温速度の4つをパラメーターとして変化させた蒸気養生パターンを選定して、モルタル供試体を用いて圧縮強度特性を試験した。なお、③最高温度に関しては、土木学会コンクリート標準示方書[6.2]の規定を踏襲し 65°C¹一定とした。

(b) 使用材料及びモルタル配合

モルタル試験は、普通ポルトランドセメントを基本とし、フライアッシュ混和セメントを用いた場合の影響についても実験を行い比較検討した。水結合材比 $W/(C+FA)$ は 50%一定とし、フライアッシュは重量比 30%内割置換とした。なお、細骨材は骨材種やばらつき等の影響を極力少なくするためにセメント協会の標準砂を用いた。表 6.2.1 に使用材料の諸元、表 6.2.2 にモルタル配合を示す。供試体作成は、JISA1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠し、サミットモールド管による $\phi 50 \times 100 \text{mm}$ モルタル供試体を作製した。供試体の養生は、蒸気養生終了後は試験材齢まで 20°C一定の封緘養生を行った。また、比較検討用として蒸気温度履歴を受けない供試体を作製し打設後試験材齢まで 20°C一定の封緘養生を行った。圧縮試験の試験材齢は、脱型時間を想定した 1 日材齢と出荷時材齢の 14 日材齢、さらに中間の 3、7 日材齢とした。

¹ セメントの熱特性については、セメントの種類により大きく変わることは知られている。特にフライアッシュは、より高い熱特性でも変質がないと言われているが、ここでは、昭和 25 年の JIS 製品制定過程で決められた 65°C を踏襲した。また、ACI の規定でも組成に影響しない最高温度として 65°C が設定されている。

表 6.2.1 使用材料

材料		諸元	備考
セメント	普通ポルトランドセメント	密度=3.16(g/cm ²)、 比表面積=3,260(cm ² /g)	住友大阪セメント社製 (バージン原材料仕様)
混和材	フライアッシュⅡ種	密度=2.21(g/cm ²)、 比表面積=4,030(cm ² /g)	電源開発(株) 磯子火力発電所産
細骨材	セメント強さ試験用標準砂	表乾密度=2.62(g/cm ²)、 吸水率=0.42(%)	(社)セメント協会製 セメント強さ試験用標準砂

表 6.2.2 モルタル配合

記号	セメント種	水セメント比 W/C(%)	水結合材比 W/(C+FA)(%)	単体量(kg/m ³)			
				W	C	FA	S
N	普通ポルトランドセメント	50	50	300	599	0	1348
FA	フライアッシュセメント	71		292	410	175	1316

(c)蒸気養生装置と温度履歴

モルタル供試体に負荷させる蒸気養生履歴は、プレキャストコンクリートの標準的製造に用いられる温度履歴をベースに設定し全 16 パターンとした。表 6.2.3 に蒸気養生履歴パターンの一覧を図 6.2.1 には代表的な養生履歴パターン図を示す。なお、図 6.2.1 中には前置時間の設定の根拠となっている普通ポルトランドセメントの凝結始発終結時間も併せて示した。実験装置は温度履歴、相対湿度を制御できる蒸気養生装置を製作(図 6.2.2 参照)、コンピューター制御により蒸気温度履歴を負荷させた。

表 6.2.3 材齢 1 日までの蒸気養生履歴パターン

蒸気養生パターン*1		①前置時間		②昇温速度		③最高温度		⑤降温速度		⑥後置時間	
		温度(°C)	時間(h)	速度(°C/h)	時間(h)	温度(°C)	継続時間(h)	速度(°C/h)	時間(h)	温度(°C)	時間(h)
1	○-2-15-65-4-4.5	20	2	15	3	65	4	4.5	10	20	5
2	○-2-15-65-4-0	20	2	15	3	65	4	-	0	20	15
3	○-2-15-65-2-4.5	20	2	15	3	65	2	4.5	10	20	7
4	○-2-15-65-2-0	20	2	15	3	65	2	-	0	20	17
5	○-2-30-65-4-4.5	20	2	30	1.5	65	4	4.5	10	20	6.5
6	○-2-30-65-4-0	20	2	30	1.5	65	4	-	0	20	16.5
7	○-2-30-65-2-4.5	20	2	30	1.5	65	2	4.5	10	20	8.5
8	○-2-30-65-2-0	20	2	30	1.5	65	2	-	0	20	18.5
9	○-0.5-15-65-4-4.5	20	0.5	15	3	65	4	4.5	10	20	6.5
10	○-0.5-15-65-4-0	20	0.5	15	3	65	4	-	0	20	16.5
11	○-0.5-15-65-4-0	20	0.5	15	3	65	2	4.5	10	20	8.5
12	○-0.5-15-65-2-0	20	0.5	15	3	65	2	-	0	20	18.5
13	○-0.5-30-65-4-4.5	20	0.5	30	1.5	65	4	4.5	10	20	8
14	○-0.5-30-65-4-4.5	20	0.5	30	1.5	65	4	-	0	20	18
15	○-0.5-30-65-4-4.5	20	0.5	30	1.5	65	2	4.5	10	20	10
16	○-0.5-30-65-2-0	20	0.5	30	1.5	65	2	-	0	20	20

*1 蒸気養生パターン名は、「セメント種-前置時間-昇温速度-最高温度-最高温度継続時間-降温速度」を示す。また、○印は、普通ポルトランドセメント使用時は「N」、フライアッシュセメント使用時は「F」の表記をする。

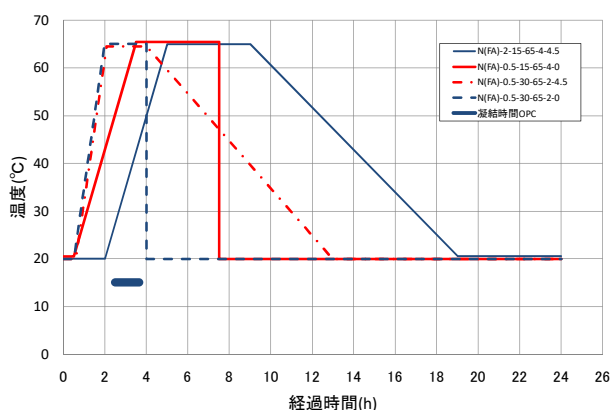


図 6.2.1 代表的な蒸気養生パターン図



図 6.2.2 蒸気養生装置

6.2.2 圧縮強度特性

1)前置時間と降温時間に着目した強度発現

図 6.2.3 から図 6.2.10 に前置時間と降温時間に着目した各蒸気養生履歴ごとの強度発現を示す[6.3,6.4]。なお、ここでは、土木学会コンクリート標準示方書[6.2]で示されている蒸気養生履歴であるパターン No. 1 (N-2-15-65-4-4.5、

FA-2-15-65-4.5)を「標準的蒸気養生」と呼ぶ。

(i)前置時間の影響 (図 6.2.3) : 標準的蒸気養生に対して、前置時間を短縮した場合

N セメント供試体は、標準的蒸気養生に比べて前置時間が短い方がいずれの材齢時でも強度が大きい。FA セメント供試体は、前置時間の長短にかかわらず標準的蒸気養生と強度発現が同等である。

(ii)前置時間と降温時間の影響 (図 6.2.4) : 標準的蒸気養生に対して、降温時間を省略した場合

N セメント供試体は、降温時間が省略された場合、材齢 1 日強度は同等であるが、それ以降の材齢では前置時間が短い方が強度が高い。なお、強度発現曲線は標準的蒸気養生と比べ相対的に低い値を示した。FA セメント供試体は、材齢 1 日は同等であるが、それ以降の材齢では、N セメントと同じ傾向で前置時間が短い方が強度が高い。

(iii)前置時間と昇温速度の影響 (図 6.2.5) : 標準的蒸気養生に対して、昇温速度を上げた場合

N セメント供試体は、昇温速度が速くなった場合でも前置時間の長短には影響せず材齢 1 日強度は同等であるが、それ以降の材齢では前置時間が長い方が強度は高い。なお、前置時間が短い場合は、材齢 7 日以降で標準的蒸気養生より強度が低い傾向になった。FA セメント供試体は、昇温速度が速くなった場合でも前置時間の長短の影響がなく同様の強度発現を示し、標準的蒸気養生とも同等の強度発現である。

(iv)前置時間と昇温・降温速度の影響 (図 6.2.6) : 標準的蒸気養生に対して、昇温速度を上げかつ降温を省略した場合

N セメント供試体は、昇温速度が速くかつ降温を省略した場合でも材齢 1 日強度は前置時間の影響を受けず同等の強度を示したが、3、7 日材齢では前置時間が長い方が高い強度を示し 14 日材齢では強度が逆転した。なお、いずれのパターンでも標準的蒸気養生より高い強度発現を示した。

FA セメント供試体は、前置時間が短い方が強度が高い傾向を示し標準的蒸気養生よりも相対的に高い強度を示した。

(v)最高温度継続時間が短い場合の前置時間の影響 (図 6.2.7) : 標準的蒸気養生に対して、最高温度継続時間短した場合

N セメント供試体は、前置時間の長さにかかわらず材齢 1 日は同じ強度であ

るが、それ以降の材齢では前置時間が短い方が高い強度を示した。なお、標準的蒸気養生よりも相対的に高い強度を示した。FAセメント供試体は、いずれの材齢でも前置時間が短い方が強度は高いが、前置時間が長い場合は標準的蒸気養生と同等の強度発現を示した。

(vi)最高温度継続時間が短い場合の前置時間と降温時間の影響 (図 6.2.8) : 標準的蒸気養生に対して、降温時間を省略した場合

Nセメント供試体は、前置時間の長短にかかわらず同等の強度発現を示した。なお、標準的蒸気養生より高い強度発現を示した。FAセメント供試体は、前置時間の長短にかかわらず同等の強度発現を示した。なお、材齢1日を除き標準的蒸気養生より高い強度発現を示した。

(vii)最高温度継続時間が短い場合の前置時間と昇温速度の影響 (図 6.2.9) : 標準的蒸気養生に対して、昇温速度を上げた場合

Nセメント供試体は、前置時間の長短にかかわらず材齢1、3日では同等の強度を示しているが、その後の材齢では前置時間が短いパターンが強度が高い。また、標準的蒸気養生より高い強度発現を示した。FAセメント供試体は、いずれの材齢でも同等の強度発現を示した。なお、標準的蒸気養生と同等の強度発現を示した。

(viii) 最高温度継続時間が短い場合の前置時間と降温速度の影響 (図 6.2.10) : 標準的蒸気養生に対して、降温時間の省略

Nセメント供試体は、前置時間の長短にかかわらず材齢1日は同等の強度発現であったが、それ以降の材令では前置時間が長い方が強度発現が高い傾向を示した。なお、標準的蒸気養生より高い強度発現を示した。FAセメント供試体は、若干の差があるが同等の強度発現を示した。なお、標準的蒸気養生に対して、材齢1日を除き高い強度発現を示した。

2)標準的蒸気養生に対する強度発現

図 6.2.11 は、標準的蒸気養生に対する各養生履歴パターンの圧縮強度増加比を示したものである。Nセメント供試体では、コンクリート標準示方書[6.2]で示されている標準的蒸気養生(No.1)が一番低い強度を示していることがわかる。このことは示方書では蒸気養生履歴が変化してもミニマムクライテリアを確保するために設定されていることを示唆することができる。また材齢3、7、14日では標準的蒸気養生に対して約1.1~1.2倍の強度を示しているのに対して、材齢1日では標準的蒸気養生よりも高い強度を示しているものの蒸気養生パターンにより大きく影響を受けることがわかる。一方、FAセメント供試体は、Nセ

メント供試体と異なり標準的蒸気養生は必ずしも最低の強度を示さないことが分かる。また、FA セメント供試体も N セメント同様に材齢 3、7、14 日は標準的蒸気養生より約 1.0~1.2 倍の強度を示しているが、材齢 1 日では蒸気養生パターンにより大きく変化していることが分かる。これらの結果から、N セメントおよび FA セメントどちらも材齢 1 日強度は蒸気養生履歴に大きく影響すること、さらに FA セメントを使用する場合は、コンクリート標準示方書[6.2]で示された標準的蒸気養生では必ずしも最低の強度を確保するパターンではないためポズラン反応等を考慮した最適蒸気パターンを設定する必要がある。したがって、コンクリート標準示方書[6.2]に示されている標準的蒸気養生は N セメントに対するものと理解する必要があると考えられる。

なお、FA セメントは、降温履歴を省いた急激な場合、材齢 14 日強度が他の蒸気養生履歴と比べ増加する傾向にある。

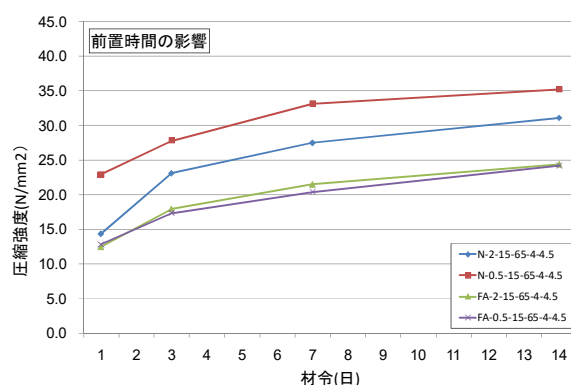


図 6.2.3 前置時間の影響

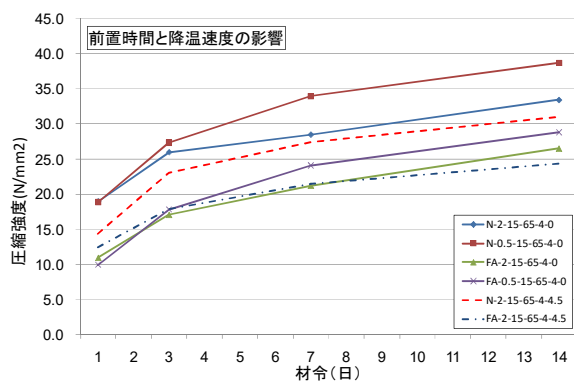


図 6.2.4 前置時間と降温速度の影響

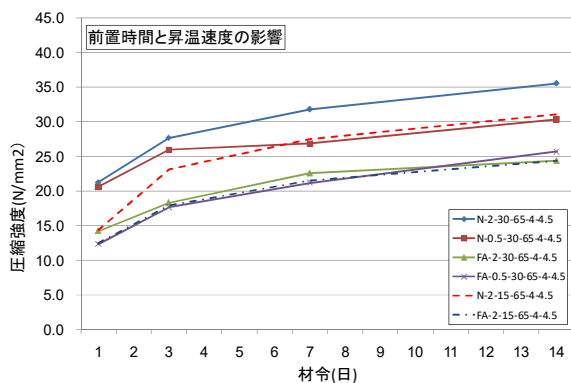


図 6.3.5 前置時間と昇温速度の影響

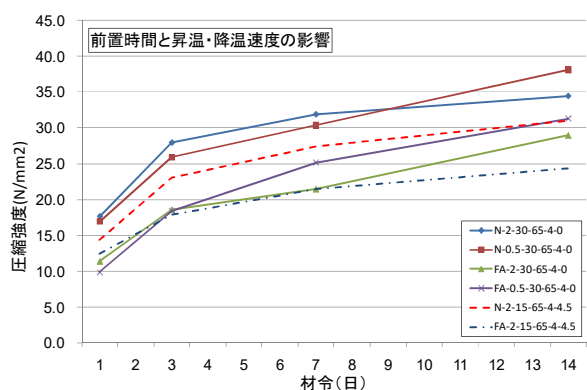


図 6.2.6 前置時間と昇温・降温速度の影響

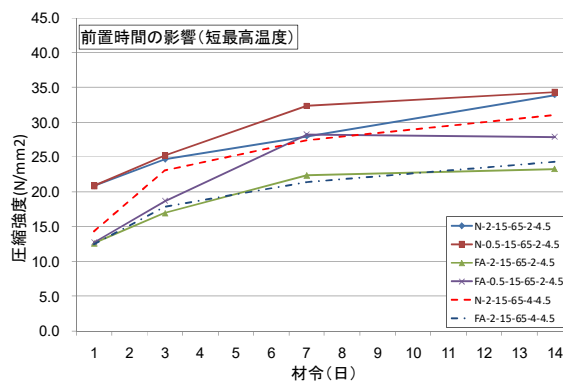


図 6.2.7 前置時間と最高温度継続時間の影響

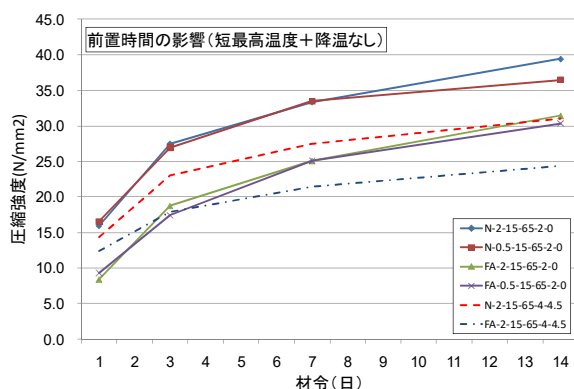


図 6.2.8 前置時間と最高温度継続時間、降温速度の影響

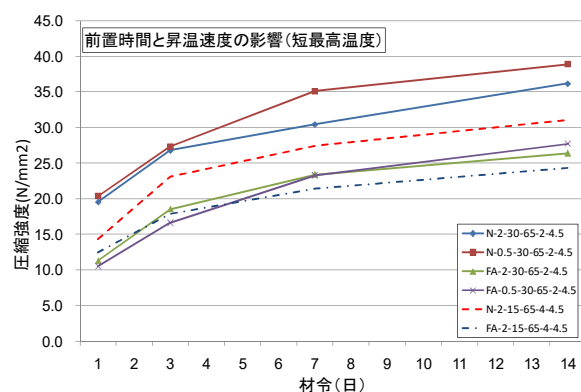


図 6.2.9 前置時間と昇温速度の影響 (短最高温度)

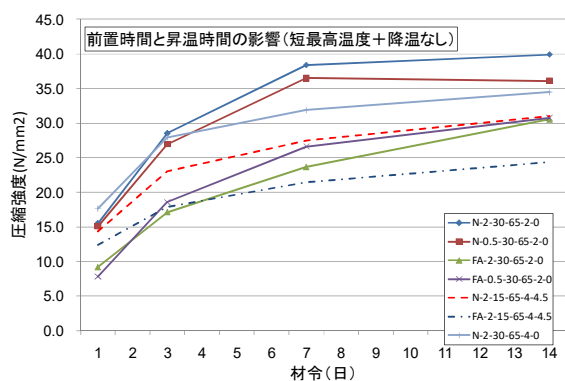


図 6.2.10 前置時間と昇温速度の影響 (短最高温度、昇温なし)

3) 積算温度および封緘養生に対する強度発現

図 6.2.11 は、標準蒸気養生(No.1)を基準に、他の蒸気養生履歴の強度増加を示したものである。Nセメントの場合、No.1は、最低の強度発現であることが分かる。一方、FAセメントの場合、標準蒸気養生(No.1)は必ずしも最低の強度

ではなく、Nセメントとの違いがはっきりわかる。また、材齢1日強度が低い蒸気養生パターンの時に材齢14日の強度が高くなる傾向があり、これらは前置時間及び降温時間を短縮するパターンである。

図 6.2.12 は、各蒸気養生パターンの材齢毎の圧縮強度の増加比率を示したものである。Nセメント供試体は材齢1日で出荷時強度の約 50%を確保しているが、FAセメント供試体は材齢後半が強度増加が進んでいることが分かる。これはフライアッシュが蒸気養生履歴を受けることでポゾラン反応が進行し強度発現したものと考えることができる。また、図 6.2.13 は、蒸気養生による積算温度（以下「蒸気積算温度」という。）と各材令の圧縮強度を示したものである。この図から分かるように、Nセメントおよび FAセメント両方とも材齢1日強度は蒸気積算温度に比例しているが、それ以降の材齢では蒸気積算温度に比例していないことがわかる。図 6.2.14 は、圧縮試験材齢時の積算温度と圧縮強度の関係を示した図である。この図から圧縮強度は積算温度に比例して増加することがわかるが、蒸気養生履歴の影響を加味した圧縮強度の算定は材齢1日を除いて明確には見られなかった。なお積算温度は、基準温度を 0℃として算定した。図 6.2.15 は、封緘養生と蒸気養生の違いによる圧縮強度比を示したものである。この図から材齢1日強度は蒸気養生が高い強度発現を示すが、それ以降の材齢では封緘養生が強度発現することが分かる。なお、材齢1日強度は蒸気養生履歴の影響を受けるため強度比が大きく変化することもわかる。

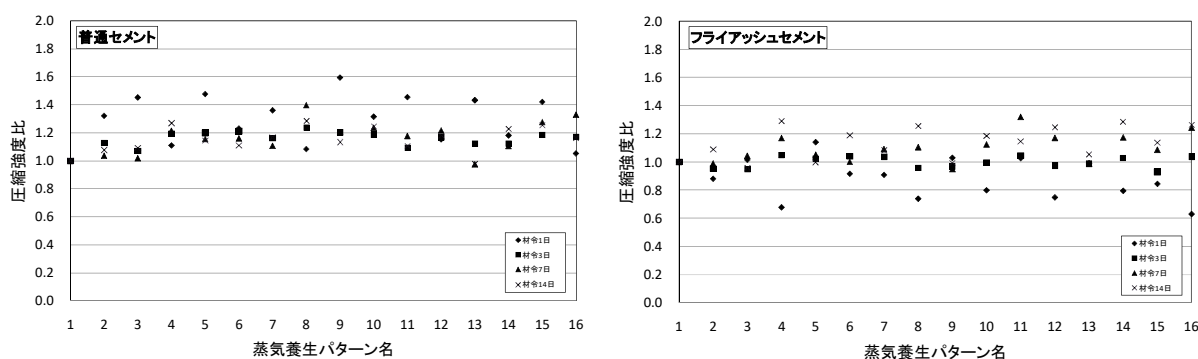


図 6.2.11 標準的蒸気養生に対する圧縮強度増加比

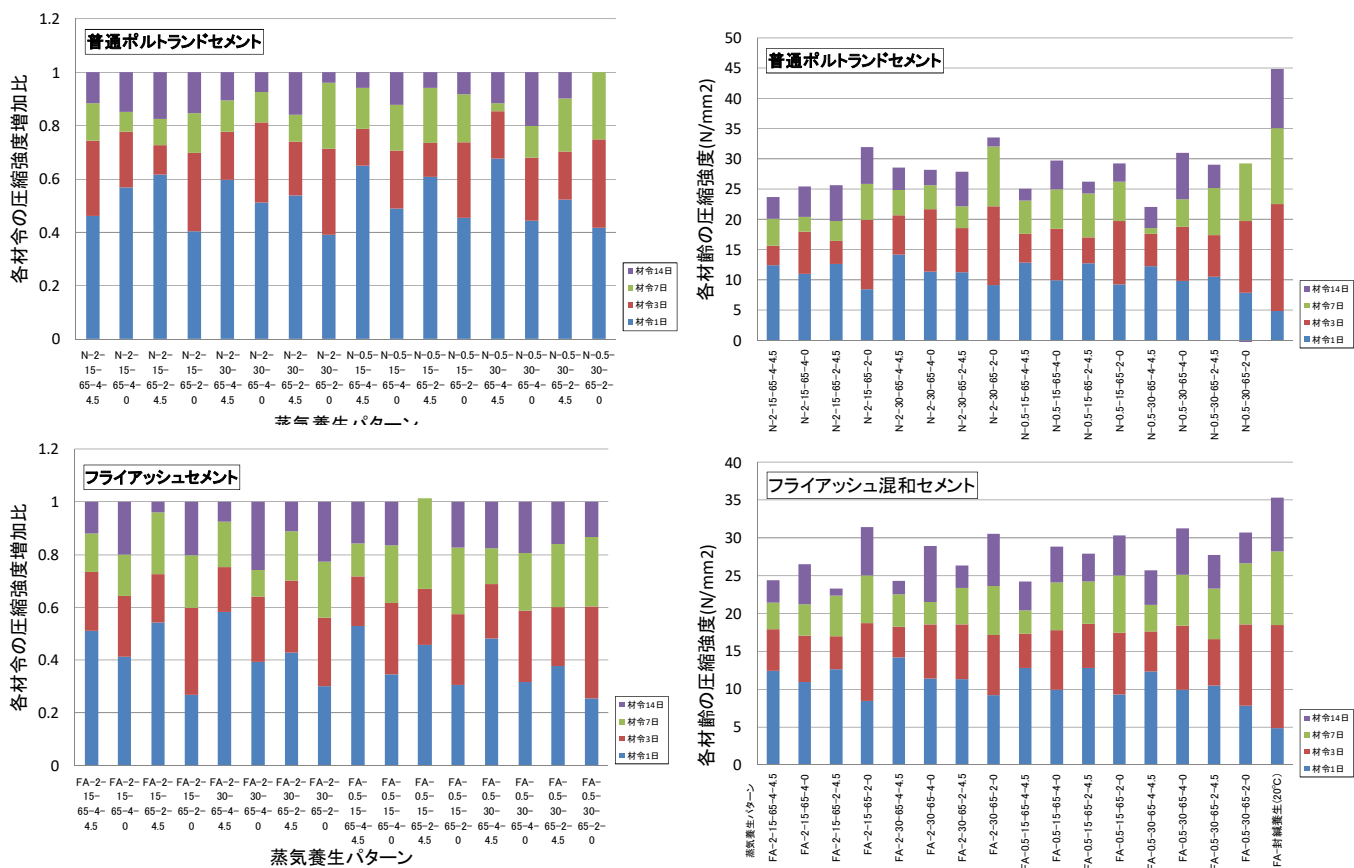


図 6.2.12 各材令の圧縮強度増加比

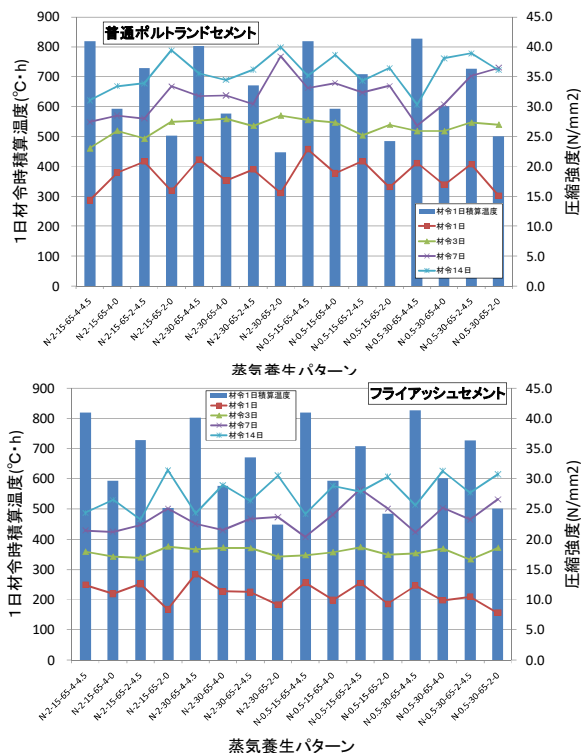


図 6.2.13 蒸気積算温度と圧縮強度の関係

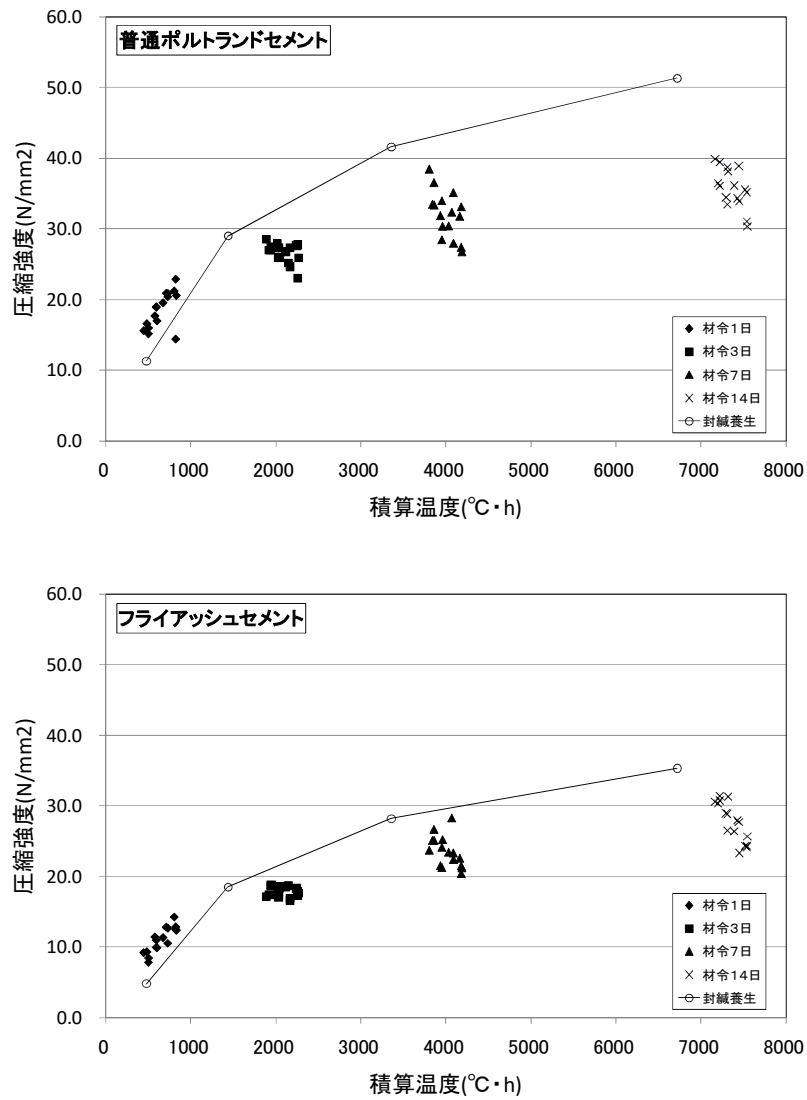


図 6.2.14 積算温度と圧縮強度の関係

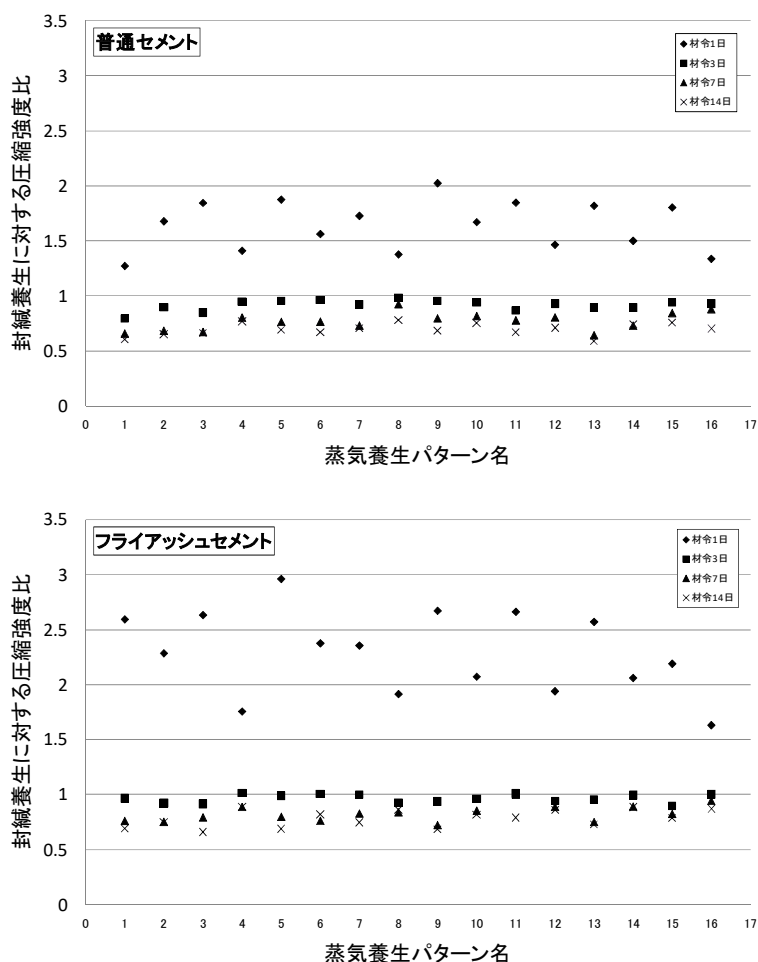


図 6.2.15 封緘養生に対する蒸気養生の強度比

4)まとめ

蒸気養生履歴を受けるモルタル供試体の圧縮強度試験結果より、以下に示すことが分かった。

- (i) Nセメント及びFAセメント共に同一配合であっても蒸気養生履歴パターンにより強度発現は大きく異なる。
- (ii) 材齢1日強度（脱型強度）は、Nセメント及びFAセメント共に蒸気積算温度に比例する。したがって、蒸気積算温度は脱型強度算定の指標として有効である。また、蒸気養生下では常温20℃一定（封緘養生）と比べ圧縮強度が高くなる。
- (iii) 材齢14日強度（出荷時強度）は、Nセメント及びFAセメント共に積算温度により算出することが可能であるが、蒸気養生履歴の影響を考慮して算出することまではできない。したがって、積算温度はプレキャストコンクリートの

品質管理手法としては適切でない。また、蒸気養生下では常温 20℃一定（封緘養生）と比べ圧縮強度は低くなる。

- (iv)凝結始発開始前に温度上昇（昇温）を開始（前置時間の短縮）しても強度発現には大きく影響しない。
- (v)FAセメントの材齢 14 日強度は、降温履歴を省いた場合は、高い強度発現を發揮する。そして、その時の蒸気養生履歴は材齢 1 日強度が低いこともわかった。

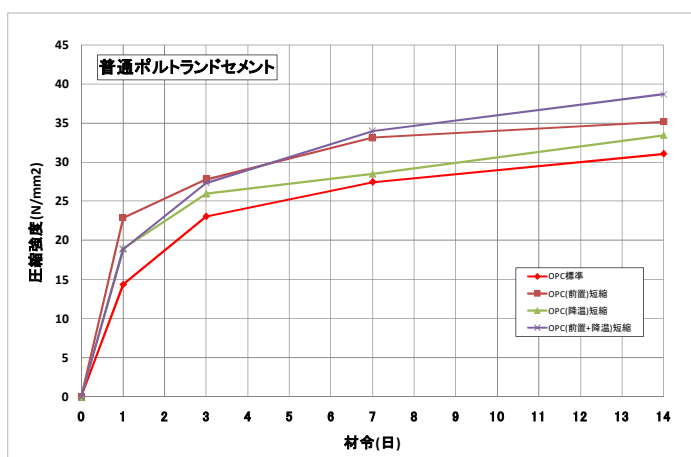


図 6.2.16 普通セメントの強度発現

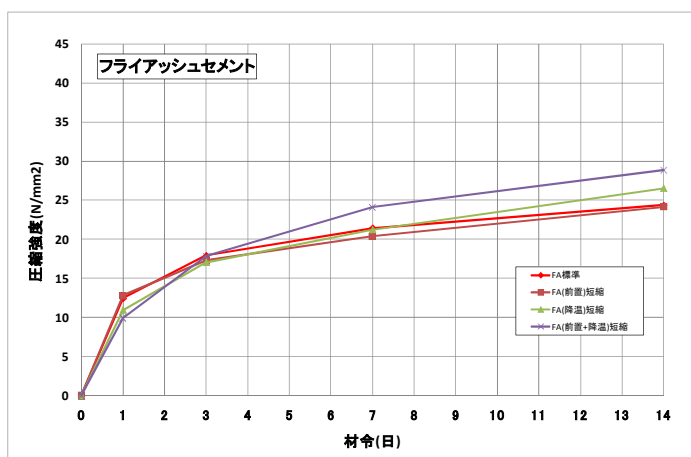


図 6.2.17 フライアッシュセメントの強度発現

5)今後の課題

今回の実験により普通ポルトランドセメントを使用した場合、コンクリート標準示方書[6.2]で示されている蒸気養生（ここでは、標準的蒸気養生と呼んでいる）は、蒸気養生履歴の中で最低の強度を示した(図 6.2.11 及び 6.2.16 参照)。

このことはこの養生履歴はプレキャストコンクリートの強度発現のクライテリアであると考えられることができる。一方、フライアッシュ混和セメント使用の場合、標準蒸気養生パターンは一つの養生パターンに過ぎず、蒸気履歴によってはさらに低い強度を呈する場合があります標準養生パターンでは最低強度を確保するクライテリアにはなり得ないことになり、蒸気履歴に及ぼす影響因子の解明やフライアッシュのポゾラン反応の温度依存性について解明して、クライテリアになりうる標準養生履歴を設定する必要があると考えられる。

また、今回の蒸気養生試験により「脱型時強度」と「出荷時強度」は積算温度の観点から強度発現のプロセスが異なると考える方が妥当である。脱型時強度は、蒸気養生中に凝結が始まり水和に直接影響する。したがって、セメントの組成、つまり、C3S、C2S等の量や粉体の比表面積が影響する。一方、出荷時強度は、蒸気養生のエネルギーや水和反応の程度の結果として、強度が発現するもので、そのメカニズムは異なると考えられる。つまり蒸気養生履歴を受けるプレキャストコンクリートの場合、製造過程の品質管理としての「脱型時強度」の両方を満足する最適配合は成立せず、したがって、「出荷時強度」と「脱型時強度」が独立して強度発現できる材料使用や配合理論を展開することが、プレキャストコンクリートの製造サイクルの合理化であると考察できる。

6.2.3 収縮抵抗性

高温又は促進蒸気養生を行う場合、粉体の収縮が懸念される。そこで、比表面積が大きい速硬性混和材を添加した場合の影響を評価するために、図 6.2.18 に示すリング状の拘束体をもったリング試験機を作成してひび割れ抵抗性を検証した。このリング試験機[6.5]は、セメントコンクリートの自己収縮、乾燥収縮さらにクリープなどを個別に計測分離することはできないが、すべての環境条件を含んだ収縮性能を打設直後から計測できるので、プレキャストコンクリートのひび割れ発生の有無を検証するには絶好の計測装置である。なお、蒸気養生履歴によりリング試験機の拘束体も熱膨張収縮するため、温度変化による拘束力の変化を除外するために内リングの素材は、鋼製の 1/10 の線膨張係数であるインバール鋼（ニッケル 36%、鉄 64%合金）を用い製作した。また、拘束体はドーナツ状のモルタル供試体の内側（内リング）のみとし、外リングさらに供試体下部の拘束はテフロンシートを 2 枚重ねにして間に粘性の低いシリコングリースを塗布して拘束力をなくした(図 6.2.19 参照)。表 6.2.4 に使用材料、表 6.2.5 に配合、表 6.2.6 に蒸気養生パターンを示した。なお、速硬性混和材の置換量は、強度増加に必要な量は 5.3.4(2)で 5%置換が最適であることを示した。そこで 5%置換を行い収縮が発生し易い環境条件で試験した。図 6.2.20、6.2.21 に供試体状況を示す。

表 6.2.4 使用材料

材料		諸元	備考
セメント	普通ポルトランドセメント	密度=3.16(g/cm ³)、 比表面積=3,260(cm ² /g)	住友大阪セメント社製 (バージン)
混和材	微粉碎セメント型速硬性混和材(FG10)	比表面積=10,459(cm ² /g)	
細骨材	セメント強さ試験用標準砂	表乾密度=2.62(g/cm ³)、 吸水率=0.42(%)	(社)セメント協会製
型枠 (内リング)	インバール鋼合金 (ニッケル 36%,鉄 64%)	熱膨張率 0.8x10 ⁻⁶ /°C	独自製作

表 6.2.5 モルタル配合

配合名	セメント比 W/C(%)	粉体比 W/(C+FG)(%)	単位量(kg/m ³)			
			W	C	FG10	S
N-S	49	49	292	600	0	1316
N-FG	51		292	570	30	1316

表 6.2.6 蒸気養生パターン

パターン名	蒸気養生パターン	前置時間 (h)	昇温速度 (°C/h)	最高温度 (°C)	最高温度継続時間(h)	降温速度 (°C/h)	全時間
S	標準蒸気養生	2	15(3)	65	4	4.5(13)	22
N	20°C一定	—	—	20	488	—	488

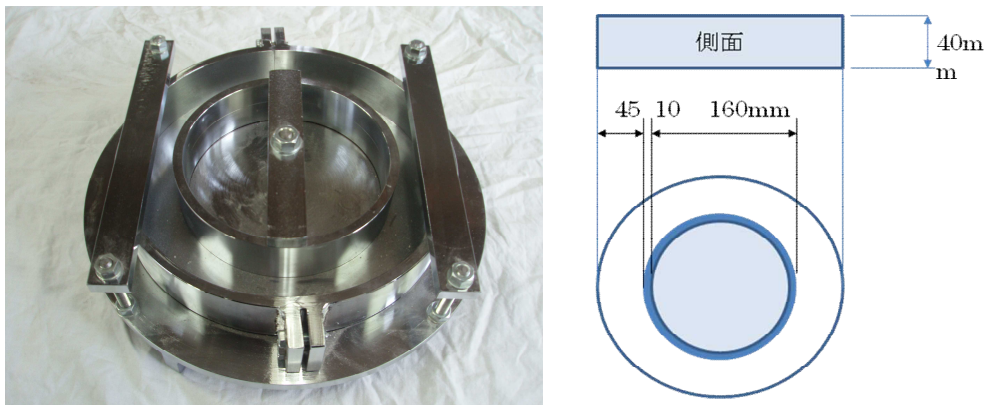


図 6.2.18 インバル鋼製リング試験機と寸法

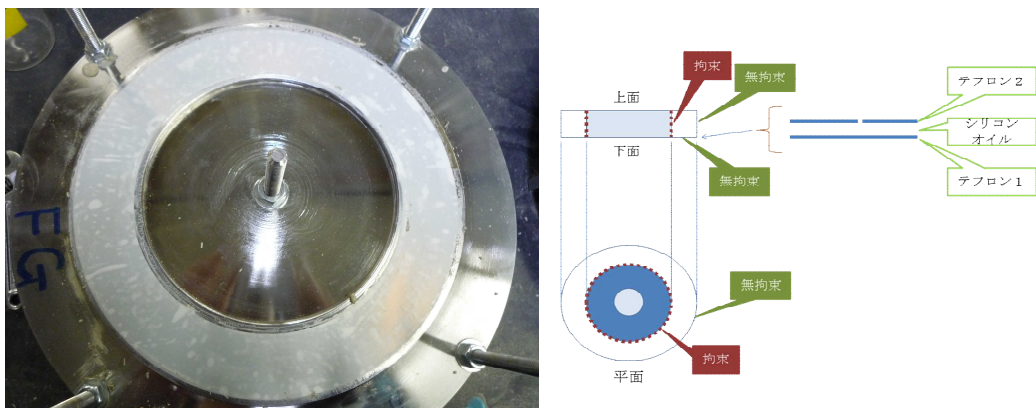


図 6.2.19 供試体下部のテフロンシートと拘束体

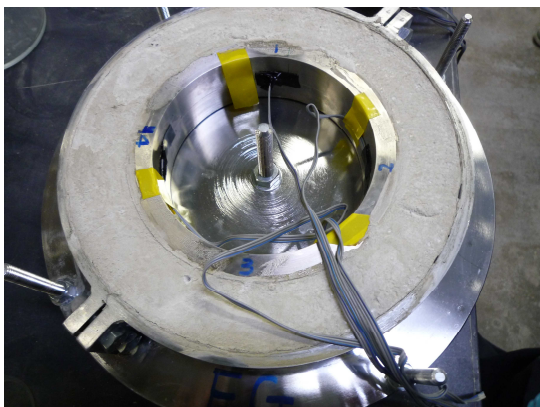


図 6.2.20 モルタル硬化状況



図 6.2.21 外リング脱型状況

図 6.2.22 は、普通セメント及び普通セメントに速硬性混和材(FG10)を 5%置換したセメントの常温 20℃恒湿室に 20 日間放置したモルタル供試体の収縮ひずみ曲線である。どちらのセメントも同等のひずみ量を呈していることがわかる。ひずみは打設直後から時間経過とともに微増しているが、材齢 1 日前後に圧縮ひずみが若干発生している(図 6.2.23 参照)。これはこの時期からエトリンガイト結晶が形成され始めた結果、膨張ひずみが発生したと考えられる。図 6.2.24 は、標準的蒸気養生を負荷させた場合の普通セメント及び普通セメントに速硬性混和材(FG10)を 5%置換したセメントのモルタル供試体の収縮ひずみ曲線である。いずれのセメントも温度上昇下降に伴ってひずみ量が増加したり減じたり温度変化に反応して変化していることが分かる。またひずみ量の比較では速硬性混和材を置換した場合が普通セメント単体よりも収縮量が大きい結果となった。この理由は、速硬性混和材置換の場合は比表面積が相対的に大きいため若材齢時から水和が進行し結晶生成するために収縮が大きくなったと考えられる。なお、最高温度継続時間が終了した後にピークひずみ約 350μが生じているがひび割れ発生は確認されなかった。

また、モルタル供試体の円周方向の応力を式 6.1[6.5]により算出すると、

$$\sigma(r) = \epsilon_s \cdot E_s \cdot t \cdot r_1 \frac{(r_2/r)^2 + 1}{r_2^2 - r_1^2} \quad \text{式(6.1)}$$

ここで、

$\sigma(r)$: 原点からの距離 r の位置におけるコンクリートの円周方向の引張応力

r : 円周の中心からの距離

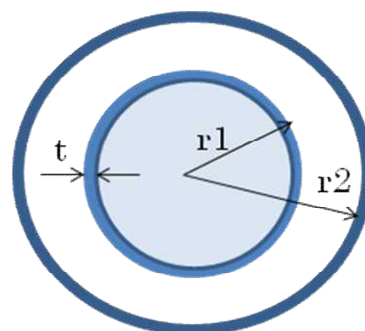
ϵ_s : 内リングの円周方向のひずみ

E_s : 内リングの弾性係数(=210kN/mm²)

t : 内リングの肉厚(10mm)

r_1 : 内リングの外半径(80mm)

r_2 : 外リングの内半径(125mm)



式(6.1)中の記号

式(6.1)は、鋼材及びコンクリートを弾性体と仮定し拘束リングは外圧を受ける薄肉リング、コンクリートは内圧を受ける厚肉リングと仮定している。コンク

リートの引張応力は内リングからの距離により変化し断面内で不均一であり、コンクリート内側における引張応力は外側の引張応力の約 2.44 倍となる。

図 6.2.26 は常温環境下でのコンクリート内側および外側の発生応力である。なお設計式から算定した引張強度は、内側と外側応力の間位置しているが実際にはひび割れは発生しなかった。これはコンクリート標準示方書の算定式が特性値を考慮した安全側の設計式であることとさらに若材齢時のクリープがあることからこのような結果が得られたと考えられる。

図 6.2.27 は蒸気養生環境下でのコンクリート内側の発生応力である。この発生応力は、弾性係数や線膨張係数の温度補正やクリープを考慮していない。また材齢 1 日でのシリンダー供試体による圧縮強度から算定した引張応力を図中にプロットした。この実験でもひび割れ発生は見られなかった。図 6.2.25 及び図 6.2.26 にはコンクリート内側に発生する最大引張力を示す。なお、引張強度の算定はコンクリート標準示方書の引張強度の算定式を用いた。

以上のひび割れ抵抗性の実験から、蒸気養生履歴下で速硬性混和材を置換してもひび割れ発生がないことが確認された。

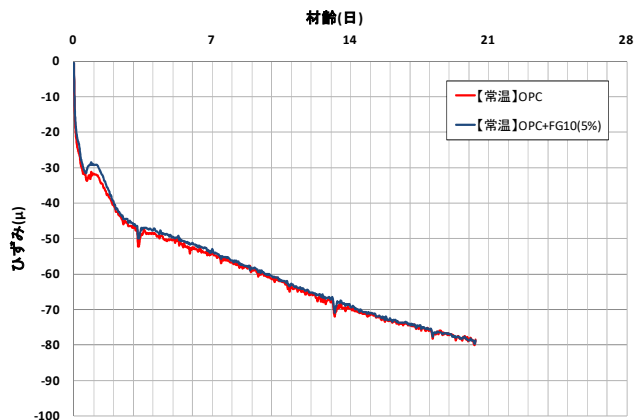


図 6.2.22 常温環境下でのひずみ

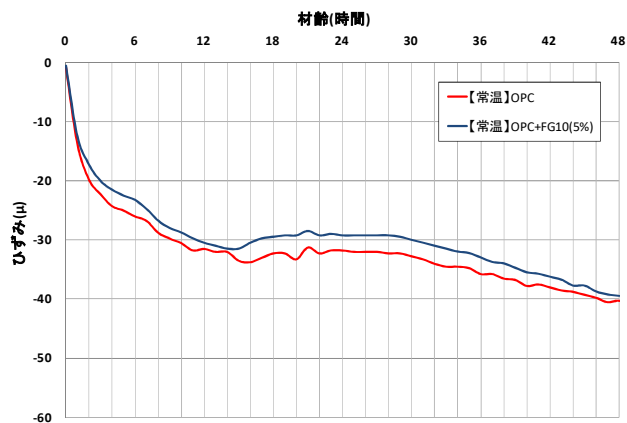


図 6.2.23 常温環境下でのひずみ (若材齢)

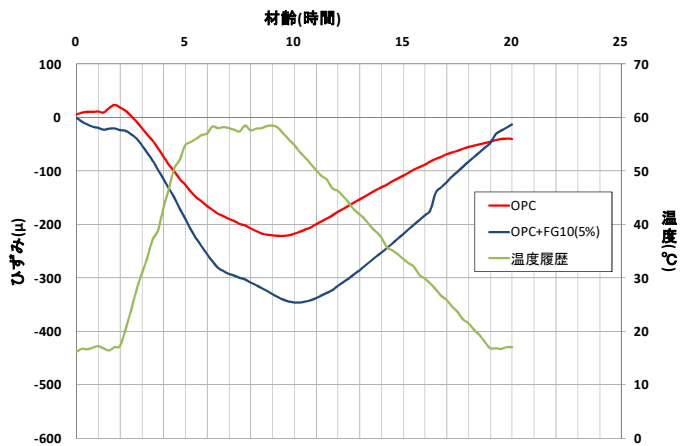


図 6.2.24 標準蒸気養生下でのひずみ

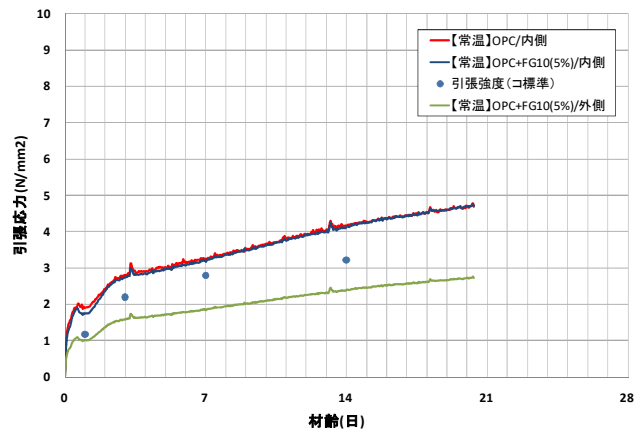


図 6.2.25 常温環境下での最大引張応力

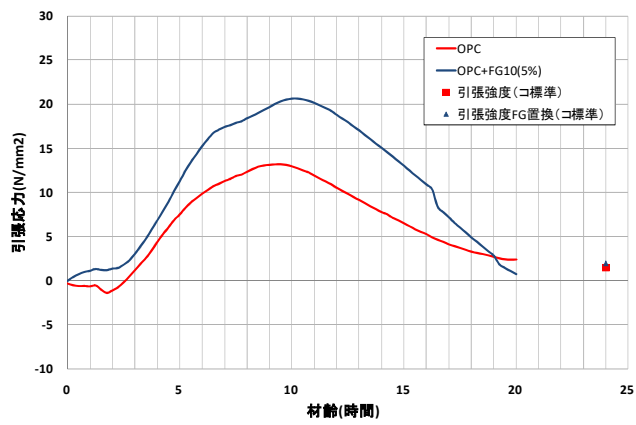


図 6.2.26 標準蒸気養生での最大引張応力

6.2.4 未燃カーボン対策

フライアッシュをコンクリート混和材として使用すると、流動性の向上、水和熱の抑制、長期強度の増進等の利点があるが、フライアッシュには未燃カーボンが含まれており、この未燃カーボンが混和剤を吸着するため、フレッシュ性状が悪化し混和剤の量が増大する。さらに、凍結融解抵抗性の低下などコンクリートの硬化物性に悪影響を及ぼしコンクリートの品質が低下することが知られている。

フライアッシュ中の未燃カーボンの含有は、石炭燃焼釜の大きさ、燃焼エネルギー分布、石炭種、さらに石炭の粉碎形状等によりフライアッシュ組成が変化する。したがって、フライアッシュの出荷ロットごとに組成が変化することになり、未燃カーボンの化学組成や量等に影響しない化学混和剤の適用が求められる。そのため、AE減水剤を液体から発泡させ泡状にした発泡型AE減水剤²にすることで吸着を少なくする新たな発想でAE混和剤が開発された。ここでは、当該AE減水剤について、プレキャストコンクリートの製造効率化への適用性を確認するための試験を行った。発泡した状態のAE減水剤を図6.2.27に示す。なお、図6.2.28にフライアッシュのロットごとに変化した様子を示す。また、図6.2.29にフライアッシュのSEM写真を示す。



図6.2.27 発泡型AE減水剤

² 発泡型 AE 減水剤は、プレキャストコンクリート製造メーカーのミルコン社と混和剤メーカーの明光油剤社等が開発した混和剤である。



図6.2.28ロットが異なるフライアッシュ 図6.2.29フライアッシュのSEM写真

(1)使用材料と配合条件

試験に用いた使用材料を表6.2.7に、コンクリート配合を表6.2.8に示す。水結合材比は、単位セメント量を 300kg/m^3 と一定として、スランプ値は $8.5\pm 2.5\text{cm}$ 、空気量は $4.0\pm 1.0\%$ となるように決定した。フライアッシュセメント置換率はセメント内割り30%とした。

表 6.2.7 使用材料

材料		諸元	備考
セメント	普通ポルトランドセメント	密度= $3.16(\text{g}/\text{cm}^2)$ 、 比表面積= $3,260(\text{cm}^2/\text{g})$	住友大阪セメント社製 (バージン原材料仕様)
混和材	フライアッシュ II 種	密度= $2.21(\text{g}/\text{cm}^2)$ 、 比表面積= $4,030(\text{cm}^2/\text{g})$	電源開発株 磯子火力発電所産
細骨材	陸砂	表乾密度= $2.62(\text{g}/\text{cm}^2)$ 、 FM=2.63	
粗骨材	砕石	表乾密度= $2.71(\text{g}/\text{cm}^2)$ 、 FM=6.67	
混和剤	AE 混和剤(AR)	リグニンスルホン酸系	
	AE 剤(AE)	変性ロジン酸化合物系	
	発泡型 AE 剤(PAE)	アルキルエーテル型アニオン界面活性剤	明光油剤・竹本油脂製

表 6.2.8 コンクリート配合

記号	Gmax (mm)	水結合比 W/B(%)	S/a (%)	単位量(kg/m^3)							
				W	B		S	G	AR	AE	PAE
					C	FA			(xB%)		
FA-A	20	49	45	147	210	90	847	1070	0.4	2.4	0
FA-P									0	0	0.9

(2)練混ぜ方法

発泡型AE混和剤を配合したFA-Pの練混ぜ方法は、予め空練りしたセメント、フライアッシュ、細骨材に水を加え30秒練混ぜした後、発泡させたPAEを添加しさらに30秒練混ぜした後、粗骨材を投入し120秒練混ぜた。

(3)蒸気養生プログラム

図6.2.30に示すような標準的蒸気養生(J)と1日2サイクル工程が可能になる促進蒸気養生(2J)の2つの養生温度プログラムを検討した。

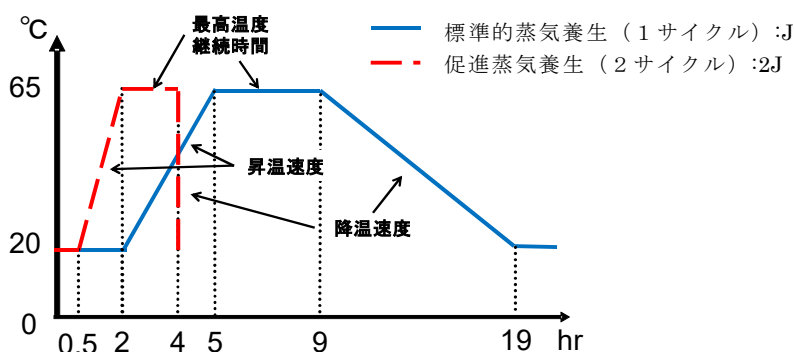


図6.2.30 蒸気養生履歴

(4)試験項目

(a)圧縮強度試験

JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じて行った。φ10 cm ×20cm のコンクリート供試体を使用し、材齢1日を除き、試験材齢までは標準養生とした。試験材齢は1日、3日、7日、28日。

(b)凍結融解試験

JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」(A法)に準じて行った。供試体の試験開始材齢は28日とし、相対動弾性係数と質量減少率を測った。

(c)気泡分布測定試験

ASTM C 457「リニアトラバース法」、「ポイントカウント法」により測定した。

(5)実験結果

(a)圧縮強度試験結果

図6.2.31は、材齢1日においては配合と養生方法の組み合わせに関係なく、同程度の強度を示した。しかし、材齢3日以降において配合FA-A、FA-Pともに促進蒸気養生が標準的蒸気養生を上回った。

(b)凍結融解試験結果

図6.2.32に相対動弾性係数の変化を示す。凍結融解の目安とされている300サ

イクル終了時点で、配合FA-Aの標準的蒸気養生(J)では初期の90%以上を確保した。一方、配合FA-Pでは促進蒸気養生(2J)で80%以上を確保できたが、標準的蒸気養生では150サイクルを過ぎたあたりから、低下が大きくなり最終的には70%程度まで低下した。

(c)気泡分布

図6.2.33に凍結融解試験供試体の気泡分布を示す。各配合の全空気量を算出した結果、配合FA-Aの標準的蒸気養生は3.4%、配合FA-Pの促進蒸気養生は3.6%となり、配合PA-Pは、少ない添加率で同等の空気量を挿入できることが分かった。また、気泡比率の分布はいずれの供試体も同様であったが、配合FA-Pの標準的蒸気養生の全空気量は2.5%と少なく、特に0.08~0.15mm範囲の空気量が少なく、これが要因となり相対動弾性係数の低下が他より大きくなったと考えられる。なお、フレッシュ時にエアメータで計測した空気量はいずれの配合も4.0~5.0%の範囲を満たしていたことから、配合FA-Pの標準的蒸気養生では形成された気泡が蒸気養生の過程で破泡し減少したことが推察される。

(6)まとめ

- (a)フライアッシュコンクリートはサイクルを短くした促進蒸気養生を施した場合、標準的蒸気養生と比較して、材齢1日強度は同程度、3日以降の強度が増進することが明らかとなった。
- (b)今回採用した発泡型AE混和剤は、通常のAE剤と同等な空気連性をもち、十分な耐凍害抵抗性を確保できることが明らかとなった。なお、同一の空気量を挿入するための添加量が従来のAE剤よりも少ない量で同等の気泡分布を確保できることが明らかとなったが、蒸気養生履歴の違いにより相対動弾性係数が低下する傾向があることもわかった。

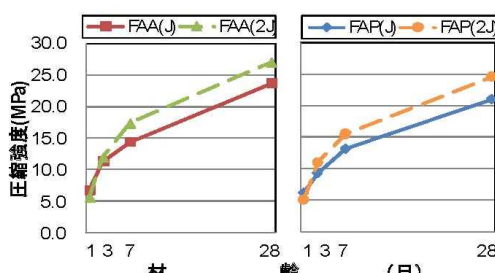


図 6.2.31 圧縮強度試験結果

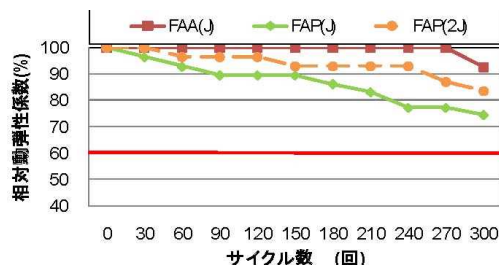


図 6.2.32 相対動弾性係数の変化

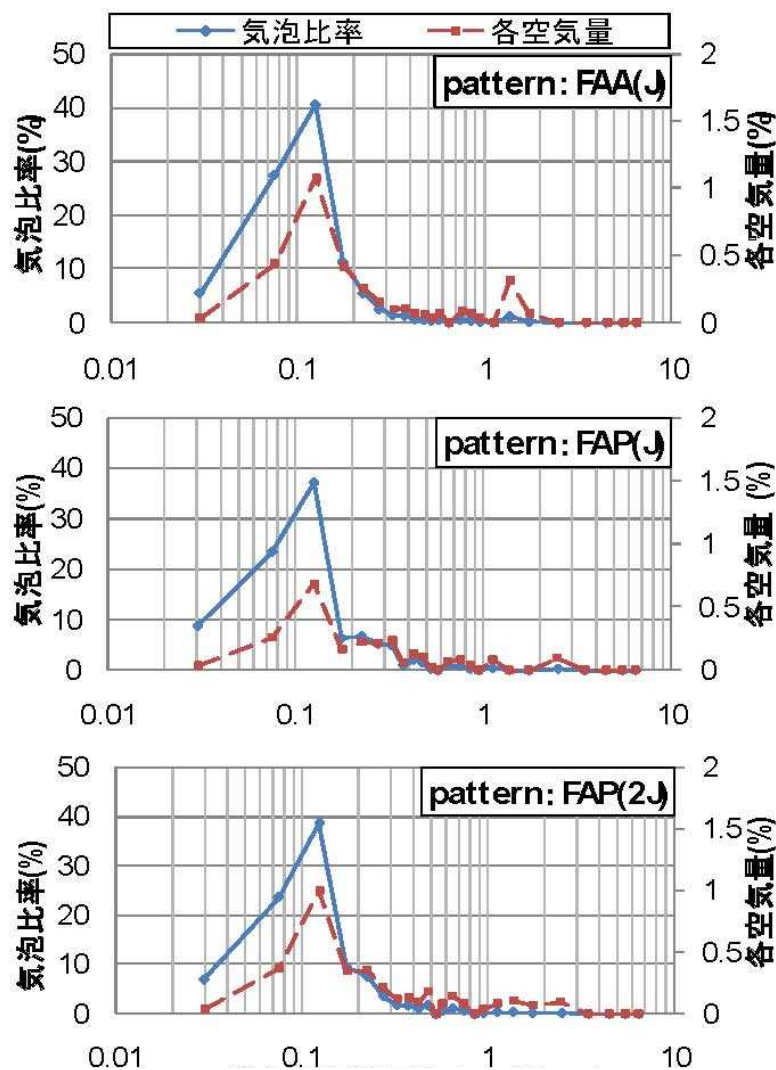


図 6.2.33 蒸気養生履歴と細孔径分布

6.2.5 基本特性のまとめ

蒸気養生を受けるフライアッシュセメント硬化体の基本特性について各種試験により確認した。以下に得られた特性についてまとめた。

○蒸気養生履歴の影響

- ・普通ポルトランドセメント使用の場合、土木学会コンクリート標準示方書等で示す標準的蒸気養生履歴は、さまざまな履歴を変化させた場合と比較して、最低の強度を示していることが確認できた。つまり、コンクリート標準示方書は、ミニマムクライテリアを示す技術基準である主旨を的確に示した蒸気養生履歴であることが確認出来た。

- ・フライアッシュセメント使用の場合、標準的蒸気養生履歴は、最低の強度を得る履歴ではなく、蒸気養生パターンに影響を受け変化することがわかった。したがって、フライアッシュセメントを使用する場合は、置換量やポゾラン反応率など特性を考慮した最適な蒸気養生履歴を見出す必要があることを示唆している。
- ・フライアッシュセメントの材齢 14 日強度は、降温履歴を省いた履歴で高い強度を示した。その時の材齢 1 日強度も非常に低いものであることがわかった。

○積算温度による評価

- ・強度発現を積算温度により示した場合(図 6.2.14 参照)、普通ポルトランドセメント及びフライアッシュセメントの強度発現を養生方法で比べると、材齢 1 日強度は、いずれも蒸気養生履歴が高い強度を得られるが、それ以降の材齢では、封緘養生の方が高い強度が得られフライアッシュセメントの場合は、大きな差は生じないが、普通ポルトランドセメントの場合は、大きな差が生じることがわかった。これは、フライアッシュはポゾラン反応が遅い材令で生じること温度寄与性が低いことから蒸気養生による影響が低いことがあげられる。なお、普通ポルトランドセメントは、材齢 3 日以降では封緘養生に比べ標準蒸気養生は大きく低い強度になっている。

6.3 蒸気養生を受けるフライアッシュセメント硬化体の長期特性

6.3.1 試験概要

(1) 使用材料と配合条件

使用材料は結合材を普通ポルトランドセメントに対し、フライアッシュⅡ種を質量比で内割30%置換し、細骨材は(社)セメント協会のセメント強さ用標準砂を用いた。これらの材料の諸元を表6.3.1に示す。今回の実験ではモルタルにより圧縮強度試験を行い、セメントペーストにより水和反応を検討した。モルタル配合を表6.3.2に示す。セメントペースト配合はモルタル配合から細骨材を除いたものとした。

表 6.3.1 使用材料

材料		諸元	備考
セメント	普通ポルトランドセメント	密度=3.16(g/cm ³)、 比表面積=3,260(cm ² /g)	住友大阪セメント社製(バージン原材料仕様)
混和材	フライアッシュⅡ種	密度=2.21(g/cm ³)、 比表面積=4,030(cm ² /g) 非晶質量 39.4(%)	電源開発(株) 磯子火力発電所産
細骨材	セメント強さ試験用標準砂	表乾密度=2.62(g/cm ³)、 吸水率=0.42(%)	(社)セメント協会製セメント強さ試験用標準砂

表 6.3.2 モルタル配合

記号	セメント種	水結合材比 W/(C+FA)(%)	S/B(%)	単位量(kg/m ³)			
				W	B		S
					C	FA	
FA	フライアッシュセメント	50	2.25	292	410	175	1316

(2) 蒸気養生方法

図6.3.1に示す蒸気養生履歴のうち、前置時間、昇温速度、最高温度継続時間、降温速度を変化させたプログラムを表6.3.3のように6パターン設定し、圧縮強度発現性と水和反応を比較検討した。本試験では、前置温度を室温と同じ20℃、最高温度は65℃一定とした。そして、前置時間を2hと0.5h、昇温速度を15℃/hと30℃/h、最高温度継続時間を4hと2h、降温速度を4.5℃/hの徐冷降下と最高温度から常温20℃の環境条件下に暴露した急冷降下(実測モルタル内中心温度45℃/h)に変化させた。さらに、実工場における1日2サイクル工程の蒸気養生の検証として、全蒸気養生工程を短縮させた促進蒸気養生A05B30C2を設定した。蒸気養生終了後、20℃恒温室で封かん養生を行った。

さらに、蒸気養生を行っていない場合と蒸気養生の比較をするため、練混ぜ直後に 20℃恒温室で封かん養生した常温養生(Normal Curing)を行った。

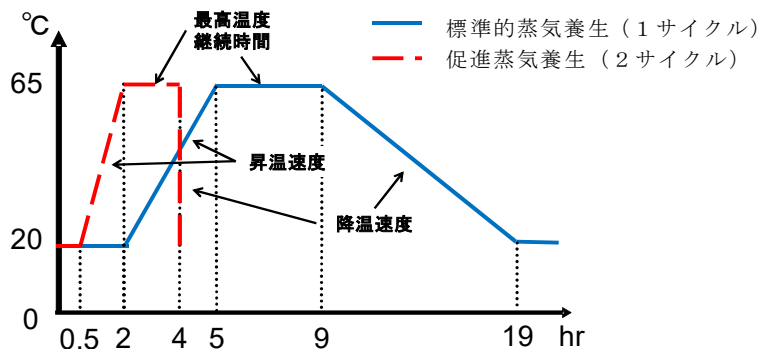


図 6.3.1 蒸気養生履歴パターン

表 6.3.3 材齢 1 日までの蒸気養生履歴パターン

蒸気養生パターン *1		①前置		②昇温		③最高温度		④降温		⑤後置	
		温度 (°C)	時間 (h)	速度 (°C/h)	時間 (h)	温度 (°C)	継続時間 (h)	速度 (°C/h)	時間 (h)	温度 (°C)	時間 (h)
1	A20B15C4D	20	2	15	3	65	4	4.5	10	20	5
2	A20B15C4	20	2	15	3	65	4	-	0	20	15
3	A20B15C2D	20	2	15	3	65	2	4.5	10	20	7
5	A20B30C4D	20	2	30	1.5	65	4	4.5	10	20	6.5
9	A05B15C4D	20	0.5	15	3	65	4	4.5	10	20	6.5
16	A05B30C2	20	0.5	30	1.5	65	2	-	0	20	20

*1 蒸気養生パターン名は、「セメント種－前置時間－昇温速度－最高温度－最高温度継続時間－降温速度」を示す

(3) 試験項目

(a) 圧縮強度試験

JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じて行った。蒸気養生プログラムごとにφ50×100mmのモルタル供試体を缶モールドで作製し、蒸気養生終了後は試験材齢まで20℃恒温室でアルミテープにより封かん養生とした。試験材齢は1、3、7、14、28、91日とした。

(b) 水和反応分析用試料調整

硬化したセメントペースト供試体をダイヤモンドカッターでカットし、2.5 mm角に粉砕した試料をアセトンで1日浸漬させて水和停止を行い、40℃乾燥炉内に1日入れてアセトンを蒸発させた試料を分析用試料とした。

(c) 水酸化カルシウム(CH)の生成量の定量

材齢 1、3、7、14、28、91 日において、熱重量示差熱分析(TG-DTA)によって、分析用試料中の水酸化カルシウム存在量を測定した。本試験の CH 量は、水和停止後のサンプル質量に対する測定値とした。

(d) フライアッシュ未反応量の測定

浅賀らの研究[6.6]を参考に、分析用試料 1g を 20cc の希塩酸(2mol/l)に入れ 30 分間攪拌し溶解後、不溶残分に 5%の炭酸ナトリウム溶液を 30cc 入れて溶解させ、残った溶液を 105℃で乾燥して不溶残分を測定した。これらの不溶残分は水和生成物の結合水量の補正を行う必要があるため、結合水量を補正した不溶残分を(式 6-3)より求め、この結合水量を補正した不溶残分と普通ポルトランドセメントにフライアッシュを内割で質量比 30%置換した未反応原材料を同様に溶解させ処理した残分との差分から(式 6-4)よりフライアッシュの反応率を算出した[6.7]。

$$b_d = (a_0 - a_d) / (a_0 / 100) \quad \text{(式 6-3)}$$

$$a_d = a_d' / (1 - IG_d / 100) \quad \text{(式 6-4)}$$

ここに、

b_d :材齢 d 日のフライアッシュの反応率(%)

a_0 :未水和時の混合セメントの不溶残分(%)

a_d :結合水量を補正した不溶残分(%)

a_d' :材齢 d 日の試料の不溶残分(%)

IG_d :材齢 d 日の試料の強熱減量(%)

(e) セメント鉱物及び水和物の定量

XRD/リートベルト法により TOPAS(Bruker AXS)を用い星野らの手法に従った[6.8]。定量は、エーライト(C₃S)、ビーライト(C₂S)、間隙質(C₃A、C₄AF)、ペリクレーズ(Periclase)、石こう(二水、半水)、水酸化カルシウム(CH)、エトリンガイトの各セメント鉱物、水和物と内部標準物質として α-Al₂O₃を定量対象とし C-S-H 及びフライアッシュを含む非晶質量を同時に測定した。その定量値と間隙水量(H)、選択溶解法によるフライアッシュ量、熱重量示差熱分析による CH 量から相組成を求めた。試験材齢は 1、3、7、14、28、91 日とした。

(f) ケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)のケイ酸鎖長の測定

本試験では、熱養生による水和反応の進行に伴って C-S-H のケイ酸の重合度が、変化する傾向を知るために、ケイ酸鎖の鎖長分布を測定した。ケイ酸鎖の鎖長分布の測定は、佐藤ら[6.9]の TMS 誘導体化法(TMS 法)に準じ、ペースト試

料に TMS 誘導化を行い、得られた TMS 誘導体をガスクロマトグラフィーにより分析し、単量体～6 量体までのケイ酸イオンの構成比(ケイ酸鎖の重合度)を測定した。また、ケイ酸鎖はシリケート相(C₃S、C₂S)及び C-S-H のシリケート成分の内訳に相当すると考えられるが、相組成の質量比とケイ酸鎖の鎖長分布のモル分率を単純に比較することはできない。また、セメント鉱物である C₃S や C₂S 中にはケイ酸イオンが単量体の状態で存在し、これらが水和することで C-S-H を生成する過程において、ケイ酸イオンは鎖状に重合し多量体にシフトするとされているが、未反応の C₃S、C₂S 由来のケイ酸鎖とセメント鉱物の水和及びフライアッシュのポゾラン反応により生成してできた C-S-H 由来のケイ酸鎖の区別は不可能である。そこで、既往の研究[6.9]に準じ、容積比に換算した。容積比への換算は、式 6-5 のとおり TMS 誘導体法により求めたケイ酸鎖のモル分率に鎖長数(m=1～6)とリートベルト法により求めた C₃S、C₂S、C-S-H の総シリケート相の容積を乗じることにより行った。その際、容積比へ正確に換算するには各鎖長の C-S-H の分子量と密度を用いて各鎖長の容積比を求める必要があるが、Ca と Si の結合割合(C/Si)、密度共に明確にされていないため、その鎖長(ケイ素(Si)数)に比例すると仮定し算出した。

$$F_{mn} = m \times M_{mn} \times V_n \quad (\text{式 6-5})$$

ここに、

材齢 n 日の m 量体構成比率 : $F_{mn}(m=1\sim6)(\text{vol.}\%)$

材齢 n 日の m 量体モル分率 : $M_{mn}(m=1\sim6)(\text{mol}\%)$

材齢 n 日の総シリケート総容積 : $V_n(\text{vol.}\%)$

また、3 量体以上のケイ酸鎖は構成比率が小さく重合の進行を適切に評価するのは難しい。そこで、便宜的に求めた 2～6 六量体の構成比率から式 6-6 を用いて平均重合度構成比を求め、さらに、式 6-7 より、練混ぜ前の未水和セメントの平均重合度構成比 (DP₀) に対する各材齢の平均重合度構成比 (DP_n) の変化率 (R_n) を求めケイ酸鎖の重合の進行の指標とした。

$$DP_n = \sum_{m=2}^6 F_{mn} \quad (\text{式 6-6})$$

ここに、

材齢 n 日の 2～6 量体の平均重合度構成比 : DP_n

$$R_n = DP_n / DP_0 \quad (\text{式 6-7})$$

ここに、

材齢 n 日の平均重合度構成比の変化率 : R_n

未水和セメント 2～6 量体の平均重合度構成比 : DP₀

材齢 n 日の 2~6 量体の平均重合度構成比 : DP_n

6.3.2 圧縮強度特性

標準的蒸気養生³である A20B15C4D を基準として、前置時間、昇温時間、最高温度継続時間、降温時間を短縮させた場合と全蒸気養生工程を短縮させた A05B30C2 及び封かん常温養生における各々の圧縮強度との比較を図 6.3.2 に示す。図 6.3.2(A)は、前置時間を 2h から 0.5h に短くした場合、図 6.3.2(B)は、昇温速度を 15°C/h から 30°C/h に早めた場合、図 6.3.2(C)は、最高温度継続時間を 4h から 2h に短くした場合であり、いずれも初期材齢 1 日から材齢 91 日まで顕著な圧縮強度の減少は認められなかった。図 6.3.2(D)は、降温速度を 4.5°C/h の徐冷降下から 45°C/h の急冷降下に変化させた場合であり、初期材齢 1 日に約 10%低下し、材齢 7 日で同等となり材齢 28 日以降 5%程度増加した。図 6.3.2(E)は促進蒸気養生の A05B30C2 においては、標準的蒸気養生の A20B15C4D と比較し、初期材齢 1 日に約 35%、材齢 3 日で約 20%低下し、材齢 28 日以降は同等となった。図 6.3.2(F)において、標準的蒸気養生の A20B15C4D は封かん常温養生と比較し、材齢 1 日に約 70%、材齢 3 日に約 25%高くなったが、材齢 7 日に同等となり、材齢 14 日以降は 10%以上低下した。

³ 標準的蒸気養生とは、土木学会 2007 年制定コンクリート標準示方書[施工編：特殊コンクリート]14 章向上製品 14.5.5 養生 等で示されている標準的な養生をいう。

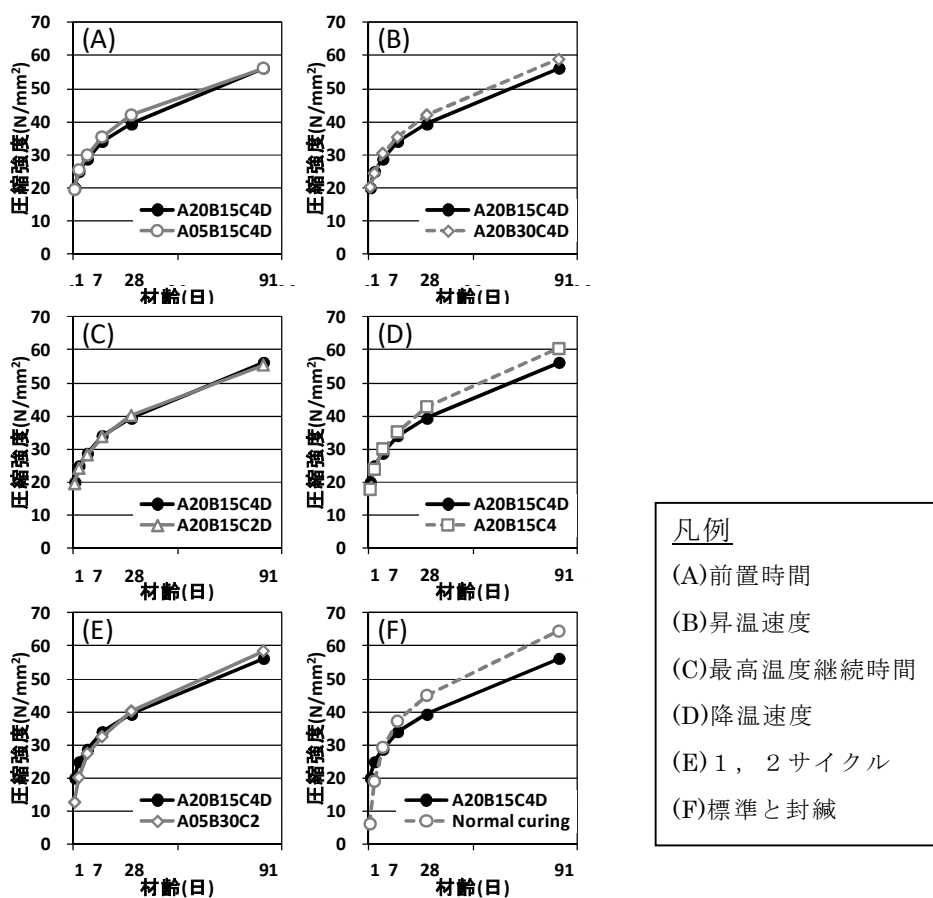


図 6.3.2 圧縮強度への影響

6.3.3 硬化体の相組成

図 6.3.3 に、標準的蒸気養生である A20B15C4D を基準として、前置時間を短縮させた場合の A05B15C4D と全蒸気養生工程を短縮させた A05B30C2 の XRD/リートベルト法により得られたセメント硬化体の XRD パターンをそれぞれ示す。前置時間の短縮は凝結始発時間前に温度上昇させることで、間隙質の水和反応促進によって偽凝結を起こしセメントからのカルシウムの溶出を抑制して、 C_3S と C_2S の水和反応の進行を阻害することが考えられたが、水和反応の遅延は認められなかった。さらに、膨張性があるエトリンガイトの異常生成は認められず、エトリンガイトから転化されるモノサルフェートの生成も認められなかった。

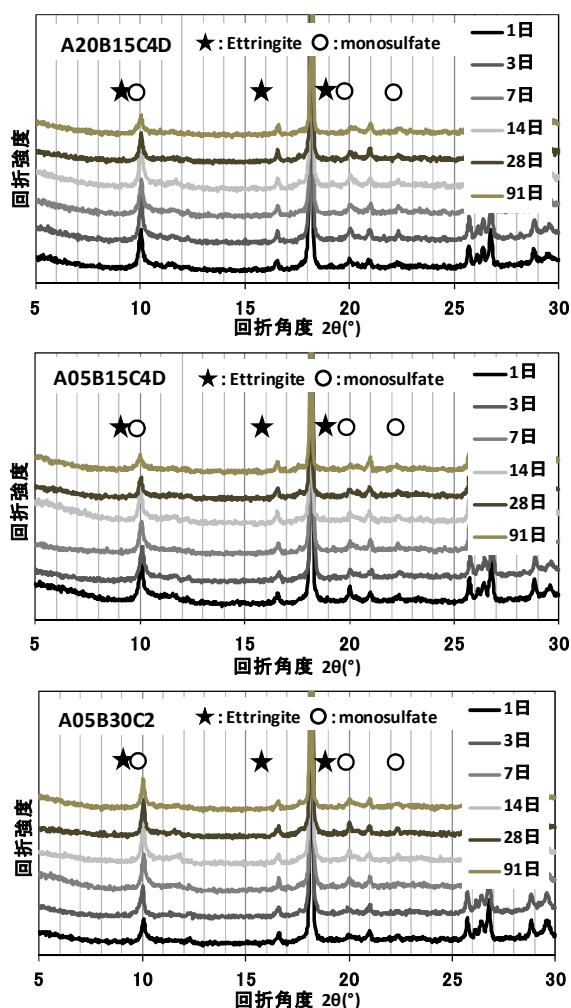


図 6.3.3 XRD パターン

6.3.4 エーライト(C₃S)反応率

標準的蒸気養生である A20B15C4D を基準として、前置時間、昇温時間、最高温度継続時間、降温時間を短縮させた場合と全蒸気養生工程を短縮させた A05B30C2 及び封かん常温養生における各々のエーライト(C₃S)の反応率との比較を図 6.3.4 に示す。図 6.3.4(A)～(D)は、それぞれ前置時間、昇温時間、最高温度継続時間、降温時間を短縮した場合の試験結果であり、いずれも初期から長期材齢まで C₃S の反応率への影響は認められなかった。図 6.3.4(E)は、促進蒸気養生の A05B30C2 は、標準的蒸気養生の A20B15C4D と比較して、初期材齢 1 日に約 15%低下したが、材齢 7 日以降は同等となった。図 6.3.4(F)より、標準的蒸気養生の A20B15C4D は、蒸気養生を行わない封かん常温養生と比較して、材齢 1 日に約 30%、材齢 3 日に約 15%高くなったが、材齢 7 日以降は同等となった。

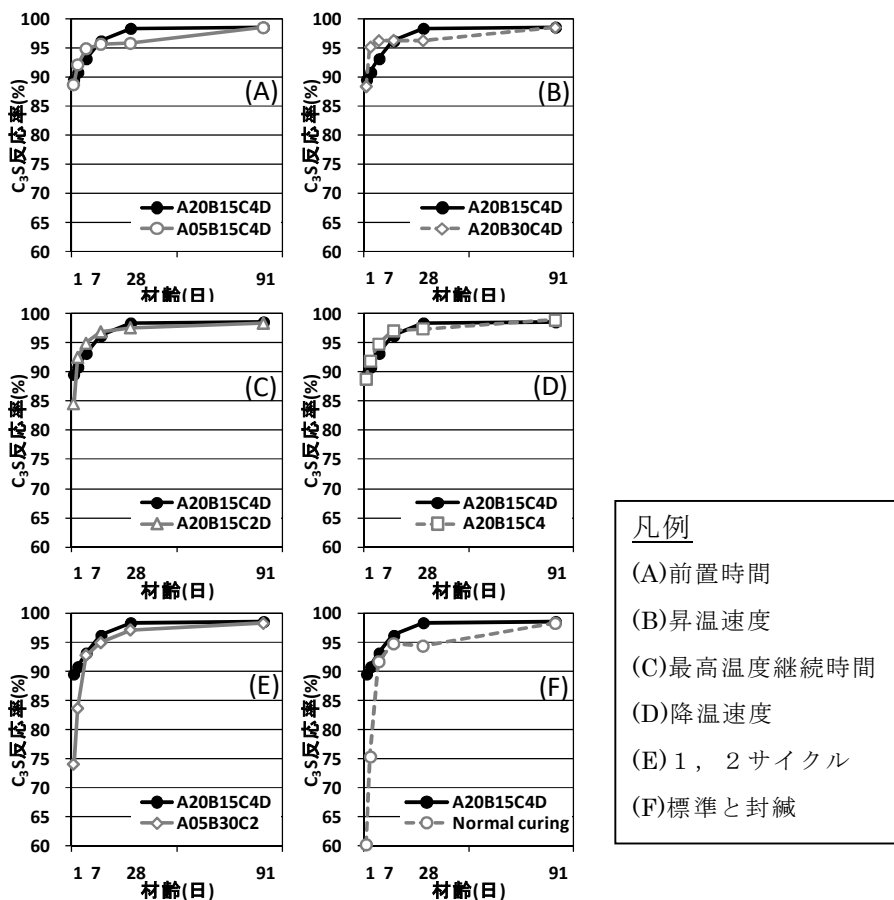


図 6.3.4 エーライト(C3S)反応率の影響

6.3.5 ビーライト(C2S)の反応率

標準的蒸気養生である A20B15C4D を基準として、前置時間、昇温時間、最高温度継続時間、降温時間を短縮させた場合と全蒸気養生工程を短縮させた A05B30C2 及び封かん常温養生における各々のビーライト(C₂S)の反応率との比較を図 6.3.5 に示す。図 6.3.5(A)より、前置時間を短縮した場合、材齢 1 日に約 5%低下したが、材齢 3 日以降同等となり、材齢 28 日以降に約 5%以上高くなった。図 6.3.5(B)より、昇温時間を短縮した場合、材齢 7 日までは同等となったが、材齢 14 日、28 日にそれぞれ約 3%、10%高くなり、材齢 91 日に 5%以上の低下が認められた。図 6.3.5(C)より、最高温度継続時間を短縮した場合、材齢 3 日まで同等となり、材齢 7 日以降に約 5%以上高くなった。図 6.3.5(D)より、降温時間を短縮した場合、材齢 1 日は約 10%低下したが、材齢 3 日で同等となり、材齢 7 日以降は約 3%以上高くなった。図 6.3.5(E)より、促進蒸気養生の A05B30C2 は、標準的蒸気養生の A20B15C4D と比較し、材齢 1 日は同等とな

り、材齢3日以降に5%以上高くなった。図6.3.5(F)より、標準的蒸気養生のA20B15C4Dは蒸気養生を行わない封かん常温養生と比較し、材齢7日まではほぼ同等となり、材齢14日以降に10%近く高くなった。

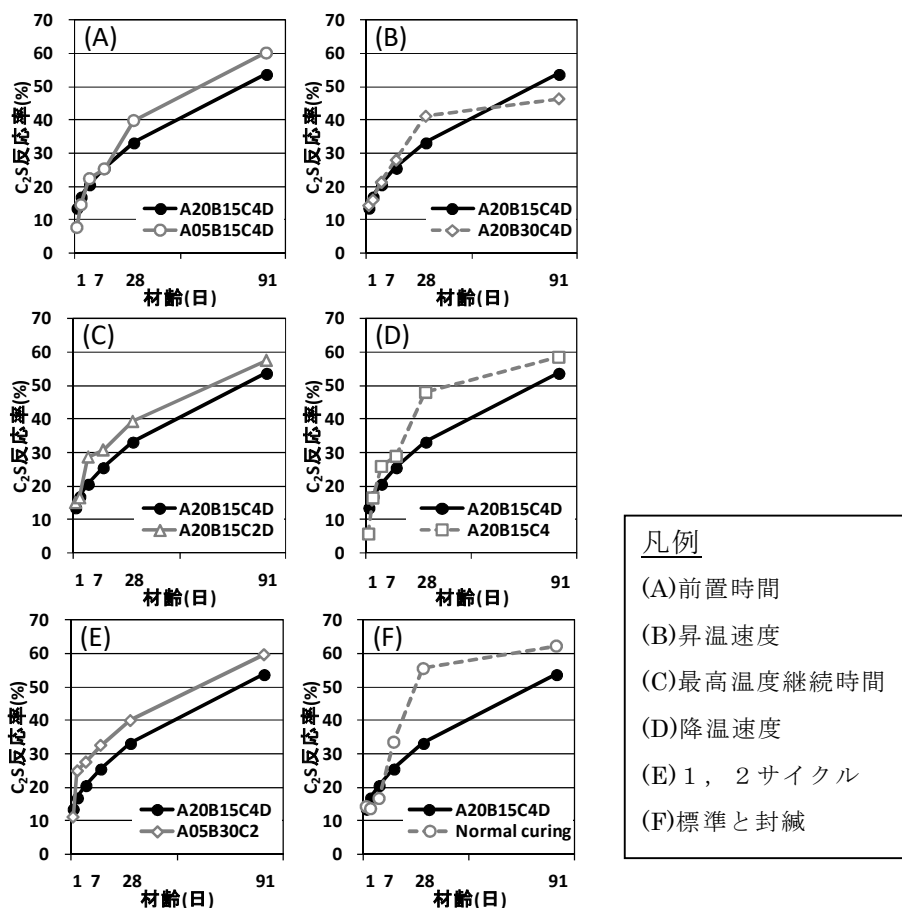


図 6.3.5 ビーライト(C₂S)反応率の影響

6.3.6 フライアッシュ(FA)の反応率

標準的蒸気養生である A20B15C4D を基準として、前置時間、昇温時間、最高温度継続時間、降温時間を短縮させた場合と全蒸気養生工程を短縮させた A05B30C2 及び封かん常温養生における各々のフライアッシュの反応率との比較を図 6.3.6 に示す。図 6.3.6(A)～図 6.3.6(D)は、それぞれ前置時間、昇温時間、最高温度継続時間、降温時間を短縮した場合、初期材齢から長期材齢までほぼ同等となった。図 6.3.6(E)より、促進蒸気養生の A05B30C2 は、標準的蒸気養生の A20B15C4D と比較し、全材齢で 5%～10%の低下が認められた。図 3.6.6(F)より、標準的蒸気養生の A20B15C4D は蒸気養生を行わない封かん常温養生と比較し、材齢 28 日までは約 10%以上低下したが、材齢 91 日に同等となった。

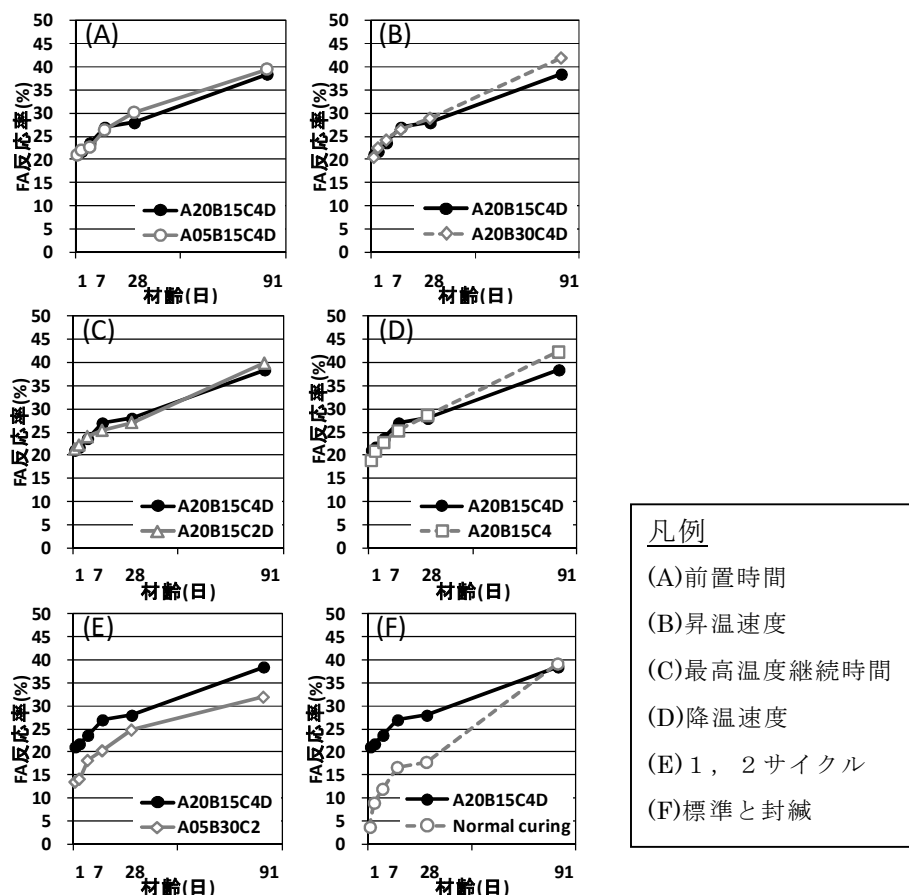


図 6.3.6 フライアッシュ(FA)反応率の影響

6.3.7 ケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)生成量

標準的蒸気養生である A20B15C4D を基準として、前置時間、昇温時間、最高温度継続時間、降温時間を短縮させた場合と全蒸気養生工程を短縮させた A05B30C2 及び封かん常温養生における各々の C-S-H 生成量との比較を図 6.3.7 に示す。図 6.3.7(A)~(D)は、それぞれ前置時間、昇温時間、最高温度継続時間、降温時間を短縮した場合、全材齢でほぼ同等の生成量となった。図 6.3.7(E)より、促進蒸気養生の A05B30C2 は、標準的蒸気養生の A20B15C4D と比較し、材齢 1 日で約 10%、材齢 14 日まで 5%以上少なくなった。しかし、材齢 28 日以降同等の生成量となった。図 6.3.7(F)より、標準的蒸気養生の A20B15C4D は蒸気養生を行わない封かん常温養生と比較し、材齢 3 日まで 10%以上多くなったが、材齢 14 日以降同等となった。この結果は、尾畑らの研究[6.10]において、普通ポルトランドセメントを用いたセメントペーストに対して蒸気養生を行った場合の C-S-H 生成量と比較して、フライアッシュ反応率が増進することにより材齢 28 日以降の C-S-H 生成量の増進が大きい結果となった。

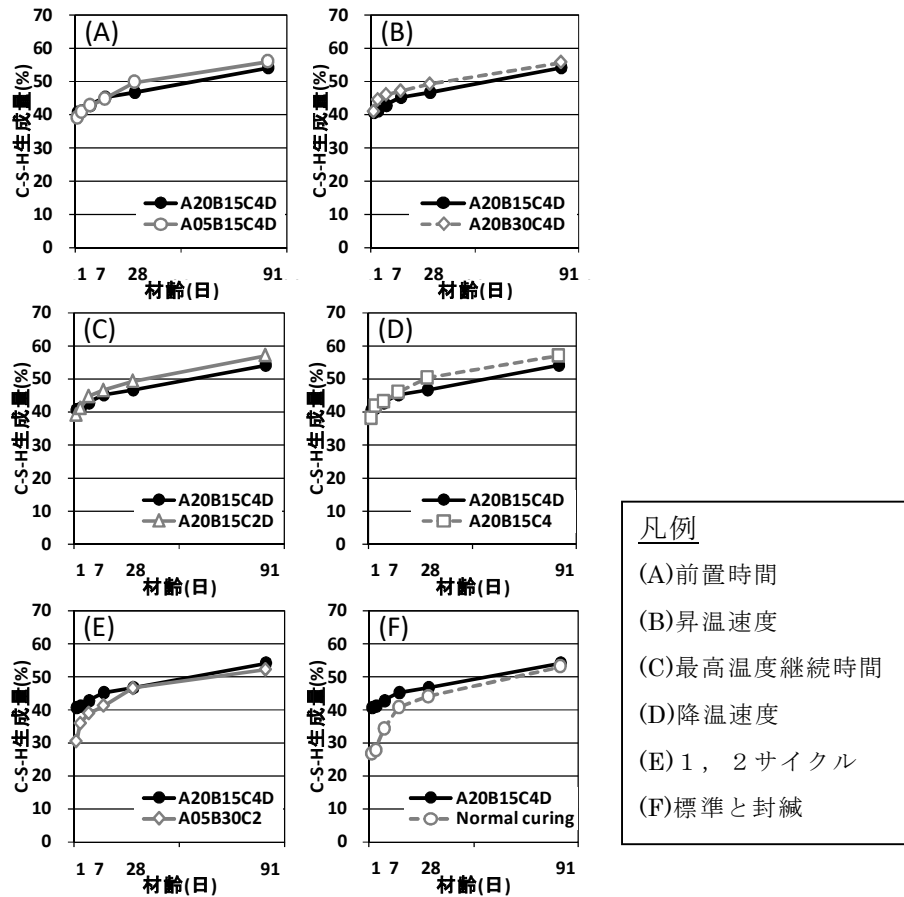


図 6.3.7 ケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)生成量の影響

6.3.8 ケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)のケイ酸鎖長の重合度

標準的蒸気養生である A20B15C4D を基準として、前置時間、昇温時間、最高温度継続時間、降温時間を短縮させた場合と全蒸気養生工程を短縮させた A05B30C2 及び封かん常温養生における各々のケイ酸カルシウム水和物 (C-S-H)のケイ酸鎖長の比較を 図 6.3.8 に示す。図 6.3.8(A)より前置時間の短縮には影響を受けず、図 6.3.8(B)、より昇温時間の短縮で、材齢 7 日以降に重合度の増加傾向が認められた。図 6.3.8(C)より最高温度継続時間の短縮で初期材齢では重合度が低下し、材齢 28 日以降は同程度となった。図 6.3.8(D)より降温時間の短縮で初期材齢から材齢 28 日まで重合度は低下したが、その後増進して材齢 91 日で同程度となった。図 6.3.8(E)より、促進蒸気養生の A05B30C2 は、標準的蒸気養生の A20B15C4D と比較し、初期材齢では減少し 28 日以降は同程度になった。図 6.3.8(F)より、標準的蒸気養生は封かん常温養生と比較して、材齢 28 日までは約 10%以上増加したが、材齢 91 日に若干下回った。

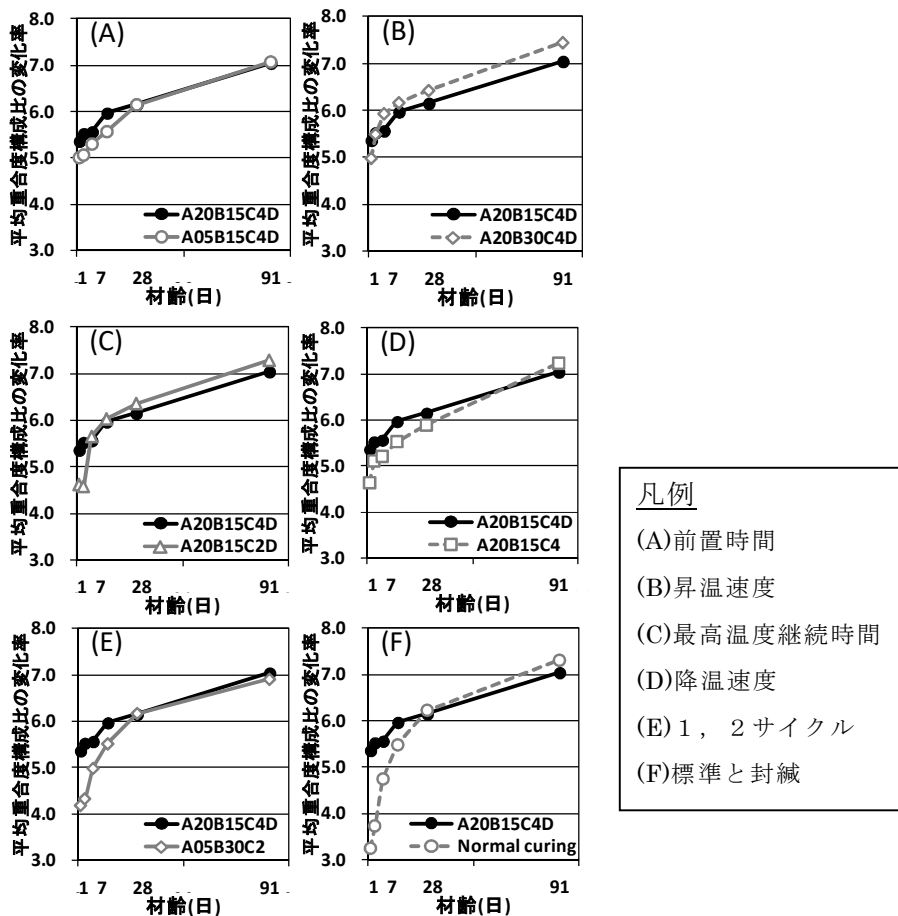


図 6.3.8 ケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)のケイ酸鎖長の重合度の影響

図 6.3.9 は、C-S-H 生成量とエーライト、ビーライト及びフライアッシュの反応率の関係を示したものである。いずれの関係性も高い線形関係が見られる。これは、それぞれの鉱物の反応が C-S-H 生成に直接的に寄与していることを示唆するものである。また、図 6.3.10 は、圧縮強度と C-S-H 生成量及び重合度の関係を示したものでこちらも高い線形関係が見られる。これらの結果は、蒸気養生履歴パターンに依らず C-S-H 生成量又は C-S-H 重合度によりその性能を評価出来ることを示唆するものである。図 6.3.11 は、C-S-H 生成量と C-S-H 平均重合度の関係を示した。この図から C-S-H 生成量が増加することで、平均重合度構成比も増加し、非常に高い相関関係がある。これは C-S-H の鎖長構造の長鎖化を示唆するもので、C-S-H 生成量が増加しないと起こらない現象と考えられる。TMS 法による重合度の算定では、六量体以上のケイ酸鎖は検出されないことから、フライアッシュのような分子量の大きいシリカは検出対象外となる。したがって、標準養生履歴の工程中の短時間では、C-S-H の生成が少ないと考えられ、普通ポルトランドセメント由来の C-S-H が重合したと示唆される。

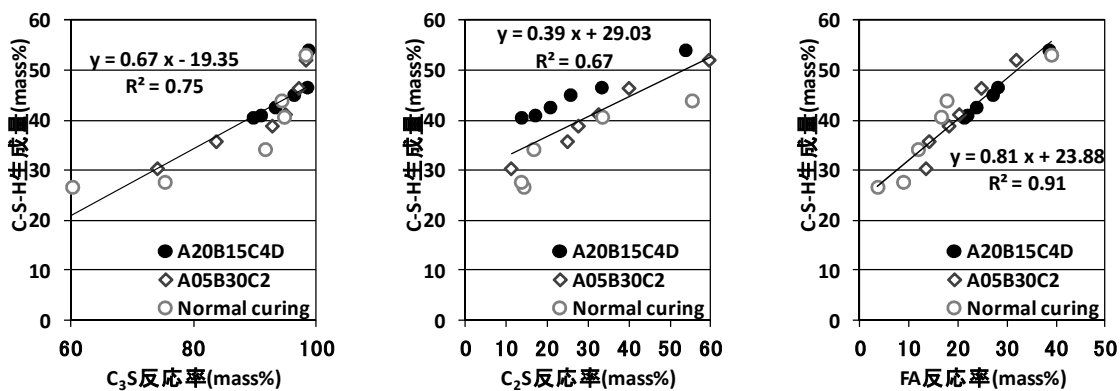


図 6.3.9 C-S-H 生成量

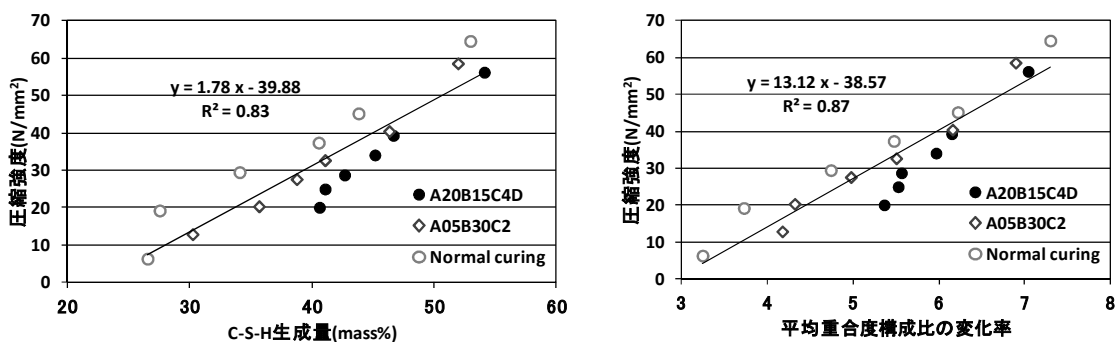


図 6.3.10 圧縮強度と C-S-H 生成量及び重合度の関係

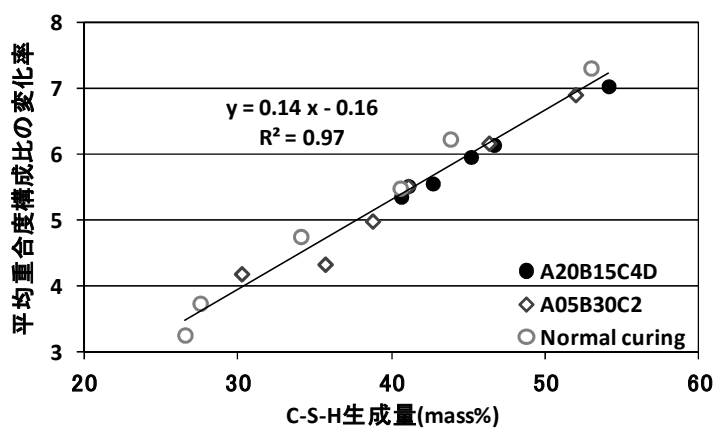


図 6.3.11 C-S-H 生成量と C-S-H 平均重合度との関係

6.3.9 特性のまとめ

圧縮強度は、前置時間、昇温時間、最高温度継続時間、降温時間の各々を短縮しても低下は認められなかった。この圧縮強度結果を水和反応から見ると C_3S と FA の反応率は、前置時間、昇温時間、最高温度継続時間、降温時間の各々を短縮しても低下は認められなかった。一方、 C_2S 反応率は、前置時間、昇温時間を短縮しても低下は認められず、最高温度継続時間、降温時間を短縮すると材齢 7 日以降に増進することが認められた。したがって、 $C\cdot S\cdot H$ 生成量は、前置時間、昇温時間、最高温度継続時間、降温時間の各々を短縮しても減少は認められず最高温度継続時間と降温時間の短縮で材齢 28 日以降、若干の増加が認められた。 $C\cdot S\cdot H$ のケイ酸鎖長の重合は、昇温時間の短縮（昇温速度の増加）で進行することが認められた。最高温度継続時間と降温時間の短縮で $C\cdot S\cdot H$ の生成量は減少しないが、材齢 28 日までケイ酸鎖の重合は遅延することが認められた。一般蒸気養生に比較して、促進蒸気養生は、 C_3S の反応率は初期材齢で大きく低下したが、7 日以降は同程度となり、 FA の反応率は全材齢で約 10% 程度低下したが、それに反して C_2S 反応率は材齢 7 日以降、約 10% 高くなった。それに連関して $C\cdot S\cdot H$ 量とそのケイ酸鎖の重合度も材齢 28 日以降は同程度になった。その結果、圧縮強度は、初期材齢で低下したが材齢 14 日以降は同等になった。

フライアッシュセメントは、標準的蒸気養生履歴と促進蒸気養生履歴でフライアッシュ (FA) 反応率及びエーライト (C_3S) 反応率並びに $C\cdot S\cdot H$ 生成量はほとんど同じであるが、ビーライト (C_2S) 反応率では促進蒸気養生が高い生成率を示している。

6.4 蒸気養生を受ける早強フライアッシュセメント硬化体の長期特性

早強ポルトランドセメントにフライアッシュ混和での性能を確認を行った。

6.4.1 試験概要

(1) 使用材料と配合条件

使用材料として、結合材は普通ポルトランドセメント及び早強ポルトランドセメントをフライアッシュⅡ種により質量比で内割30%置換したものとした。細骨材は(社)セメント協会のセメント強さ用標準砂を用いた。表6.4.1に使用材料の諸元を示す。今回の実験ではモルタルにおいて圧縮強度試験を行い、セメントペーストにおいて水和反応を検討した。モルタル配合を表6.4.2に示す。ペースト配合はモルタル配合から細骨材を除いたものとした。

表 6.4.1 使用材料

材料		諸元	備考
セメント	普通ポルトランドセメント	N 密度=3.16(g/cm ²)、 比表面積=3,260(cm ² /g)	住友大阪セメント社製 (バージン原材料仕様)
	早強ポルトランドセメント	H 密度=3.13(g/cm ²)、 比表面積=4,720(cm ² /g)	
混和材	フライアッシュⅡ種	FA 密度=2.21(g/cm ²)、 比表面積=4,030(cm ² /g) 非晶質量 39.4(%)	電源開発(株) 磯子火力発電所産
細骨材	セメント強さ試験用標準砂	S 表乾密度=2.62(g/cm ²)、 吸水率=0.42(%)	(社)セメント協会製セメント強さ試験用標準砂

表 6.4.2 モルタル配合

記号	セメント種	水セメント比 W/C(%)	水結合材比 W/(C+FA)(%)	単位量(kg/m ³)				
				W	C		FA	S
					N	H		
NPC	普通ポルトランドセメント	50	50	300	599	0	0	1348
NFC		71		292	410	0	175	1316
HPC	早強ポルトランドセメント	50		299	0	598	0	1346
HFC		71		293	0	410	175	1348

(2) 蒸気養生方法

図6.4.1に示すように蒸気養生履歴のうち、前置時間、昇温速度、最高温度継続時間、降温速度からなり、前置温度を室温と同じ20℃、最高温度は65℃一定とした。表6.4.3に示すように1日1サイクルの標準的蒸気養生は、前置時間を2h、昇温速度を15℃/h、最高温度継続時間を4h、降温速度を4.5℃/hの徐冷

降下としたプログラムであり1日2サイクルの促進蒸気養生は、前置時間を0.5h、昇温速度を30°C/h、最高温度継続時間を2h、降温速度を最高温度から常温20°Cの環境条件下に暴露した急冷降下(実測モルタル内中心温度45°C/h)したプログラムである。

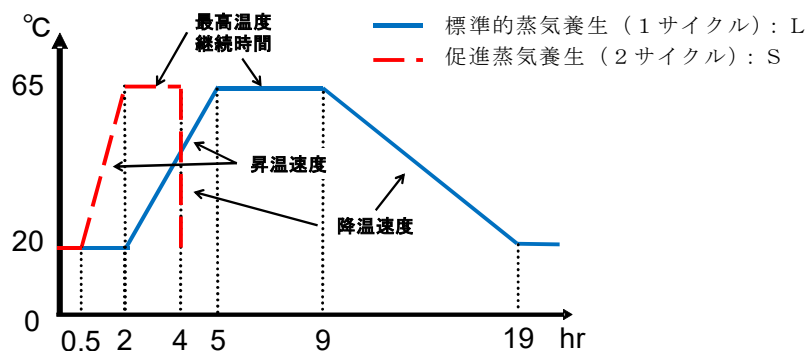


図 6.4.1 蒸気養生履歴パターン

表 6.4.3 材齢 1 日までの蒸気養生履歴パターン

蒸気養生パターン *1	①前置		②昇温		③最高温度		④降温		⑤後置		
	温度(°C)	時間(h)	速度(°C/h)	時間(h)	温度(°C)	継続時間(h)	速度(°C/h)	時間(h)	温度(°C)	時間(h)	
1	N-2-15-65-4-4.5	20	2	15	3	65	4	4.5	10	20	5
16	N-0.5-30-65-2-0	20	0.5	30	1.5	65	2	-	0	20	20

*1 蒸気養生パターン名は、「セメント種-前置時間-昇温速度-最高温度-最高温度継続時間-降温速度」を示す

(3) 試験項目

(a) 圧縮強度試験

JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じて行った。蒸気養生パターンごとにφ50×100mmのモルタル供試体を缶モールドで作製し、蒸気養生終了後は試験材齢まで20°C恒温でアルミテープにより封緘養生とした。試験材齢は1、3、7、14、28、91日とした。

(b) 分析用試料調整

硬化したセメントペースト供試体をダイヤモンドカッターでカットし、2.5mm角に粉砕した試料をアセトンで1日浸漬させて水和停止を行い、40°C乾燥

炉内に1日入れてアセトンを蒸発させた試料を分析用試料とした。

(c) 水酸化カルシウム(CH)の生成量の定量

分析用試料を材齢1、3、7、14、28、91日において、熱重量示差熱分析(TG-DTA)によって、水酸化カルシウム存在量を測定した。本研究のCH量は、水和停止後のサンプル質量に対する測定値とした。

(d) フライアッシュ未反応量の測定

浅賀らの研究[6.7]を参考に、分析用試料1gを20mlの希塩酸(2mol/l)に入れ30分間攪拌し溶解後、不溶残分に5%の炭酸ナトリウム溶液を30ml入れて溶解させ、残った溶液を105℃で乾燥して不溶残分を測定した。これらの不溶残分は水和生成物の結合水量の補正を行う必要があるため、結合水量を補正した不溶残分を式(6-8)より求め、この結合水量を補正した不溶残分と普通ポルトランドセメントにフライアッシュ(FA)を内割で質量比30%置換した未反応原材料を同様に溶解させ処理した残分との差分から式(6-9)よりフライアッシュの反応率を算出した[6.8]。

$$a_d = a_d' / (1 - IG_d / 100) \quad (\text{式 6-8})$$

$$b_d = (a_0 - a_d) / (a_0 / 100) \quad (\text{式 6-9})$$

ここに、

b_d : 材齢 d 日のフライアッシュの反応率(%)

a_0 : 未水和時の混合セメントの不溶残分(%)

a_d : 結合水量を補正した不溶残分(%)

a_d' : 材齢 d 日の試料の不溶残分(%)

IG_d : 材齢 d 日の試料の強熱減量(%)

(e) セメント鉱物および水和物の定量

XRD/リートベルによりTOPAS(Bruker AXS)を用いて、星野ら[6.9]の手法に従った。定量は、エーライト(C_3S)、ビーライト(C_2S)、間隙質(C_3A 、 C_4AF)、酸化マグネシウム(MgO)、二水セッコウ(Gyp)、半水セッコウ(Bas)、水酸化カルシウム(CH)、エトリンガイト(AFt)、モノサルフェート(AFm)、FAはピークの検出された鉱物(Mullite、Quartz、Magnetite)を対象とした。内部標準物質として $\alpha-Al_2O_3$ (10mass%)を定量対象として、ケイ酸カルシウム水和物($C-S-H$)及びフライアッシュを含む非晶質量を同時に定量した。さらに、その定量値と選択溶解法によるフライアッシュ量、熱重量示差熱分析によるCH量から相組成を求めた。試験材齢は1、3、7、14、28、91日とした。

6.4.2 圧縮強度特性

普通ポルトランドセメントのみの配合（NPC）および普通ポルトランドセメントにフライアッシュを混和した配合（NFC）、さらに早強ポルトランドセメントのみの配合（HPC）及び早強ポルトランドセメントにフライアッシュを混和した配合（HFC）をそれぞれ標準的蒸気養生（L）及び促進蒸気養生（S）した場合の圧縮強度発現結果を図 6.4.2 に示す。図 6.4.2(A)に示すように普通ポルトランドセメントの配合において促進蒸気養生した場合の圧縮強度は、標準的蒸気養生した場合と比較して材齢 3 日までは約 15%低下したが、7 日以降は大きくなり材齢の経過に伴い増加率が大きくなった。一方、図 6.4.2(C)に示すように早強ポルトランドセメントの配合において促進蒸気養生した場合は、標準的蒸気養生した場合と比較して材齢 28 日までは各材齢で約 10%低下し材齢 91 日で同等になった。また、標準的蒸気養生の場合、早強ポルトランドセメントは、普通ポルトランドセメントに比較して、材齢の 91 日まで各材齢で約 15%大きくなった。次に、フライアッシュを混和した配合では、図 6.4.2 (B) に示すように普通ポルトランドセメントをベースにフライアッシュを混和した配合では、促進蒸気養生した場合は標準的蒸気養生した場合と比較して初期材齢 1 日では約 40%、3 日では 20%低下したが、7 日以降は同等となった。図 6.4.2(D)に示すように早強ポルトランドセメントをベースにフライアッシュを混和した配合では、促進蒸気養生した場合は標準的蒸気養生した場合と比較して初期材齢 1 日では約 15%低下したが 3 日以降は同等となった

以上のことから、普通ポルトランドセメントの配合では、促進蒸気養生した場合は標準的蒸気養生と比較して初期材齢では圧縮強度発現は低くなるが、長期材齢では強度増進率は大きくなり、一方、早強ポルトランドセメントでは、促進蒸気養生した場合は標準的蒸気養生と比較して初期材齢から強度発現は低くなり、材齢 91 日で漸く同程度になることが分かった。また、フライアッシュを混和した配合では、ベースセメントが普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメントともに促進蒸気養生した場合は標準的蒸気養生した場合と比較して初期材齢 7 日程度までは圧縮強度発現は低下するが、その後は同等となり大きな強度差が生じないことが分かった。

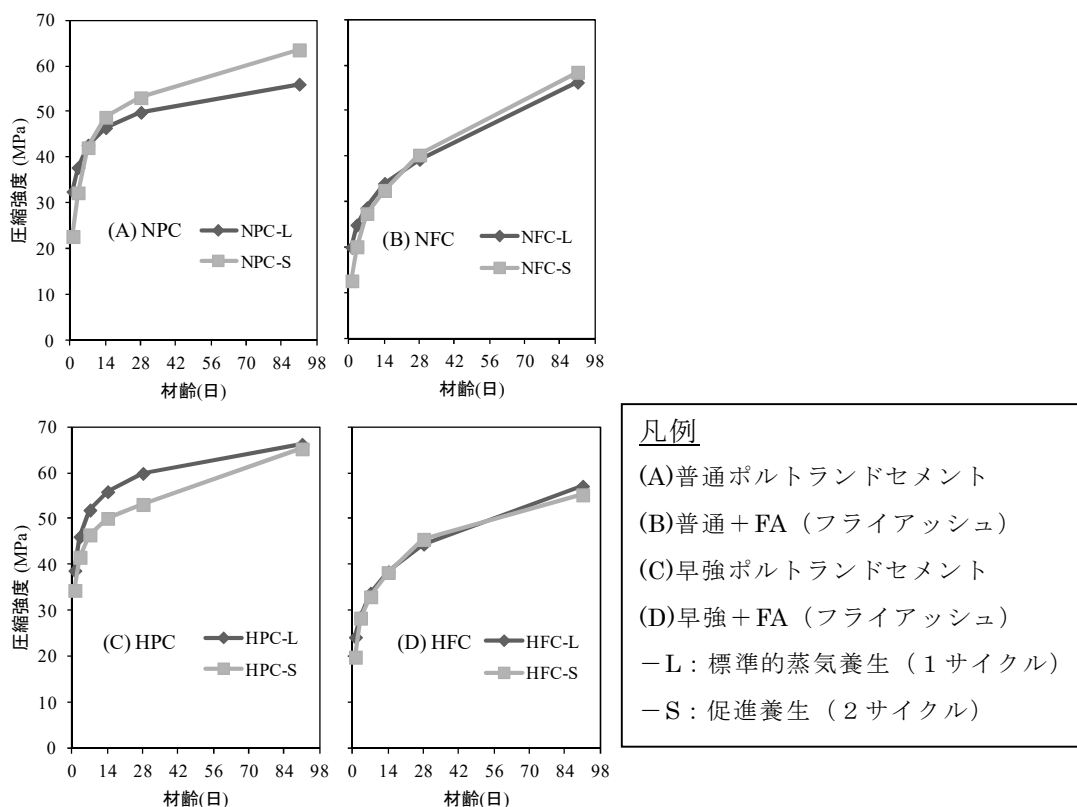


図 6.4.2 圧縮強度試験結果

6.4.3 硬化体の相組成

普通ポルトランドセメントのみの配合 (NPC) 及び普通ポルトランドセメントにフライアッシュを混和した配合 (NFC)、さらに早強ポルトランドセメントのみの配合 (HPC) 及び早強ポルトランドセメントにフライアッシュを混和した配合 (HFC) をそれぞれ標準的蒸気養生 (L) 及び促進蒸気養生 (S) した場合の XRD/リートベルト法により得られたセメント硬化体の相組成を図 6.4.3 に示す。普通ポルトランドセメントの配合において、促進蒸気養生した場合

(NPC-S) の C_3S 、 C_2S の反応率は、標準的蒸気養生した場合 (NPC-L) と比較して、材齢 7 日までは大きく低下したが、その後は同程度となった。一方、早強ポルトランドセメントの配合においては、促進蒸気養生した場合 (HPC-S) の C_3S 、 C_2S の反応率は、標準的蒸気養生した場合 (HPC-L) と比較して、材齢 1 日では低下したが、その後は同程度となった。普通ポルトランドセメントまたは早強ポルトランドセメントをベースセメントとしてフライアッシュを混和した配合におけるフライアッシュの反応率は、標準的蒸気養生、促進蒸気養生ともに普通ポルトランドセメントベースにした場合 (NFC-L、NFC-S) は、早強ポルトランドセメントの場合 (HFC-L、HFC-S) と比較して半減した。図

6.4.4に示すように、エトリンガイトの大きなピークは材齢1日から91日まで、すべての配合と蒸気養生プログラムで検出されなかった。また、エトリンガイトから転化するモノサルフェートの生成は、普通ポルトランドセメントの配合（図6.4.4(A)、図6.4.4(B)）と比較して早強ポルトランドセメントの配合（図6.4.4(C)、図6.4.4(D)）は少なくなることが認められた。

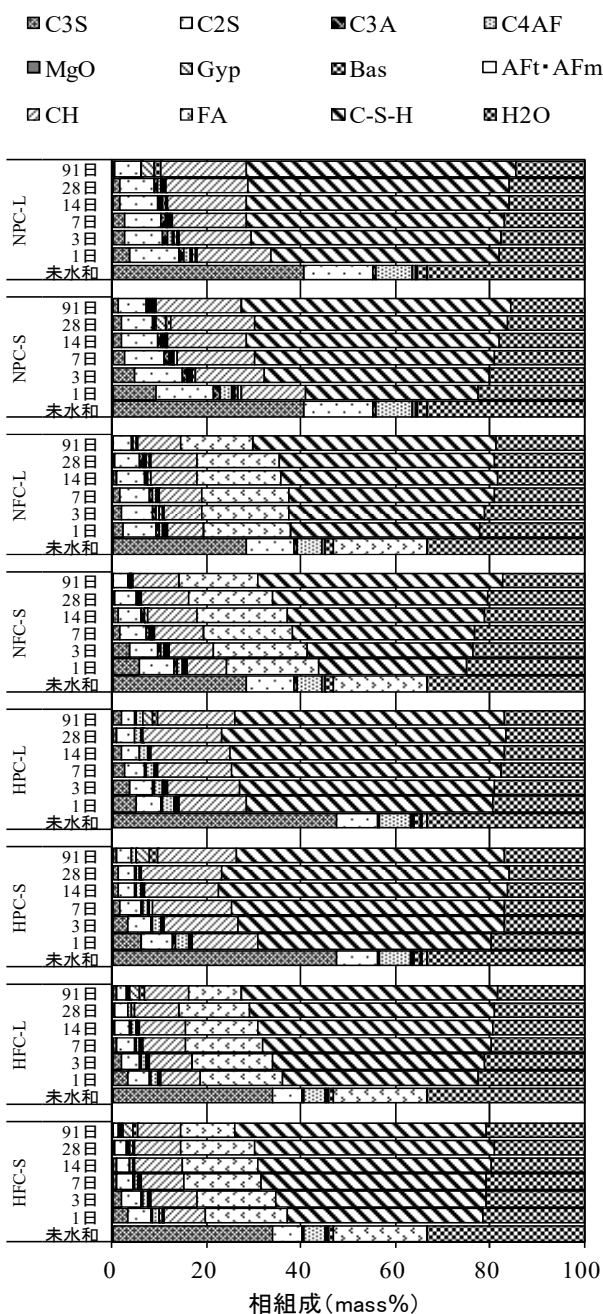


図 6.4.3 相組成

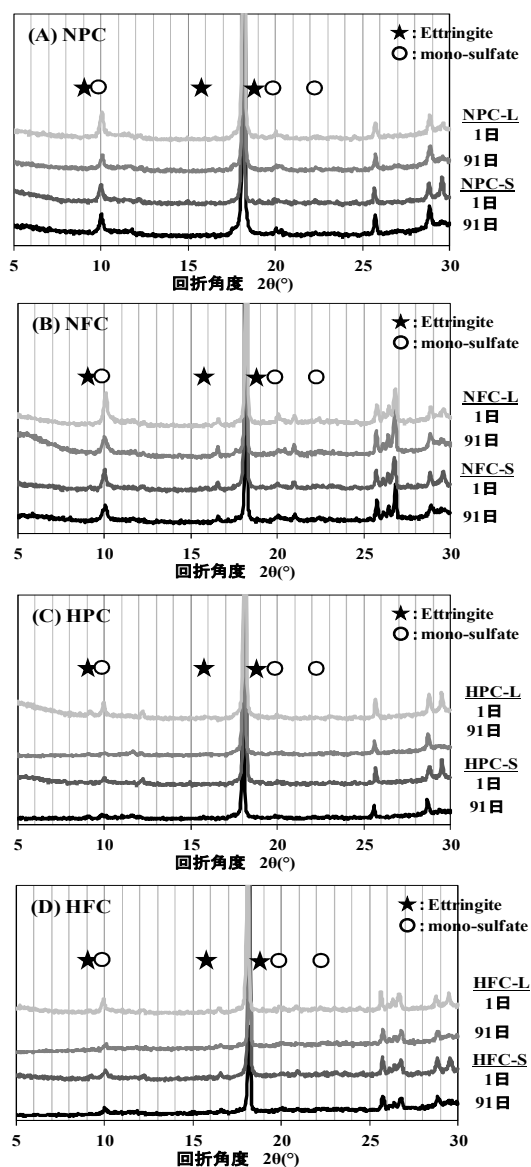


図 6.4.4 XRD パターン

6.4.4 エーライト(C₃S)の反応率

普通ポルトランドセメントのみの配合 (NPC) 及び普通ポルトランドセメントにフライアッシュを混和した配合 (NFC)、さらに、早強ポルトランドセメントのみの配合 (HPC) 及び早強ポルトランドセメントにフライアッシュを混和した配合 (HFC) をそれぞれ標準的蒸気養生 (L) 及び促進蒸気養生 (S) した場合のセメント鉱物の内、エーライト (C₃S) の反応率を図 6.4.5 に示す。図 6.4.5(A)、図 6.4.5 (B) に示すように、普通ポルトランドセメント及び普通ポルトランドセメントをベースにフライアッシュを混和した配合において促進蒸気養生した場合の C₃S の反応率は、標準的蒸気養生した場合と比較して材齢 3 日までは低下したが、7 日以降は同程度となった。一方、図 6.4.5(C)、図 6.4.5(D) に示すように早強ポルトランドセメント及び早強ポルトランドセメントをベースにフライアッシュを混和した配合において促進蒸気養生した場合の C₃S の反応率は、標準的蒸気養生した場合と比較して大きな違いが生じなかった。また、普通ポルトランドセメントと早強ポルトランドセメントの配合並びに普通ポルトランドセメント及び早強ポルトランドセメントをベースにフライアッシュを混和した配合は、蒸気養生条件に関わらず、材齢 14 日以降の C₃S の反応率は 95% 以上となり材齢 91 日には 98% に達しほぼすべてが反応した。

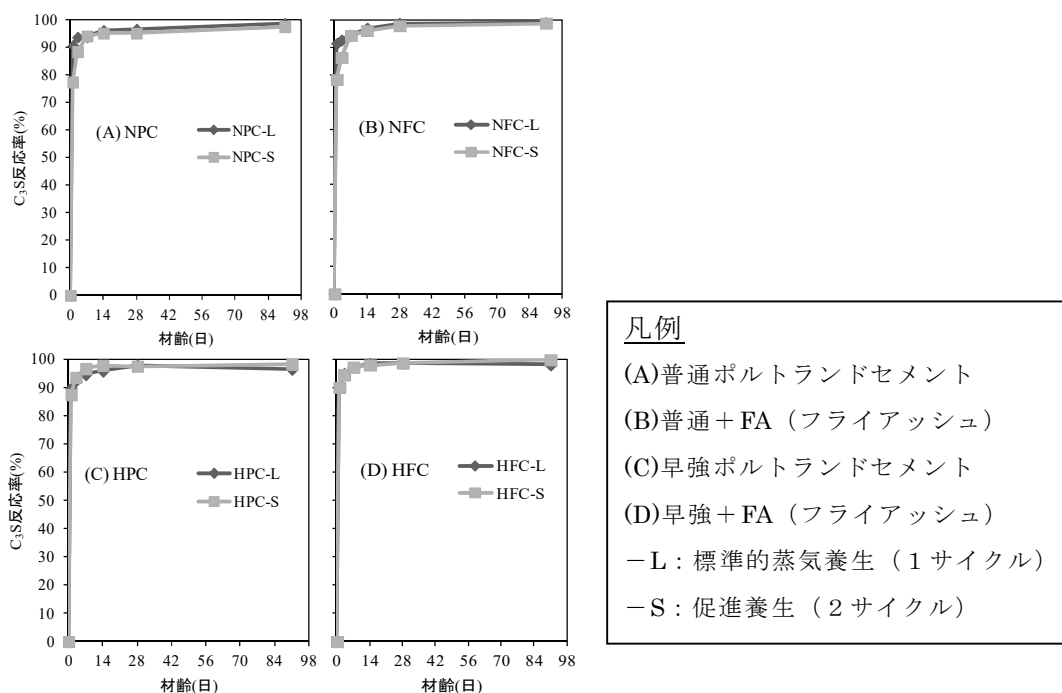


図 6.4.5 エーライト(C₃S)反応率

6.4.5 ビーライト(C2S)の反応率

普通ポルトランドセメントのみの配合 (NPC) 及び普通ポルトランドセメントにフライアッシュを混和した配合 (NFC)、さらに早強ポルトランドセメントのみの配合 (HPC) 及び早強ポルトランドセメントにフライアッシュを混和した配合 (HFC) をそれぞれ標準的蒸気養生 (L) および促進蒸気養生 (S) した場合のセメント鉱物の内、ビーライト (C₂S) の反応率を図 6.4.6 に示す。図 6.4.6(A) に示すように、普通ポルトランドセメントの配合において促進蒸気養生した場合のセメント鉱物の反応率は、標準的蒸気養生した場合と比較して材齢 1 日では約 45% 低下、材齢 3 日では約 30%、材齢 7 日では約 10% したが、その後は同程度となった。一方、図 6.4.6 (C) に示すように早強ポルトランドセメントの配合においては材齢 1 日では約 35% 低下したが、その後は同程度となった。図 6.4.6 (B) に示すように普通ポルトランドセメントをベースにフライアッシュを混和した配合では、促進蒸気養生の場合は標準的蒸気養生した場合と比較して初期材齢 1 日では約 15% 低下したが、3 日では約 15% 増加し、その後は約 20% 上回った。図 6.4.6(D) に示すように早強ポルトランドセメントをベースしてフライアッシュを混和した配合は、促進蒸気養生した場合は標準的蒸気養生した場合と比較して初期材齢 1 日では約 35%、材齢 3 日では約 15% 低下したが、それ以降は 10~15% 程度上回った。

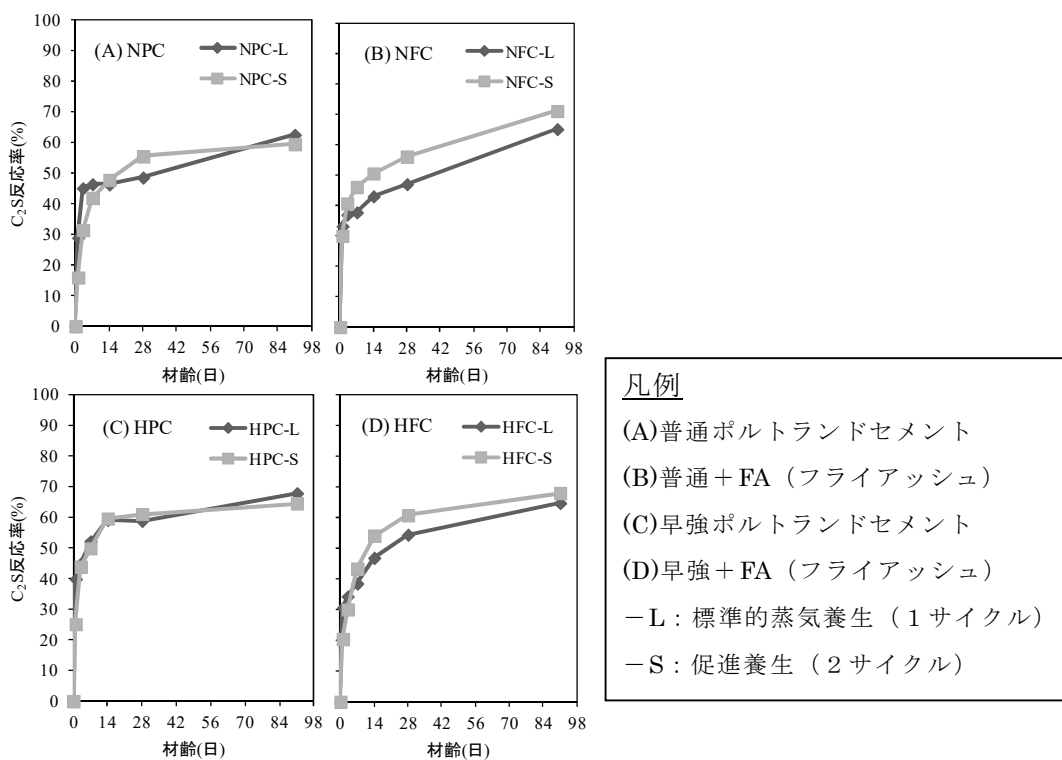


図 6.4.6 ビーライト(C2S)反応率

6.4.6 フライアッシュ(FA)の反応率

普通ポルトランドセメントにフライアッシュを混和した配合（NFC）及び早強ポルトランドセメントにフライアッシュを混和した配合（HFC）をそれぞれ標準的蒸気養生（L）及び促進蒸気養生（S）した場合のフライアッシュの反応率を図 6.4.7 に示す。普通ポルトランドセメントをベースにした場合のフライアッシュ反応率は、早強ポルトランドセメントをベースにした場合と比較して低く材齢 91 日でも約 50%低くなった。また、促進蒸気養生した場合は一般蒸気養生した場合よりもさらに反応率は低くなった。

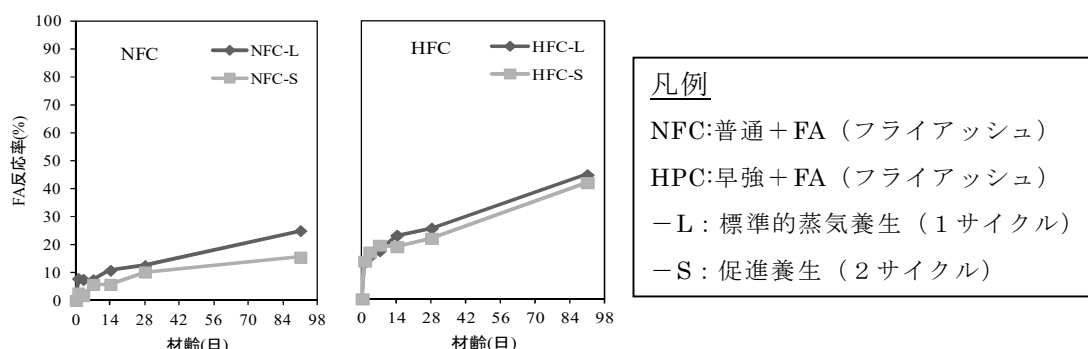


図 6.4.7 フライアッシュ(FA)反応率

6.4.7 ケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)生成量

普通ポルトランドセメントのみの配合（NPC）及び普通ポルトランドセメントにフライアッシュを混和した配合（NFC）、さらに、早強ポルトランドセメントのみの配合（HPC）及び早強ポルトランドセメントにフライアッシュを混和した配合（HFC）をそれぞれ標準的蒸気養生（L）及び促進蒸気養生（S）した場合のケイ酸カルシウム水和物（C-S-H）の反応率を図 6.4.8 に示す。図 6.4.8(A) に示すように、普通ポルトランドセメントの配合において促進蒸気養生した場合の C-S-H の生成量は、標準的蒸気養生した場合と比較して材齢 1 日では約 25%、材齢 3 日では約 15%、材齢 7 日では約 10%低下したが、その後は同程度となった。一方、図 6.4.8(C) に示すように、早強ポルトランドセメントの配合においては材齢 1 日では約 5%低下したが、その後は同程度となった。図 6.4.8 (B) に示すように普通ポルトランドセメントをベースにフライアッシュを混和した配合では、促進蒸気養生した場合は標準的蒸気養生した場合と比較して初期材齢 1 日では約 25%、3 日から 14 日まで 10~15%低下したが、その後は同程度となった。図 6.4.8(D)に示すように早強ポルトランドセメントをベースしてフライアッシュを混和した配合は、促進蒸気養生した場合は一般蒸気養生した場合と比較して大きな差異は生じなかった。

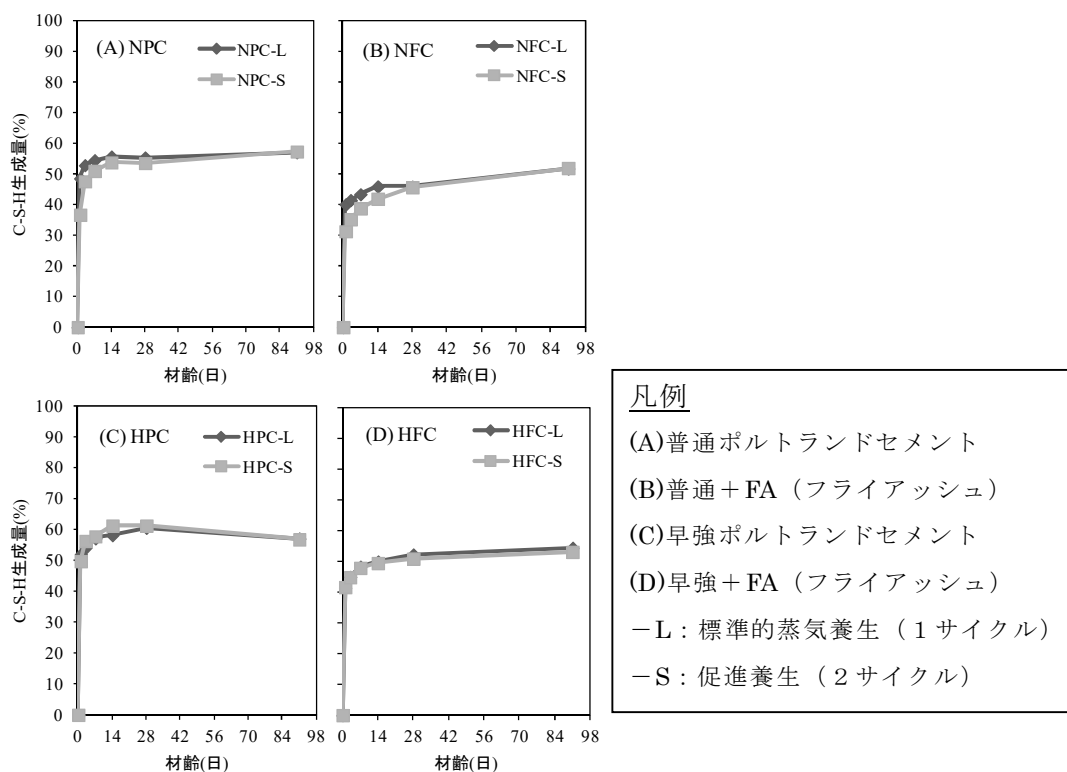


図 6.4.8 ケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)生成量

6.4.8 特性のまとめ

圧縮強度発現は、ベースセメントである普通ポルトランドセメントまたは早強ポルトランドセメントのみの配合のそれぞれで促進蒸気養生と標準的蒸気養生を行った場合、蒸気養生方法の違いで圧縮強度発現に大きな違いが生じた。一方、普通ポルトランドセメントまたは早強ポルトランドセメントにフライアッシュを混和したフライアッシュセメントの配合では、促進蒸気養生を行った場合、標準的蒸気養生と比較して初期材齢で若干低くなったが、それ以降の材齢で大きな差異は生じず同等となった。また、ベースセメントが早強ポルトランドセメントの場合は普通ポルトランドセメントと比較して、材齢1日で約55%、3日で約40%の強度増進となった。この圧縮強度の結果を水和反応からみると、早強ポルトランドセメントは普通ポルトランドセメントよりも促進蒸気養生においてもC₃Sの反応率は大きく影響を受けず材齢1日より高い反応率を示しており、さらに、早強ポルトランドセメントは、普通ポルトランドセメントよりもC₃Sの成分が多いことから十分なカルシウム(Ca²⁺)が溶出したことが推察される。その結果、フライアッシュのポゾラン反応が活性化し早強ポルトランドセメントの場合のフライアッシュの反応率が普通ポルトランドセメントよりも高くなったものと考えられる。

以上のことから、フライアッシュセメントを使用したプレキャストコンクリート製品の製造において、冬期の脱型強度の低下とそれに伴う製造効率の低下を避ける方法として、ベースセメントを普通ポルトランドセメントから早強ポルトランドセメントに切り替え、標準的蒸気養生から前置時間、昇温時間、最高温度継続時間、降温時間を短縮した促進蒸気養生を適用する方法が有効であることが示唆された。

6.5 まとめ

フライアッシュを混和材としたプレキャストコンクリートの蒸気養生履歴の最適化を目的に各種試験を行った結果、次のことがわかった。

○生成組成について

- ・フライアッシュセメントは、標準的蒸気養生履歴と促進蒸気養生履歴でフライアッシュ(FA)反応率及びユーライト(C3S)反応率並びに C-S-H 生成量はほとんど同じであるが、ビーライト(C2S)反応率では蒸気養生履歴により生成率が進行した。特に、蒸気養生履歴の降温速度を急冷した場合に顕著に表れることが分かった。
- ・圧縮強度は、C-S-H 生成量及び C-S-H 重合度と線形関係がある。

○強度特性について

- ・フライアッシュ混和した場合、初期強度は非常に小さく脱型時間の遅延となる。
- ・材齢 1 日強度は、蒸気養生履歴を負荷することで封緘養生に比べ大きく強度増進が得られる。
- ・材齢 1 日強度を向上させるためには、
 - ①速硬性混和材を添加する
 - ②早強セメントを使用する
 - ③普通セメントの単位セメント量を増加させるの 3 つの選択がある。この手法は、いずれも JIS 制度の変更なしに実行できる。

○最適な蒸気養生履歴について

- ・フライアッシュを混和した場合、降温速度を急激に落とした履歴を負荷させることで出荷時強度が増進することがわかった。これは、フライアッシュ及びビーライト共にこの蒸気養生履歴パターンがそれぞれの反応率の活性化に適切な履歴であるためとわかった。

以上のことから、フライアッシュ混和したプレキャストコンクリートは、出荷時強度を向上させるためには、降温速度を急冷した履歴が最適であることがわかった。ただし、その蒸気養生履歴は脱型時強度が低くなることもわかり、第5章で開発した速硬性混和材を混和する必要がある。

【6章 参考文献】

- 6.1 たとえば、日本規格協会：JISA5303-1956「遠心力鉄筋コンクリート管 4.3 養生 4.3.2(2)」
- 6.2 土木学会土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書 施工編 特殊コンクリート 14章 工場製品 14.5.5 養生 解説(2)、2008.3
- 6.3 入江正明、鏡健太、梅村靖弘：高温養生履歴を受けるフライアッシュコンクリート製品の圧縮強度特性、土木学会混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会(NO.2)報告書およびシンポジウム論文集、コンクリート技術シリーズ 89、2010.5.24、pp371-378、
- 6.4 鏡健太、入江正明、小泉公志朗、梅村靖弘：フライアッシュモルタルの強度に及ぼす蒸気養生履歴の影響、日本コンクリート工学協会年次(2010)論文報告集、2010.7、pp1481-1486
- 6.5 日本コンクリート工学協会：コンクリートの自己収縮研究委員会報告書、2002.9、pp34-38
- 6.6 浅賀喜与志ほか：セメント - 石英系水熱反応における未反応石英の定量、窯業協会誌 No.90、pp.397-400、1982.7
- 6.7 小早川真、坂井悦郎、大門正機、佐藤道生：フライアッシュのポゾラン反応がコンクリートの圧縮強度発現に及ぼす影響、無機マテリアル学会、Journal of the Society of Inorganic Materials、Japan 15(334)、pp.137-145、2008.5
- 6.8 星野清一、山田一夫、平尾宙、山下弘樹：石灰石微粉末を添加したセメントの X 線回折/リートベルト法による水和反応解析と強度発現機構に関する検討、セメント・コンクリート論文集、No.60、pp47-54、2006.2
- 6.9 佐藤正己、梅村靖弘、小泉公志郎：シリカフュームと高性能減水剤を用いた超高強度セメント硬化体の水和反応、セメント・コンクリート論文集、vol.64、pp.442-449、2011.2
- 6.10 尾畑展宏、鏡健太、梅村靖弘：普通ポルトランドセメントの圧縮強度発現性と水和反応に及ぼす蒸気養生履歴の影響、土木学会年次学術講演会講演概要集、Vol.67、V-433、pp.865-866、2012.8

第7章 プレキャストコンクリートの製造効率化の構築

7.1 はじめに

プレキャストコンクリートの製造方法は、自然環境を相手にする現場打ちコンクリートとは異なり管理された工場において人工的に蒸気養生を負荷させることが出来ることから「より早く」「より高品質に」「より安く」など管理製造することができ効率的と言われているが、現状におけるプレキャストコンクリートの製造では第2～4章で述べたように、製造工程のうち、蒸気養生履歴が足かせとなって効率的な製造が出来ていない状況である。それは昭和54(1979)年以前のJIS製品の蒸気養生履歴に関する仕様規定[7.1]や土木学会(2007)コンクリート標準示方書施工編[7.2]の参考例が現在も忠実に継承されており、さらに分野別認証指針(一般認証指針の特例)JISQ1012「プレキャストプレキャストコンクリート」では明確に蒸気養生履歴を明示しそれに従順に製造しなければならないことを規定していることから、蒸気養生履歴が自主規制になった今日[7.3]でも必ずしも効率化が図れる技術基準体系となっていないことがその原因である。そのため、蒸気養生工程は、プレキャストコンクリート製造に要する約9割の時間を拘束し製造費の約3割を占めるにもかかわらず、実際には「より早く」「より安く」が実現出来ない状況にある。こうした背景により蒸気養生工程の効率化はプレキャストコンクリート製造メーカーの悲願であり最大の研究テーマである。一方、国土交通省のi-construction[7.4]でも措置されているが、発注者の設計指針・基準への位置づけが不明確であり積算評価の確立の必要性など、制度上の問題も多く存在している。

こうした背景の下で本研究では、プレキャストコンクリートの製造工程の効率化を図ることの必要性が求められているが、現行の市販セメント材料では、最適な配合設計や効率的製造が不可能であることから、プレキャストコンクリートの製造の問題点の抽出を行ったところ、図7.1.1及び表7.1.1に示す製造上のクリティカルポイントを克服することが判り、その対策として「速硬性混和材による製造効率化」と「蒸気養生履歴の最適化による製造効率化」の2つの対策とその組合せを行うことで製造効率化を実現した。また、環境負荷低減策が求められることからリサイクル材のうち、フライアッシュを混和できることを念頭にシステムの開発を行った。

本章では、このフライアッシュを混和したプレキャストコンクリートの製造効率化のシステムを提案するものである

表 7.1.1 プレキャストコンクリートの製造上のクリティカルポイント

クリティカルポイント	管理材令	評価指標及び管理値	要求性能	
①出荷時強度	製品性能	14日または7日	設計基準強度を満足する	使用性、耐久性
②脱型時強度	製造管理 上の性能	4~10時間の間	圧縮強度 10-15N/mm ²	吊上げ、欠け

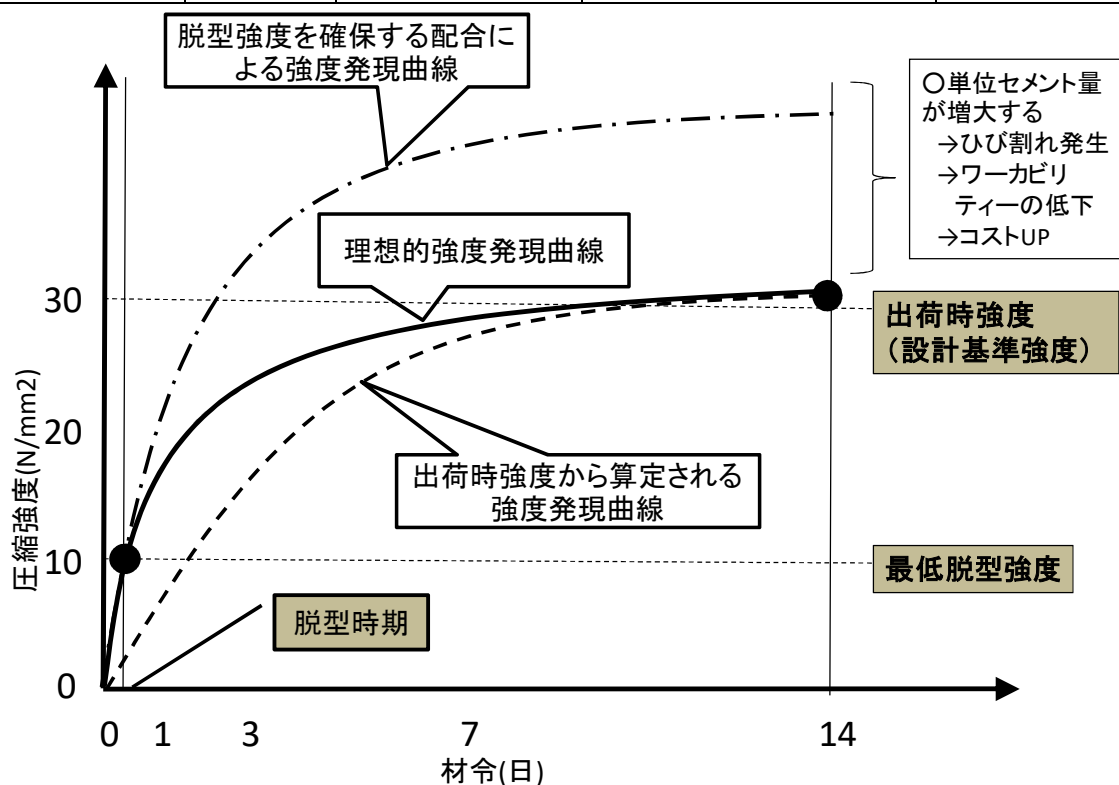


図 7.1.1 蒸気養生したプレキャストコンクリートの強度発現

7.2 プレキャストコンクリート製造システムの提案

7.2.1 プレキャストコンクリートの新製造システム

(1) 設備の増設

プレキャストコンクリートの製造工程の効率化による製法改善のシステムは、コスト削減も大きな目標であることから既存設備を用いることを原則とし最低限の増設に抑えた。増設に必要な設備としては、速硬性混和材を混和することから小型のセメントサイロを増設する必要がある。なお、工場設備によってはセメントの計量で少量計測ができないものも存在する。この場合には、少量計量機の増設も必要となってくる。これらのシステムを図 7.2.1 に示す。

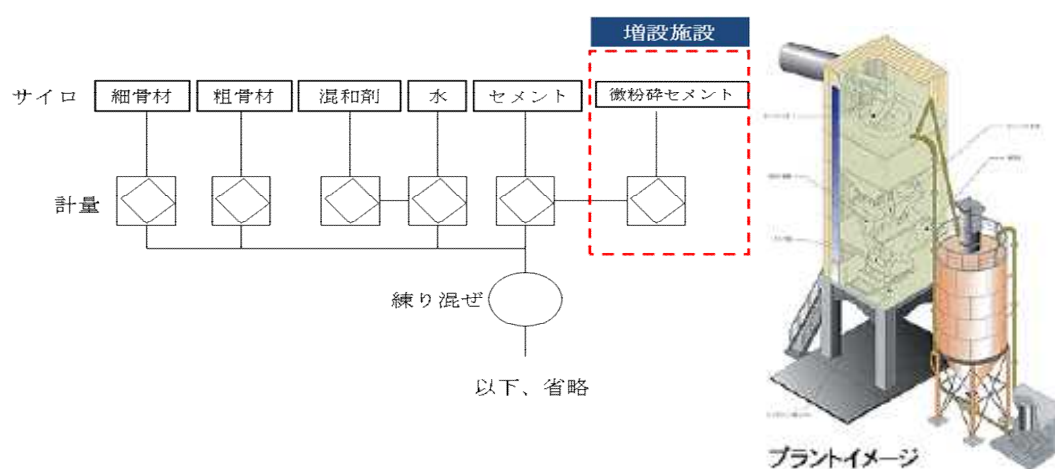


図 7.2.1 プレキャストコンクリートのコンクリート製造設備図

(2) 配合設計

本製造システムを採用する場合、図 7.2.2 に示す製法フローにしたがって配合設計を行う必要がある。このフローは、2つのステップで構成されており、第一ステップにより、出荷時強度に対する最適な蒸気養生履歴を見出す。第二ステップにより不足する脱型強度を増加させる混和材の添加を行う。以下にフローの詳細説明を行う。

【第一ステップ】

① プレキャストコンクリートの要求性能の確認及び設定（表 7.2.1 参照）

これにより設計基準強度や空気量さらに養生履歴を設定する

② 出荷時強度の設定

出荷時管理材齢と強度を設定する

③ 基本配合設計（図 7.2.3(a)）

出荷時強度を経済的に満足する配合設計を行う

【第二ステップ】

④脱型時材齢と強度を設定し、基本配合が脱型強度を満足しているかの照査を行う

脱型強度を満足していない場合は、⑤へ進む。満足の場合は配合設計の完了

⑤使用するセメント系材料による最密充填試験を行い微粉碎セメントの仕様を決定する（表 7.2.2 参照）

⑥置換量を決定する（表 7.2.2 参照）

⑦微粉碎セメントを置換した実効配合設計を行う（表 7.2.3(b)）

⑧脱型強度の照査を行う。

脱型強度を満足していない場合は、⑥へ戻り置換量等を変更する。満足の場合は実効配合設計の完了。

表 7.2.1 プレキャストコンクリートの要求性能の設定項目

構造物	プレキャストコンクリートの要求性能			
	物理的性能を示す指標	力学的性能を示す指標	耐久的性能を示す指標	製造・施工性能を示す指標
プレキャストコンクリート	<ul style="list-style-type: none"> ・外観 ・寸法 ・形状 ・配筋 ・かぶり 	<ul style="list-style-type: none"> ・設計基準強度 ・出荷時強度 ・脱型時強度 ・ひび割れ発生モジュール 	<ul style="list-style-type: none"> ・初期材料 JIS（セメント、混和材、骨材、化学混和剤、練混ぜ水） ・材料変化 W/C、空気量 	<ul style="list-style-type: none"> ・運搬（重量） ・設置（安定性） ・組立（接続性） ・養生履歴（製造サイクル） ・移動性（脱型積込）

表 7.2.2 微粉碎セメント型速硬性混和材の仕様

混和材	比表面積の水準(cm ² /g)	置換率(%)
微粉碎セメント型速硬性混和材	5,000、7,000、10,000	1、3、5、(10、20)

注) 置換率 5%以上は JIS 認証に抵触する可能性がある

(a)第一ステップの <u>基本配合設計</u>	W	C	S	G	AE	
					
(b)速硬性混和材を用いた第二ステップでの <u>実効配合設計</u>	W	C	P	S	G	AE

注) P:微粉碎セメント型速硬性混和材

図 7.2.3 配合設計法

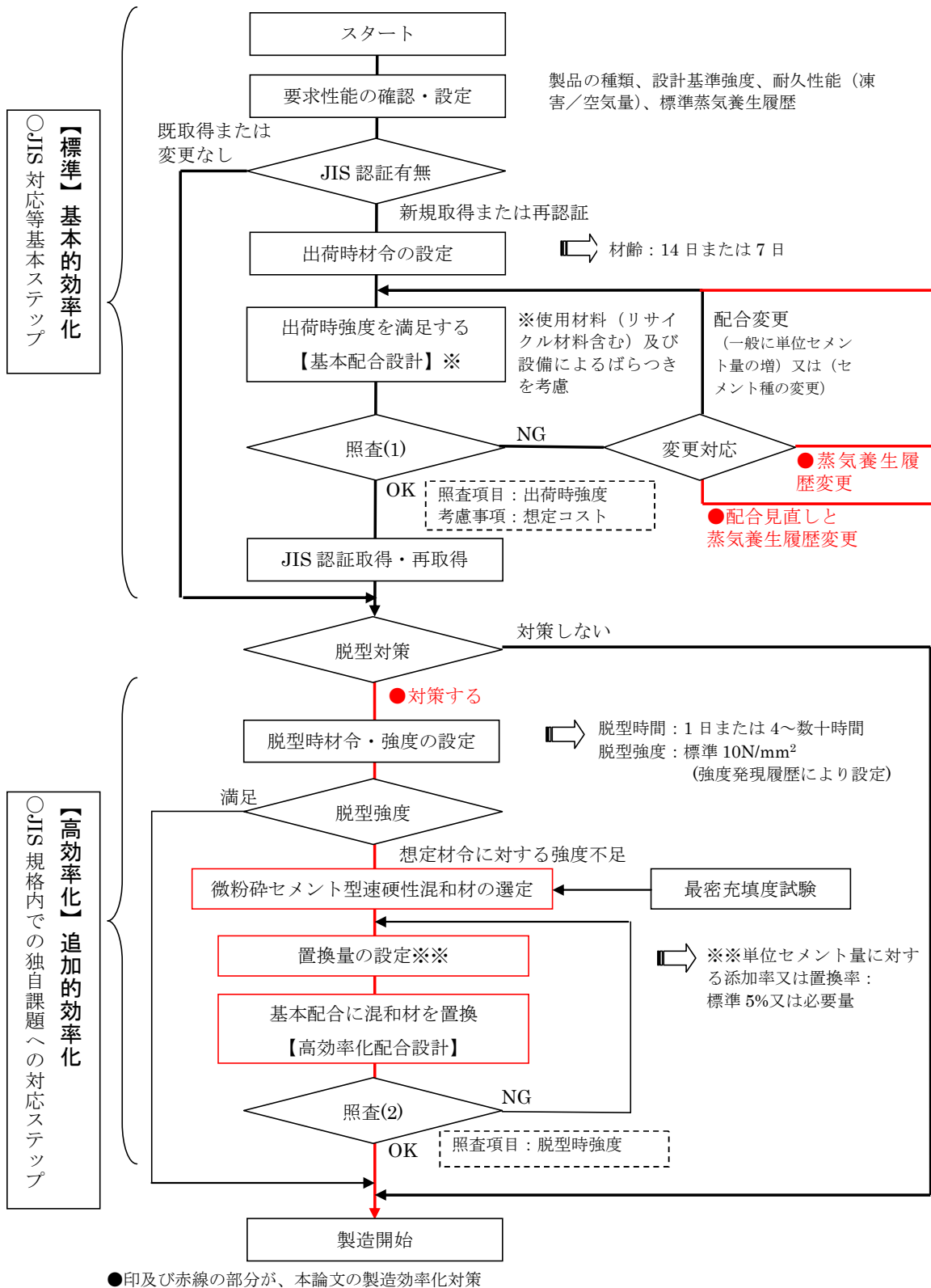


図 7.2.2 本研究によるプレキャストコンクリートの製造効率化フロー

7.2.2 コスト縮減効果

コンクリート構造物の工事費は、国土交通省の土木工事積算基準「施工歩掛」[7.5]によれば、原則現場打ちコンクリートを対象として設定されており、プレキャストコンクリートに関しての設定は、現場打ちコンクリートに対して一部を読み替えした形で取り扱われている。したがって、現場打ちコンクリート構造物の積算は実態に沿っており実勢の変化に即座に対応したものとなっている。一方、プレキャストコンクリートの積算は、実態の把握や実勢変化に対して対応されないまま体系化されていることになる。この違いは、現場打ちコンクリートの場合は、技術発展や施工機械、手法の発達などに伴いその都度改訂されているが、プレキャストコンクリートに関してはあたかも技術開発が進んでいないまたは何の変化もないと認識されているからと考えられる。特にプレキャストコンクリートの基本的な施工法や利点である工期短縮、高品質なども積算体系において考慮されておらず、まったく実態に沿っていないと言える。

表 7.2.3 は、現行の積算基準により内径 2.5m x 2.5m のボックスカルバートを対象に積算価格の比較を行ったものである。この表からわかるように、同一コンクリート構造物を施工するにも関わらず、プレキャストコンクリートによる工事費が現場打ちに比べて工期で 1/3 にも関わらず 10%以上も割高となっている。これは、現行の積算体系での間接経費で工期が異なるまたは施工手間が大きく異なるにも関わらず「同じ経費率」であること、さらにプレキャストコンクリートには、工場と現場の両方で経費が計上されており、経費の重複が存在することなどが主ない理由である。こうした点を考慮してプレキャストコンクリートの実態に沿った積算を行うとケース 7、8 となり、プレキャストプレキャストコンクリートを採用したほうが 3 割程度安くなることが分かる。しかし積算体系の変更はさまざまな問題を抱えているため相当の時間を要するので、当面の処置として、本研究で提案した、製造サイクルの短縮による製品コストの低減を行うことで、運用上対応が可能となる。

表 7.2.3 ボックスカルバート（内径 2.5m x 2.5m、延長 10m 当り）の積算単価

		現場打ち	プレキャストコンクリート							
			ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース6	ケース7	ケース8
積算条件	間接経費の対象	—	製品代+据付費	製品代+据付費	製品代+据付費	製品代のみ	製品代のみ	製品代のみ	据付費	据付費
	共通仮設費係数	0.2625	1.00	0.50	0.33	1.00	0.50	0.33	1.00	0.50
	現場管理費係数	0.2862	1.00	0.50	0.33	1.00	0.50	0.33	1.00	0.50
	一般管理費係数	0.1360	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
直接工事費	直接工事費または製品代	1,978,470	1,955,000	1,955,000	1,955,000	1,955,000	1,955,000	1,955,000	1,955,000	1,955,000
	据付費	—	245,452	245,452	245,452				245,452	245,452
間接工事費	共通仮設費	519,348	577,619	288,809	192,540	513,188	256,594	171,063	64,431	32,216
	現場管理費	714,876	795,084	356,213	228,291	706,395	316,479	202,826	88,689	39,734
	一般管理費	436,926	485,949	386,985	356,494	431,743	343,818	316,729	54,206	43,167
工事費 合計		3,649,620	4,059,103	3,232,459	2,977,777	3,606,326	2,871,891	2,645,618	2,407,777	2,315,568
備考	工期(日)	26	9							
	経済比率	100	111	89	82	99	79	72	66	63
	状況	現状		シミュレーション				本来の姿		

注) 土工事、土留め工等は、省略

図 7.2.4 は寸法の異なるL型擁壁についてコストシミュレーションをした結果である。現行積算基準によれば、H=3000を超える擁壁はプレキャストコンクリートの方が高くなるが、施工日数を考慮した実態に沿った積算では、すべての擁壁でプレキャストコンクリートが安くなる。また、現行基準で製造サイクルを短縮した場合、2サイクルの場合は実態とほぼ同じコスト比になり、3倍サイクルになればプレキャストコンクリートが相当安くなる事が分かる。

図 7.2.5 は、ボックスカルバートについてのコストシミュレーションであるが、現行基準では最小躯体の1000x1000のみがプレキャストコンクリートが安い。それ以上の大きさになると現場打ちコンクリートが有利になっている。しかし、製造サイクルの短縮を行えば、擁壁同様に実態に近づいてくることから、製造サイクルの効率化は、プレキャストコンクリート市場にとって大きな武器となりうると考えられる。

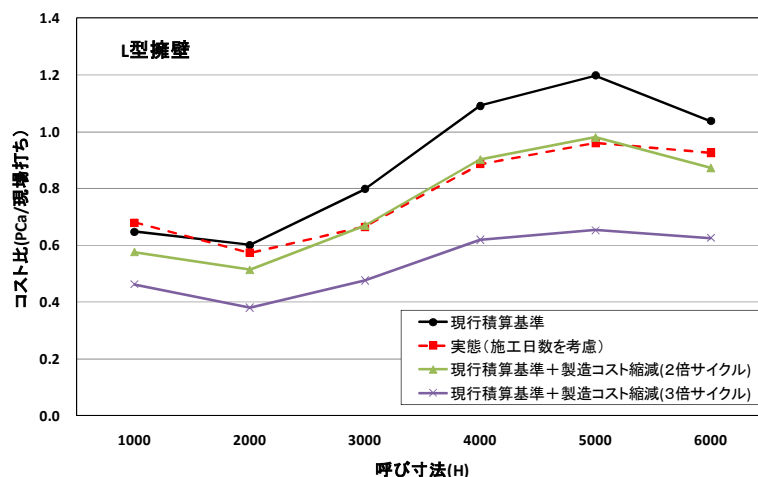


図 7.2.4 L型擁壁のコスト比較

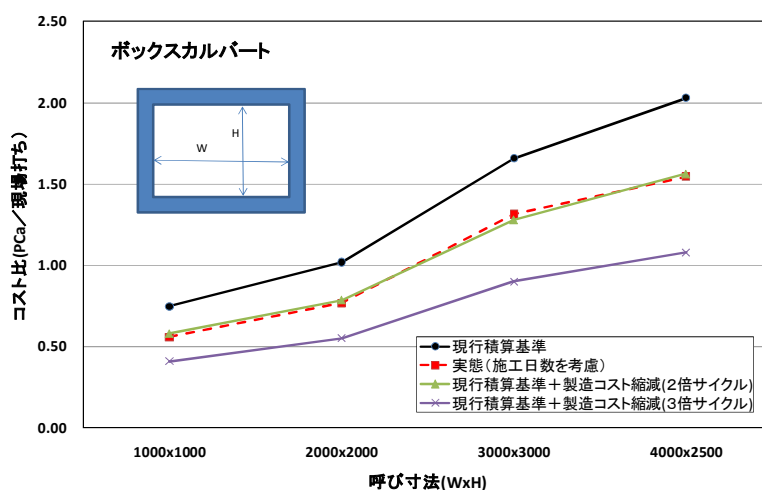


図 7.2.5 ボックスカルバートのコスト比較

なお、平成 27 年度にスタートした国土交通省の i-construction プロジェクトでは、プレキャストコンクリートの採用を提案できる入札契約制度の整備に向けた条件整備に着手し[7.4]、今後、積算体系の見直しに発展することを期待する。

7.3 品質管理

7.3.1 目視検査

プレキャストコンクリートの性能は、所定の強度が発現していることが第一義であるが、プレキャストコンクリートに発生したひび割れやあばた、さらに色変化などは受け入れ検査時に問題視される。したがって、さまざまな材料を用いることや製造サイクルの最適などを試行した場合には、別途、目視検査をしてコンクリート性状を確認する必要がある。図 7.3.1 は実機製造した製品の主な不具合を示したものである。特に早期脱型の場合、端部の欠けが発生し易い状況にあり、若材令時は強度のばらつきが大きいことも原因の一つであるが、速硬性混和材置換の製品においては特に従来製品と変わった不具合は生じなかった。



(a) L型擁壁

(b) 端部欠けおよびあばた

(c) 色斑

図 7.3.1 プレキャストコンクリートの不具合例

7.3.2 反発硬度法による品質管理

プレキャストコンクリートの品質管理は、JISQ1012「プレキャストコンクリート製品」の指導の下で品質管理マニュアルを作成し項目や頻度が規定されている。このマニュアルに沿って日常の品質管理が行われ同一生コン同一環境下で養生した供試体で強度の判定を行うことになるが、必ずしも全ての製品製造過程で供試体を作成していないため、外気温の急激な変動や型枠の温度などさまざまなファクターでコンクリート強度が変動したと推定された時、供試体が存在しなければ脱型や吊り移動などの判断が出来ない（図 7.3.2 参照）。したがって、簡易的にかつ非破壊で強度の判定が行える手法の開発が求められている。

ここでは、既存硬化コンクリート構造物の強度判定に用いられている反発硬度による手法（通称、シュミットハンマー法）による判定を試みた。

実験は図 7.3.3～7.3.7 に示すように同一材料を用いてシリンダー供試体と実製品に対して反発硬度法により反発度を計測した。図 7.3.8 は、若材齢時の反発硬度とシリンダー供試体の関係を示したものである。若材令時にもかかわらず、またフライアッシュや速硬性混和材を置換した場合でも線形関係が得られることがわかった。したがって、この簡易的手法は脱型時強度等の確認や品質管理に十分行える手法であると考えられ、製品の品質管理法として提案する。



図 7.3.2 脱型及び吊上げ



図 7.3.3 試験配合



図 7.3.4 供試体と養生

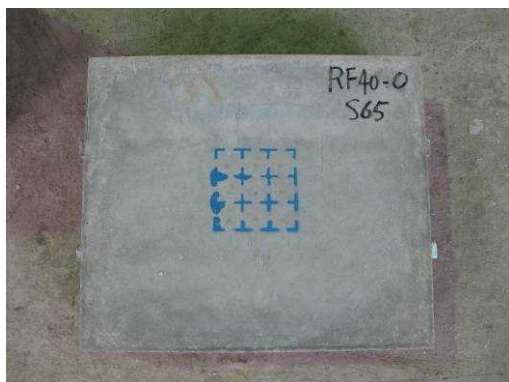


図 7.3.5 反発法の打点マーカー



図 7.3.6 シリンダー圧縮試験

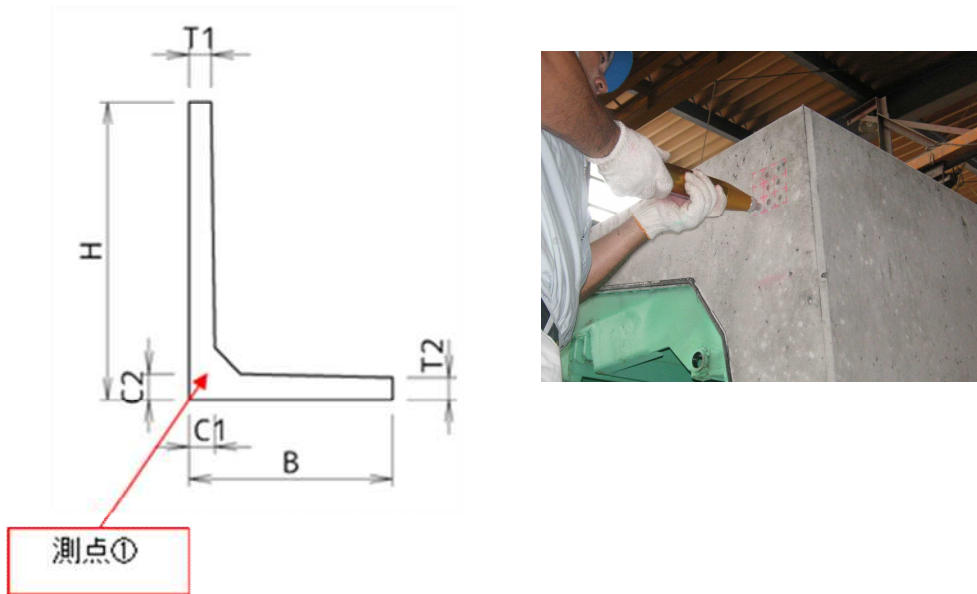


図 7.3.7 シュミットハンマー試験

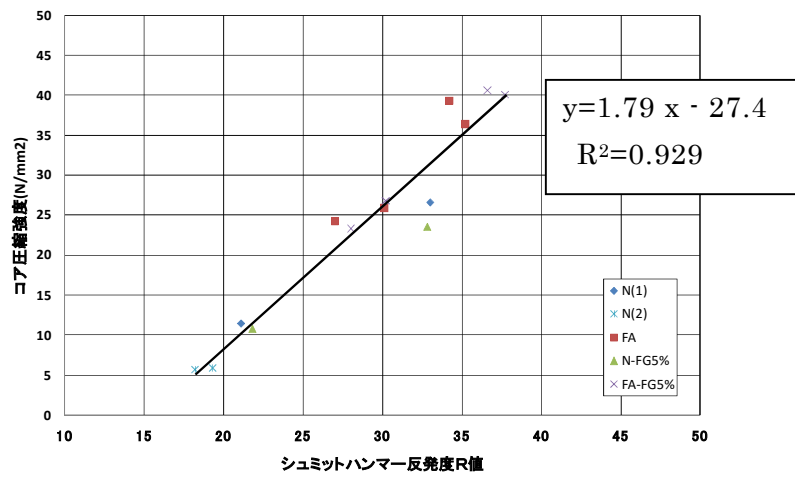


図 7.3.8 若材齢時コンクリートの反発度～強度関係

7.3.3 実蒸気養生装置による実証確認

(1)モルタルによる実証

(a)標準的蒸気養生と封緘養生試験

微粉碎セメント型速硬性混和材（以下「速硬性混和材」という。）を使用し蒸気養生履歴を負荷させた場合の圧縮特性について実際に用いられている蒸気養生設備を用いて試験を行った。使用した材料は、普通ポルトランドセメントに対して速硬性混和材を置換したセメントであり、表 7.3.1 に使用材料、表 7.3.2 に配合を示す。蒸気養生は、前章で紹介した蒸気養生装置により行った。表 7.3.3 に示す蒸気養生履歴パターンを示す。なお、圧縮強度は、 $\phi 50 \times 100 \text{mm}$ のサミットモールド管を用いて行った。

表 7.3.1 使用材料

材料		諸元	備考
セメント	普通ポルトランドセメント	密度=3.16(g/cm ³)、 比表面積=3260(cm ² /g)	住友大阪セメント社製 (バージン原材料仕様)
混和材	微粉碎セメント型速 硬性混和材(FG10)	比表面積=10,459(cm ² /g)	
細骨材	セメント強さ試験用 標準砂	表乾密度=2.62(g/cm ³)、 吸水率=0.42(%)	(社)セメント協会製

表 7.3.2 モルタル配合

配合名	セメント比 W/(C+FG) (%)	粉体比 W/(C+P) (%)	単位量(kg/m ³)				
			W	C	P		S
					FG10	FA	
N-S	49	49	292	600	0	0	1316
N-FG				594	6	0	

表 7.3.3 蒸気養生パターン

パター ン名	蒸気養生パターン	前置時 間 (h)	昇温速 度 (°C/h)	最高温 度 (°C)	最高温 度継続 時間(h)	降温 速度 (°C/h)	蒸気養 生によ る積算 温度
S	標準的蒸気養生	2	15	65	4	4.5	

(b)実験結果

表 7.3.4 は、普通ポルトランドセメント単独と速硬性混和材を 1%置換した場合の圧縮強度発現結果である。蒸気養生履歴を負荷させることで材齢 1 日では約 1.55 倍の強度発現が得られた。なお、材齢 7 日では速硬性混和材による強度向上の効果はほぼ零となっている。

表 7.3.4 標準蒸気パターンでの強度発現結果

材料	圧縮強度(N/mm ²)		
	1日	7日	14日
OPC	15.9(5.0)	33.2	40.7
OPC+FG10(1%)	24.7(3.2)	33.6	35.6
圧縮強度比	1.55(0.64)	1.01	0.87

注) () 内数字は、常圧常温の封緘養生時

(2)実製造機器での強度特性改善効果

プレキャストコンクリートの製造装置は、一般的蒸気養生装置から、低水比のバイコンなど存在する。これらの適用について類似の製造装置を用いて、速硬性混和材置換による強度特性改善について検証した。実施機関は微粉碎セメント型速硬性混和材を用いた製法改善を行うプレキャストコンクリート会社で集まって設立した「ナノセメント研究会（会員8社、年間セメント使用量総計240,000ton）」の内、5社6工場に於いて行った。

実験の条件は、通常業務で用いている機器やコンクリート配合に対して速硬性混和材を単位セメント量の1%（内割）置換するものである。したがって、通常時の圧縮強度に対して強度変化の程度により検証するものである。図 7.3.9 は、材齢毎の圧縮強度比を示したものである。6工場では、使用材料、設備や練混ぜミキサーなどすべてが異なっているが、おおむね材齢1日で強度増加が5～10%図られた。ただし、一部の試験では、強度増が見込めない場合が発生しその原因を追及したところ、FA混和の場合、練混ぜ時間が所定より短い、微粉碎セメントとセメントの事前混ぜを行っていないなどの理由が存在していた。したがって、骨材が混入したコンクリート配合では速硬性混和材の置換量が相対的に少ないので全体への分散がし難いため、セメントと事前に混ぜておくか又は十分な練混ぜ時間を確保すれことが必要であることがわかった。なお、モルタル試験では材齢1日強度増加が1.55倍と大きく向上したのに対して、実機のコンクリート配合では粗骨材が入ることで最密充填効果が小さくなり、5～10%程度の強度発現になったと考えられる。いずれの場合でも速硬性混和材を置換することで脱型時強度増加が見込めることが確認できた。

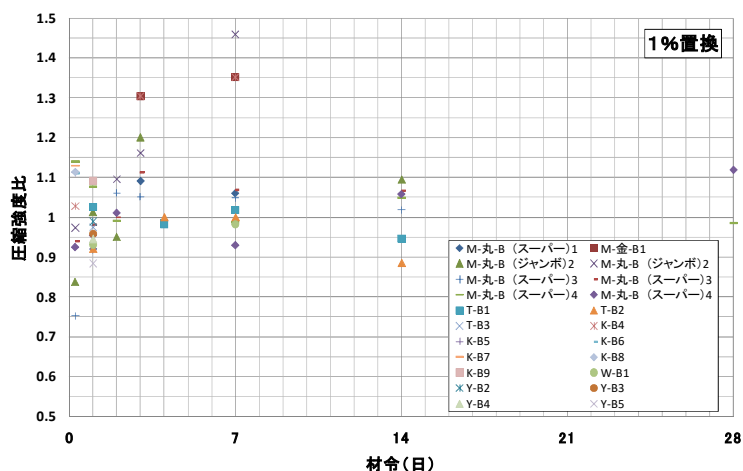


図 7.3.9 各種製造機器による速硬性混和材 1%置換による強度改善効果

7.4 まとめ

プレキャストコンクリートは現行の積算体系では実態が反映されていないため現場打ちコンクリートに比べコスト的に不利な状況にある。したがって、本来この積算体系を実態に沿った形に変更する必要があるが、この積算体系の変更はさまざまな問題があることから一途には変更が出来ない。また、土木系のプレキャストコンクリートは JIS 製品規格を基本とすることから、JIS 認証工場等の認可を得る必要がある。このため、現行 JIS を満足しつつプレキャストコンクリートの製造効率化の構築することで、現場打ちコンクリートと同等のコストとして評価することが必要であり、本研究により可能となった。

本論文で提案した製造効率化法は、一部の工場での実験データを基に提案し実証したものであるが、本提案手法は製法フローに従えばどのプレキャストコンクリート製品工場でも適用が可能であるため、コンクリート市場の回復に貢献できると考えている。

【7章 参考文献】

- 7.1 たとえば、日本規格協会：JISA5303-1956「遠心力鉄筋コンクリート管 4.3 養生 4.3.2(2)」
- 7.2 土木学会土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書 施工編 特殊コンクリート 14 章 工場製品 14.5.5 養生 解説(2)、2008.3
- 7.3 たとえば、JISA5302-1979 第五回改正資料
- 7.4 国土交通省、i-construction、平成 27 年 12 月
- 7.5 国土交通省土木工事積算基準、財団法人建設物価調査会、平成 20 年度版

第8章 結論

コンクリート構造物は、現場打ちコンクリート又はプレキャストコンクリートのいずれかの手法により構築される。中でもプレキャストコンクリートは管理された工場で部材を製造するため、運搬時の品質変動、配筋・締固め・技術者の力量など打設の良し悪し、さらに養生時の環境条件等に影響されず、比較的低廉に高性能でかつ品質ばらつきが小さいコンクリートが実現できることが知られている。このプレキャストコンクリートの建設思想は、すでに100年以上前から採用されており、今日の熟練技術者不足や高品質が求められる社会においてはますます必要性が求められるコンクリートであると考えられる。

プレキャストコンクリートは、土木及び建築分野のいずれの分野でも採用されているが、その変遷や構造体としての位置づけは大きく異なっている。建築分野では、法律の建築基準法に基づいて構築方法の違いとして扱われ、品質及び構造性能に関しては現場打ちコンクリートと同等とする技術基準が整備され「構造部材」として性能規定体系として発展した。一方、土木分野では、「全国的に統一し、又は単純化すること」(JIS 法第2条)を目的にコンクリート製品形態ごとに仕様規定の民間委任規格として JIS 製品化され、この JIS 規定を守ることで品質を担保する「製品」として位置づけされた。近年は JIS 製品を構造形式ごとに再分類し性能規定化した。品質を保つために製造工場に対して JIS 認証制度を設け使用材料や蒸気養生履歴等を提示認定し、その順守状況を確認することに精力が注がれていることから、材料のばらつきや変更、環境条件の変化等に対して変更できなく、実質的に仕様規定化体系そのものであり、製造管理上の蒸気養生履歴の最適化や適切な材料の選択等の自由度がなく、現行の土木分野のプレキャストコンクリートの規定は製造効率化に対して高い障壁となっている。特に、性能規定化にもかかわらず要求機能や要求性能等を規定する国の技術基準が整備されていないことから、土木と建築分野で制度の斉一性がない状況にある。

また、コンクリート分野では、長期耐久性や環境負荷低減策としてフライアッシュの利用が求められている。このフライアッシュは、収縮ひび割れ特性や高流動化さらに、温度非依存性などさまざまな点で優れているが、一般的環境下では強度発現が非常に遅いことから脱型期間の延長が工期の延長になり、直接コスト増に繋がり、短所の補完材等の開発が求められているところである。

こうした背景により、プレキャストコンクリートの製造において製造効率的が求められており、製造手法を見出すために、使用材料から製造及び養生、さらに設計に関する技術基準の現状を徹底的に調査し、現行の製造過程での問題点の抽出と改善点を整理した。その結果、現行 JIS 制度を満足しつつ、製造するためには2つの相反する強度管理が要求されることが明らかになった。それは、

(A) 製品としての**出荷時強度**（出荷時材齢 14 日又は 7 日）

(B) 製造硬化過程での**脱型時強度**（脱型時材齢 4～10 時間）

である。この2つの管理要求は、現行のセメント材料で満足するためには、②の脱型時強度を満足するまで単位セメント量を増加させる必要があり、製品要求強度は相当高い強度になりコスト増となることに加え、収縮ひび割れ等の懸念が増大することから、蒸気養生後の後養生を長期に渡り管理する必要が出て、本来蒸気養生の効率化又は最適化に逆行する事態になってしまう。また、フライアッシュの内割り添加した場合、フライアッシュのポゾラン反応は強度増進に貢献出来ないためますます単位セメント量が増加することになり、品質低下とともに製造効率化の妨げとなっていることが分かった。したがって、脱型強度増加するために、早強セメントを用いて早期強度発現を行う事例があるが、セメント単価が相当に増加することから、冬場の外気温が低い時など特別な時のみに適用することに留まっている。こうした背景から現行材料や基準下では製造効率化が難しいと判断されており、プレキャストコンクリートの製造効率化の先行事例は存在しない。

しかし、プレキャストコンクリートは、管理された JIS 工場で蒸気養生履歴により製造されるため、自然環境雰囲気に影響されずさらに運搬等による品質変動も無く高品質なコンクリートが実現可能なコンクリートであり、製造過程における技術者育成も比較的単純作業であることから一般の現場打ちコンクリートのように専門の高度な技術者の必要性はなく、近年の国の i-construction プロジェクトに代表されるような施工の効率化等にも貢献出来るコンクリートでもある。

そこで本研究では、プレキャストコンクリート製造における最適な蒸気養生履歴の提案である。従来から JIS 規定で用いられてきた前置時間、昇温速度や最高温度の規定を JIS の性能規定化に基づいて最適な履歴に変更することで大幅な蒸気養生工程の短縮が行える。また二つ目の手法は、従来配合設計に対して混和材料として微粉碎セメント型速硬性混和材を単位セメント量の数%内割置換することで、若材齢時強度が向上しその結果脱型時間の短縮化が行える。これら2つの手法をそれぞれ単独または組み合わせることで、プレキャストコンクリートの製造効率化のシステムの構築を行うことができた。

○本研究成果をブラッシュアップするための課題

本研究では、現行 JIS 製品規格を満足したうえで、製造効率化手法を構築した。本システムは、手法の提案ではあるが、一般化したとは言い難い。それは、コンクリート製品の構成材料は、セメント、骨材、混和材料、化学混和剤など組合せは工場ごとに異なり、さらに、同一材料が永久に供給される保証もない。このように材料が変化したり混和材種の変更した場合などにおいて、本システムではステップ1の配合設計のやり直しを行う必要が出てくる。また、ステップ2における使用材料の充填密度が変化する場合

も同様である。工場にコンクリート主任技士等の技術者が常駐していれば即座の対応は可能であるが、多くの工場では技術者がいなく対応が出来ない可能性がある。こうした企業又は工場でも単純に対応出来るように簡素化したシステムに改造する必要がある。

○今後のプレキャストコンクリート界の整備すべき課題

本製造効率化システムは、現行の JIS 制度下におけるプレキャストコンクリートの効率的な製造を行うためのシステムであるが、本来、現場打設コンクリートとの対等化及び建築分野のプレキャストコンクリートとの齊一化を図ることは重要な課題である。このためには、下記に示す課題の解決を行うことが必要である。

【国等の技術基準の策定】

プレキャストコンクリートの適用を拡大するためには、現在の設計体系である性能規定体系を考慮し設計段階から適用される必要がある。また、「製品」ではなく「構造物」としての適用が重要である。そのためには、プレキャストコンクリートに要求される機能や性能に適合するための技術基準を整備する必要がある。なお、技術基準は、下位の照査基準や JIS 等の見なし規定とセットで整備される必要がある。

【国の積算体系の構築】

現行の積算基準は、現場打設コンクリートを対象としたものとなっている。したがって、製品製造過程と製品設置の2重に経費がかかったり、設置時の工期がコンクリート養生期間（たとえば、4週間）と同じになったりして、必ずしもプレキャストの実態に合っていないことから、実態に合わせた積算基準を整備する必要がある。これにより、プレキャストコンクリートの採用しやすい環境ができる。

【JIS の適正化】

JIS は本来、単独製品の性能を確保するために「全国的に統一し、又は単純化すること」（JIS 法第2条）を目的に整備された民間委任規格である。側溝等の単独製品を連続的に設置して、それぞれの製品の構造連続性を求めない等の単独コンクリート製品の場合は、現行の JIS 製品規格は適切に働くが、製品を複数組立てて1つの構造体として機能させる場合には、個々の製品に要求される性能が組み方により異なるなど、現行の JIS 製品規格では不適切なものとなる。このように、多様性が求められるコンクリートとするためには、技術基準を整備し、その実効するための製造方法等の仕様を規定した JIS 製品規格とする必要がある。現行の JIS 製品規格は、JIS の中に性能を標記したり、仕様を明示したり、本来の JIS の目的を逸脱してる部分も存在することから、第3章で示したように、法令階層を整備して、JIS 製品の適正化を行う必要がある。

最後に本研究による本論文を構成する各章の内容と得られた成果及び課題としてまとめた。以下、各章の内容を簡単に紹介し、本論文の構成を説明する。

第1章「はじめに」では、本研究の背景について概説し、プレキャストコンクリートの製造効率化の必要性を社会的背景及び製造企業のニーズから整理し、本研究の目的を明確化した。

第2章「プレキャストコンクリートに関する現状及び既往の研究」では、プレキャストコンクリートの規格や基準の現状を JIS の歴史的変遷の視点からまとめ、問題点の抽出や昨今の環境対策の要求に対する各自治体の制度設計についてまとめた。さらに、コンクリート構築におけるプレキャストコンクリートの優位性について、現場打ちコンクリート工法と比較示した。その結果、プレキャストコンクリートは、品質及び性能等多くの項目で優位性があるが、技術基準や積算基準がないことが、採用機会の障壁となっていることが分かった。また、プレキャストコンクリートの性能は、強制的な蒸気養生により製作するため、使用材料や配合に基づいた最適な蒸気養生履歴が必要であることが分かったが、JIS 製品規格が近年の性能規定化へ移行するまで長年に渡り蒸気養生履歴を仕様規定していたこともあり、材料等に見合った最適な蒸気養生履歴を適用する研究事例がないことが明らかとなった。これは、近年のリサイクル材の適用や材料の多様性に対する性能確保のための最適な蒸気養生履歴が不可欠であり、製造効率化に関する技術的ニーズが高いことがわかった。

第3章「コンクリート構造物に関する技術基準」では、コンクリート構造物の設計に関する技術基準を法体系から整理した。これにより、コンクリート構造物の要求機能及び要求性能とその性能の評価指標が明確になり、国等の設計要求に対する性能評価手法や適用できる材料等を明確化した。特に、新規材料やリサイクル材の使用など材料設計に関する技術基準が存在せず、「材料」は JIS 等からの選定又は選択に過ぎないことを明確にした。そしてコンクリート構造物の品質及び性能向上においては、材料の特性を加味した材料設計の必要性を示した。

第4章「プレキャストコンクリートの製造効率化における課題の抽出」では、プレキャストコンクリートの要求性能を明確にし、使用される材料と示方配合さらに設計及び製造手法について現状を把握し、プレキャストコンクリートの製造方法の効率化に対する具体的改善点について見出した。その結果、プレキャストコンクリートの製造効率化では、(A) 使用材料に応じた蒸気養生履歴の最適化が必要であること、さらに (B) 脱型時強度を向上させる速硬性混和材が不可欠であることを見出した。特に、リサイクル材としてフライアッシュを適用するためには、この2つの手法の組み合わせは不可欠であることを示した。

第5章「プレキャストコンクリートの速硬性混和材による製造効率化」では、プレキャストコンクリートの「製造時の要求性能である (B) 脱型強度の確保」をするために独自に開発した「速硬性混和材」の製造方法と各種特性について明らかにした。速硬性

混和材による強度増加は、セメント材料の空間を埋めるフィラー効果と比表面積拡大による水和反応の促進の2つの効果によることを明らかにした上で、比表面積と添加率の関係を見だし、脱型時強度増に寄与する配合の設定法を示した。

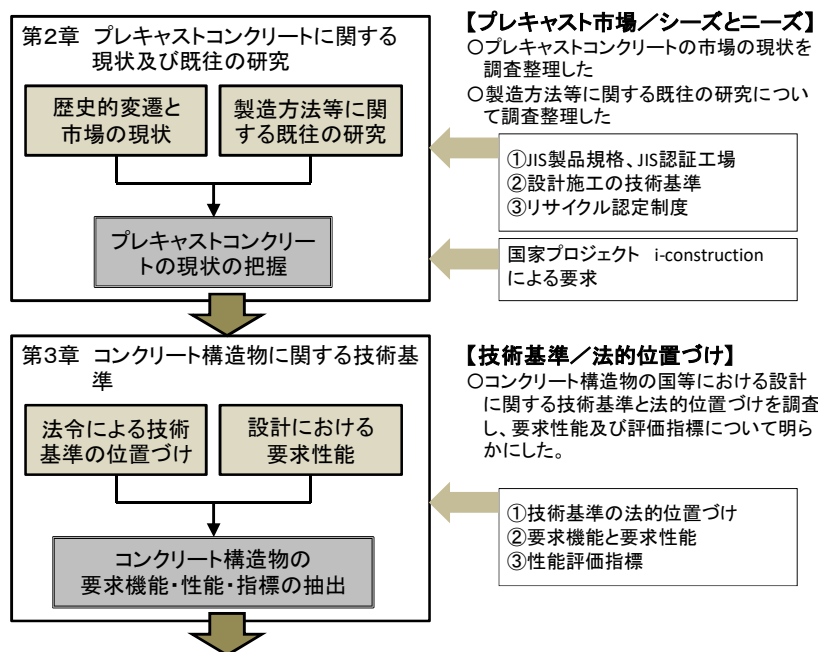
これらの成果により、プレキャストコンクリートの速硬性混和材による製造効率化を実現した。

第6章「フライアッシュ混和型プレキャストコンクリートの蒸気養生履歴の最適化による製造効率化」では、使用セメントと最適蒸気履歴を見出すため、普通及び早強ポルトランドセメントとそれにフライアッシュを混和したセメントに対する基本特性の試験を行い、フライアッシュ混和セメントの蒸気養生履歴の最適化を見出した。その結果、JIS 製品規格や土木学会コンクリート標準示方書【施工編】で明示されている標準的蒸気養生履歴は最低限の強度を発現する蒸気養生履歴であるが、必ずしも最適な蒸気養生履歴ではなく、使用材料や配合等を考慮して適切な蒸気養生履歴を見出す必要があることを示した。

これらの成果により、プレキャストコンクリートの蒸気養生履歴の最適化による製造効率化を実現した。

第7章「プレキャストコンクリートの製造効率化の構築」では、第5章で示した速硬性混和材による製造効率化及び第6章で示した蒸気養生履歴の最適化の2つの手法を組み合わせたプレキャストコンクリートの製造効率化の設定フローを示し、製造効率化のシステムについて提案した。

第8章「結論」では、本研究で明らかにしたプレキャストコンクリートの製造効率化に関する技術を整理するとともに、さらなる市場拡大の問題点と解決法を提案し本論の結びとした。



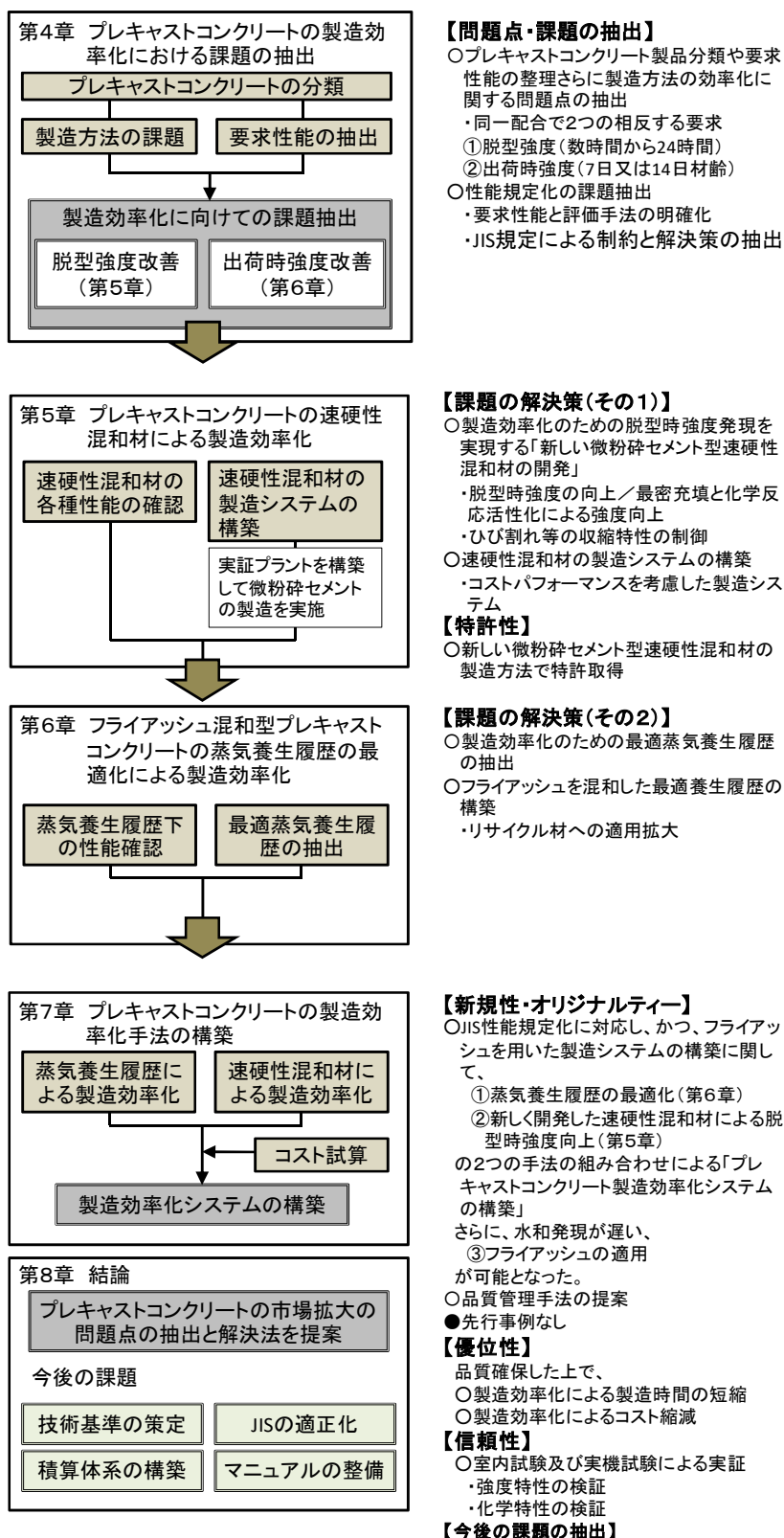


図8 本論文の構成

謝 辞

日本大学理工学部土木工学科 梅村靖弘教授には、本学位論文の主査として土木のコンクリートの観点から指導いただいた。先生とは大学時代から今日まで研究についてまた実務設計について懇切丁寧には時には厳しく指導していただいた。日本大学理工学部建築学科 中田善久教授には、建築コンクリートの観点から本論文の副査をお引き受けいただきました。先生からは建築と土木の考え方や制度の違いなど貴重なご意見をいただき、今後の研究に向けて有益なお話を頂戴した。日本大学理工学部物質応用化学科 小嶋芳行教授には、化学の観点から本論文の副査をお引き受けいただいた。セメントの化学反応や評価法等について貴重なご指摘をいただいた。心より感謝の意を表します。

私の研究の原点は、日本大学大学院理工学研究科土木工学専攻博士前期課程時代、色部 誠教授（当時 日本大学理工学部交通土木工学科教授）の研究室に配属になり破壊力学、応用力学や有限要素解析などの指導をいただき、そして初めてコンクリート構造物について本格的な研究について指導いただいた。色部先生とは、初めての論文発表(1984年)、初めての国際会議（中国南京工科大学 1986年）での発表経験をさせていただいた。論文作成時は、必ず先生と二人で都内のホテルのツイン室に泊り、徹夜で執筆を行った思い出がある。また、初めて委員会にも同席させていただいた。まだ学生の青二才の私を最先端の工学の世界に導いていただきました。この委員会（NAPRA）で初めて国分正胤東大教授、山田嘉昭東大教授、前川宏一博士、桜井博士らの真剣な乃木会館での議論を拝聴させていただき、コンクリートの数値解析開発への熱意を知った。この成果は、現在の東大コード WCOMM の原点となったものである。また色部先生には、博士課程への進学に迷っていた時、東京大学大学院工学系研究科土木専門課程博士課程への進学を推薦いただき岡村甫東京大学教授を紹介いただいた。色部先生には現在の研究の方向性や研究姿勢などを学び、毎日17時から習志野校舎の研究室で一緒に恵比寿ビールを嗜んだ思い出が今も脳裏に焼き付いている。

最上武雄教授（当時 日本大学理工学部土木工学科教授、東京大学名誉教授）には、基礎力学、応用力学、土質力学について指導をいただいた。特に基礎力学に関しては、私一人の履修にもかかわらず、広い教室で授業していただいた。さらに、毎回続きは先生の広い研究室のソファで指導いただき、この個人教授は2年間に亘り続いた。その中で、「すぐやる」精神を叩き込まれた。そして東京大学大学院博士課程への進学を勧めていただいた。先生がさんちゃんとい

緒に受けた徴兵検査では体が弱く不合格だったとの話や東大学生運動の時の緊迫した話は、今も脳裏に焼き付いている。

川口 昌宏教授（当時 日本大学理工学部交通土木工学科教授）には、カステリアの定理やエネルギー法など応用力学について学んだ。またティモシェンコ博士の弾性論についても原文により指導いただいた。この経験を生かして、修士2年の時は、土木の修士の有志を募ってティモシェンコ勉強会を主宰出来たのは、上に立つ者の使命であることを最上教授及び川口教授から学んでいたからであった。さらに東京大学博士課程進学について東大岡村甫教授へ個人的に推薦書を書いていただいた。先生には感謝しても感謝しきれない恩があるにもかかわらず、お礼を言う間もなく癌でお亡くなり、すぐやる精神が実現出来なかった。

鈴木俊男教授（当時 日本大学理工学研究所教授）には、橋梁工学について指導いただいた。特に日大土木橋梁研究室の故成瀬勝武教授からの言い伝えである「隅田川橋梁群の設計において、地震対策として同じ構造形式の橋梁を作らないという冗長性設計についての教え」は今も実務経験に役立っている。

山崎徳也教授（当時 日本大学理工学研究所教授）には、メタルのせん断流など薄肉構造について学んだ。また現在の羽田空港の基本となった羽田空港の拡張工事を一緒に見学し、土木の壮大さを学んだ。

なお、日本大学は私にとって鬼門であり、なかでも2つの出来事は今もって呪縛として残っている。1つは修士2年スタートした時、大学院を辞めざる出来事が起きたことである。全て私の若気の至りであるが、その時に親身になって引留めていただいたのが現在清水建設土木本部長の池田謙太郎先輩であり、土木工学科では修論の引き受け手がなかった時、交通土木工学科で拾っていただき修士論文の指導をしていただいたのが色部先生であった。2つ目は、日大から東大へ進学したことで、日大修了式当日に日大から破門されそれ以降20年間日大の門をくぐるができなかったことである。なお、日大から破門されたにも関わらず創立90周年を迎える日大土木の記念式典に発起人として名を連ねることが出来さらに卒業名簿に名前が復帰したことが何よりもうれしい。これはひとえに主査の梅村教授の運動があったからである。また、こうして学位論文を引き受けていただいた。感謝申し上げます。

東京大学大学院に進学してからは、当時の指導教官 岡村甫教授（元高知工科大学学長・理事長）、国島正彦助教授（現高知工科大学教授）、前川宏一助教授（現東大大学院社会基盤学専攻教授）には研究のイロハやコンクリート示方書の役割などを指導いただいた。また上田多門助教授（現北海道大学教授）、二羽淳一郎講師（現東京工業大学教授）にはコンクリート構造に関するさまざまな指導をいただいた。特に岡村先生には、研究の本質を学ばさせていただき、

現在の研究に関する姿勢はその時に学んだものである。しかし、東大では博士課程に入学したものの日大での修士の単位が認められず、修士からの36単位を取得し直したことは時間的に精神的に負担であった。また自分の未熟さも相まって3年間で学位を取得できず満期退学をするに至ってしまい推薦いただいた先生方に迷惑をかけてしまった。また、当時の秘書齋藤さんには、随分と助けられました。教授室から出てくるときに必ず笑顔で迎えていただき、次の1週間の活力になった。

大学以外でも多くの方々に指導をいただいた。

土木学会コンクリート委員会活動として、主に構造及び耐震に関する委員会に参加した。構成則関連では前川宏一東大教授とは随分と議論させていただいた。耐震委員会では丸山久一教授（長岡科学技術大学名誉教授）、島 弘教授（高知工科大）、渡辺忠朋北武コンサルタント副社長（当時 鉄道総研）を始め耐震に造詣が深い先生方とは、設計と照査について随分と議論させていただいた。また、耐久性評価委員会では、名和豊春教授（北海道大学総長）、石田哲也教授（東京大学大学院）、伊代田岳史教授（芝浦工業大学）。この委員会は、コンクリート界で初めて長期性能の評価にチャレンジした委員会で、現在の長期物質安定性評価の基本をなしたものである。さらに高エネルギー加速器研究機構では戸塚洋二機構長の直属の研究員として J-PARC の設計に加え、セメント・コンクリート材料の中性子による材料物質構造解析や放射線に関する基礎を学んだ。

さらに、後藤幸正教授（東北大学名誉教授）には、隔週毎に仙台から東京に来ていただきコンクリートに関する指導を2年間に亘り2人きりでいただいた。中でも「GOTO Crack」の発見の苦労話やファーガソン教授（テキサス大学）との逸話について貴重なお話をいただいた。また先生に最期のぶどうジュースを勧めることができたのは光栄であり後悔でもある。そして亡くなる一週間前に仙台日赤病院に先生から会いたいとの電話連絡いただき、先生の教え子やコンクリート関係者の誰よりも早く病院を訪れることができた時の先生のお顔を今も忘れることはできない。これが最後のお別れとなってしまった。

また、長友成樹氏（ジオフロンテ研究会会長、元日本道路公団技術担当理事）には、一緒に加久藤トンネルや長崎トンネルを調査した思い出、大宰府天満宮の梅ヶ枝餅や博多での河豚の食事は思い出となった。江戸川橋では常に焼肉や鰻を御馳走になり山岳トンネルのイロハについてご指導いただいた。また、スイスのトンネル講座に派遣していただきヨーロッパのトンネルの実態にも触れることができた。長友氏は「入江だったらもっとやれるだろう」が口癖であり、それに答えることが出来なかったことが悔やまれる。

私が学術的にお世話になった色部誠教授、最上武雄教授、川口昌宏教授、後

藤幸正教授、長友成樹氏に公私に亘って大変お世話になったがお礼を伝える前にすでにお亡くなりになった。ここに改めて感謝するとともにご冥福をお祈りしたいと思います。

最初に職を得たのは、建設コンサルタントである日本技術開発(株) (現エイト日本技術開発(株)) であった。大学3年の時に発足したばかりの地震防災室(室長 佐伯光昭博士) にアルバイトとして入り、青焼きの丁稚奉公から各種基準作成に参画するまで、ここでの4年余りの修行は現在の実務設計の基本となっている。東京湾横断道路アクアライン Pj では、膨大な数のボーリングによる地質データを方眼紙に手でプロットして地質に関する特性値を算出したり、建設省土木研究所の DUCT コードを用いた解析を行った。1978年宮城県沖地震の地下インフラの被害分析結果による地盤急変部の被害に対して、当時の建設省土木研究所の川島和彦博士(東京工業大学名誉教授) や日本技術開発の磯山龍二博士の下で弾性床上の梁に対する正弦波を荷重とした4階偏微分方程式の理論解を解き共同溝設計施工指針(昭和61年発行)を作成したことは、地中構造物の設計に関する実務の取得に貢献した。この指針はその後の兵庫県南部地震等の巨大地震を受けても致命的な被害が発生していないことから未だ改定は行われていない。また、明石海峡大橋のケーソンの耐震設計手法について、波動論によるCFM解析コードの開発を行ったことも思い出す。また、米国カリフォルニア大学からSHAKEを日本に初めて導入しコード化したことも思い出す。

東大大学院を出て職業人として最初に就職したのは、(株)日建設計であった。大学院博士過程では毎日コンクリートを「練っては潰す」を繰り返していたこともあり、実務設計に興味を持ち、土木系の建設コンサルタントを希望し岡村先生の許可を得ようとしたが許可が下りず、コンクリートを真剣にやっている日建設計なら就職OKと許しを得た。日建設計ではコンクリート会議(議長 矢野 専務)に参画させていたき、建築のコンクリートから土木のコンクリートまであらゆるコンクリートに関する技術検討を行い、日建仕様を作成した。中でも日建設計は設計監理においてコンクリートの不具合があった建築物を3棟も作り直す命令を出す勇気と技術的知見を持つという重責の中で実務設計の厳しさを学んだ。日建時代の11年間では土木以外の建築の設計や消防設備も学ぶことができた。また、1年間経産省の関連団体である(財)エンジニアリング振興協会の主任研究員として出向し、国家備蓄プロジェクトに携われたことは役所経験として貴重であった。さらに最後の仕事となったのが、横浜みなとみらいコアシティープロジェクトであり、ここでは、世界で初めて超高層ビルと地下鉄構造を一体構造とし、鉄道軌道の上部に開口をあげ、手すりをガラス材

にするなど革新的設計をし、建設大臣認定と運輸大臣認定のダブル認定を取得した。また、鉄道軌道に防振軌道を始めて採用された。コンクリートの打設では、3種混合低熱セメント採用と高流動化を実現でき、約50万m³を打設した。なお、日建時代には、石灰石骨材の採用、高流動化セメントの採用、オペレーション室の抗堪設計など多くの特殊設計を行ったのも実務設計として学んだ。

その後、大根義男教授（愛知工業大学）の勧めもありジャパンザイペックス社に転職した。ザイペックス社は、年商2億円（年商従業員共に日建設計の100分の1）で誰も振り向きもしない零細企業であったが、5年間で5倍以上の企業に育てあげることができ、コンクリート界においてコンクリート無機補修の一時代を築くことが出来たと自負している。そして現在コンクリート界では「コンクリートの自己修復作用」という言葉が流行っているが、日本で初めてその存在を明らかにし論文として発表しその技術は、JR東日本及び東大生産研に技術移転した。また、新幹線の大規模改修の効果をカナダケベックで行われたアルカリ骨材反応に関する国際会議でJR東日本の松田氏と一緒に論文発表させていただきケベックでの1週間の思い出と同時に帰国時の搭乗した飛行機が車輪パンクによりモントリオール国際空港を閉鎖して不時着、緊急脱出し電研の山本博士と3人で滑走路を端まで爆走した思い出もある。その後、日本躯体処理(株)に移り、佐藤亮会長、平松賢治社長には、公私に亘って支援していただいた。

現在は、放射性廃棄物を300年に渡りコンクリートに閉じ込めるために、環境省の外局である原子力規制委員会／原子力規制庁において、第二種廃棄物の規制基準類の策定業務を担当している。約30年前にピット処分施設のコンクリートの性能評価では、「砂並みの透水係数」とされており、当時科学技術庁の顧問会メンバーであった岡村東大教授は、コンクリートはもっと高い性能を有しているためそのように評価するよう進言された。また放射性廃棄物には相当量の酸が含まれているのであれば、セメントでの閉じ込めは不適であることも併せて指摘されている。しかし、当局は「砂並みの性能」とする安全評価を説明できずに物別れになり、その後、顧問会を辞められたと研究室の言い伝えがある。今回の規制基準ではコンクリートを評価から技術的に性能照査することに改訂できたことはコンクリート技術者冥利である。真の技術は1つであるとそれを追求することを諸先輩たちから教えられたことが今回活かされたのかもしれない。しかし、自分としては今まで習得した設計監理及びセメント技術を最大限に発揮できるものと考え原子力規制庁へ転職したが、このような真の技術を使う場面がなく社会のために汗を流す雰囲気も無い。本論文には原子力規制庁で得られた知見は一切ないことを付け加えておく。

大学人としての経験は、慶応義塾大学において12年間に渡り建築コンクリート構造について講義を行った。これは日建設計時代の同期である小林博人教授（慶応義塾大学大学院政策メディア研究科）の計らいにより実現したものである。一方、母校日大理工土木では、10年間に渡りヴィジュアルスタディーコンクリート、コンクリート工学、建設工学、土木技術者倫理を担当した。この教育者として過ごした10数年間は、人に伝える難しさを実感したときであった。

土木工学科として国立と私学の両方の雄で学べたことは、歓喜の極めである。国立の官僚的構築の手腕、私学の社会的実務構築の手腕の、さらに民間会社に於いて建築と土木の設計から施工監理まで、役所の行政経験と多岐に経験出来たことは幸せであった。

本論文作成には、ナノセメント研究会の会員各社や清華大学の安教授の協力はなしでは達成し得なかった。また、日本大学理工学部化学教室の露木尚光元教授、小泉公志郎准教授の実験協力や適切なアドバイスがあったことをここに記す。

最後に、今日まで温かく見守っていただいた父入江船一、母和子と妻佳子、長男正佳、次男正直、三男正育に感謝する。土木技術者になったのは、熊本県職員であり土木技術者である父の背中を見て育ち、民生委員であるおじ矢野一の社会への貢献を肌で感じ、ライオンズクラブの交換留学で感じたアメリカでのシビルエンジニアの高い地位に感激し、社会に貢献できる土木技術者を職業として選んだ。そして多くの方々の応援と指導のもとに今日まで研鑽を重ねることができた。残された時間を応援くださった方々への恩返しとして、後進の指導と共に土木技術者の社会的地位向上のために尽くしたい。

平成29年9月吉日