

論文 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

野中 英*1・湯浅 昇*2・佐藤 孝一*3

要旨: コンクリートの品質向上のため、様々な養生方法が検討されているが、それらを評価する方法は研究段階のものが多いのが現状である。本論では、乾燥開始材齢および表面含浸材などの養生効果のある塗布剤を塗布した場合の評価について簡易透気試験により検討を行った。その結果、透気性は水セメント比の効果が支配的であり、乾燥開始材齢、膜養生剤では若干の差が認められたものの、収縮低減剤、表面含浸剤による養生効果は確認されなかった。また、透気性と各種物性の関係では、水セメント比の違いを含むすべてのデータでは、中性化と反発度で相関が認められたが、水セメント比毎で評価すると相関は認められなかった。

キーワード: 透気性, 養生, 品質評価, 非破壊試験, 中性化, 塩化物イオン浸透性

1. はじめに

コンクリート表層部の品質を確保するには、施工時における打込みや締固め、施工後の湿潤養生を入念に行う必要がある。特に型枠を脱型する時期や脱型後の養生は重要であり、湿潤養生期間が長いほど緻密なコンクリートとなる¹⁾。また最近では、湿潤養生終了後にも表面含浸材などを脱型後のコンクリート表面に塗布することにより、コンクリート表層の品質を緻密化させる工法なども普及してきている。一方で、実際に施工した養生効果を検証するためには、非破壊・微破壊試験により実構造物による評価・管理が必要となるが、確立された試験方法は少なく研究段階のものが多い²⁾。

表面含浸材や膜養生剤を施工する時の品質管理は、「JSCE-K577 表面含浸材の試験方法 (案)」³⁾などの品質基準を満たす材料が、所定量均質に施工計画に基づいて塗布されているかを確認するのみであり、施工後の養生効果を確認するには至っていない。そこで筆者らは、表層コンクリートの品質の一つである透気性に着目して、実構造物に適用可能な簡易透気試験⁴⁾により、各種養生を行ったコンクリートの品質を評価する方法を検討する。

本研究では、水セメント比 50%、60%、80%のコンクリートに、乾燥開始材齢を変化させた場合および収縮低減剤、表面含浸材(けい酸塩系、シラン系)、膜養生剤(以下、3種類をまとめて塗布剤と呼ぶ)を塗布した場合を対象に簡易透気試験を行いその結果と促進中性化深さ、塩化物イオン浸透深さ、ひっかき傷幅、反発度との関係から養生効果の評価を実験的に検討する。また、透気性に影響をおよぼす含水状態およびトレント法透気試験との比較についても検討を行う。

2. 実験概要

2.1 実験ケース

表-1に、実験ケース一覧を示す。養生は、型枠養生1ケース、ビニール封緘4ケース、収縮低減剤3ケース、表面含浸材(けい酸塩系)3ケース、表面含浸材(シラン系)3ケース、膜養生剤3ケースの計17ケースとした。

2.2 試験体およびコンクリートの調査

(1) 試験体

簡易透気試験、含水率の測定、反発度の測定、ひっかき試験の試験体は、寸法を500×500×150mmとし、500×500mmの面を試験面として使用した。促進中性化試験、

表-1 実験ケース一覧

養生の仕様		試験体 記号	脱型・養生開始 材齢	乾燥開始 材齢
型枠養生		1-1	1日	1日
ビニール封緘		2-1	1日	3日
		2-2	1日	5日
		2-3	1日	7日
		2-4	1日	28日
収縮低減剤	収縮低減剤 A	3-1	5日	5日
	収縮低減剤 B	3-2	5日	5日
	収縮低減剤 C	3-3	5日	5日
表面含浸材 (けい酸塩系)	けい酸塩系 A	4-1	5日	5日
	けい酸塩系 B	4-2	5日	5日
	けい酸塩系 C	4-3	5日	5日
表面含浸材 (シラン系)	シラン系 A	5-1	5日	5日
	シラン系 B	5-2	5日	5日
	シラン系 C	5-3	5日	5日
膜養生剤	パラフィン系 A	6-1	1日	1日
	パラフィン系 B	6-2	1日	1日
	アクリル系	6-3	1日	1日

*1 (株)熊谷組 技術研究所 建設材料研究グループ (正会員)

*2 日本大学 生産工学部 建築工学科 教授 博士 (工学) (正会員)

*3 (株)熊谷組 技術研究所 (正会員)

塩化物イオン浸透性試験の試験体は、寸法を 100×100×400mm の試験体を 3 分割したものとし、100×400mm の型枠に接していた部分を試験面として使用した。100×100×400mm 試験体における分割は、塗布剤を塗布した後の材齢 28 日で行った。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-1 に、500×500×150mm の試験体を示す。

(2) コンクリートの調合

本実験で使用したコンクリートの調合は、水セメント比 50%, 60%, 80% の 3 種類とした。使用材料は、セメントに普通ポルトランドセメント、細骨材につくば市産川砂 (S1: 表乾密度 2.50g/cm³)、つくば市産砕砂 (S2: 表乾密度 2.59g/cm³)、粗骨材につくば市産砕石 (表乾密度 2.66g/cm³) を使用した。表-2 に使用材料を表-3 に、コンクリートの調合を示す。

2.3 養生

試験体の養生はコンクリートの打設後、脱型・養生開始材齢まで温度 20℃、相対湿度 60% の恒温恒湿室内において型枠内で静置し、脱型・養生開始材齢で各種養生を行った。

ビニール封緘、膜養生剤による養生は、材齢 1 日で型枠を取り外した後、500×500mm および 100×400mm の試験面をビニール封緘ではビニールを用いて封緘し、膜養生剤では所定量を塗布した。ビニール封緘は、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。収縮低減剤、表面含浸材 (けい酸塩系、シラン系) による養生は、材齢 5 日で型枠を取り外した後、500×500mm および 100×400mm の試験面に所定量を塗布した。養生実施後は、試験材齢まで温度 20℃、相対湿度 60% の恒温恒湿室内で静置した。塗布剤の塗布方法は、試験面が鉛直面となるように試験体を設置した後に刷毛を用いて塗布剤を塗布した。塗布剤の塗布量は、メーカーの示す標準塗布量を目標としたが、標準塗布量を塗布できない場合にはその時点で塗布を終了した。実際の塗布量は標準

表-2 使用材料

セメント	C	普通ポルトランドセメント (密度 3.15g/cm ³)
細骨材	S1	つくば市産川砂 (表乾密度 2.50g/cm ³)
	S2	つくば市産砕砂 (表乾密度 2.59g/cm ³)
粗骨材	G	つくば市産採石 (表乾密度 2.66g/cm ³)
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)

塗布量に対して、水セメント比 50% で 60~70%, 水セメント比 60% で 70~90% であった。塗布量の減少はコンクリート表面の緻密さおよび含水状態によると考えられる。

2.4 試験方法

試験は、表-4 に示した項目について以下の方法により行った。また、500×500×150mm 試験体における試験位置を図-1 に示す。

(1) 簡易透気試験

簡易透気試験は、図-2 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 の孔および装置を用いて測定するものである。測定は材齢 3 ヶ月において、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 X₁kPa から X₂kPa に低下する時間(T)を計測した。このとき、低下した真空度(X₂-X₁)kPa を時間(t)で割った値を簡易透気速度と呼び、透気性の指標とした。X₁および X₂は、X₁を 21.3kPa、X₂を 25.3kPa (真空度の低下時間が 10 秒以下の場合には、X₁を 13.3kPa、X₂を 33.3kPa)として測定した。

(2) 含水率の測定

含水率は材齢 3 ヶ月において、K 社製の押当て式静電容量含水率計により測定した。

(3) トレント法透気試験

トレント法透気試験は、文献⁵⁾に従い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、内部チャ

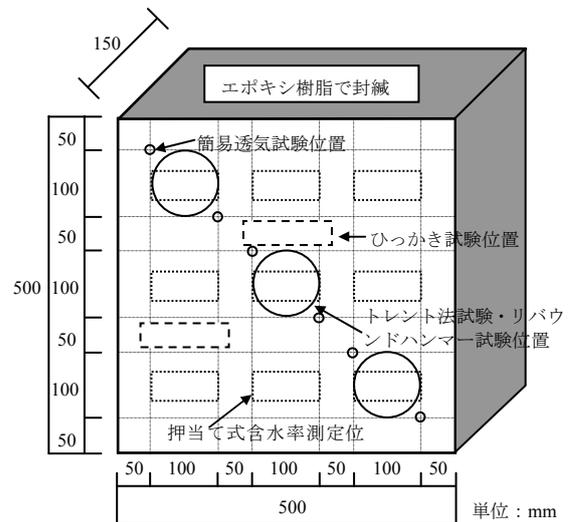


図-1 500×500×150mm の試験体図

表-3 コンクリートの調合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	組骨材の最大寸法 (mm)	単位量 (kg/m ³)							空気量 (%)	スランブ (cm)	材齢 28 日 圧縮強度 (N/mm ²)
			水	セメント	細骨材		粗骨材	混和剤				
			W	C	S1	S2	G	Ad1	Ad2			
50	45.0	20	185	370	184	570	955	3.70	1.11	5.8	19.5	34.5
60	46.6	20	185	308	196	608	955	3.08	0.93	5.0	17.0	29.6
80	50.0	20	195	244	213	663	908	2.44	0.61	5.0	21.0	18.5

ンバーの気圧変化から透気係数を算出した。

(4) 促進中性化試験

促進中性化試験は、促進開始材齢を 28 日として、促進開始から促進 13 週で中性化深さを測定した。中性化深さの測定は、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割裂面の両面の計 10 点を測定し、その平均値を中性化深さとした。

(5) 塩化物イオン浸透性試験

塩化物イオン浸透性試験は、浸漬開始材齢を 28 日として、浸漬開始から浸漬 13 週で、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の測定は、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て、コンクリート表面から蛍光を発する部分を割裂面の両面の計 10 点を測定し、その平均値を塩化物イオン浸透深さとした。

(6) ひっかき傷幅の測定

ひっかき試験は材齢 3 ヶ月において日本仕上げ学会式のひっかき試験器により、加圧力 9.8N (1.0kg でひっかいたときの傷幅をクラックスケールにより 5 点測定し、その平均をひっかき傷幅とした。

(7) 反発度の測定

反発度は材齢 3 ヶ月において、リバウンドハンマーにより実施した。測定は、JIS A 1149 に準じて、1 箇所当たりの測定点数を 9 点とし、その平均を反発度とした。

3. 実験結果

3.1 各種養生における簡易透気速度

図-3~図-5に、水セメント比毎の各種養生における材齢 3 ヶ月の簡易透気速度を示す。水セメント比の違いによる簡易透気速度は、水セメント比が大きくなるのに伴い大きくなる傾向を示した。乾燥開始材齢の違いによる簡易透気速度は、乾燥開始材齢が遅くなると小さくなる傾向を示した。この傾向は、水セメント比が大きくなるほど顕著であった。

収縮低減剤、表面含浸材(けい酸塩系、シラン系)を塗布(塗布材齢 5 日)したコンクリートの簡易透気速度

表-4 試験項目・試験方法および試験体寸法

試験項目	試験方法	試験体寸法 (mm)
簡易透気試験	文献 ⁴⁾ に準拠して測定	500×500×150
含水率の測定	市販の押当て式含水率計により測定	500×500×150
トレント法透気試験	文献 ⁵⁾ に準拠して測定	500×500×150
促進中性化試験	JSCE-K-571	100×100×400
塩化物イオン浸透性試験	JSCE-K-571	100×100×400
ひっかき傷幅の測定	文献 ⁶⁾ に準拠して測定	500×500×150
反発度の測定	JIS A 1155	500×500×150

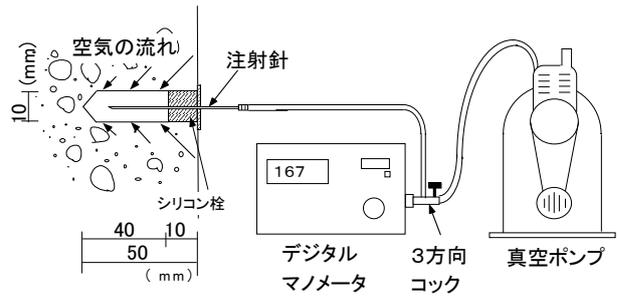


図-2 簡易透気試験装置

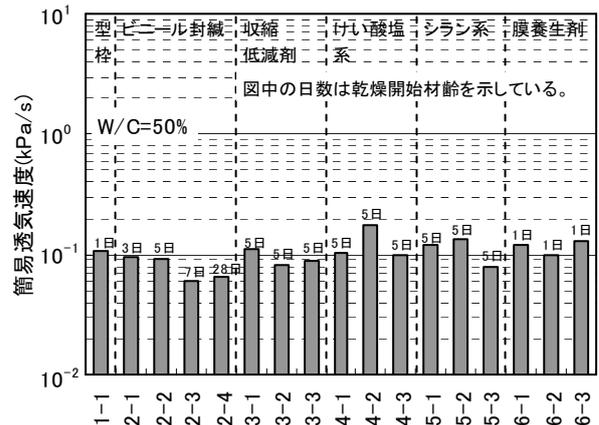


図-3 各種養生における材齢 3 ヶ月の簡易透気速度 (W/C=50%)

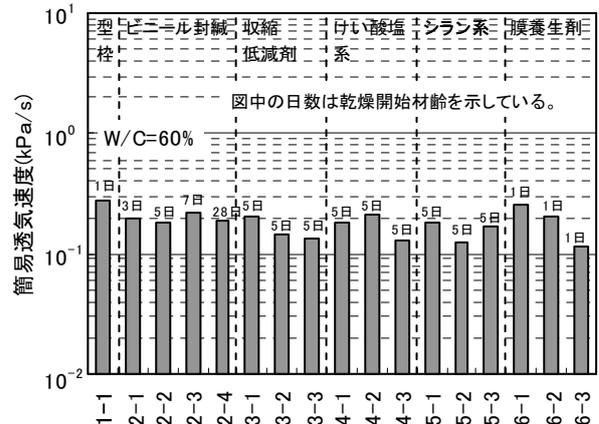


図-4 各種養生における材齢 3 ヶ月の簡易透気速度 (W/C=60%)

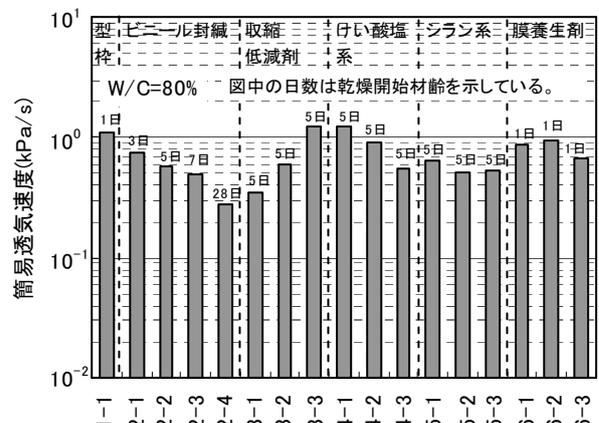


図-5 各種養生における材齢 3 ヶ月の簡易透気速度 (W/C=80%)

は、乾燥開始材齢 5 日の結果と比較して、水セメント比 50%では全体的に同等か大きくなり、水セメント比 60%、80%では養生による違いは認められず、養生の効果を明確に確認できなかった。

膜養生剤を塗布（塗布材齢 1 日）したコンクリートの簡易透気速度は、乾燥開始材齢 1 日の結果と比較して水セメント比 50%では同等程度であったが、水セメント比 60%、80%では小さくなり、養生の効果が確認された。また各水セメント比では、養生による傾向が異なる結果となった。

塗布剤養生では、塗布剤の含浸深さが最大でも数 mm 程度と言われており、養生効果はごく表面であるといえる³⁾。また、封緘養生では、乾燥により表層と内部で不均質な状況となっており、その影響深さはかぶり厚さである 50mm 程度までと言われており¹⁾。ここで簡易透気試験は既往の研究⁴⁾により、同一直径において削孔深さを変化させた場合に削孔内部の空気の流入可能な面積が小さいほど簡易透気速度は大きくなり、削孔深さが 50mm 以上になると空気の流入可能な面積が増加した場合の簡易透気速度の変化は少なくなる。このことから、簡易透気速度は表面の影響を大きく受けるが、50mm 程度までの内部の影響も受おり、本実験に用いた養生剤の評価も可能であると考えられる。

しかし本試験では、乾燥開始材齢、膜養生剤で差が認められたが、収縮低減剤、表面含浸材（けい酸塩系、シラン系）では明確な差は認められず、塗布剤の養生効果を評価するには至らなかった。収縮低減剤、表面含浸材（けい酸塩系、シラン系）で傾向が得られない原因としては、脱型直後は含水率が高く、塗布剤が内部まで浸透しないことにより養生効果が少なく評価が困難であったためと考えられる。

3.2 含水率

図-6 に、各種養生と押当て式含水率を示す。水セメント比の違いによる含水率は、水セメント比 50%、60%

では同程度のものが多く、水セメント比 80%では小さくなる傾向が認められた。

乾燥開始材齢の違いによる含水率は、乾燥開始材齢が遅くなるほど大きくなる傾向となった。

塗布剤を塗布したコンクリートの含水率は、同一材齢で脱型したコンクリートと比べ大きくなる傾向にあった。

図-7 に、押当て式含水率と簡易透気速度の関係を示す。含水率の違いによる簡易透気速度は、水セメント比 80%で含水率の低下に伴い大きくなる傾向にあったが、水セメント比 50%、60%では含水率の違いによる傾向は認められなかった。

3.3 透気性

図-8 に、簡易透気速度とトレント法透気係数の関係を示す。トレント法透気係数は、簡易透気速度が大きくなるのに伴い大きくなる傾向にあり、累乗近似の結果決定係数は 0.89 と高い相関が認められた。

水セメント比毎における簡易透気速度とトレント法透気係数の関係は、どの水セメント比においても全データの近似線に近い値となり、そのばらつきも少ない。

3.4 耐久性

(1) 簡易透気速度と促進中性化の関係

図-9 に、簡易透気速度と促進中性化深さの関係を示

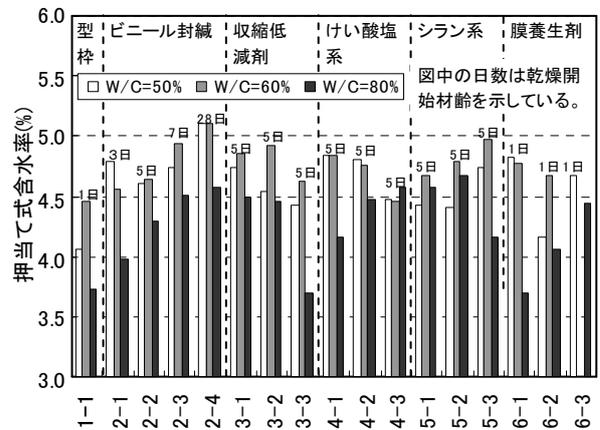


図-6 各種養生と押当て式含水率の関係

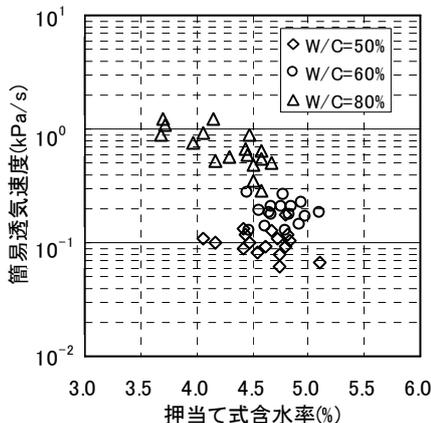


図-7 簡易透気速度と押当て式含水率の関係

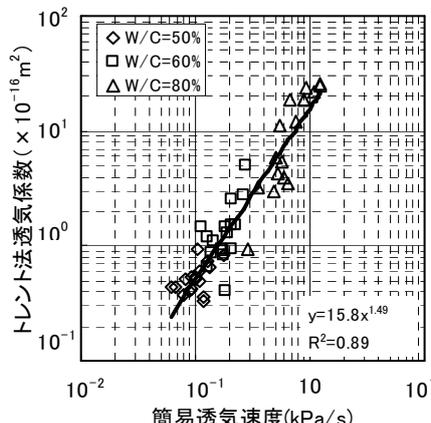


図-8 簡易透気速度とトレント法透気係数の関係

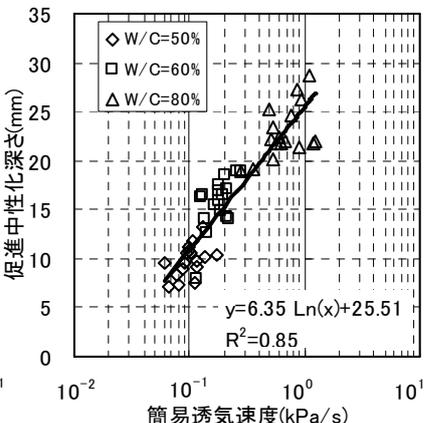


図-9 簡易透気速度と促進中性化深さの関係

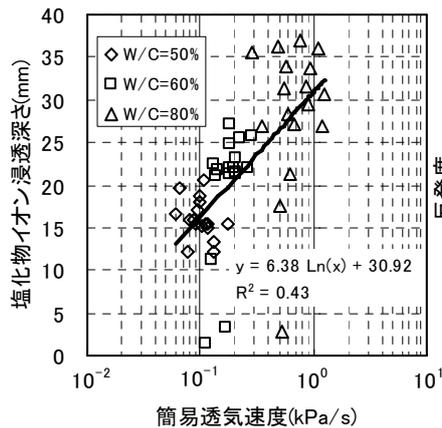


図-10 簡易透気速度と塩化物イオン浸透深さの関係

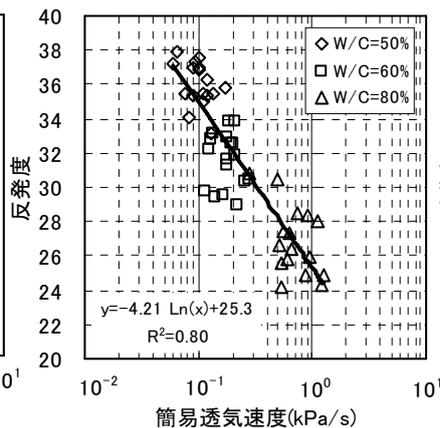


図-11 簡易透気速度と反発度の関係

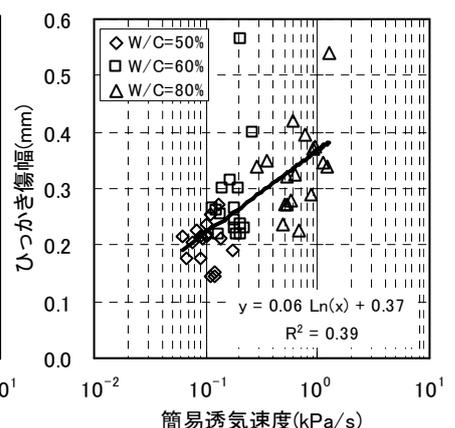


図-12 簡易透気速度とひっかけ傷幅の関係

す。促進中性化深さは、簡易透気速度が大きくなるのに伴い大きくなる傾向にあり、対数近似の結果決定係数が0.85と高い相関が認められた。

水セメント比毎における促進中性化深さの変動は、同一の簡易透気速度において水セメント比80%で10mm程度と若干大きくなったが、水セメント比50%、60%では5mm程度でありばらつきは小さく、全データの近似線に近い値となった。

簡易透気速度と中性化深さの関係は、既往の研究⁴⁾にもあるように相関が高く、各種養生による品質を評価することが可能であると考えられる。

(2) 簡易透気速度と塩化物イオン浸透深さの関係

図-10に、簡易透気速度と塩化物イオン浸透深さの関係を示す。塩化物イオン浸透深さは、簡易透気速度が大きくなるのに伴い大きくなる傾向にあり、対数近似の結果決定係数が0.43と相関は低い。

水セメント比毎における塩化物イオン浸透深さの変動は、同一の簡易透気速度において、水セメント比50%では15mm程度、水セメント比60%では10mm程度、水セメント比80%では20mm程度であり、塩化物イオン浸透深さの測定範囲が全体で28mm程度であると考え、36%～71%の変化となりばらつきは大きいといえる。また、塩化物イオン浸透深さが5mm以下のものがあるが、これはシラン系の撥水効果によるものである。

簡易透気速度と塩化物イオン浸透深さの関係では、相関は低くなった。このことは、塩化物の進入が気体の透過ではなく、水分の浸透やイオンの拡散による影響を受けているためであり、評価には透気性ではなく、吸水性等の検討が必要であると考えられる。

3.5 表層強度

(1) 簡易透気速度と反発度の関係

図-11に、簡易透気速度と反発度の関係を示す。反発度は、簡易透気速度が大きくなるのに伴い小さくなる傾向にあり、対数近似の結果決定係数は0.80と高い相関が

表-5 各試験における回帰式と決定係数

試験項目	回帰条件	回帰式	決定係数
促進中性化	全データ	$6.35\text{Ln}(x)+25.51$	0.85
	W/C=50%	$3.10\text{Ln}(x)+16.91$	0.25
	W/C=60%	$6.82\text{Ln}(x)+27.41$	0.41
	W/C=80%	$3.55\text{Ln}(x)+24.36$	0.30
塩化物イオン浸透深さ	全データ	$6.38\text{Ln}(x)+30.92$	0.43
	W/C=50%	$-2.60\text{Ln}(x)+10.00$	0.09
	W/C=60%	$16.50\text{Ln}(x)+48.31$	0.32
	W/C=80%	$3.01\text{Ln}(x)+29.83$	0.02
反発度	全データ	$-4.21\text{Ln}(x)+25.31$	0.80
	W/C=50%	$-1.93\text{Ln}(x)+31.56$	0.15
	W/C=60%	$-0.44\text{Ln}(x)+30.84$	0.01
	W/C=80%	$-2.56\text{Ln}(x)+25.90$	0.25
ひっかけ傷幅(9.8N)	全データ	$0.06\text{Ln}(x)+0.37$	0.39
	W/C=50%	$-0.004\text{Ln}(x)+0.19$	0.00
	W/C=60%	$0.11\text{Ln}(x)+0.48$	0.09
	W/C=80%	$0.75\text{Ln}(x)+0.37$	0.17

認められた。

水セメント比毎における反発度の変動は、同一の簡易透気速度において水セメント比50%では7程度の範囲、水セメント比60%では5程度の範囲、水セメント比80%では4程度の範囲であり、反発度の測定範囲が全体で14程度であると考え、29%～50%の変化となりばらつきは大きい。

(2) 簡易透気速度とひっかけ傷幅の関係

図-12に、簡易透気速度とひっかけ傷幅の関係を示す。ひっかけ傷幅は、簡易透気速度が大きくなるのに伴い大きくなる傾向にあり、対数近似の結果決定係数は0.39と相関は低い。

水セメント比毎のひっかけ傷幅は、同一の簡易透気速度において水セメント比50%では0.1mm程度の範囲、水セメント比60%、80%では0.2mm程度の範囲であり、ひっかけ傷幅の測定範囲が全体で0.3mmであることを考

えると 33%~67%の変化となり、ばらつきは大きい。

簡易透気速度と表層強度の関係では、反発度で高い相関が認められたものの、各水セメント比内でのばらつきが大きいと、各種養生の評価に当たっては詳細な検討が必要である。

3.6 各試験における回帰式と決定係数

簡易透気速度と各種物性の関係では、全データを用いた場合には傾向が認められたが、水セメント比毎の判断では、ばらつきが大きく傾向が認められなかった。そこで、各試験において、全データおよび水セメント比毎に対数近似し、その回帰式と決定係数により関係を検討した。表-5に、各試験における回帰式と決定係数を示す。

全データと水セメント比毎の決定係数は、促進中性化との関係で全データの決定係数 0.85 に対して、水セメント比毎の決定係数が水セメント比 50%で 0.25、水セメント比 60%で 0.41、水セメント比 80%で 0.30 と全データと比較して小さくなった。反発度との関係では全データの決定係数が 0.80 と相関が認められるのに対して、水セメント比毎の決定係数が水セメント比 50%で 0.15、水セメント比 60%で 0.01、水セメント比 80%で 0.25 と水セメント比では相関が認められなかった。また、全データの相関が低い塩化物イオン浸透深さおよびひっかき傷幅では、水セメント比毎における相関は認められなかった。

以上より、養生効果が少ない場合には、本試験での品質評価は困難であると考えられる。しかし、同一水セメント比においても乾燥開始材齢や膜養生剤等は違いが認められており、対象によっては評価が可能であると考えられ、養生毎などの検討を行う必要があると考える。

4. まとめ

本実験結果により得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- (1) 各種養生における簡易透気速度は、乾燥開始材齢、膜養生剤で差が認められたが、収縮低減剤、表面含浸材（けい酸塩系、シラン系）では明確な差は認められず、塗布剤で効果が少ないものの養生効果の評価するには至らなかった。
- (2) 含水率の違いによる簡易透気速度は、水セメント比 80%で含水率の低下に伴い大きくなる傾向となったが、水セメント比 50%、60%では含水率の違いによる傾向は認められなかった。
- (3) 全データにより検討した結果、トレント法透気係数、促進中性化深さ、反発度で高い相関が認められたが、

塩化物イオン浸透深さ、ひっかき傷幅では相関は低くなった。

- (4) 水セメント比毎に比較すると、トレント法透気係数、促進中性化深さで全体の近似線と近くばらつきは少ないが、塩化物イオン浸透深さ、反発度、ひっかき傷幅では、同一の簡易透気速度において近似線から離れており、ばらつきは大きい。
- (5) 決定係数は、全体のデータを使用した場合には高い値となったが、水セメント比毎の決定係数は小さくなった。これは、水セメント比の影響が支配的であるためと考えられる。

本実験では、乾燥開始材齢や膜養生剤では違いが認められ評価可能な可能性を示したが、塗布剤等で養生効果の少ないものについてはその評価が困難であった。今後の課題として、適用可能な範囲を検討するとともに、養生効果の少ないものへの適用性についても検討する予定である。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 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) 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, 1991
- 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, pp.358-365, 1992
- 6) 湯浅昇, 笠井芳夫, 松井勇: ひっかき傷によるコンクリートの表層強度推定方法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.709-710, 1999.9