

論文 温度履歴養生した高炉スラグコンクリートの水分浸透挙動に対する後養生の影響

堀住 永樹*1・上野 敦*2・鎌田 知久*3・大野 健太郎*2

要旨: プレキャストコンクリートの製造において硬化過程で給熱したコンクリートは、標準養生したコンクリートと硬化後の特性が異なることが知られている。本研究では、高炉スラグ微粉末を置換率 60%で用いたコンクリートを対象に、温度履歴養生後の後養生における水分供給が水分浸透速度係数および空隙構造に与える影響について検討した。その結果、温度履歴養生後の湿布養生により圧縮強度の向上および水分浸透速度係数の低下が確認され、高炉スラグ微粉末を用いた場合には温度履歴養生後に 6 日以上湿布養生を行うことで表層から 10mm 以深の細孔構造が緻密化し、水分浸透速度係数が大幅に低下することが示された。

キーワード: プレキャストコンクリート, 高炉スラグ微粉末, 温度履歴養生, 後養生, 水分浸透速度係数

1. はじめに

プレキャストコンクリート製品 (以下、PCa 製品) は、工期短縮、省力化等の利点が多く、利用割合の増加が期待されている。一般に、PCa 製品を製造する工場では、早期の脱型を目的として蒸気養生を行っている。

既往の研究¹⁾により、蒸気養生したコンクリートは、同一配合の標準養生したコンクリートと比較して、疎な細孔構造となり、強度や耐久性が低下することが明らかとなっている。また、蒸気養生を行ったコンクリートの物性に関する研究は、強度などの力学的特性を取り扱ったものが多く、製品や構造物の耐久性に関する検討は十分に行われていない。今後、PCa 製品の普及および用途拡大を進めるためには、PCa 製品を用いた構造物の耐久性を設計段階で照査できる体系を構築する必要がある。

近年、環境負荷低減を目的として高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの利用が進められている。既往の研究²⁾より、高炉スラグ微粉末を 60%の置換率 (高炉セメント B 種相当) で用いた場合、温度履歴を与え気中保管することで水分浸透速度係数が増加するのに対し、水中養生を行った場合では水分浸透速度係数が大幅に低下することが確認されている。すなわち、高炉スラグ微粉末を用いる場合、水分浸透の抑制に対して養生時の水分供給が重要であることが示されている。

このような背景から、本研究では、高炉スラグ微粉末を 60%の置換率で用いたコンクリートを対象に、温度履歴養生後の水分供給が水分浸透挙動および空隙構造に及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

使用材料を表-1 に、コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの性状を表-2 に示す。結合材 (B) は普通ポルトランドセメント (OPC)、高炉セメント B 種 (B60: BFS による置換率を 60%としたもの) を用いた。細骨材は大井川水系の陸砂、粗骨材は青梅産砕石を用いた。配合は、単位粗骨材容積と単位水量を一定とし、水結合材比を 45%とした。目標スランプを 18cm として、高性能 AE 減水剤の添加量を調整した。

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	—
高炉スラグ微粉末	BFS	2.92	—
細骨材	S	2.59*	1.94
粗骨材(Gmax=20mm)	G	2.66*	0.60
ポリカルボン酸高性能減水剤	SP	1.05	—

*表乾密度

表-2 コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの性状

記号	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					SP (B×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
			W	C	BFS	S	G				
OPC	45	44.0	160	356	—	806	1053	0.900	18.0	2.5	20.0
B60		43.6		142	214	792		0.700	18.5	2.1	21.0

*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)

表-3 温度履歴条件および後養生条件

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)
L-w1							湿布養生 → 気中保管 (1日,20°C) (20°C,60%R.H)
L-w6							湿布養生 → 気中保管 (6日,20°C) (20°C,60%R.H)
L-w13							湿布養生 (20°C)
W	封緘養生 (20°C)	—	—	—	—	—	水中養生 (20°C)

2.2 養生条件

温度履歴条件および後養生条件を表-3に示す。温度履歴養生のみを行うものをLとし、同じ温度履歴条件で材齢1日の脱型後に湿布養生を1日、6日、13日行うものをL-w1、L-w6、L-w13とした。いずれの養生条件においても水分逸散を防ぐため表面を封緘した状態で温度履歴を与えた。湿布養生は脱型後、濡らしたワイブ材をφ100×200mmの円柱供試体および100×100×400mmの角柱供試体に巻き、ビニル袋中で密閉した状態で20°C環境下に静置した。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

(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14日にJIS A 1108に従って実施した。

(2) 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に従って実施した。供試体を材齢14日まで養生後、型枠底面から25mmを切断し、20°C、60%R.H.環境下で91日以上乾燥させた後、試験を実施した。

(3) 開放空隙率試験

開放空隙率試験の測定は、水分浸透速度係数試験時に供試体底面を切断して得られたφ100×25mmの供試体を用い、20°C、60%R.H.環境下で91日間乾燥させた後に実施した。測定本数は、1水準3本とし、その平均値を開放空隙率の値として用いた。なお、開放空隙率は式(1)に示すアルキメデス法により算出した。

$$\varepsilon = \frac{m_a - m_d}{m_a - m_w} \quad (1)$$

ここに、 m_a ：飽水質量 (g)、 m_w ：飽水状態での水中での見かけの質量 (g)、 m_d ：乾燥質量 (g) (JSCE-G582の試験開始時の含水状態と合わせるため、20°C、60%R.H.環境の乾燥での恒量値とした。)

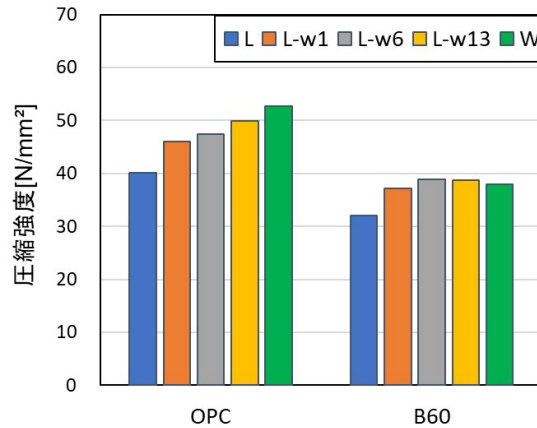


図-1 材齢14日圧縮強度

また、小池らの手法³⁾を参考に水分浸透速度係数試験に用いた供試体の割裂前の質量を測定することで、吸水量と開放空隙率から式(2)のとおり水分浸透深さを算出し、水分浸透速度係数に変換してJSCE-G582の結果と比較した。

$$l = \frac{m_t}{a \cdot \varepsilon \cdot d} \quad (2)$$

ここに、 l ：水分浸透深さ (mm)、 m_t ：吸水開始から時刻 t までの吸水量 (g)、 a ：吸水面積 (mm²)、 ε ：開放空隙率、 d ：水の密度 (g/mm³)

(4) 細孔径分布測定

細孔径分布測定は水銀圧入法により実施した。細孔径分布測定用に100×100×400mmの角柱供試体を各水準につき1体作製した。供試体は気中保管開始時(L-w13、Wは養生終了時)に、打込み側面を一面のみ残し、その他の面をアルミ箔テープで被覆した。その後、20°C、60%R.H.環境下で91日間乾燥させた後、湿式コンクリートカッターで開放面から10mm片ずつ50mmまで切断した。切断したコンクリートから採取した2.5~5.0mmのモルタル片を24時間以上アセトンに浸漬して水和を停止させた後、真空状態で7日間以上乾燥させ、測定に供した。

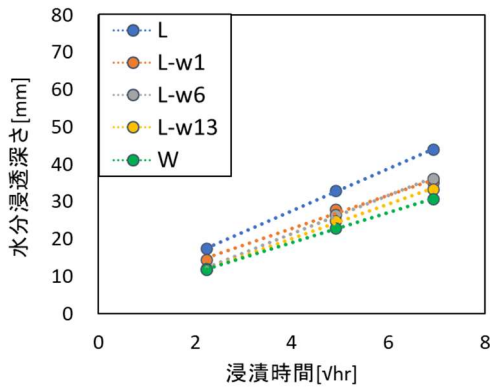


図-2 水分浸透深さ (OPC)

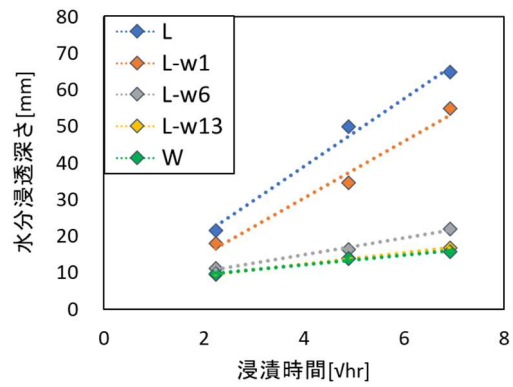


図-3 水分浸透深さ (B60)

3. 結果および考察

3.1 圧縮強度

図-1 にコンクリートの圧縮強度試験の結果を示す。OPC と B60 の両配合において、養生条件 L に比べて L-w1, L-w6, L-w13 の圧縮強度が高く、温度履歴養生後の湿布養生による圧縮強度の向上が確認される。また、OPC では、湿布養生期間が長いほど圧縮強度が増加する傾向を示し、B60 では温度履歴養生後に湿布養生を 6 日以上行うことで養生条件 W と圧縮強度が同程度になることがわかる。結合材種類による比較を行うと、いずれの養生条件においても B60 は OPC よりも圧縮強度が 20~30% 程度低く、高炉スラグ微粉末を高置換することにより、圧縮強度が低下する結果となった。

3.2 水分浸透深さ

図-2 に OPC の養生条件ごとの水分浸透深さの結果を示す。養生条件 L の場合、水分浸透深さが最も大きく、温度履歴養生後に湿布養生を行うことで水分浸透深さが低下することがわかる。

図-3 に B60 の養生条件ごとの水分浸透深さの結果を示す。養生条件 L に比べて L-w1 では水分浸透深さが低下する結果となり、L-w6, L-w13 では水分浸透深さが大幅に低下し、養生条件 W と同程度となることがわかる。高炉スラグ微粉末を 60% の置換率で用いた場合、温度履歴養生後の湿布養生による水分浸透深さの低下に及ぼす影響は顕著であり、温度履歴養生後に 6 日以上湿布養生を行うことで水分浸透深さが大幅に低下する結果となった。

3.3 水分浸透速度係数

図-4 に水分浸透速度係数の結果を結合材別に示す。養生条件 L, L-w1 の場合、OPC と比較して B60 の水分浸透速度係数は大きくなっており、温度履歴を与え水分供給を継続しない場合、高炉スラグ微粉末を高置換することによって水分浸透速度係数が大きくなることわかる。一方、養生条件 L-w6, L-w13, W の場合、OPC と比較して B60 の水分浸透速度係数が小さく、温度履歴養生

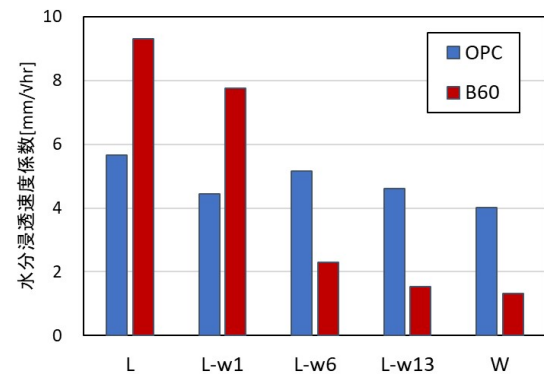


図-4 水分浸透速度係数

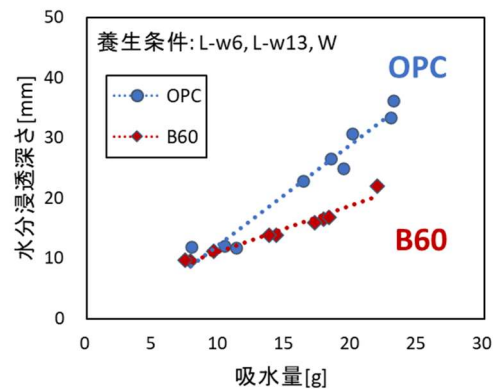


図-5 吸水量と水分浸透深さの関係

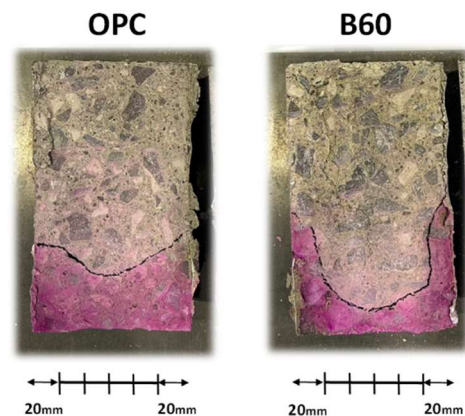


図-6 水分浸透速度係数試験 48 時間後の様子 (例: L-w6)

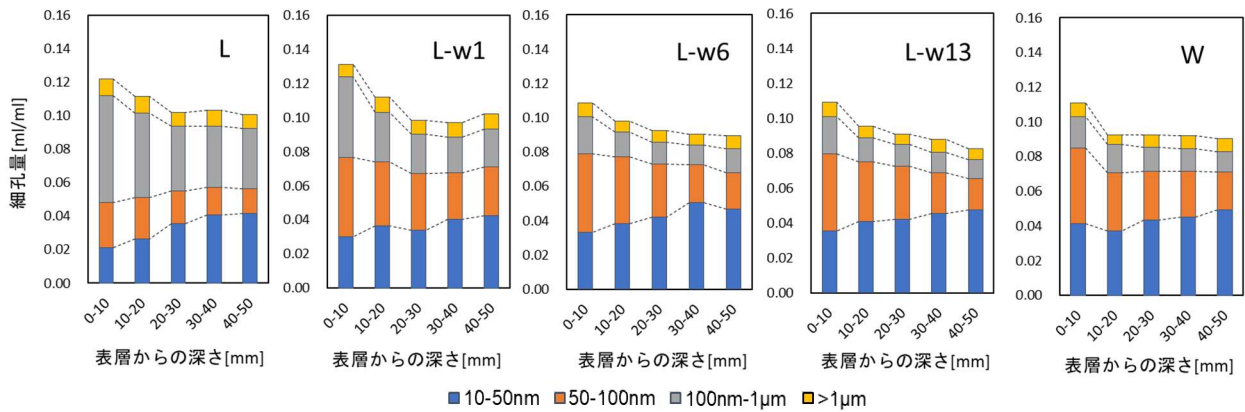


図-7 深さごとの細孔径分布測定結果 (OPC)

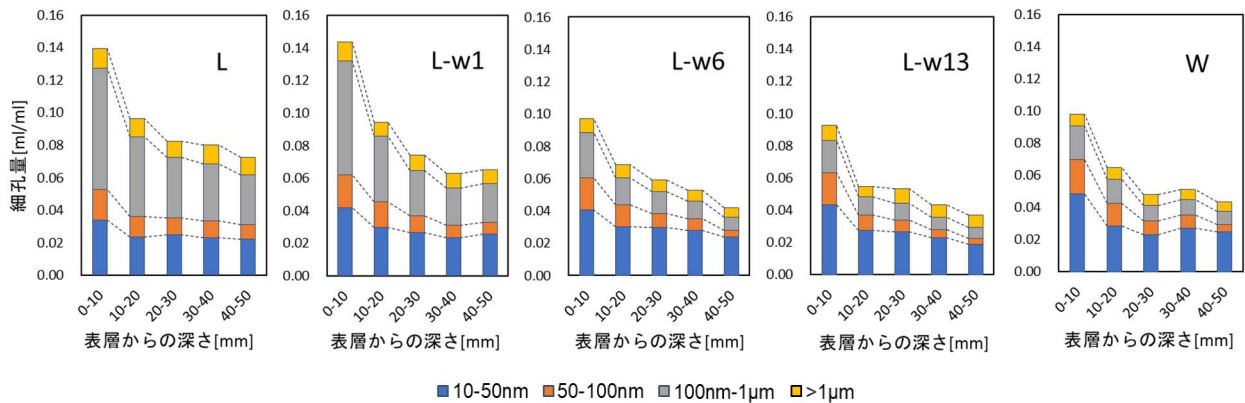


図-8 深さごとの細孔径分布測定結果 (B60)

後 6 日以上⁴⁾の湿布養生および水中養生を行った場合、高炉スラグ微粉末を高置換で混和することにより水分浸透速度係数が顕著に低下する結果となった。高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは初期養生が不十分な場合にはコンクリートの物性が低下すること⁴⁾、また置換率が高いほど養生の影響を受けやすい⁵⁾ことから、高炉スラグ微粉末を高置換で用いた場合、養生時に十分な水分供給を行うことで水分浸透抵抗性が向上すると考えられる。

3.4 吸水量と水分浸透深さ

図-5に養生条件 L-w6, L-w13, W の水分浸透速度係数試験時の吸水量と水分浸透深さの結果を結合材別に示す。いずれの結合材でも吸水量と水分浸透深さには相関が見られるが、B60 で大幅な水分浸透の抑制が確認された養生条件 L-w6, L-w13, W では OPC と比べて B60 の場合、吸水量に対する水分浸透深さが小さい。これは、図-6 に示すように、吸水量が浸漬面全体での吸水による質量増分なのに対し、水分浸透深さが供試体側面（片側 20mm ずつ）を除いた中央 5 点の平均値であり、側面での水の吸い上がりの影響を含まないためと考えられる。このように、高炉スラグ微粉末を用いた場合、表層部分と内部で水分浸透深さが大きく異なる傾向が確認されるため、表層部分と内部の水分浸透挙動の違いについて、さらなる検討が必要であると考えられる。

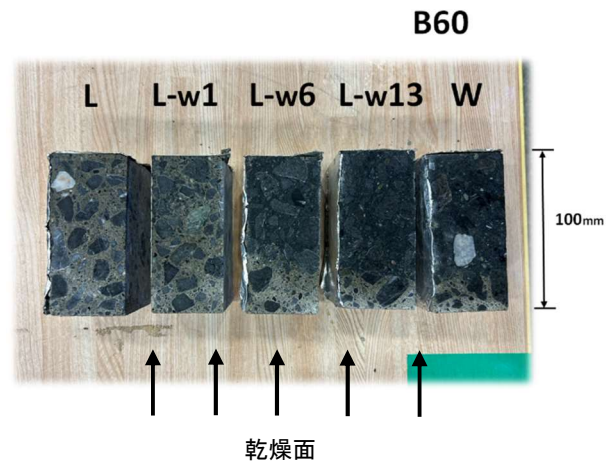


図-9 角柱供試体切断面の様子 (91 日乾燥後)

3.5 細孔構造

図-7に OPC の深さ方向の細孔径分布測定結果を養生条件別に示す。いずれの養生条件でも表層から内部にかけて 10-50nm の細孔量が増加するとともに 50nm 以上の細孔量が減少する傾向を示し、深さ方向の細孔構造の緻密化が確認された。特に温度履歴養生後に 6 日以上⁴⁾の湿潤養生を行った水準 (L-w6, L-w13) および水中養生を行った水準 (W) では、内部の総細孔量および 50nm 以上の細孔量の減少がその他の水準よりも明確となる結果

となった。これは、温度履歴養生後の湿布養生による効果が深さ方向の緻密化に大きく影響を及ぼしたものと考えられる。

図-8にB60の深さ方向の細孔径分布測定結果を養生条件ごとに示す。いずれの養生条件でも最表層と内部の細孔量が大きく異なり、深さ方向に急激に緻密化することがわかる。高炉スラグ微粉末は潜在水硬性を有し、長期にわたり水和水が進行するため、乾燥による水分逸散の影響が顕著である。このため、乾燥の影響を大きく受ける最表層部分では内部よりも細孔量が増加することが考えられる。養生条件による比較をすると、養生条件L-w6, L-w13, Wでは養生条件L, L-w1よりも表層部分の細孔量が大幅に減少する傾向を示した。また、図-9に示すように、B60では高炉スラグ微粉末の反応による深緑色の呈色が見られるが、温度履歴養生後の湿布養生期間が長いほど、表層からの乾燥領域が小さくなることわかる。すなわち、湿布養生による水分供給および乾燥抑制によって高炉スラグ微粉末の反応による緻密な細孔構造が形成され、水分浸透の抑制に繋がったと考えられる。

3.6 水分浸透速度係数と細孔量の関係

既往の研究⁹⁾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から、50nmを閾値として水分浸透速度係数との関係を整理した。図-10に水分浸透速度係数と50nm以上の細孔量の関係を示す。なお、細孔量の値は表面から50mmまで10mmごとに測定した細孔量を平均した値とした。結合材種類に関わらず、50nm以上の細孔量の増加に従い、水分浸透速度係数が増加し、50nm以上の粗大な空隙が水分浸透速度係数に影響を及ぼすことがわかる。

3.7 開放空隙率

図-11に開放空隙率試験の結果を養生条件別に示す。OPC, B60ともに温度履歴養生後に湿布養生を行うことで開放空隙率が低下し、湿布養生期間が長いとその影響が大きいことがわかる。

3.8 水分浸透速度係数の変換値と実測値の比較

図-12に水分浸透速度係数の実測値と水分浸透時の質量増分と開放空隙率から算出した変換値の関係を示す。なお、図-12は、文献²⁾の結果に本検討の結果を加えたものである。使用材料および養生条件に関わらず、変換値は実測値と同等の値となることわかる。ただし、高炉スラグ微粉末を用いて温度履歴養生後6日以上湿布養生を行った水準および水中養生を行った水準(図中、白抜き、○)では、変換値が実測値よりも大きくなることわかる。これは、図-5に示したとおり、B60を用いたこれらの養生水準で吸水量に対して水分浸透深さが浅いことが要因として考えられ、高炉スラグ微粉末を用いた場合では吸水量をもとにした変換値が実測値と異

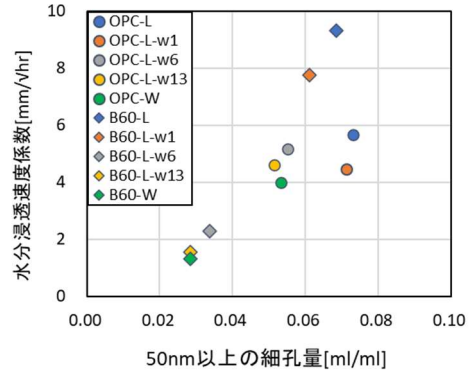


図-10 水分浸透速度係数と50nm以上の細孔量の関係

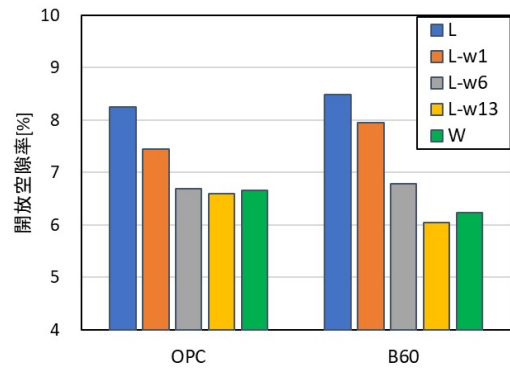


図-11 開放空隙率

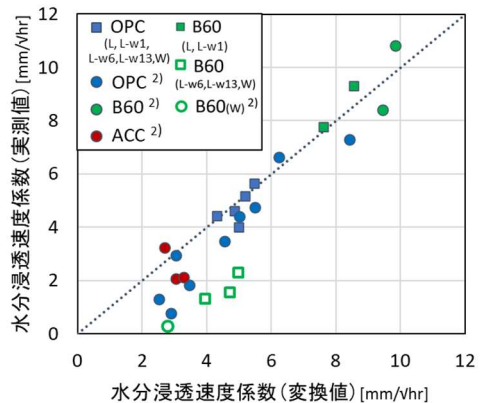


図-12 水分浸透速度係数の変換値と実測値の比較

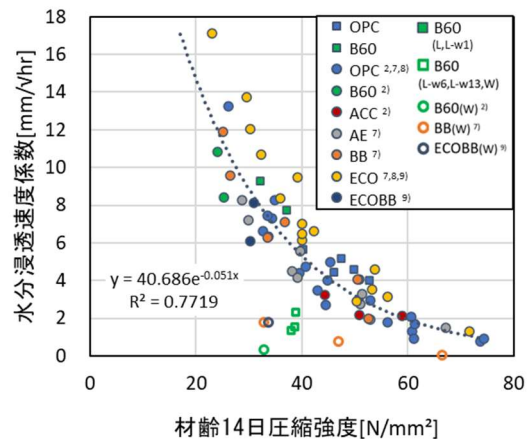


図-13 水分浸透速度係数と材齢14日圧縮強度の関係

なる値となる可能性があると考えられる。

3.9 水分浸透速度係数と圧縮強度の関係

図-13 に水分浸透速度係数と材齢 14 日圧縮強度の関係を、文献^{2,7,8,9)}に本検討の結果を加えて結合材別に示す。結合材種類に関わらず、圧縮強度の増加に伴い、水分浸透速度係数が低下することがわかる。しかし、高炉スラグ微粉末を用いて温度履歴養生後 6 日以上湿布養生を行った水準および水中養生を行った水準（図中、白抜きのみ、○）では圧縮強度に対する水分浸透速度係数が顕著に小さいことがわかる。ここまで述べてきた高炉スラグ微粉末の混和による空隙構造の深さ方向の急激な変化および内部での緻密な空隙構造の形成が水分浸透速度係数の低下に影響し、異なる傾向となったと考えられる。

以上の結果より、全体の傾向としては、結合材の種類、配合、養生条件によらず、PCa 製品の一般的な管理材齢である材齢 14 日圧縮強度から水分浸透速度係数を管理できる可能性が示された。しかし、高炉スラグ微粉末を用いて十分に湿潤養生を行った場合では他のものの関係式を適用した際、過度に安全側の管理となることが考えられる。

4. まとめ

本検討では、高炉スラグ微粉末を 60%の置換率で用いたコンクリートを対象に、温度履歴養生後の水分供給が水分浸透挙動および空隙構造に及ぼす影響について検討した。以下に本検討で得られた知見を示す。

- (1) 温度履歴養生後の湿布養生により、圧縮強度の向上および水分浸透速度係数の低下が確認された。
- (2) 高炉スラグ微粉末を 60%の置換率で用い温度履歴養生後に気中保管した場合、水分浸透速度係数が大きくなるのに対して、温度履歴養生後に 6 日以上湿布養生を行うことで水分浸透速度係数が顕著に低下した。
- (3) 高炉スラグ微粉末を用い大幅な水分浸透の抑制が確認された養生条件では、吸水量に対する水分浸透深さが小さくなった。これは、水分浸透深さが供試体側面を除いた中央 5 点の平均値であり、側面の水の吸い上がりの影響を含まないためと考えられる。
- (4) 高炉スラグ微粉末を 60%の置換率で用いた場合、乾燥による水分逸散の影響が顕著であり、最表層部分では内部よりも細孔量が増加し、深さ方向に急激に緻密化した。
- (5) 水分浸透時の質量増分と開放空隙率から算出した水分浸透速度係数の変換値が実測値と同等の値となった。ただし、高炉スラグ微粉末を用いた場合では変換値が実測値と異なる値となる可能性がある。
- (6) 材齢 14 日圧縮強度から水分浸透速度係数を管理で

きる可能性が示されたが、高炉スラグ微粉末を用いて十分に湿潤養生を行った場合では他のものの関係式を適用した際、過度に安全側の管理となることが考えられる。

謝辞：本検討の実施にあたり、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 年生の春木彩乃氏の協力を得た。

参考文献

- 1) 住吉宏，窪山潔，今橋太一，塩谷勝：コンクリートの組織や物性におよぼす蒸気養生の影響，セメント技術年報，vol.35，pp.290-293，1981.12
- 2) 堀住永樹，上野敦，大野健太郎，鎌田知久：温度履歴養生がコンクリートの水分浸透速度係数および空隙構造に与える影響，土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会，V-312，2024.8
- 3) 小池賢太郎，加藤佳考，蔵重勲，上野敦，高橋駿人：水分浸透速度係数試験におけるコンクリートの吸水量と水分浸透深さとの関係，コンクリート技術シリーズ，No.131，pp.241-244，2022.11
- 4) 伊代田岳史，兼安真司，檀康弘，前田悦孝：高炉スラグ微粉末を高含有したセメントの温度依存特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.139-144，2005.6
- 5) 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.431-441，2009.10
- 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.330-335，1990.4
- 7) 酒井創地，上野敦，鎌田知久，大野健太郎：硬化過程で温度履歴養生を受けたコンクリートの水分浸透挙動に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.45，No.1，pp.850-855，2023.6
- 8) 堀住永樹，上野敦，大野健太郎，鎌田知久：温度履歴養生がコンクリートの水分浸透速度係数に及ぼす影響，土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会，V-270，2023.8
- 9) 渥美はる香，堀住永樹，上野敦，鎌田知久，大野健太郎：温度履歴を受けたエコセメントコンクリートの水分浸透性状に関する検討，土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会，V-313，2024.8