

論文 硬化過程で温度履歴を受けたコンクリートの水分浸透挙動に関する検討

酒井 創地*1・上野 敦*2・鎌田 知久*3・大野 健太郎*4

要旨: プレキャストコンクリート製品は養生方法が現場打ちコンクリートと異なるため、土木学会コンクリート標準示方書[設計編]で用いられている水分浸透速度係数の予測式の適応範囲外となる。本研究ではプレキャストコンクリート製品を想定した供試体を作製し、使用材料、配合、養生条件の違いが水分浸透特性および細孔構造に与える影響について検討した。この結果、水分浸透速度係数に与える影響として養生条件、使用材料による違いが確認され、水セメント比が大きくなるほどその差が明確に表れた。

キーワード: プレキャストコンクリート, 温度履歴養生, 水分浸透速度係数, 空隙構造, 圧縮強度

1. はじめに

近年、建設業界における労働者不足や高齢化が問題となっている中で、国土交通省は、建設現場における生産性向上を図り、魅力ある建設現場を目指す取組である*i-Construction*を推進している。その取り組みの中でコンクリート工の生産性向上が求められており、安定した品質が確保でき、現場作業の省力化、工期短縮が可能なプレキャストコンクリート製品（以下、PCa 製品）の利用拡大が期待されている。

しかし、PCa 製品の普及および用途拡大のためには JIS の構造別製品群規格によるだけでなく、PCa 製品を用いて構築した構造物の耐久性を照査する必要がある。土木学会コンクリート標準示方書[設計編]²⁾では、中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食に対する照査の中でコンクリートの水分浸透速度係数の予測式を示しているが、この式はコンクリート標準示方書[施工編]³⁾で定めた標準的な養生が行われた場合を前提としており、一般的に蒸気養生が行われ、水分浸透特性が異なると予想される PCa 製品は適応範囲外である。

このような背景から本検討では、PCa 製品を想定し温度履歴を与えたコンクリートを対象に、養生条件、使用材料、配合を変化させた時の水分浸透速度係数の変化を明確にすることを目的とした。また、繰返しの製造過程における水分浸透速度係数の管理の可能性を探るため、水分浸透速度係数と細孔径分布測定から算出した細孔容積、圧縮強度の関係性について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

使用材料を表-1に、配合を表-2に示す。結合材は普通ポルトランドセメント(OPC), 高炉セメント B 種(BB), 普通エコセメント (ECO) の 3 種類を用いた。細骨材は

表-1 使用材料

種類	記号	密度(g/cm ³)	吸水率(%)
普通ポルトランドセメント	OPC	3.16	-
高炉 B 種セメント	BB	3.04	-
普通エコセメント	ECO	3.15	-
細骨材	S	2.59*	2.06
粗骨材(Gmax=20mm)	G	2.65*	0.63
ポリカルボン酸系高性能減水剤	SP	1.08	-
陰イオン系 AE 剤	AE	1.04	-

*表乾密度

表-2 配合

水準名	スランブ(cm) 空気量(%) 練り上がり温度(°C)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						SP (C×%)	AE (C×%)
				W	C(OPC)	C(BB)	C(ECO)	S	G		
OPC	18±2.5	35	41.4	160	457	0	0	724	1050	0.750	-
	2.0±1.5	45	44.0	160	356	0	0	806	1050	0.800	-
	20±1.0	55	45.6	160	291	0	0	860	1050	1.000	-
AE	18±2.5	35	39.1	160	457	0	0	659	1050	0.650	0.011
	4.5±1.5	45	42.0	160	356	0	0	742	1050	0.625	0.012
	20±1.0	55	43.7	160	291	0	0	795	1050	0.775	0.013
BB	18±2.5	35	40.9	160	0	457	0	709	1050	0.585	-
	2.0±1.5	45	43.7	160	0	357	0	795	1050	0.725	-
	20±1.0	55	45.3	160	0	291	0	850	1050	0.600	-
ECO	18±2.5	35	41.3	160	0	0	457	722	1050	0.775	-
	2.0±1.5	45	44.0	160	0	0	356	805	1050	0.950	-
	20±1.0	55	45.6	160	0	0	291	859	1050	0.725	-

*1 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 (学生会員)

*2 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域助教 博士 (工学) (正会員)

*4 東京都立大学大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域准教授 博士 (工学) (正会員)

表-3 養生条件

記号	養生方法	前置き時間 (h)	昇温速度 (°C/h)	最高温度 (°C)	最高温度 保持時間 (h)	降温速度 (°C/h)	後養生方法 (材齢1日～14日)
L	温度履歴養生	4	15	45	4	10	気中保管 (20°C 60%R.H.)
H		2	20	60	2	10	
W	封緘養生 (20°C)						水中養生 (20°C)

大井川水系の陸砂、粗骨材は青梅産碎石を用いた。配合は、単位粗骨材容積と単位水量を一定とし、水セメント比を35, 45, 55%の3水準とした。また、空気連行の有無による影響について検討するため、OPCを用いてAE剤を添加する水準を設けた。目標スランプは18cmとして、適宜高性能AE減水剤の添加量を調整した。なお、フレッシュコンクリートの練り上がり温度は、19～21°Cであった。

2.2 養生条件

表-3に養生条件を示す。温度履歴養生として、一般的な条件としてのHと、前養生時間を長く、昇温速度を低く、最高温度を低くした条件Lを設定した。温度履歴養生後は材齢1日で脱型し、その後20°C、60%R.H.環境下で材齢14日まで気中保管を行った。どちらの養生条件においても水分逸散を防ぐため表面をビニールで封緘した状態で温度履歴を与えた。また、比較として温度履歴を与えず、材齢1日で脱型後、材齢14日まで20°Cの水中養生を行う条件Wを設けた。

2.3 試験項目および方法

(1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験はφ100×200mmの円柱供試体を用いて材齢1日(脱型時)と14日にJIS A 1108に準拠して実施した。

(2) 細孔径分布測定

コンクリートの細孔径分布を水銀圧入法によって測定した。材齢は14日で圧縮強度試験後の供試体の中央側面部を2.5mm～5.0mmに細分化したモルタル片を用いた。採取したモルタル片を24時間アセトンに浸漬し、デシケータを用いて真空状態で7日間以上保管した後、測定した。

(3) 水分浸透速度係数試験

水分浸透速度係数試験はφ100×200mmの円柱供試体を用いてJSCE-G 582-2018に準拠して実施した。供試体を材齢14日まで養生後、型枠底面を切断し、20°C、60%R.H.環境下で91日以上乾燥させた。供試体側面をアルミはくテープで被覆し、切断面から10mmまで水道水で浸漬し、浸漬開始から5, 24, 48時間後に各時間3体割裂した。その後、水分検知剤を噴霧して発色した部分を水分浸透深さとしてノギスで測定した。浸漬期間5, 24,

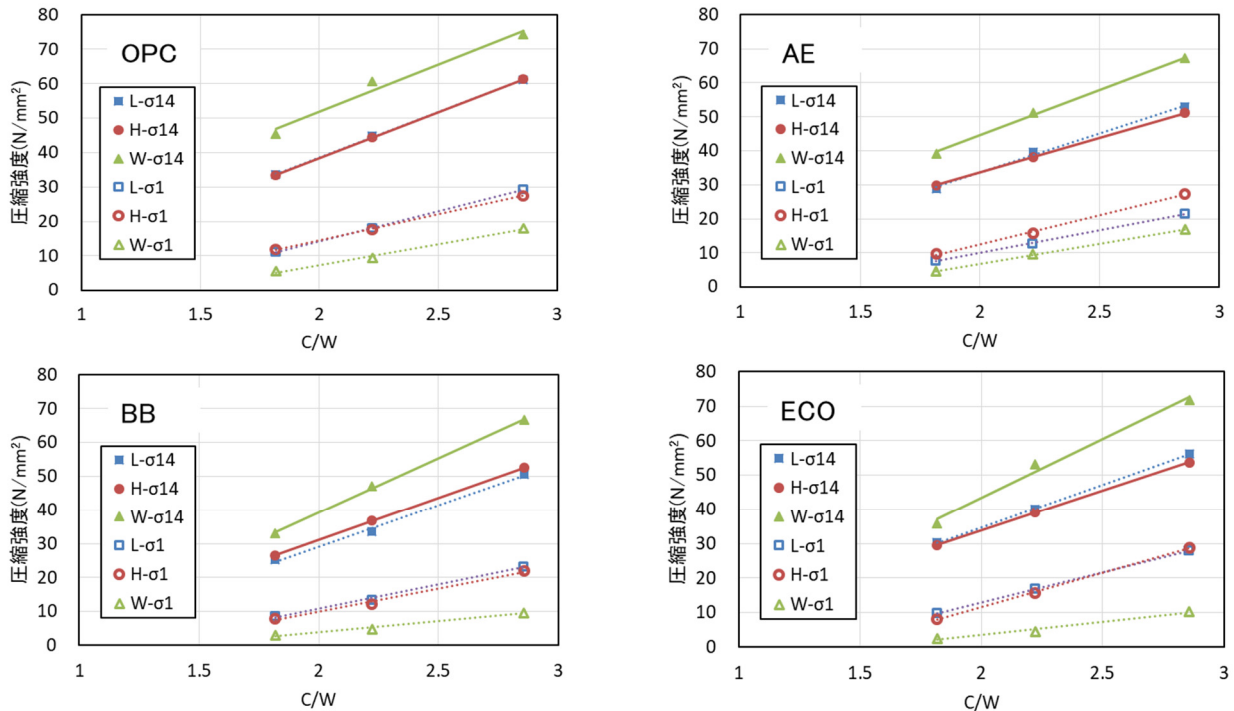


図-1 圧縮強度試験結果

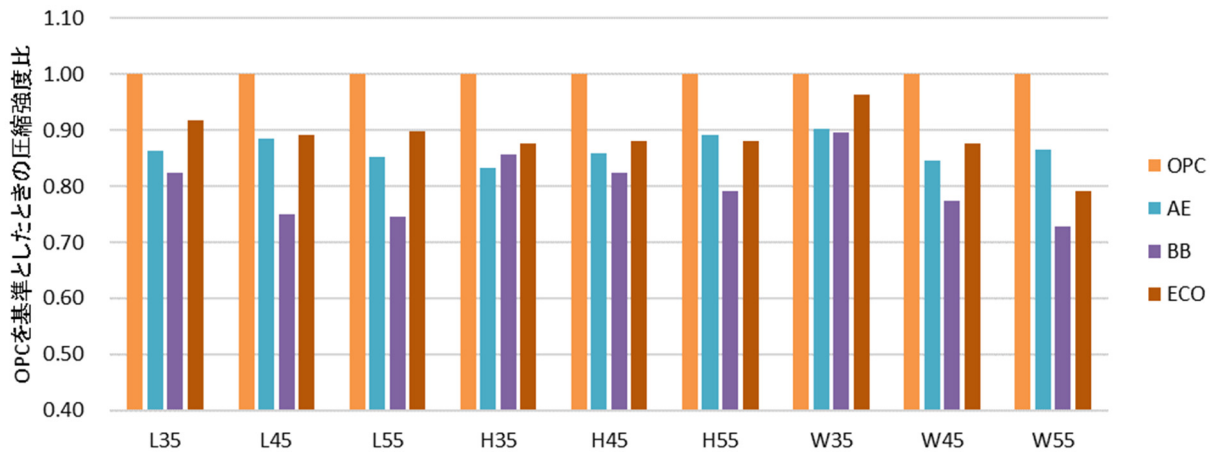


図-2 材齢 14 日の圧縮強度比

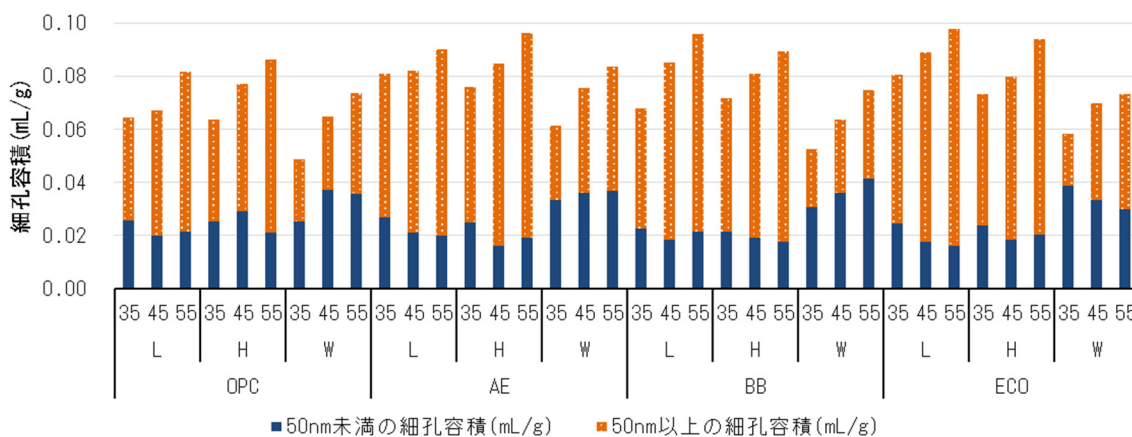


図-3 材齢 14 日の細孔径分布測定結果

48 時間に得られた水分浸透深さと浸漬時間の平方根を直線近似した傾きを水分浸透速度係数として算出した。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度試験結果

図-1 に結合材種類ごとの圧縮強度試験結果を示す。結合材種類、水セメント比によらず材齢 1 日では温度履歴養生(L, H)を行うことで水中養生(W)よりも圧縮強度が高くなっており、初期の水和反応が促進されたことが示唆される。しかし、材齢 14 日では温度履歴を与え、その後気中保管を行った L, H は強度発現が停滞し、水中養生した W よりも約 25%低い結果となった。また、材齢に関わらず、温度履歴条件による明確な差はみられなかった。

図-2 に材齢 14 日における OPC を基準とした各結合材を用いた時の圧縮強度比を示す。養生条件、水結合材比によればばらつきはあるが、OPC と比較して AE は約 14%、BB は約 20%、ECO は約 11%圧縮強度が低下する結果となった。エコセメントを使用した場合、間隙質相を多く含むことや珪酸カルシウム鉱物の含有量が少ないこと⁴⁾などにより材齢 14 日までの強度増進が停滞した

と考えられる。また、高炉スラグ微粉末を使用した場合、強度発現が遅いため⁵⁾水中養生を行った場合でも材齢 14 日では OPC と比較して強度が低い結果となったと考えられる。

3.2 細孔径分布測定結果

図-3 に細孔径分布測定の結果を示す。既往の研究により、50nm 以上の細孔量が圧縮強度や物質の透過性に影響を及ぼすとされていること⁶⁾から、本検討では 50nm を閾値として 50nm 以上の細孔容積と 50nm 未満の細孔容積を算出した。いずれの結合材、養生条件においても水セメント比が増加するに従い、総細孔量が増加することが確認された。また、温度履歴養生を行った L, H は水中養生を行った W と比較して 50nm 以上の粗大な空隙の割合が多くなった。これは、水合初期に温度履歴を受けることで、組織が疎となる⁷⁾ことが原因と考えられる。

図-4 に 50nm 以上の細孔容積を養生条件ごとにまとめた図を示す。温度履歴養生を行った L, H では AE, BB, ECO は OPC と比較して、50nm 以上の粗大な細孔が多くなった。高炉スラグ微粉末を使用した場合、高温履歴後に気中養生を行うと C-S-H を消費してバテライトが生成し、粗大な空隙の占める割合が同じ養生条件にお

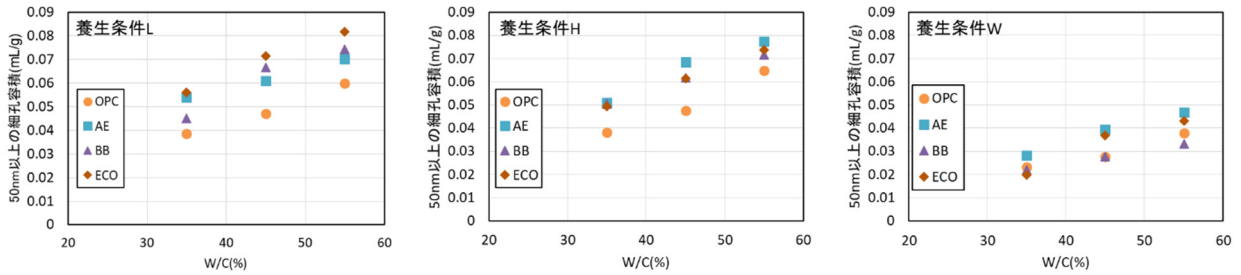


図-4 各養生条件における 50nm 以上の細孔容積

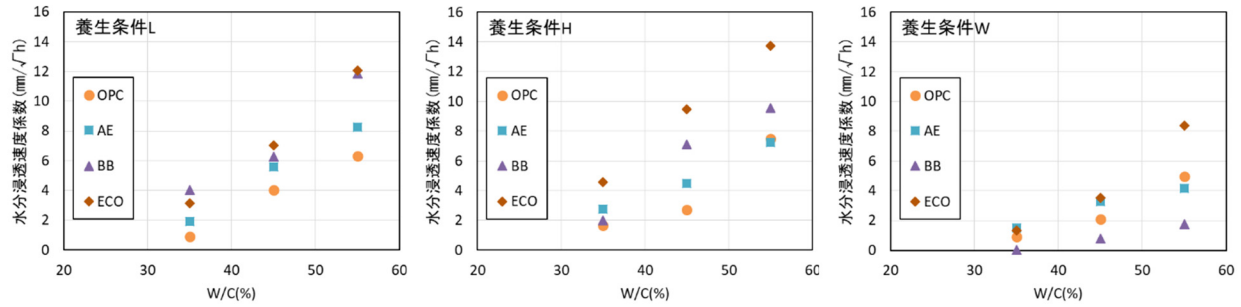


図-5 各養生条件における水分浸透速度係数試験結果

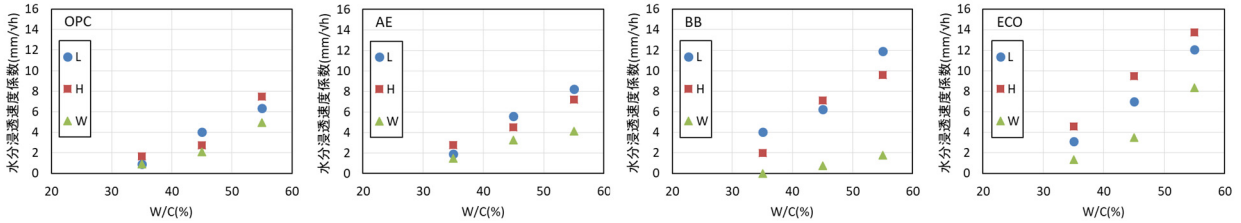


図-6 各結合材種類における水分浸透速度係数試験結果

ける OPC と比較して大きくなる⁸⁾が、水中養生を行った W では OPC と BB の 50nm 以上の細孔量は同程度となり、高炉セメントを用いた場合水分が供給されることで OPC と同程度の細孔構造になることがわかる。

3.3 水分浸透速度係数試験結果

図-5 に水分浸透速度係数試験結果を養生条件別に示す図を示す。

養生条件 L, H の場合、OPC と比較して AE の水分浸透速度係数は大きくなっており、温度履歴を与えると、同じ結合材を用いた場合でも連行空気泡の影響により、若干水分浸透速度係数が増加することがわかる。また、BB についても温度履歴養生を行った場合、OPC と比較して水分浸透速度係数は大きい結果となった。この要因として、前述のバテライトの生成による粗大な空隙量の増加⁸⁾や、高炉スラグ微粉末を混入したセメントペーストは普通ポルトランドセメントペーストよりも熱膨張係数が大きい⁹⁾ことから、温度履歴を与えた場合、骨材との熱膨張係数の差による組織の損傷が生じた可能性が考えられる。しかし、BB の W では、他の結合材と比較して水分浸透速度係数が顕著に小さい結果となった。高炉セメントを用いて水中養生を行った場合、空隙構造が複雑化され¹⁰⁾、水分浸透抵抗性が向上したと考えられる。

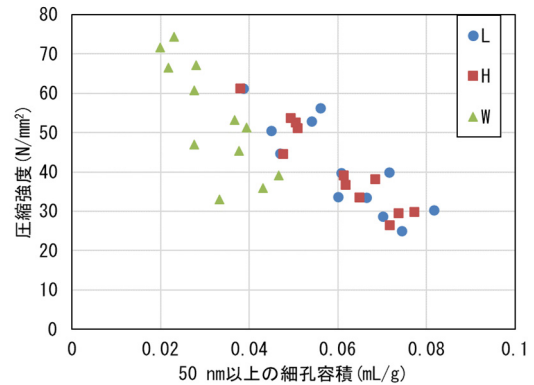


図-7 材齢 14 日圧縮強度と 50nm 以上の細孔容積の関係

ECO においては養生条件に関わらず OPC と比較して水分浸透速度係数は大きくなった。

図-6 に水分浸透速度係数結果を結合材種類別に比較した図を示す。いずれの結合材においても水セメント比が増加するに伴い、水分浸透速度係数は増加することが確認された。また、水セメント比が増加するに従い、養生条件による水分浸透速度係数への影響が大きくなることがわかる。結合材で比較すると、OPC, AE, BB では温度履歴養生を行った L, H の水分浸透速度係数は概ね同等であった。しかし、ECO については組織形成に対し

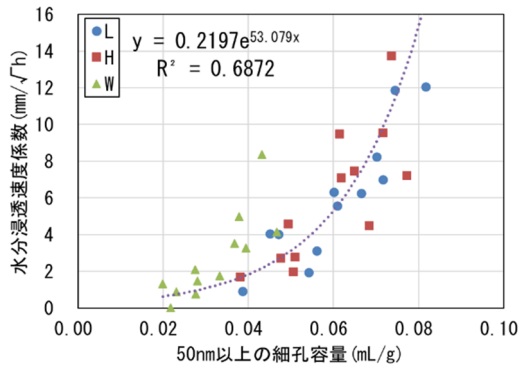


図-8 水分浸透速度係数と 50nm 以上の細孔容積の関係

て厳しい養生条件と考えられる H の方が水分浸透速度係数は大きくなり、温度履歴条件による差が他の結合材より顕著となることからわかる。これは、エコセメントを使用した場合、凝結始発時間が遅く前養生の影響を受けやすい¹¹⁾ことが影響したと考えられる。また、BB では水中養生を行った W と温度履歴養生を行った L, H の差が顕著に表れ、養生による水分供給の差が明確となっている。高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの物質移動特性は養生の影響を受けやすい¹²⁾が、本検討でも同様の傾向となった。

3.4 細孔容積と圧縮強度の関係

図-7 に 14 日圧縮強度と 50nm 以上の細孔容積の関係を養生条件別に示す。50nm 以上の細孔容積の増加に伴い圧縮強度が低下する傾向が確認できる。

3.5 水分浸透速度係数と細孔容積の関係

図-8 に水分浸透速度係数と 50nm 以上の細孔容積の関係を養生条件別に示す。50nm 以上の細孔容積の増加に伴い水分浸透速度係数が増加することがわかる。

3.6 水分浸透速度係数と圧縮強度の関係

図-9 に水分浸透速度係数と材齢 14 日の圧縮強度の関係を結合材種類別に示す。結合材種類に関わらず、圧縮強度が増加するに従い水分浸透速度係数は低下する傾向となるとわかる。しかし、ECO では OPC, AE, BB と比較して圧縮強度に対する水分浸透速度係数が若干大きい傾向になった。

図-10 に水分浸透速度係数と材齢 14 日の圧縮強度の関係を養生条件別に示す。養生条件に関わらず、圧縮強度が増加するに従い水分浸透速度係数は低下する傾向となるとわかる。しかし、高炉スラグ微粉末を使用して水中養生を行った水準(図中, △)に関しては、圧縮強度に対する水分浸透速度係数が顕著に低いことが確認できる。高炉セメントを用いた場合、空隙量が顕著に減少するのではなく、空隙構造を複雑にする¹⁰⁾とされており、圧縮強度に支配的な影響を及ぼす 50nm 以上の細孔容積だけではなく微細な空隙特性を含めて水分浸透速度係数を評

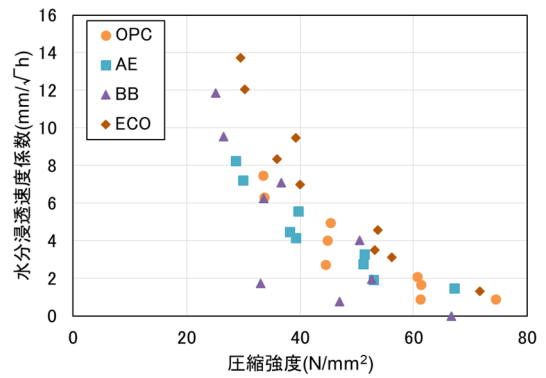


図-9 各結合材における水分浸透速度係数と材齢 14 日圧縮強度の関係

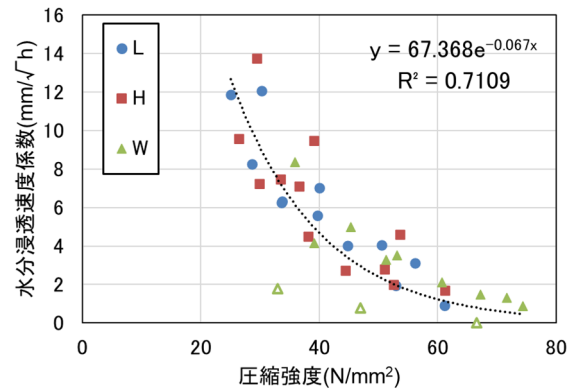


図-10 各養生条件における水分浸透速度係数と材齢 14 日圧縮強度の関係

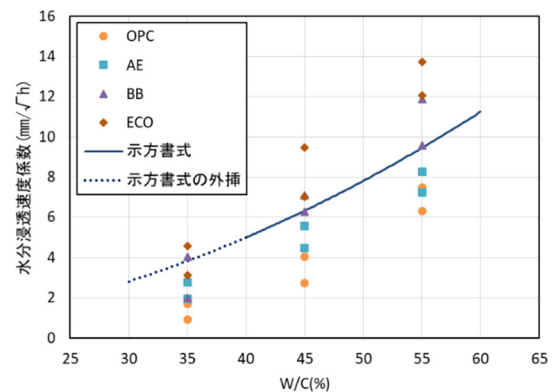


図-11 水分浸透速度係数予測値との比較

価する必要があると考えられる。以上の結果より、養生条件、結合材種類を考慮したうえで PCa 製品の一般的な管理材齢である 14 日の圧縮強度から水分浸透速度係数が管理できる可能性があると考えられる。

3.7 水分浸透速度係数予測値との比較

養生条件 L, H における水分浸透速度係数結果を図-11 に示す。また、コンクリート標準示方書〔設計編〕²⁾の水分浸透速度係数の予測式(1)を図中に示す。

$$q_p = 31.25 \cdot (W/B)^2 \quad (0.40 \leq W/B \leq 0.60) \quad (1)$$

ここに、 q_p : コンクリートの水分浸透速度係数の予測値(mm/√h), W/B : 水結合材比

この式は W/B が 40%~60%の範囲の普通ポルトラン

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 種を用いたコンクリートにおいて、コンクリート標準示方書[施工編]³⁾で定めた標準的な養生が行われた場合を前提として定められている。今回の実験結果と比較すると OPC, AE, BB, においては W/B55%の BB の L 以外の水準では予測値よりも実験値が小さくなり安全側の評価となった。しかし ECO においては予測値よりも今回の実験値が大幅に大きくなり、エコセメントを使用した場合、現在の予測式では適応が困難となると考えられる。

4. まとめ

本検討では、温度履歴を与えたコンクリートの水分浸透速度係数に及ぼす養生条件、結合材種類、水セメント比の影響について検討を行った。以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) 結合材種類に関わらず水セメント比が増加するに従い、水分浸透速度係数は増加する。また、水セメント比が増加するに従い、養生条件による水分浸透速度係数への影響が顕著になる。
- (2) 空気泡を連行し温度履歴養生を行った場合、水分浸透速度係数が増加する。
- (3) 高炉セメントを使用し水中養生を行った場合、水分浸透速度係数は小さいが、高温履歴を与え、気中保管を行った場合、水分浸透速度係数は大きくなる。
- (4) エコセメントを使用した場合、養生条件に関わらず水分浸透速度係数は大きくなる。
- (5) 養生条件、結合材種類を考慮したうえで、材齢 14 日圧縮強度で水分浸透速度係数を管理できる可能性がある。
- (6) 普通ポルトランドセメントと高炉 B 種セメントを使用し、温度履歴養生後気中保管した場合においても、コンクリート標準示方書 [設計編] の水分浸透速度係数の予測式を適応できる可能性が示唆された。

謝辞：本研究の遂行にあたり、公益社団法人全国土木コンクリートブロック協会から研究費の支援を受けた。また、実験の実施にあたり、本学学部 4 年生の堀住永樹氏の協力を得た。

参考文献

- 1) 那須 将弘：プレキャストコンクリート製品の活用

の現状と普及のための課題，コンクリート工学，Vol.55, No.9, pp.800-803, 2017

- 2) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]，p153, 2017
- 3) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書 [施工編]，pp.124-128, 2017
- 4) 寺田剛，明嵐政司：都市ごみ焼却灰を主原料としたセメントの低塩素化とコンクリートの特性，コンクリート工学，Vol.37, No.8, pp.26-30, 1999.8
- 5) 依田彰彦：技術フォーラム資源の有効化活用とコンクリート 第 5 回高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート，コンクリート工学，Vol.34, No.4, pp.72-82, 1996.4
- 6) 内川浩，羽原俊祐，沢木大介：混合セメントモルタルおよびコンクリートの硬化体構造が強度発現性状に及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集，No.44, pp.330-335, 1990
- 7) 森寛晃，久我龍一郎，高橋晴香，鶴澤 正美：高温履歴を受けたセメント硬化体の強度発現メカニズムと添加材による物性改善の試み，材料，Vol.59, No.10, pp.794-700, 2010.10
- 8) 久我龍一郎，森寛晃，鶴澤正美：初期高温履歴を受けた高炉スラグ微粉末添加セメントの水和に及ぼす養生条件の影響，材料，Vol.60, No.8, pp.693-700, 2011.8
- 9) 青木千里，細田暁，藤原浩一：高温履歴を受けた高炉スラグ微粉末含有コンクリートの圧縮強度・弾性係数，コンクリート工学年次論文集，Vol.28, No.1, pp.161-166, 2006
- 10) 水野博貴，伊代田岳史：炭酸化した高炉セメント硬化体の空隙構造変化が水分浸透性に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.41, No.1, pp.665-670, 2019
- 11) 村田哲，上野敦，大野健太郎，宇治公隆：極初期の組織形成が温度履歴養生後のモルタルの特性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.37, No.1, pp.481-486, 2015
- 12) 檀康弘，伊代田岳史，大塚勇介，佐川康貴，濱田秀則：高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの養生条件と耐久性の関係，土木学会論文集 E，Vol.65, No.4, pp.431-441, 2009