

## 蒸気養生コンクリートの水分浸透特性に関する基礎的検討

王傑\*・佐々木謙二\*\*

## Study on Water Permeation Characteristics of Steam-cured Concrete

by

Jie WANG\* and Kenji SASAKI\*\*

In this study, we investigated the water permeation characteristics of steam-cured concrete by focusing on the presence or absence of granulated blast-furnace slag fine powder, steam curing conditions (maximum temperature, holding time), and the presence or absence of water supply after steam curing. As a result, it was confirmed that the porosity and the water permeation rate coefficient were reduced by mixing the blast furnace slag fine powder. It was also clarified that the water permeation rate coefficient and porosity differ greatly depending on the steam curing conditions. Furthermore, we proposed a formula for predicting the coefficient of water permeation rate of steam-cured concrete.

**Key words** : steam curing, water penetration, ground granulated blast-furnace slag

## 1. はじめに

コンクリートの各種性能は、材料や配合のみならず、施工の良し悪し、養生条件、暴露条件などの影響を大きく受ける。その点を考慮すると、現場打ちのコンクリートよりも工場で製造されるプレキャストコンクリート (PCa) 製品の方が品質が安定しており、施工の面においても工期短縮や省力化が可能である。それにもかかわらず、PCa 製品の利用は拡大されていない。現在の社会状況 (構造物の長期利用のための高耐久・高品質化、環境負荷抑制、副産資源の活用、熟練労働者の不足) を考慮すると、今後 PCa 製品が社会状況を改善する方法として利用される機会は多いと考えられる<sup>1)</sup>。

著者らは、PCa 製品の高品質化、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの副産資源の有効利用が広がりつつあ

る現状を踏まえ、各種結合材と養生条件の組合せがコンクリートの材料特性に及ぼす影響について検討を行っている。これまで、蒸気養生コンクリートの力学的特性<sup>2)</sup>、収縮特性<sup>3)</sup>、塩分浸透抵抗性<sup>4)</sup>、中性化<sup>5)</sup>についての検討を行ってきた。コンクリート中の水分浸透は、コンクリート中の鋼材の腐食を予測するために非常に重要になる。土木学会のコンクリート標準示方書が改訂され<sup>6)</sup>、コンクリート中の鋼材腐食限界照査に水の浸透に伴う照査が追加されるとともに、コンクリート中の水分浸透速度係数試験方法が制定された。同示方書ではセメント種類に関わらず水分浸透速度係数は同一水セメント比の場合、同じ値を用いてよいとされているが、高炉スラグ微粉末を用いると、水分浸透抵抗性は高くなると考えられる。さらに、蒸気養生コンクリートの水分浸透速度係数に関する研究はさほど

Table 1 使用材料

項目	種類	品質
セメント (C)	普通ポルトランドセメント (N)	密度 3.15g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 3240cm <sup>2</sup> /g
混和材 (SCM)	高炉スラグ微粉末 (BFS)	密度 2.91g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 5920cm <sup>2</sup> /g
細骨材 (S)	海砂	密度 2.56g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.87%, 粗粒率 2.47
粗骨材 (G)	碎石 (安山岩)	密度 2.76g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.69%, 粗粒率 6.66
混和剤 (AD)	高性能減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物

令和3年7月2日受理

\* 総合工学専攻 (Graduate student, Department of Advanced Engineering)

\*\* システム科学部門 (Division of System Science)

Table 2 配合

配合記号	結合材種類	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
				水 W	セメント C	混和材 SCM	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 AD
N30	N	30	38	165	550	—	618	1084	2.20
N35		35	39		471	—	659	1108	1.41
N40		40	40		413	—	695	1120	1.03
N45		45	41		367	—	728	1125	0.92
N50		50	42		330	—	758	1125	0.83
NB3035	N+BFS	30	38		358	193	615	1075	1.93
NB3535		35	39		306	165	655	1101	1.41
NB4035		40	40		268	144	691	1114	1.03
NB4535		45	41		238	128	724	1120	0.73
NB5035		50	42		215	116	754	1125	0.66

Table 3 養生条件

養生条件記号	養生方法	前置時間 (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 0.75 日以降)
【40-5/D】	蒸気養生	3	20	40	5	5	気中養生 (20°C, R.H.60%)
【40-10/D】					10		
【50-5/D】				5			
【60-1/D】				1			
【60-5/D】				5			
【50-5/WD】				50	5		水中養生 (20°C, 材齢 7 日まで)→気中養生 (20°C, R.H.60%)
【W28】				封緘養生(20°C, 2 日)			水中養生 (20°C, 材齢 28 日まで)

なく、蒸気養生における初期高温履歴が水分浸透速度係数に及ぼす影響は明らかでない。

そこで本研究では、蒸気養生を模擬した初期高温履歴を与えたコンクリート試験体を用いて、水分浸透特性に及ぼす高炉スラグ微粉末の有無、水結合材比、蒸気養生条件の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

#### (1) 使用材料

Table 1 に使用材料を示す。実験に用いた結合材は、普通ポルトランドセメント[N]、N と高炉スラグ微粉末 6000 の混合系(65%:35%)[NB]の 2 種類とした。細骨材は海砂、粗骨材は碎石を用いた。混和剤として高性能減水剤を用いた。

#### (2) 配合

Table 2 にコンクリートの配合を示す。PCa 製品を想定した Non-AE コンクリートとした。水結合材比を 30, 35, 40, 45, 50% と変化させ、目標空気量 2.0% とした。単位水量は 165kg/m<sup>3</sup> 一定とし、目標スランプ 12cm となるよう適宜混和剤の添加量を調整した。

### 2.2 養生条件

Table 3 に養生条件を示す。蒸気養生条件は、1 日 1 サイクルの製造で、打込みから 18 時間程度経過した後に脱型することを想定し、最高温度、最高温度保持時間、後養生方法を変化させた。前置時間は 3 時間、昇温速度は 20°C/h とした。最高温度は 40, 50, 60°C、最高温度保持時間は 1, 5, 10 時間とし、それらの組合せのうち、表-3 に示した 5 パターンとした。降温速度は 5°C/h (徐冷) とし、後養生方法は気中養生(気温 20°C, 湿度 60%)または水

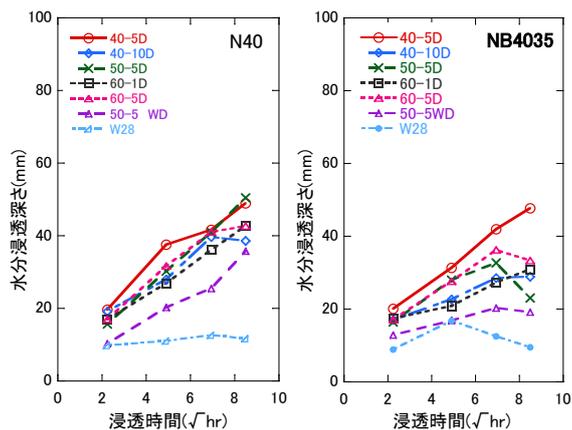


Fig. 1 水分浸透深さに及ぼす蒸気養生条件の影響

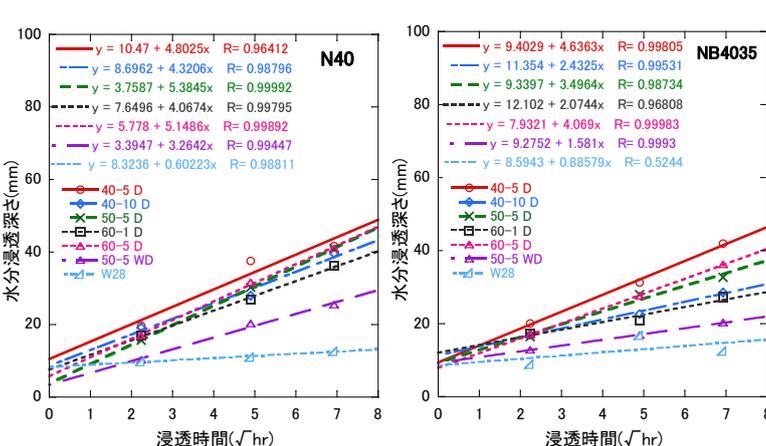


Fig. 2 水分浸透深さの回帰結果

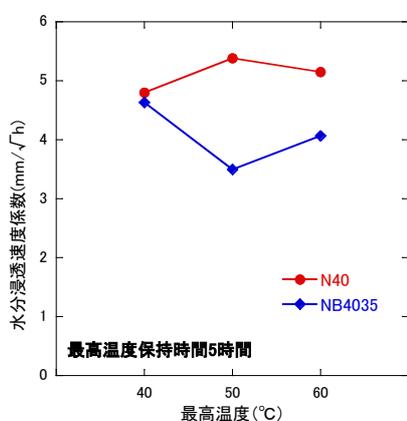


Fig. 3 最高温度の影響

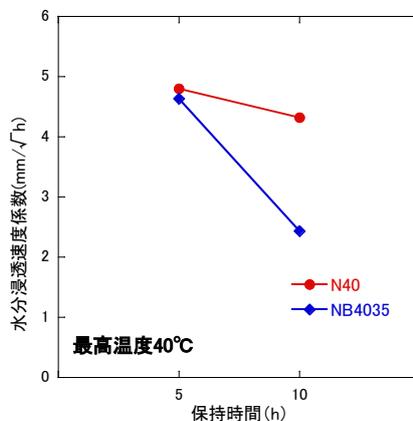


Fig. 4 最高温度保持時間の影響

中養生(20°C)とした。なお本研究では、恒温恒湿槽(湿度90~95%)において所定の温度履歴を与えることにより蒸気養生を模擬した。また供試体からの水分逸散を防ぐために、供試体をビニールで密封した状態で温度履歴を与えた。

すべての養生条件において、練混ぜから18時間後に脱型を行い、所定の後養生を行った。

なお、本研究では試験体名を「配合記号【養生条件記号】」で表す。

## 2.3 実験項目

### (1) 圧縮強度

圧縮強度は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に従い測定した。供試体の寸法は、φ100×200mmとした。材齢0.75, 14, 105日において試験を実施した。

### (2) 水分浸透深さ、水分浸透速度係数

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に準拠し実施した。試験体脱型後、試験体底面から25mmの位置を切断した後、20°C、R.H60°C環境下に91日間静置した。その後、水に浸漬する面およびその対面以外の面を防水シールし、切断面を下、

打込み面を上にして、試験体下部が10mm水面下になるように浸漬した。浸漬開始から5, 24, 48, 72時間後に割裂し、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求めた。浸漬期間5, 24, 48時間の水分浸透深さと浸漬時間の平方根の関係を直線近似し、その傾きを水分浸透速度係数として求めた。

### (3) 空隙率

材齢105日にφ100×200mmの円柱供試体の中心部において高さ50mmの円盤試験体を切断・採取した。飽水処理した後に、水中質量と表乾質量の測定した。その後、50°C乾燥炉に入れ、2週間乾燥させ、50°C乾燥質量を測定した。水中質量、表乾質量および50°C乾燥質量より、次式(1)を用いて空隙率を算出した。

$$\varepsilon = \frac{(m_a - m_d) \times \rho_w}{m_a - m_w} \times 100 \quad (1)$$

ただし、 $\varepsilon$ :空隙率(%),  $m_a$ :供試体の表乾質量(g),  $m_d$ :50°C乾燥後の供試体質量(g),  $m_w$ :供試体の水中質量(g),  $\rho_w$ :水の密度(g/cm<sup>3</sup>)である。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 水分浸透深さの測定結果および水分浸透速度係数の算出結果

##### (1) 蒸気養生条件の影響

Fig. 1 に、蒸気養生条件が異なる N40, NB4035 試験体における浸透時間の平方根と水分浸透深さの関係を表す。Fig.1 には浸透時間 5, 24, 48, 72 時間の水分浸透深さの結果を示している。いずれの養生条件においても、浸透時間の増加に伴い、水分浸透深さは基本的に大きくなる傾向が認められた。同一の浸透時間で比較すると、NB4035 の方が蒸気養生条件により水分浸透深さに大きな違いが生じていることが分かる。同一の蒸気養生条件において結合材種類に着目すると、いずれの蒸気養生条件においても NB4035 の方が水分浸透深さが小さくなっている。また、後養生方法の違いの観点から、蒸気養生後に材齢 7 日まで水中養生とした【50-5/WD】の方が、脱型直後から気中養生とした【50-5/D】よりも水分浸透深さが明確に小さくなっていることが確認される。

Fig. 2 に、浸透時間 5, 24, 48 時間の水分浸透深さの回帰結果を示す。相関係数は、概ね 0.98 以上であり、回帰直線の傾きから求められる水分浸透速度係数は妥当なものであると考えられる。

Fig. 3 に、最高温度保持時間 5 時間における最高温度と水分浸透速度係数の関係を示す。N40 の場合、水分浸透速度係数に及ぼす最高温度の影響はあまり見られないが、NB4035 においては最高温度の影響が明確に確認され、40°C に比べて 50, 60°C の場合に水分浸透速度係数が小さくなることが分かる。高炉スラグ微粉末の潜在水硬性による反応には、温度依存性が強く、高温養生の場合に高炉スラグ微粉末の反応活性が励起され、反応が促進されることによってコンクリートの内部構造が緻密になり、水分浸透速度係数が小さくなったと考えられる。

Fig. 4 に、最高温度 40°C, 60°C における最高温度保持時

間と水分浸透速度係数の関係を示す。最高温度 40°C の場合、最高温度保持時間が長いほど水分浸透速度係数が小さくなることが確認できる。特に、最高温度保持時間 10 時間の NB4035 の水分浸透速度係数は 5 時間の約半分の値となった。これは、蒸気養生の最高温度としては比較的低い 40°C で長時間養生されることにより、水和の促進が長時間継続したためと考えられる。一方、最高温度 60°C の場合、最高温度保持時間が長いほど水分浸透速度係数が大きくなることが確認できた。これは、セメント、高炉スラグ微粉末いずれの水和反応も促進されるものの、高温長時間の養生によって生成される水和物が未反応結合材の表面に緻密に生成し、それ以降の水和反応の継続が停滞、阻害されることによって、比較的に粗い空隙構造となったためと考えられる。

Fig. 5 に、積算温度と水分浸透速度係数の関係を示す。図には、-10°C を基準として、注水から脱型（18 時間後）までの蒸気養生中の積算温度を示している。N40 では積算温度の影響はさほど見られないが、NB4035 においては積算温度の影響が見られるものの、積算温度が大きいほど水分浸透速度係数が小さくなる訳ではない。

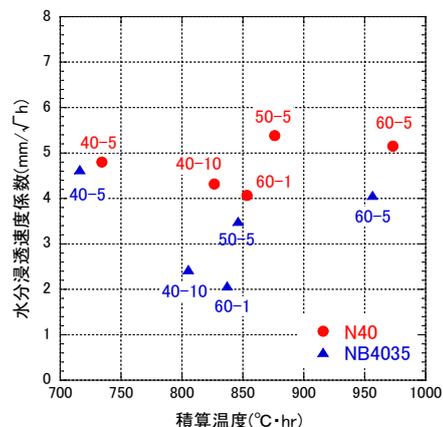


Fig. 5 積算温度と水分浸透速度係数の関係

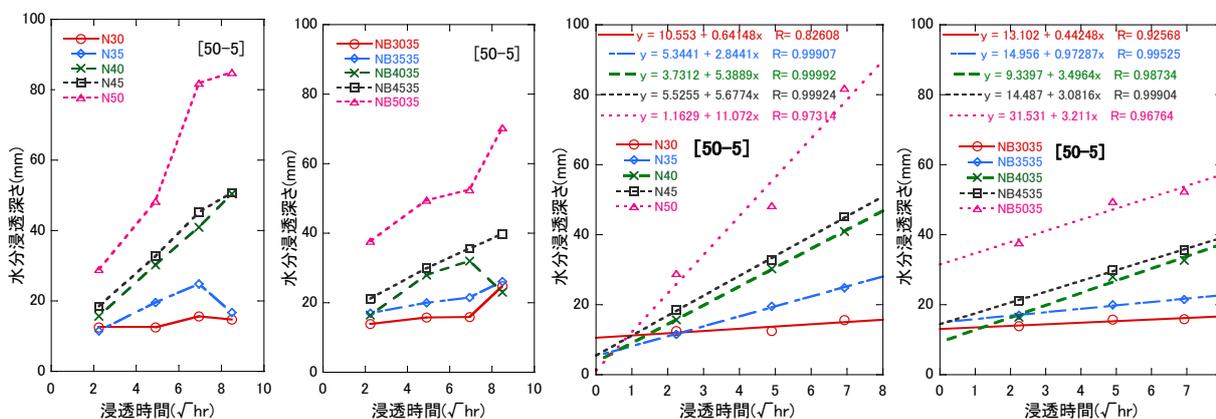


Fig. 6 水分浸透深さに及ぼす水結合材比の影響

Fig. 7 水分浸透深さの回帰結果

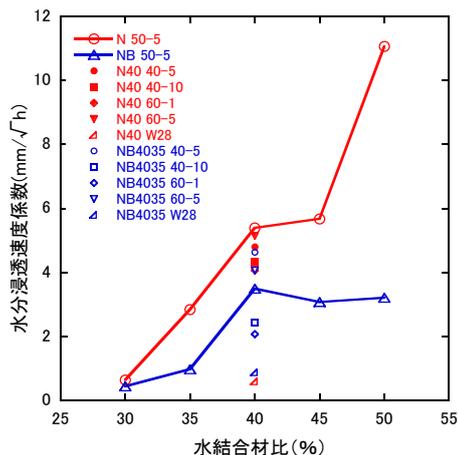


Fig. 8 水結合材比と水分浸透速度係数の関係

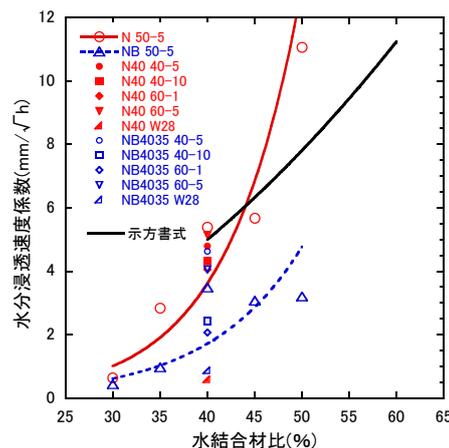


Fig. 9 水分浸透速度係数の回帰結果

## (2) 水結合材の影響

Fig. 6 に、水結合材比が異なる蒸気養生条件【50-5】の場合における浸透時間の平方根と水分浸透深さの関係を表す。Fig.6には浸透時間 5, 24, 48, 72 時間の水分浸透深さの結果を示している。蒸気養生条件が異なる Fig.1 と同様に、いずれの水結合材比の試験体においても、浸透時間の増加に伴い、水分浸透深さは基本的に大きくなる傾向が認められた。同一の浸透時間で比較すると、N の場合の方が水結合材比により水分浸透深さに大きな違いが生じていることが分かる。同一の水結合材比において結合材種類に着目すると、いずれの水結合材比においても NB の方が水分浸透深さが小さくなっている。

Fig. 7 に、浸透時間 5, 24, 48 時間の水分浸透深さの回帰結果を示す。相関係数は、概ね 0.98 以上であり、回帰直線の傾きから求められる水分浸透速度係数は妥当なものであると考えられる。

Fig. 8 に、蒸気養生条件【50-5】における水結合材比と水分浸透速度係数の関係を示す。図より、同一水結合材比の場合、高炉スラグ微粉末を用いた NB は、N に比べて水分浸透速度係数が小さくなっている。これは、高炉スラグ微粉末を用いた NB のけい酸カルシウム水和物 C-S-H のゲル水量の増加によって C-S-H の密度が減少したことにより、C-S-H 生成質量が同じ場合、密度が低くなると固体体積は大きくなり、空隙の充填効果が高くなることで、毛細管空隙が減少したためと考えられる<sup>7)</sup>。N の場合、水結合材比の減少とともに、水分浸透速度係数も明確に減少することが分かる。これは、水結合材比が小さくなると、硬化体中の毛細管空隙が減少し、連続の空隙から非連続の空隙となること、材料分離の傾向が小さくなり、ブリージングによる水みちおよび骨材下面の空隙が生じにくくなることによるものと考えられる<sup>8)</sup>。NB の場合、水結合材比が小さい場合に、水分浸透速度係数が著しく小さくなる事が分かる。また、同一の配合であっても、蒸気養生条

件の違いにより、水結合材比 5%程度に相当する程度の水分浸透速度係数の相違があることが分かる。

Fig. 9 に、蒸気養生条件【50-5】における水結合材比と水分浸透速度係数の関係を指数関数で回帰した結果を示す。図には、コンクリート標準示方書〔設計編〕<sup>9)</sup>の水分浸透速度係数の予測式(式(2))も併記している。

$$q_p = 31.25 \cdot (W/B)^2 \quad (2)$$

ここに、 $q_p$ :コンクリート中の水分浸透速度係数の予測値 (mm<sup>2</sup>/hr)、 $W/B$ :水結合材比、である。

本検討においても、示方書式と同様に 2 次関数で回帰することを試みたが、水分浸透速度係数が最大で 10 倍程度異なるものに対して 2 次関数では十分に回帰しきれなかったことから、指数関数で回帰し、N と NB それぞれの場合に対して、下記の式(3)、(4)を得た。

$$q_p = 0.0218 \cdot e^{12.8W/B} \quad (3)$$

$$q_p = 0.0286 \cdot e^{10.2W/B} \quad (4)$$

データ数が少ないものの、指数関数でおおよそ評価できていることから、蒸気養生コンクリートの水分浸透速度係数 $q_p$ の予測式を上記の式(3)、(4)のように提案する。なお、蒸気養生条件や後養生方法の影響については、現段階においては十分なデータがなく、それらの反映については今後の課題としたい。

## 3.2 水分浸透深さと吸水量の関係

Fig. 10 に、蒸気養生条件が異なる N40, NB4035 試験体における浸透時間 5, 24, 48, 72 時間の水分浸透深さと吸水量の関係を示す。結合材種類、蒸気養生条件に関わらず、吸水量と水分浸透深さの関係には高い相関があることが分かる。

Fig. 11 に、水結合材比が異なる蒸気養生条件【50-5】の

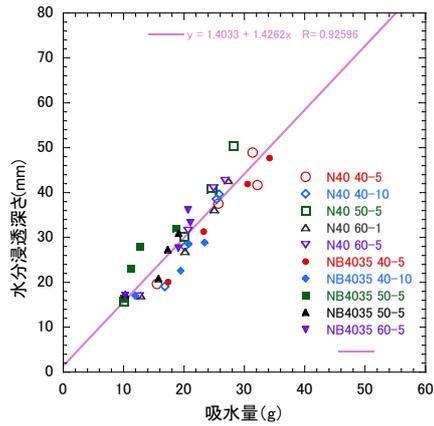


Fig. 10 蒸気養生条件の影響

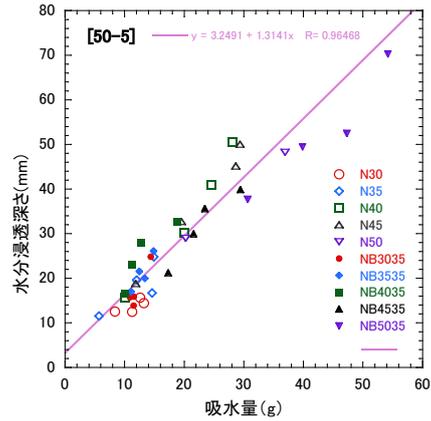


Fig. 11 水結合材比の影響

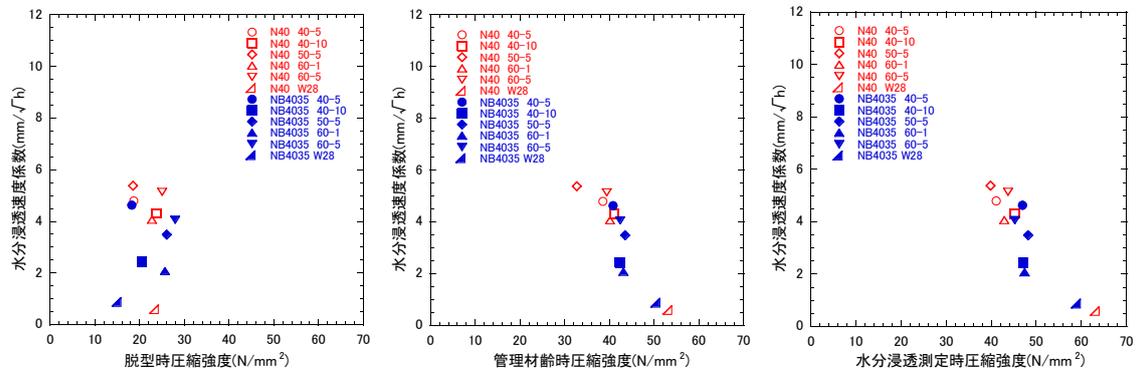


Fig. 12 圧縮強度と水分浸透速度係数の関係に及ぼす蒸気養生条件の影響

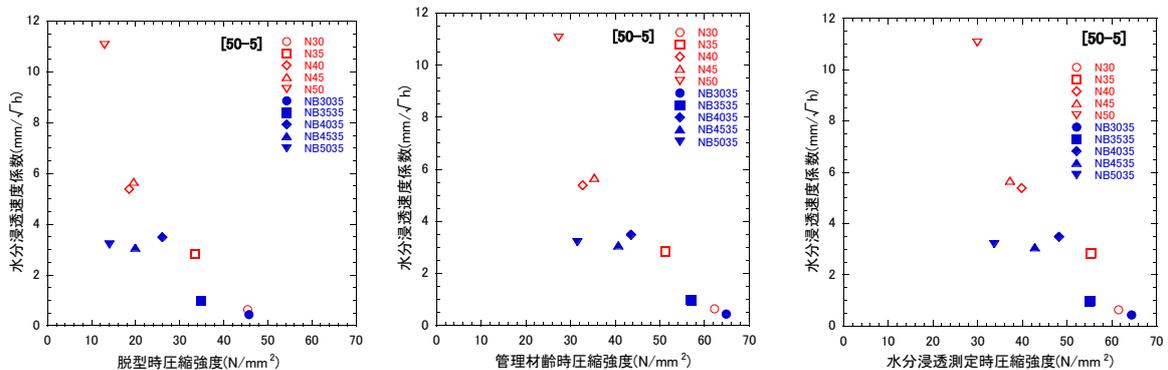


Fig. 13 圧縮強度と水分浸透速度係数の関係に及ぼす水結合材比の影響

場合における浸透時間 5, 24, 48, 72 時間の水分浸透深さと吸水量の関係を示す。蒸気養生条件が異なる場合と同様に、結合材種類、水結合材比に関わらず、吸水量と水分浸透深さの関係には高い相関があることが分かる。

### 3.3 水分浸透速度係数と圧縮強度の関係

Fig. 12 に、蒸気養生条件が異なる N40, NB4035 の圧縮強度と水分浸透速度係数の関係を示す。脱型時圧縮強度の場合には、明確な関係を確認できない。これは、蒸気養生

条件によって脱型後の強度発現性が異なり、水分浸透速度係数測定時の硬化体の特性との乖離が大きいと考えられる。管理材齢時（材齢 14 日）圧縮強度の場合には、圧縮強度が大きいほど水分浸透速度係数が小さくなる傾向が確認できる。水分浸透測定時（材齢 105 日）圧縮強度の場合には、圧縮強度が大きいほど水分浸透速度係数が小さくなることがより明確に確認できる。これは、脱型以降の強度増進はおおよそ管理材齢である材齢 14 日までで収束し、それ以降の強度増進が少なく、硬化体特性（空隙構

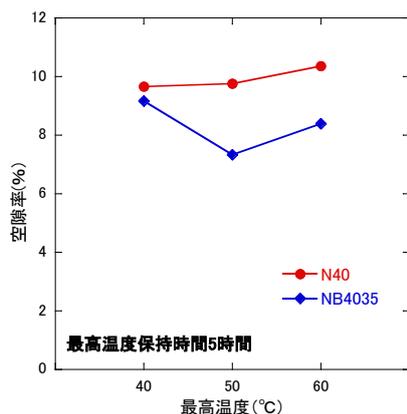


Fig. 14 最高温度の影響

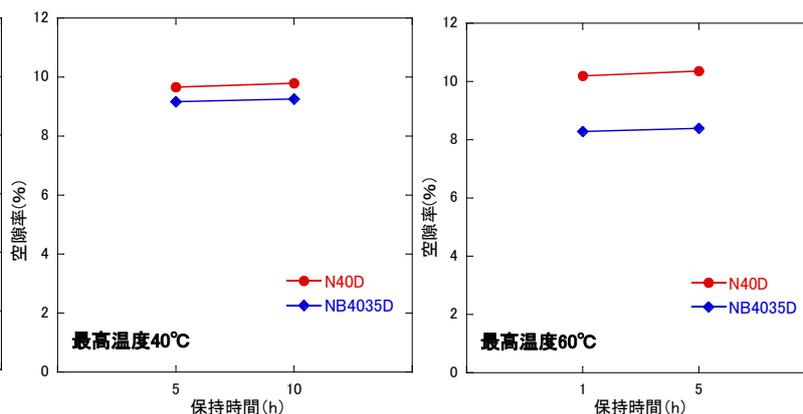


Fig. 15 最高温度保持時間の影響

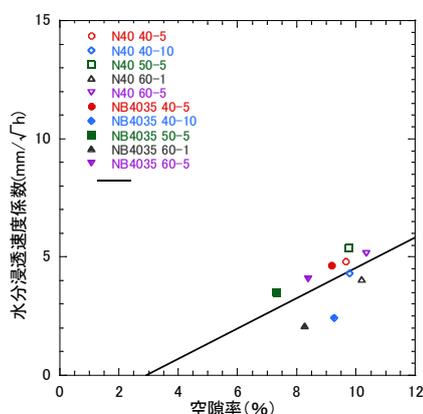


Fig. 16 蒸気養生条件の影響

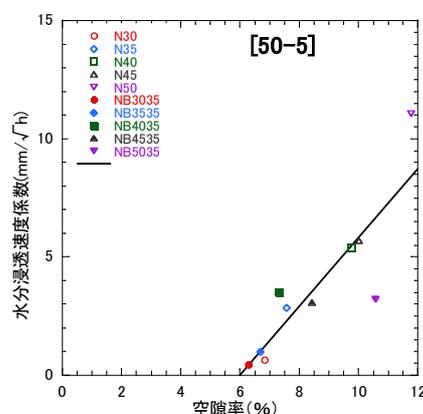


Fig. 17 水結合材比の影響

造等)が大きく変化することはないためであると考えられる。

Fig. 13 に、水結合材比が異なる蒸気養生条件【50-5】の水分浸透速度係数と圧縮強度の関係を示す。脱型時圧縮強度、管理材齢時（材齢 14 日）圧縮強度、水分浸透測定時（材齢 105 日）圧縮強度のいずれの場合においても、圧縮強度が大きいほど水分浸透速度係数が小さくなる傾向が確認できる。

以上の結果より、蒸気養生条件が異なる場合、水結合材比が異なる場合のいずれにおいても、PCa 製品の一般的な管理材齢である材齢 14 日以降の圧縮強度で、水分浸透速度係数を概ね評価できると考えられる。

### 3.4 空隙率の算出結果

#### (1) 蒸気養生条件の影響

Fig. 14 に、最高温度保持時間 5 時間における最高温度と空隙率の関係を示す。N40 の場合、空隙率に及ぼす最高温度の影響はあまり見られないが、NB4035 においては最高温度の影響が明確に確認され、40°C に比べて 50、60°C の場合に空隙率が小さくなるのが分かる。既往の研究<sup>9)10)11)</sup>によれば、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性による反

応には強い温度依存性があり、高温養生の場合に高炉スラグ微粉末の反応活性が励起されて反応が促進されたことによって、コンクリート内部構造が緻密になり、空隙率が低くなったと考えられる。

Fig. 15 に、最高温度 40°C、60°C における最高温度保持時間と空隙率の関係を示す。いずれの結合材種類、最高温度においても、最高温度保持時間によらず、空隙率がほぼ同等であることが分かる。いずれの最高温度においても、高炉スラグ微粉末を用いた NB4035 の空隙率の方が N40 よりも低くなっている。

#### (2) 空隙率と水分浸透速度係数の関係

Fig. 16 に、蒸気養生条件が異なる N40、NB4035 試験体における空隙率と水分浸透速度係数の関係を示す。空隙率が小さいほど、水分浸透速度係数も小さくなる傾向が確認できるが、同程度の空隙率であっても水分浸透速度係数が異なることが分かる。これは、空隙率が同程度であっても、養生条件により空隙径分布、空隙の複雑性が異なるためであると考えられる。

Fig. 17 に、水結合材比が異なる蒸気養生条件【50-5】の場合における空隙率と水分浸透速度係数の関係を示す。空隙率が小さいほど、水分浸透速度係数も小さくなる傾向が

確認できるが、水結合材比が 50%の場合に著しく異なる傾向を示した。その理由は現段階では不明であるので、今後詳細を検討する予定である。

#### 4. まとめ

本研究では、蒸気養生コンクリートの水分浸透特性について高炉スラグ微粉末混合の有無、蒸気養生条件（最高温度、保持時間）、蒸気養生後の水分供給の有無に着目して検討した。その結果、高炉スラグ微粉末混合することで、水分浸透速度係数が小さくなることが確認された。また、蒸気養生条件により水分浸透速度係数が大きく異なることを明らかにした。さらに、蒸気養生コンクリートの水分浸透速度係数予測式を提案した。

#### 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：プレキャストコンクリート製品の設計と利用研究委員会報告書，2009.8.
- 2) 佐々木謙二，片山強，原田哲夫，永藤政敏：蒸気養生を模擬した温度履歴を与えたコンクリートの力学的性質に及ぼす養生条件と結合材種類の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.359-364，2011.7.
- 3) 佐々木謙二，岡野耕大，片山強，原田哲夫：PCa 製品を想定した温度履歴を与えたコンクリートの収縮性状に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.517-522，2013.7.
- 4) 片山強，佐々木謙二，原田哲夫：プレキャストコンクリート製品の耐塩害設計に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.1，pp.709-714，2017.7.
- 5) 中山大誠，佐々木謙二，原田哲夫：蒸気養生を模擬した温度履歴を与えたコンクリートの中性化抵抗性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.605-610，2019.7.
- 6) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2017.
- 7) 佐川孝広，石田哲也，Yao LUAN，名和豊春：高炉セメントの水和物組成分析と空隙構造特性，土木学会論文集E，No.3，pp.311-324，2010.
- 8) 関博，宮田克二，北峯博司，金子雄一：比抵抗によるコンクリートの緻密性に関する実験的一考察，土木学会論文集，No.451，pp.49-57，1992.
- 9) RICHARDSON I G, WILDING C R, DICKSON M J.: The hydration of blast furnace slag cements, *Adv Cem Res*, Vol.2, No.8, pp.147-157, 1989.
- 10) ESCALANTE-GARCIA J I, SHARP J H.: The effect of temperature on the early hydration of Portland cement and blended cement, *Adv Cem Res*, Vol.12, No.3, pp.121-130, 2000.
- 11) HASHIMA R, FATHOLLAH S.: The effect of heat treatment on the compressive strength of cement-slag mortars, *Master Design*, Vol.32, No.8, pp.4618-4628, 2011.