

論文 プレキャストコンクリート製品の細孔構造に及ぼす養生条件の影響

寺川 麻美^{*1}・宇治 公隆^{*2}・上野 敦^{*3}・大野 健太郎^{*4}

要旨: 本研究は、強度発現や耐久性と関係が深いとされる細孔構造に着目し、蒸気養生後のコンクリート表面からの乾燥の影響に関して、現場打ちを模擬した養生および標準養生と比較検討を行ったものである。実験より、蒸気養生後の二次養生における水分供給量によって、コンクリート表層部の深さ方向の組織の緻密化に大きな違いが見られるが、現場打ち模擬養生と同様に乾燥の影響を受けること、また、水分供給量が多い場合、同一水セメント比の現場打ち模擬養生の細孔構造より組織が緻密化していることが明らかとなった。

キーワード: 蒸気養生、細孔構造、コンクリート製品

1. はじめに

プレキャストコンクリート製品は、一般に、工場において促進養生の一つである蒸気養生により製造される。また、現場におけるコンクリートの養生を必要としないため、工期短縮等による利用促進が期待される。これまでの研究により、促進養生を実施したコンクリートの細孔構造は、同一配合の標準養生を実施したコンクリート(以下、標準養生コンクリートと記す)と比較して、粗大になること、また、強度、耐久性が低下することが明らかとなっている¹⁾。これは、養生条件の相違²⁾のほか、細孔構造に対するコンクリート表面からの乾燥の影響が要因であると考えられる。一般に、蒸気養生を実施したコンクリート(以下、蒸気養生コンクリートと記す)は、その後の二次養生で気中保管を行っている場合が多く、表層からの乾燥により、コンクリート内部の水分が失われ、水和反応が停滞し、細孔構造の緻密化が阻害されると考えられる。

本研究では、蒸気養生後の二次養生条件が細孔構造、および、強度特性に及ぼす影響を検討した。細孔構造においては、コンクリート表層から内部にかけての変化を把握するため、深さごとの測定を行い、考察した。さらに、一定期間の封緘養生または水中養生を実施し、現場打ちを模擬したコンクリート(以下、現場打ち模擬コンクリートと記す)および標準養生コンクリートと比較検討し、プレキャストコンクリートの性能評価を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

使用材料を表-1に、コンクリートの配合を表-2に示す。配合は、実際のプレキャストコンクリート製品に用いられているものを参考に決定した。水セメント比は、主に40%とし、現場打ち模擬コンクリートについては、

水セメント比50%のコンクリートも合わせて作製した。

2.2 養生条件

(1) 蒸気養生条件

蒸気養生条件を図-1に示す。比較的大型のプレキャストコンクリート製品に適用される、1日1サイクルの条件とした。

(2) 検討要因および養生条件

養生条件は、図-2に示す通り、促進養生(蒸気養生)、現場打ち模擬、標準養生の3種類とした。

蒸気養生後のコンクリート表層からの乾燥が、強度発

表-1 使用材料

結合材	普通ポルトランドセメント、密度 3.16g/cm ³
細骨材	碎砂、表乾密度 2.63g/cm ³
粗骨材	碎石、表乾密度 2.66g/cm ³
混和剤	AE剤: アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤
	AE減水剤: ポリカルボン酸エーテル系

表-2 コンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメント 比 W/C(%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
					水 w	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE剤	AE減水剤
20	8±2.5	4.5±1.5	50	49	165	330	884	931	0.01	4.29
			40	46	165	413	797	947	0.0124	5.369

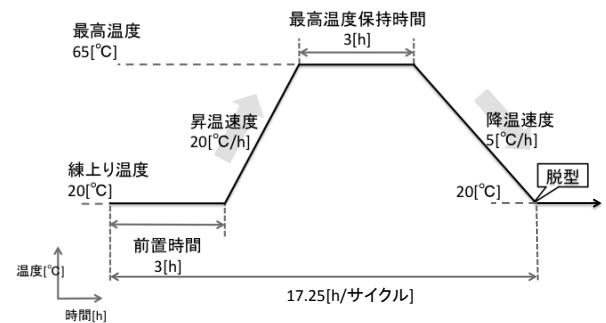


図-1 蒸気養生条件

*1 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)

*2 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)

*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 准教授 博士(工学) (正会員)

*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 助教 博士(工学) (正会員)

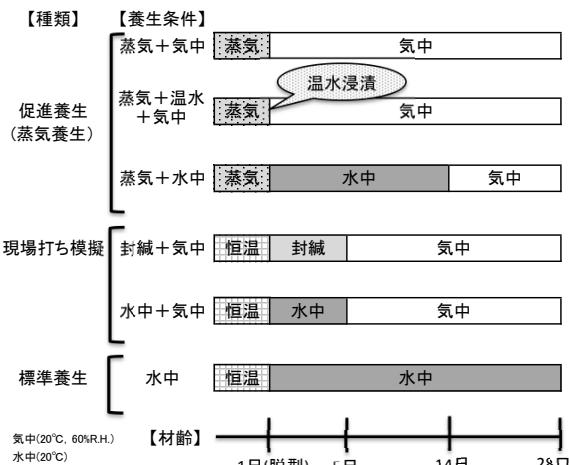


図-2 検討要因および養生条件

現や耐久性に与える影響を検討するため、蒸気養生後気中保管するものに加え、蒸気養生後の急激な乾燥を防止する目的で、蒸気養生直後に30分間の温水(35~40°C)浸漬を行った後に気中保管するもの、蒸気養生後の二次養生として水中養生するものの3水準とした。なお、水中養生は、製品出荷時の目安となる材齢14日まで行い、以後、気中保管とした。

現場打ち模擬コンクリートについては、実際の現場打ちが、最低、材齢5日まで湿潤養生するよう土木学会のコンクリート標準示方書(施工編)で規定されている。本研究においては、現場での水分供給量の影響も検討するため、水分供給が少ない環境を模擬する封緘養生(5日間)と、水分供給が十分行われる環境を模擬する水中養生(5日間)の2水準とし、その後気中保管とした。

2.3 試験項目

(1) フレッシュ性状

JIS A 1101, JIS A 1128 および JIS A 1156 に従ってスランプ試験、空気量試験、練上がり温度測定を行った。

(2) 圧縮強度試験

JIS A 1108 に準拠して行い、 $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を各3体試験した。試験材齢は、全ての養生条件につき14日および28日とした。さらに、蒸気養生コンクリートは脱型時に、また、現場打ち模擬コンクリートは気中保管開始時点における強度も把握するため、材齢5日においても、合わせて試験を行った。

(3) 細孔径分布試験

圧縮試験用供試体とは別に、細孔径分布試験用に $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ の角柱供試体を各養生条件につき1体作製し、細孔径分布試験を行った。コンクリート表層部(0~10 mm)における細孔構造が、内部に比べ、コンクリート表面からの乾燥の影響により変化が顕著である³⁾ことを考慮し、その影響を検討するため、深さごとに試料を採取した。

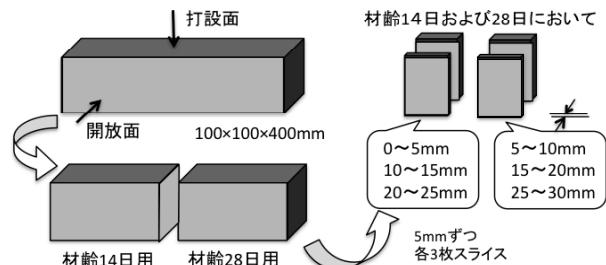


図-3 細孔径分布試験用試料作製

表-3 実験結果表記記号

W/C(%)	種類	養生条件		記号
		一次養生	二次養生	
40	促進養生	蒸気養生	気中	s40-d
			温水→気中	s40-hwd
			水中	s40-w
	現場打ち模擬	封緘(5日間)→気中		n40-5rd
		水中(5日間)→気中		n40-5wd
	標準養生	水中		n40
50	現場打ち模擬	封緘(5日間)→気中		n50-5rd
		水中(5日間)→気中		n50-5wd

供試体は、図-3に示すように、気中保管開始時点において、打設側面を一面のみ残し、その他の面をエポキシ樹脂でシールし、その後、材齢14日において2分割した。そして、半分は分割した断面をシリコンでシールし、さらに材齢28日まで養生を継続した。両材齢において、コンクリートカッターによって5mmずつ深さ30mmまでスライスした。その際、コンクリートカッターの刃によって削られる厚さを考慮し、0~5mm, 10~15mm, 20~25mm, 25~30mmの部分を採取するものと、5~10mm, 15~20mm, 25~30mmの部分を採取するものに、供試体をあらかじめ二分割した。スライスしたコンクリートをニッパにより細分化し、2.5mm以上5mm以下の粒子を24時間以上アセトンに浸漬して水和を停止させた。その後、真空状態で7日間以上乾燥させ、モルタル部分の粒子を選定して試料とした。

試験には、水銀圧入式ポロシメーター(測定範囲:5nm~400μm)を用い、細孔直径および細孔容量を測定した。

3. 実験結果および考察

実験結果は、表-3に示す記号を用いて示す。

3.1 フレッシュ性状

コンクリートのフレッシュ性状を表-4に示す。水セメント比40%および50%のコンクリートとともに、スランプは $8 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ の範囲内の値が得られた。

3.2 二次養生の違いの影響

(1) 圧縮強度

蒸気養生コンクリートの圧縮強度を図-4に示す。蒸

気養生後に温水浸漬を行ったコンクリート(s40-hwd)と、浸漬を行わずに気中保管したコンクリート(s40-d)は、ほぼ同等の圧縮強度を示した。また、二次養生として、材齢 14 日まで水中養生を行ったコンクリート(s40-w)の場合、材齢 14 日までは他の蒸気養生コンクリートと差が見られないものの、材齢 28 日において他より約 20%高い強度発現を示した。この結果から、二次養生として水中養生を行ったコンクリートでは、水分供給が十分に行われ、その後の気中保管においてもコンクリート内部の水和反応が進行し、高い強度が得られたものと考えられる。

(2) 細孔構造

蒸気養生コンクリートの材齢 28 日における細孔径分布試験結果を図-5 に示す。これまでの研究より、中性化進行に支配的な影響を及ぼすのは、40nm 以上の細孔量であるとされている^{4), 5)}ことから、図-5 (a)に総細孔

表-4 コンクリートのフレッシュ性状

水セメント比(%)	スランプ(cm)	空気量(%)	練上がり温度(°C)
40	8.5	3.6	27
50	9.5	3.5	26

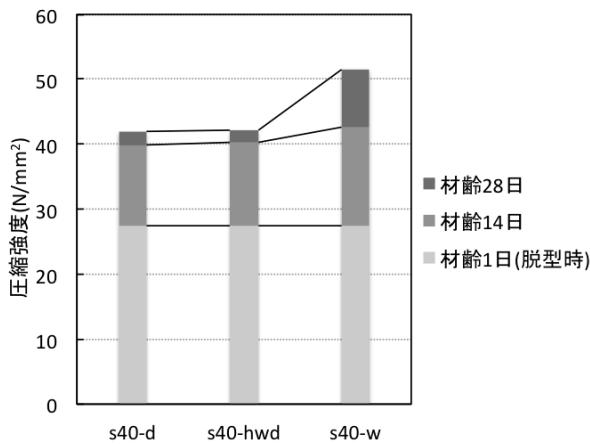


図-4 二次養生の違いによる圧縮強度への影響

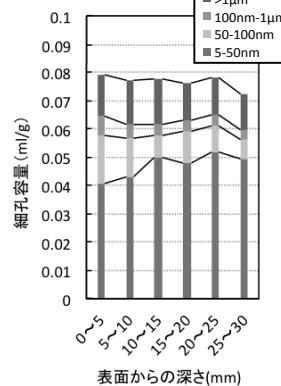
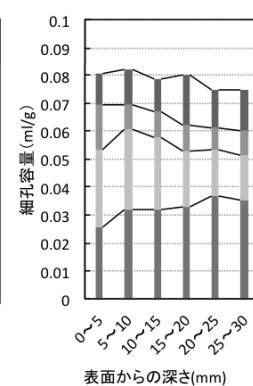
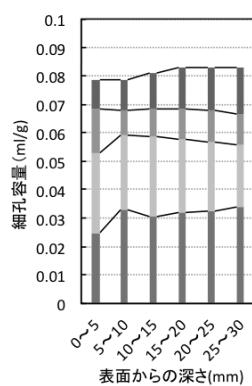
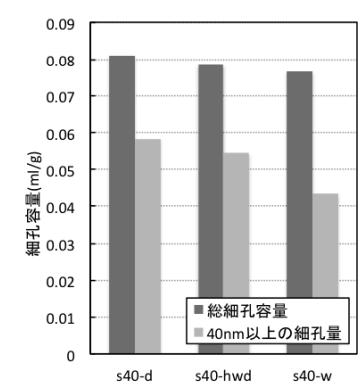


図-5 蒸気養生後の二次養生の違いによる細孔構造への影響

量と 40nm 以上の細孔量を供試体ごとに示した。なお、本研究において総細孔量の数値は、コンクリート表面 0~30mm までの深さごとに測定した総細孔量を平均した値として定義した。図より、温水浸漬を行ったコンクリート(s40-hwd)の総細孔量および 40nm 以上の細孔量は、気中保管したコンクリート(s40-d)と比べて若干低い値となり、表層部分において組織が緻密化された可能性が伺える。また、水中養生を行ったコンクリート(s40-w)は、気中保管したコンクリート(s40-d)と比べ、総細孔量は約 10%， 40nm 以上の細孔量は約 30% 小さい値を示した。このことから、水中養生を行ったコンクリート(s40-w)は、二次養生における水分供給により水和反応が進み、組織が緻密化されたと考えられる。

各供試体の深さごとの細孔構造を図-5 (b)～図-5 (d) に示す。蒸気養生後気中保管したコンクリート(s40-d)は、他の蒸気養生コンクリートに比べ、5~100nm の小さい細孔の細孔量の深さ方向における変化が小さい。温水浸漬を行ったコンクリート(s40-hwd)は、内部ほど総細孔量が減少し、5~50nm の小さい細孔の細孔量が増加していることから、蒸気養生後の温水浸漬により、コンクリート表面からの乾燥を軽減した可能性が考えられる。この細孔量の変化が、上述の気中保管したコンクリート(s40-d)と比較したときの総細孔量の減少(図-5 (a))に対応している。一方、水中養生を行ったコンクリート(s40-w)は、5~50nm のミクロな細孔量が、各深さの領域において他の蒸気養生コンクリートより同程度多い傾向が示された。また、蒸気養生後に温水浸漬を行ったコンクリート(s40-hwd)と水中養生を行ったコンクリート(s40-w)は、深さによる細孔構造の不均質化(ばらつき)が大きい。これは、表面からの乾燥と内部での水和反応進行が同時に行われたことによると考えられる。

以上のことから、蒸気養生後の水分供給は、圧縮強度および細孔構造に対し大きな影響を及ぼし、その供給量

によってコンクリート表層における細孔構造の違いを生じることがわかった。蒸気養生後に二次養生として水中養生を行うと、深さ方向での細孔構造の緻密化が見られ、他の蒸気養生コンクリートと比べて5~50nmの小さい細孔の細孔量が多く、組織の緻密化ならびに強度発現に大きく貢献していることが示された。

3.3 蒸気養生と現場打ち模擬および標準養生との比較

(同一水セメント比での比較)

(1) 圧縮強度

蒸気養生コンクリートの中でも、二次養生として水中養生を行い、最も水分供給を受けた蒸気養生コンクリート(s40-w)と、水セメント比40%の現場打ち模擬コンクリートおよび標準養生コンクリートの圧縮強度を図-6に示す。材齢14日における圧縮強度は、現場打ち模擬コンクリート(n40-5rdおよびn40-5wd)に比べ、蒸気養生コンクリート(s40-w)のほうが小さく、蒸気養生コンクリート(s40-w)の強度の値は、水中養生した現場打ち模擬コンクリート(n40-5wd)の約80%程度の値を示した。その後、材齢が進み、28日材齢における強度を比べると、蒸気養生コンクリート(s40-w)が封緘養生した現場打ち模擬コン

クリート(n40-5rd)の強度を上回り、また、水中養生した現場打ち模擬コンクリート(n40-5wd)の約90%程度の強度を得た。このことから、蒸気養生コンクリート(s40-w)は、材齢14日までの水中養生により、コンクリート内部まで十分な水分が供給され、材齢14日以降の気中保管においてもコンクリートの水和反応が進んでいるものと考えられる。

一方、蒸気養生コンクリート(s40-w)と標準養生コンクリート(n40)の強度を比較すると、材齢14日および28日において、蒸気養生コンクリート(s40-w)の圧縮強度は標準養生コンクリート(n40)の約90%の値を示した。このことから、強度発現に対し、蒸気養生コンクリートの二次養生後の気中保管による乾燥の影響は少なく、二次養生が効果的であることが明らかとなった。

(2) 細孔構造

材齢28日における各養生条件の総細孔量と40nm以上の細孔量を図-7(a)に示す。圧縮強度の傾向と異なり、総細孔量は蒸気養生コンクリート(s40-w)が最も多く、現場打ち模擬コンクリート(n40-5rdおよびn40-5wd)はほぼ同等の細孔量となった。一方で、40nm以上の細孔量に

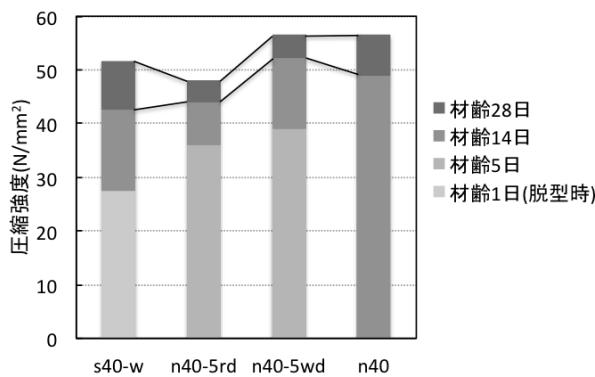
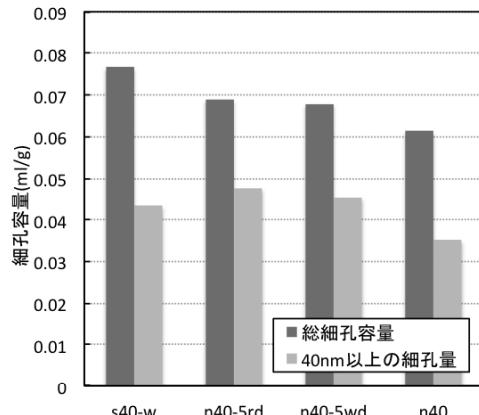


図-6 蒸気養生と現場打ち模擬および標準養生との強度比較(同一W/C)



(a) 総細孔容量と40nm以上の細孔量

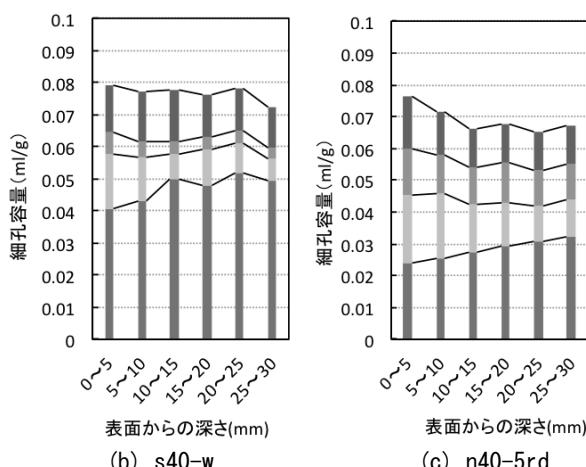
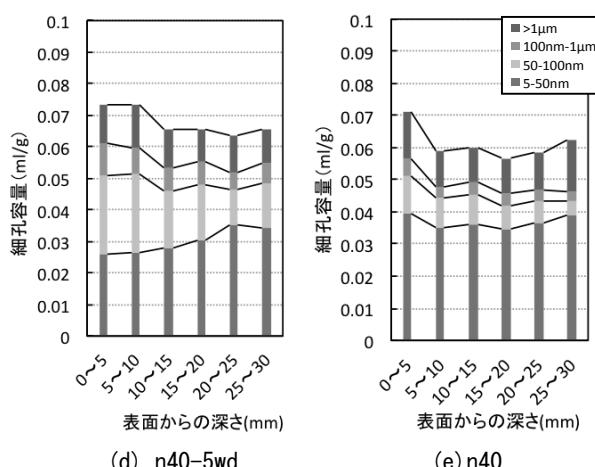


図-7 蒸気養生と現場打ち模擬および標準養生との細孔構造比較(同一W/C)



(b) s40-w (c) n40-5rd (d) n40-5wd (e) n40

着目すると、n40-5rd および n40-5wd よりも、s40-d が少ない。これは、蒸気養生コンクリートは、現場打ち模擬コンクリートに比べて十分な水分供給が行われ、コンクリート表層部において水和反応が進み、大きな細孔が小さな細孔へと変化したことが考えられる。

各供試体の深さごとの細孔構造を図-7 (b)～図-7 (e)に示す。図-7 (b)より、上述の s40-d の水和反応による結果とみられる、5～50nm の小さい細孔の細孔量の増加が明らかである。また、図-7 (c)および図-7 (d)から n40-5rd と n40-5wd の細孔構造を比較すると、5～50nm の小さい細孔の細孔量はほぼ同じであるが、50～1μm の中間的な大きさの細孔量に違いがみられる。水中養生した現場打ち模擬コンクリート(n40-5wd)は、封緘養生した現場打ち模擬コンクリート(n40-5rd)よりも、中間的な大きさの細孔量に対する 50～100nm の比較的小さい細孔量の割合が大きい。これは、現場打ち模擬の水中養生によって 100nm～1μm の細孔が 50～100nm の小さい細孔に変化したと考えられる。

次に、各供試体の深さ方向における細孔構造の変化を比較する。現場打ち模擬コンクリートにおいて 0～10mm の表面部分の総細孔量は、10mm 以降の内部より大きい傾向がみられ、コンクリート表面からの乾燥の影響によると推定される。また、蒸気養生コンクリートは内部に比べて 5～50nm のミクロな細孔の細孔量が少なく、現場打ち模擬コンクリートと同様、乾燥の影響により表層近くの組織構造が粗になりやすく、細孔構造の不均質化が生じることがわかった。さらに、図-7 (b)および図-7 (e)から蒸気養生コンクリートと標準養生コンクリートを比較すると、5～50nm のミクロな細孔量が蒸気養生コンクリートでは深さ方向に緩やかに増加しており、材齢 14 日までの水中養生後の気中保管による不均質化が明らかとなっている。

以上のことから、蒸気養生後に二次養生として水中養

生を行い十分な水分供給を受けると、蒸気養生コンクリートは、同一水セメント比の現場打ち模擬コンクリートおよび標準養生コンクリートとほぼ同等の強度発現性を有し、現場打ち模擬コンクリートより微細な細孔を有する組織構造となり得ることが明らかとなった。

3.4 蒸気養生と現場打ち模擬との比較（水セメント比を低減したケースでの比較）

(1) 圧縮強度

蒸気養生後気中保管したコンクリート(s40-d)と、水セメント比 50% の現場打ち模擬コンクリートの圧縮強度を図-8 に示す。水セメント比の違いの影響が大きく現われ、蒸気養生コンクリート(s40-d)の強度は、現場打ち模擬コンクリート(n50-5rd および n50-5wd)に比べ、約 10%～20% 高い値を示した。また、材齢 14 日から材齢 28 日にかけての圧縮強度の変化率に着目すると、蒸気養生コンクリート(s40-d)に比べ、現場打ち模擬コンクリート(n50-5rd および n50-5wd)は、およそ 2 倍の強度増加がみられる。このことから、現場打ち模擬コンクリート(n50-5rd および n50-5wd)は、コンクリート内部にまだ自由水が多く存在し、水和反応が進行しやすい状態であるといえる。

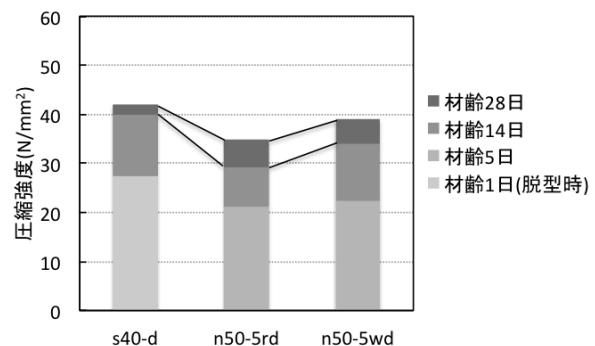
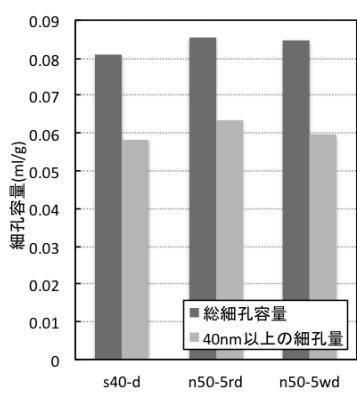


図-8 蒸気養生と現場打ち模擬の強度比較
(異なる W/C)



(a) 総細孔容量と 40nm 以上の細孔量

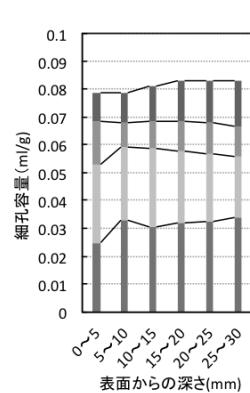
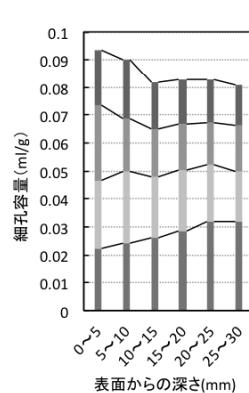
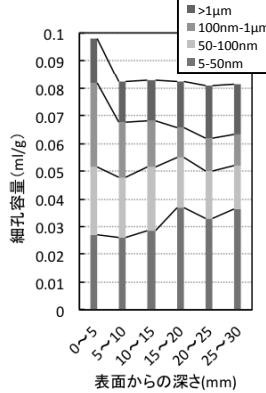


図-9 蒸気養生と現場打ち模擬の細孔構造比較(異なる W/C)



(c) n50-5rd の細孔構造



(d) n50-5wd の細孔構造

(2) 細孔構造

材齢 28 日における各養生条件の総細孔量と 40nm 以上の細孔量を図-9 (a) に示す。蒸気養生コンクリート (s40-d) と現場打ち模擬コンクリート (n50-5rd および n50-5wd) の総細孔量に注目すると、蒸気養生コンクリート (s40-d) のほうが約 5% 少ないものの、上述した圧縮強度に比べ、総細孔量に対する条件の違いの影響は小さいといえる。

各供試体の深さごとの細孔構造を図-9 (b) ~ 図-9 (d) に示す。前述の水セメント比 40% の現場打ち模擬コンクリートと同様、50% の現場打ち模擬コンクリートは、コンクリート表層部と内部との細孔構造の違いが認められ、n50-5rd は 0~10mm において、n50-5wd は 0~5mm において、総細孔量が多く、またミクロな細孔が少ない傾向がみられた。

ところで、図-9 (a) では、各養生条件による総細孔量にあまり大きな違いはないものの、深さ方向で比較すると、蒸気養生コンクリート (s40-d) は明らかに現場打ち模擬コンクリートと異なる細孔構造であることがわかる。現場打ち模擬コンクリートの内部と、蒸気養生コンクリート (s40-d) において、同様の細孔構造を有していることから、蒸気養生コンクリートは、水セメント比を 10% 低減することで、現場打ち模擬コンクリートの内部と同様の組織の緻密さが得られ、また、乾燥によるコンクリート表面近くの不均質化が認められない結果となっている。

以上のことから、蒸気養生後気中保管したコンクリートは、現場打ち模擬コンクリートより水セメント比を 10% 程度低減することで、現場打ち模擬コンクリートと同等の強度および細孔構造を有し、さらに、コンクリート表層部においては、水セメント比を 10% 低減した蒸気養生コンクリートのほうが、組織が緻密であることが示された。

4.まとめ

本研究において、養生条件の相違が蒸気養生コンクリートの細孔構造に及ぼす影響に関して検討し、本研究で設定した試験条件下で、以下のことが明らかとなった。

- (1) 蒸気養生直後 30 分間の温水浸漬を行った後に気中保管したコンクリートは、蒸気養生後気中保管したコンクリートと比べ、圧縮強度に差は見られないものの、深さ方向における細孔構造の変化が見られ、温水浸漬により組織が緻密化されることが伺える。
- (2) 蒸気養生後の二次養生において、温水浸漬や水中養生によりコンクリートに水分供給を行うことの影響は大きく、特に、水分供給せず気中保管をしたコン

クリートと比べ、水分供給したコンクリートは深さ方向での細孔構造の緻密化が認められた。

- (3) 蒸気養生後水中養生したコンクリートは、同一水セメント比において、現場打ち模擬の封緘養生コンクリートと現場打ち模擬で水中(湿润)養生したコンクリートの間の強度発現性を有する。
- (4) 蒸気養生後水中養生したコンクリートは、同一水セメント比の現場打ち模擬コンクリートよりも 40nm 以上のマクロな細孔が少ない。なお、深さ方向での細孔構造の変化は、現場打ち模擬コンクリート同様、表面からの乾燥の影響を受けて表層部の組織が粗であり、不均質化がみられる。
- (5) 蒸気養生後気中保管したコンクリートは、コンクリート表層部における深さ方向での細孔構造の変化は見られず、内部にかけて緻密化している現場打ち模擬コンクリートとは、異なった細孔構造を有していることが明らかとなった。
- (6) 蒸気養生後気中保管したコンクリートは、水セメント比を 10% 低減することで、現場打ち模擬コンクリートと同等の強度および細孔構造を有する。

謝辞

本研究の実施にあたり、東京セメント工業(株) 原 洋介氏に多大のご協力を戴きました。ここに、謝意を表します。

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) 丸山晃平, 宇治公隆, 上野 敦, 大野健太郎 : 蒸気養生条件が相違するコンクリート製品の強度特性および細孔構造に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.571-576, 2011.6
- 3) 郭度連, 宇治公隆, 國府勝郎, 上野 敦 : 乾燥によるコンクリート組織の不均質化, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.711-716, 2002.6
- 4) 関 健吾, 宇治公隆, 上野 敦, 原 洋介 : 蒸気養生を実施したコンクリートの細孔構造および中性化性状, 土木学会第 65 回年次学術講演会, pp.605-606, 2010.9
- 5) 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, Vol.57, No.718, pp.59-68, 2002.11