

## 論文審査の結果の要旨

氏名：入 江 正 明

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：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

審査委員：（主査）教授 梅 村 靖 弘

（副査）教授 中 田 善 久 教授 小 嶋 芳 行

現在、国土交通省では、建設技能労働者の高齢化等による大量離職を踏まえて2016年に建設生産プロセスの向上を目指した「i-Construction」プロジェクトを立ち上げている。このプロジェクトの中で、予め工場で作られたコンクリート部材を現場で組立て構造物を建設するプレキャストコンクリートへの転換を推進している。予め管理された工場で製造されるプレキャストコンクリートは、コンクリート製造プラントで製造されたフレッシュコンクリートを建設現場まで運搬し打込みをする現場打ちコンクリートのように運搬時の品質変動、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、比較的低廉で高品質のコンクリートの製造が実現できる。一方、建設産業界においてもリサイクル法に基づき、石炭火力発電所から発生する産業副産物であるフライアッシュの有効利用が求められているが、コンクリート混和材としては初期強度発現が遅いことから欧米ほどには有効利用が進んでいない。そこで、セメントやフライアッシュの水と反応の促進を図り養生期間を短縮できる蒸気養生を施すことが可能なプレキャストコンクリートへの利用拡大が検討されている。この蒸気養生工程に関しては、1969年制定の土木学会「鉄筋コンクリート工場製品設計施工指針（案）」において、JISで規定されていた蒸気養生履歴が採用され、その後、最新の2012年制定の土木学会「コンクリート標準示方書」まで見直されずに踏襲されているのが現状である。以上のような背景の中で、本研究は、リサイクル材の中で環境負荷低減効果や収縮特性に優れているが、初期強度発現が遅くコンクリート混和材として有効されていないフライアッシュを積極的に有効利用するために、蒸気養生に代表される加熱養生により強度発現の促進が可能なプレキャストコンクリートへ利用した場合の経済的かつ効率のよい製造方法を検討したものである。

本論文は、全8章から構成されている。

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、本研究の目的を示している。

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JISの歴史的変遷と各種規格や基準の現状、さらに、昨今の産業副産物を対象とした環境対策の要求に対する各自治体の制度設計に関してまとめている。また、コンクリート工事におけるプレキャストコンクリート工法の採用促進のためには、現場打ちコンクリート工法に基づく現在の積算方法の見直しが重要であることを指摘している。

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の観点から整理し、コンクリート構造物の設計における要求機能及び要求性能とその性能の評価指標と手法を明確にしている。また、国内の各種設計基準が使用規定から性能規定へ移行している現状の中で、JIS規定に基づき製造されるプレキャストコンクリートでは、フライアッシュのようなリサイクル材を使用する場合などにおいて、JIS規定が弊害となることを指摘しその解決策を提案している。さらに、今後、設計における性能照査項目では、構造耐荷力を考慮した構造安定性に加えてコンクリートの物質構造変化を考慮した物質安定性の必要性を指摘している。

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、使用される材料とコンクリートの配合設計及び製造手法についての現状を考慮したプレキャストコンクリートの製造効率化に関する具体的な改善方法を提案している。フライアッシュなどのリサイクル材を利用したプレキャストコンクリートの製造効率化では、リサイクル材の混和による蒸気養生後の型枠を外す際の圧縮強度（脱型時強度）の低下を抑え、製品を出荷する際の基準材齢である材齢14日時の圧縮強度（出荷時強度）を確保するために、リサイクル材に応じた蒸気

養生履歴の最適化と脱型時の圧縮強度のみを向上させるための速硬性混和材の開発が経済的かつ効果的であることを指摘している。

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効率化において、脱型時の圧縮強度を確保するために必要となる「速硬性混和材」の製造方法の提案と実証をし、その材料特性について明らかにしている。速硬性混和材は普通ポルトランドセメントを微粉碎したものを基本とした混和材であり、その強度増進効果がベースセメント粒子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ている。さらに、速硬性混和材の比表面積及び添加率と圧縮強度増進との関係から脱型時強度の増進を図る配合方法を示している。

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、最適蒸気養生履歴を見出すために、コンクリートの練混ぜ後の前置き時間、温度上昇速度、最高温度持続時間、降温速度が圧縮強度発現性へ与える影響を明らかにしている。さらに、圧縮強度発現特性とセメントの水和反応とフライアッシュのポズラン反応に関する水和反応解析結果をもとに最適な蒸気養生履歴について提案をしている。

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、速硬性混和材と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効率的な製造システムと品質管理の提案と実証を行っている。

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、さらなるプレキャストコンクリートの利用拡大の課題点と解決法を提案し本論の結びとしている。

申請者の研究内容の新規性ならびに独創性は以下のとおりである。

- (1)プレキャストコンクリートの JIS の歴史的変遷と各種規格や基準の現状、さらに、昨今の産業副産物を対象とした環境対策の要求に対する各自自治体の制度設計を考慮して、現在、プレキャストコンクリートへの利用が進んでいないフライアッシュを積極的に利用するための効率的な製造方法に関する課題点を抽出整理したことが高く評価できる。
- (2)プレキャストコンクリートを効率的に製造するための脱型時強度と出荷時強度を満足する最適な蒸気養生履歴の検討を圧縮強度発現性だけではなく、その強度発現の根幹となるセメントの水和反応やフライアッシュのポズラン反応の観点から行っていることが高く評価できる。
- (3)プレキャストコンクリートの脱型強度を確保するための経済的な方法として、微粉セメントからなる速硬性混和材を提案し実証したことが高く評価できる。
- (4)プレキャストコンクリートを効率的に製造するための蒸気養生履歴の最適化検討や脱型強度を確保するための速硬性混和材の開発において、粉末 X 線回折(XRD)/リートベルト法、熱重量示差熱分析、選択溶解法、TMS 法などを用いて、セメントの水和反応やフライアッシュのポズラン反応とその反応から生成される C-S-H 等の水和物の解析から検討を行っている。このようにコンクリートの性能をセメント硬化体のマイクロレベルの組織から分析して照査することは、強度からでは把握できない長期に亘る物性変化の予測に大きく寄与するものである。さらに、セメントの水和反応で生成する C-S-H の水和の進行と安定度を評価するために粉末中性子回折を利用しているが、セメント硬化体へ利用した研究は殆どなく新規性に富み、今後のセメントの水和反応解析に関する研究へ大きく寄与するものと高く評価できる。

以上、本論文の成果は、コンクリート工事におけるプレキャストコンクリートの積極的採用とフライアッシュなどのリサイクル材の利用促進に大きく貢献するものである。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以上

平成 30 年 2 月 15 日