

論文 蒸気養生中の水分率変化における細孔構造

原 洋介*1・大野 優実*2・鳥海 秋*3・宇治 公隆*4

要旨: プレキャストコンクリートの多くは、生産性向上を目的に促進養生が施されており、一般的に蒸気養生が採用されている。この蒸気養生を施したコンクリートは、封かん養生や水中養生を施したコンクリートに比べ、細孔構造が疎となることが知られている。本研究では、蒸気養生中の水分率変化および重量変化を測定することにより、薄肉厚部材では、蒸気養生中の乾燥が細孔構造を疎にする一要因であることを明らかにした。さらに、混合セメントを用いることで、蒸気養生中の乾燥を抑制することを提案している。

キーワード: 蒸気養生, 水分率変化, 印加電圧方式, 蒸発, 細孔構造, プレキャストコンクリート

1. はじめに

プレキャストコンクリートの多くは、生産性向上を目的に促進養生が施されており、一般的に蒸気養生が採用されている。しかし、蒸気養生を施したコンクリートは、封かん養生や水中養生を施したコンクリートに比べ、細孔構造が疎となり、同一配合の封かん養生や水中養生を施したコンクリートに比べ、耐久性に劣ることが知られている¹⁾。さらに、蒸気養生を施したコンクリートは、微細なクラックが発生するとの報告もある²⁾。これら既往の研究では、温度履歴による体積膨張が主な要因とされてきた。しかし、蒸気養生が細孔構造や微細なクラックの発生に対し、どの様に影響しているかについて、未だ明確になっていない。

蒸気養生では、高温の水蒸気を養生槽内に噴射することにより温度制御を行っていることから、湿潤養生の一手法として考えられ、蒸気養生中のコンクリートは乾燥しないとされてきた。しかし筆者らは、蒸気養生完了直後のコンクリートが乾燥状態にあることに注目している。

本研究では、多孔質材料をコンデンサとして、その内部空隙に吸収したセメントペーストの水分率変化を電氣的に捉える印加電圧方式³⁾により、蒸気養生を施したコンクリート（以下、蒸気養生コンクリートと記す）および5日間の封かん養生を施したコンクリート（以下、封かん養生コンクリートと記す）の水分率変化を測定し、蒸気養生がコンクリート中の水分変化に与える影響を定量的に把握した。また、コンクリート中の水分変化は、セメントの水和反応により消費される場合と、蒸発により失われる場合とが考えられる。そこで、蒸気養生中の供試体重量を測定することにより、水蒸気による水分供給や、温度履歴による蒸発に関し、定量的に把握している。

さらに、蒸気養生の影響を抑制する方法として、高炉

スラグを混和材として用いて、水和熱を抑制することを提案している。

これら全てのコンクリートに対し、水銀圧入式ポロシメーターを用いて細孔径分布を測定し、細孔構造の比較を行っている。また、コンクリート中に微細なクラックが発生した場合、圧縮強度に対する曲げ強度が低下することが知られており⁴⁾、確認のため、圧縮強度に対する曲げ強度の比を求めた。

2. 蒸気養生中の水分率変化と細孔構造

2.1 供試体の作製

(1) 使用材料

表-1 に使用材料を示す。結合材には普通ポルトランドセメントを用いた。細骨材には砕砂（表乾密度 2.63 g/cm³）を、粗骨材には砕石 2005（表乾密度 2.66 g/cm³）を用いた。混和剤には、高性能減水剤（ポリカルボン酸エーテル系）および AE 剤（変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤）を使用した。

表-1 使用材料

項目	品質
結合材	普通ポルトランドセメント, 密度3.16g/cm ³
細骨材	砕砂, 表乾密度2.63g/cm ³ , 吸水率1.15%, F.M.=3.02
粗骨材	砕石2005, 表乾密度2.66g/cm ³ , 吸水率2.43%, F.M.=6.69
混和剤	高性能減水剤(WR): ポリカルボン酸エーテル系
	AE剤(AE): 変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

(2) コンクリートの配合およびフレッシュ性状

配合を表-2 に示す。水セメント比はプレキャストコンクリートで多く用いられる 40%とし、比較のため、現場打ちコンクリートで多く用いられる 50%も対象とした。コンクリートの配合は、プレキャストコンクリート製品

*1 東京セメント工業株式会社 開発事業部 (正会員)

*2 首都大学東京大 都市環境学部 都市環境学科 都市基盤環境コース

*3 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 (学生会員)

*4 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 教授 博士(工学) (正会員)

で実際に使用されている配合を参考としている。

練り上がったコンクリートに対して、スランプ試験、空気量測定試験および練上がり温度の測定を行い、コンクリートのフレッシュ性状を把握した。測定結果を表-3に示す。

表-2 配合表

Gmax (mm)	目標 スランプ (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				高性能 減水剤 WR	AE剤 AE
					水 w	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G		
20	8.0	4.5	40	43	170	425	736	987	C×0.70%	C×0.0045%
20	8.0	4.5	50	43	170	340	766	1026	C×0.75%	C×0.0030%

表-3 フレッシュ性状

W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (°C)
40	10.5	4.9	18.5
50	9.0	5.3	21.0

(3) 養生条件

蒸気養生条件および養生時間を図-1に示す。

蒸気養生では、プレキャストコンクリートで多く用いられる養生条件としている。比較用に採用した養生条件は、現場打ちコンクリートに多く用いられる封かん養生とした。

蒸気養生は、図-1に示す条件で実施した。約20°Cで練り上がったコンクリートを打設し、蒸気養生槽内にて練り上がり後3時間の前置き後、蒸気養生を開始した。具体的には、1時間につき15°Cのペースで温度を上昇させ、最高温度65°Cを3時間保持したのち、1時間につき5°Cのペースで約20°Cまで降温させた。

蒸気養生終了後は、作業工程上の制約も考慮して、約3時間の冷却時間（そのままの状態に保つ）を確保した後に脱型した。その後、20°C、60%R.H.の恒温恒湿室内に供試体を移して、所定の材齢まで二次養生を行った。二次養生とは、プレキャストコンクリートは一般に、蒸気養生後に強度保証材齢まで保管されるが、この保管を二次養生としている。

封かん養生コンクリートは、コンクリート標準示方書[施工編]⁹⁾において、日平均15°C以上で、普通ポルトランドセメントを用いた場合、5日間の湿潤養生が標準日数とされていることを参考に、鋼製型枠へのコンクリートの打設後、コンクリート内外の水分の移動が無いよう防湿袋を用いて型枠上面を密閉し、20°C、60%R.H.の恒温恒湿室内にて封かん養生し、材齢5日の時点で脱型した。脱型後は、蒸気養生を行ったプレキャストコンクリートと同様に、20°C、60%R.H.の恒温恒湿室内で二次養生を行った。

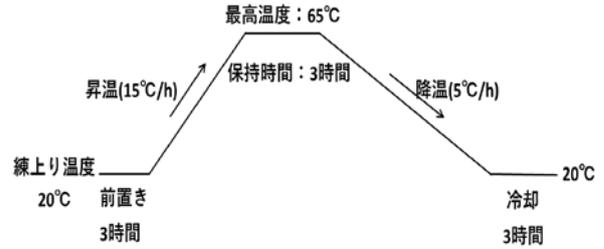


図-1 蒸気養生条件

配合と養生条件により、各供試体の種別を記号により判別している。表-4に各養生条件の供試体記号を示す。

表-4 供試体記号

W/C	養生条件	記号
40%	蒸気養生→気中養生 (s) (d)	S40-d
40%	封かん養生→気中養生	n40-5rd
50%	(r) (d)	n50-5rd

2.2 蒸気養生中の水分率と重量

(1) 養生温度の測定

蒸気養生中の養生槽内温度とコンクリート温度の測定を行った。コンクリート温度は、供試体(φ100mm×200mm)の中心部と打設面表面の2箇所にて測定している。測定結果を図-2に示す。

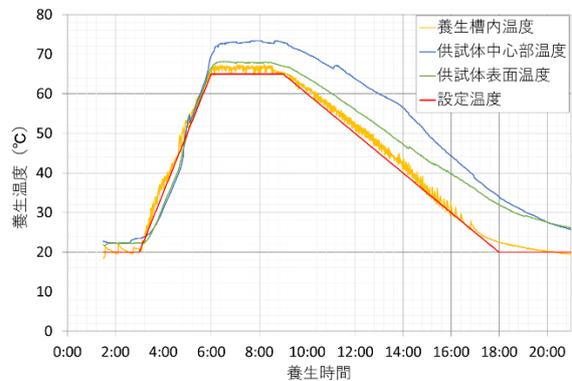


図-2 養生温度

グラフ中の設定温度は、養生槽内温度を制御するための設定温度であり、おおよそ養生槽内温度が設定温度通りに制御されている。昇温時には、供試体温度が養生槽内温度に遅れて上昇しているが、最高温度保持中では、明らかに供試体温度が養生槽内温度を上回っている。降温時には、供試体温度が養生槽内温度に遅れて下降している。これら供試体温度が養生槽内温度に遅れて上昇または下降する理由としては、コンクリートの熱容量が空気に比べ大きいことが挙げられる。また、最高温度保持中などで供試体温度が養生槽内温度を上回る理由として

は、セメントの水和熱によるものと考えられる。この水和熱による発熱量の大きさは、供試体の中心部温度と表面温度との差によって傾向を知ることができると思われる。

(2) 供試体重量の測定

蒸気養生では、高温の水蒸気を養生槽内に噴射することにより、養生温度を制御する方式であり、コンクリートへ水分供給する湿潤養生の一手法であると考えられてきた。しかし、蒸気養生完了直後のコンクリートは明らかに乾燥している。そこで、蒸気養生中の供試体重量変化を測定することにより、コンクリートへの水分供給と乾燥の状況を定量的に把握した。供試体は、型枠重量の影響を最小限とするため、樹脂製型枠（100×100×500mm）に打設し、型枠を含む重量として測定している。このため、供試体重量は変化量として評価した。測定結果を図-3に示す。

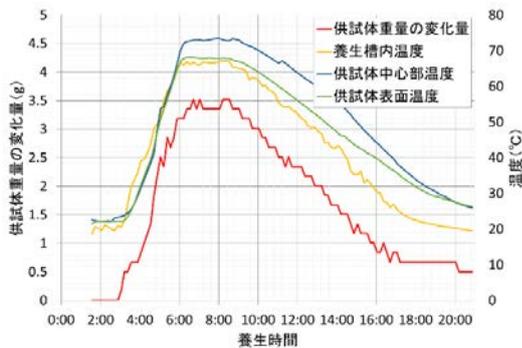


図-3 供試体重量の変化量

供試体重量の変化量を見ると、蒸気養生温度の影響を大きく受けている。高湿度でも、大気よりも高温の物体には結露は生じない。温度に依存する蒸気圧は、高温ほど高くなる。温度差を生じた場合、蒸気圧勾配が生じ、水分が蒸気圧の高い方から低い方へ移動する。昇温時には養生槽内温度に比べ、供試体表面温度が低く、供試体への結露による水分供給が生じ、供試体重量が増加している。最高温度保持中では、養生槽内温度と供試体表面温度の温度差が無く、結露や蒸発の影響を受けず、供試体重量に大きな変化が見られない。そして降温時には、供試体表面温度が養生槽内温度を上回り、蒸気圧勾配による自由水の蒸発が促され、供試体重量が減少している。

(3) 蒸気養生中の水分率（出力電圧の変化率）測定

印加電圧方式では、水分率を直接測定することはできないため、出力電圧の変化を測定することで水分率変化を相対的に捉えた。蒸気養生中の出力電圧の変化を測定するため、印加電圧方式の水分センサを供試体（φ100mm×200mm）の中心部に設置した。印加電圧方式の水分センサの計測原理³⁾は以下の通りである。受感部で

ある多孔質内の空隙に浸透させたコンクリート中のペーストに多孔質材内に配置された電極から電圧を印加する。この電圧の印加によりペースト内部の水分の中で分子間力などの影響を受けていない比較的ルーズな自由水に存在するOH⁻などの陰イオンは陽極に、K⁺、Na⁺などの陽イオンは陰極に移動し、電荷が蓄積される。印加を止めると直ちに電極間に蓄積された電荷が放電される。放電の過程は、コンクリート中の水分量やイオン濃度の変化により電気伝導度が変化するため、この放電過程の残留電圧の変化を計測することで、コンクリート中の水分の変化を相対的に捉えることができる。ただし、センサの出力電圧が受感部である多孔質材料の空隙分布に依存し、また多孔質材料自身の空隙率に若干のバラツキがあるため、同一計測対象を測定した場合においても最大出力が変動する。そこで本研究では、出力電圧は出力電圧の変化率で評価している。

佐野らの研究³⁾によれば、出力電圧はモルタルの温度変化により変動するが、これは自由水が高アルカリ性で、温度により電気伝導度が著しく変化することに起因しているとし、絶対温度 T 時の出力電圧を mV(T)、20°C (293K) 時の計測値に補正した出力電圧を mV(293)とすると、式(1)で表され、任意の温度で計測した出力電圧を20°C時の出力電圧に補正できるとしている。蒸気養生供試体の測定値は、この式(1)を用いて補正した。

$$mV = \frac{mV(T)}{\exp\{-702.67(1/T - 1/293)\}} \quad (1)$$

蒸気養生供試体の乾湿いずれの状況であるかを判定するため、外部との水分移動を受けない封かん養生供試体（φ100mm×200mm）の中心部に同様のセンサを設置し、比較を行った。測定結果を図-4に示す。センサ自身の許容温度範囲は、-20～80°Cであるが、式(1)の適応範囲は、明確でない。s40-dの供試体中心部の温度は、70°C程度に達しており、確認のため未補正值も図-4に示す。

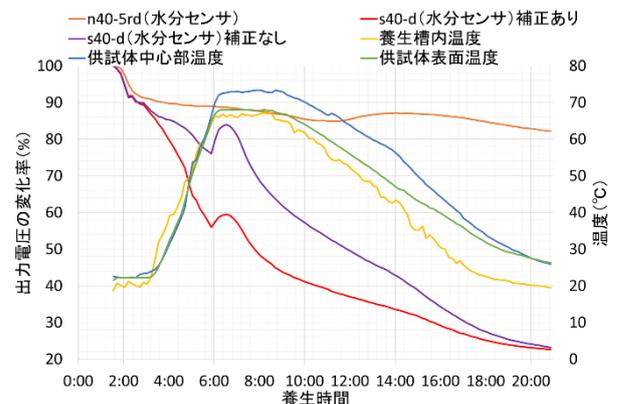


図-4 出力電圧の変化率

S40-d の出力電圧の変化率を見ると、n40-5rd と同様に養生初期の減少勾配が最も急勾配となっている。その後、n40-5rd では緩やかな変化となるが、促進養生を施している蒸気養生では、セメントの水和反応に自由水が消費されることで出力電圧の減少が大きくなっている。最高温度保持の初期段階にて、出力電圧の増加が確認されるが、昇温時の結露がセンサ位置（供試体中心部）にまで浸透したことによると推察される。降温後期では、供試体中心部温度と供試体表面温度の差が小さくなり、水和反応の発熱量が減少している。すなわち水和反応の反応速度が減速していると考えられるが、出力電圧の減少速度に大きな変化は見られない。従って、蒸気養生後期における出力電圧の減少、すなわち水分率の減少は、自由水の蒸発が影響していると考えられる。

2.3 水分率変化と細孔構造

(1) 水分率とコンクリート強度

コンクリート中の自由水がセメントの水和反応によって消費され、結合水となることによって、コンクリートの圧縮強度が増加する。自由水がコンクリート外部との移動を生じない場合には、コンクリートの水分率の変化、すなわち出力電圧の変化とコンクリートの圧縮強度との間には相関関係があると考えられる。そこで、一般的なプレキャストコンクリートの出荷材齢である 14 日までの出力電圧の変化とコンクリートの圧縮強度との比較を行った。材齢 14 日までの出力電圧の変化率を図-5 に、コンクリート強度を表-5 に示す。

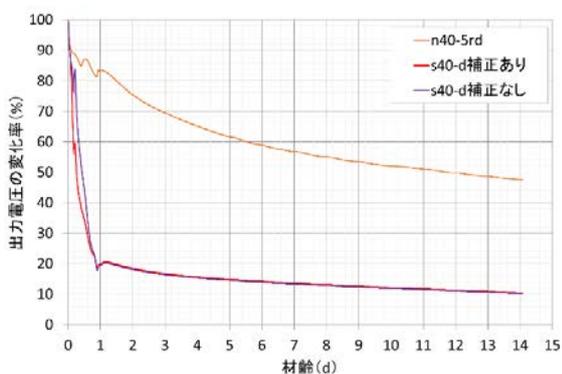


図-5 材齢 14 日までの出力電圧の変化率

表-5 コンクリート強度

	圧縮強度(N/mm ²)			曲げ強度(N/mm ²)		曲げ強度/圧縮強度	
	脱型時	14日	28日	14日	28日	14日	28日
s40-d	27.3	39.6	40.4	3.12	3.67	1/13	1/11
n40-5rd	30.8	40.6	47.6	3.47	4.76	1/12	1/10
n50-5rd	24.9	34.2	37.0	3.33	4.11	1/10	1/9

脱型時は、蒸気養生で材齢 1 日、封かん養生で材齢 5 日である。s40-d の 1 日強度に比べ、n40-5rd の 5 日強度

が上回っているが、出力電圧の変化率の減少は、n40-5rd の 5 日に比べ、s40-d の 1 日の方が明らかに大きい。さらに 14 日強度は、同等の強度となっているが、出力電圧の変化率の減少は、n40-5rd に比べ s40-d の方が明らかに大きく、出力電圧の変化率と圧縮強度の間に相関関係が成立しない。従って、自由水の蒸発による影響があるものと考えられる。しかし、s40-d と n40-5rd における出力電圧の変化率の差を自由水の蒸発によるセメントの水和反応の停滞だけで説明するには差が大きすぎる。

コンクリート中に微細なひび割れが発生すると、圧縮強度に対する曲げ強度の比が低下することが知られている。このことに着目すると、n40-5rd に比べ、s40-d の方が小さな値となっている。さらに n50-5rd に比べ n40-5rd の方が小さな値となっている。水セメント比の小さなコンクリートほどコンクリート中の自由水がセメントの水和反応によって消費されることに起因する自己収縮が生じやすい。さらに、蒸気養生コンクリートでは、自由水の蒸発の影響も受ける。

これらのことから、蒸気養生によりセメントの水和反応は促進されているものの、自由水の蒸発により自己収縮が促され、微細なひび割れが生じていると推察される。

(2) 細孔構造の比較

蒸気養生コンクリートの細孔構造を確認するため、水銀圧入式ポロシメーター（測定範囲：5nm～400μm）を用いて細孔直径および細孔容積を測定した。細孔径分布測定試験用の供試体は、100×100×400mm の角柱供試体を用いた。脱型時に打設側面のうち 1 面のみを残し、5 面をエポキシ樹脂でシールし、各試験材齢まで養生を行っている。乾燥の影響が顕著である表層部に着目し、表面から深さ 0-10mm 部分の試料を採取し、測定を行っている。測定結果を図-6 に示す。

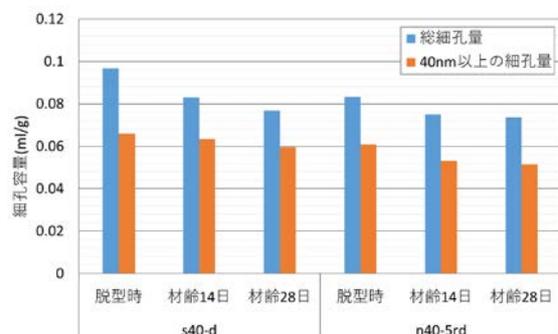


図-6 細孔構造

測定結果を見ると、いずれの材齢においても総細孔量および 40nm 以上の細孔量ともに s40-d の細孔量が n40-5rd を上回っている。細孔量の差は、材齢とともに小さく

なっているが、40nm以上の細孔量では、材齢28日においても明らかにs40-dがn40-5rdを上回っている。40nm以上の細孔量は、腐食因子の浸入に影響が大きいといわれており⁹⁾、蒸気養生を施すことにより、耐中性化などの性能低下を招いていると考えられる。また、総細孔量と圧縮強度の間には、相関性が見られるが、おおよそ同等の圧縮強度を得た材齢14日においても、明らかにs40-dの総細孔量がn40-5rdを上回っている。水分率の変化と併せて考察すると、蒸気養生によりセメントの水和反応が促進され、反応生成物は多く生成されたものの、乾燥によるC-S-Hゲル等の水和物の収縮していることが影響していると推察される。

3. 蒸気養生中の乾燥抑制

3.1 供試体の作製

(1) 乾燥抑制の概要

普通ポルトランドセメントを用いた実験では、養生槽温度をコンクリート温度が上回ることにより、蒸気圧勾配による自由水の蒸発が促されたと推察される。そこで、セメントの重量比50%を高炉スラグで置き換え、混合セメントとすることにより水和熱を抑制することとした。

(2) 配合および養生条件

普通ポルトランドセメントを用いた実験での配合を基に、セメントの重量比50%を高炉スラグで置き換えている。高炉スラグは、水和熱抑制効果の異なる、4000ブレーンと3000ブレーンの2ケースについて実験を行った。詳細を表-6に示す。また養生条件は、普通ポルトランドセメントを用いた実験と同一条件としている。表-7に配合を、表-8にフレッシュ性状を示す。

表-6 高炉スラグの品質

4000ブレーン	高炉スラグ微粉末, 密度2.90g/cm ³ , 比表面積4370cm ² /g
3000ブレーン	高炉スラグ微粉末, 密度2.90g/cm ³ , 比表面積3240cm ² /g

表-7 混合セメントを用いたコンクリートの配合

Gmax (mm)	目標 スランブ (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単用量(kg/m ³)					高性能 減水剤 WR	AE剤 AE
					水 w	セメント C	スラグ BS	細骨材 S	粗骨材 G		
20	8.0	40	4.5	43	170	212.5	212.5	728	976	C×0.40%	C×0.0045%

表-8 混合セメントを用いたコンクリートのフレッシュ性状

高炉 スラグ ブレーン	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンク リート 温度 (°C)
4000	10.0	5.2	15.0
3000	8.5	5.2	16.0

3.2 乾燥抑制の効果

(1) 養生温度の測定

セメントを高炉スラグへ置き換えたことによる水和熱の抑制効果を確認するため、養生温度の測定を行った。普通ポルトランドセメントでの実験同様、蒸気養生中の養生槽内温度とコンクリート温度の測定を行った。コンクリート温度は、供試体(φ100mm×200mm)の中心部と打設面表面の2箇所にて測定している。4000ブレーンの測定結果を図-7に、3000ブレーンの測定結果を図-8に示す。

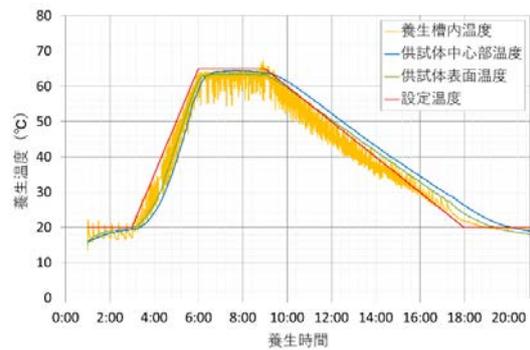


図-7 4000 ブレーン養生温度

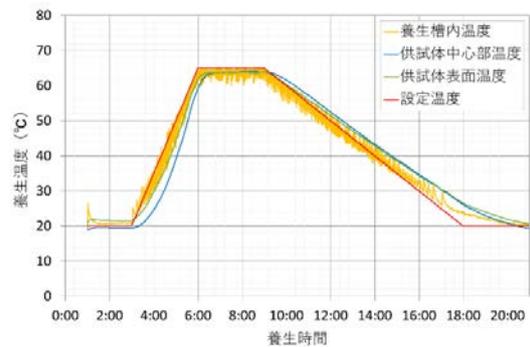


図-8 3000 ブレーン養生温度

養生温度の測定結果を見ると、4000ブレーンと3000ブレーンともに蒸気養生後期にて、若干供試体温度が養生槽内温度を上回っているが、その差が小さくなっている。また3000ブレーンでは、供試体中心部温度が供試体表面温度をほとんど上回っていない。混合セメントを用いて蒸気養生中の水和熱を抑制することで、養生槽内温度を供試体温度が上回ることを抑制できることが確認された。即ち、コンクリート表面の蒸気圧上昇を抑制し、養生槽内の蒸気圧を上回ることを抑制している。

(2) コンクリート強度

普通ポルトランドセメントを用いた実験では、蒸気養生を施すことにより、圧縮強度に対する曲げ強度の比が低下し、コンクリート中に微細なひび割れが発生していると推察された。混合セメントを用いて蒸気養生中の水

和熱量を抑制することで、圧縮強度に対する曲げ強度の比の低下を抑制できるか確認した。表-9 にコンクリート強度を示す。

表-9 混合セメントを用いたコンクリートの強度

BS Sw	記号	圧縮強度(N/mm ²)			曲げ強度(N/mm ²)		曲げ強度/圧縮強度	
		脱型時	14日	28日	14日	28日	14日	28日
4000	s40-d	15.0	27.0	28.8	3.26	3.70	1/8	1/8
	n40-5rd	18.1	28.1	31.3	3.68	4.16	1/8	1/8
3000	s40-d	12.1	21.2	23.2	2.89	3.29	1/7	1/7
	n40-5rd	13.7	23.1	25.3	3.30	3.73	1/7	1/7

4000 ブレーンと 3000 ブレーンともに圧縮強度に対する曲げ強度の比は、養生方法によらずに同等となった。水和熱を抑制することにより、圧縮強度に対する曲げ強度の比の低下が抑制され、収縮ひずみの発生を抑制できることが確認された。また、3000 ブレーンの圧縮強度に対する曲げ強度の比が 4000 ブレーンに比べ小さくなっている。これは、水セメント比の差と同様、自己収縮の発生しやすさの差であると考えられる。

(3) 細孔構造の比較

蒸気養生コンクリートの細孔構造が疎となることを蒸気養生中の水和熱量を抑制することで、改善できるかを確認した。細孔径分布測定の結果を図-9 に示す。

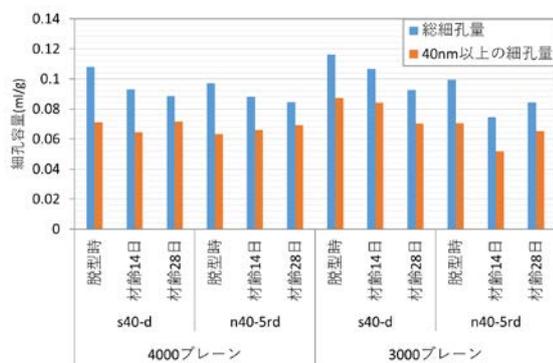


図-9 混合セメントでの細孔構造

脱型時は材齢の違いもあり、s40-dの細孔量が n40-5rd に比べ大きくなっている。材齢 14 日での測定結果に着目すると、4000 ブレーンで同等の値となっている。蒸気養生中の水和熱量を抑制することで、蒸気養生を施したコンクリートの細孔構造が改善されることが確認された。しかし、3000 ブレーンでは明らかに s40-d の細孔量が n40-5rd に比べ大きくなっている。これは、高炉スラグの活性度が低く、蒸気養生によるセメントの水和促進が十分に得られなかったと考えられる。また材齢 28 日の測定結果に着目すると、3000 ブレーンの s40-d 以外の 40nm 以上の細孔量が若干増加し、3000 ブレーンの n40-5rd では、総細孔量も増加している。これは、二次養生中の自

由水の蒸発が影響していると考えられるが、この点に関しては、さらなる検討課題としたい。

今後、配合に応じた適切な蒸気養生条件を検討する必要があると思われる。

4. まとめ

蒸気養生コンクリートの細孔構造が疎となる原因を究明するため、蒸気養生中のコンクリートの水分率の変化や重量変化を測定することにより、以下のことが明らかとなった。ただし、測定対象の寸法が水分率の変化に大きく影響するため、薄断面が対象となる。

- (1) 蒸気養生では、コンクリート温度が養生槽内温度を下回る昇温時には結露による水分供給が生じ、コンクリート温度が養生槽内温度を上回る降温時には、結露は生じず、蒸気圧勾配によって自由水の蒸発が促される。
- (2) 蒸気養生では、水和反応の促進と自由水の蒸発により、乾燥の影響を強く受ける。
- (3) 蒸気養生を施したコンクリートは、圧縮強度に対する曲げ強度の比が低下する。
- (4) 混合セメント等により、セメントの水和熱量を抑制することにより、コンクリート表面の蒸気圧上昇を抑制し、蒸気養生中の乾燥を抑制することができると考えられる。

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
- 2) 阿波稔，大塚浩司，諸橋克敏：蒸気養生過程で発生する鉄筋コンクリート部材の微細ひび割れ，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.1，pp.567-572，1993
- 3) 佐野禎，末吉良敏，平田隆祥，十河茂幸：印加電圧方式によるコンクリートの水分率推定方法に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.589-594，2005
- 4) 鳥海秋，宇治公隆，上野敦，原洋介：蒸気養生中の散水がコンクリート製品の強度特性および細孔構造に及ぼす影響，土木学会第 72 回年次学術講演会，V-379，pp.757-758，2017.9
- 5) コンクリート標準示方書[施工編：施工標準]，pp.122～123，2012
- 6) 郭度連，宇治公隆，國府勝郎，上野敦：養生条件によるコンクリートの組織変化と中性化を支配する細孔径の評価，土木学会論文集，No.718/V-57，pp.56～68，2002，11