

簡易透気試験による構造体コンクリートの  
品質評価方法に関する研究

野 中 英

# 目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的と範囲	1
1.3 コンクリートの透気性と試験方法	2
1.3.1 透気試験方法の分類	2
1.3.2 構造体コンクリートに適用可能な簡易法による透気試験方法	3
1.4 簡易透気試験の変遷・各種要因の試験結果と問題点・課題	10
1.4.1 試験装置	10
1.4.2 試験方法	12
1.4.3 評価方法	15
1.4.4 各種影響要因	18
1.4.5 簡易透気試験の課題	23
1.5 本研究の構成	24
第2章 ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法の提案	29
2.1 概要	29
2.2 簡易透気試験方法の検討	29
2.2.1 実験概要	29
2.2.2 実験結果および考察	33
2.3 ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法の提案	38
2.4 簡易透気試験方法による影響要因	45
2.4.1 実験概要	45
2.4.2 実験結果および考察	49
2.5 本章のまとめ	53
第3章 簡易透気試験の結果と他の透気試験の結果の比較	54
3.1 概要	54
3.2 各種透気試験方法の特徴	54
3.3 簡易透気試験の結果とφ100mmのコア供試体による透気試験の結果の比較	55
3.3.1 実験概要	55
3.3.2 実験結果および考察	58
3.4 簡易透気試験の結果と他の簡易法による透気試験の結果の比較	61
3.4.1 実験概要	61
3.4.2 実験結果および考察	64
3.5 本章のまとめ	68

第4章 簡易透気試験方法による構造体コンクリートの中性化抵抗性評価	69
4.1 概要	69
4.2 中性化抵抗性評価を行う場合の簡易透気試験材齢の検討	69
4.2.1 実験概要	69
4.2.2 実験結果および考察	72
4.3 調合、養生の異なるコンクリートの促進中性化深さ、簡易透気速度	74
4.3.1 実験概要	74
4.3.2 実験結果および考察	76
4.4 簡易透気試験方法による構造体コンクリートの中性化抵抗性評価	78
4.4.1 JASS5 の計画供用期間の級に対応する促進中性化深さの算出	78
4.4.2 簡易透気速度と促進期間 26 週の中性化深さ、JASS5 における計画 供用期間の級との関係	81
4.5 本章のまとめ	83
第5章 簡易透気試験方法を用いた各種養生方法の効果に対する評価	84
5.1 概要	84
5.2 簡易透気試験方法を用いた湿潤養生方法の違いによる養生効果の評価に 関する検討	84
5.2.1 実験概要	84
5.2.2 簡易透気試験結果	87
5.2.3 簡易透気試験方法を用いた湿潤養生方法の違いによる養生効果の評価に 関する検討	87
5.3 簡易透気試験方法を用いた塗布材による品質改善効果の検討	89
5.3.1 実験概要	90
5.3.2 簡易透気試験結果	93
5.3.3 簡易透気試験方法を用いた塗布材による品質改善効果の評価に関する検討	96
5.4 本章のまとめ	99
第6章 総括	100
6.1 各章のまとめ	100
6.2 今後の課題と展望	102
謝辞	103
研究目録	104

# Study on Evaluation Method for Quality of Structural Concrete with Rapid Air-Permeability Test

Akira NONAKA

This paper has developed the drilled-hole method as a rapid air-permeability testing method that can be used for the concrete in structures. Next, Comparison of an easy air-permeability test method, evaluation of carbonation resistance of concrete in structures and quality evaluation of the curing compound was examined with the proposed “rapid test method for air permeability of structural concrete with drilled-hole”.

The second chapter proposes “rapid test method for air permeability of structural concrete with drilled-hole” which is considered to apply for structural concrete. Moreover presents the tendency which test results indicate on each factor of affecting the rapid air permeability test. Measurements of the proposed test method were examined with various parameters. As a result, rapid air-permeation speed increased, when water cement ratio increased, cement hydration delayed, air content increased, age of drying became earlier and test age was delayed.

The third chapter shows a comparative study of the test results of the drilled-hole method, the Double chamber method, and the Single chamber method aiming at understanding the interrelationship of their test results and capability of examining carbonation resistance using concrete specimens with different water-cement ratio and the age of drying.

The fourth chapter is rapid air permeability testing method proposed by the authors was applied to predict the carbonation resistance of concrete in structures. Concrete specimens with variable water-cement ratio, type of cement and age of drying were prepared and subjected to the rapid air permeability test and accelerated carbonation test. Rapid air permeability speed corresponding to the JASS5 design service life classes were obtained using the relationships between accelerated carbonation depth and rapid air permeability speed by cement type.

The fifth chapter is aimed at checking effect, and quality evaluation of the curing compound which are applied on concrete surfaces. As a result, evaluation of carbonation resistance is strictly difficult and that of chloride permeability resistance has not been performed at all.

# 第 1 章

## 序論

## 第1章 序論

### 1.1 研究の背景

近年，日本では，スクラップアンドビルドからの脱却，持続可能な循環型社会へと移行が図られ，建築物の長寿命化が謳われている。日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2009」（以下 JASS 5 と略記）では，構造体および部材の建設時の初期性能を高め入念な施工を行うことにより長期の耐久性を有すること，維持管理を定期的に行うことにより長期の耐久性を実現することが重要であるとしている<sup>1)</sup>。

鉄筋コンクリート構造物の劣化は，二酸化炭素，塩化物イオン，水，酸素等の劣化因子が，コンクリート表面から内部へと移動することが起因している場合が多い。中性化による鉄筋腐食，塩害，凍害，アルカリシリカ反応等を引き起こしている。劣化因子の移動現象は，コンクリートの透気性，透水性といったコンクリートの物質移動性と高い関係がある。

コンクリートの透気性とは，コンクリート内の気体の透過しやすさをあらわす性質であり，中性化と関係のある指標として研究の対象とされている<sup>2)</sup>。コンクリートの透気性の研究は，コンクリートの基本物性の一つとして，透気性に及ぼす材料，調合，養生等の条件の影響を供試体により確認している。透気性の試験方法は，従来，円柱および角柱の供試体に一定圧力の気体を作作用させ，流れが定常となった後に供試体の反対の面から透過する気体の流量を測定し，ダルシー則を適用して透気係数を求めて評価している。しかし，近年，透気性の関心は，コンクリートの透気性に及ぼす材料，調合，養生の影響要因の解明から，実構造物の原位置における透気性を評価し，その構造物の耐久性を予測，維持管理に利用する方向に移っている<sup>3)4)</sup>。供試体による透気試験は，透気性を直接的に測定する方法であるが，実構造物の原位置ではコンクリートに定常流の空気を流すことは不可能である。

1970年代に入り，ヨーロッパでは実構造物の原位置で測定可能な透気試験方法を開発する研究がみられるようになった<sup>5)</sup>。日本では，笠井が1980年代に入り Figg により提案された削孔法<sup>6)</sup>による透気試験を構造体コンクリートに適用可能な方法として，整理・発展してきた<sup>7)8)9)</sup>。この方法は，直径10mm，深さ50mmのドリル削孔にコンクリート表面より10mmまでシリコン栓により封をする方法であり，表面法による透気試験と比しチャンバーを押しあてた直下のコンクリート組織の粗な影響を受けにくく，更にかぶりコンクリートの範囲である50mmまで<sup>10)</sup>ドリル削孔を行うため，内部の影響も反映されていると考えることができる。現在では，国内外で多くの実構造物の原位置で測定可能な透気試験が考案・提案されており，日本でも削孔による方法，シングルチャンバーによる方法，ダブルチャンバーによる方法の研究開発とその利用例がみられる。

### 1.2 研究の目的と範囲

本論文では，こうした背景を受け，鉄筋コンクリート構造物の耐久性に関わる透気性を，笠井・湯浅らが整理・検討してきた方法に基づき，1996年以降に実施した実構造物に適用可能な透気性の試験方法に関する研究により構築されている。本論文では，削孔を用いた笠井・湯浅の方法を「簡易透気試験方法」として定義し，以下に示す4つの検討を行った。

(1) ドリル削孔を用いた簡易透気試験方法の確立・提案

- (2) 簡易透気試験の結果と他の透気試験の結果の比較
- (3) 簡易透気試験を用いた構造体コンクリートの中酸化抵抗性評価
- (4) 簡易透気試験方法を用いた各種養生方法の効果に対する評価

### 1.3 コンクリートの透気試験方法

#### 1.3.1 透気試験方法の分類

コンクリートの透気性に関する試験方法は基本的には透水試験の水を気体に置き換えたものであり、透水試験のアウトプット法において水の代わりに気体を用いる定圧方法と、所定の圧力を作用させた後その圧力の経時変化を測定する変圧法の 2 種類に分類される<sup>11)</sup>。透気試験方法の分類は、図 1.1 に示した通りである。

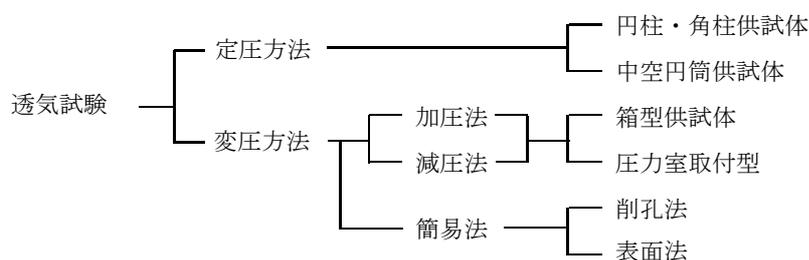


図 1.1 透気試験方法の分類<sup>11)</sup>

#### (1) 定圧方法

定圧方法は、一定圧力の気体を供試体表面に作用させ、流れが定常となった後に供試体の反対の面から透過する気体の流量を測定し、ダルシー則を適用して透気係数を求めて評価する方法である<sup>11)</sup>。試験体の形状は円板、円柱、角柱供試体を用いたものや中空円筒形を用いたものなどがある。図 1.2 は、透気試験装置（定圧方法）の概略図を示したものである。

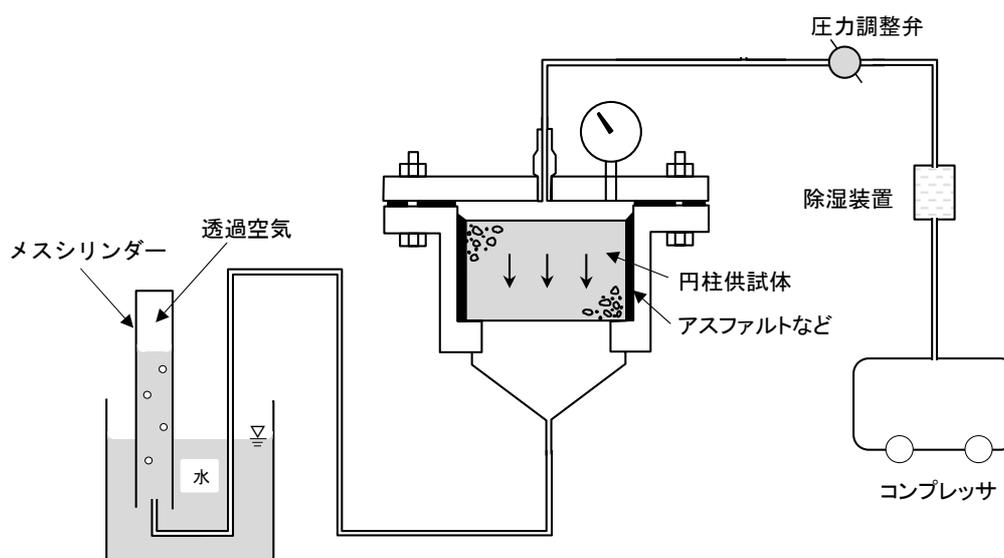


図 1.2 透気試験装置(定圧方法)の概略図

## (2) 変圧方法

変圧方法は、供試体に設けられた空間や供試体表面に取り付けられた圧力室内を加圧あるいは減圧し、所定の圧力を作用させた後の圧力の変化と経過時間を測定することにより、コンクリートの透気性を評価する方法である<sup>11)</sup>。供試体はその内部に加圧あるいは減圧させる空間を有しているものが多い。供試体の大きさは、圧縮強度用供試体程度のものから実構造物程度のものまで広範囲であり、実構造物の一部を用いて透気性を測定する方法もある。図 1.3 に、透気試験装置（変圧方法）の概略図を示す。

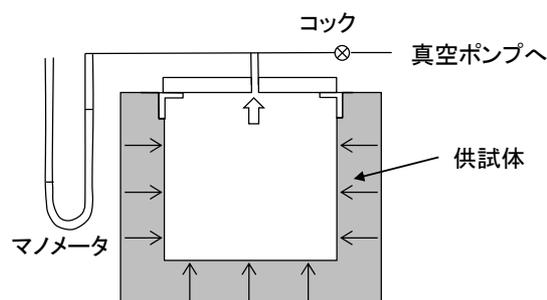


図 1.3 透気試験装置(変圧方法)の概略図<sup>12)</sup>

## 1.3.2 構造体コンクリートに適用可能な簡易法による透気試験方法

構造体コンクリートの透気性を評価する方法として、1973年に論文発表された Figg の方法にはじまり、それ以降様々な方法が提案されてきた。構造体コンクリートに適用可能な透気試験方法は、2006年の「実構造物の表層透気性の非・微破壊試験方法に関する研究の現状」<sup>3)</sup>や2007年の「Non-Destructive Evaluation of the Penetrability and Thickness of the Concrete Cover」<sup>9)</sup>、2012年の「構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会（JSCE335委員会）第2期成果報告書およびシンポジウム講演概要集」<sup>10)</sup>などによりまとめられている。

ここでは、上記文献を参考に、国内外における実構造物に適用可能な、透気性の非・微破壊試験を示し、更に近年の国内の動向を追加して整理した。表 1.1 に簡易法における透気性の試験方法を示す。透気性の試験方法としては削孔法と表面法があり、それぞれに減圧と加圧があり、また表面法の中にはシングルチャンバー法とダブル（トリプル）チャンバー法がある。

表 1.1 簡易法における透気性の試験方法

試験方法		研究者
削孔法	減圧	Figg <sup>4)</sup>
		笠井ら <sup>12)</sup>
	加圧	Reinhardt ら <sup>9)</sup>
		Hong ら <sup>13)</sup>
		Paulman <sup>9)</sup>
Hansen ら <sup>9)</sup>		
表面法	シングルチャンバー法	減圧
		Schönlin <sup>14)</sup>
		Autculam <sup>9)</sup>
	ダブルチャンバー法	減圧
		氏家ら <sup>15)</sup>
		Germann <sup>9)</sup>
ダブルチャンバー法	減圧	Torrent <sup>16)</sup>
		Zia-Guth <sup>13)</sup>
		蔵重ら <sup>17)</sup>

## (1) 削孔法

削孔法は、コンクリート表面を削孔し、その孔を密封した後に減圧もしくは加圧し、コンクリートを通り流入・流出する空気による圧力変化の速度を求める方法である。測定は、深さ 35～50mm の孔に長さ 10～20mm 程度の栓などを用いて行う。表面のみにチャンバーを当てるシングルチャンバー法、ダブルチャンバー法に対し、コンクリートの空気透過性をより反映させることのできる方法といえるが、微破壊ではあるが破壊を伴うため、完全な非破壊試験といえるシングルチャンバー法、ダブルチャンバー法と比し試験位置・数が限定される場合がある。

## (a) Figg が 1973 年に提案した方法

Figg の方法は、図 1.4 に示すように、コンクリートにドリルを用いてあけた直径 5.5mm、深さ 30mm の穴を用いる。厚さ 3mm のポリエーテルフォームシートから切り取られた直径 7.5mm のディスクをコンクリート表面から 20mm の位置に押し込む。削孔に速硬型液体シリコンゴムを使い捨て注射器を用いて注入する。全長 36mm の 16 ゲージの皮下注射針をシリコンゴムに通す。図 1.4 に示すように、注射針と水銀圧力計とハンドバキュームポンプをスリーウエータップと Luer コネクターとプラスチックチューブにより接続する。

測定は、スリーウエータップをポンプ、削孔、圧力計をつなぐようにあけ、次にハンドポンプにより圧力が  $15\text{kN/m}^2$  (15kPa) になるまで低下させる。それから、ポンプ、圧力計のみが接続されている状態になるようにスリーウエータップを回転させ、削孔内部が  $20\text{kN/m}^2$  (20kPa) まで圧力が低下する時間を計測する。この時間をコンクリートの透気性の指標とする。

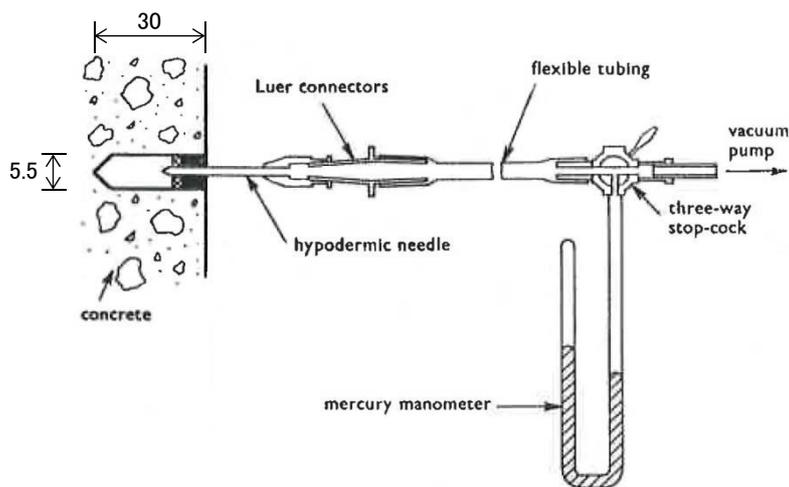


図 1.4 Figg の透気試験方法 <sup>4)</sup>図 1

(b) TUD 法

TUD 法の試験は、図 1.5 に示すようにコンクリートにあけた直径 10mm、深さ 40mm の小孔により行われる。試験空間は、プローブを通したゴムリングをはめ込み、孔をシールして行う。リングの拡張は、ナットを締めることによるリングの縦の圧縮により行われる。チャンバーをシールした後、プローブを通して 10~10.5bar の圧力となるように窒素ガスを入れる。10~9.5bar に圧力が低下した時間を試験結果とする <sup>9)</sup>。

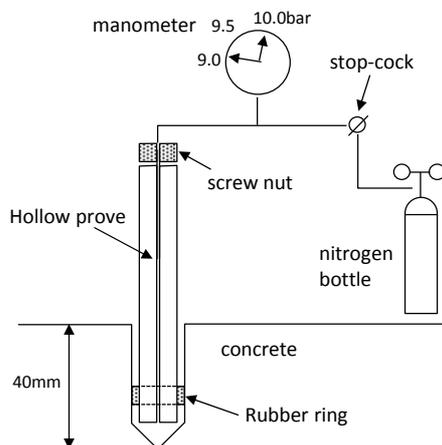


図 1.5 TUD 法 <sup>9)</sup>図 3.27

(c) Hong-Parrot の方法

Hong-Parrot の方法は、コンクリート表面に開けた直径 20mm、深さ 35mm の密封された孔により行われる。孔のシールは、ステンレスプラグと拡張シリコンゴム、ゴム・スリーブにより行う。圧力トランスデューサとデジタル表示装置をプラグに接続する。試験孔を減圧した後、50~35kPa 圧力が低下する時間を測定する <sup>13)</sup>。

## (2) シングルチャンバー法

シングルチャンバー法は、コンクリート表面に設置したチャンバーを減圧もしくは加圧したときの圧力変化に関する指標を求める表面法の一つである。この試験方法は、きわめて簡便で、比較的短時間で結果が得られ、同一位置であれば試験の再現性も高い。しかし、チャンバーを押し当てた直下の粗な影響を過度に受けやすいと指摘されている。

## (a) Schönlin's の方法

Schönlin's の方法は、図 1.6 に示すようにコンクリートの表面および内部を真空にするのに、ゴムガasketを備えたセルを設置して行う。圧力は、ゴムリングでシールされた真空チャンバーにより、コンクリート表面にセルを設置し減圧する。ある一定の圧力に達した時、栓を閉じ、50~100mbr 圧力が上昇する時間を測定する。密実なコンクリートの場合、120 秒における圧力変化を測定する。これらの測定値により「透気指数」 $M(m^2/s)$ を計算する<sup>14)</sup>。

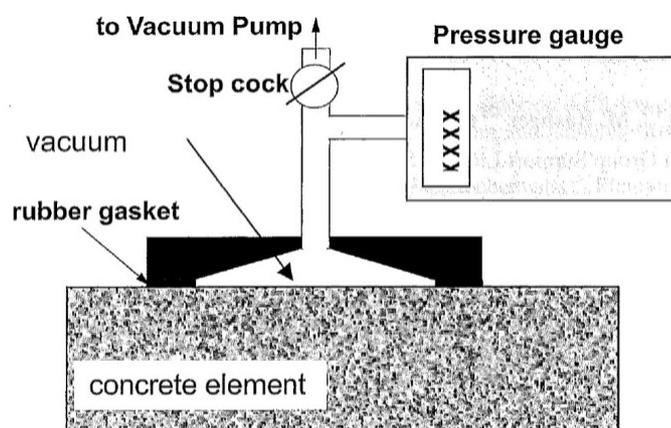


図 1.6 Schönlin's の方法<sup>14)図1</sup>

## (b) Autoclam 透気試験

Autoclam Air Permeability Test は、50mm の直径をテスト領域とし、ベースリングを接着もしくはゴムリングで表面にシールすることにより行う。試験圧力を記録する圧力トランスデューサを含む Autoclam の本体は、テストリングとボディーの間を O リングでシールし、ベースリングにボルトで締める。透気試験は、装置の中の圧力を 0.5bar よりわずかに増加させた後、圧力が 0.5bar になったときに自動で開始する。その後、15 分か圧力がゼロに減少するまで、圧力低下を毎分測定する。試験結果は、15 分間の試験における 5 分と 15 分の間の線形回帰曲線より、透気性指標  $(Ln(bar)/分)$  を算出する<sup>11)</sup>。

## (c) 氏家らの方法

氏家らのシール法は、図 1.7 に示すように、コンクリート表面を円形に気密処理し、その中央から真空ポンプで空気を吸出し、吸出した流量から透気係数を算出する<sup>15)</sup>。

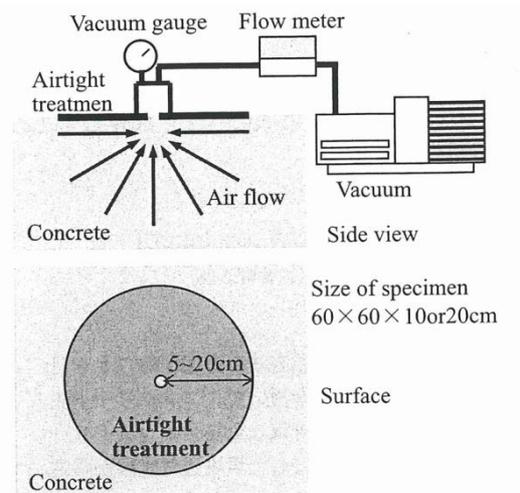


図 1.7 氏家らの方法 <sup>15)</sup>図 1

(d) Germann の方法

Germann の方法は、図 1.8 に示すように行う。テストリグは表面に固定された 2 つの固定ペンチ、ダイヤモンドドリルで表面に 45° で開けられた 18mm の穴により固定される。圧力ヘッドはドリル孔のコンクリート表面にジグを用いて取り付けられる。圧力センサを備えたシールリングを挿入する。センサは圧力ヘッドの下にコンクリートの非常に小さい圧力変化を検出できる。圧力ヘッドは減圧バルブのある高圧の CO<sub>2</sub> ガス・ボンベに接続される。バルブは、希望のレベル(1~4bar)に調整されて、開けられる。圧力は、圧力ヘッドに提供されて、自動的に維持される。圧力ヘッドの内径は、粗骨材寸法による試験結果の変化を最小とするため 60mm とした<sup>9)</sup>。

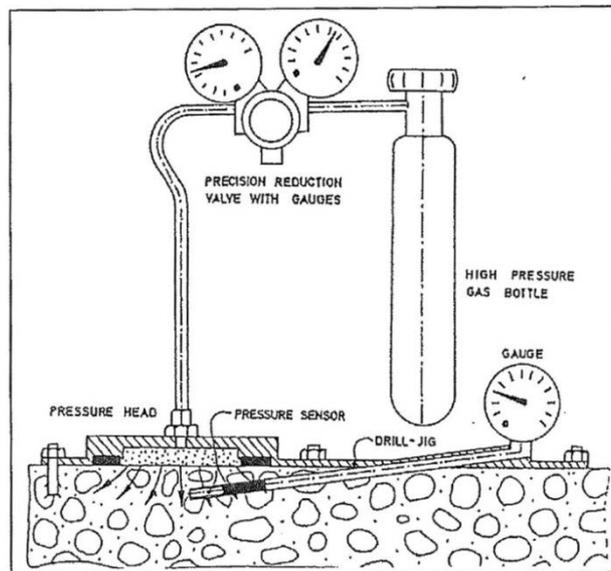


図 1.8 Germann の方法 <sup>9)</sup>図 3.37

## (3) ダブル(トリプル)チャンバー法

ダブルチャンバー法は、計測に供するチャンバー（内部チャンバー）の外側にチャンバー（外部チャンバー）を設け、外部チャンバーと同じ圧力下で、内部チャンバーの圧力変化を測定するものである。シングルチャンバー法で懸念されているコンクリート極表層の粗な組織の影響を排除できると考えられ、コンクリートから採取したコアなどを用いた透気試験と同様に、ダルシー則に基づく透気性の評価が可能と考えられている。蔵重らは、チャンバーを3つ設け、コンクリートの表層と内部の品質を判断する方法を検討している<sup>17)</sup>。

## (a) トレント法による透気試験

図1.9に、トレント法による透気試験の概要を示す。市販の装置によりコンクリート表面に減圧したチャンバー（内部チャンバーと外部チャンバーの2つのチャンバーを有する）を設置し、その内部チャンバーの気圧変化から透気係数を算出する。内部チャンバーの気圧上昇の測定値からトレント法による透気係数  $K_t$  を算出するには、コンクリートを均質体と仮定し、透気試験において気圧変化を生じる影響領域が時間とともに深部へ拡大するといったモデル化がなされている。これに圧縮性流体の一次元流れを表す Hagen-Poiseuille 式を適用し、トレント法による透気係数を算出する<sup>16)</sup>。

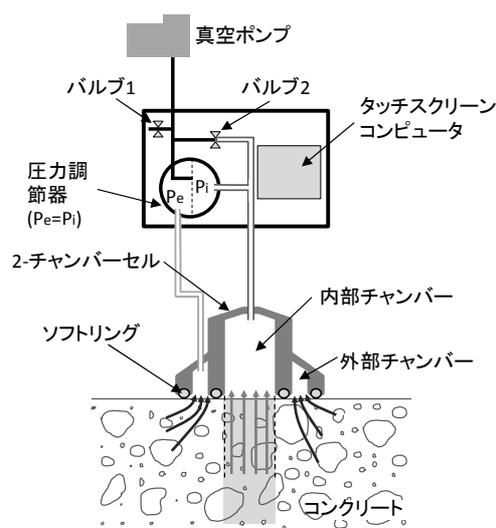


図 1.9 Torrent 透気試験<sup>16)</sup>

## (b) Zia-Guth の方法

Zia-Guth の方法は、図 1.10 に示すように実験箇所を選択した後に、円形のテンプレートをコンクリート表面に設置し行う。そして、速硬型のエポキシの被膜をリングの外部に付ける。次に、装置は、図 1.10 に示されているように、コンクリート表面にしっかり設置する。テストは両方のチャンバーの、真空度が約 2kPa のとき開始される。15 分以降にインナーチャンバーバルブは閉じられる。次に、空気はアウターチャンバーに入る状態とする。そして、インナーチャンバーの圧力上昇の記録を開始する。5 秒間隔で、インナーチャンバーの圧力上昇を 1 時間記録する。テスト結果は、時間と圧力の曲線による求める<sup>13)</sup>。

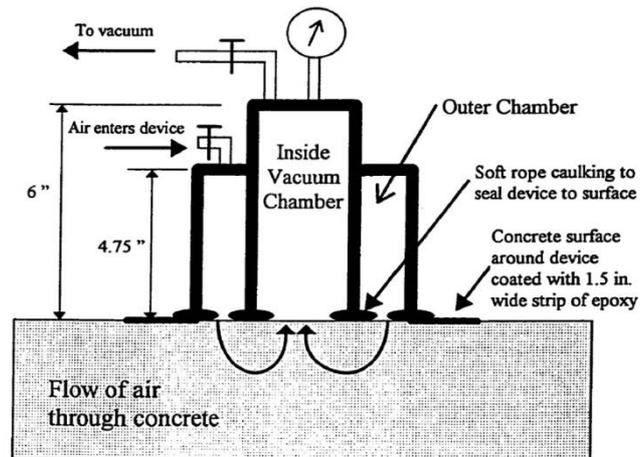


図 1.10 Zia-Guth の方法 <sup>13)</sup>図 4.45

(c) 蔵重らの方法

蔵重らの方法は、外部チャンバーの気圧制御による 1 次元流れを対象とした、Torrent 法とは対照的に、図 1.11 のように同心円状に配置した 3 層のチャンバー（最外縁径約 200mm）に 3 次元的に流入する空気を捉えるものである。3 層のチャンバーそれぞれの気圧変化は、コンクリートの品質の良否やその分布を受けるものと考えられ、逆解析によりそれらを推定できるものと推定される。

実際には、コンクリート表面に装置を当て、真空ポンプにより各層を減圧した後（本研究における条件：60 秒間、3kPa 以下）、バルブを閉じて各層の気圧上昇をモニタリングするものであり、試験時間は中心層の気圧が 50kPa を超えるか、バルブ閉塞後 660 秒経過するまでとした <sup>17)</sup>。

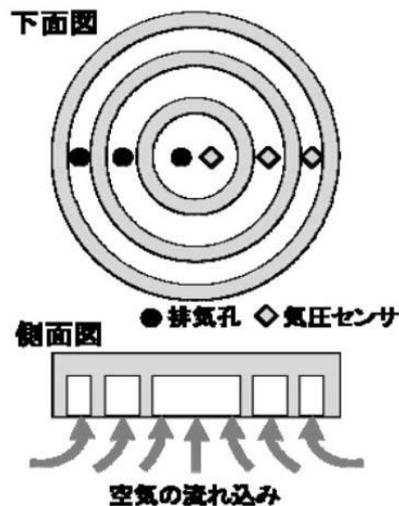


図 1.11 蔵重らの方法 <sup>17)</sup>図 1

#### 1.4 簡易透気試験の変遷・各種要因の試験結果と問題点・課題

簡易透気試験方法は、笠井らが1982年以降に構造体コンクリートの透気性を評価する方法として、Figgの方法を改良し、試験装置・方法の改良や実構造物への適用などが行われてきた<sup>19)~46)</sup>。本節では、過去の検討結果より問題点・課題を抽出するため、文献を整理した。

##### 1.4.1 試験装置

表1.2に、簡易透気試験装置に関する検討事項を示す。試験装置に関しては、1982年当初Figgの方法に対して栓のみがゴム栓+コーキング材と異なっている。1988年にバキュームポンプ（真空ポンプ）の使用、1990年にデジタルマノメータの使用と、手動から自動化されている。1992年にはゴム栓を使用していたのが、専用のシリコン栓に変更になっている。

試験装置に関しては、変更は少なく、変更のあったものに関しても自動化されているのみである。現在、デジタルマノメータおよび真空ポンプを使用しているが、測定数が多い場合には便利であるが、現場などで測定数が少ないような場合には、簡易に、安価で行えることを考えると、U字型真空計+ストップウォッチ、ハンドポンプを使用しても良いと考えている。

表 1.2 簡易透気試験装置に関する検討事項

年代	試験装置					
	針	真空計	計測	栓	真空ポンプ	ドリル
1982	16ゲージ36mm 皮下注射針	U字型 真空計	ストップ ウォッチ	ゴム栓+コーキ ング材	ハンドポンプ	電動ドリル
1983	静脈注射針	↓	ストップ ウォッチ	↓	↓	↓
1988	↓	↓	↓	↓	真空ポンプ	↓
1990	↓	デジタルマノメータ		↓	↓	↓
1992	↓	↓		シリコン栓+エ ポキシ樹脂	↓	↓

##### (1) 本論文で提案した方法

簡易透気試験は、図1.12に示すようにコンクリートを振動ドリルで削孔した直径10mm、深さ50mmの孔を用いて行う。試験では、直径10mm、深さ10mmのシリコン栓により密封した削孔内部を減圧した後、孔の周壁から空気の流入により真空度が $X_1$  (kPa) から $X_2$  (kPa) に低下する時間(T)を計測する。

$X_1$ および $X_2$ は、 $X_1$ を21.3 (kPa)、 $X_2$ を25.3 (kPa) (真空度の低下時間が10秒以下の場合には、 $X_1$ を13.3 (kPa)、 $X_2$ を33.3 (kPa))として測定する。

簡易透気速度は、(1.1)式により求める。

$$K = \frac{X_2 - X_1}{T} \quad \dots (1.1)$$

ここに、  
 K : 簡易透気速度 (kPa/s)  
 $X_1$  : 時間測定開始時の真空度 (kPa)  
 $X_2$  : 時間測定終了時の真空度 (kPa)  
 T : 真空度の低下時間 (s)

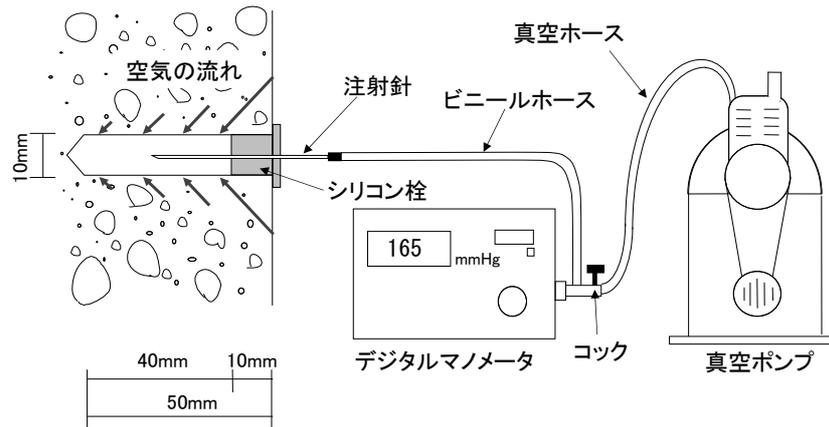


図 1.12 簡易透気試験装置

(2) Figg が 1973 年に提案した方法

Figg が 1973 年に提案した方法は、「1.4.2(1) (a) Figg が 1973 年に提案した方法」で示した通りである。

(3) 笠井らが 1982 年に提案した方法

試験装置は、図 1.13 に示すように、モルタル・コンクリートの透気性を試験するために試作したものである。試験方法は、モルタル供試体に、直径 5mm、深さ 30mm の穴を電動ドリルであけ、この穴に長さ 10mm のゴム栓で栓をする。このゴム栓に注射針をさし込み、試験装置のコック 1 およびコック 2 を開いた状態で、ハンドバキュームポンプにより内部の空気を抜き取り、水銀柱の上端が降下して A 点(150mmHg)に達したとき、コック 2 を閉じる。すると、空気が徐々に穴の中に集まり、穴の真空度が失われ、水銀柱の上端が上昇してくる。この時に水銀柱上端が B 点(160mmHg)から C 点(190mmHg)までの 30mmHg 上昇する時間を測定する。この結果から(1.2)式により簡易透気速度を求める<sup>19)</sup>。

$$k = \frac{30\text{mmHg}}{T} \quad \dots (1.2)$$

ここに、k：簡易透気速度(mmHg/sec)

T：水銀柱が 160mmHg から 190mmHg まで 30mmHg 上昇する時間(sec)

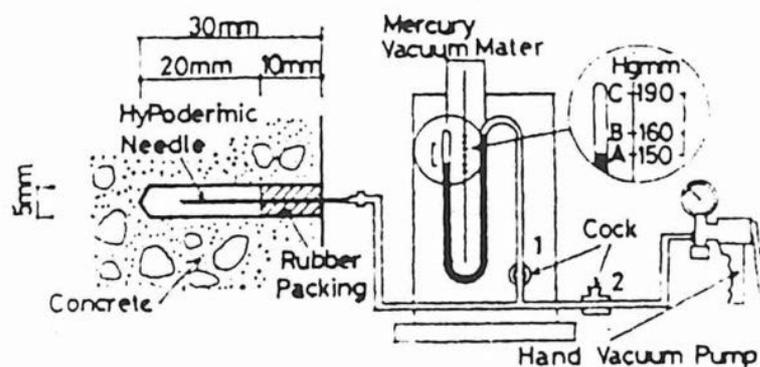


図 1.13 簡易透気性試験装置<sup>19)</sup>図 8

## 1.4.2 試験方法

表 1.3 に、簡易透気試験方法に関する検討事項を示す。

1982 年には、Figg の方法を参考に、直径 5mm、深さ 30mm の削孔に、 $\phi 5 \times 10$ mm のゴム栓を挿入して、圧力の範囲を 21.3kPa (160mmHg)～25.3kPa (190mmHg) として試験をしている。

1983 年には、削孔深さの検討を行い、削孔深さを 40mm に変更している。また、測定圧力範囲は 17.3kPa (130mmHg)～20.0kPa (150mmHg) と 1982 年よりも真空度は高くなっている。測定圧力の範囲に関しては、1989 年まで 8.0kPa (60mmHg)～13.3kPa (100mmHg) の範囲もしくは 18.7kPa (140mmHg)～24.0kPa (180mmHg) の範囲の 2 ケースで行われている。

1987 年には、削孔径を 8mm, 10mm, 削孔深さを 30mm, 80mm で行うことが多くなってきている。これは、ドリル削孔による中性化深さ試験方法、単位セメント量試験方法を併用することから、削孔径は大きく、削孔深さは深くなっている。1990 年に、「構造体コンクリートの簡易な品質評価方法に関する研究」<sup>32)~34)</sup>として、ドリル削孔を用いた一連の試験方法として、削孔径を 10mm, 削孔深さを 80mm, ゴム栓の寸法を  $\phi 10 \times 10$ mm, 測定圧力範囲を 21.3kPa (160mmHg)～25.3kPa (190mmHg) として、以降 1997 年までこの方法で試験が行われている。測定圧力範囲に関しては、1993 年に 21.3kPa (160mmHg)～25.3kPa (190mmHg) の時間が 10 秒以下の場合には 13.3kPa (100mmHg)～33.3kPa (250mmHg) で測定することが追加されている。

1990 年～1994 年には、測定方法の検討は行われず実構造物での調査が主に行われた。

1995 年になると、ドリル削孔による一連の調査ではなく、簡易透気試験のみを行う場合について検討をしている。その結果、簡易透気速度のみを行う場合には、かぶりコンクリートの範囲を対象とすることとして、削孔深さが 50mm に変更となっている。以降、削孔径 10mm, 削孔深さ 50mm として試験方法に変更はない。

また、この他に隣接する削孔の影響や、減圧部体積の影響などについても検討を行っている。

表 1.3 簡易透気試験方法に関する検討事項

年代	試験方法				
	削孔径	削孔深さ	栓の寸法	削孔深さ	圧力範囲
	mm	mm	mm	mm	kPa (mmHg)
1982	5	30	$\phi 5 \times 10$	20	21.3-25.3 (160-190)
1983	5	20, 40, 60	↓	10, 30, 50	17.3-20.0 (130-150)
1984	5	40	↓	30	16.0-21.3 (120-160)
1986	↓	↓	↓	↓	18.7-24.0 (140-180)
1986	5.5	50	$\phi 5.5 \times 10$	40	8.0-13.3 (60-100)
1986	5	40	$\phi 5 \times 10$	30	18.7-24.0 (140-180)
1987	8, 10	50	$\phi 8, 10 \times 10$	40	8.0-13.3 (60-100)
1988	10	30, 80	$\phi 10 \times 10$	20, 70	8.0-10.7 (60-80)
1988	↓	80	↓	70	18.7-24.0 (140-180)
1989	10	30, 80	↓	20, 70	8.0-10.7 (60-80)
1989	5, 8, 10	30, 50, 80	$\phi 5, 8, 10 \times 10$	20, 40, 70	8.0-13.3 (60-100)
1990	10	80	$\phi 10 \times 10$	70	21.3-25.3 (160-190)
1993	↓	↓	↓	↓	21.3-25.3 (160-190) 13.3-33.3 (100-250)
1995	↓	20-100	↓	10-90	↓
1997	10	50	↓	40	↓

以下に、簡易透気試験方法に関する既往の研究を示す。

図 1.14 に、穴の深さと透気性・透水性の測定時間の関係を示す。穴の深さと透気性の関係は、線形関係であるが、結果はごくわずかな違いしか認められなかった<sup>4)</sup>。

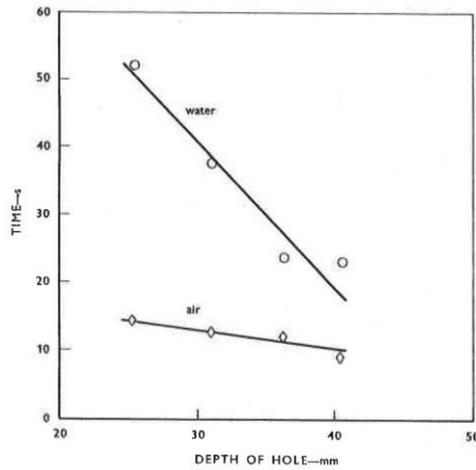


図 1.14 穴の深さと透気性・透水性の測定時間の関係<sup>4)図5</sup>

同一の穴で試験した結果、簡易透気速度は、1回目：0.746mmHg/sec，2回目：0.700mmHg/sec，3回目：0.681mmHg/sec，4回目：0.688mmHg/sec となり，1回目の結果が若干大きめになるため，試験結果は2回目から4回目の平均を用いることを示した<sup>20)</sup>。

図 1.15 に穴の実質深さと簡易透気速度の関係を示す。穴の深さの影響は、穴の実質深さが深いほど、簡易透気速度は大きくなることを示している。しかし、この値は穴の内部の表面積に正比例していない。簡易透気速度の変動係数は3.19～61.0%と大きくなっており、コンクリートにあけた穴がモルタル部分か、骨材を貫通しているかによって異なることを示している。そこで、穴の深さが深い方が穴の内部の状況が均質化するためばらつきが小さくなるだろうとしている<sup>21)</sup>。

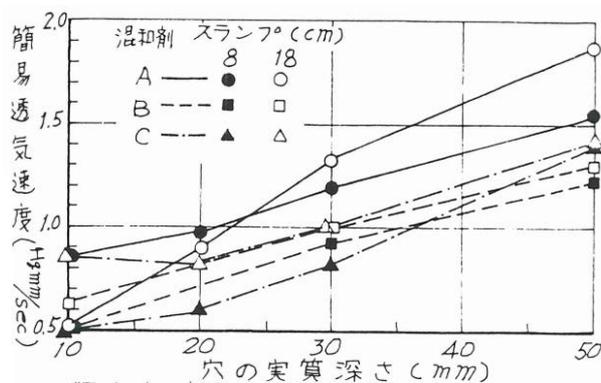


図 1.15 穴の実質深さと簡易透気速度との関係<sup>21)図1</sup>

図 1.16 に穴の間隔および数が簡易透気速度におよぼす影響を示す。穴の数および間隔の影響は、穴の間隔が 25mm 以上離れるとその穴の影響はほとんど認められないことから、穴の間隔は、粗骨材の最大寸法の 2 倍以上とした<sup>22)</sup>。

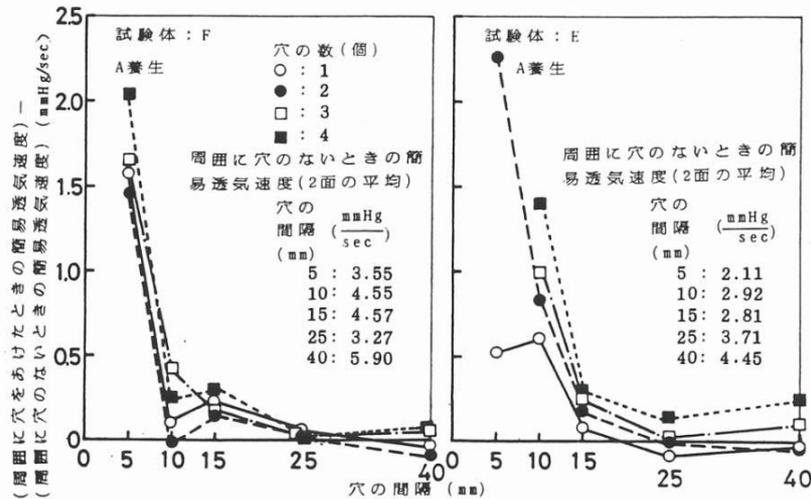


図 1.16 穴の間隔および数が簡易透気速度におよぼす影響<sup>22)図 4</sup>

図 1.17 に削孔径、削孔深さが異なる場合のモルタル壁体の簡易透気速度を示す。簡易透気速度は、穴内部の表面積が大きいものほど大きくなっている。単位面積当たりの速度を求めると、 $\phi 10 \times 30$  の値が最も大きくなっている。これは、穴に集まる空気は、コンクリート表層から流れており、穴の深さが浅いと、この影響を大きく受けるためと考えられる。また、穴の径が小さい  $\phi 5 \times 50$  の値が大きいのも、表層から空気の流れが影響したためと考えられる<sup>32)</sup>。

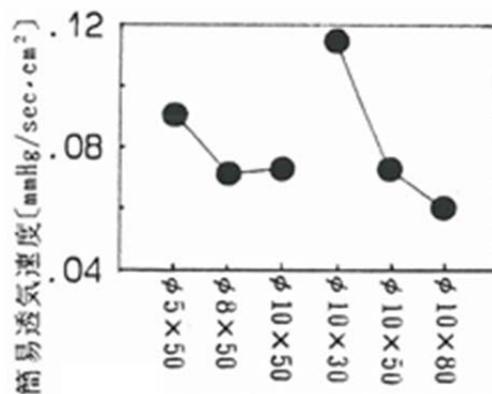


図 1.17 モルタル壁体の簡易透気速度<sup>32)図 1</sup>

図 1.18 にホース長さの変化による減圧部体積の増減と簡易透気速度の関係(試験孔深さ 8 cm 一定)を示す。減圧部体積が大きくなると簡易透気速度が小さくなることを示している。減圧部の体積が増えるとそれだけ圧力の回復時間がかかることを示している<sup>45)</sup>。

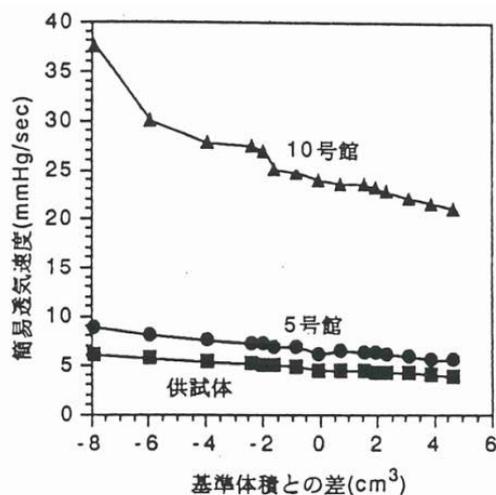


図 1.18 ホース長さの変化による減圧部体積の増減と簡易透気速度の関係 (試験孔深さ 8 cm 一定)<sup>45)</sup>図 5

図 1.19 に減圧部体積を一定とした場合の試験孔深さと簡易透気速度の関係を示す。10 号館に比べ供試体および 5 号館は勾配がかなり穏やかだが、試験孔が深くなるほど簡易透気速度は大きくなる傾向がみられる。これは試験孔が深くなると空気が流入する面積が増えるので減圧部体積が一定であるとき圧力の回復時間が速くなるからである<sup>45)</sup>。

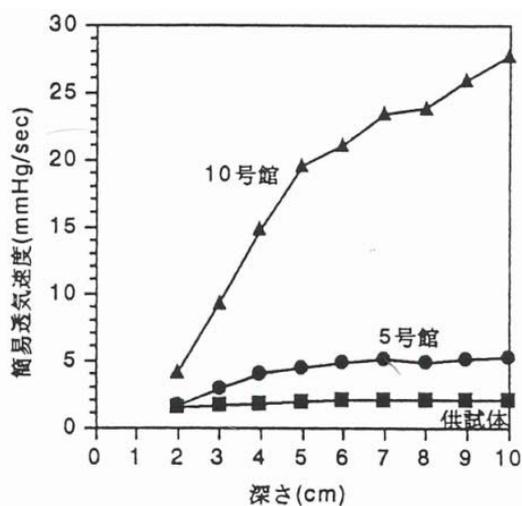


図 1.19 試験孔深さと簡易透気速度の関係(減圧部体積一定)<sup>45)</sup>図 6

### 1.4.3 評価方法

評価方法に関しては、簡易透気速度と透気係数および中性化深さとの比較を行っているものの2つに大別される。

いずれの文献でも簡易透気速度と透気係数の関係を示しているものの、ばらつきが大きいことを示している。

中性化との比較では、簡易透気速度を促進中性化深さの関係や、竣工後期間の経過した実構造物における簡易透気速度と中性化深さの関係を示している。試験体レベルでは、簡易透気速度と中性化深さには有意な関係があることを示しているが、竣工後期間の経過した構造物に関しては、簡易透気速度からの評価値を示すことは十分とはいえないとしている。

以下に、試験方法の比較に関する既往の研究を示す。

図 1.20 に、透気係数と簡易透気速度との関係を示す。透気係数と簡易透気速度の関係は、両者の関係はばらつきを有しているが、おおよそ上に凸の曲線で示されている<sup>19)</sup>。

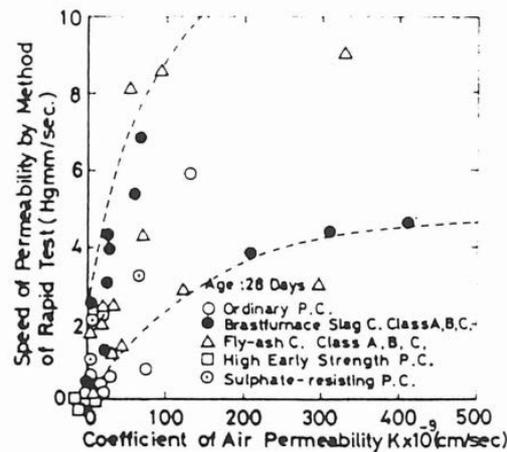


図 1.20 透気係数と簡易透気速度の関係<sup>19)</sup>図 14

図 1.21 に透気係数と簡易透気速度との関係を示す。透気係数が大きくなるに従い簡易透気速度は大きくなるが、透気係数が  $1 \times 10^{-10}$  (cm/sec) を超えると、簡易透気速度は急激に大きくなる。水中養生した供試体の透気係数・簡易透気速度はいずれも空気中養生より小さくなる<sup>24)</sup>。

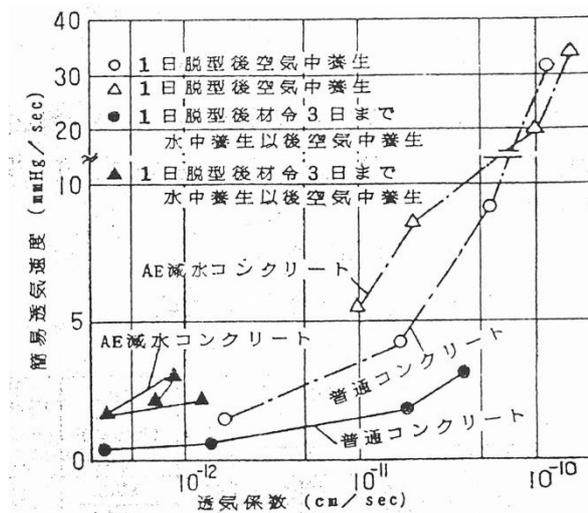


図 1.21 透気係数と簡易透気速度の関係<sup>24)</sup>図 7

図 1.22 に促進中性化深さと簡易透気速度の関係を示す。全体に乾燥等の影響により材齢 180 日における簡易透気速度は、材齢 91 日に比べ大きい値になる傾向を示している。しかし、材齢 91 日、180 日の簡易透気速度の値は、それらの値が大きくなるのに従って促進中性化深さが増大しており、簡易透気試験が中性化深さと有意な関係を示していることがわかる<sup>29)</sup>。

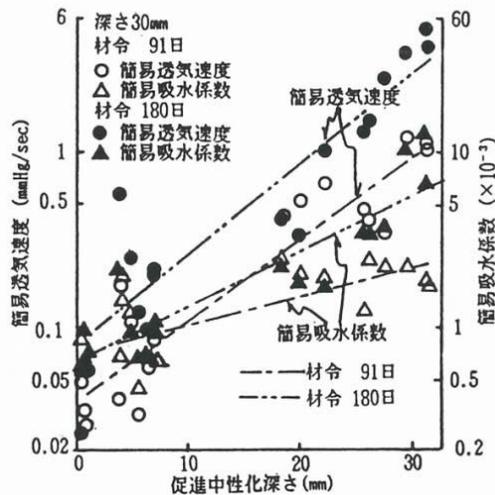


図 1.22 促進中性化深さと簡易透気速度、簡易吸水係数との関係<sup>29)図 13</sup>

図 1.23 に簡易透気速度と中性化深さの関係を示す。現在までのところ算出した簡易透気速度からの絶対的な評価は十分とはいえない<sup>42)</sup>。

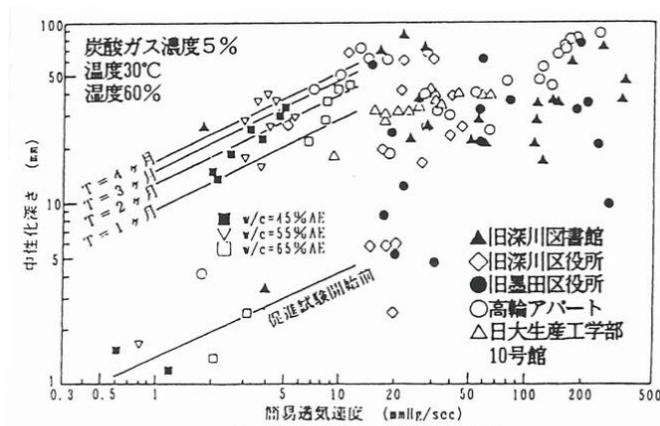


図 1.23 簡易透気速度と中性化深さ<sup>42)図 7</sup>

#### 1.4.4 各種影響要因

本節では、各種影響要因に関する検討として、水セメント比、セメントの種類、養生、材齢および測定事例毎に既往の研究を整理した。

##### (1) 水セメント比

水セメント比の影響は、水セメント比の増加に伴い透気性は大きくなり、特に水セメント比 60% を超える場合には急激に透気性は大きくなる。

以下に、水セメント比に関する既往の研究を示す。

温度 20℃、40%R.H. の恒温恒湿室で養生した試験体の透気性と水セメント比の関係を図 1.24 に示す。傾向線における相関係数はかなり良い。そのなかでも、玄武岩で作られたコンクリートの結果は最も良い。コンクリートを作製するのに使用する骨材種類により、傾向線は異なる。このように、比較的多孔質な骨材（石灰岩）で作られる強度のコンクリートと不透質な骨材（玄武岩砕石）で作られるコンクリートを見分けるほど敏感である<sup>4)</sup>。

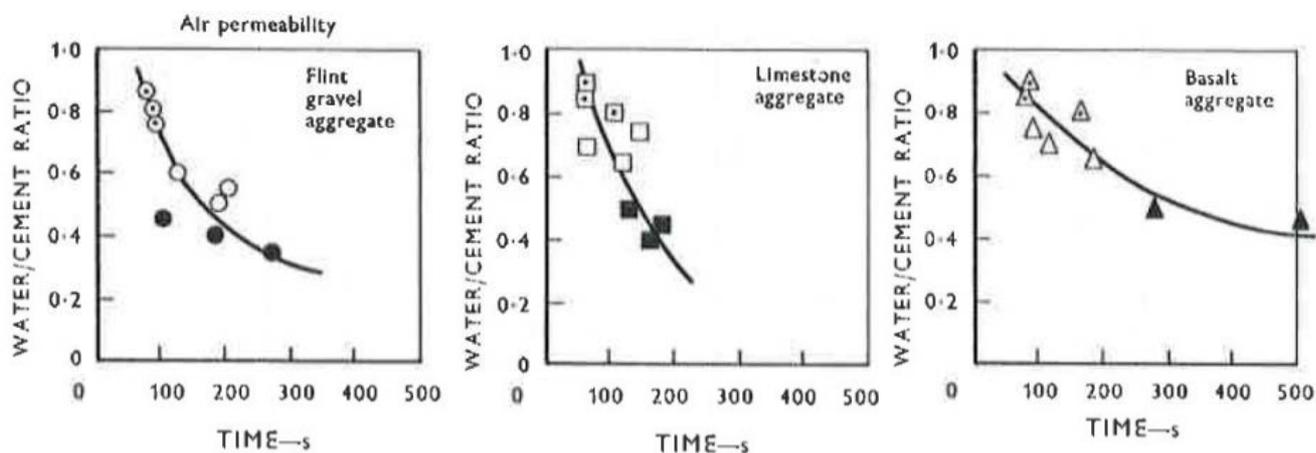


図 1.24 透気性と水セメント比の関係<sup>4)図3</sup>

図 1.25 に水セメント比、乾燥開始材齢の異なるコンクリートの簡易透気速度を示す。簡易透気速度は、水セメント比が大きい程大きいですが、初期の養生(乾燥開始材齢)の違いによっても長期的に影響を受け、乾燥開始が早いほど大きく、透気性が大きい。乾燥開始材齢を 7 日とすると、乾燥開始材齢を 1 日とする場合と比べ、簡易透気速度は、水セメント比の約 10% 低減に相当する程度小さくなる<sup>4)</sup>。

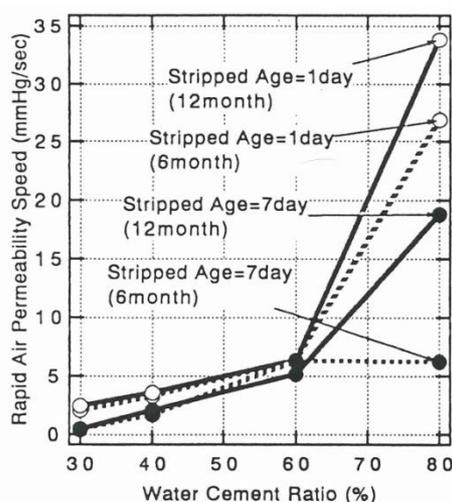


図 1.25 水セメント比, 乾燥開始材齢の異なるコンクリートの簡易透気速度 <sup>44)</sup>図 6

図 1.26 に, 水セメント比と簡易透気速度の関係を示す。本図は文献 47) 表-5 の結果を図化したものである <sup>47)</sup>。水セメント比の増加に伴い簡易透気速度は増加するが, 水セメント比 50%以下ではその変化は少なく, 水セメント比 60%を超えると増加が大きくなった。

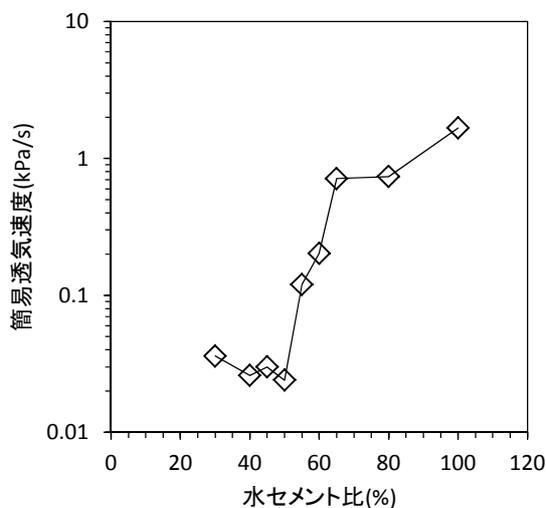


図 1.26 水セメント比と簡易透気速度の関係 <sup>47)</sup>表 5 を図化したものである

## (2)セメントの種類

セメントの種類の違いは, 高炉スラグを混入したものの結果しかないが, 高炉スラグ無混入に対して高炉スラグを混入することにより簡易透気速度は大きくなる傾向となっている。

以下に, 簡易透気試験方法に関する既往の研究を示す。

図 1.27 に各種コンクリートの簡易透気速度を示す。高炉スラグ微粉末の混入率が 0, 15, 45%と大きくなるに従い, 平均細孔半径は小さくなるが, T.P.V. は大きくなり簡易透気速度および中性化も速くなる。単位結合材量が 270, 300, 330 kg/m<sup>3</sup>と大きくなるに従い, T.P.V. が小さくな

り簡易透気速度も小さくなる。前養生が十分にされる(水中0, 1, 5日の順)ほどT.P.V.と平均細孔半径が小さくなり簡易透気速度が遅くなる。水中養生がない供試体では, T.P.V.と平均細孔半径が大きくなり, 簡易透気速度が速くなる傾向が認められ, 耐久性に不利となっている<sup>25)</sup>。

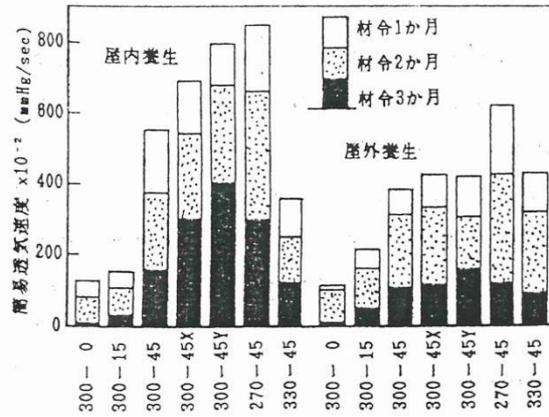


図 1.27 各種コンクリートの簡易透気速度の関係<sup>25)図 3</sup>

(3) 単位水量

単位水量の変化を測定した事例は少なく, 簡易透気速度に及ぼす単位水量の影響は小さい。

以下に, 簡易透気試験方法に関する既往の研究を示す。

図 1.28 に, 単位水量と簡易透気速度の関係を示す。本図は文献 47) 表-5 の結果を図化したものである。単位水量の増加に伴う簡易透気速度への影響は小さかった。

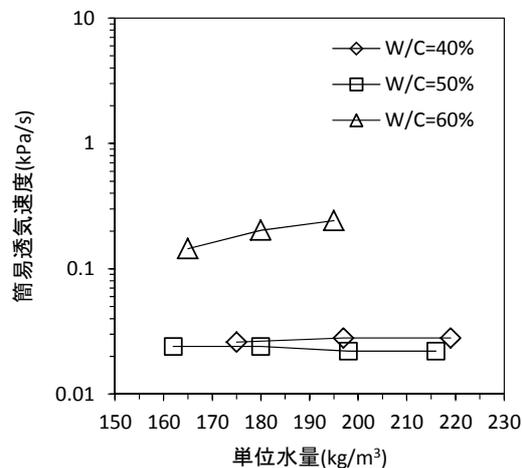


図 1.28 単位水量と簡易透気速度の関係<sup>47)表 5</sup>を図化したものである

(4) 養生

養生方法に関しても検討事例は少ない。水中養生期間の違いを示しているが, 養生による簡易透気速度の違いを示すことは可能である。

以下に, 簡易透気試験方法に関する既往の研究を示す。

図1.29に養生方法と簡易透気速度の関係を示す。気乾状態，絶乾状態共に空气中養生は3日水中，7日水中養生よりも簡易透気速度は大きい値を示している。3日水中，7日水中養生の簡易透気速度はセメントによって大差はない<sup>26)</sup>。

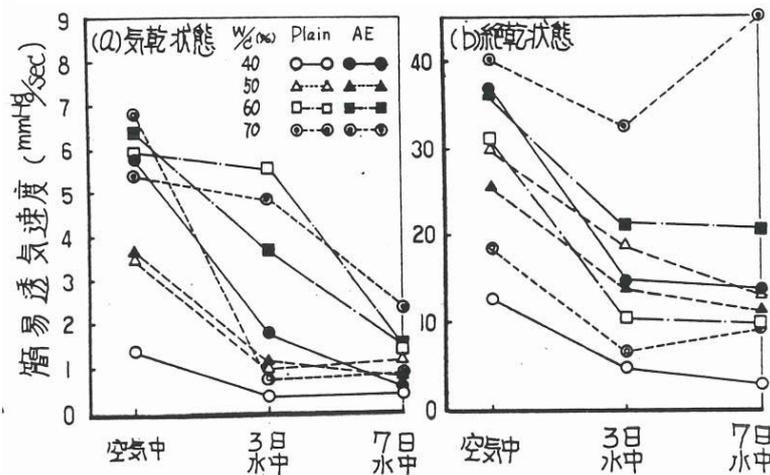


図1.29 養生方法と簡易透気速度との関係 <sup>26)</sup>図4

(5) 材齢

材齢の違いを検討した事例では，材齢の経過に伴い透気性は大きくなる傾向を示している。以下に，簡易透気試験方法に関する既往の研究を示す。

図1.30に材齢と簡易透気速度との関係を示す。材齢が進むに従って，簡易透気速度が大きくなっている。また，水セメント比が大きくなるのに従って，折れ線勾配が急になり，簡易透気速度の増加割合が大きくなっている<sup>29)</sup>。

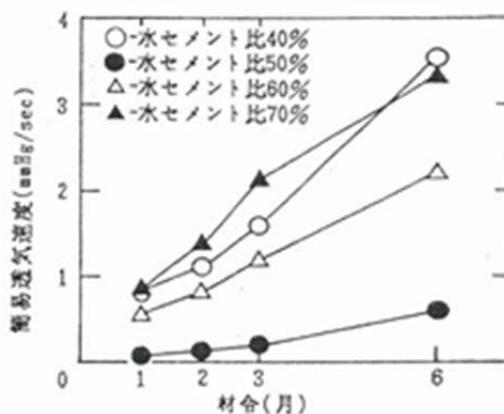


図1.30 材齢と簡易透気速度との関係 <sup>29)</sup>図2

(6) 測定例

測定例としては、実構造物における調査結果とともに、高さ方向や方位の違いなどの検討が行われている。また、再生骨材を用いた場合などについても検討している。

以下に、測定例に関する既往の研究を示す。

図 1.31 に簡易透気速度の高さ方向の変化を示す。他の3体に比べC3柱は、簡易透気速度は柱の試験位置の高さが高い程大きくなっており、高さ190 cmの位置での簡易透気速度は高さ30 cmでの2倍になっていた<sup>36)</sup>。

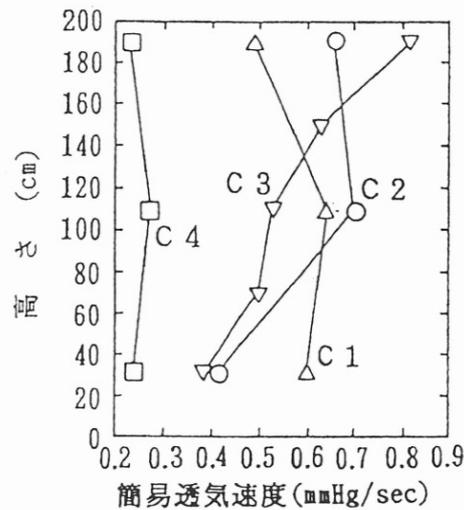


図 1.31 簡易透気速度の高さ方向の変化 <sup>36)</sup>図 3

図 1.32 にコンクリートの品質方位による相違(都営高輪アパート)を示す。全般的に南面は透気性、吸水性が大きく、北面は小さい。北面は湿っていたためと思われる<sup>43)</sup>。

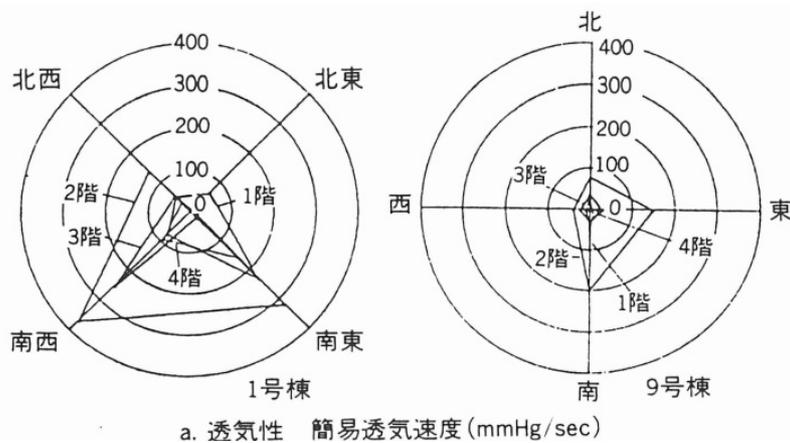


図 1.32 コンクリートの品質の方位による相違 <sup>43)</sup>図 12  
〔都営高輪アパート〕

図 1.33 に、再生細骨材と混合粗骨材を用いたコンクリートの簡易透気速度を示す。細骨材を再生細骨材とした場合は、W/C=45%において粗骨材混合率に関わらず 0.2kPa/sec 程度であるが、W/C=55%および W/C=65%では、再生粗骨材混合率の増大かつ水セメント比の増大に伴い簡易透気速度は大きくなる傾向にあり、これらの要因でマトリックスがポーラス化することが認められる<sup>48)49)</sup>。

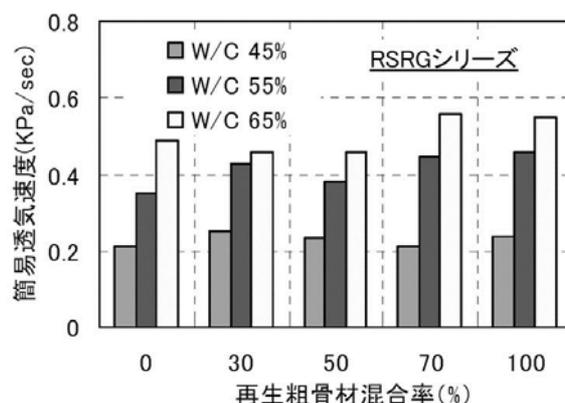


図 1.33 再生細骨材と混合粗骨材を用いたコンクリートの簡易透気速度<sup>48) 図 2</sup>

#### 1.4.5 簡易透気試験の課題

文献を調査した結果、以下のことを本研究の課題として抽出した。

##### (1) 試験方法に関する検討

1996年までに笠井・湯浅らの整理・検討した結果より、削孔径 10mm、削孔深さ 50mm と定めて概ね試験方法として確立している。しかし、試験方法を決定した実験の材料、調合、時期等が異なるため、試験方法として提案するには統一した条件で再度確認が必要である。

##### (2) 評価方法に関する検討

透気係数との比較では、簡易透気速度との関係が明確に示されていない。

中性化抵抗性に関する評価は、簡易透気速度と中性化深さの関係を示しているのみであり、簡易透気速度により中性化抵抗性を評価する指標値を示すことが必要と考える。

##### (3) 簡易法による試験方法の比較

簡易透気試験方法以外に、シングルチャンバーによる方法、ダブルチャンバーによる方法が日本で一定の普及、使用が認められている。これら透気試験の指標値を相互に互換させる検討が実構造物に適用可能な透気試験の規格化を行う際には必要である。

##### (4) 各種影響要因に関する検討

簡易透気試験に関して様々な試験結果が示されている。しかし、材料、調合、養生等を同一の条件で行った場合が示されておらず検討が必要である。

## 1.5 本研究の構成

本論文は、全6章から構成されている。図1.34に、本論文の構成を示し、以下に各章の概要を示す。

第1章「序論」では、序論として本研究の背景と目的、コンクリートの透気試験方法、既往の研究との関係、本研究の構成について述べている。

第2章「ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法の提案」では、Figgの発想に基づき、1996年までに笠井・湯浅らが整理・発展してきた試験結果により、削孔径を $\phi 10\text{mm}$ 、削孔深さを50mmと定めて簡易透気試験方法を確立・検討を行い、「ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法」として提案した。さらに、提案した「ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法」により、材料・調合・養生条件の違いが簡易透気速度に及ぼす影響について検討した。

第3章「簡易透気試験結果と他の透気試験結果の比較」では、簡易透気試験の結果と $\phi 100\text{mm}$ のコア供試体による透気試験の結果の関係を検討した。簡易透気試験以外に、シングルチャンバーによる方法、ダブルチャンバーによる方法（トレントの提案した方法）による透気性の指標値と簡易透気速度の関係を示し、実構造物で適用可能な試験方法間において各試験値を相互に互換させる仕組みを構築する検討をした。

第4章「簡易透気試験方法による構造体コンクリートの中性化抵抗性評価」では、まず材齢3ヶ月で測定した簡易透気速度と促進期間26週の中性化深さの関係をセメントの種類毎に示した。次に、日本建築学会「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）・同解説」で示された、計画耐用年数と促進26週における中性化深さを求める考え方に基づき、JASS5の「計画供用期間の級」毎に対応する促進期間26週の中性化深さを算出した。この算出した中性化深さを、使用したセメント種類毎に示した簡易透気速度と促進中性化深さの関係に対応させ、JASS5の「計画供用期間の級」に対応する簡易透気速度を求めた。

第5章「簡易透気試験方法を用いた各種養生方法の効果に対する評価」では、コンクリートの品質向上を期待した各種湿潤養生（水中養生、散水養生、テープ養生、マット養生）の中性化抵抗性、塩分浸透抵抗性の効果とそれらが簡易透気速度で評価できるか検討した。また同様に、コンクリートの品質向上を期待した塗布剤を用いた方法（けい酸塩系表面含浸剤、シラン系表面含浸剤、塗布型収縮低減剤、膜養生剤）の中性化抵抗性、塩分浸透抵抗性の効果とそれらが簡易透気速度で評価できるか検討した。

第6章「結論」では、本研究で得られた結果を集約して示した。

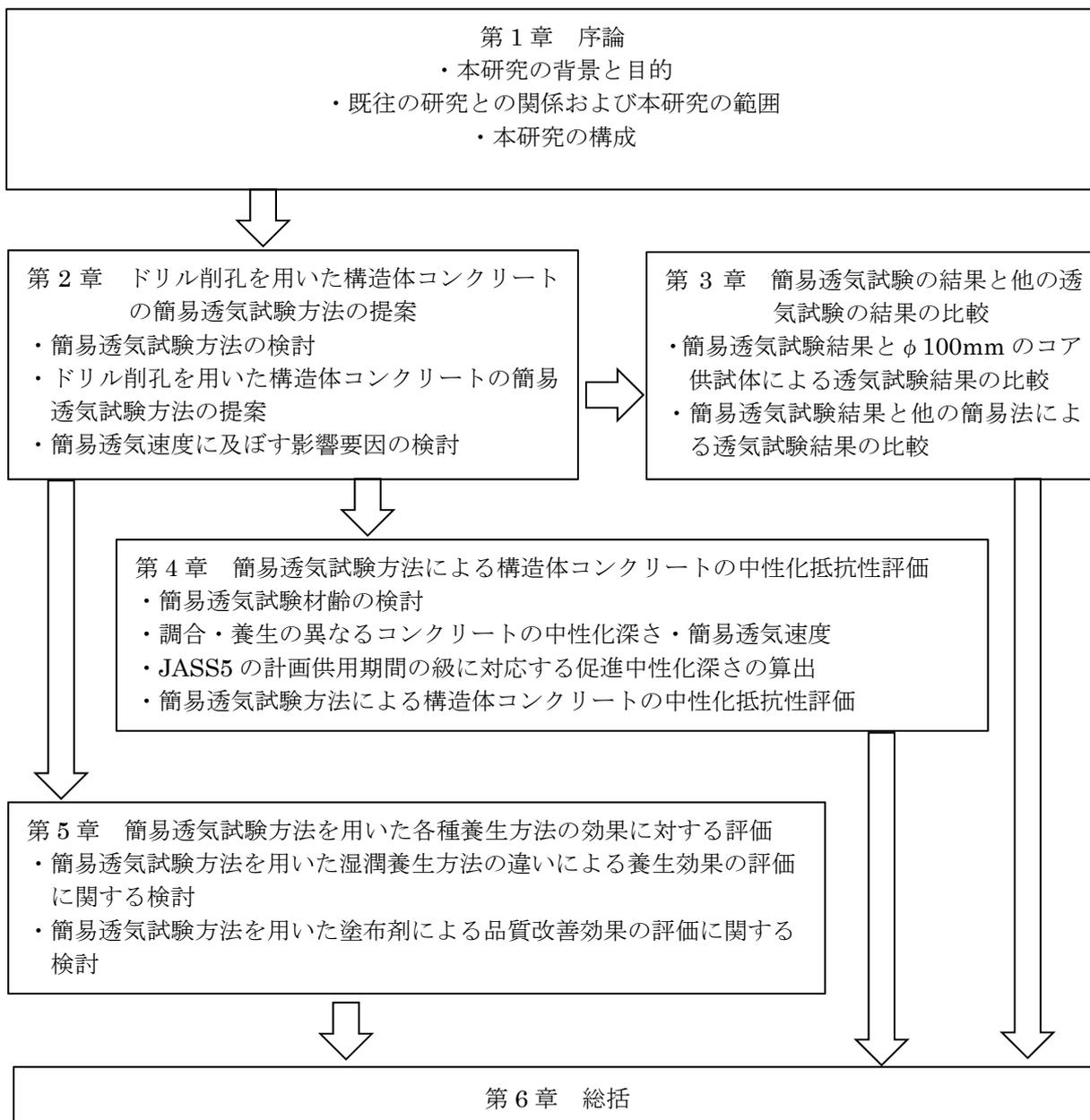


図 1.34 本論文の構成

## 参考文献

- 1) 日本建築学会編：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，日本建築学会，2009.2
- 2) 日本建築学会編：鉄筋コンクリート造建築物の品質管理および維持管理のための試験方法，2007.3
- 3) RILEM Report 40, Non-Destructive Evaluation of the Penetrability and Thickness of the Concrete Cover, State of the Art Report of RILEM Technical Committee TC 189- NEC “Non-Destructive Evaluation of the Concrete Cover” , (ed. by R. Torrent and L. Fernandez Luco). 2007
- 4) 土木学会コンクリート委員会編：コンクリート技術シリーズ No.97 構造物表層のコンクリートの品質と耐久性検証システム小委員会(JSCE335 委員会)第二期成果報告書およびシンポジウム講演梗概集，土木学会，2012
- 5) 今本啓一，下澤和幸，山崎順二，二村誠二：実構造物の表層透気性の非・微破壊試験方法に関する研究の現状，コンクリート工学，Vol.44, No.2, pp.31-38, 2006.2
- 6) J.W.Figg: Methods of Measuring the Air and Water Permeability of Concrete; Magazine of Concrete Research, Vol.25, No.85, pp.213-218, 1973
- 7) Y. Kasai, I. Matsui, M. Nagano : On Site Rapid Air Permeability Test for Concrete, ACI, SP82-26, pp.526-539
- 8) 笠井芳夫，松井勇，湯浅昇：簡易な試験による構造物コンクリートの品質評価の試み，セメント・コンクリート，No.559, pp.20-28, 1993.9
- 9) 笠井芳夫，松井勇，湯浅昇，野中英：ドリル削孔を用いた構造物コンクリートの簡易透気試験方法(その1)～(その2)，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp.669-702, 1999
- 10) 湯浅昇，笠井芳夫，松井勇：乾燥を受けたコンクリートの表層から内部にわたる含水率，細孔構造の不均質性，日本建築学会構造系論文集，第509号，pp.9-16, 1998.7
- 11) 笠井芳夫編：コンクリート総覧，技術書院，PP.453-455, 1998.6
- 12) 笠井芳夫，松井勇，蒲原博行：コンクリートの簡易透気試験方法，第5回コンクリート工学年次講演会公演論文集，pp.57-60, 1983
- 13) C. Z. Hong and L. J. Parrott: DEVELOPMENT AND EVALUATION OF AN AIR PERMEABILITY TEST DEVICE FOR CONCRETE. A dissertation submitted to the graduate faculty of North Carolina State University in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, pp.89-94
- 14) K. Schönlin and H.K. Hilsdorf: Evaluation of the effectiveness of curing of concrete structures, ACI SP-100, Concrete Durability, Katharine and Bryant Mather Intern. Confer. , Vol.1, pp.207-226, Detroit, ACI. 1987
- 15) 氏家勲，土屋崇，岡崎慎一郎：実構造物でのコンクリートの透気性の測定方法に関する検討，セメント・コンクリート論文集，Vol.62, pp.197-204, セメント協会，2008
- 16) R. Torrent and G. Frenzer: A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the “covercrete” , International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), pp.985-992. 1995

- 17) 蔵重勲, 廣永道彦: コンクリートに内在する深さ方向の透気性分布を評価可能な非破壊試験方法の開発, 土木学会第 67 回年次学術講演会, V-009, pp17-18, 2012
- 18) P.A.M. Basheer, et al.: the 'Autoclam' for measuring the surface absorption and permeability of concrete on site, CANMET/ACI Int. Workshop on Advances in Concrete Technology, Athens, pp.107-132 . 1992
- 19) 笠井芳夫, 松井勇, 福島幸典, 蒲原博行: セメントモルタル板の透気性試験, セメント協会セメント技術年報 36, pp441-443, 1982 年 (昭和 57 年)
- 20) 笠井芳夫, 松井勇, 福島幸典, 蒲原博行: コンクリートの透気・吸水性に関する研究 (その 1 透気・吸水性試験方法について), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.115-116, 1982 年 (昭和 57 年)
- 21) 笠井芳夫, 松井勇, 福島幸典, 蒲原博行: コンクリートの透気・吸水性に関する研究 (その 2 透気・透水試験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 117. 118, 1982 年 (昭和 57 年)
- 22) 笠井芳夫, 松井勇, 蒲原博行: コンクリートの簡易透気試験方法, 第 5 回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp. 57-60, 1983 年 (昭和 58 年)
- 23) 笠井芳夫, 松井勇, 長野基司: コンクリートの中性化と透気性第 6 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp. 189-192, 1984 年 (昭和 59 年)
- 24) 笠井芳夫, 松井勇, 青木俊雄: 調合および養生を変えたコンクリートの透気性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 221-222, 1986 年 (昭和 61 年)
- 25) 長野基司, 笠井芳夫, 国府勝郎, 村田芳樹: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートのポロシティと透気性・中性化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 261-262, 1986 年 (昭和 61 年)
- 26) 笠井芳夫, 松井勇, 青木俊雄: 水セメント比とコンクリートの透気性 (その 2) - 簡易透気速度の測定 -, 日本大学生産工学部第 19 回学術講演会, pp. 9-12, 1986 年 (昭和 61 年)
- 27) 長野基司: 簡易透気試験および簡易吸水試験によるコンクリートの評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 155-156, 1987 年 (昭和 62 年)
- 28) 笠井芳夫, 長野基司, 佐藤孝一, 菅一雅: 透水型枠および合板型枠を用いたコンクリートの品質判定に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, pp. 441-446, 1988 年 (昭和 63 年)
- 29) 長野基司, 笠井芳夫: コンクリートの透気性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 155-156, 1988 年 (昭和 63 年)
- 30) 笠井芳夫, 長野基司, 佐藤孝一, 菅一雅: 表層部コンクリートの品質判定方法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, pp. 177-182, 1989 年 (平成元年)
- 31) 長野基司, 笠井芳夫, 佐藤孝一, 菅一雅: 簡易透気試験および簡易吸水試験によるモルタル・コンクリートの評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 679-680, 1989 年 (平成元年)
- 32) 笠井芳夫, 松井勇, 湯浅昇: 構造体コンクリートの簡易な品質評価方法に関する研究 - その 1 調査方法 -, 日本大学生産工学部第 23 回学術講演会, pp. 41-44, 1990 年 (平成 2 年)
- 33) 笠井芳夫, 松井勇, 湯浅昇: 構造体コンクリートの簡易な品質評価方法に関する研究 - その 2 調査方法の検討 -, 日本大学生産工学部第 23 回学術講演会, pp. 45-48, 1990 年 (平成 2 年)

- 34) 笠井芳夫, 松井勇, 湯浅昇: 構造体コンクリートの簡易な品質評価方法に関する研究 - その3 高強度コンクリートの調査事例 -, 日本大学生産工学部第23回学術講演会, pp. 49-52, 1990年(平成2年)
- 35) 長野基司, 笠井芳夫, 松井勇: 簡易透気試験および簡易吸水試験によるコンクリートの品質評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 99-100, 1991年(平成3年)
- 36) 杉崎茂, 笠井芳夫, 松井勇, 湯浅昇, 阿部道彦, 寺田謙一: 高強度コンクリート柱の品質に関する調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 853-854, 1991年(平成3年)
- 37) 笠井芳夫, 松井勇, 湯浅昇, 青木公彦: 構造体コンクリートの簡易な品質評価方法に関する研究 - その4 本学部10号館の調査事例 -, 日本大学生産工学部第24回学術講演会, pp. 101-104, 1991年(平成3年)
- 38) 松井勇, 長野基司, 笠井芳夫, 湯浅昇: 55年経過した旧深川区役所の構造体コンクリートの調査報告, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp. 153-156, 1991年度(平成3年度)
- 39) 杉崎茂, 笠井芳夫, 松井勇, 湯浅昇, 柳啓: 60年経過した旧墨田区役所の構造体コンクリートの調査報告, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp. 157-160, 1991年度(平成3年度)
- 40) 湯浅昇, 笠井芳夫, 松井勇: 43年経過した都営高輪アパートの構造体コンクリートの調査報告, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp. 161-164, 1991年度(平成3年度)
- 41) 青木公彦, 笠井芳夫, 松井勇, 湯浅昇: 63年経過した区立深川図書館の構造体コンクリートの調査報告, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp. 161-164, 1991年度(平成3年度)
- 42) 湯浅昇, 笠井芳夫, 松井勇: 構造体コンクリートの簡易な品質調査方法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 99-100, 1992年(平成4年)
- 43) 笠井芳夫, 松井勇, 湯浅昇: 簡易な試験による構造体コンクリートの品質評価の試み, セメント・コンクリート No. 559, pp. 20-28, 1993年(平成5年)
- 44) 湯浅昇, 笠井芳夫, 松井勇: 構造体コンクリートの表層から内部の含水率および細孔構造の不均質性, セメント・コンクリート論文集 No. 48, pp. 430-435, 1994年(平成6年)
- 45) 柴田忍, 笠井芳夫, 松井勇, 湯浅昇: 構造体コンクリートの簡易透気試験方法, 簡易吸水試験方法に関する研究 - 試験孔の深さが簡易透気速度・簡易吸水速度に及ぼす影響 -, 日本大学生産工学部第28回学術講演会, pp. 33-36, 1995年(平成7年)
- 46) 笠井芳夫, 松井勇, 湯浅昇, 飛坂基夫, 柳啓, 野中英: 簡易透気試験を用いた構造体コンクリートの耐久性評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 151-152, 1997年(平成9年)
- 47) 下澤和幸, 今本啓一, 山崎順二, 永山勝: 鉄筋コンクリート構造物の耐久性検証のための透気試験による指標値と中性化深さの関係について, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 2005-2010, 2009
- 48) 山崎順二, 二村誠二, 村上順一: 再生粗骨材の混合がコンクリートの透気性と中性化に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No. 1, pp. 1253-1257, 2003
- 49) 山崎順二, 立松和彦: 実機で製造した再生骨材コンクリートの強度および耐久性状, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 1, pp. 1563-1568, 2004

## 第 2 章

# ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの 簡易透気試験方法の提案

## 第2章 ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法の提案

### 2.1 概要

笠井らは、Figgの方法を参考に1980年代初め頃から削孔法の透気試験方法を「簡易透気試験方法」として整理・発展させてきている。この方法は、1996年までに試験方法の検討結果に基づき、振動ドリルにより削孔した径10mm、深さ50mmの孔（以下、削孔とする）により試験することを定めている。試験方法に関する検討は、削孔径、削孔深さ、真空ホース長さ（減圧部容積）、削孔間隔、同一削孔での試験回数について検討しているが、同一の条件で試験が行われていない。また、簡易透気速度に及ぼす影響要因に関しても水セメント比、混合セメント、養生方法、材齢などの検討が行われているが、これについても測定時の材料、調合、養生、材齢が異なっている。試験方法として確立・提案するとともに、簡易透気速度に及ぼす影響について示すには、材料、調合、養生、試験材齢を統一して試験を行う必要がある。

本章では、既往の研究における検討を参考に、簡易透気試験方法に関する各種影響（一削孔における測定回数、接続ホース長さ、削孔径、削孔深さ、隣接削孔の影響）を統一した材料・調合により検討し、その結果に基づき試験方法を確立・提案する。また、提案した方法により、簡易透気速度に及ぼす影響要因（水セメント比、セメントの種類、単位水量、空気量、乾燥開始材齢、測定材齢）を変化させて簡易透気速度を測定する。

### 2.2 簡易透気試験方法の検討

#### 2.2.1 実験概要

既往の試験で実施・提案した方法を同一の条件で確認・検証するため、試験回数、接続ホース長さ（減圧部容積）、削孔径、削孔深さ、削孔間隔などの試験条件を変化させた場合における簡易透気速度を品質の異なるコンクリートで測定した。

##### (1) 実験の変動要因と水準

実験は、表2.1に示す仕様の測定器具を用い、図2.1に示す直径10mm、深さ50mmの削孔に、長さ10mmのシリコン製の栓を施し、長さ100cmのビニール製のホースを接続して試験を行うことを基準として行った。

表2.2に、実験の変動要因と水準を示す。測定回数の検討では、回数ごとに値が異なるため、同一の削孔において1～4回測定し、その結果が安定する回数について検討した。

接続ホース長さの検討では、減圧部容積が異なる場合に真空度の回復速度の違いを検討するため、接続ホース長さを50、75、100、125、150、200、250、300cmの8水準とした。

削孔径の検討では、削孔径が異なる場合に真空度の回復速度の違いを検討するため、削孔の径を3.5、5.0、7.5、10、15、20mmの6水準とした。

削孔深さの検討では、削孔深さが異なる場合に真空度の回復速度の違いを検討するため、削孔の深さを20、30、40、50、80mmの5水準とした。

削孔間隔の検討では、隣接する削孔の影響がない範囲を把握するため、10mmの削孔径において、中心間の距離として、20、30、40、50、60mmの5水準とした。

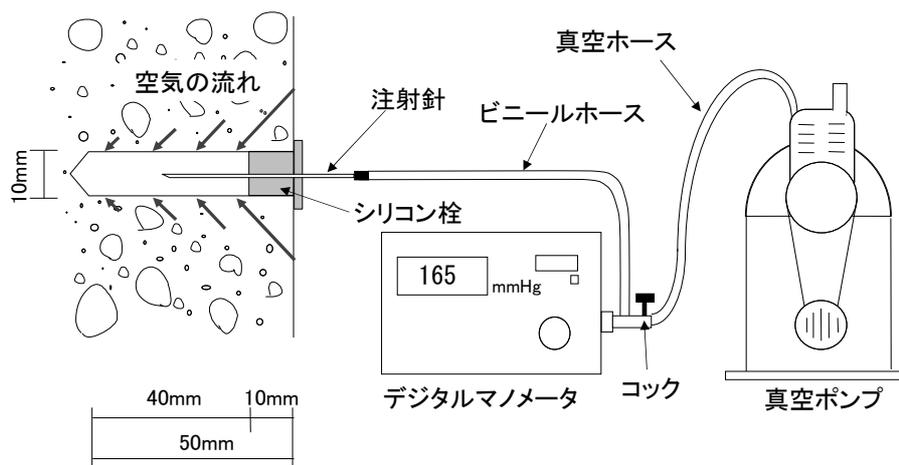


図 2.1 簡易透気試験装置

表 2.1 簡易透気試験に使用する測定器具および仕様

測定器具	仕様
振動式電動ドリル	携帯型で JIS C 9605 に規定されている振動式のもの。
ドリル刃	振動式電動ドリルに対応したコンクリート削孔専用で、直径 10mm のもの。
真空計 (デジタルマノメータ)	6.7kPa(50mmHg)から 40.0kPa(300mmHg)の圧力計測が可能なもので、指定した圧力の範囲において真空度の低下に要する時間を自動的に少数第 1 位まで計測できるもの。ただし、U 字真空計とストップウォッチでこの機能を補ってもよい。
真空ポンプ	削孔内部を指定した圧力(12.0kPa(90mmHg))まで減圧できる能力を有するもの。
シリコン栓	図 2.3 に示す形状(栓の部分の直径が 10mm、長さ 10mm)のシリコン製のもの
注射針	直径 0.75mm、内径 0.50mm、長さ 38mm の静脈用のもの。
ビニール ホース	管の外径 10mm、内径 5mm、長さ 100mm で、減圧時に管がつぶれずかつフレキシブルなもの。

表 2.2 実験の変動要因と水準

変動要因	水準
一削孔における測定回数	1, 2, 3, 4 回
接続ホース長さ (減圧部容積)	50, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300cm
削孔径	3.5, 5.0, 7.5, 10, 15, 20mm
削孔深さ	20, 30, 40, 50, 80mm
削孔間隔	20, 30, 40, 50, 60mm

## (2) コンクリートの調合および使用材料

本実験で使用したコンクリートは、水セメント比 50, 60, 80%の 3 種類とした。表 2.3, 表 2.4 に、使用材料および使用したコンクリートの調合を示す。

表 2.3 使用材料

使用材料	使用材料の種類および品質
水	習志野市水道水(密度 1.00g/cm <sup>3</sup> )
セメント	普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	S1:つくば市産川砂(表乾密度 2.50g/cm <sup>3</sup> ) S2:つくば市産砕砂(表乾密度 2.59g/cm <sup>3</sup> )
粗骨材	つくば市産碎石(表乾密度 2.66g/cm <sup>3</sup> )
混和剤	Ad1:AE 減水剤(P社製) Ad2:AE 助剤(P社製, 100倍希釈)

表 2.4 コンクリートの調合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
		水	セメント	細骨材		粗骨材	混和剤	
				S1	S2		Ad1	Ad2
50	45.0	185	370	184	570	955	3.70	1.11
60	46.6	185	308	196	608	955	3.08	0.93
80	50.0	195	244	213	663	908	2.44	0.61

## (3) 試験体の寸法

試験体は、図 2.2 に示すように、寸法を 500×500×150mm とし、500×500mm の面を試験面として使用した。試験面以外の 500×150mm 面は、乾燥しないようにエポキシ樹脂を塗布した。

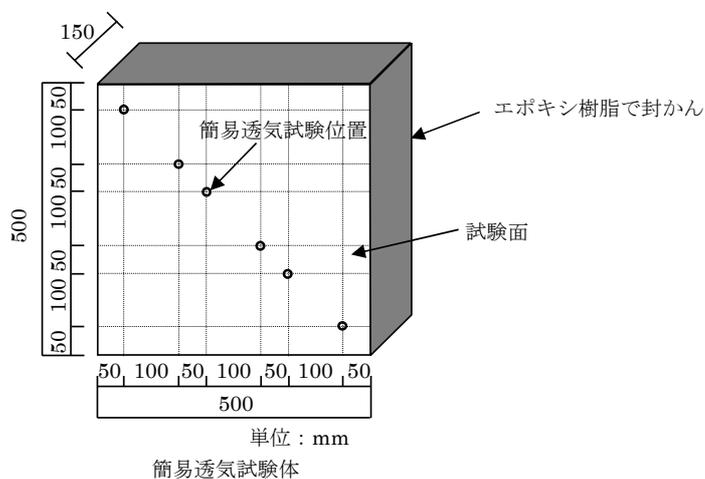


図 2.2 試験体概念図

## (4) コンクリートの打込みおよび養生

コンクリートの打込み・養生は、温度 20℃、相対湿度 60%の恒温恒湿室で行い、打込み後材齢 3 日で乾燥面を開放した後、試験時まで静置した。試験回数の違いを要因とする試験では材齢 3 ヶ月、それ以外の試験では材齢 6 ヶ月で簡易透気試験を実施した。

## (5) 簡易透気試験方法

簡易透気試験は、表 2.1 に示す仕様の測定器具を用い、図 2.1 に示すようにコンクリートを振動ドリルで削孔した直径 10mm、深さ 50mm の孔を用いて行った。試験では、直径 10mm、長さ 10mm のシリコン栓により密封した削孔内部を減圧した後、削孔の周壁から空気の流入により真空度が  $X_1$  (kPa) から  $X_2$  (kPa) に低下する時間(T)を計測した。 $X_1$ および  $X_2$ は、 $X_1$ を 21.3 (kPa)、 $X_2$ を 25.3 (kPa) (真空度の低下時間が 10 秒以下の場合には、 $X_1$ を 13.3 (kPa)、 $X_2$ を 33.3 (kPa) )として測定した。

簡易透気速度は、(2.1)式により求めた。

$$y = \frac{X_2 - X_1}{T} \quad \dots (2.1)$$

ここに、 K : 簡易透気速度(kPa/s)

$X_1$  : 時間測定開始時の真空度(kPa)

$X_2$  : 時間測定終了時の真空度(kPa)

T : 真空度の低下時間(s)

## (6) 測定方法

## a. 測定回数の違いによる検討

測定回数の違いは、同一の削孔において 4 回測定した。

## b. 接続ホース長さ（減圧部容積）の違いによる検討

簡易透気試験の減圧部は、図 2.1 に示すコックより先の、デジタルマノメータ、ビニールホース、削孔となる。本検討では、デジタルマノメータ、削孔の容積は一定のため、ビニールホース長さが変化した場合のみ減圧部容積は変化する。

接続ホース長さ（減圧部容積）の違いを確認する実験では、コックから注射針に接続するビニール製のホースの長さ（以下接続ホース長さとして略記）を変化させることにより検討した。このとき、ホースは、内径 5mm のものを使用したため、ホース 10cm あたりの容積は、1.96cm<sup>3</sup>となる。また、削孔内部の容積（直径 10mm、深さ 50mm、シリコン栓 10mm）は、3.01cm<sup>3</sup>となる。

## c. 削孔径の違いによる検討

削孔径の違いを確認する実験では、削孔深さを 50mm、シリコン栓の削孔への挿入深さを 10mm とし、削孔径を変化させて測定した。削孔径の水準は、3.5、5.0、7.5、10、15、20mm の 6 水準とした。測定位置は、削孔の中心間距離を試験面の上下 100mm、左右 75mm とし、試験は各径 4 カ所（上下方向で各 1 カ所）とした。なお、減圧部容積を一定とするため、ホース長さによる補正を行った。

## d. 削孔深さの違いによる検討

削孔深さの違いを確認する実験では、削孔径を10mm、削孔間隔（中心間距離）を50mm、シリコン栓の削孔への挿入深さを10mmとし、削孔深さを20, 30, 40, 50, 80 mmと変化させて測定した。なお、減圧部容積を一定とするため、ホース長さによる補正を行った。

## e. 削孔間隔（中心間距離）の違いによる検討

削孔間隔の違いを確認する実験では、削孔の周囲に所定の間隔（20, 30, 40, 50, 60mm）で4カ所削孔して測定した。なお測定は、周囲の削孔の数の影響を確認するため、1カ所削孔を行う毎に行った。

## 2.2.2 実験結果および考察

## (1) 測定回数と簡易透気速度の関係

表 2.5 に、各測定回数における簡易透気速度を示す。各試験回数における簡易透気速度は、同一の削孔で試験を繰り返した場合、1回目の結果は、2回目以降と比し大きくなる。4回目の簡易透気速度を100として比較すると、1回目は108~128と大きくなり、2回目は104以下、3回目は103以下と差は小さくなる。そこで、測定回数は4回とし、1回目を除いた2回目以降の3回の平均より簡易透気速度を求めることとした。

1回目の測定が大きくなる理由は、2回目以降の空気の定常流に関与しない空気を取り込むためと考えられる。

表 2.5 各測定回数における簡易透気速度

水セメント比	乾燥開始材齢	上段：簡易透気速度(kPa/s)			
		下段：4回目を100とした場合の比			
		1回目	2回目	3回目	4回目
50%	1日	0.119	0.104	0.101	0.100
		118	104	101	100
	3日	0.100	0.087	0.083	0.084
		119	104	99	100
	7日	0.071	0.065	0.065	0.063
		114	103	103	100
	28日	0.055	0.053	0.053	0.053
		104	101	101	100
60%	1日	0.325	0.277	0.257	0.254
		128	109	101	100
	28日	0.202	0.170	0.168	0.164
		123	104	103	100
80%	1日	0.924	0.882	0.863	0.858
		108	103	101	100
	28日	0.536	0.468	0.465	0.463
		116	101	101	100

## (2) 接続ホース長さ（減圧部容積）と簡易透気速度の関係

図 2.3 に、接続ホース長さ（減圧部容積）と簡易透気速度の関係を示す。簡易透気速度は、いずれの水セメント比においても、接続ホース長さが長くなる（減圧部容積が大きくなる）ととも

に小さくなる。接続ホース長さ 100cm (減圧部容積 22.7cm<sup>3</sup>) の場合における簡易透気速度との比較では、接続ホース長さが 50cm (同 12.9cm<sup>3</sup>) では約 1.65 倍, 75cm (同 17.8cm<sup>3</sup>) では約 1.33 倍, 125cm (同 27.6cm<sup>3</sup>) では 0.92 倍, 150cm (同 32.5cm<sup>3</sup>) では約 0.80 倍, 200cm (同 42.3cm<sup>3</sup>) では約 0.65 倍, 250cm (同 52.1cm<sup>3</sup>) では 0.52 倍, 300cm (同 61.9cm<sup>3</sup>) では約 0.43 倍となった。

接続ホースの長短, すなわち減圧部容積の大小により簡易透気速度が異なることから, 減圧部容積を一定にする必要がある。試験のしやすさを考慮して接続ホース長さを 100cm (減圧部容積 22.7cm<sup>3</sup>) とすることとした。減圧部容積は接続ホースのみではなく, 測定機等を変更する場合にも異なることあるので, 適宜補正を行う必要がある。

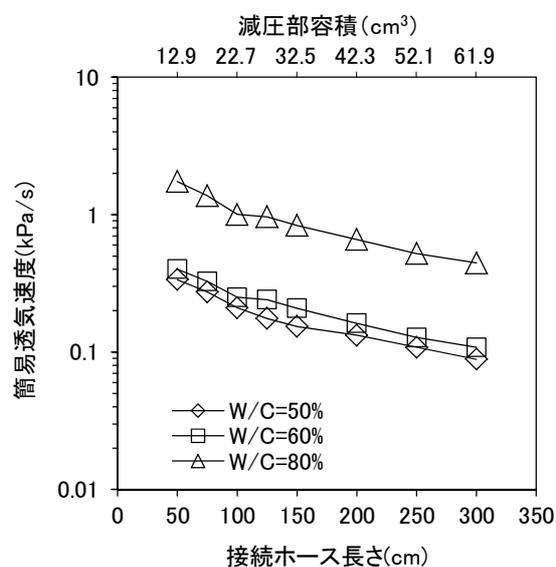


図 2.3 接続ホース長さ(減圧部容積)と簡易透気速度の関係

### (3) 削孔径と簡易透気速度の関係

図 2.4 に, 削孔径と簡易透気速度との関係を示す。削孔径の違いによる簡易透気速度は, いずれの水セメント比においても削孔径が大きくなるのに伴い大きくなる。削孔径 10mm (削孔内部のコンクリートの表面積 12.7cm<sup>2</sup>) の簡易透気速度との比較では, 削孔径 3.5mm (同 4.4cm<sup>2</sup>) で約 0.48 倍, 削孔径 5.0mm (同 6.3cm<sup>2</sup>) で約 0.70 倍, 削孔径 7.5mm (同 9.5cm<sup>2</sup>) で約 0.88 倍, 削孔径 15mm (同 19.1cm<sup>2</sup>) で約 1.43 倍, 削孔径 20mm (同 25.5cm<sup>2</sup>) で約 1.72 倍となった。簡易透気速度の増加は, 削孔径が大きくなるのに伴い削孔内部のコンクリート表面積 (透気領域) が大きくなったことがその理由と考えられる。

削孔径 22mm まで削孔可能な市販の振動ドリルを使用して削孔したが, 容易に削孔可能であったのは, 削孔径 10mm までであった。削孔径 15mm 以上では削孔に時間がかかった。一方, 径の小さいものは, 削孔の寸法安定性の観点から採用しづらいと判断し, 削孔径は 10mm を標準とすることとした。

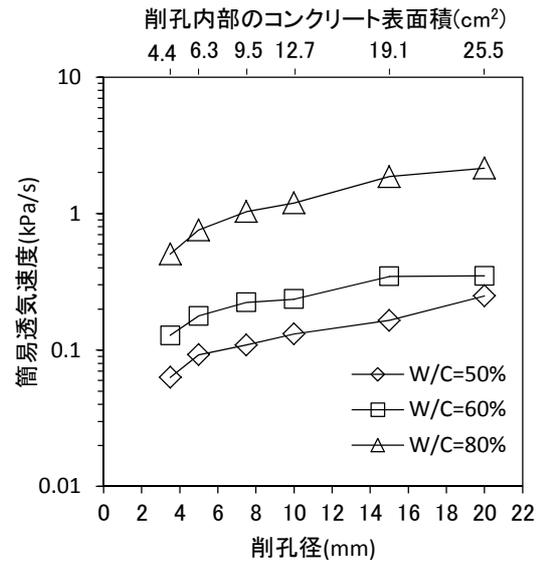


図 2.4 削孔径と簡易透気速度の関係

(4) 削孔深さと簡易透気速度の関係

図 2.5 に、削孔深さと簡易透気速度の関係を示す。削孔深さの違いによる簡易透気速度は、いずれの水セメント比においても削孔深さが深くなるのに伴い大きくなった。簡易透気速度の増加は、削孔径に比し小さかった。削孔深さ 50mm (削孔内部のコンクリート表面積 12.7cm<sup>2</sup>) と比較すると、削孔深さ 20mm (同 3.2cm<sup>2</sup>) で 0.83 倍、30mm (同 6.4cm<sup>2</sup>) で 0.90 倍、40mm (同 9.5cm<sup>2</sup>) で 0.91 倍、80mm (同 22.1cm<sup>2</sup>) で 1.04 倍であった。前述の削孔径と比し、削孔深さの影響は小さい。

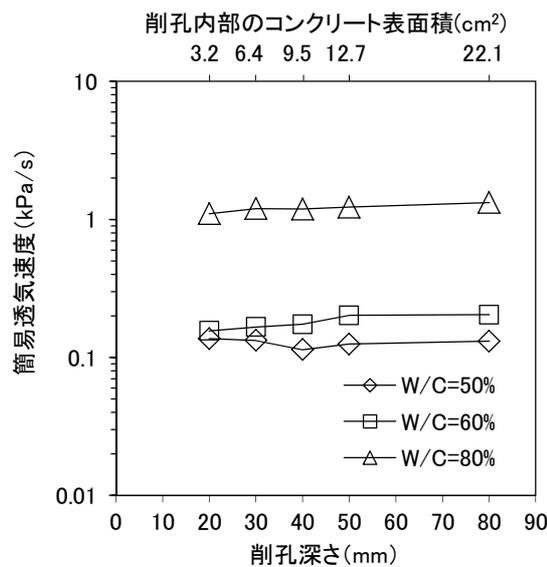


図 2.5 削孔深さと簡易透気速度の関係

図 2.6 は、削孔内部の表面積と  $\phi 10 \times 50\text{mm}$  削孔に対する簡易透気速度倍率を示したものである。削孔内部表面積の増加に対する簡易透気速度の倍率変化は、深さを固定し径を変化させた時の方が、径を固定し深さを变化させた時に比し大きいことがわかった。

これらの結果は、簡易透気速度は空気の透過経路の短い表層部の影響をより受けるからと思われるが、寸法の安定性と鉄筋のかぶり厚さの範囲を評価することを考えて削孔深さは 50mm とすることとした。

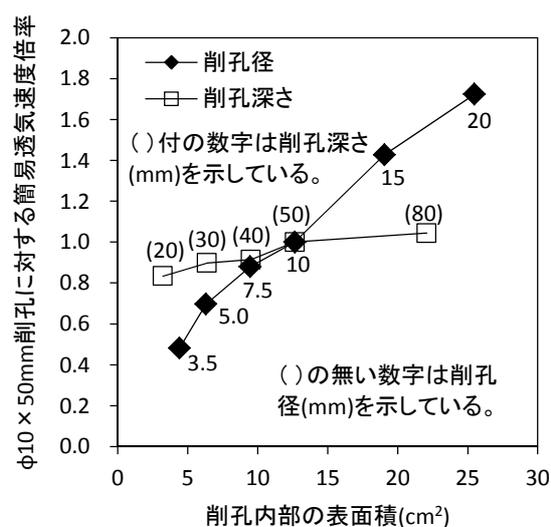


図 2.6 削孔内部の表面積と  $\phi 10 \times 50\text{mm}$  削孔に対する簡易透気速度倍率

#### (5) 削孔間隔（中心間距離）と簡易透気速度の関係

図 2.7 に、削孔径 10mm において、削孔中心間距離と周囲に削孔がある場合と無い場合の簡易透気速度の比を示す。周囲に削孔がある場合の簡易透気速度は、削孔中心間距離 20mm の場合に大きく影響を受けるが、削孔中心間距離が広くなるのに従い影響は小さくなり、削孔中心間距離が 40mm 以上では影響はほぼ認められなかった。これらの傾向は、水セメント比が小さいほど顕著であった。削孔中心間距離 20mm, 30mm では削孔数の増加に伴い簡易透気速度は大きくなり、40mm 以上ではその影響がないことがわかった。

削孔中心間距離は、40mm 以上で隣接削孔が簡易透気速度に影響を及ぼさないことから、50mm 以上とすることとした。

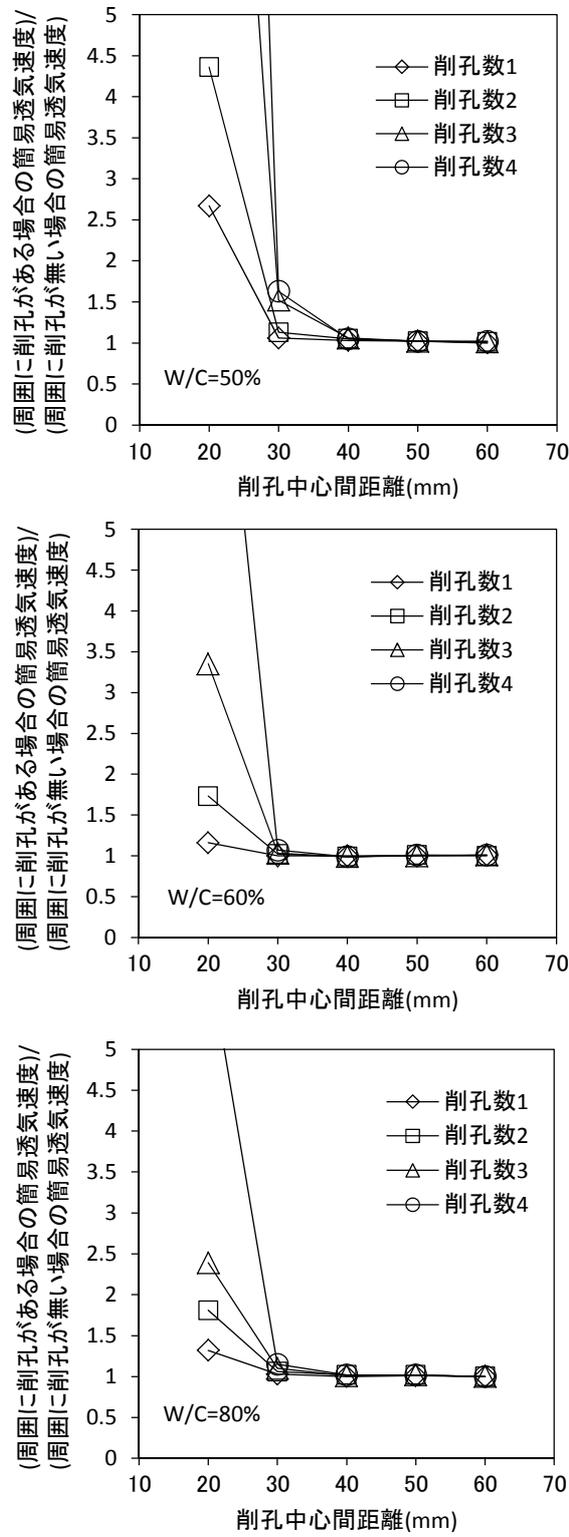


図 2.7 削孔中心間距離と周囲に削孔がある場合と無い場合との簡易透気速度の比

### 2.3 ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法の提案

2.2「簡易透気試験方法に関する検討」では、試験回数、減圧部容積、削孔径、削孔深さ、削孔間隔について検討を行い、その結果および既往の研究を総括して簡易透気試験の仕様を決定した。本節では、これらの結果を踏まえて、次の通り「ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法」を提案する。

## ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法

### 1. 適用範囲

この規格は、構造体コンクリートの簡易透気速度をドリル削孔により試験する方法に適用する。試験箇所は、原則として通常は雨水のかからない構造物の壁・柱・梁などの垂直面とする。

コンクリートの透気性は含水率が高い場合には小さくなる。雨水が直接掛からないような条件では、含水率が高い場合には水分の逸散が少なく、密実なコンクリートになると考えられる。そのため、今回提案では、養生環境による含水率の影響を含む透気性として評価することとした。また、このような条件下では、含水率の補正が必要なほど簡易透気速度に違いが少ないと考えられる。しかし、含水率が極端に異なる場合にはその影響があることも考えられるため、含水状態は測定して記録しておくこととした。含水率の測定は、文献<sup>4)</sup>による装置を用いるとよい。

### 2. 引用規格

次に掲げる規格は、この規格に引用されることによって、この規格の規定の一部を構成する。

JIS A 0203 : 1999 コンクリート用語

JIS C 9605 : 1988 携帯電気ドリル

JIS Z 2300 : 1991 非破壊試験用語

### 3. 用語の定義

- (1) 削孔：電動式振動ドリルを用いてあけた、直径 10mm、深さ 50mm の孔。
- (2) 簡易透気速度：透気性の指標で、削孔内部を減圧した後、孔の周壁からの空気の流入により、大気圧に戻る時の速度。

### 4. 一般事項

#### 4.1 試験技術者

簡易透気試験技術者（以下技術者という）は、コンクリート構造物およびその劣化に関する知識を十分に有している者でなければならない。

「コンクリート技士」「コンクリート診断士」等の関連資格を有していることが望ましい。

#### 4.2 事前調査または事前準備

原則として、次の事項を簡易透気試験前に調査する。

##### (1) 試験対象構造物の概要

所在地、竣工年、構造物の規模（建築面積、床面積、階数）、構造物の用途、履歴および周囲の構造物、周囲の環境条件等（外壁の場合は試験面の方位等）。

##### (2) コンクリート

セメントの種類、粗骨材の最大寸法、調合等

##### (3) 試験箇所

構造物の立地条件（屋内または屋外）、屋外の場合、雨水の直接の影響の有無。

##### (4) 仕上げ材

仕上げ材の有無。仕上げ材がある場合は、その種類、厚さ、経過年数、ひび割れ、浮きの有無および程度。

##### (5) その他

簡易透気試験に必要な事項。

コンクリートは一般に、水セメント比が大きくなるほど、養生が不十分なほど、含水率が小さくなるほど簡易透気速度は小さくなる。また、試験箇所の方位および周囲の構造物、樹木などにより、日射量が異なる場合に簡易透気速度は異なる。日射量の多い西面、南面の簡易透気速度は大きくなり、日射量が少ない北面や周囲に構造物や樹木がある場合には、コンクリートの含水率が高く簡易透気速度は小さくなる。雨が直接かかる場所では、日常的に含水率が高くなるため、簡易透気速度は小さくなる。また、打込み高さは、低い位置と比し高い位置では大きくなる。

これらの影響を考え、簡易透気試験位置は決定される。

セメントの種類は、竣工時に中性化抵抗性評価を行う場合には必ず必要となる。

表 2.6 簡易透気試験に使用する測定器具および仕様

測定器具	仕様
振動式電動ドリル	携帯型で JIS C 9605 に規定されている振動式のもの。
ドリル刃	振動式電動ドリルに対応したコンクリート削孔専用で、直径 10mm のもの。
真空計 (デジタルマンメータ)	6.7kPa(50mmHg)から 40.0kPa(300mmHg)の圧力計測が可能で、指定した圧力の範囲において真空度の低下に要する時間を自動的に少数第 1 位まで計測できるもの。ただし、U 字真空計とストップウォッチでこの機能を補ってもよい。
真空ポンプ	削孔内部を指定した圧力(12.0kPa(90mmHg))まで減圧できる能力を有するもの。
シリコン栓	図 2.3 に示す形状(栓の部分の直径が 10mm、長さ 10mm)のシリコン製のもの
注射針	直径 0.75mm、内径 0.50mm、長さ 38mm の静脈用のもの。
ビニール ホース	管の外径 10mm、内径 5mm、長さ 100mm で、減圧時に管がつぶれずかつフレキシブルなもの。

### 5. 試験用具

電気ドリル：携帯型振動式ドリルとし、JIS C 9605 に規定するものまたはこれに準ずるもの。

ドリルの刃：コンクリート削孔専用で、直径 10mm のもの。

デジタルマノメータ：6.67kPa (50mmHg)から 40.0kPa(300mmHg)の圧力の計測が可能なもので、指定した圧力の範囲において真空度の低下に要する時間を自動的に小数点第1位まで計測できるもの。ただし、U字型真空計とストップウォッチでこの機能を補ってもよい。

ビニールホース：管の外径 10mm，内径 5mm，長さ 100mm のもので、減圧時に管がつぶれず，かつフレキシブルなもの。

注射針：直径 0.75mm，内径 0.50mm，長さ 38mm の静脈用のもの。

真空ポンプ：真空ポンプは，削孔内部を指定した圧力(12.0kPa(90mmHg))まで減圧できる能力を有するもの。

シリコン栓：直径が 10mm，長さ 10mm のシリコン製のもの。

簡易透気試験に使用する測定器具および仕様は，表 2.6 に示す通りである。

電動ドリルは，必ず振動式を使用すること。ドリルによっては，振動式，回転式両用のものがあるが，必ず振動式として使用すること。回転式で削孔した場合には，容易に削孔出来ないばかりか，刃に熱を持つため，削孔内部が変質する危険性がある。

ドリルの刃は，振動式に対応したコンクリート専用のもので行う。

規定したデジタルマノメータは高価なため，使用頻度が少ない場合には，安価である U字型真空計とストップウォッチによりその機能を補ってもよいとした。

シリコン栓は，図 2.8 及び写真 2.1 に示すに示す形状(栓の部分の直径が 10mm，長さ 10mm)のシリコン製のものを使用する。

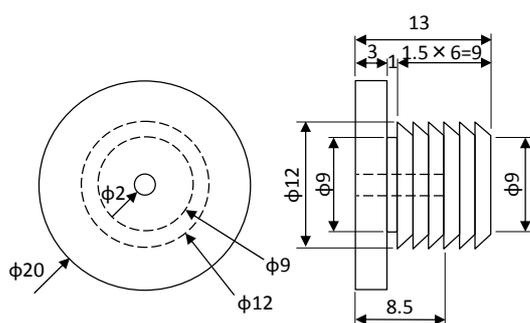


図 2.8 シリコン栓



写真 2.1 シリコン栓

## 6. 簡易透気試験装置の点検

試験装置の点検は、不具合の有無や試験装置、ホース直径、長さ等が異なる場合の減圧部容積の違い等を確認するため、試験前に基準用の試験体を測定することにより行う。

その結果、基準値以外である場合には、試験装置の修理や減圧部容積を一定にするためホース長さを変更するなどの調整をしなければならない。

## 7. 簡易透気試験の操作

### 7.1 削孔および装置の接続

簡易透気試験は、図 2.9 に示す装置により行う。

#### a) ドリル削孔

振動式電動ドリルを用いて削孔を行う。

#### b) ドリル削孔のシリコン栓での密封

ドリル削孔のシリコン栓での密封は、栓の部分が直径 10mm、長さ 10mm のシリコン製の栓および 5 分硬化型などのエポキシ樹脂を用いて行う。

#### c) 注射針の挿入

注射針の挿入は、注射針および直径 0.44mm 程度の針金を用いる。

#### d) 測定器具の接続

図 2.9 に示すように、注射針、デジタルマノメータ、真空ポンプを耐圧性のあるビニールホースにより接続する。

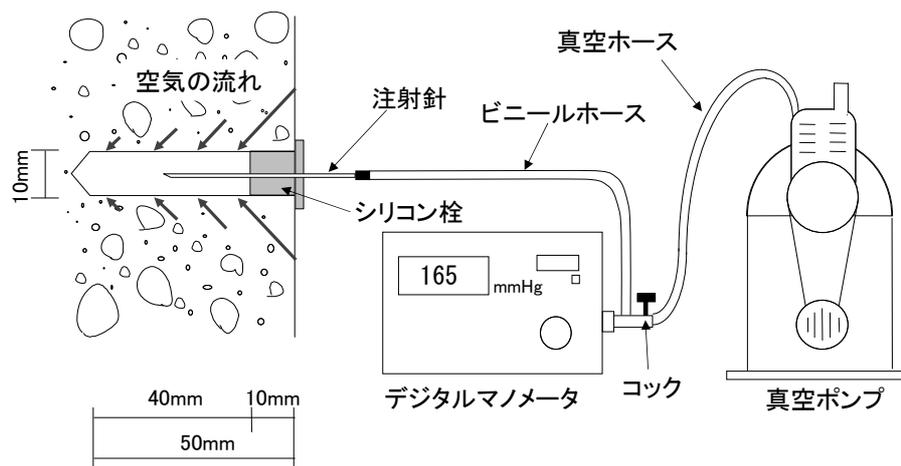


図 2.9 簡易透気試験装置

簡易透気試験は図 2.10 に示す操作フローに従い実施する。

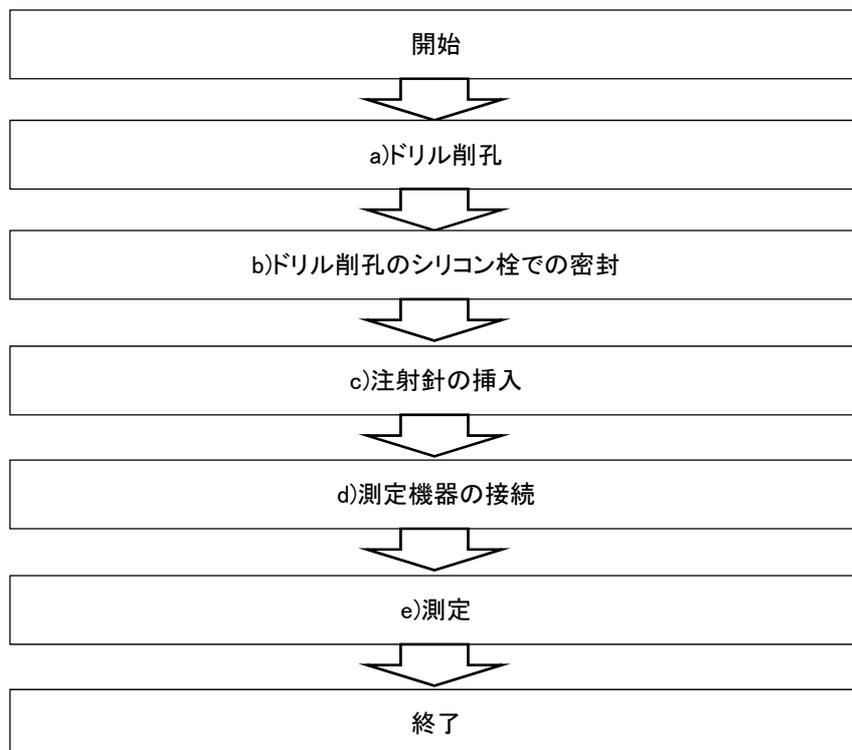


図 2.10 簡易透気試験操作フロー

簡易透気速度の操作は、以下に示す方法で行う。

#### a)ドリル削孔

振動式電動ドリルを用いて削孔を行う。このとき、ドリルの刃には、ビニールテープなどで 50mm の位置に目印をつけておくと良い。まず削孔前に、削孔する位置を決定する。このとき、隣接するドリル削孔中心間距離は、50mm 以上とする。鉄筋のある箇所では測定を行う場合には、鉄筋位置を非破壊検査により事前に探査し、出来るかぎり鉄筋位置から遠い箇所を測定点とする。

次に、写真 2.2 に示すように削孔を行う。ノギスによる深さの測定は、写真 2.3 に示すように試験の開始時やドリルの刃の交換を行った場合に行う。最後に、削孔終了後にはドリル削孔内にコンクリート粉が残っているので、エアダスターなどを用いて除去する。



写真 2.2 削孔状況



写真 2.3 ノギスによる削孔深さ測定

#### b) ドリル削孔のシリコン栓での密封

ドリル削孔のシリコン栓での密封は、図 2.8 に示す栓の部分が直径 10mm、長さ 10mm のシリコン製の栓および 5 分程度で硬化を開始するエポキシ樹脂により行う。まず、シリコン栓にエポキシ樹脂を塗布する。シリコン栓の挿入は、羽の部分がコンクリートに密着し、周囲にエポキシ樹脂がはみ出る程度とするのが良い。

#### c) 注射針の挿入

注射針の挿入は、注射針および直径 0.44mm 程度の針金を用いる。エポキシ樹脂が硬化した後、シリコン栓の中央部にあるくぼみの部分に注射針を差し込む。このとき、注射針の穴にシリコンが詰まることを防ぐために、あらかじめ注射針の穴に直径 0.44mm 程度の針金等を差し込んでおくといよい。

#### d) 測定器具の接続

写真 2.4 に示すように、注射針、デジタルマノメータ、真空ポンプを耐圧性のあるビニールホースにより接続する。



写真 2.4 測定器具の接続状況

## 7.2 測定

コックを開いた状態で、真空ポンプを用いて、削孔内の空気を抜き取り、真空度が  $X_1(21.3\text{kPa}(160\text{mmHg}))$  より  $1.3\text{kPa}$  ( $10\text{mmHg}$ ) 高い  $20.0\text{kPa}(150\text{mmHg})$  程度まで減圧し、コックを閉じる。孔の周壁からの空気の流入により、真空度が  $X_1(21.3\text{kPa}(160\text{mmHg}))$  から  $X_2(25.3\text{kPa}(190\text{mmHg}))$  まで低下する時間  $T$  を測定する。 $T$  が 10 秒以下になる場合には、 $X_1$  を  $13.3\text{kPa}(100\text{mmHg})$ 、 $X_2$  を  $33.3\text{kPa}(250\text{mmHg})$  として測定する。

1 削孔における測定は、上記の操作を 4 回繰り返す。

## 8. 簡易透気速度の計算

簡易透気速度は、(2.3)式により求める。1 回目を除いた 2 回目以降の 3 回の平均より簡易透気速度を求め、当該孔の測定値とする。

$$K = \frac{X_2 - X_1}{T} \quad \dots (2.3)$$

ここに、  
 $K$  : 簡易透気速度(kPa/s)  
 $X_1$  : 時間測定開始時の真空度(kPa)  
 $X_2$  : 時間測定終了時の真空度(kPa)  
 $T$  : 真空度の低下時間(s)

簡易透気速度の計算は、前節において検討した結果から、1 つ削孔における 1 回目の測定値が 2 回目以降と比し大きくなるため、1 回目の測定値を除外することとした。

## 9. 修復

削孔した孔は、試験終了後にセメントペースト、モルタルなどを充填して修復する。

## 10. 報告

### 10.1 必ず報告する項目

必ず報告する項目は次による。

- (1) 構造物の名称, 所在地
- (2) 構造物の概要
- (3) 試験日時, 天候
- (4) 試験技術者名
- (5) 試験箇所, 範囲
- (6) 簡易透気試験結果
- (7) 含水率測定結果

### 10.2 必要に応じて報告する事項

必要に応じて報告する事項は次による。

- (1) コンクリートの調合, 使用材料
- (2) 関連試験結果
- (3) その他必要事項

なお, 報告書は必要な期間保存しなければならない。

## 2.4 簡易透気試験方法による影響要因

### 2.4.1 実験概要

#### (1) 実験の影響要因と水準

ここでは, 2.3 で提案した「ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法」を用いた場合の, 簡易透気速度に及ぼすコンクリートの水セメント比, セメントの種類, 単位水量, 空気量, 乾燥開始材齢, 測定材齢の影響を検討した。

表 2.7 に, 実験の影響要因とその水準を示す。本実験で使用したコンクリートは, 普通ポルトランドセメント (OPC) を用いた水セメント比 60%, 単位水量 185kg/m<sup>3</sup>, 目標空気量 4.5%, 目標スランプ 18cm のコンクリートを材齢 3 ヶ月で試験することを基準として, 以下の影響要因を変化させた。

水セメント比を検討する実験では, 水セメント比を 30, 40, 60, 80%とした。

セメント種類を検討する実験では, セメントの種類を普通ポルトランドセメント (OPC), 早強ポルトランドセメント (HPC), 中庸熱ポルトランドセメント (MPC), 高炉セメント B 種 (SCB), フライアッシュセメント B 種 (FCB) とした。

単位水量を検討する実験では, 単位水量を 202, 185, 178, 170, 162kg/m<sup>3</sup>とした。

空気量を検討する実験では, 目標空気量を 1.0, 2.0, 4.5, 6.0%とした。

養生条件として, コンクリート打込み後に型枠, ビニールなどの養生材を取り外し乾燥を開始した時の材齢 (以下乾燥開始材齢と略記) を 1, 3, 7, 28 日, 測定材齢を 1, 3, 6 ヶ月とした。

表 2.7 実験の影響要因と水準

影響要因	水準
水セメント比	30, 40, 60, 80%
セメントの種類	普通ポルトランドセメント (OPC) 早強ポルトランドセメント (HPC) 中庸熟ポルトランドセメント (MPC) 高炉セメント B 種 (SCB) フライアッシュセメント B 種 (FCB)
単位水量	202, 185, 178, 170, 162kg/m <sup>3</sup>
空気量	1.0, 2.0, 4.5, 6.0%
乾燥開始材齢	1, 3, 7, 28 日
測定材齢	1, 3, 6 ヶ月

## (2) コンクリートの調合および使用材料

表 2.8, 表 2.9 に, コンクリートの調合および使用材料をそれぞれ示す。表 2.10 は, フレッシュコンクリートの性状および圧縮強度を示したものである。

表 2.8 使用材料

使用材料	使用材料の種類および品質
水	習志野市水道水(密度 1.00g/cm <sup>3</sup> )
セメント	OPC:普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm <sup>3</sup> ) HPC:早強ポルトランドセメント(密度 3.14g/cm <sup>3</sup> ) MPC:中庸熟ポルトランドセメント(密度 3.21g/cm <sup>3</sup> ) SCB:高炉セメント B 種(密度 3.04g/cm <sup>3</sup> ) (高炉スラグの分量 43wt%) FCB:フライアッシュセメント B 種(密度 2.97g/cm <sup>3</sup> ) (フライアッシュの分量 17wt%)
細骨材	大井川系川砂(表乾密度 2.62g/cm <sup>3</sup> )
粗骨材	大井川系川砂利(表乾密度 2.66g/cm <sup>3</sup> )
混和剤	Ad1:P 社製 AE 減水剤 Ad2:P 社製高性能 AE 減水剤 Ad3: P 社製 AE 助剤(100 倍希釈)

表 2.9 コンクリートの調合

シリーズ	水セメント比 (%)	セメントの種類	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
			水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤		
							Ad1	Ad2	Ad3
水セメント比	30	OPC	185	617	577	94	—	6.180	0.900
	40		185	463	658	990	1.160	—	1.100
	60		185	308	849	923	0.770	—	1.500
	80		185	231	893	947	0.578	—	1.300
セメント種類	60	OPC	185	308	849	923	0.770	—	1.167
		HPC	185	308	849	923	0.770	—	1.750
		MPC	186	310	849	923	0.770	—	1.575
		SCB	183	305	849	923	0.770	—	2.500
		FCB	181	302	849	923	0.770	—	2.667
単位水量	60	OPC	202	336	823	884	0.840	—	2.000
			185	308	849	923	0.770	—	1.182
			178	297	787	1018	0.738	—	1.773
			170	283	803	1035	0.708	—	1.720
			162	270	817	1053	0.668	—	1.636
空気量	60	OPC	192	319	880	956	—	—	—
			190	316	871	947	0.782	—	0.152
			185	308	849	923	0.770	—	1.085
			181	302	832	905	0.758	—	1.970

表 2.10 フレッシュコンクリートの性状および圧縮強度

影響要因	W/C (%)	セメント種類	目標空気量 (%)	空気量	スラン	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )			
				(%)	(cm)	1日	3日	7日	28日
水セメント比	30	OPC	4.5	4.5	21.0	29.3	49.2	60.7	72.5
	40			4.1	22.0	12.1	23.9	31.3	36.6
	60			5.0	17.0	4.89	13.4	19.7	26.1
	80			4.8	24.0	2.31	6.27	10.4	13.5
セメント種類	60	OPC	4.5	4.3	21.0	4.92	14.6	21.7	30.9
		HPC		4.4	20.5	12.7	23.1	30.0	35.3
		MPC		4.2	16.5	4.74	8.70	13.3	28.2
		SCB		4.7	21.0	3.12	7.31	12.8	25.3
		FCB		4.3	20.0	3.65	9.90	15.5	26.5
単位水量	60	OPC	4.5	4.9	21.5	6.89	15.9	23.0	30.0
				4.1	18.5	7.25	17.6	23.7	34.1
				4.6	15.0	6.20	18.3	24.2	34.2
				4.9	14.5	5.48	18.5	23.4	32.0
				4.8	10.0	5.11	17.7	25.5	30.0
空気量	60	OPC	1.0	1.1	19.0	7.84	16.6	23.8	33.3
			2.0	1.9	20.0	8.35	17.7	23.1	35.7
			4.5	4.0	19.0	7.74	16.5	23.0	31.2
			6.0	5.9	21.5	6.34	14.4	20.9	29.1

(3) 試験体の寸法および試験位置

図 2.11 に、試験体の概念図を示す。試験体は、寸法を 150×150×200mm とし、150×150mm の面を試験面として使用した。試験位置は、150×150mm の試験面を 50mm 毎に 3 分割した交点の 4 箇所とした。

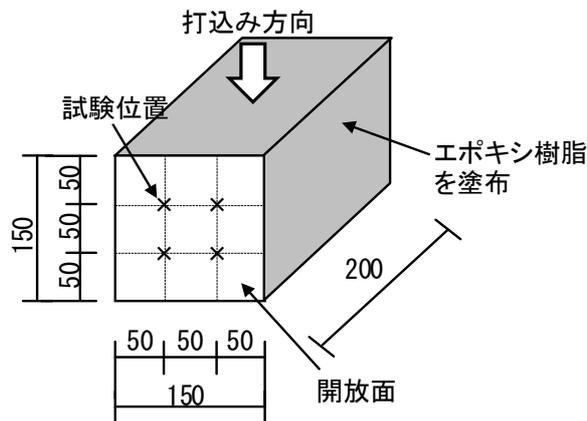


図 2.11 試験体の概念図(単位:mm)

(4) 養生(乾燥)条件

図 2.12 に、コンクリートの養生条件を示す。試験体は、コンクリート打込み後材齢 1 日で脱型し、150×150mm の開放面 2 面はビニールを用いて封緘し、150×200mm の開放面以外の 4 面は乾燥を防ぐためエポキシ樹脂を塗布した。養生は、20℃、相対湿度 60%の恒温恒湿室内で行い、所定の乾燥開始材齢でビニールを取り除いた。

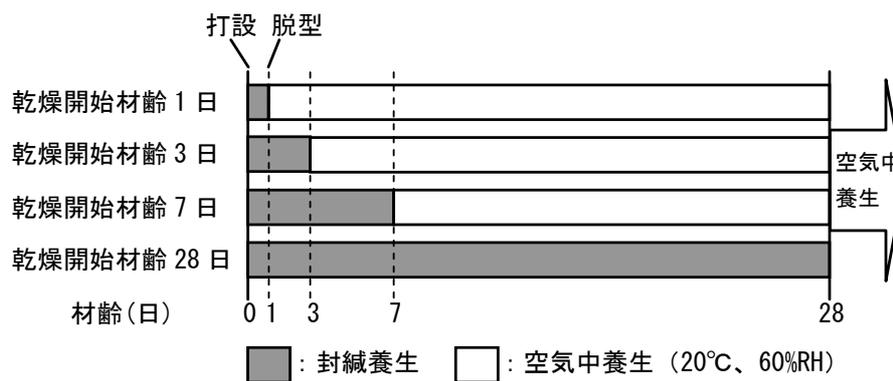


図 2.12 コンクリートの養生条件

### (5) 簡易透気速度の測定

簡易透気速度の測定は、2.3 で提案した「ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法」により行った。測定材齢は3ヶ月とした。なお、測定材齢が簡易透気速度に及ぼす影響を確認する実験では、材齢1, 3, 6ヶ月で測定した。

## 2.4.2 実験結果および考察

### (1) 水セメント比と簡易透気速度の関係

図 2.13 に、水セメント比と簡易透気速度の関係を示す。簡易透気速度は、水セメント比が大きくなるほど大きくなった。この傾向は、水セメント比が 60%を超えると更に顕著であった。同一水セメント比では乾燥開始材齢が早いほど、簡易透気速度は大きくなる傾向が認められた。「1.5.4 各種影響要因」の結果と比較した場合においても、水セメント比が 60%以上で透気性の増加は大きくなっており、同様の傾向であるといえる。

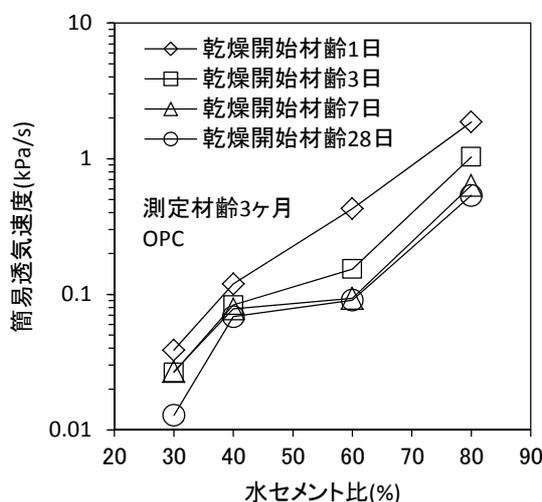


図 2.13 水セメント比と簡易透気速度の関係

### (2) 使用したセメントの種類と簡易透気速度の関係

図 2.14 に、使用したセメントの種類と簡易透気速度の関係を示す。水和の早い早強ポルトランドセメント(HPC)を用いたコンクリートの簡易透気速度は、普通ポルトランドセメント(OPC)に比し小さく、乾燥開始材齢の違いによる差は小さかった。水和の遅い中庸熱ポルトランドセメント(MPC)、高炉セメントB種(SCB)、フライアッシュセメントB種(FCB)を用いたコンクリートの簡易透気速度は、普通ポルトランドセメント(OPC)に比し大きく、乾燥開始材齢による差も大きかった。「1.5.4 各種影響要因」で示す結果では、高炉スラグを混入した場合の検討しかないが、高炉スラグの置換率の増加に伴い簡易透気速度は増加している。混合セメント系では、簡易透気速度は大きくなる傾向にあるが、材齢3ヶ月における試験であり、さらに長期材齢となった場合には、普通ポルトランドセメントの結果に近づくと推測される。

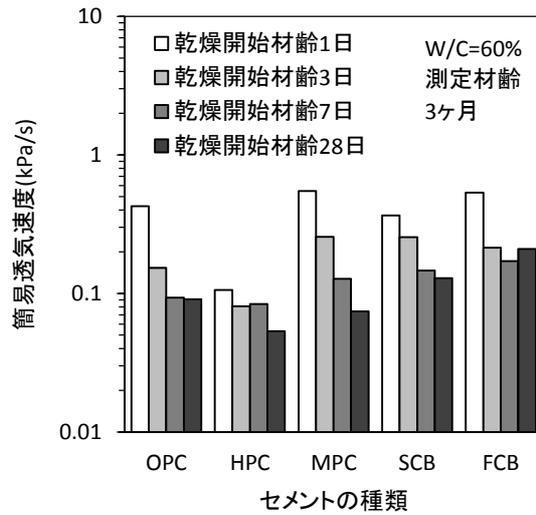


図 2.14 セメントの種類と簡易透気速度の関係

(3) 単位水量と簡易透気速度の関係

図 2.15 に、単位水量と簡易透気速度の関係を示す。コンクリートに使用される実際の材料，調合の範囲を考えた時，単位水量は，前述の水セメント比，セメント種類，後述の空気量，乾燥開始材齢と比し影響が小さかった。「1.5.4 各種影響要因」でも，単位水量の影響は小さかった。単位水量の影響については，骨材と比し透気性の大きくなるセメントペーストが多くなった場合の影響を確認していると考えられるが，本実験の範囲ではセメントペーストの影響は少なかったと考えられる。

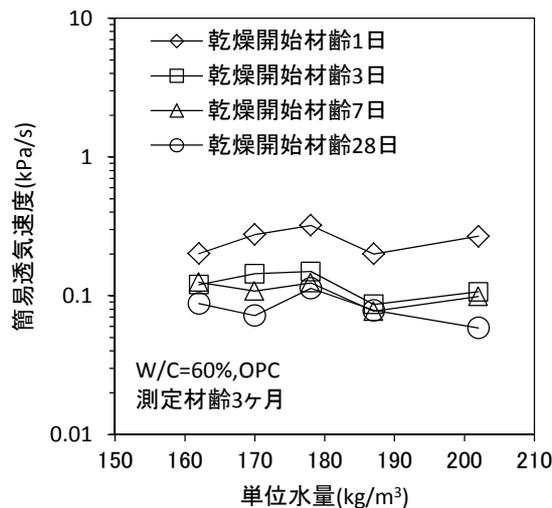


図 2.15 単位水量と簡易透気速度の関係

## (4) 空気量と簡易透気速度の関係

図 2.16 に、空気量と簡易透気速度の関係を示す。簡易透気速度は、空気量の増加に伴い大きくなる傾向にあった。ただし、他の要因に比べると変化幅は小さいといえる。空気量として増加した空隙は、AE 剤による独立気泡であり、空気量が 4.5%以下では簡易透気速度に影響はなかったが、空気量が 4.5%を超えるような場合には簡易透気速度への影響が認められた。これは、空気量の増加に伴い気泡の間隔が小さくなったことにより、一部の気泡が連続的な空隙となったことによると推測される。

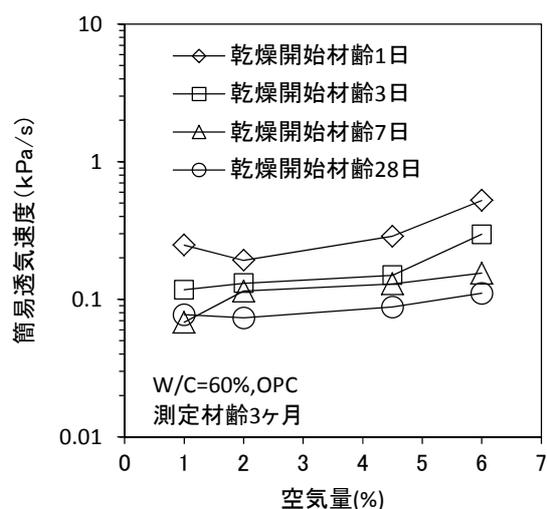


図 2.16 空気量と簡易透気速度の関係

## (5) 乾燥開始材齢と簡易透気速度の関係

図 2.17 に、乾燥開始材齢と簡易透気速度の関係を示す。簡易透気速度は、いずれの水セメント比においても乾燥開始材齢が遅くなるのに伴い小さくなった。このとき、乾燥開始材齢の違いによる簡易透気速度の差は、設定の範囲では乾燥開始材齢 7 日までは大きいものの、乾燥開始材齢 7 日と 28 日の間では小さかった。「1.5.4 各種影響要因」では、乾燥開始材齢が 1 日と 7 日の比較のみが行われているが、本実験の結果と同様に、乾燥開始材齢 1 日と比し 7 日の簡易透気速度は小さくなっている。

乾燥開始材齢の影響は、脱型が早いほど強度が低く、その状態で乾燥したため水和が進行せず、細孔が粗いまま残ったためと考えられる。

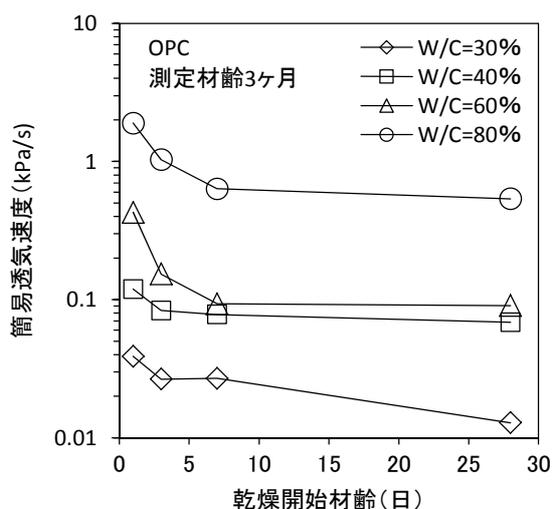


図 2.17 乾燥開始材齢と簡易透気速度の関係

## (6) 測定材齢と簡易透気速度の関係

図 2.18 に、乾燥開始材齢 1 日のコンクリートにおける測定材齢と簡易透気速度の関係を示す。材齢経過・乾燥に伴い簡易透気速度は大きくなるが、その増加量は、材齢 1 ヶ月から 3 ヶ月と比し、3 ヶ月から 6 ヶ月の間では小さかった。「1.5.4 各種影響要因」では、材齢の経過に伴い簡易透気速度は大きくなっているが、その範囲が 0~0.53kPa/sec (0~4mmHg/sec) の範囲であることを考えると、その差は小さいと考えられる。

材齢の経過に伴う簡易透気速度の違いは、普通ポルトランドセメントでは、乾燥状態の違いが影響していると推測される。

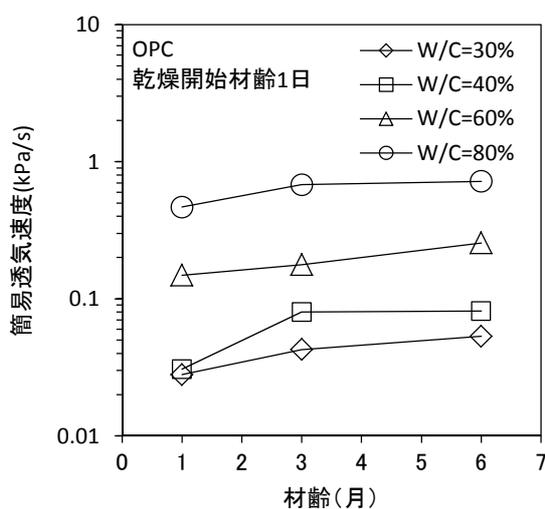


図 2.18 測定材齢と簡易透気速度の関係

## 2.5 本章のまとめ

本章で得られた結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 簡易透気速度に及ぼす測定回数，減圧部容積，削孔径，削孔深さ，削孔間隔の影響を検討し，簡易透気試験を削孔深さ 50mm，削孔径 10mm，ホース長さ 100cm，削孔間隔 50mm 以上で行うこととした。また，測定は 4 回行い，測定結果は 1 回目を除いた 2 回目以降の測定値を平均した値とすることとした。
- (2) (1)に示した成果を踏まえて，試験方法を整理し，「ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法」を提案した。
- (3) 提案した試験方法による測定値に及ぼす各種影響要因を検討した。その結果，簡易透気速度は，水セメント比が大きくなるほど，水和の遅いセメントを使用したほど，空気量が大きいくほど，乾燥開始材齢が早いほど，測定材齢が遅いほど大きくなった。なお，水セメント比，使用セメントの種類，乾燥開始材齢の影響は大きく，単位水量，空気量，測定材齢の影響は小さい方であった。

## 参考文献

- 1) J.W.Figg: Methods of Measuring the Air and Water Permeability of Concrete; Magazine of Concrete Research, Vol.25, No.85, pp.213-218, 1973
- 2) 笠井芳夫，松井勇，湯浅昇：簡易な試験による構造体コンクリートの品質評価の試み，セメント・コンクリート，No.559, pp.20-28, 1993.9
- 3) 湯浅昇，笠井芳夫，松井勇：乾燥を受けたコンクリートの表層から内部にわたる含水率，細孔構造の不均質性，日本建築学会構造系論文集，第509号，pp.9-16, 1998.7
- 4) 美岬町雅弘，湯浅昇：誘電率既知材料によるコンクリート用試製新型水分計の表示値の検証，非破壊検査協会平成24年度秋季講演大会，pp.47-50, 2012.10

## 第 3 章

### 簡易透気試験の結果と他の透気試験の結果の比較

## 第3章 簡易透気試験の結果と他の透気試験の結果の比較

### 3.1 概要

透気試験は、コンクリートから採取したφ100mmのコア供試体を用いた破壊試験による方法、構造体コンクリートに適用可能な、非・微破壊試験による方法がある。コア供試体による方法では、RILEM TC 116-PCD (Permeability of Concrete as Criterion of its Durability) などで試験方法として提案されているとともに、ダルシー則により直接的に透気係数が求められる。一方で、非・微破壊試験である削孔法やシングルチャンバー法、ダブルチャンバー法の透気試験は、各々の試験方法により間接的な指標値を示すとともに、相対的な評価基準を示しているのみである。そのため、コンクリートの透気性を示す指標としての透気係数と簡易透気速度の関係を示すことは、コンクリートの透気性を考える上で重要である。また、簡易法による透気試験は、いくつかの方法が提案され、土木分野などではダブルチャンバー法による透気試験が普及しているなど、各々の試験が広まっている。そこで現在、簡易法による透気試験を規格化する流れがあり、各試験値を相互に互換する仕組みを構築することは重要である。

そこで本章では、第一に、コンクリートの条件を変えた模擬壁に簡易透気試験を適用させ、簡易透気速度とφ100mmのコア供試体による透気係数の関係を検討する。次に、簡易透気試験以外に日本で利用・普及が認められるシングルチャンバーによる方法、ダブルチャンバーによる方法（トレントによる方法）による透気性の指標値と簡易透気速度との関係を示し、実構造物で適用可能な試験方法間において各試験値を相互に互換する仕組みを検討した。

### 3.2 各種透気試験方法の特徴

表 3.1 に、各種透気試験方法のそれぞれの特徴を示す。なおこの検討結果は、一般的に示されている考え方をまとめたものであり、実験結果に基づくものではない。

#### (1) 破壊の状態

簡易透気試験方法は、直径 10mm、深さ 50mm の削孔を用いて試験するため微破壊ではあるが破壊を生じる。シングルチャンバー法による透気試験方法、トレント法による透気試験方法では、コンクリート表面にチャンバーを吸付けるため非破壊である。

#### (2) 測定の容易さ

簡易透気試験は削孔する作業が生じるため若干ではあるが測定に手間が掛かる。シングルチャンバー法による透気試験方法、トレント法による透気試験方法では、コンクリート表面にチャンバーを吸付けるため容易に試験可能である。

#### (3) 測定精度

簡易透気試験、シングルチャンバー法による透気試験とともに、ある圧力から一定の圧力まで低下する時間を測定し、圧力の低下速度を算出している。トレント法による透気試験では、コンクリートから採取したコアなどを用いた方法と同様に、ダルシー則に基づいた式(3.2)からトレント法による透気係数を算出している。簡易法の試験に関しては、非(微)破壊試験であることから、その精度は低くなる。

(4) 評価

簡易法の試験では間接的な透気性の評価となる。簡易透気速度により筆者らは、30年、65年、100年の間鉄筋まで中性化が進行しないかを評価する指標を提案している。トレント法による透気係数は、優、良、一般、劣、極劣5段階のグレードで評価する方法を提案している。

(5) 測定装置に関する費用

簡易透気試験およびシングルチャンバー法による透気試験の装置は安価であるが、ダブルチャンバー法による透気試験装置は市販品であり高価である。また、簡易透気試験、シングルチャンバー法による透気試験に関しては、その価格の多くがデジタルマノメータであるが、試験箇所数が少ない場合などには、これをU字型真空系とストップウォッチに置き換えることにより、更にコストを低下させることが可能である。

(6) 測定に掛かる人件費等のコスト

簡易透気試験では、1人で作業を行う場合、削孔時には測定が出来ないなど時間当たりの測定数は少なくなる。シングルチャンバー法による透気試験では強度レベルにより測定時間は異なるが1日で比較的多くの測定が可能である。ダブルチャンバー法による透気試験では1測定に最低6分必要で、段取り替え等を含めると1時間に6点程度しか測定できない。

表 3.1 各種透気試験方法のそれぞれの特徴

試験方法	破壊の状態	測定の容易さ	測定の精度	評価方法	コスト		
					装置の費用	人件費等	総合
コア供試体による透気試験方法	×	×	○	○	×	×	×
簡易透気試験方法	削孔法	△	△	△	○	△	△
シングルチャンバーによる透気試験方法 (シングルチャンバー法)	表面法 (減圧)	○	○	△	○	○	○
トレント法による透気試験方法 (ダブルチャンバー法)	表面法 (減圧)	○	○	△	×	△	△

破壊の状態 ○：小， △：中， ×：大  
 測定の容易さ ○：容易， △：普通， ×：困難  
 測定制度 ○：高い， △：普通， ×：低い  
 評価方法 ○：直接的な評価， △：間接的な評価  
 コスト ○：安価， △：普通， ×：高価

3.3 簡易透気試験の結果と φ100mmのコア供試体による透気試験の結果の比較

本節では、コンクリートの条件を変えた模擬壁に簡易透気速度を適用させ、簡易透気速度と採取したφ100mmのコアによる透気係数の関係を検討した。

3.3.1 実験概要

(1) 実験の要因と水準

表 3.2 に、実験の要因と水準を示す。実験は、φ100mmのコア供試体による透気試験方法、簡易透気試験方法を実施した。また、コンクリートの品質を変化させるため、乾燥開始材齢を7日

として水セメント比を30%, 40%, 60%とした場合, 水セメント比を60%として乾燥開始材齢を1日, 3日, 7日, 28日とした模擬壁を作製した。

表 3.2 実験の要因と水準

実験の要因	水準
透気試験方法	φ100mmのコアによる透気試験 簡易透気試験
水セメント比	50%, 60%, 80%
乾燥開始材齢	1日, 3日, 7日, 28日

## (2) コンクリートの調合および使用材料

使用材料を表3.3に, コンクリートの調合を表3.4に示す。コンクリートの調合は, W/C=50%, 60%, 80% (水セメント比の比較), W/C=60' % (乾燥開始材齢の比較) とした。

表 3.3 使用材料

使用材料	使用材料の種類および品質
水	つくば市水道水 (密度 1.00g/cm <sup>3</sup> )
セメント	普通ポルトランドセメント (密度 3.15g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	S1:川砂 (大井川系川砂, 表乾密度 2.62g/cm <sup>3</sup> ) S2:つくば市産川砂 (表乾密度 2.50g/cm <sup>3</sup> ) S3:つくば市産砕砂 (表乾密度 2.59g/cm <sup>3</sup> )
粗骨材	G1:川砂利 (大井川系川砂利, 表乾密度 2.66g/cm <sup>3</sup> ) G2:つくば市産碎石 (表乾密度 2.66g/cm <sup>3</sup> )
混和剤	Ad1:P社製 AE 減水剤 (4倍希釈液) Ad2:P社製 AE 助剤 (100倍希釈)

表 3.4 コンクリートの調合

水セメント比 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )									
	水	セメント		細骨材			粗骨材		混和剤	
		C1	C2	S1	S2	S3	G1	G2	Ad1	Ad2
50	180	360	—	846	—	—	949	—	0.900	0.700
60	180	300	—	842	—	—	954	—	0.750	0.792
80	180	225	—	874	—	—	985	—	0.578	1.184
60'	185	—	308	—	195	608	—	955	0.770	0.154

## (3) 試験体の作製および養生

試験体は, 図 3.1 に示すように, 寸法を 300×300×150mm, φ100×200mm, 試験面を 300×300mm, φ100mm の2面とし, コンクリート打ち込み後材齢1日で脱型し, 試験面をビニールで封かんし, 試験面以外は乾燥の影響を受けないようにアルミテープで封かんした。なお, φ100×200mm の試験体はφ100mmの面が側面となるように, 鋼製型枠を用いて作製した。

養生は, 温度 20℃, R.H. 60%の恒温恒湿室内で行い, 材齢1日, 3日, 7日, 28日でビニールを取り外し, 乾燥を開始した。

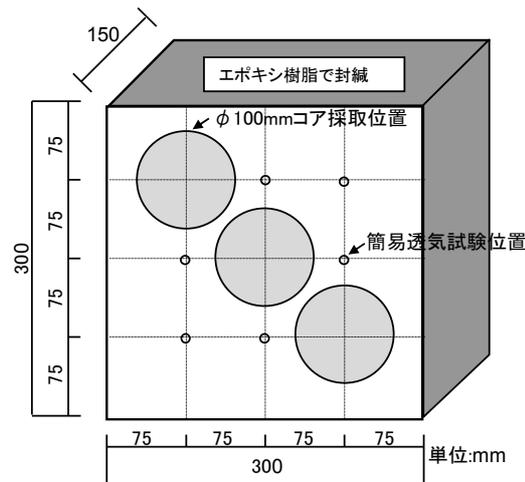


図 3.1 試験体概要図

(4) 試験方法

a. φ 100mm のコア供試体による透気試験方法

φ 100mm のコア供試体による透気試験方法は、図 3.2 に示す試験装置により行った。供試体は、図 3.1 に示す簡易透気試験を終了した供試体から φ 100mm のコアを採取し、試験面から 40mm の厚さで切断した後、40℃の乾燥炉で質量が一定になるまで乾燥させた。測定は、φ 100mm、厚さ 40mm の試験体を圧力容器に設置し、0.5MPa の窒素ガスを試験体に作用させ、窒素ガスの流れが定常となったときの単位時間あたりに供試体を透過し、水に置換された窒素ガスを透気量とし、(3.1) 式により透気係数を求めた。

$$K = \frac{2LP_2\gamma_a}{P_1^2 - P_2^2} \times \frac{Q}{A} \quad \dots (3.1)$$

ここに、K：透気係数 (cm/sec)

L：試験体厚さ (cm)

P<sub>1</sub>：載荷圧力+大気圧 (kgf)

P<sub>2</sub>：大気圧 (1.0) (kgf)

A：透気面積 (cm<sup>2</sup>)

γ<sub>A</sub>：空気の単位容積質量 (1.025 × 10<sup>-6</sup>kg/cm<sup>3</sup>)

b. 簡易透気試験

簡易透気試験は、「2.3 ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法」に従い実施した。

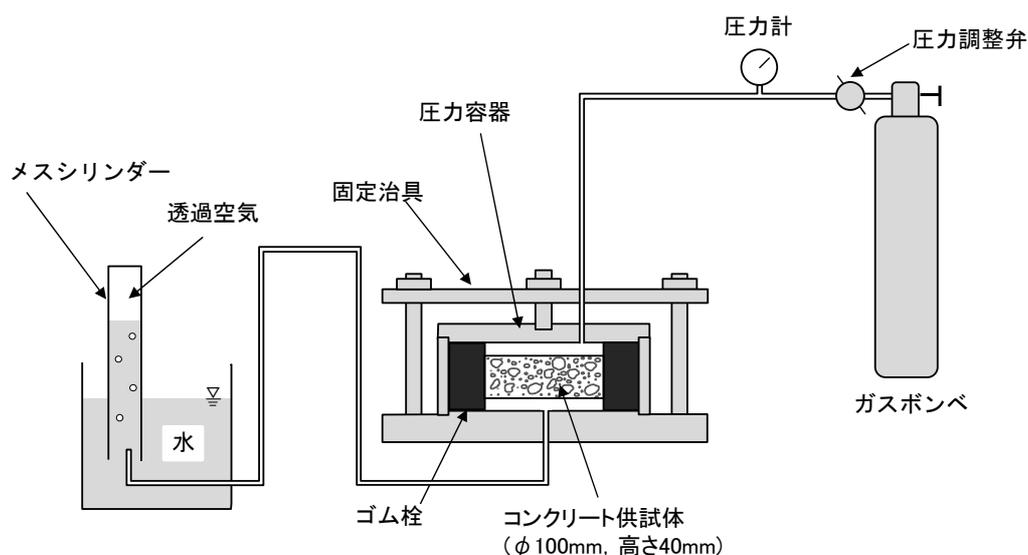


図 3.2 Φ100mm のコア供試体による透気試験装置

### 3.3.2 実験結果および考察

#### (1) 簡易透気速度

図 3.3 に、水セメント比と簡易透気速度の関係を示す。簡易透気速度は、既往の研究と同様に水セメント比が大きくなるほど大きくなり、水セメント比 60%では、この傾向は顕著であった。

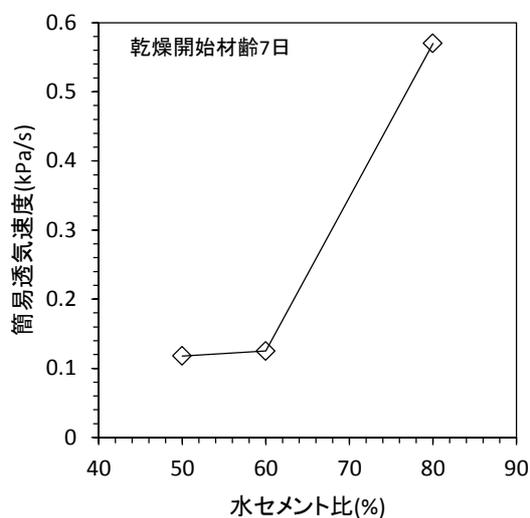


図 3.3 水セメント比と簡易透気速度の関係

図 3.4 に、乾燥開始材齢と簡易透気速度の関係を示す。簡易透気速度は、既往の研究と同様に乾燥開始材齢が早くなるほど大きくなった。簡易透気速度におよぼす影響は、乾燥開始材齢に比し水セメント比で大きくなった。

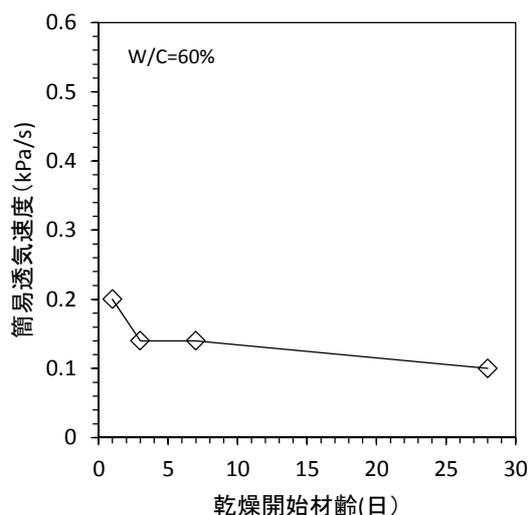


図 3.4 乾燥開始材齢と簡易透気速度の関係

(2)  $\phi 100\text{mm}$  のコア供試体による透気係数

図 3.5 に、水セメント比と  $\phi 100\text{mm}$  のコア供試体による透気係数の関係を示す。 $\phi 100\text{mm}$  のコア供試体による透気係数は、水セメント比が大きいくほど大きくなった。簡易透気速度と比し、水セメント比 50%と 60%における差が認められた。 $\phi 100\text{mm}$  のコア供試体と試験体による違いは、試験体の透気係数が大きくなった。これは、試験面が型枠側面となるように打設したが、試験体内における上下方向の不均質の影響を受けたため、コアと比較して大きくなったと考えられる。

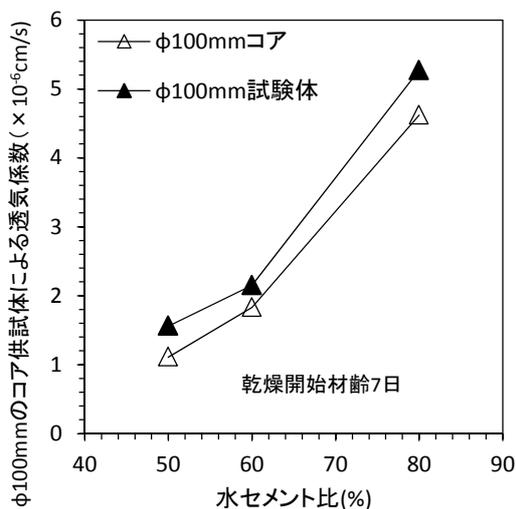
図 3.5 水セメント比と  $\phi 100\text{mm}$  のコア供試体による透気係数の関係

図 3.6 に、乾燥開始材齢と  $\phi 100\text{mm}$  のコア供試体による透気係数の関係を示す。 $\phi 100\text{mm}$  のコア供試体による透気係数は、乾燥開始材齢が早くなるほど大きくなるが、簡易透気速度と比しその差は小さかった。乾燥開始材齢の影響が簡易透気速度と比し小さかったのは、供試体の厚さが  $40\text{mm}$

であり表面の乾燥の影響のみではなく内部の緻密な部分の影響も受けていることによると考えられる。

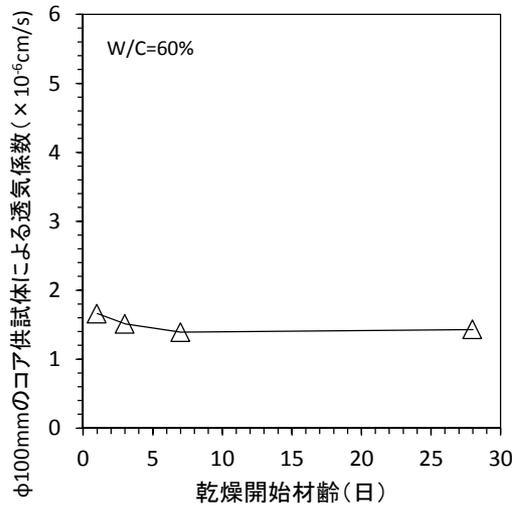


図 3.6 乾燥開始材齢とφ 100mm のコア供試体による透気係数の関係

(3) 簡易透気速度とφ 100mm のコア供試体による透気係数の関係

図 3.7 に、φ 100mm のコア供試体による透気係数と簡易透気速度の関係を示す。実験結果は少ないが、φ 100mm のコア供試体による透気係数が大きくなるのに伴い簡易透気速度は大きくなる傾向であった。このとき、水セメント比と乾燥開始材齢で傾向が異なっている。これは、簡易透気速度が削孔を用いて試験を行っているため、コンクリート表層部の不均質の影響を受けた可能性があるのに対し、φ 100mm のコア供試体による透気係数は供試体厚さ 40mm で試験を行っていることから、表層コンクリートの品質の影響を受けにくかったことが一つの要因として考えられる。

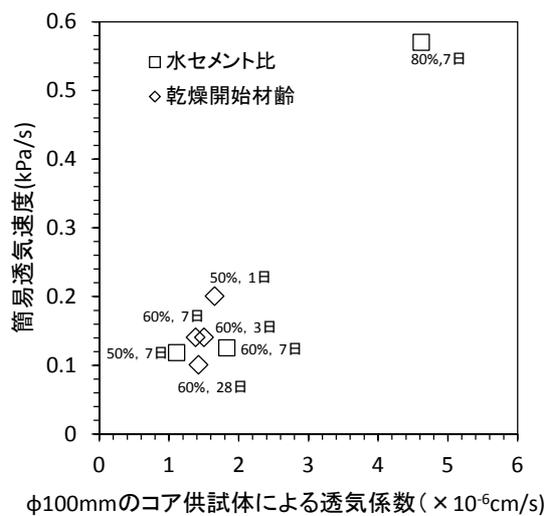


図 3.7 φ 100mm のコア供試体による透気係数と簡易透気速度の関係

3.4 簡易透気試験の結果と他の簡易法による透気試験の結果の比較

簡易透気試験以外に一定の利用・普及が認められる，シングルチャンバーによる方法，ダブルチャンバーによる方法（トレント法）による透気性の指標値と簡易透気速度の関係を示し，実構造部で適用可能な試験方法間において各試験値を相互に互換する仕組みを構築する。

### 3.4.1 実験概要

#### (1) コンクリートの要因と水準

表 3.5 に，実験の要因と水準を示す。試験方法は，削孔法の簡易透気試験，シングルチャンバー法による透気試験，ダブルチャンバー法のトレントの提案した透気試験の3種類とした。コンクリートは，水セメント比を 50，60，80%，乾燥開始材齢を 1，3，7，28 日としたものを使用した。

表 3.5 実験の要因と水準

実験の要因	水準
試験方法	簡易透気試験（削孔法） シングルチャンバー法の透気試験（シングルチャンバー法） トレントの提案した透気試験（ダブルチャンバー法）
水セメント比	50，60，80%
乾燥開始材齢	1，3，5，7，28 日

#### (2) コンクリートの使用材料，調合および性状

表 3.6 に使用材料を，表 3.7 に，コンクリートの調合を示す。本実験で使用したコンクリートは，水セメント比 50，60，80%の3種類とした。表 3.7 に圧縮強度を併記した。

表 3.6 使用材料

使用材料	使用材料の種類および品質
水	つくば市水道水（密度 1.00g/cm <sup>3</sup> ）
セメント	普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm <sup>3</sup> ）
細骨材	S1:つくば市産川砂（表乾密度 2.50g/cm <sup>3</sup> ） S2:つくば市産砕砂（表乾密度 2.59g/cm <sup>3</sup> ）
粗骨材	つくば市産碎石（表乾密度 2.66g/cm <sup>3</sup> ）
混和剤	Ad1:P 社製 AE 減水剤（4 倍希釈液），Ad2:P 社製 AE 助剤（100 倍希釈）

表 3.7 コンクリートの調合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							スランプ <sup>o</sup> (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
		水	セメント	細骨材		粗骨材	混和剤				
				S1	S2		Ad1	Ad2			
50	45.0	185	370	184	570	955	3.70	1.11	19.5	5.8	34.5
60	46.6	185	308	196	608	955	3.08	0.93	17.0	5.0	29.6
80	50.0	195	244	213	663	908	2.44	0.61	21.0	5.0	18.5

## (3) コンクリートの作製および養生，試験材齢

試験体は，寸法を 500×500×150mm とし，500×500mm の面を試験面として使用した。試験面以外の 500×150mm 面は，乾燥しないようにエポキシ樹脂を塗布した。所定の乾燥開始材齢以降，温度 20℃，相対湿度 60%の恒温恒湿度室内で試験材齢の 3 ヶ月まで静置した。

## (4) 試験方法

## a. 簡易透気試験

簡易透気試験は，「2.3 ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法」に従い実施した。

## c. シングルチャンバー法による透気試験

シングルチャンバー法による透気試験は、図 3.8 に示すように湯浅らが提案した<sup>6)</sup>、内径 85mm、容積 167cm<sup>3</sup>のデシケータの蓋をゴム製のパッドとパッキング材によりコンクリート表面に取り付けを行った。測定は，真空ポンプを用いてデシケータの蓋の内部を減圧した後，コンクリート表面からの空気の流入により真空度が  $X_1$  (kPa) から  $X_2$  (kPa) に低下する時間(T)を計測した。 $X_1$ および  $X_2$ は， $X_1$ を 21.3 (kPa)， $X_2$ を 25.3 (kPa) (真空度の低下時間が 10 秒以下の場合には， $X_1$ を 13.3 (kPa)， $X_2$ を 33.3 (kPa) )として測定した。

シングルチャンバー法による透気速度  $K_s$  は，(3.2)式により求めた。1 回目を除いた 2 回目以降の 3 回の平均より求め，当該位置の測定値とする。

$$K_s = \frac{X_2 - X_1}{T} \quad \dots (3.2)$$

ここに， $K_s$  : シングルチャンバー法による透気速度 (kPa/s)

$X_1$  : 時間測定開始時の真空度 (kPa)

$X_2$  : 時間測定終了時の真空度 (kPa)

T : 真空度の低下時間 (s)

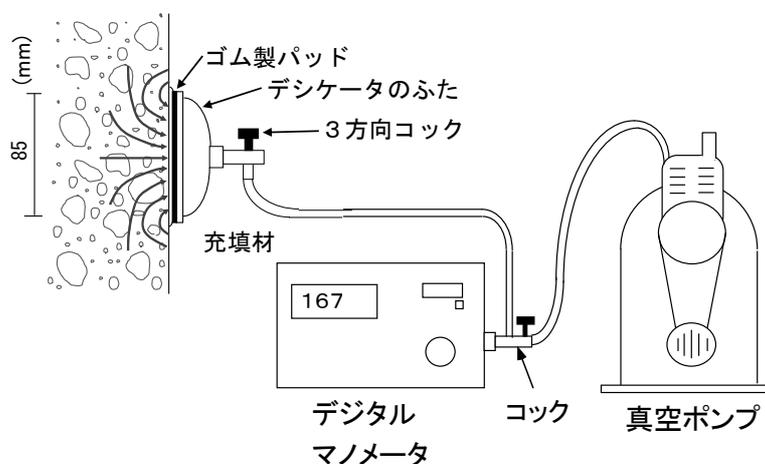


図 3.8 シングルチャンバー法による透気試験装置

c. トレントの提案した透気試験

図 3.9 に、トレントの提案した透気試験の概念図を示す。市販の装置によりコンクリート表面に減圧したチャンバー（内部チャンバーと外部チャンバーの2つのチャンバーを有する）を設置し、その内部チャンバーの気圧変化から透気係数を算出した（以下本論文では、トレント法による透気係数とする）。内部チャンバーの気圧上昇の測定値からトレント法による透気係数  $K_t$  を算出するには、コンクリートを均質体と仮定し、透気試験において気圧変化を生じる影響領域が時間とともに深部へ拡大するといったモデル化がなされている。これに圧縮性流体の一次元流れを表す Hagen-Poiseuille 式を適用し、(3.3)式によりトレント法による透気係数を算出した<sup>3)</sup>。

$$T = \left[ \frac{V_c}{A} \right]^2 \frac{\mu}{2\varepsilon P_a} \left[ \frac{\ln \frac{P_a + \Delta P_{ieff}(t_f)}{P_a - \Delta P_{ieff}(t_f)}}{\sqrt{t_f} - \sqrt{t_0}} \right]^2 \dots (3.3)$$

- ここに、 $k_T$  : トレント法による透気係数 ( $m^2$ )
- $V_c$  : 内部セルシステムの容積 ( $m^3$ )
- $A$  : 内部セルの断面積 ( $m^2$ )
- $\mu$  : 空気の粘性係数 ( $=2.0 \times 10^{-5} N \cdot s / m^2$ )
- $P_a$  : 大気圧 ( $N / m^2$ )
- $\Delta P_{ieff}$  : 試験終了時内部セルの有効圧力上昇 ( $N / m^2$ )
- $t_f$  : 試験終了時間 (s)
- $t_0$  : 試験開始時間 (s) ( $=60s$ )

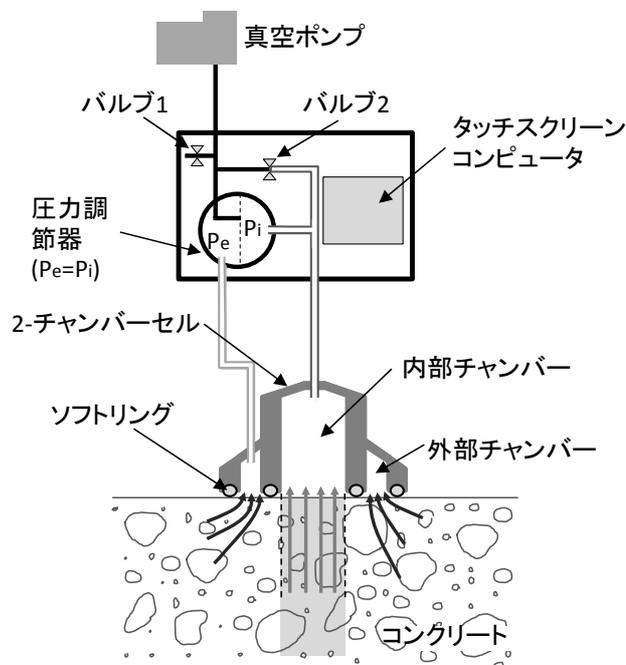


図 3.9 トレントの提案した透気試験の概念図

### 3.4.2 実験結果および考察

#### (1) 簡易法による透気試験の結果

図 3.10 に、水セメント比と簡易透気速度の関係を示す。簡易透気速度は、水セメントの増加に伴い大きくなった。乾燥開始材齢の影響は、水セメント比が 60%、80%では乾燥開始材齢が早いほど簡易透気速度は大きくなったが、水セメント比 50%ではその差は小さく、一部で順番が異なるものも認められた。これは、水セメント比 50%のコンクリートでは 3 日、5 日、7 日の養生の差が小さかったためと考えられる。

図 3.11 に、水セメント比とシングルチャンバー法による透気速度の関係を示す。シングルチャンバー法による透気速度は、水セメント比の増加に伴い大きくなった。乾燥開始材齢の影響は、水セメント比 80%では乾燥開始材齢が早いほど簡易透気速度は大きくなったが、水セメント比が小さくなるにつれて、その差は小さく、順番も入れ替わるものがあった。これは、シングルチャンバー法による透気試験のばらつきが大きいためと考えられる。

図 3.12 に、水セメント比とトレント法による透気係数の関係を示す。トレント法による透気係数は、水セメント比の増加に伴い大きくなるが、その影響は乾燥開始材齢が早いほど顕著であった。特に乾燥開始材齢 28 日では、水セメント比の影響がわずかであったのは特筆すべきであった。乾燥開始材齢の影響は、水セメント比 80%では乾燥開始材齢が遅くなるほど簡易透気速度は大きくなったが、水セメント比 60%では、1 日と 28 日の差はあるものの、その間の差は小さく、水セメント比 50%ではその差はほぼ認められなかった。

乾燥開始材齢 28 日の結果に対する乾燥開始材齢 1 日の倍率は、水セメント比 50%で簡易透気速度が 1.7 倍、トレント法による透気係数が 1.4 倍、シングルチャンバー法による透気速度が 0.4 倍となり、水セメント比 60%で簡易透気速度が 1.5 倍、トレント法による透気係数が 9.2 倍、シングルチャンバー法による透気速度が 1.2 倍、水セメント比 80%で簡易透気速度が 3.9 倍、トレント法による透気係数が 23.8 倍、シングルチャンバー法による透気速度が 2.3 倍となり、トレント法による透気係数の乾燥開始材齢による影響が大きいことが確認された。水セメント比 50%、60%において乾燥開始材齢の影響がシングルチャンバー法による透気速度、トレント法による透気係数でその影響が小さかった。

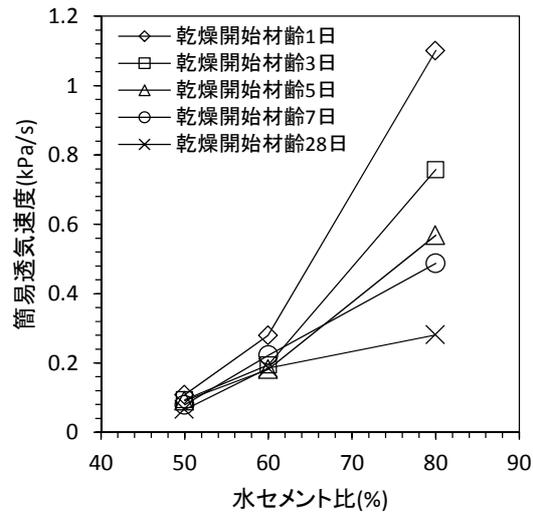


図 3.10 水セメント比と簡易透気速度の関係

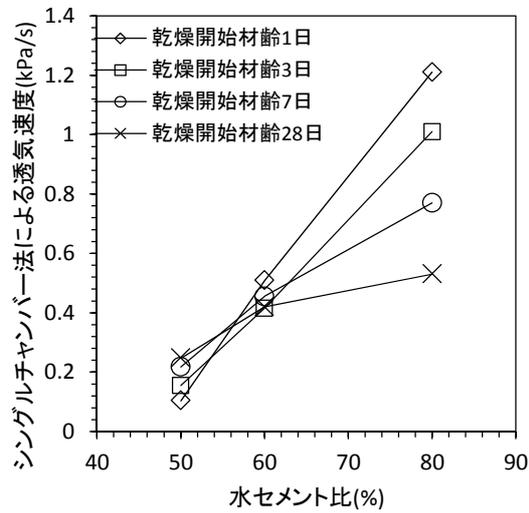


図 3.11 水セメント比とシングルチャンバー法による透気速度の関係

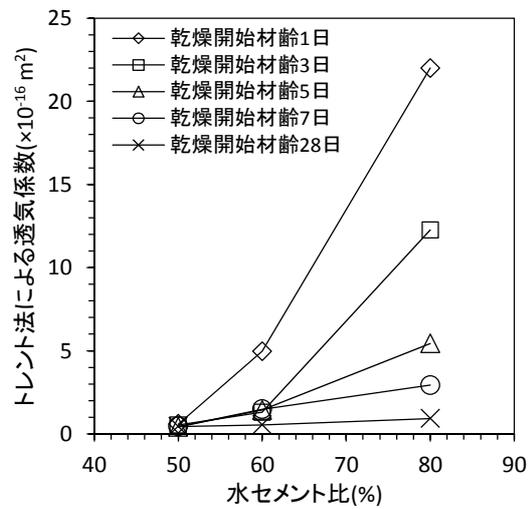


図 3.12 水セメント比とトレント法による透気係数の関係

(2) 各種透気試験結果の相互関係

図 3.13 に、簡易透気速度とシングルチャンバー法による透気速度の関係を示す。簡易透気速度とシングルチャンバー法による透気速度の関係を見ると、簡易透気速度が 0.2kPa/s までの小さい範囲では、シングルチャンバー法による透気速度の変化量が大きい。0.2kPa/s 以上では、その変化量は小さくなったが、簡易透気速度とシングルチャンバー法による透気速度との関係は明確であったといえる。

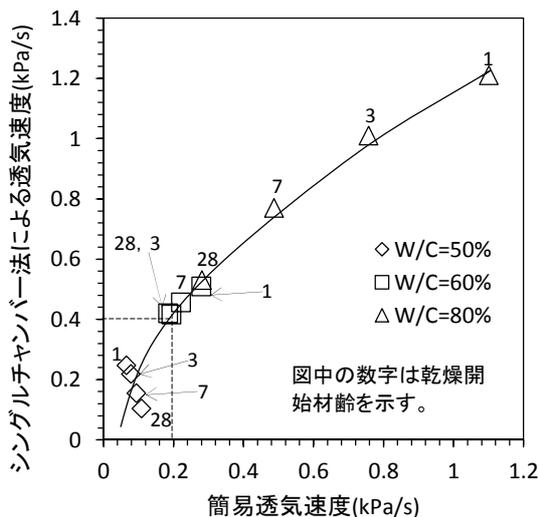


図 3.13 簡易透気速度とシングルチャンバー法による透気速度の関係

図 3.14 に、簡易透気速度とトレント法による透気係数の関係を示す。簡易透気速度とトレント法による透気係数の関係を見ると、簡易透気速度が 0.5kPa/s までは、簡易透気速度の変化量に対し、トレント法による透気係数の変化量は少なかった。しかし、簡易透気速度 0.5kPa/s 以上では、トレント法による透気係数の変化量が大きくなり、0.5kPa/s 以下の時の 8 倍の変化量となっており、相互の対応が明確であった。

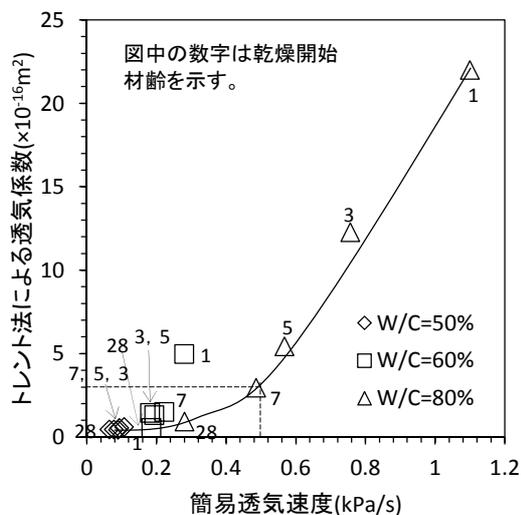


図 3.14 簡易透気速度とトレント法による透気係数の関係

図 3.15 に、トレント法による透気係数とシングルチャンバー法による透気速度の関係を示す。トレント法による透気係数とシングルチャンバー法による透気速度の関係をみると、トレント法による透気係数  $2 \times 10^{-16} \text{m}^2$  以下では、トレント法による透気係数の変化量に比し、シングルチャンバー法による透気速度の変化量は極めて大きい。 $2 \times 10^{-16} \text{m}^2$  以上では、シングルチャンバー法による透気速度の変化は小さくなり、相互の対応は明確であった。

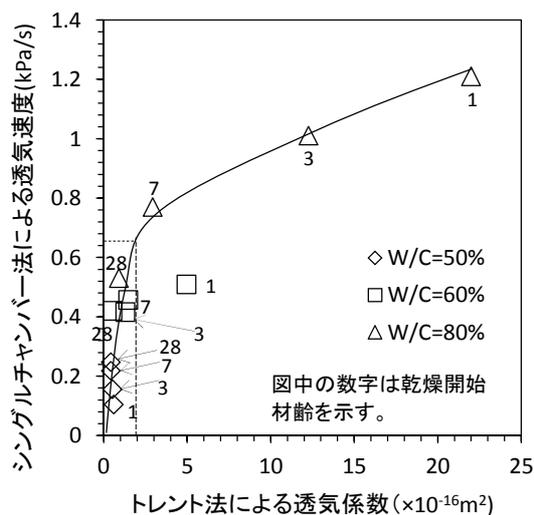


図 3.15 トレント法による透気係数とシングルチャンバー法による透気速度の関係

簡易透気速度，トレント法による透気係数，シングルチャンバー法による透気速度の関係は，それぞれ1本の曲線で示すことができたが，本実験の範囲で相互の互換が可能と思えるのは表 3.8 の通りであった。本節では3種類の透気試験を行ったが，各試験で異なる結果が得られた。これは，各試験における測定範囲やばらつきによるものと考えられるが，一概にどの試験が良いと言うことはない。そこで，試験をする際には，測定対象に応じた試験を選定する必要があると考えられる。

表 3.8 互換先に互換可能な互換元の最低値

互換元 \ 互換先	簡易透気速度	トレント法による透気係数	シングルチャンバー法による透気速度
簡易透気速度		0.5kPa/s	0.2kPa/s
トレント法による透気係数	$3 \times 10^{-16} \text{m}^2$		$2 \times 10^{-16} \text{m}^2$
シングルチャンバー法による透気速度	0.4kPa/s	0.68kPa/s	

### 3.5 本章のまとめ

本章で得られた結果をまとめると以下の通りである。

- (1)  $\phi$  100mm のコア供試体による透気係数と簡易透気速度の関係を示し、 $\phi$  100mm のコア供試体による透気係数の増加に伴い、簡易透気速度も増加する傾向にあることを示した。
- (2) どの試験方法によっても透気性の指標値は、水セメント比の増加に伴い大きくなった。また、どの試験方法によっても、水セメント比 80%では乾燥開始材齢が早いほどそれらの値は大きくなったが、水セメント比が 60, 50%では、シングルチャンバー法による透気速度、トレント法による透気係数で乾燥開始材齢の影響が小さかった。
- (3) 各種透気試験指標値の相互関係は、それぞれ概ね 1 本の曲線で示すことができたが、透気性の低い範囲では互換が難しい。互換先に互換可能な互換元の最低値を示した。

### 参考文献

- 1) 野中英, 湯浅昇, 三谷和裕, 田中淳一:  $\phi$  100mm コア透気性と構造体コンクリートに適用可能な透気試験の比較, 日本建築学会学術講演概要集 A-1, pp.1167-1168, 2014
- 2) J.W.Figg: Methods of Measuring the Air and Water Permeability of Concrete; Magazine of Concrete Research, Vol.25, No.85, pp.213-218, 1973
- 3) 笠井芳夫, 松井勇, 湯浅昇, 野中英: ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法(その1)~(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp.669-702, 1999
- 4) 野中英, 湯浅昇: ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第700号, pp.689-696, 2014.6
- 5) R. J. Torrent: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air the concrete cover on site. Materials and Structures, vol.25, No.6, pp358-365, 1992
- 6) 国本正恵, 湯浅昇, 笠井芳夫, 松井勇: 構造体コンクリートのコールドジョイント評価方法の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp.433-434, 2000.9

## 第4章

# 簡易透気試験方法による構造体コンクリートの 中性化抵抗性評価

## 第4章 簡易透気試験方法による構造体コンクリートの中性化抵抗性評価

### 4.1 概要

コンクリートが中性化をすると、鋼材に腐食が生じひび割れ、かぶり部の剥離・剥落が生じる。そのため、コンクリートの中性化を抑制すること、中性化の進行速度を知ることは、耐久性を評価する上で重要である。コンクリートの透気性は中性化と高い相関があり、透気性と中性化の関係によりコンクリートの中性化抵抗性の評価をする試みが行われている<sup>1)~3)</sup>。一方で、その評価は中性化深さと透気性の指標値との関係を示すのみで、評価指標を示すには至っていない。そこで、簡易透気試験方法を展開するにあたり、中性化抵抗性を評価する指標値を示すことは重要と考える。

現行の2009年度版日本建築学会建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事<sup>4)</sup>（以下、JASS5 と略記）では、計画供用期間の級に応じた耐久設計強度が示されており、耐久性に関しては中性化により決定されている。そこで、計画供用期間の級を評価するため、促進試験による中性化深さ（以下、促進中性化深さとする）と簡易透気速度の関係により中性化抵抗性を評価が出来ると考えられる。検討にあたり、促進中性化深さと一般大気中の中性化深さの関係を求める必要があるが、これは1991年版「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）・同解説」に明確に示されている方法を用いることとした。

本章では、まず中性化抵抗性評価を行う材齢の検討を行った。次に、材齢3ヶ月で測定した簡易透気速度と促進期間26週の中性化深さの関係をセメントの種類毎に示した。そして、日本建築学会「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）・同解説」で示された、計画耐用年数と促進26週における中性化深さを求める考え方にに基づき、JASS5の「計画供用期間の級」毎に対応する促進期間26週の中性化深さを算出した。この算出した中性化深さを、使用したセメント種類毎に示した簡易透気速度と促進中性化深さの関係に対応させ、JASS5の「計画供用期間の級」に対応する簡易透気速度を求めた。

### 4.2 中性化抵抗性評価を行う場合の簡易透気試験材齢の検討

構造体コンクリートの中性化抵抗性評価を行う場合の簡易透気試験材齢は、コンクリートの打込み後28日で行う圧縮強度試験と同様に考えると、コンクリートの品質が安定した以降に実施するのが重要である<sup>5)</sup>。しかし、コンクリートの簡易透気速度は、一般的には材齢が経過するほど水和が進行し、含水率の変化も少なくなり安定している。簡易透気試験は、コンクリート打込み後比較的早い段階で試験を行うため、その材齢について検討する。検討は、簡易透気速度の材齢による違いおよび、測定材齢毎の簡易透気速度と促進中性化深さの関係より行った。

#### 4.2.1 実験概要

##### (1) 実験の要因と水準

表4.1に、実験の要因と水準を示す。実験の要因は、水セメント比、乾燥開始材齢、測定材齢とした。

表 4.1 実験の要因と水準

要因	水準
簡易透気試験材齢	1ヶ月, 3ヶ月, 6ヶ月
水セメント比	30%, 40%, 60%, 80%
乾燥開始材齢	1日, 3日, 7日, 28日

(2) 使用材料およびコンクリートの調合

表 4.2 および表 4.3 に、使用材料およびコンクリートの調合を示す。

表 4.2 使用材料

使用材料	使用材料の種類および品質
水	習志野市水道水 (密度 1.00g/cm <sup>3</sup> )
セメント	普通ポルトランドセメント(M社製, 密度 3.16g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	大井川系川砂 (表乾密度 2.62g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率 2.83)
粗骨材	大井川系川砂利 (表乾密度 2.66g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率 6.96)
混和剤	Ad1:P 社製 AE 減水剤 Ad2:P 社製高性能AE 減水剤 Ad3:P 社製 AE 助剤(100倍希釈)

表 4.3 コンクリートの調合

水セメント比 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤		
					Ad1	Ad2	Ad3
30	185	617	574	939	-	6.18	0.9
40	185	463	655	986	1.16	-	1.1
60	185	308	849	923	0.77	-	1.5
80	185	231	889	944	0.578	-	1.3

(3) 試験体の寸法

図 4.1 に、簡易透気試験および促進中性化試験の試験体概念図を示す。簡易透気試験用試験体の寸法は、150×150×200mm、促進中性化試験用試験体の寸法は、100×100×200mm とし、150×150mm および 100×100mm の面を乾燥面・試験面とした。

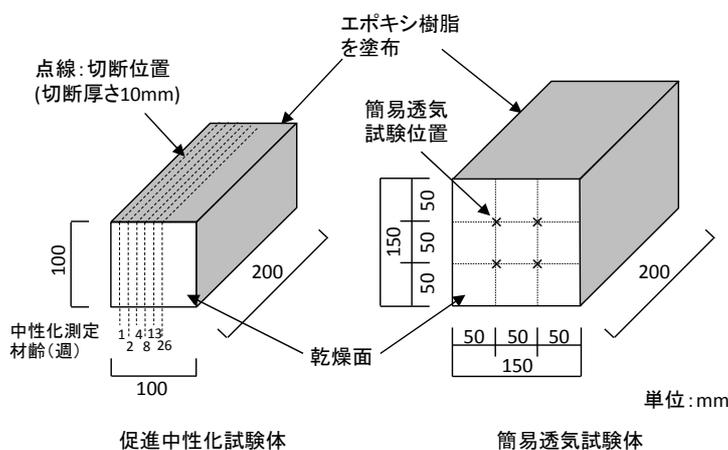


図 4.1 試験体概念図

## (4)養生（乾燥）条件

図 4.2 に、コンクリートの養生条件を示す。試験体は、コンクリート打込み後材齢 1 日で脱型し、150×150mm および 100×100mm の乾燥面 2 面はビニールを用いて封緘し、乾燥面以外の 4 面は乾燥を防ぐためエポキシ樹脂を塗布した。養生は、温度 20℃、相対湿度 60%の恒温恒湿室内で行い、所定の乾燥開始材齢でビニールを取り外し、乾燥を開始させた。

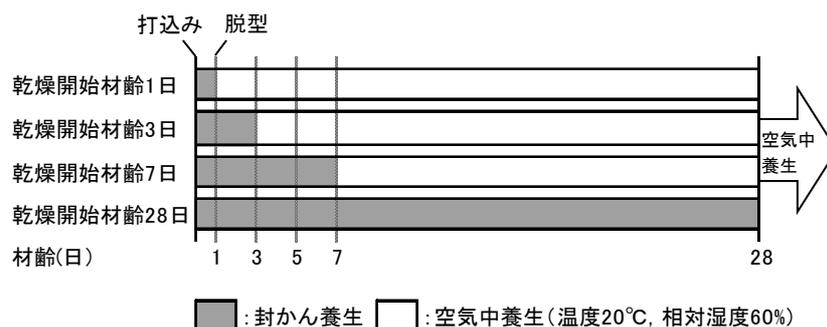


図 4.2 コンクリートの養生条件

## (5)試験方法

## a. 簡易透気試験

簡易透気試験は、「2.3 ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法」に従い実施した。

## b. 促進中性化試験

促進中性化試験は、材齢 28 日まで養生後、文献<sup>6)</sup>に準じて試験体を温度 20℃、相対湿度 60%、炭酸ガス濃度 5%の促進中性化試験槽の中に入れ、26 週経過時に中性化深さの測定を行った。中性化深さの測定は、試験体を乾式コンクリートカッターを用いて、図 4.1 に示すように乾燥面に垂直に厚さ 10mm に切断し、表面のコンクリート粉を除去した後に、1%フェノールフタレインアルコール溶液を噴霧して行った。中性化深さは、赤紫色に呈色しない部分を開放面両面から 5 点ずつ測定し、計 10 点の平均した値とした。

### 4.2.2 実験結果および考察

#### (1) 測定材齢と簡易透気速度の関係

第2章の図2.18の乾燥開始材齢1日の結果に乾燥開始材齢3日, 7日, 28日の結果を追加したものを図4.3に示す。材齢の経過に伴う乾燥により簡易透気速度は大きくなるが, その増加量は材齢1ヶ月と3ヶ月の間と比し, 材齢3ヶ月と6ヶ月の間では小さかった。これは, 材齢の経過に伴いコンクリートの品質が安定していると言える。また, 乾燥開始材齢1日に比し28日の結果の方がその傾向は顕著であった。

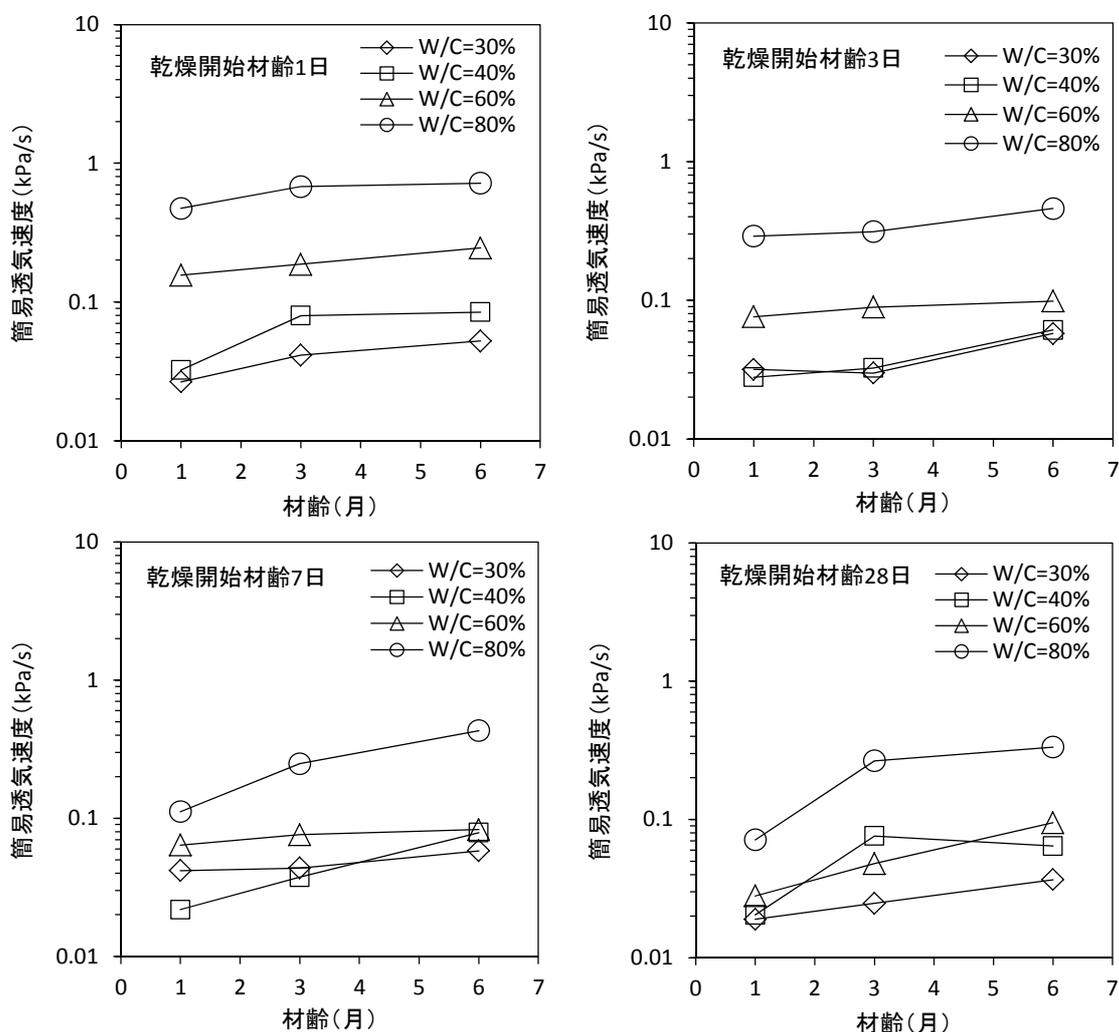


図4.3 測定材齢と簡易透気速度の関係

(2) 簡易透気速度と促進中性化深さの関係

図 4.4 に、測定材齢毎の簡易透気速度と促進中性化深さの関係を示す。水セメント比，乾燥開始材齢を変えて作製したコンクリート試験体において，簡易透気試験方法で得られた簡易透気速度と促進中性化深さの関係は，概ね一本の傾向線上にのることがわかった。簡易透気試験方法を行う時期は，試験時期が遅くなるほど，簡易透気速度－中性化深さ曲線の勾配が緩やかになり，中性化深さの予測には有利であるものの，実施の簡便さや早期の判定が望ましいことを考えると，コンクリート材齢で3ヶ月とした。

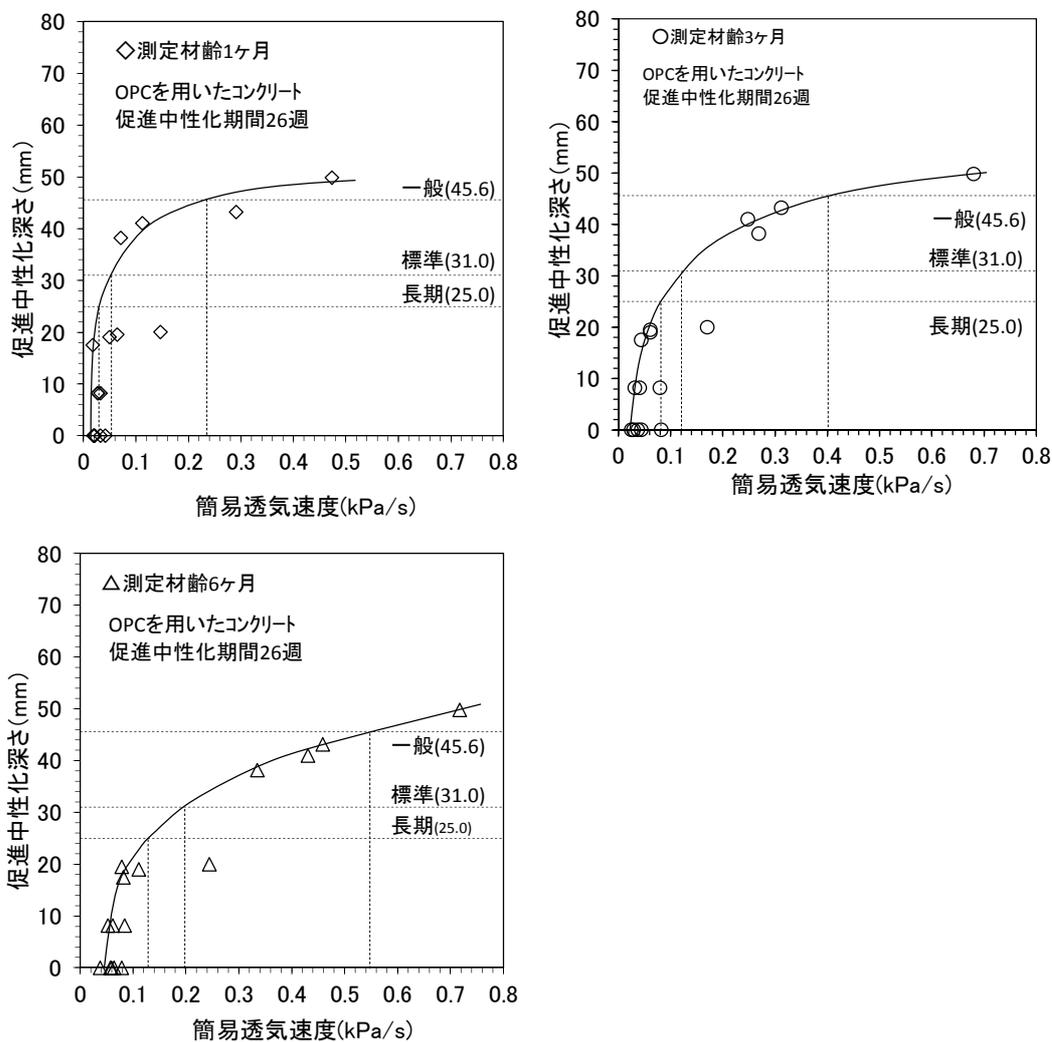


図 4.4 測定材齢毎の簡易透気速度と促進中性化深さの関係

### 4.3 調合、養生の異なるコンクリートの促進中性化深さ、簡易透気速度

簡易透気試験方法による、中性化抵抗性の評価を構築するため、水セメント比、セメントの種類および乾燥開始材齢を要因としてコンクリートを作製し、促進中性化深さと簡易透気速度をそれぞれ検討した。

#### 4.3.1 実験概要

##### (1) 実験の要因と水準

表 4.4 に、実験の要因と水準を示す。

水セメント比を検討する実験では、普通ポルトランドセメント (OPC)、高炉セメント B 種 (SCB) を用いて、水セメント比を 30%、40%、60%、80% のコンクリートを作製した。

セメントの種類を検討する実験では、普通ポルトランドセメント (OPC)、早強ポルトランドセメント (HPC)、中庸熱ポルトランドセメント (MPC)、高炉セメント B 種 (SCB)、フライアッシュセメント B 種 (FCB) を用いて、水セメント比 60% のコンクリートを作製した。

なお、全ての材料・調合で、型枠などを取り外し、乾燥面を気中に開放する材齢（以下、乾燥開始材齢とする）を、1 日、3 日、7 日、28 日とした。

表 4.4 実験の要因と水準

要因	水準
水セメント比	30%, 40%, 60%, 80%
セメントの種類	普通ポルトランドセメント 早強ポルトランドセメント 中庸熱ポルトランドセメント 高炉セメント B 種 フライアッシュセメント B 種
乾燥開始材齢	1 日, 3 日, 7 日, 28 日

##### (2) 使用材料およびコンクリートの調合

使用材料およびコンクリートの調合は、それぞれ表 4.5 および表 4.6 に示す。

表 4.5 使用材料

使用材料	使用材料の種類および品質
水	習志野市水道水 (密度 1.00g/cm <sup>3</sup> )
セメント	OPC: 普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm <sup>3</sup> ) HPC: 早強ポルトランドセメント (密度 3.14g/cm <sup>3</sup> ) MPC: 中庸熱ポルトランドセメント (密度 3.21g/cm <sup>3</sup> ) SCB: 高炉セメント B 種 (密度 3.04g/cm <sup>3</sup> ) (高炉スラグの分量 43wt%) FCB: フライアッシュセメント B 種 (密度 2.97g/cm <sup>3</sup> ) (フライアッシュの分量 17wt%)
細骨材	大井川系川砂 (表乾密度 2.62g/cm <sup>3</sup> )
粗骨材	大井川系川砂利 (表乾密度 2.66g/cm <sup>3</sup> )
混和剤	Ad1: P 社製 AE 減水剤 Ad2: P 社製高性能 AE 減水剤 Ad3: P 社製 AE 助剤 (100 倍希釈)

表 4.6 コンクリートの調合

シリーズ	水セメント比 (%)	セメントの種類	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
			水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤		
							Ad1	Ad2	Ad3
シリーズ 1 (水セメント比)	30	OPC	185	617	574	939	—	6.180	0.900
	40		185	463	655	986	1.160	—	1.100
	60		185	308	849	923	0.770	—	1.500
	80		185	231	889	944	0.578	—	1.300
	30	SCB	183	601	629	874	—	6.100	3.400
	40		183	458	652	985	2.290	—	5.067
	60		183	305	849	849	0.763	—	6.933
	80		183	229	912	921	0.573	—	4.400
シリーズ 2 (セメントの種類)	60	HPC	185	308	849	923	0.770	—	1.750
		MPC	186	310	849	923	0.770	—	1.575
		SCB	183	305	849	923	0.770	—	2.500
		FCB	181	302	849	923	0.770	—	2.667

## (3) 試験体の寸法

簡易透気試験用試験体の寸法は、150×150×200mm、促進中性化試験用試験体の寸法は、100×100×200mm とし、150×150mm および 100×100mm の面を乾燥面・試験面とした。簡易透気試験および促進中性化試験の試験体概念図は、図 4.1 に示す。

## (4) 養生（乾燥）条件

150×150mm および 100×100mm の乾燥面 2 面はビニールを用いて封緘し、乾燥面以外の 4 面は乾燥を防ぐためエポキシ樹脂を塗布した。養生は、温度 20℃、相対湿度 60%の恒温恒湿室内で行い、所定の乾燥開始材齢でビニールを取り外し、乾燥を開始させた。

## (5) 試験方法

試験方法は、「4.2.1 (5) a. 簡易透気試験」「4.2.1 (5) b. 促進中性化試験」に従い実施した。

### 4.3.2 実験結果および考察

#### (1) 促進中性化深さ

図 4.5 に、乾燥開始材齢と促進期間 26 週における中性化深さの関係を示す。a) 普通ポルトランドセメントを用いた場合、b) 高炉セメント B 種を用いた場合の結果をみると、水セメント比が小さいほど、乾燥開始材齢が遅いほど促進中性化深さが小さいことが確認できた。今回の水準設定の範囲では、乾燥開始材齢よりも水セメント比の影響が大きかった。

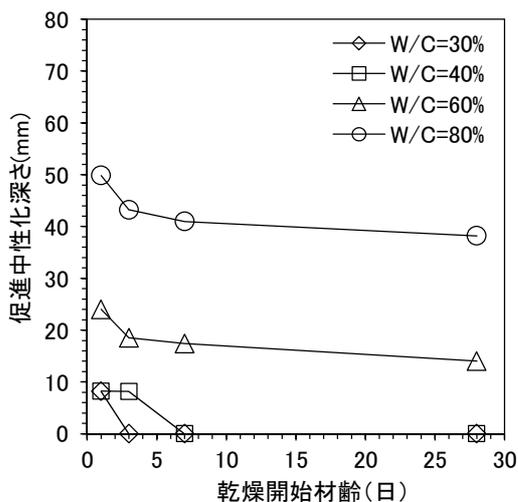
c) 各種セメントを用いたコンクリート(W/C=60%)の乾燥開始材齢と促進中性化深さの関係をみると、水和の早い早強ポルトランドセメント(HPC)を用いたコンクリートの促進中性化深さは、普通ポルトランドセメント(OPC)と比し小さいことが確認できた。セメント中のアルカリ分が少なく、また、水和が遅い高炉セメント B 種(SCB)、フライアッシュセメント B 種(FCB)の促進中性化深さは大きいことが確認できた。水和の遅い中庸熟ポルトランドセメント(MPC)を用いたコンクリートは、普通ポルトランドセメント(OPC)を用いたコンクリートと比し、促進中性化深さが若干大きかった。

#### (2) 簡易透気速度

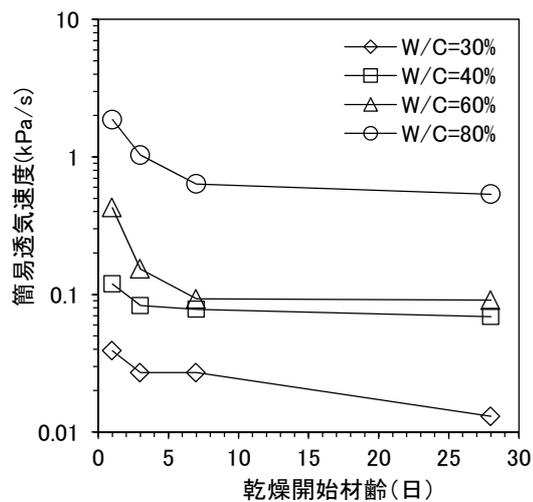
図 4.6 に、乾燥開始材齢と簡易透気速度(測定材齢 3 ヶ月)の関係を示す。図 4.5 a) b) と図 4.6 a) b) を比較すると、簡易透気速度で促進中性化を一律に評価出来ないことがわかる。すなわち、同程度の簡易透気速度が測定されたとしても、高炉セメント B 種(SCB)を用いたコンクリートは、普通ポルトランドセメント(OPC)を用いたコンクリートに比し中性化深さが大きい。これは、簡易透気速度では、コンクリートの緻密さに密接な関係があるのに対し、中性化の進行では、緻密さと  $\text{Ca(OH)}_2$  の量がともに重大な影響を与えるからだといえる。

図 4.5 c)、図 4.6 c) をみても、使用したセメントによる中性化の順序と、簡易透気速度の順序は入れ違っていることが明らかであることがわかる。

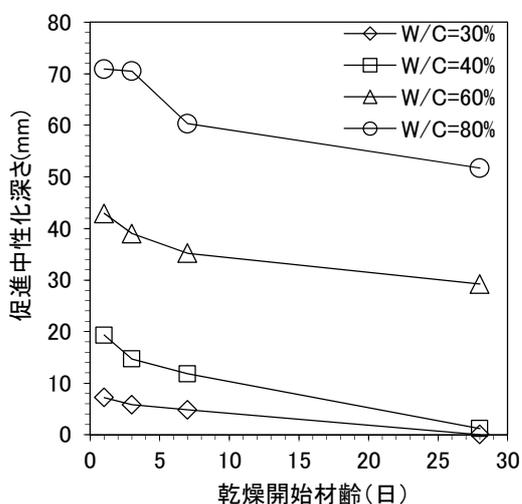
以上の結果から、文献<sup>5)</sup>では、普通ポルトランドセメント(OPC)を用いた範囲において、その水セメント比、乾燥開始材齢によらず、簡易透気速度から促進中性化深さの評価が可能とされていたが、使用するセメントの種類により、簡易透気速度と促進中性化深さの関係は異なることが明らかとなった。



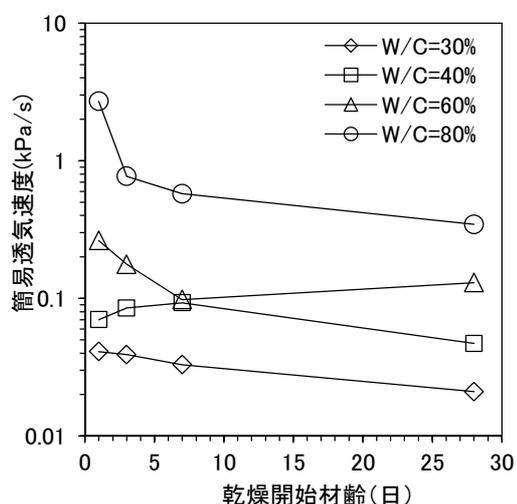
a) 普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート



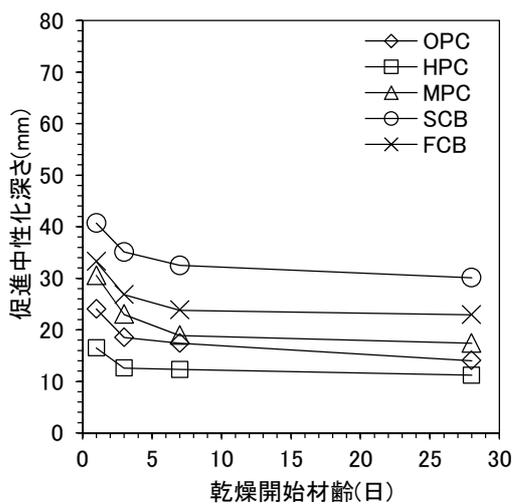
a) 普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート



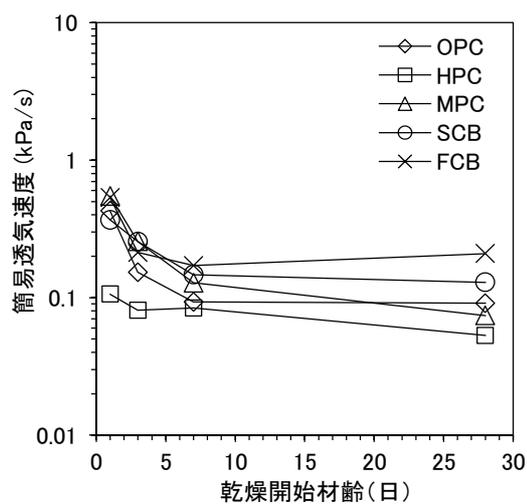
b) 高炉セメントB種を用いたコンクリート



b) 高炉セメントB種を用いたコンクリート



c) 各種セメントを用いたコンクリート(W/C=60%)



c) 各種セメントを用いたコンクリート(W/C=60%)

図 4.5 乾燥開始材齢と中性化深さの関係 (促進期間 26 週)

図 4.6 乾燥開始材齢と簡易透気速度の関係 (測定材齢 3 ヶ月)

#### 4.4 簡易透気試験方法による構造体コンクリートの中性化抵抗性評価

非（微）破壊試験である簡易透気試験方法によりコンクリート打込み後早期に、簡易に中性化抵抗性を評価することを目的として、簡易透気速度と中性化深さの関係から JASS5 に示されている「計画供用期間」の級を評価することを検討する。計画供用期間の級と中性化抵抗性の関係については、現行の JASS5 では、鉄筋の腐食確率の議論<sup>12)</sup>を踏まえて展開されているものの、そこで重要な中性化のばらつき、かぶり厚さのばらつき等の考え方を追認することは困難である。そこで、ここでは、1991年版高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）・同解説<sup>6)</sup>で明解に示された考え方により、計画供用期間の級に対応する促進中性化 26 週の中性化深さを求めることとする。

##### 4.4.1 JASS5 の計画供用期間の級に対応する促進中性化深さの算出

###### (1) JASS5 における計画供用期間の級および最小かぶり厚さ

JASS5 では、一般的な劣化作用に対して計画供用期間中は、構造体に鉄筋腐食やコンクリートの重大な劣化が生じないこととしている。計画供用期間の級は、次の 4 水準としている。

- ①短期（計画供用期間としておよそ 30 年）
- ②標準（計画供用期間としておよそ 65 年）
- ③長期（計画供用期間としておよそ 100 年）
- ④超長期（計画供用期間としておよそ 200 年）

JASS5 における「一般的な劣化作用を受ける場合の計画供用期間」とは、中性化による劣化抵抗性に基づく計画供用期間を示している。1991年版「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）・同解説」では、計画耐用年数 100 年を例に、中性化のばらつき、かぶり厚さのばらつきを考慮せずに、単に、計画耐用年数で中性化が鉄筋が発錆し始める深さまで到達していないかを判断し、対応する促進期間 26 週の中性化深さを求めている。

対象となる柱・梁・耐力壁における最小かぶり厚さは、JASS5 によれば表 4.7 に示す通りである。

表 4.7 JASS5 における最小かぶり厚さ(柱・梁・耐力壁・仕上げなし)

短期	標準・長期		超長期	
	屋内	屋外	屋内	屋外
30	30	40	30	40

###### (2) 促進中性化期間と一般大気中の中性化期間の関係

「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）・同解説」において、高耐久性鉄筋コンクリート造建築物の耐久性に関する目標品質を定めるにあたり、促進中性化の結果と一般大気中における中性化により、劣化が発生すると予想される期間の関係を検討している。

炭酸ガス濃度を 5% として行った促進中性化試験では、この試験によって得られた中性化深さと一般大気中の中性化深さの関係をまとめると、大気中での中性化深さ  $C$  は(4.1)式で表される

$$C=A\sqrt{\frac{CO_2}{5}}\times\sqrt{t} \quad \dots (4.1)$$

ここに、  
 C : 中性化深さ (mm)  
 CO<sub>2</sub> : 炭酸ガス濃度 (%)  
 A : 定数 (促進中性化試験による定数: mm/√週)  
 t : 材齢 (週)

式(4.1)から(4.2)式が得られる。

$$t=\frac{5}{CO_2\times A^2}\times C^2 \quad \dots (4.2)$$

空気中の二酸化炭素濃度について、現在の「鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針(案)・同解説」<sup>7)</sup>では、その測定値がない場合には、屋外では 500ppm(0.05%)、屋内では 2000ppm(0.2%)として耐久設計を行うものとしている。これに基づくと、大気中屋外では(4.3)式、大気中屋内では(4.4)式となり、炭酸ガス濃度 5%の促進中性化試験が大気中屋外の 100 倍、大気中屋内の 25 倍の期間に相当する。

$$t=\frac{100}{A^2}\times C^2 \quad \dots (4.3)$$

$$t=\frac{25}{A^2}\times C^2 \quad \dots (4.4)$$

### (3) JASS5 の計画供用期間の級に対応する促進中性化深さの算出

ここでは、JASS5 の計画供用期間の級に対応する大気中屋内・屋外の鉄筋が発錆し始める促進期間 26 週の中性化深さを算出する。

例として、(4.3)式および(4.4)式より、計画供用期間の級「長期」である材齢 100 年 (52×100 週) について以下で検討する。

大気中屋外では、中性化深さが屋外の最小かぶり厚さ 40mm に達するとすると、(4.3)式より計画供用期間の長期に対応する中性化速度係数 A (mm/√週) は(4.5)式となる。

$$A=\sqrt{\frac{100}{t}}\times C=\sqrt{\frac{100}{52\times 100}}\times 40=5.55 \quad (\text{mm}/\sqrt{\text{週}}) \quad \dots (4.5)$$

本実験に対応する促進期間 26 週の中性化深さ C (mm) は、得られた A の値を用いて(4.6)式により求められる。

$$C = 5.55 \times \sqrt{26} = 28.3 \quad (\text{mm}) \quad \dots (4.6)$$

高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説の解説記述に従えば、鉄筋が発錆し始めるのは過去の調査結果より、大気中屋内では、屋外と比し炭酸ガス濃度は高いものの湿度は低く乾燥しているため、屋内の部位の鉄筋が発錆し始めるのが、鉄筋の裏側まで中性化が進んだ頃であることから、屋内の最小かぶり厚さに中性化しても鉄筋に有害な腐食が生じない領域 20mm を加えた場合としている<sup>8)</sup>。これに従い、大気中屋内では、中性化深さが屋内の最小かぶり厚さ 30mm に 20mm を加えた 50mm に達するとすると、(4.4) 式より計画供用期間の長期に対応する中性化速度係数  $A(\text{mm}/\sqrt{\text{週}})$  は(4.7)式となる。

$$A = \sqrt{\frac{25}{t}} \times C = \sqrt{\frac{25}{52 \times 100}} \times 50 = 3.47 \quad (\text{mm}/\sqrt{\text{週}}) \quad \dots (4.7)$$

本実験における促進期間 26 週の中性化深さ  $C$  は、得られた  $A$  の値を用いて(4.8)式により求められる。

$$C = 3.47 \times \sqrt{26} = 17.7 \quad (\text{mm}) \quad \dots (4.8)$$

以上の結果から、計画供用期間の級「長期」では、大気中材齢 100 年において、屋外で 40mm、屋内で 50mm の中性化深さとなる場合、相当する炭酸ガス濃度 5% による促進 26 週の中性化深さが、それぞれ 28.3mm、17.7mm となり、双方を満足する値として、計画供用期間の級に対応する促進 26 週の中性化深さは 17.7mm と算出された。

表 4.8 は、短期(30 年)、標準(65 年)、および超長期(200 年)についても同様の検討を行い、それぞれの計画供用期間の級に対応する促進中性化深さを算出したものである。

表 4.8 JASS5 の計画供用期間に対応する炭酸ガス濃度 5% の促進 26 週の中性化深さ

計画供用期間の級		対象	最小かぶり厚さ(mm)	鉄筋が発錆し始める中性化深さ(mm)*	計画供用期間に対応する中性化速度係数(mm/√週)	対応する促進期間 26 週の中性化深さ(mm)	計画供用期間に対応する促進 26 週の中性化深さ(mm)
区分	期間(年)						
短期	30	屋外	30	30	7.60	38.7	32.3
		屋内	30	50	6.33	32.3	
標準	65	屋外	40	40	6.88	35.1	21.9
		屋内	30	50	4.30	21.9	
長期	100	屋外	40	40	5.55	28.3	17.7
		屋内	30	50	3.47	17.7	
超長期	200	屋外	40	40	3.92	20.0	12.5
		屋内	30	50	2.45	12.5	

\*鉄筋が発錆し始めるときの中性化深さは、大気中屋外では鉄筋の最小かぶり厚さ、大気中屋内では鉄筋の最小かぶり厚さに 20mm を加えた値

## 4.4.2 簡易透気速度と促進期間 26 週の中性化深さ、JASS5 における計画供用期間の級との関係

図 4.7 に、材齢 3 ヶ月で測定した簡易透気速度と促進（炭酸ガス濃度 5%）期間 26 週の中性化深さの関係をセメントの種類毎に示した。図 4.7 で示した近似線・近似式では、中性化が 0mm の場合に透気性と中性化の関係が明確でないため、中性化が 0mm の結果を除外している。簡易透気速度と促進中性化深さの関係は、どのセメントを使用したコンクリートでも、それぞれ相関が高いといえる。簡易透気試験方法によって中性化抵抗性を評価出来ると考えられる。

表 4.9 は、現行 JASS5 における計画供用期間の級に対応する簡易透気速度（材齢 3 ヶ月）を示したものである。簡易透気速度と促進中性化深さの関係の間にばらつきがあるが、非（微）破壊試験を用いてコンクリート打込み後早期に行う簡易な評価方法であることを考慮し、表 4.9 に示す簡易透気速度は、ある程度のばらつきを有した目安の値として提案するものである。

図 4.7 に、JASS5 の計画供用期間の級に対応する促進期間 26 週の中性化深さを併記した。普通ポルトランドセメント(OPC)、高炉セメント B 種(SCB)を用いたコンクリートでは、今回の実験の範囲内で計画供用期間の級「短期」、「標準」、「長期」、「超長期」を評価できることがわかった。

早強ポルトランドセメント(HPC)を用いる場合については、「長期」、「超長期」を評価することしかできず、「短期」、「標準」を評価可能とするためには、水セメント比を大きくした設定により検討が必要である。

一方、中庸熟ポルトランドセメント(MPC)を用いる場合については、「短期」、「標準」、「長期」、フライアッシュセメント B 種(FCB)を用いる場合については、「短期」、「標準」の評価が可能であったが、「超長期」までを評価するためには、水セメント比を小さくした設定により検討が必要である。

表 4.9 JASS5(2009 年度版)における計画供用期間の級に対応する材齢 3 ヶ月における簡易透気速度

JASS5 における 計画供用期間の級		(1)短期 (30 年)	(2)標準 (65 年)	(3)長期 (100 年)	(4)超長期 (200 年)
対応する促進期間 26 週の中性化 深さ(mm)		32.3 以下	21.9 以下	17.7 以下	12.5 以下
簡易透気速度* (kPa/s)	OPC	0.45 以下	0.19 以下	0.13 以下	0.09 以下
	HPC	—	—	0.14 以下	0.07 以下
	MPC	0.85 以下	0.18 以下	0.08 以下	—
	SCB	0.16 以下	0.09 以下	0.07 以下	0.05 以下
	FCB	0.48 以下	0.15 以下	—	—

\*表に示した簡易透気速度は、実験結果の範囲とし、—の箇所は本実験の範囲外であることを示している。ただし、HPC の長期、MPC の短期、FCB の標準については、実験データの範囲外であるが、その値が極めて範囲に近い場合評価値を記載した。

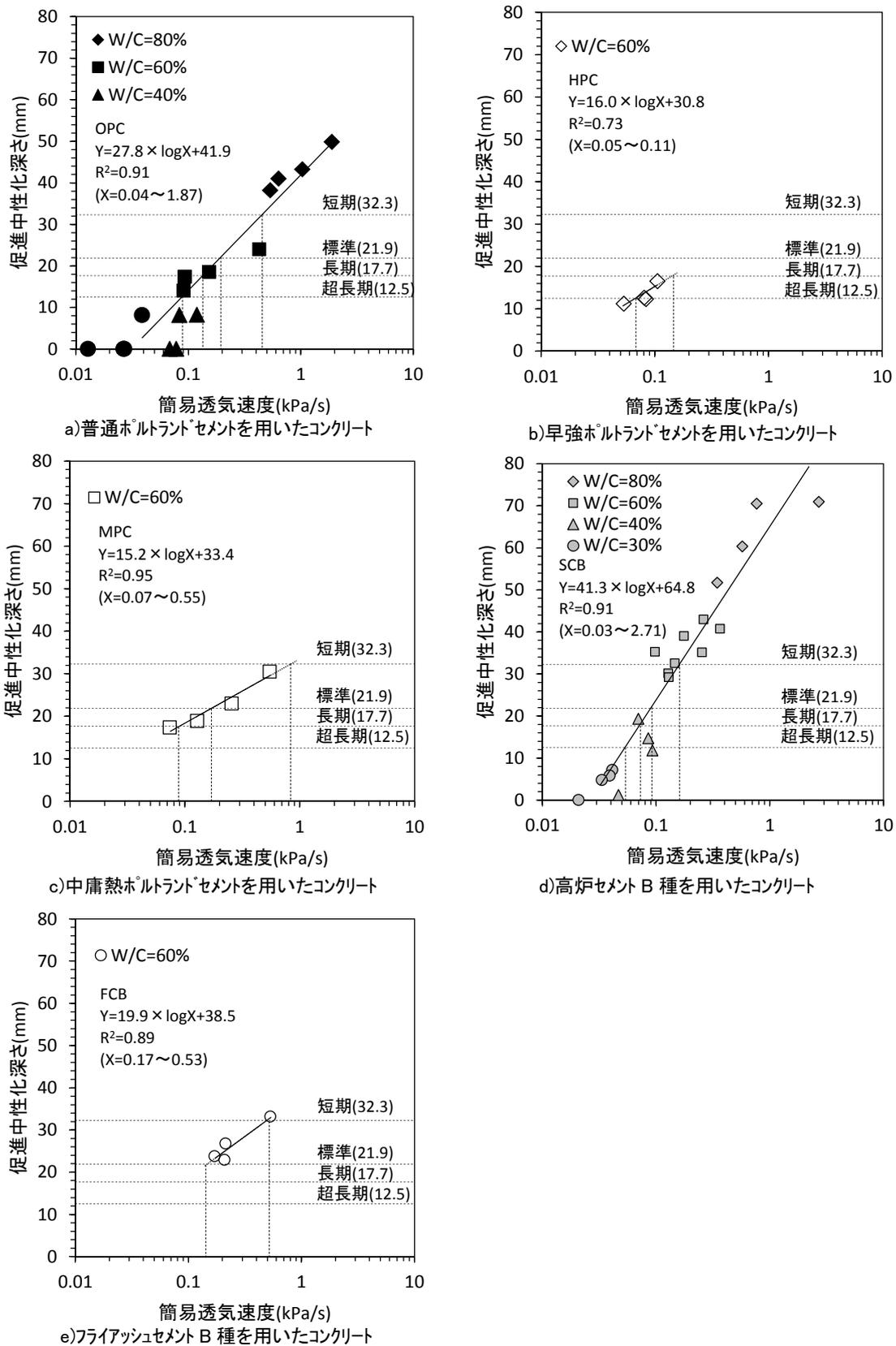


図 4.7 材齢 3 ヶ月における簡易透気速度と促進(炭酸ガス濃度 5%)期間 26 週の中性化深さの関係

#### 4.5 本章のまとめ

本章で得られた結果をまとめると以下の通りである。

- (1) コンクリート打込み後早期に中性化抵抗性の評価を行うため試験材齢の検討を行い、その結果、実施簡便さや早期の判断が望ましいことから、コンクリート材齢で3ヶ月とした。
- (2) 水セメント比、セメントの種類、乾燥開始材齢の異なるコンクリートにより、簡易透気速度と促進中性化深さが一律に対応することを、使用したセメント種類毎に示した。
- (3) 日本建築学会「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）・同解説」で示された、計画耐用年数と促進26週における中性化深さを求める考え方にに基づき、JASS5の計画供用期間の級に対応する促進期間26週の中性化深さを算出した。
- (4) 使用したセメント種類毎に示した、簡易透気速度と促進中性化深さの関係線とJASS5の計画供用期間の級に対応する促進期間26週の中性化深さにより、JASS5の計画供用期間の級に対応する簡易透気速度を求め、使用したセメントの種類毎に表として示した。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会編：鉄筋コンクリート造建築物の品質管理および維持管理のための試験方法，2007.3
- 2) 今本啓一，下澤和幸，山崎順二，二村誠二：実構造物の表層透気性の非・微破壊試験方法に関する研究の現状，コンクリート工学，Vol.44，No.2，pp.31-38，2006.2
- 3) 土木学会コンクリート委員会編：コンクリート技術シリーズ No.97 構造物表層のコンクリートの品質と耐久性検証システム小委員会(JSCE335委員会)第二期成果報告書およびシンポジウム講演梗概集，土木学会，2012
- 4) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，pp.168-176，2009
- 5) 笠井芳夫，松井勇，湯浅昇，飛坂基夫，柳啓，野中英：簡易透気試験を用いた構造体コンクリートの耐久性評価，日本建築学会学術講演梗概集 A-1，pp151-152，1997.9
- 6) 日本建築学会：高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）・同解説，pp.86-88，1991
- 7) 日本建築学会：鉄筋コンクリート建築物の耐久設計施工指針（案）・同解説，pp.54-59，2004
- 8) 和泉意登志，嵩英雄，押田文雄：鉄筋コンクリート建築物における鉄筋のかぶり厚さの信頼性設計手法の提案ーコンクリートの中性化によって鉄筋が腐食する場合ー，日本建築学会構造系論文集，第384号，昭和63年2月，pp.58-66

## 第5章

# 簡易透気試験方法を用いた各種養生方法の 効果に対する評価

## 第5章 簡易透気試験方法を用いた各種養生方法の効果に対する評価

### 5.1 概要

JASS5 では、コンクリートの湿潤養生方法として、養生マットまたは水密シートなどで覆い水分を維持する方法、連続または断続的に散水または噴霧を行い水分を供給する方法、膜養生剤や浸透性の養生剤の塗布により水分の逸散を防ぐ方法が示されているが<sup>1)</sup>、上記3つの養生が行われた場合に、せき板存置と同等であることを確認することは難しく、適切に養生が行われているか確認する方法を検討することは重要である。

本章では、コンクリートの品質向上を期待した各種湿潤養生方法（水中養生、散水養生、テープ養生、マット養生）および各種塗布材を用いた方法（けい酸塩系表面含浸剤、シラン系表面含浸剤、塗布型収縮低減剤、膜養生剤）の中性化抵抗性、塩分浸透抵抗性への効果と、それらが簡易透気速度で評価できるかを検討した。

### 5.2 簡易透気試験方法を用いた湿潤養生方法の違いによる養生効果の評価に関する検討

本節では、表層コンクリートの品質向上を目的として、湿潤養生方法として封かん養生、水中養生（以下、水中とする）、散水養生（以下、散水とする）、保湿養生テープ（以下、テープとする）、吸水マット養生（以下、マットとする）を行ったコンクリートの簡易透気速度の効果を示した。次に、湿潤養生方法による促進中性化深さ、塩化物イオン浸透深さを簡易透気速度で評価できるか検討した。

#### 5.2.1 実験概要

##### (1) 養生条件

表 5.1 に、養生条件を示す。養生の仕様は、封かん養生、水中養生、散水養生、保湿養生テープ、吸水マット養生の計5種類とした。また、一部の養生では、型枠存置期間、養生開始材齢、乾燥開始材齢を変化させたため、養生条件は計13種類となった。

表 5.1 養生条件

養生の仕様	試験体記号	型枠存置期間	養生開始材齢	乾燥開始材齢
封かん養生	a	1日	/	1日
	b	3日		3日
	c	5日		5日
	d	7日		7日
	e	28日		28日
水中養生	f	1日	1日	28日
散水養生	g	1日	1日	5日
保湿養生テープ	h	1日	1日	5日
吸水マット養生	i	1日	1日	5日
	j	1日	1日	10日
	k	1日	1日	28日
	l	3日	3日	5日
	m	3日	3日	10日

(2) 試験体の作製

a. コンクリートの調合

コンクリートの調合は、水セメント比 50% の 1 種類とした。表 5.2 に、使用材料を、表 5.3 に使用したコンクリートの調合を示す。また、フレッシュコンクリートの性状および圧縮強度は、表 5.3 に併記した。

表 5.2 使用材料

使用材料	使用材料の種類および品質
水	つくば市水道水 (密度 1.00g/cm <sup>3</sup> )
セメント	普通ポルトランドセメント (密度 3.15g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	S1:つくば市産川砂 (表乾密度 2.50g/cm <sup>3</sup> ) S2:つくば市産砕砂 (表乾密度 2.59g/cm <sup>3</sup> )
粗骨材	つくば市産砕石 (表乾密度 2.66g/cm <sup>3</sup> )
混和剤	Ad1:P 社製 AE 減水剤 (3 倍希釈液) Ad2:P 社製 AE 助剤 (100 倍希釈)

表 5.3 コンクリートの調合、フレッシュコンクリートの性状および圧縮強度

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							スラブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
		水	セメント	細骨材		粗骨材	混和剤				
				S1	S2		Ad1	Ad2			
50	45.0	185	370	184	570	955	3.70	1.11	19.5	5.8	34.5

b. 試験体の寸法

図 5.1 に、試験体の概要図を示す。簡易透気試験の試験体は、寸法を 500×500×150mm とし、500×500mm の面を試験面とした。促進中性化試験、塩化物イオン浸透性試験の試験体は、寸法を 100×100×133mm とし、100×133mm の型枠側面に接していた部分を試験面とした。試験面以外の 4 面は乾燥の影響を受けないようにエポキシ樹脂を塗布した。

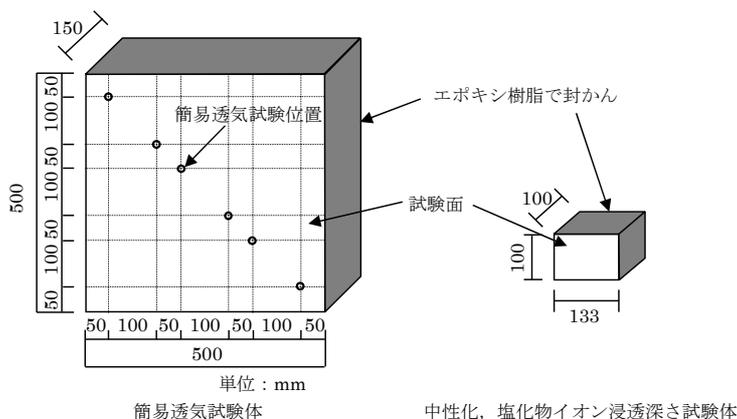


図 5.1 試験体概要図

### (3) コンクリートの養生

コンクリートは、打込み後型枠存置期間、養生開始材齢まで20℃の恒温室内で型枠内に静置した。このとき、打込み面はビニールで封緘し乾燥を防止した。養生は、型枠存置期間、養生開始材齢に型枠を取り外した後、各々の方法で養生を開始し、乾燥開始材齢で養生を終了させ、20℃、相対湿度60%の恒温恒湿室内に静置した。

### (4) 試験方法

#### a. 簡易透気試験

簡易透気試験は、「第2章2.3ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法の提案」で提案した方法で実施した。

#### b. 促進中性化試験

促進中性化試験は、材齢28日に、JIS A 1153に準じて試験体を温度20℃、相対湿度60%、炭酸ガス濃度5%の促進中性化試験槽の中に入れ、26週経過時点で中性化深さの測定を行った。中性化深さは、割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して、コンクリート表面から赤紫色に呈色する部分までの距離を試験面毎に各5点測定し、その平均を測定値とした。

#### c. 塩化物イオン浸透性試験

塩化物イオン浸透性試験は、材齢28日に、試験体をJIS A 6205付属書1に規定する濃度4.2%の塩分溶液に浸漬し、13週経過時点で塩化物イオン浸透深さを測定した。塩化物イオン浸透深さは、割裂面に0.1%フルオレセインナトリウム水溶液および0.1N硝酸銀溶液を噴霧し、コンクリート表面から蛍光を発する部分の距離を、試験面毎に各5点測定し、その平均を測定値とした。

## 5.2.2 簡易透気試験結果

図 5.2 養生の違いによる簡易透気速度を示す。

水中、散水、テープ、マット養生を行った簡易透気速度は、型枠存置期間が長いほど小さくなった。同一の型枠存置期間での簡易透気速度は、散水養生、養生テープ、吸水マットでは、封かん養生より大きくなった。1 日型枠を取外して乾燥したものに比し、1 日で型枠を取外した後散水養生した試験体 g、保湿養生テープで養生した試験体 h、マット養生を 5 日まで行った試験体 i の簡易透気速度の変化は少ない。また、マット養生で養生期間を 5 日、10 日、28 日とした場合には、養生期間が長いほど簡易透気速度は小さくなり、封かん養生と同程度であった。

簡易透気試験方法を用いて湿潤養生方法の違いが相対的に認められることを確認した。また、その違いは、封かん養生と同程度の差であることから、湿潤養生方法の違いを簡易透気試験方法を用いて評価出来ると考えられる。

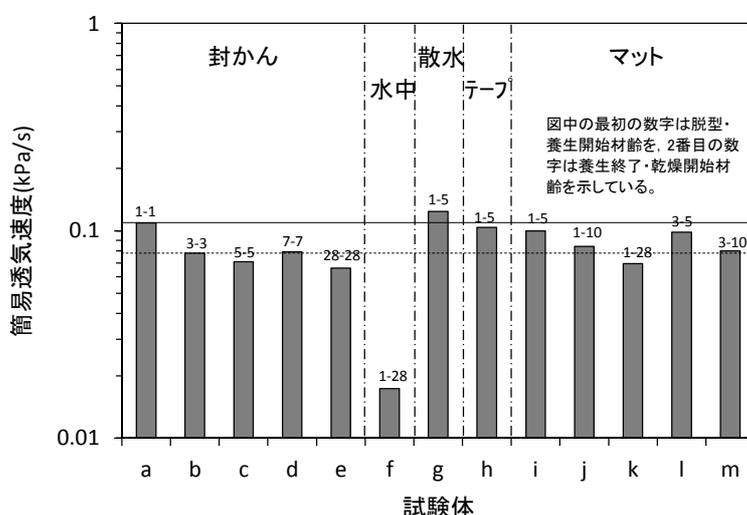


図 5.2 養生の違いによる簡易透気速度

## 5.2.3 簡易透気試験方法を用いた湿潤養生方法の違いによる養生効果の評価に関する検討

### (1) 簡易透気速度と促進 26 週の中性化深さの関係

図 5.3 に、簡易透気速度と促進 26 週の促進中性化深さの関係を示す。水中養生を除き、簡易透気速度の増加に伴い促進 26 週の中性化深さも増加する傾向にある。

湿潤養生方法毎に中性化抵抗性の効果を簡易透気速度で評価できるか検討するため、表 5.4 に、湿潤養生方法における中性化抵抗性の簡易透気速度による効果の評価を示した。中性化抵抗性の評価は、封かん養生、テープ養生、マット養生で中性化深さが簡易透気速度の効果と同じ傾向をもって増減しており、評価できる。水中養生では、簡易透気速度の減少が促進中性化深さの減少と比し大きく、評価できるがばらつきがある。散水養生では、促進中性化深さの減少に対し、簡易透気速度は増加しており評価できない。

水中養生は、材齢 28 日まで水中で養生していたため、含水率の影響により透気性は小さくなった可能性があるが、中性化の進行は促進期間 26 週で試験を行ったため含水率の影響が少なかったと推測される。散水養生は、1 日に 2 回霧吹きにより表面がぬれる程度に水を塗布したが、散水

の効果よりも乾湿の繰り返しによる微細なひび割れにより簡易透気速度への効果がなかったと推測される。

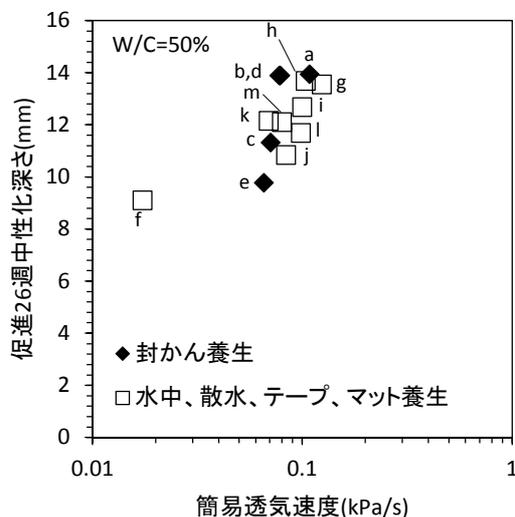


図 5.3 簡易透気速度と促進中性化深さの関係

## (2) 簡易透気速度と浸漬 13 週の塩化物イオン浸透深さの関係

図 5.4 に、簡易透気速度と浸漬 13 週の塩化物イオン浸透深さの関係を示す。水中養生を除き、簡易透気速度の増加に伴い、浸漬 13 週の塩化物イオン浸透深さも増加する傾向にある。しかし、散水養生した試験体 g、保湿養生テープで養生した試験体 h、型枠存置期間 1 日でマット養生を 5 日した試験体 i、型枠存置期間 1 日でマット養生を 10 日した試験体 j、型枠存置期間 3 日でマット養生を 5 日した試験体 1 では簡易透気速度の増減は小さいが浸漬 13 週の塩化物イオン浸透深さは 4 mm 程度変化している。

湿潤養生方法毎に塩分浸透抵抗性の効果を簡易透気速度で評価できるか検討するため、表 5.4 に、湿潤養生方法における塩分浸透性の簡易透気速度による効果の評価を示した。塩分浸透性の評価は、封かん養生、テープ養生、マット養生で塩化物イオン浸透深さが簡易透気速度の効果と同じ傾向をもって増減しており、評価できる。水中養生では、簡易透気速度の減少が塩化物イオン浸透深さの減少と比し大きく、評価できるがばらつきがある。散水養生では、塩化物イオン浸透深さの減少に対し、簡易透気速度は増加しており評価できない。

本実験における調合の範囲では、湿潤養生方法を中性化抵抗性と塩分浸透抵抗性を簡易透気速度で評価する場合に、その評価に大きな違いは認められなかった。

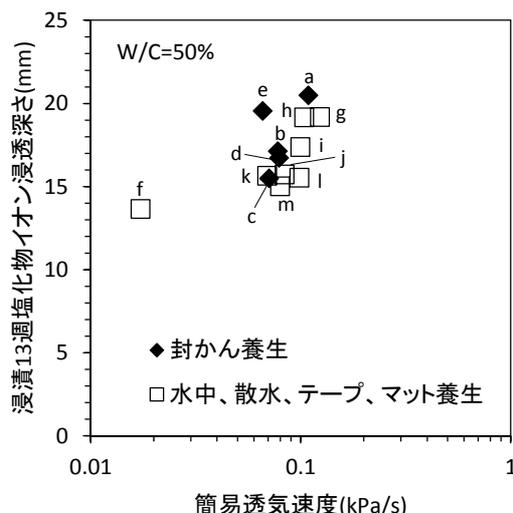


図 5.4 簡易透気速度と塩化物イオン浸透深さの関係

表 5.4 湿潤養生方法における中性化抵抗性、塩分浸透性の簡易透気速度による効果の評価

養生債の種類	中性化抵抗性	簡易透気試験による効果の評価	塩分浸透抵抗性	簡易透気試験による効果の評価
封かん養生	乾燥開始材齢の経過に伴い良くなる。	○	乾燥開始材齢の経過に伴い良くなる。	○
水中養生	良くなる	△	良くなる	△
散水養生	良くなる	×	良くなる	×
テープ養生	良くなる	○	良くなる	○
マット養生	養生期間が長くなるのに伴い良くなる。	○	養生期間が長くなるのに伴い良くなる。	○

○：評価出来る，△：評価出来るがばらつきがある，×：評価出来ない

### 5.3 簡易透気試験方法を用いた塗布材による品質改善効果の検討

コンクリート表層部の品質向上を目的として、表層強度や耐久性を向上させる材料（以下、塗布剤とする）を型枠取外し後に塗布する場合がある。塗布剤は、土木学会の「けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針(案)」<sup>2)</sup>、「表面保護工法設計施工指針(案)」<sup>3)</sup>などにより、性能や効果の基準等が提案されている。

塗布剤には、けい酸塩系表面含浸材、シラン系表面含浸材、塗布型収縮低減剤、膜養生剤などがあり、塗布剤の系列毎に性能が異なる。塗布剤の効果は、塗布剤毎に上記指針で規定された方法などにより、自主検査で無塗布との比較で確認することが多く、系列の異なる塗布剤について相互に評価を行っている事例は少なく、それも限定されている<sup>4)5)</sup>。一方、実際の構造物に塗布した場合の効果は、現状では確認する方法が確立されていない。

本節では、系列の異なる塗布剤のそれぞれの塗布効果を一同に確認することを目的として、各種塗布剤を施した調合・養生の異なる試験体について、簡易透気速度の効果を示した。次に、塗布後の促進中性化深さ、塩化物イオン浸透深さを簡易透気速度で評価できるか検討した。

### 5.3.1 実験概要

#### (1) 実験の要因と水準

実験の要因としては、塗布材の系列及び種類、水セメント比、塗布材齢とした。詳細は、表 5.5 の実験の要因と水準に示す通りである。

表 5.5 実験の要因と水準

実験の要因	水準
塗布材の種類	けい酸塩系表面含浸材 (3 種類) シラン系表面含浸材 (3 種類) 塗布型収縮低減剤 (3 種類) 膜養生剤 (3 種類)
水セメント比	50, 60, 80%
塗布材齢	1, 5 日

#### (2) 塗布剤の種類

表 5.6 に、養生の仕様および塗布剤の品質（メーカーの資料による）を示す。使用した塗布剤は、けい酸塩系表面含浸材（以下、けい酸塩系とする）、シラン系表面含浸材（以下、シラン系とする）、塗布型収縮低減剤（以下、収縮低減剤とする）、膜養生剤と系列の異なるものとし、各系列で各々3種類の塗布剤を選定した。

各系列における塗布剤の特徴を以下に述べる<sup>3)</sup>。

けい酸塩系は、塗布剤をコンクリート表面に含浸することにより、コンクリート中の水酸化カルシウムとの反応で C-S-H ゲルを生成して、コンクリート中の空隙を充填することにより緻密化させ、劣化因子の侵入を抑制するものである。

シラン系は、塗布剤を表面に含浸させることにより、コンクリート表層から数 mm の厚みの範囲には水層（吸水防止層）が形成され、水や塩化物イオンなどの劣化因子の侵入を抑制するものである。

塗布型収縮低減剤は、アルコール系と保水系に分類され、アルコール系では、水の毛管張力を低減することにより収縮を抑制するものである。保水系は、表面張力の低下がアルコール系より少ないものの、乾燥時における水分蒸発抑制効果があり、その効果により乾燥収縮を抑制するものである。「表面保護工法設計施工指針（案）」に示されていない塗布型収縮低減剤には、一部に中性化の抑制効果があるとの報告があり<sup>6)</sup>、検討の対象とすることとした。

膜養生剤は、塗布剤をコンクリート表面に塗布することにより皮膜を形成し、保湿・保水効果を高めることにより、セメントの水和を進行させ緻密化させる。パラフィン系やアクリル系などがある。

表 5.6 養生の仕様および塗布材の品質

養生の仕様		型枠存 置期間	塗布 材齢	試験体 記号	塗布量 (g/m <sup>2</sup> )	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	pH	粘度 (mPa・s)	濃度 (%)	
無塗布 (封かん養生)		1日		a						
		3日		b						
		5日		c						
		7日		d						
		28日		e						
けい酸塩 系表面含 浸材	A 社製けい酸ナトリウム (養生用)	1日	1日	f	200	1.08-1.18	11.2-11.8	1-5 (CPS)	12-20	
		5日	5日	g						
		A 社製けい酸ナトリウム (防水用)	5日	5日	h	250	1.08-1.18	11.3-11.9	5-10 (CPS)	14-22
	B 社製けい酸ナトリウム	5日	5日	i	200	1.24-1.28	11.3-12.3	7.1	31.5-55.5	
シラン系 表面含浸 材	C 社製アルキルアルコシランモ マー	1日	1日	j	150	0.98-1.2	6-8	<10	20	
		5日	5日	k						
		D 社製シラン系シリコマー 溶液	5日	5日	l	300-400	—	—	—	—
		E 社製アルキルアルコシラン	5日	5日	m	200-300	0.88	—	0.95	98-100
塗布型収 縮低減剤	F 社製低級アルコールの アルキレンオキシド誘導体	1日	1日	n	100-150	1.015 -1.045	5.0-7.0	5-35	—	
		5日	5日	o						
		G 社製グリコエーテル系誘 導体	5日	5日	p	80-150	0.99 -1.05	6-10	10-30	99%以上
	H 社製ポリリアルキルグリコ ール混和物	5日	5日	q	100-200	1.04 -1.06	6.0-8.5	50-30	—	
膜養生剤	H 社製ハーフインワックスエ マルジョン	1日	1日	r	100-250	1.0	—	—	10-15	
	E 社製水性ハーフインワッ クス	1日	1日	s	100-150	0.95 -1.00	5-8.5	—	10-20	
	E 社製溶剤系アクリル	1日	1日	t	200	0.8	わずかに アルカリ性	—	—	

\*塗布剤の品質はメーカーの資料による。—の部分は非開示

### (3) 試験体の作製

#### a. コンクリートの使用材料および調合

コンクリートの使用材料および調合は、表 5.7、表 5.8 に示す水セメント比 50、60、80%の3種類とした。スランプの目標値は  $18 \pm 2.5$ cm、空気量の目標値は  $4.5 \pm 1.5\%$ とした。コンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度は表 5.8 に併記した。

表 5.7 使用材料

使用材料	使用材料の種類および品質
水	つくば市水道水 (密度 1.00g/cm <sup>3</sup> )
セメント	普通ポルトランドセメント (密度 3.15g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	S1:つくば市産川砂 (表乾密度 2.50g/cm <sup>3</sup> ) S2:つくば市産砕砂 (表乾密度 2.59g/cm <sup>3</sup> )
粗骨材	つくば市産碎石 (表乾密度 2.66g/cm <sup>3</sup> )
混和剤	Ad1:P 社製 AE 減水剤 (3倍希釈液) Ad2:P 社製 AE 助剤 (100倍希釈)

表 5.8 コンクリートの調合, フレッシュ性状および圧縮強度

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
		水	セメント	細骨材		粗骨材	混和剤				
				S1	S2		Ad1	Ad2			
50	45.0	185	370	184	570	955	3.70	1.11	19.5	5.8	34.5
60	46.6	185	308	196	608	955	3.08	0.61	17.5	5.0	29.6
80	50.0	195	244	213	663	908	2.44	0.61	21.0	5.0	18.5

## b. 試験体の寸法

試験体の作製は、「5.2.1(2)試験体の作製」と同様に行った。

## c. 養生, 塗布剤の塗布

試験体の養生は、塗布剤を塗布する材齢まで 20℃の恒温室内で封かん養生とし、所定の材齢で型枠を取外し、その直後に塗布剤を塗布した。塗布剤の塗布後は、温度 20℃、相対湿度 60%の恒温恒湿内で静置した。また、比較として、材齢 1 日、3 日、5 日、7 日、28 日まで型枠を存置した試験体も作製した。

表 5.6 に、養生の仕様を示す。塗布剤を塗布する材齢は、1 日および 5 日とした。膜養生剤は、1 日のみ実施した。塗布剤の塗布は、所定の材齢で試験面を地面と垂直に設置した後に、刷毛を用いて行った。塗布の目標量は、メーカーの示す標準塗布量とするが、標準塗布量まで塗布できない場合には、その時点で塗布を終了した。塗布量の管理は質量で行い、塗布量を塗布面積で除したものを実塗布量とした。なお、各養生・塗布条件に対して試験体数は 1 である。

表 5.9 および図 5.5 は実塗布量を示したものである。塗布量は、標準塗布量と比し、小さくなった。これは、型枠を取外した直後に塗布したことによる影響と考えられる。なお、塗布量は、水セメント比が小さい程、小さくなる傾向となった。

表 5.9 実塗布量

養生の仕様		型枠存置期間	塗布材齢	試験体記号	塗布量 (g/m <sup>2</sup> )	左：実塗布量 (g/m <sup>2</sup> ), 右：塗布率 (%)					
						W/C=50%		W/C=60%		W/C=80%	
けい酸塩系表面含浸材	A 社製けい酸ナトリウム (養生用)	1 日	1 日	f	200	90	45	169	85	163	82
		5 日	5 日	g		159	80	197	99	158	79
	A 社製けい酸ナトリウム (防水用)	5 日	5 日	h	250	158	63	263	105	210	84
	B 社製けい酸ナトリウム	5 日	5 日	i	200	189	95	208	104	155	78
シラン系表面含浸材	C 社製アルキルアルコシランモノマー	1 日	1 日	j	150	98	65	149	99	132	88
		5 日	5 日	k		92	61	57	38	121	81
	D 社製シラン系オリゴマー溶液	5 日	5 日	l	300-400	161	46	167	48	189	54
	E 社製アルキルアルコシラン	5 日	5 日	m	200-300	292	86	204	82	232	93
塗布型収縮低減剤	F 社製低級アルコールのアルキレンキシル誘導体	1 日	1 日	n	100-150	108	86	120	96	148	118
		5 日	5 日	o		108	72	116	93	103	82
	G 社製クマロン系誘導体	5 日	5 日	p	80-150	83	50	90	78	90	78
	H 社製ポリアルキルグリコール混和物	5 日	5 日	q	100-200	83	50	90	60	90	60
膜養生剤	H 社製ラフィンワックスエマルジョン	1 日	1 日	r	100-250	88	90	94	54	123	70
	E 社製水性ラフィンワックス	1 日	1 日	s	100-150	113	56	103	82	113	90
	E 社製溶剤系アクリル	1 日	1 日	t	200	112	71	198	99	216	108

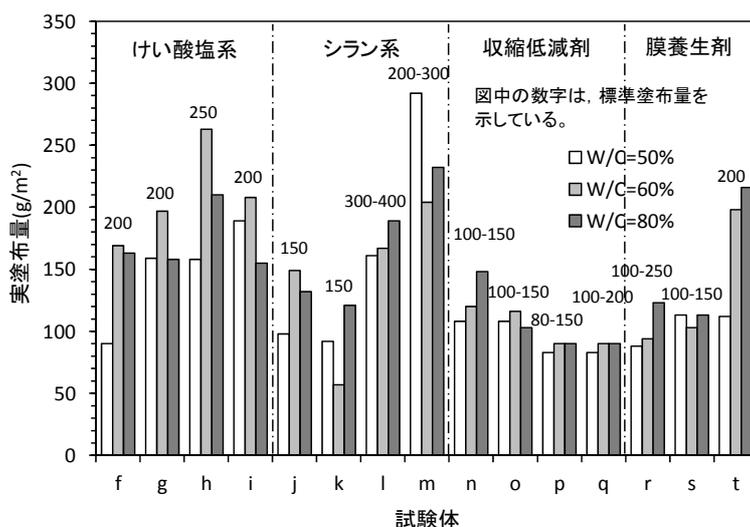


図 5.5 実塗布量

#### (4) 試験方法

試験は、「5.2.1(4)a. 簡易透気速度」～「c. 塩化物イオン浸透性試験」と同様に行った。

### 5.3.2 簡易透気試験結果

ここでは、型枠存置期間を遅くすることにより簡易透気速度の低下を確認するとともに、塗布剤による効果は無塗布の場合との簡易透気速度の比較により確認した。

図 5.6 に、養生の異なる試験体の簡易透気速度を示す。

#### (1) 型枠存置期間を遅くした場合

全ての水セメント比で、型枠存置期間を遅くする程、簡易透気速度は小さくなり、型枠存置期間を遅らせるとコンクリートが緻密になることが確認できた。

#### (2) けい酸塩系を塗布した場合

型枠存置期間 1 日で A 社製けい酸ナトリウム(養生用)を塗布した試験体 f の場合、全て水セメント比で無塗布と比し簡易透気速度が同等か大きく低下が認められなかった。

型枠存置期間 5 日で塗布剤を塗布した場合、水セメント比 50%の全ての塗布剤、水セメント比 80%の A 社製けい酸ナトリウム(養生用)を塗布した試験体 g, B 社製けい酸ナトリウムを塗布した試験体 i で無塗布と比し簡易透気速度が同等か大きくなり効果は認められなかったが、水セメント比 60%の全て、水セメント比 80%の A 社製けい酸ナトリウム防水用を塗布した試験体 h では無塗布を比し小さくなり簡易透気速度の低下が認められた。

#### (3) シラン系を塗布した場合

型枠存置期間 1 日で塗布剤 C 社製アルキルアルコシランモノマーを塗布した試験体 j の場合、水セメント比 50%で型枠存置期間 1 日と 3 日の中間程度の簡易透気速度の若干の低下が認められたものの、水セメント比 60%, 80%では無塗布と比し簡易透気速度が同等か大きく、効果は認められなかった。

型枠存置期間5日で塗布剤を塗布した場合には、水セメント比60%のG社製グリコエーテル系誘導体を塗布した試験体p, H社製ポリアルキグリコール混和物を塗布した試験体qで簡易透気速度の低下が認められたものの、それ以外塗布剤では効果は少ないか認められなかった。

#### (4) 収縮低減剤を塗布した場合

型枠存置期間1日でF社製低級アルコールのアルキレンオキシド誘導体を塗布した試験体nの場合、水セメント比50%, 60%では型枠存置期間5日より小さく簡易透気速度の低下が認められたが、水セメント比80%では無塗布と比し若干大きく簡易透気速度に低下は認められなかった。

#### (5) 膜養生剤と塗布した場合

水セメント比60%で、E社製溶剤系アクリルを塗布した試験体tの簡易透気速度の低下は大きかったが、それ以外の塗布剤では簡易透気速度の低下は大きくても5日と同程度だった。

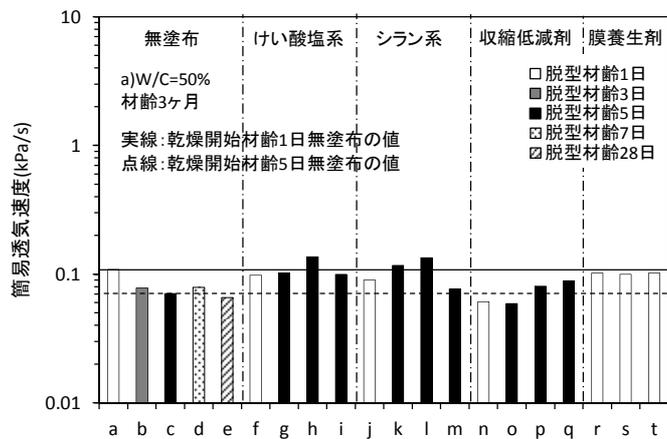
#### (6) 水セメント比の影響

塗布剤を塗布した場合の養生効果は水セメント比60%が一番大きかった。

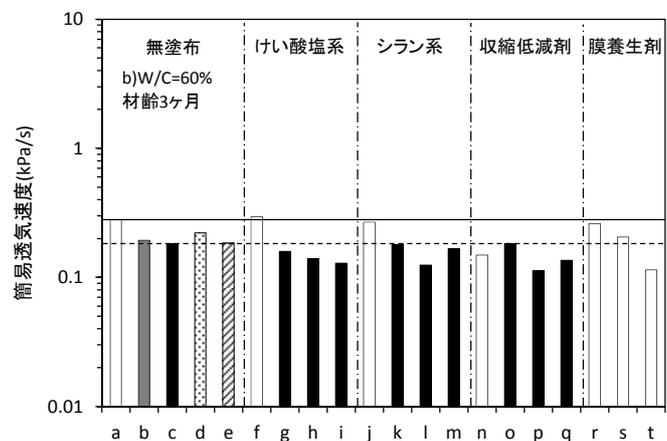
#### (7) 塗布材齢の影響

水セメント比50%では、けい酸塩系、シラン系で1日塗布で無塗布と比し簡易透気速度は同程度となったが、5日塗布では無塗布比し簡易透気速度大きくなり効果は認められなかった。収縮低減剤では、1日塗布で簡易透気速度の低下がみとめられたが、5日塗布では簡易透気速度は同等もしくは若干大きくなった。水セメント比60%では、塗布材齢1日の収縮低減剤および塗布材齢5日で簡易透気速度の低下が認められるものが多かった。水セメント比80%ではほぼ全て簡易透気速度の低下が認められなかった。

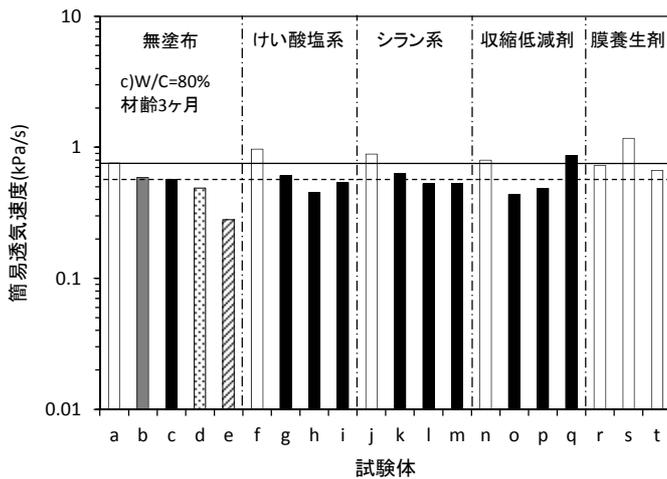
塗布剤のメカニズムは、大きくはけい酸塩系、膜養生剤ではコンクリートを緻密化させる効果、シラン系ではコンクリート表層には水層を形成する効果、収縮低減剤では保湿による養生効果と水の毛管張力の低減により収縮が低減することによる微細ひび割れが減少する効果である。これらの効果が本実験の範囲では明確に認められなかった。これは、塗布時期や養生を一定にして行ったためと考える。



a)水セメント比 50%の場合



b)水セメント比 60%の場合



c)水セメント比 80%の場合

図 5.6 養生の異なる試験体の簡易透気速度(測定材齢 3ヶ月)

## 5.3.3 簡易透気試験方法を用いた塗布材による品質改善効果の評価に関する検討

## (1) 簡易透気速度と中性化の関係

図 5.7 に、簡易透気速度と促進中性化深さの関係を示す。簡易透気速度と促進中性化深さの関係は、一見、簡易透気速度の増加に伴い促進中性化深さも増加する傾向にあり、既往の研究7)で示した水セメント比や乾燥開始材齢を変化させた場合のように、簡易透気速度により中性化抵抗性を評価可能のように思われる。しかしながら、水セメント比 80%の結果をみるとわかりやすいが、塗布剤の塗布による簡易透気速度の低下は小さいかむしろ若干増えているものの、促進中性化深さは 10mm 程度小さくなっている。ただし、この傾向は水セメント比 50%, 60%では明確ではない。塗布剤の塗布による中性化抵抗性の向上が一定の効果でしかないこともあり、総じて、簡易透気速度から塗布剤の効果の評価するのは厳密には難しい。

塗布剤毎に中性化抵抗性を簡易透気速度で評価できるか検討するため、表 5.10 に、塗布剤による中性化抵抗性の簡易透気速度による効果の評価を示す。コンクリートを緻密化するけい酸塩系および膜養生剤では塗布剤による促進中性化深さへの効果と簡易透気速度への効果が同じであり、評価できる。収縮低減剤では、塗布剤の効果が促進中性化深さではでは全てで効果があったが、簡易透気速度は一部で効果が少ないものがあり、評価できるがばらつきがある。シラン系では、塗布した効果が促進中性化深さ、簡易透気速度ともに効果があるもの、ないものがあるが、その傾向が双方で異なるため評価できない。

収縮低減剤では、保湿による養生効果と水の毛管張力の低減により収縮が低減することによる微細ひび割れの減少効果と効果が異なるため、促進中性化深さと簡易透気速度で効果が異なると推測される。シラン系のメカニズムが撥水効果であるため、促進中性化深さ、簡易透気速度ともに塗布による効果が認められなかったと推測される。

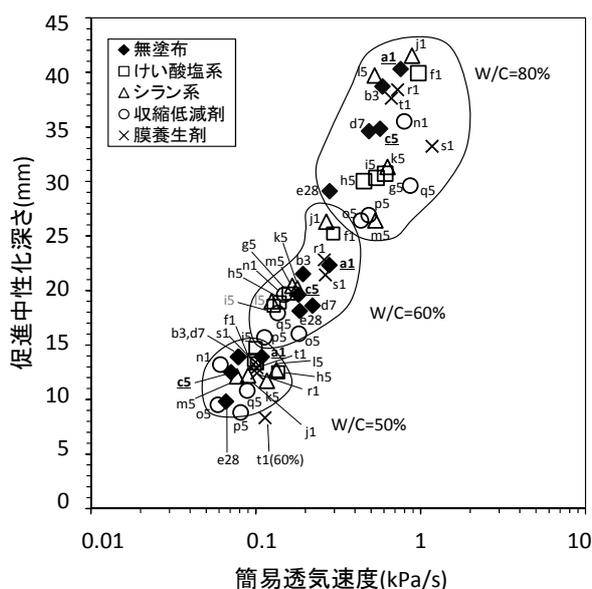


図 5.7 簡易透気速度と促進中性化深さの関係

表 5.10 塗布剤による中性化抵抗性の簡易透気速度による効果の評価

養生剤の種類	効果のメカニズム	中性化抵抗性	簡易透気試験による効果の評価
けい酸塩系	コンクリート中の空隙を充填し緻密化	良くなるものと悪くなるものがある。	○
シラン系	コンクリート表層には水層を形成	良くなるものと悪くなるものがある。	×
収縮低減剤	水の毛管張力を低減する（アルコール系） 乾燥時の水分蒸発を抑制（保水系）	全てで良くなり、その効果は大きい。	△
膜養生剤	皮膜を形成し、保湿・保水効果を高め緻密化	概ね良くなるが、その効果は小さい。	○

○：評価出来る，△：評価出来るがばらつきがある，×：評価出来ない

## (2) 簡易透気速度と塩分浸透性の関係

図 5.8 に、簡易透気速度と塩化物イオン浸透深さの関係を示す。シラン系の塗布剤では、その塗布により簡易透気速度が低下していなくとも、他の塗布剤に比し、極端に塩化物イオン浸透深さは小さくなっている。これは、シラン系の塗布剤は、透気性の低下に対して効果がないが、塩化物イオンの遮蔽には極めて効果があることを示している。このシラン系を除けば、おおまかには簡易透気速度の増加に伴い塩化物イオン浸透深さも増加する傾向にあるようにみえるが、図 5.7 の対中性化深さとの関係よりも分布のばらつきは大きい。また、これを塗布したものと塗布しないものとの関係で厳密にみると、簡易透気速度の変化が塩化物イオン浸透深さの低下につながっているものは少ない。塗布したものの分布は、その多くが無塗布のもの分布の下（簡易透気速度に対し、塩化物イオン浸透深さは小さい）にあり、塗布剤の塩化物イオン抵抗性にみられる効果を簡易透気速度から評価することが難しい。

塗布剤毎に塩分浸透抵抗性を簡易透気速度で評価できるか検討するため、表 5.11 に、塗布剤による塩分浸透抵抗性の簡易透気速度による効果の評価を示す。シラン系では、塩化物イオン浸透深さの効果が簡易透気速度の効果と比し非常に大きく、評価できない。これは、シラン系の塗布剤が撥水層を形成するものであり、水の浸入が阻害されたことによる塩化物イオン浸透深さの低減効果が大きかったと考える。けい酸塩系、収縮低減剤、膜養生剤では、塩化物イオン浸透深さの効果と簡易透気速度の効果が同じものが多いが、一部効果に違いがあるものが認められ、評価できるがばらつきがある。

中性化抵抗性と比し塩分浸透抵抗性の効果は評価しづらかった。これは、中性化が気相で進行するのに対し、塩分は液相で浸透することの違いと推測される。

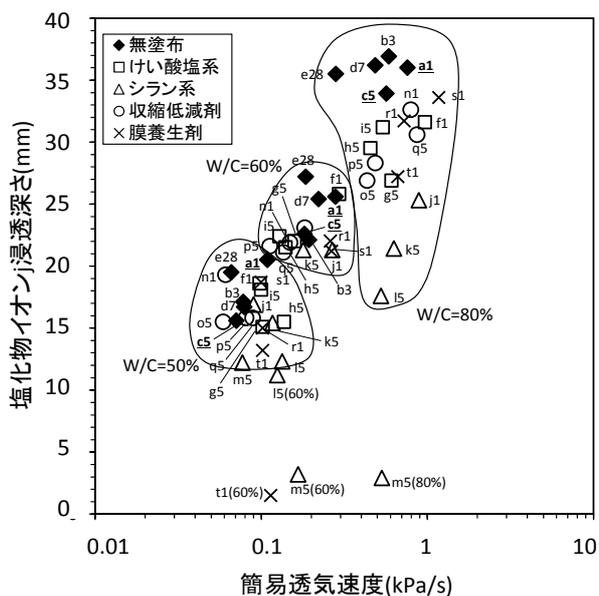


図 5.8 簡易透気速度と塩化物イオン浸透深さの関係

表 5.11 塗布剤による塩分浸透抵抗性の簡易透気速度による効果の評価

養生剤の種類	効果のメカニズム	塩分浸透抵抗性	簡易透気試験による効果の評価
けい酸塩系	コンクリート中の空隙を充填し緻密化	概ね良くなるが、その効果は小さい。	△
シラン系	コンクリート表層にはっ水層を形成	全てで良くなり、その効果は大きい。シラン系の撥水効果が影響していると考えられる。	×
収縮低減剤	水の毛管張力を低減する（アルコール系） 乾燥時の水分蒸発を抑制（保水系）	概ね良くなるが、その効果は小さい。	△
膜養生剤	皮膜を形成し、保湿・保水効果を高め緻密化	全てで良くなり、シラン系ほどではないが効果も大きい。	△

○：評価出来る，△：評価出来るがばらつきがある，×：評価出来ない

#### 5.4 本章のまとめ

本章で得られた結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 湿潤養生方法の違いによる養生効果を簡易透気速度により比較した結果、養生方法によっては封かん養生と同等の評価が可能であった。
- (2) 湿潤養生方法の違いによる養生効果の評価では、中性化抵抗性、塩分浸透抵抗性を一部の養生を除き簡易透気速度で評価できることを示した。
- (3) 塗布剤を塗布した場合の簡易透気速度は、材齢5日で塗布する条件では、水セメント比60%のけい酸塩系、水セメント比60%、80%の収縮低減剤で効果が認められが、塗布材の効果は簡易透気速度では明確ではなく、むしろ、大きくなる結果が多く塗布材で確認された。
- (4) 簡易透気速度と促進中性化の関係では、試験結果を塗布剤毎に検討した結果、シラン系を除き塗布剤の中性化抵抗性を簡易透気速度で評価できることを示した。
- (5) 簡易透気速度と塩化物イオン浸透深さの関係では、簡易透気速度と変化と比し塩化物イオン浸透深さの効果が大きく、塩化物イオン浸透深さの低下に伴い簡易透気速度も低下する傾向は認められ、評価ができると考えられるものの、中性化と比しその対応は明確ではなかった。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会編：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，日本建築学会，2009.2
- 2) 土木学会編：コンクリートライブラリー137 けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針(案)，土木学会，pp.13-22,2012
- 3) 土木学会編：コンクリートライブラリー119 表面保護工法 設計施工指針(案)，土木学会，pp.55-67,2005
- 4) 澤田巧，福手勤，井上雄太，小笠原哲也：表面含浸材の基本性能とひび割れ改質効果に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，pp.761-766，2010
- 5) 坂元貴之，武若耕司，山口明伸，櫛原弘貴：各種表面含浸材の塩分浸透および中性化に対する抑制効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，pp.1625-1630，2011
- 6) 日本建築学会編：膨張材・収縮低減剤を使用したコンクリートの技術の現状，日本建築学会，pp231-234，2013.8
- 7) 野中英，湯浅昇：簡易透気試験による構造体コンクリートの中性化抵抗性評価，日本建築学会構造系論文集，第80巻，第711号，印刷中，2015.5

# 第 6 章

## 総括

## 第6章 総括

### 6.1 各章のまとめ

本論文では、鉄筋コンクリート構造物の耐久性に関わる透気性を、これまでは評価が困難であった実構造物の原位置を対象に「簡易透気試験方法」を整理・確立し提案した。その上で、コンクリート打込み早期に簡易透気速度により、構造物の中性化による鉄筋腐食の危険性を評価する仕組みを構築している。

本章では、各章で得られた知見を総括して示すとともに、本研究における今後の課題と展望を述べる。

第1章「序論」では、本研究の背景と目的、実構造物に適用可能な透気性の試験方法に関する既往の研究および本研究の構成を示した。

第2章「ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法の提案」では、Figgの発想に基づき、1996年までに笠井・湯浅らが整理・発展させてきた簡易透気試験の検討結果により、削孔径を $\phi 10\text{mm}$ 、削孔深さを $50\text{mm}$ と定めて簡易透気試験方法を確立・提案するために、まず、削孔径、削孔深さが簡易透気速度に及ぼす影響を明らかにした。次に接続ホースの長さが減圧部全体の容積を変化させるためその長さの影響、また隣接する削孔の影響を明らかにした。これらの成果に基づき、削孔径 $\phi 10\text{mm}$ 、削孔深さ $50\text{mm}$ 、ホース長さ $100\text{cm}$ 、削孔間隔（中心間距離） $50\text{mm}$ 以上で行い、測定は4回のうち最初の1回目を除いた2回目以降の測定値を平均して簡易透気速度とする「ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法」を提案した。

提案した「ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法」による簡易透気速度に及ぼすコンクリートの材料、調合、養生の影響を検討し、水和の遅いセメントを使用するほど、水セメント比が大きくなるほど、空気量が大きいほど、乾燥開始材齢が早いほど、測定材齢が遅いほど簡易透気速度は大きいことを明らかにした。使用したセメントの種類、水セメント比の種類、乾燥開始材齢の影響は大きく、単位水量、空気量、測定材齢の影響は小さかった。

第3章「簡易透気試験の結果と他の透気試験の結果の比較」では、第一に、コンクリートの条件を変えた模擬壁に簡易透気試験を適用させ、簡易透気速度と $\phi 100\text{mm}$ のコア供試体による透気試験による透気係数との関係を示した。

次に、簡易透気試験以外に、シングルチャンバーによる方法、ダブルチャンバーによる方法（トレントの提案した方法）による透気性の指標値と簡易透気速度の関係を示し、実構造物で適用可能な試験方法間において各試験値を相互に互換させる仕組みを構築した。今後、日本で一定の利用・普及が認められる簡易透気試験方法、シングルチャンバーによる方法、ダブルチャンバーによる方法をともに、日本非破壊検査協会等で規格化する際には有益と考える。

第4章「簡易透気試験方法による構造体コンクリートの中性化抵抗性評価」では、まず、打設後早期に行う試験材齢は、材齢毎の簡易透気速度と促進中性化試験による中性化深さの関係より、試験時期が遅くなるほど曲線の勾配が緩やかになり中性化の予測には有利なものの、実施の簡便さや早期の判定が望ましいことからコンクリート材齢で3ヶ月とした。

次に、材齢3ヶ月で測定した簡易透気速度と促進期間26週の中性化深さの関係をセメントの種類毎に示し、水セメント比・乾燥開始材齢によらず、簡易透気速度と促進試験による中性化深さが一律に対応することを示した。いずれのセメントを使用したコンクリートでも、それぞれ相関は高かった。

最後に、竣工時に、簡易透気試験により、日本建築学会 JASS5 に示される「計画供用期間の級」を確認する方法を構築するために、鉄筋が発錆し始める中性化深さを日本建築学会「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）・同解説」で示された、計画耐用年数と促進26週における中性化深さを求める考え方にに基づき、JASS5 の「計画供用期間の級」毎に対応する促進期間26週の中性化深さを算出した。この算出した中性化深さを、使用したセメント種類毎に示した簡易透気速度と促進中性化深さの関係に対応させ、JASS5 の「計画供用期間の級」に対応する簡易透気速度を求め、使用したセメントの種類毎に表として示した。

第5章「簡易透気試験方法を用いた各種養生方法の効果に対する評価」では、コンクリートの品質向上を期待した各種湿潤養生（水中養生，散水養生，テープ養生，マット養生）の中性化抵抗性，塩分浸透抵抗性への効果とそれらが簡易透気速度で評価できるか，また同様にコンクリートの品質向上を期待した各種塗布材を用いた方法（けい酸塩系表面含浸剤，シラン系表面含浸剤，塗布型収縮低減剤，膜養生剤）の中性化抵抗性，塩分浸透抵抗性とそれらが簡易透気速度で評価出来るか検討した。各種養生方法を行った効果は，中性化抵抗性，塩分浸透抵抗性を簡易透気速度で一律に評価することは困難であったが，各々の養生では養生に対する効果を評価できた。中性化抵抗性に比し塩分浸透抵抗性の評価がしづらいこと，撥水性を形成することによるシラン系表面含浸剤等のメカニズムが緻密にならない塗布材の効果は評価しづらかった。

第6章「総括」は，本研究で得られた結果についてまとめ，今後検討すべき課題を示している。

## 6.2 今後の課題と展望

本研究には、鉄筋コンクリート構造物の耐久性に関わる透気性を、笠井・湯浅らが整理・検討してきた方法に基づき、1996年以降に実施した実構造物に適用可能な透気性の試験方法に関する研究を行ってきた。試験方法を確立・提案し、中性化抵抗性における JASS5 の「計画供用期間の級」を確認する方法を示し、社会資本の維持保全に貢献をもたらすものと思われる。

しかしながら、本研究には、次の項目が今後の課題として残されている。

### (1) 試験方法

- ・一試験における試験数およびデータのばらつきおよび棄却の方法について検討する。

### (2) 評価方法

- ・簡易透気速度と透気係数の関係について、データを追加し精度を向上させる。
- ・仕上げ塗材が簡易透気速度及びコンクリートの耐久性に及ぼす影響を解明する。

### (3) 簡易透気試験の透気メカニズムの解明

- ・表層から内部にわたり組織と含水率が異なる中、空気がどのように削孔内に流れ、大気圧まで回復するか実験及び有限要素法等の解析をする。
- ・シングルチャンバー法およびダブルチャンバー法についても空気の流れの解析を行い、簡易透気試験方法、シングルチャンバー試験方法、ダブルチャンバー試験方法の特徴、測定、目的、コンクリートにおける影響範囲を明確にする。

### (4) 実構造物への適用

- ・環境条件（温度、湿度）、降雨、含水率、試験位置・数、鉄筋の影響について検討する。
- ・構造体コンクリートの品質評価方法の妥当性の検証として、提案した試験方法を多数の実構造物に適用する。

今後は、提案した方法を広く展開していくとともに、残された課題に取り組み、継続して推進・発展させてきたいと考える。

## 謝 辞

本論文は、筆者が1997年から1999年まで日本大学大学院生産工学研究科建築工学専攻博士前期課程で行った結果および、日本大学大学院生産工学研究科建築工学専攻博士後期課程に在籍して、2012年から熊谷組技術研究所で実施した研究の成果をまとめたものです。

本論文をまとめるにあたり、主査としてご指導いただきました日本大学生産工学部建築工学科教授・湯浅昇博士をはじめとして、副査としてご指導いただきました日本大学生産工学部建築工学科教授・小松博博士、日本大学生産工学部電気電子工学科教授・小井戸純司博士、日本大学生産工学部名誉教授・松井勇博士ならびに日本大学理工学部建築学科教授・中田善久博士には、深く感謝を申し上げます。特に、湯浅昇先生には、論文の執筆に行き詰まった際には、本学の横芝研修所、軽井沢研究所で2人きりで合宿を行ったり、研究室で徹夜をしたりと、先生のご指導無くして本論文は存在し得なかったと思います。

本論文の執筆の機会をいただきました、株式会社熊谷組技術研究所 石橋久義所長、佐藤孝一前所長に深く感謝いたします。また、同 建設材料研究グループ 田中淳一副部長、金森誠治副部長には、的確なアドバイスをいただくとともに、業務が忙しい中、様々なサポートをしていただいたことに感謝しております。同建設材料グループ 三谷和裕氏、実験補助をしていただいた日暮博光氏、濱裕次氏、RECO エンジニアリング株式会社 大沼薫春氏、TRD 寺田謙一氏には、業務や実験を通じて、多大な協力をいただきました。また、技術研究所の方々には、論文執筆の際に激励をいただきました。心より感謝申し上げます。

熊谷組入社当時の先端技術グループ 新材料チーム 石田良平氏、小山秀紀氏、長谷川清光氏、戸上郁英氏、コンクリートチーム 渡部聡氏、林順三氏、石関嘉一氏には、社会人として様々なことをご指導いただきました。心より御礼申し上げます。

日本大学および日本大学桜門建築会の皆様には、研究に対する考え方、研究に対する姿勢など、ご助言、ご指導をいただきました。深く感謝申し上げます。特に、故・日本大学生産工学部建築工学科教授・笠井芳夫先生には、亡くなる直前に論文をまとめないのかとのご助言をいただきました。この一言が、本論文をまとめるきっかけとなったと思っております。深く感謝申し上げますとともに、心よりご冥福をお祈りいたします。

当時湯浅研究室に在籍していた大学院生、石川潤氏、小瀬木美砂氏、三浦彰吾氏、美留町雅弘氏、実験を手伝っていただいた酒井史弥氏、中村隆太氏、松枝拓氏、宇野央人氏、藤野佑介氏をはじめとする学生の皆さんには、種々の行事等で大変お世話になりました。

また、いくつかの研究会、委員会に参加させていただき、様々な方と接することが出来ました。研究に対する考え方、最新の情報などの知見を広めることができたとともに、人とのつながりの大切さを実感致しました。心より感謝申し上げます。

最後に、本論文が完成できたもの、長きにわたり支えてくれた、父 榮、母 孝子のおかげであると思っております。また、暖かく見守ってくれた、姉 愛、義兄 賢二、甥 賢郎のおかげです。心から感謝しています。

2015年3月 野中 英

## 研究業績

### 1 学協会誌等掲載研究論文

- 1) 野中英, 湯浅昇: 簡易透気試験による構造体コンクリートの中性化抵抗性評価, 日本建築学会構造系論文集, 第711号, 2015年5月 (掲載決定) (関連第4章)
- 2) 野中英, 湯浅昇, 金森誠二, 三谷和裕: 塗布材を塗布したコンクリートの品質・その品質と簡易透気速度の関係, 日本建築学会技術報告集, (掲載決定) (関連第5章)
- 3) 野中英, 湯浅昇: ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第700号, pp. 689-696, 2014年6月 (関連第2章)
- 4) Akira Nonaka, Noboru Yuasa: Comparison of Rapid Air-Permeability Testing Methods for Structural Concrete, The Fifth US-JAPAN Symposium on Emerging NDE Capabilities for a Safer World, The Japanese Society for Non-Destructive Inspection and American Society for Nondestructive Testing, Hawaii, pp. 11-17, 2014年6月 (関連第3章)

### 2 その他の印刷物

- 1) 野中英, 湯浅昇, 佐藤孝一: 各種養生を施したコンクリートの簡易透気試験による品質評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, pp. 1849~1854, 2013年7月 (関連第5章)
- 2) 野中英, 田中淳一, 金森誠治, 三谷和裕: 電磁誘導法によるかぶり厚さ測定方法に関する実験的研究, 熊谷組研究報告第71号, pp. 15-24, 2012年12月
- 3) 野中英, 監修: 中田善久: こんなときどうする「コンクリート工事」の現場力 (検査・補修の肝所), 建築技術, No. 753, pp. 154-15, 2012年10月
- 4) 野中英, 佐藤孝一, 金森誠治, 高島展浩: 免震基礎ベースプレート下地グラウト充填工法の開発, 熊谷組研究報告第68号, pp. 67-74, 2009年12月
- 5) 野中英, 監修: 湯浅昇: 第三者が検証可能なRC構造物の品質・性能評価方法 (透水性, 塩化物イオン量), 建築技術, No. 703, pp. 138-139, p15, 2008年8月
- 6) 野中英, 佐藤孝一, 金森誠治, 濱田真: 超高強度材料を用いた鉄筋コンクリート柱の耐火性に関する研究, 熊谷組研究報告第65号, pp. 21-28, 2006年12月
- 7) 野中英, 佐藤孝一, 金森誠治, 石口真美: 高性能特殊増粘剤を用いたモルタルの基礎物性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 1, pp. 1667~1672, 2006年7月
- 8) 野中英, 佐藤孝一, 金森誠治, 濱田真:  $F_c=150\text{N}/\text{mm}^2$ 級超高強度コンクリートの製造技術に関する実験的研究, 熊谷組研究報告第64号, pp. 37-42, 2006年3月

### 3 国際会議における講演発表

- 1) Akira Nonaka, Noboru Yuasa: Rapid Testing Method for Air-Permeability of Concrete in Structure Using Borehole, Fourth international Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, Tokyo, pp. 1917~1922, 2014年11月17日 (関連第2章)

#### 4 学協会等における講演発表

- 1) 野中英, 湯浅昇, 三谷和裕, 田中淳一:  $\phi$ 100mmコア透気性と構造体コンクリートに適用可能な透気試験の比較, 2014年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 1167-1168, 2014年9月 (関連第3章)
- 2) 三谷和裕, 田中淳一, 金森誠治, 野中英: 表面含浸材を塗布したコンクリートの透気性と中性化に関する研究, 2014年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 1171-1172, 2014年9月 (関連第5章)
- 3) 本田悟, 古賀一八, 小山智幸, 湯浅昇, 野中英: 暑中環境で施工される構造体コンクリートのコールドジョイントに関する研究 その3 暑中環境でのフライアッシュの効果, 2014年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 551-552, 2014年9月
- 4) 中澤元宏, 野中英, 三谷和裕, 田中淳一, 松岡直人, 小山秀紀: 耐火性を有したかぶり厚さ補修用ポリマーセメントモルタルの物性, 2014年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 1325-1326, 2014年9月
- 5) 加藤淳司, 立松和彦, 唐沢智之, 長谷川和昭, 起橋孝徳, 野中英, 住学, 高橋祐一, 山岸直樹, 若林信太郎, 吉田敏之, 山田雅裕: コンクリート表面含浸材に関する現状調査 その5 スケーリング抵抗性および耐候性評価結果), 2014年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 385-386, 2014年9月
- 6) 野中英, 湯浅昇, 三谷和裕: 各種養生を施したコンクリートの透気性に関する実験的検討 その2 各種養生剤の評価, 2013年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 1231-1232, 2013年8月
- 7) 本田悟, 小山智幸, 湯浅昇, 野中英: 暑中環境で施工される構造体コンクリートのコールドジョイントに関する研究 その1 研究の概要およびコンクリートのフレッシュ・強度性状, 2013年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 629-630, 2013年8月
- 8) 伊藤是清, 湯浅昇, 野中英, 本田悟, 小山智幸, 山田義智: 暑中環境で施工される構造体コンクリートのコールドジョイントに関する研究 その1 研究の概要およびコンクリートのフレッシュ・強度性状, 2013年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 631-632, 2013年8月
- 9) 三谷和裕, 野中英, 佐藤孝一, 金森誠治: 補修用ポリマーセメントモルタルの施工性および耐火性に関する実験, 2013年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 801-802, 2013年8月
- 10) 浦川和也, 野中英, 三谷和裕, 井戸康浩, 木村仁治, 鈴木好幸, 宮野和樹: コンクリートの乾燥収縮ひずみの早期判定方法に関する実験的検討 (その1 実験概要および埋め込み型ひずみ計の選定実験), 2013年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 61-62, 2013年8月
- 11) 鈴木好幸, 浦川和也, 野中英, 三谷和裕, 井戸康浩, 木村仁治, 宮野和樹: コンクリートの乾燥収縮ひずみの早期判定方法に関する実験的検討 (その2 水中養生期間や高温環境が乾燥収縮歪みに与える影響), 2013年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 62-63, 2013年8月
- 12) 木村仁治, 浦川和也, 野中英, 三谷和裕, 井戸康浩, 鈴木好幸, 宮野和樹: コンクリートの乾燥収縮ひずみの早期判定方法に関する実験的検討 (その3 レディーミクストコンクリートの乾燥収縮ひずみ測定結果と早期判定方法の検討), 2013年度大会日本建築学会学術講演概要

集, pp64-65, 2013年8月

- 13) 野中英, 大沼薫春, 三谷和裕, 佐藤孝一, 湯浅昇: 養生・調合の異なるコンクリートの品質評価に関する研究 - その1 概要及び含水率 -, 2012年度日本建築学会関東支部研究報告集 I, pp. 109-112, 2013年3月 (関連第5章)
- 14) 大沼薫春, 野中英, 三谷和裕, 佐藤孝一, 湯浅昇: 養生・調合の異なるコンクリートの品質評価に関する研究 - その2 透気性 -, 2012年度日本建築学会関東支部研究報告集 I, pp. 103-116, 2013年3月 (関連第5章)
- 15) 三谷和裕, 野中英, 大沼薫春, 佐藤孝一, 湯浅昇: 養生・調合の異なるコンクリートの品質評価に関する研究 - その3 耐久性と表層強度 -, 2012年度日本建築学会関東支部研究報告集 I, pp. 117-120, 2013年3月 (関連第5章)
- 16) 山口尚也, 稲葉大和, 本田悟, 小山智幸, 湯浅昇, 野中英: 暑中で施工される構造体コンクリートのコールドジョイントに関する研究 その1 研究の概要及びコンクリートのフレッシュ・強度性状, 日本建築学会九州支部研究報告 第52号, pp. 185-188, 2013年3月
- 17) 野中英, 湯浅昇, 本田悟, 小山智幸, 伊藤是清, 山田義智, 山口尚也, 松本侑也: 暑中で施工される構造体コンクリートのコールドジョイントに関する研究 その2 透気性によるコールドジョイントの評価, 日本建築学会九州支部研究報告 第52号, pp. 189-192, 2013年3月
- 18) 野中英, 湯浅昇: 簡易透気試験時の含水率測定方法に関する実験的検討, 非破壊検査協会平成24年秋期講演大会講演概要集, pp. 43-46, 2012年10月
- 19) 野中英, 湯浅昇, 大沼薫春, 各種養生を施したコンクリートの透気性に関する実験的検討, 2012年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 249-250, 2012年9月 (関連第5章)
- 20) 高橋祐一, 濱崎仁, 閑田徹志, 安田正雪, 小島正朗, 立松和彦, 野中英, 日高晶, 山田雅裕, 梅本宗宏, 和田高清, 山田人司, 梶田秀幸: 補修用ポリマーセメントモルタルの耐久性および吸発熱特性に関する実験, 2012年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 1103-1104, 2012年9月
- 21) 大沼薫春, 野中英: 電磁誘導法によるかぶり厚さ補正方法に関する実験的検討, 2012年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 639-640, 2012年9月
- 22) 野中英, 湯浅昇: 各種養生を行ったコンクリートの透気性に関する実験的検討, 日韓建築材料シンポジウム, pp. 128-131, 2012年9月
- 23) 野中英, 八朝秀晃, 湯浅昇, 大沼薫春: 各種養生によるコンクリート表層の品質改善効果に関する実験的検討, 土木学会第67回年次学術講演会, pp. 951-952, 2012年9月
- 24) 大沼薫春, 野中英: 各種因子が電磁誘導法によるかぶり厚さ推定値に及ぼす影響, 土木学会第67回年次学術講演会, pp. 503-504, 2012年8月
- 25) 野中英, 湯浅昇, 美苗町雅弘:  $\phi$  10mmドリル削孔を用いたコンクリートの含水率分布の測定方法, シンポジウム: コンクリート構造物の非破壊検査論文集 (Vol. 4) 非破壊検査協会, pp. 215-216, 2012年8月
- 26) 野中英, 佐藤孝一, 八朝秀晃, 湯浅昇, 各種透気試験による養生の違いが表層コンクリートの透気性に及ぼす影響の検討, シンポジウム: コンクリート構造物の非破壊検査論文集 (Vol. 4)

- 非破壊検査協会, pp. 77-78, 2012年8月(関連第5章)
- 27) 野中英, 佐藤孝一, 大沼薫春, 電磁誘導法による鉄筋かぶり厚さ測定技術に関する実験的検討, シンポジウム: コンクリート構造物の非破壊検査論文集 (Vol. 4) 非破壊検査協会, pp. 13-16, 2012年8月
  - 28) 野中英, 佐藤孝一, 大沼薫春, 鉄筋かぶり厚さ測定精度向上に関する実験的研究, 日本大学生産工学部第44回学術講演会講演概要, pp. 537-540, 2011年12月
  - 29) 野中英, 大沼薫春: 電磁誘導法による鉄筋かぶり厚さ推定に関する実験的研究—近接鉄筋および直交鉄筋の影響—, 土木学会第66回年次学術講演会, pp. 443-444, 2011年9月
  - 30) 大沼薫春, 野中英: 電磁誘導法による鉄筋かぶり厚さ測定精度に関する実験的検証, 土木学会第66回年次学術講演会, pp. 445-446, 2011年9月
  - 31) 濱崎仁, 鹿毛忠継, 根本かおり, 閑田徹志, 安田正雪, 小島正朗, 野中英, 高橋祐一, 日高晶, 梅本宗宏: 補修用ポリマーセメントモルタルの耐久性および吸発熱特性に関する実験 その1 実験概要および促進中性化試験の結果, 2011年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 277-278, 2011年8月
  - 32) 野中英, 濱崎仁, 小島正朗, 高橋祐一, 日高晶, 山田雅裕, 梶田秀幸, 和田高清, 立松和彦: 補修用ポリマーセメントモルタルの耐久性および吸発熱特性に関する実験 その2 乾燥収縮, 塩化物イオン浸透深さ, 凍結融解試験の結果, 2011年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 279-280, 2011年8月
  - 33) 鈴木好幸, 濱崎仁, 閑田徹志, 安田正雪, 小島正朗, 野中英, 山田人司: 補修用ポリマーセメントモルタルの耐久性および吸発熱特性に関する実験 その3熱分析の結果, 2011年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 281-282, 2011年8月
  - 34) 野中英, 佐藤孝一, 時岡誠剛: ウォータージェットによるコンクリート表面処理に関する実験的検討, 2010年度ウォータージェット技術年次報告会論文集, pp. 17-20, 2011年1月
  - 35) 野中英, 佐藤孝一, 時岡誠剛, 田中淳一, 金森誠治, 森謙一: ウォータージェットによる表面処理技術の実験的検討, 日本大学生産工学部第43回学術講演会講演概要, pp. 11-18, 2010年12月
  - 36) 時岡誠剛, 佐藤孝一, 野中英, 田中淳一, 金森誠治, 森謙一: ウォータージェットによるコンクリート表面処理に関する研究 —その1 実験概要—, 2010年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 491-492, 2010年9月
  - 37) 金森誠治, 佐藤孝一, 時岡誠剛, 野中英, 田中淳一, 森謙一: ウォータージェットによるコンクリート表面処理に関する研究 —その2 基板コンクリートの品質およびウォータージェット処理状況・表面処理性能—, 2010年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 493-494, 2010年9月
  - 38) 田中淳一, 佐藤孝一, 時岡誠剛, 野中英, 金森誠治, 森謙一: ウォータージェットによるコンクリート表面処理に関する研究 —その3 表面処理後の目視観察・画像処理結果—, 2010年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 495-496, 2010年9月
  - 39) 野中英, 佐藤孝一, 時岡誠剛, 田中淳一, 金森誠治, 森謙一: ウォータージェットによるコ

- ンクリート表面処理に関する研究 ーその4 表面処理深さ・長さ増加率および接着強さ試験結果ー, 2010年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 497-498, 2010年9月
- 40) 濱崎仁, 鹿毛忠継, 小島正朗, 野中英, 山田人司, 梅本宗宏, 日高晶, 閑田徹志, 安田正雪: 補修用ポリマーセメントモルタルの力学性状および発熱性状に関する実験 その1 実験概要およびフレッシュ試験・強度試験の結果, 2010年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 145-146, 2010年9月
- 41) 濱崎仁, 鹿毛忠継, 小島正朗, 野中英, 山田人司, 梅本宗宏, 日高晶, 閑田徹志, 安田正雪: 補修用ポリマーセメントモルタルの力学性状および発熱性状に関する実験 その2 接着性および発熱性状に関する結果, 2010年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 147-148, 2010年9月
- 42) 大沼薫春, 野中英, 篠原茂: 電磁波レーダ法による鉄筋かぶり厚さ測定に関する実験的研究 その1 概要および各種計測器による測定結果, 土木学会第65回年次学術講演会, pp. 339-340, 2010年9月
- 43) 野中英, 篠原茂, 大沼薫春: 電磁波レーダ法による鉄筋かぶり厚さ測定に関する実験的研究 その2 含水率と比誘電率の関係, 土木学会第65回年次学術講演会, pp. 775-776, 2010年9月
- 44) 金森誠治, 佐藤孝一, 田中淳一, 野中英, 大沼薫春: 非破壊試験による鉄筋のかぶり厚さ測定に関する実験的研究 (その1 実験概要), 2009年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 773-774, 2009年8月
- 45) 野中英, 佐藤孝一, 田中淳一, 金森誠治, 大沼薫春: 非破壊試験による鉄筋のかぶり厚さ測定に関する実験的研究 (その2 装置の基本性能, かぶり厚さ実測値, 圧縮強度, 含水率), 2009年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 775-776, 2009年8月
- 46) 田中淳一, 佐藤孝一, 金森誠治, 野中英, 大沼薫春: 非破壊試験による鉄筋のかぶり厚さ測定に関する実験的研究 (その3 電磁誘導法によるかぶり厚さ測定結果), 2009年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 777-778, 2009年8月
- 47) 大沼薫春, 佐藤孝一, 田中淳一, 金森誠治, 野中英: 非破壊試験による鉄筋のかぶり厚さ測定に関する実験的研究 (その4 電磁波レーダ法によるかぶり厚さ測定結果), 2009年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 779-780, 2009年8月
- 48) 野中英, 森康雄, 大沼薫春: 非破壊試験による鉄筋のかぶり厚さ測定方法に関する実験的研究 ー含水状態 (比誘電率) の影響ー, 土木学会第64回年次学術講演会, pp. 725-726, 2009年8月
- 49) 大沼薫春, 野中英, 森康雄: 非破壊試験による鉄筋のかぶり厚さ測定方法に関する実験的研究 ーかぶり厚さが大きい場合の検討ー, 土木学会第64回年次学術講演会, pp. 723-724, 2009年8月
- 50) 野中英, 佐藤孝一, 金森誠治: 非破壊による鉄筋のかぶり厚さ測定方法の検討, シンポジウム: コンクリート構造物の非破壊検査論文集 (Vol. 3) 非破壊検査協会, pp. 225-230, 2009年
- 51) 野中英, 佐藤孝一, 金森誠治: 免震基礎グラウト工法における打継ぎ時間の違いが充填性, 付着強度に及ぼす影響, 2007年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 909-910, 2008年9月

- 52) 西田浩和, 野中英, 浦川和也, 梅本宗宏, 西浦範昭, 山田人司, 梶田秀幸: 超高強度コンクリートの自己収縮に関する実験的研究 (その1 実験概要, 圧縮強度, ヤング係数), 2007年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 255-256, 2007年8月
- 53) 浦川和也, 野中英, 梅本宗宏, 西浦範昭, 山田人司, 西田浩和, 梶田秀幸: 超高強度コンクリートの自己収縮に関する実験的研究 (その2 強度の定式化), 2007年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 257-258, 2007年8月
- 54) 梶田秀幸, 野中英, 浦川和也, 梅本宗宏, 西浦範昭, 山田人司, 西田浩和, 宮野和樹: 超高強度コンクリートの自己収縮に関する実験的研究 (その3 線膨張係数), 2007年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 259-260, 2007年8月
- 55) 梅本宗宏, 野中英, 浦川和也, 西浦範昭, 山田人司, 西田浩和, 梶田秀幸: 超高強度コンクリートの自己収縮に関する実験的研究 (その4 自己収縮試験結果), 2007年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 261-262, 2007年8月
- 56) 増田隆行, 野中英, 浦川和也, 梅本宗宏, 西浦範昭, 山田人司, 西田浩和, 梶田秀幸: 超高強度コンクリートの自己収縮に関する実験的研究 (その5 実証実験の概要と施工性・強度試験の結果), 2007年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 263-264, 2007年8月
- 57) 野中英, 佐藤孝一, 金森誠治, 石口真美: 高粘性モルタルの流動性試験方法に関する基礎的実験, 土木学会第62回年次学術講演会, pp. 405-406, 2007年9月
- 58) 野中英, 湯浅昇, 西田健治, 笠井芳夫, 松井勇: 工後34年経過した構造体コンクリートの含水状態と簡易透気速度の関係, シンポジウム: コンクリート構造物への非破壊検査の展開論文集 (Vol. 2), 非破壊検査協会, pp. 161-164, 2006年
- 59) 野中英, 吉松賢二, 佐藤孝一, 前川利雄, 佐々木静郎, 梅津朋岳, 佐藤聡: 低放射化コンクリートの中性子照射実験, 2006年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 21-22, 2006年9月
- 60) 梅津朋岳, 吉松賢二, 佐藤孝一, 前川利雄, 佐々木静郎, 野中英, 佐藤聡: 低放射化コンクリートの中性子照射実験 その2 中性子照射実験, 2006年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 23-24, 2006年9月
- 61) 野中英, 佐藤孝一, 金森誠治, 石口真美: 高性能特殊増粘剤を用いたモルタル配合に関する基礎実験—単位水量による影響—, 土木学会第61回年次学術講演会, pp. 53-54, 2006年9月
- 62) 野中英, 佐藤孝一, 金森誠治, 石口真美: 高性能特殊増粘剤を用いたモルタル配合に関する基礎物性, 日本大学生産工学部学術講演会, pp. 167-172, 2006年12月
- 63) 湯浅昇, 野中英, 松井勇, 笠井芳夫: 竣工後33年経過した実構造物の簡易透気速度、簡易吸水速度 その1 方位の違いによる影響, 2005年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 1239-1240, 2005年9月
- 64) 野中英, 湯浅昇, 松井勇, 笠井芳夫: 竣工後33年経過した実構造物の簡易透気速度、簡易吸水速度 その2 降雨の有無、屋内、屋外の影響及び室内柱, 2005年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 1241-1242, 2005年9月
- 65) 野中英, 佐藤孝一, 金森誠治: コンクリートの汚れ抑制効果に関する基礎実験 その1 基礎物性の確認, 2004年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 809-810, 2004年8月

- 66) 金森誠治, 佐藤孝一, 野中英: コンクリートの汚れ抑制効果に関する基礎実験 その2 屋外暴露実験, 2004年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 811-812, 2004年8月
- 67) 野中英, 佐藤孝一, 金森誠治, 岩井孝幸, 森康雄: トンネル補強工法の開発(その2) - 裏込めコンクリートの配合選定および施工実験 -, 土木学会第59回年次学術講演会, pp. 679-680, 2004年9月
- 68) 野中英, 佐藤孝一: 硫酸抵抗性に優れたモルタルの性能向上に関する基礎実験, 第36回日本大学生産工学部学術講演会, pp. 101-104, 2003年12月
- 69) 野中英, 小山秀紀, 戸上郁英: 硫酸抵抗性を有するモルタルの性能向上に関する基礎実験, 土木学会第58回年次学術講演会, pp. 53-54, 2003年9月
- 70) 小山秀紀, 野中英, 松田和繁, 宇野定雄, 鴻巣正幸: コンクリート構造物の汚れ防止に関する基礎実験, 土木学会第58回年次学術講演会, pp. 229-230, 2003年9月
- 71) 野中英, 笠井芳夫, 湯浅昇, 松井勇: ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法, シンポジウム, コンクリート構造物への非破壊検査への期待論文集 (Vol. 1), pp. 355-360, 2003年7月 (関連第2章)
- 72) 野中英, 石田良平, 小山秀紀, 戸上郁英: 下水道処理施設環境における耐酸コンクリートの品質, 第35回日本大学生産工学部学術講演会, pp. 233-236, 2002年12月
- 73) 野中英, 小山秀紀, 石田良平, 戸上郁英, 中沢均, 遠田和之: 耐酸コンクリートの配合に関する検討, 土木学会第57回年次学術講演会概要集, pp. 1079-1080, 2002年9月
- 74) 小山秀紀, 野中英, 宇野定雄, 松岡直人, 鰐淵憲昭, 猪狩直人, 平松一樹: 天然系ワックスエマルジョンの防塵防止効果について, 土木学会第57回年次学術講演会概要集, pp. 933-934, 2002年9月
- 75) 野中英, 佐藤孝一, 石田良平, 村上順也, 小山秀紀: 半導体製造施設向け塗料の耐酸性に関する検討, 2002年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 195-196, 2002年8月
- 76) 石田良平, 長谷川清光, 野中英, 戸上郁英: コンクリートから発生するアンモニアガスに関する検討, 2002年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 635-636, 2002年8月
- 77) 野中英, 石田良平, 小山秀紀: 耐硫酸コンクリートに関する基礎実験, 日本大学生産工学部第34回学術講演会, pp. 187-190, 2001年12月
- 78) 野中英, 石田良平, 小山秀紀, 鴻巣正幸: コンクリート建築物への防カビ剤の適用に関する検討, 2001年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 59-60, 2001年9月
- 79) 野中英, 石田良平, 小山秀紀: 混和材を多量使用した耐酸性モルタルの基礎実験, 日本大学生産工学部第33回学術講演会, pp. 175-178, 2000年12月
- 80) 野中英, 石田良平, 小山秀紀, 鴻巣正幸, 戸上郁英: コンクリート表層部の防カビ方法に関する基礎実験, 2000年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 315-316, 2000年9月
- 81) 野中英, 石田良平, 小山秀紀, 戸上郁英, 松田敏: 耐硫酸抵抗性に優れたモルタル配合に関する基礎実験, 日本大学生産工学部第32回学術講演会, pp. 223-224, 1999年12月
- 82) 笠井芳夫, 松井勇, 湯浅昇, 野中英: ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法 - その1 簡易透気試験方法(案)の提案 -, 1999年度大会日本建築学会学術講演概

要集, pp. 699-700, 1999年9月 (関連第2章)

- 83) 野中英, 笠井芳夫, 松井勇, 湯浅昇: ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法 - その2 簡易透気試験方法 (案) 解説 -, 1999年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 701-702, 1999年9月 (関連第2章)
- 84) 野中英, 笠井芳夫, 松井勇, 湯浅昇: 簡易透気試験を用いた構造体コンクリートの中性化抵抗性評価, 日本非破壊検査協会平成11年度春期大会講演概要集, pp. 115-118, 1999年5月 (関連第3章)
- 85) 野中英, 笠井芳夫, 松井勇, 湯浅昇: 簡易透気試験を用いた耐中性化評価 - 各種セメントを用いた場合 -, 日本大学生産工学部第31回学術講演会, pp. 75-78, 1998年12月 (関連第4章)
- 86) 野中英, 笠井芳夫, 松井勇, 湯浅昇: コンクリートの簡易透気速度と細孔構造、含水率との関係, 日本大学生産工学部第31回学術講演会, pp. 67-70, 1998年12月
- 87) 野中英, 笠井芳夫, 松井勇, 湯浅昇: ドリル削孔粉によるコンクリート中の塩化物イオン量現場判定方法, 1998年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 1131-1132, 1998年9月
- 88) 野中英, 笠井芳夫, 松井勇, 湯浅昇: 表層コンクリートの品質, 日本大学生産工学部第30回学術講演会, pp. 73-76, 1997年12月 (関連第4章)
- 89) 野中英, 笠井芳夫, 松井勇, 湯浅昇: フェロニッケルスラグ砂を用いたモルタルの加熱および冷却繰り返しに対する抵抗性, 1997年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 151-152, 1997年9月
- 90) 笠井芳夫, 松井勇, 湯浅昇, 飛坂基夫, 柳啓, 野中英: 簡易透気試験を用いた構造体コンクリートの耐久性評価, 1997年度大会日本建築学会学術講演概要集, pp. 21-22, 1997年9月 (関連第4章)

## 5 著書

- 1) 加藤武彦, 渡辺英彦, 田中淳一, 金森誠治, 野中英 (5章執筆), 吉松賢二, 仲宗根淳, 前川利雄, 森利弘, 近藤祐輔, 佐々木静郎, 石橋久義, 村上順也: 〈わかる材料学〉6 建築材料, (株)学芸出版, 2009年11月10日
- 2) 塚田茂, 上田真, 佐藤孝一, 吉松賢二, 渡辺英彦, 金森誠治, 野中英 (12章執筆), 稲井田洋二, 萩原浩: 〈建築携帯ブック〉コンクリート, (株)井上書院, 2006年12月20日