

# 論文 蒸気養生条件の相違が混和材を用いたコンクリートの細孔構造に及ぼす影響

小池 悠介\*1・宇治 公隆\*2・上野 敦\*3・原 洋介\*4

**要旨:** 本研究では、蒸気養生条件が比較的溫度依存性の高い混和材を用いたコンクリートの細孔構造に及ぼす影響を把握することで、混和材を用いたプレキャストコンクリート製品の有用性を検討した。具体的には、蒸気養生後に脱型し、再び蒸気養生を実施することで水分供給および積算溫度を増加させ、結合材の反応を促進させるものである。本蒸気養生条件を適用する場合、混和材の有無によらず、脱型時点で十分な組織構造が形成され、一般的なプレキャストコンクリート製品の細孔構造よりも組織が緻密化することを明らかにした。

**キーワード:** コンクリート製品、蒸気養生、細孔構造、混和材

## 1. はじめに

プレキャストコンクリート製品は、工場内の整備された設備で製造され、一般に促進養生の一つである蒸気養生が行われている。蒸気養生は、型枠ごと高温の蒸気を噴霧することにより、材齢初期におけるコンクリートの強度発現を促進させる。そのため、脱型時に必要とされる所定の強度を早期に得ることができ、工期短縮等の利点が多いため、今後、プレキャストコンクリート製品の利用割合が増加すると期待される。しかしながら、既往の研究では、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)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)と比較して、細孔構造が疎になり、長期強度および耐久性が低下するとされている<sup>1)</sup>。

蒸気養生コンクリートにおける性能低下の主要因として、乾燥の影響による細孔構造の不均質性が考えられる。これは、蒸気養生中において蒸気養生槽内とコンクリート内部の溫度に差異が生じること<sup>2)</sup>、および蒸気養生後は湿潤養生が行われずに気中保管される場合が多いことに起因する。乾燥が生じると、コンクリート表層部から水分が逸散し、コンクリート内部の水分が失われるため、水和反応が停滞して、コンクリートの組織形成が阻害される。その結果、細孔構造が不均質になり、本来の性能を確保できない恐れがある。すなわち、乾燥の影響を防ぐことはプレキャストコンクリート製品を使用する上で非常に重要であるといえる。

このような背景から、著者らは乾燥の影響を防ぐ方法として、蒸気養生後の二次養生による水分供給が蒸気養生コンクリートの細孔構造に及ぼす影響を検討した<sup>3)</sup>。

その結果、蒸気養生後に水分供給を行った場合、蒸気養生後に気中保管した一般的な蒸気養生コンクリートに比べて細孔構造の緻密化が認められ、二次養生による水分供給によって、乾燥の影響を抑制できることを示した。しかしながら、本方法は養生水槽を用いる実験的なものであり、工場のストックヤードに養生水槽を設置することは困難であることや出荷日数の関係等の工場の実状を考慮できていないという問題がある。そこで、二次養生の代替案として蒸気養生後に再び蒸気養生を行うことを検討した。これは、若材齢時の水分供給による乾燥抑制および積算溫度の増加による反応促進を意図したものである。これにより、一般的な蒸気養生コンクリートと比較して、早期に十分な性能を有し、長期強度および耐久性も向上するという知見を得た<sup>4)</sup>。

本研究では、上述した蒸気養生条件を比較的溫度依存性の高い混和材を用いたコンクリートに適用する場合の諸物性を把握することを目的としている。具体的には、蒸気養生条件の相違が高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いたコンクリートの細孔構造、強度特性および中性化性状に及ぼす影響を検討し、さらに結合材として、普通ポルトランドセメントのみを用いた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)および標準養生コンクリートと比較検討することで、混和材を用いたプレキャストコンクリート製品の性能評価を行うものである。また、乾燥の影響を把握するために、コンクリート表層部から内部にかけて深さごとの細孔構造を測定し、乾燥による細孔構造の変化と強度特性および中性化性状の関係を明らかにした。

\*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 東京セメント工業株式会社 開発事業部 (正会員)

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 <sup>3</sup> 、ブレン比表面積3280cm <sup>2</sup> /g 高炉セメントB種、密度3.04g/cm <sup>3</sup> 、ブレン比表面積3860cm <sup>2</sup> /g フライアッシュ、密度2.28g/cm <sup>3</sup> 、ブレン比表面積3960cm <sup>2</sup> /g
細骨材	砕砂、表乾密度2.63g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	砕石、表乾密度2.66g/cm <sup>3</sup>
混和剤	AE剤:アルカリエーテル系陰イオン界面活性剤 高性能減水剤:ポリカルボン酸エーテル系化合物

表-2 配合表

配合名	粗骨材の最大寸法 (Gmax)(mm)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	水結合材比 W/B(%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
						水	セメント	FA	細骨材	粗骨材	AE剤	高性能減水剤
OPC40	20	8	4.5	40	43	W	C	F	S	G	AE剤	高性能減水剤
BB40						170	425	0	728	975	0.02	2.13
F40						170	361	64	728	975	0.02	2.13
OPC50						50	44	170	340	0	777	1000

表-3 供試体一覧

W/B(%)	種類	養生条件	混和材料	記号
40	1回蒸気養生	蒸気養生→気中	なし	s40-d-n
			高炉スラグ微粉末	s40-d-b
	2回蒸気養生	2回蒸気養生→気中	フライアッシュ	s40-d-f
			なし	s40-s-n
50	現場打ち模擬	5日封緘養生→気中	なし	n50-5rd-n
			標準養生	n50-28w-n
	標準養生	28日水中養生→気中	なし	n50-28w-n
			なし	n50-28w-n

※記号について:(1回目蒸気養生:s、恒温室保管:n)(水結合材比)- (気中保管d、2回目蒸気養生:s、5日間封緘養生:5rd、28日間水中養生:28w)-(混和材)

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

使用材料を表-1、コンクリートの配合を表-2に示す。結合材が高炉スラグ微粉末の場合は、高炉セメントB種を用い、フライアッシュの場合は、普通ポルトランドセメントに内割で15%添加した。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。また、プレキャストコンクリート製品と現場で作製されるコンクリートにおける水結合材比の相違を考慮し、プレキャストコンクリート製品は水結合材比40%、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は水結合材比50%とした。

### 2.2 検討要因

表-3に示す通り、検討要因は「1回蒸気養生」、「2回蒸気養生」、「現場打ち模擬」、「標準養生」の4種類とした。

蒸気養生後におけるコンクリート表層からの乾燥が、強度発現および耐久性に与える影響を検討するため、蒸気養生後に気中保管するものに加え、若材齢時の十分な組織形成を目的に蒸気養生後に再び蒸気養生をするものの2種類に大別した。また、混和材の有無による影響を把握するために混和材を用いない場合、高炉スラグ微粉末を用いる場合、およびフライアッシュを用いる場合の3種類とし、計6水準とした。

現場施工のコンクリートについては、土木学会コンクリート標準示方書【施工編】で材齢5日まで湿潤養生するように規定されている。本研究では、現場打ち模擬コンクリートについては、乾燥環境下を想定し、材齢5日まで封緘養生した後に気中保管するものとした。

【養生条件】

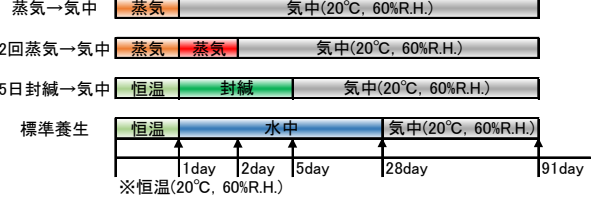
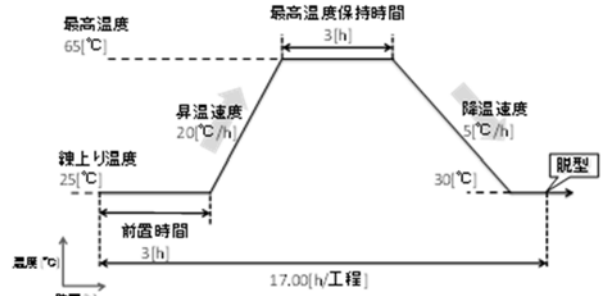
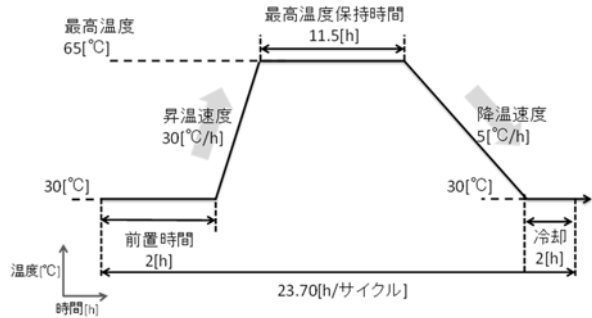


図-1 養生条件



(a) 1回目の蒸気養生工程



(b) 2回目の蒸気養生工程

図-2 蒸気養生工程

### 2.3 養生条件

養生条件を図-1、蒸気養生工程を図-2に示す。1回目の蒸気養生は、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工程の方法に準拠した(図-2(a))。2回目の蒸気養生は、1回目の蒸気養生条件と比較して、昇温速度が大きく、最高温度保持時間を長く定めた(図-2(b))。これは、1回目の蒸気養生により組織形成が進行し、昇温速度の短縮が可能となったこと、また積算温度の増加により水和反応を促進させるためである。なお、2回蒸気養生コンクリートは、1回目の蒸気養生が終了した後に脱型し、再び蒸気養生を行った。

### 2.4 試験項目

#### (1) フレッシュ性状

JIS A 1101, JIS A 1128 および JIS A 1156 に準拠し、スランプ試験、空気量試験、練上がり温度の測定を行った。

#### (2) 細孔径分布測定試験

試験には、100×100×400mmの角柱供試体を用いた。コンクリート表層部の乾燥の影響は、コンクリート表面の0~10mmの範囲で顕著であることを考慮し、深さ方向に6スライスの試料を採取した。

気中保管開始時点から、打設側面を1面のみ開放面とし、その他の面をエポキシ樹脂でシールした。その後、試験材齢時にコンクリートカッターにより、0~5mm、5~10mm、10~15mm、15~20mm、20~25mm、25~30mmにスライスした。スライスしたコンクリートはニッパを用いて細分化し、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反応を停止させた。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、1回測定を行った。なお、1回蒸気養生コンクリートは材齢1, 14, 91日、2回蒸気養生コンクリートは材齢2, 14, 91日、現場打ち模擬コンクリートは材齢5, 28, 91日、標準養生コンクリートは材齢28, 91日を試験材齢とした(図-3)。

### (3) 圧縮強度試験

JIS A 1108 に準拠し、φ100×200mmの円柱供試体を各3体用いて試験を行った。なお、試験材齢は細孔径分布測定試験と同じである。

### (4) 促進中性化試験

JIS A 1152 および JIS A 1153 に準拠し、100×100×400mmの角柱供試体を用いて試験を行った。所定の養生終了後、材齢8週の時点で、細孔径分布試験用の供試体と同様にエポキシ樹脂でシールした。その後、供試体を

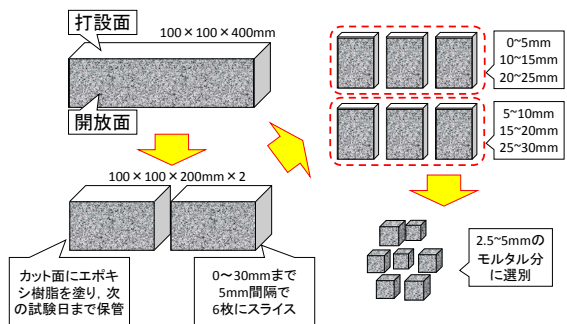


図-3 細孔径分布測定用試料の選定方法

表-4 フレッシュ性状

名称	Sl(cm)	Air(%)	T(°C)
s40-d-n	6.0	4.0	24.0
s40-d-b	10.0	4.5	23.8
s40-d-f	9.5	3.3	24.4
s40-s-n	7.5	4.1	25.2
s40-s-b	10.5	5.0	25.0
s40-s-f	8.0	3.5	25.2
n50-5rd-n	7.5	5.2	25.5
n50-28w-n	9.0	5.0	25.3

二酸化炭素 5%、温度 20°C、相対湿度 60%の促進中性化槽内に移動し、促進中性化試験を実施した。なお、材齢は促進材齢 4, 9, 16 週とした。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 フレッシュ性状

フレッシュ性状は表-4 に示す通りである。

### 3.2 蒸気養生条件の相違がコンクリートの諸物性に及ぼす影響

#### (1) 細孔構造

図-4 に 1 回蒸気養生コンクリートの細孔構造、図-5 に 2 回蒸気養生コンクリートの細孔構造を示す。なお、両図ともに(a)は養生終了時、(b)は材齢 91 日における細孔構造である。

図-4 に着目すると、養生終了時点で表層部(0~10mm)の総細孔量が多い。これは、内部セメントの温度活性ならびに、蒸気養生中の養生槽内とコンクリートの温度差による相対湿度の低下が影響していると考えられる。また、材齢 91 日では、表層部付近ほど 100nm~1μm の細孔量が増加する傾向を示している。すなわち、1 回蒸気養生では若材齢時の組織形成が十分でなく、養生終了後の気中保管による乾燥の影響を受けているといえる。し

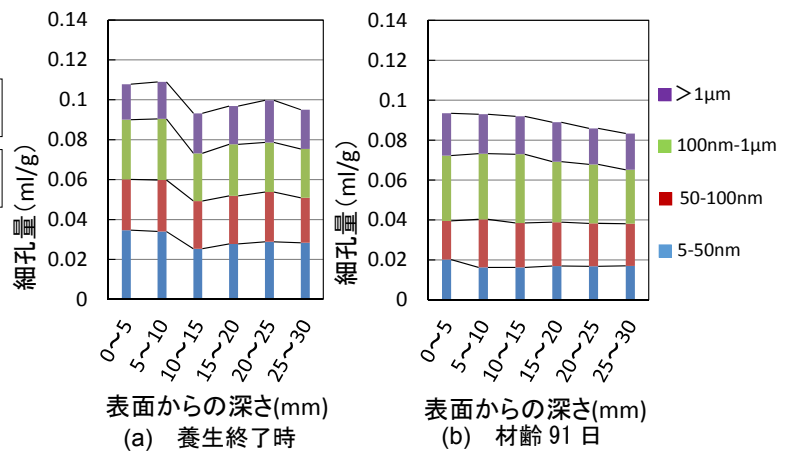


図-4 1回蒸気養生コンクリート(s40-d-n)の細孔構造

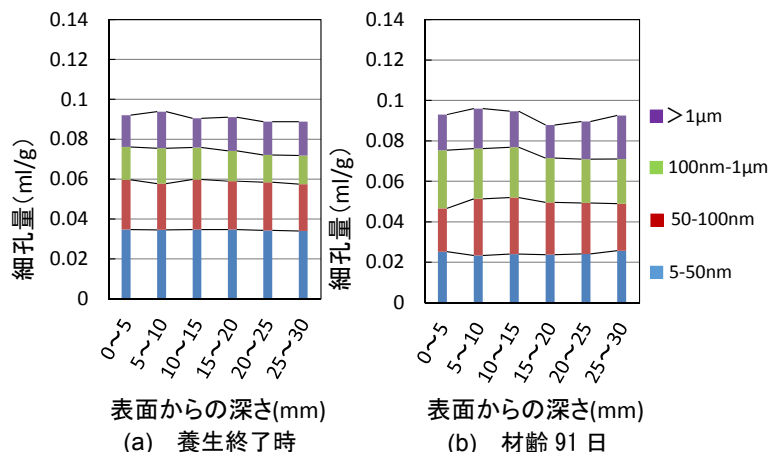


図-5 2回蒸気養生コンクリート(s40-s-n)の細孔構造

かしながら、図-5の2回蒸気養生コンクリート(s40-s-n)は、養生終了時における表層部と内部の細孔構造に不均質化が見られず、一般的な1回蒸気養生コンクリート(s40-d-n)の細孔構造よりも密な組織を形成している。また、材齢の進行に伴う細孔構造の変化においても表層部と内部で大きな差異はない。すなわち、2回蒸気養生を行うことによる水分供給および積算温度の増加のため、組織形成が進行し、乾燥の影響を受けにくい組織を養生終了時に形成したといえる。

### (2) 圧縮強度

図-6に材齢の進行に伴う圧縮強度の変化を示す。同図から、一般的な1回蒸気養生コンクリート(s40-d-n)は、材齢1日から14日にかけて圧縮強度は急増しているが、材齢14日以降における強度の増進はほとんどない。しかしながら、2回蒸気養生コンクリート(s40-s-n)は、養生終了時における圧縮強度が30N/mm<sup>2</sup>以上であり、材齢14日以降も圧縮強度が微増している。これは、前述したように2回蒸気養生による細孔構造の緻密化が、乾燥を抑制し、水和反応を進行させたためと考えられる。そこで、材齢91日の圧縮強度と100nm以上の細孔量に着目すると、図-7に示すように、100nm以上の細孔量が2割ほど少ない2回蒸気養生コンクリート(s40-s-n)の方が、圧縮強度は1割ほど高くなっている。

### (3) 中性化性状

郭らの研究<sup>5)</sup>によると、結合材が同一の場合、中性化の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おり、本研究においても中性化の検討においては40nm以上の細孔量に着目した。

40nm以上の細孔量と中性化速度係数の関係を図-8に示す。同図より、緻密な組織を有する2回蒸気養生コンクリート(s40-s-n)は、一般的な1回蒸気養生コンクリート(s40-d-n)に比べ、40nm以上の細孔量が若干減少するとともに中性化速度係数が4割ほど小さくなっている。

以上のことから、2回蒸気養生を行うことにより、コンクリートの水和反応は促進し、早期に所要の性能を確保するだけでなく、長期にわたってその性能が発揮されることを明らかにした。また、養生終了時に30N/mm<sup>2</sup>以上の圧縮強度を有することから、養生終了後、速やかに出荷できる可能性が示唆された。

## 3.3 混和材を用いたコンクリートの諸物性に及ぼす影響

### (1) 細孔構造

養生終了時における1回蒸気養生コンクリートの細孔構造を図-9、2回蒸気養生コンクリートの細孔構造を図-10に示す。また、材齢91日における1回蒸気養生コンクリートの細孔構造を図-11、2回蒸気養生コンクリートの細孔構造を図-12に示す。なお、両図ともに(a)は高炉スラグ微粉末を用いた場合、(b)はフライアッシュを

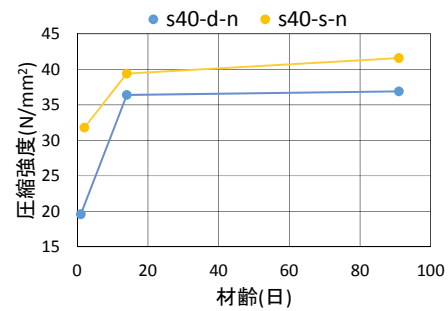


図-6 材齢進行に伴う圧縮強度の変化

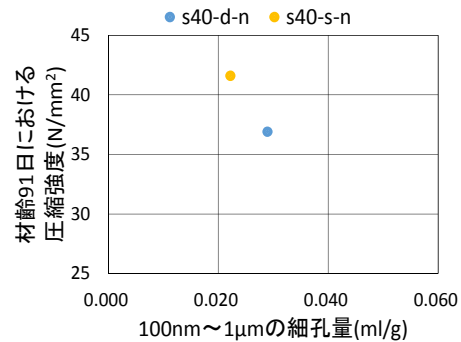


図-7 100nm以上の細孔量と材齢91日の圧縮強度

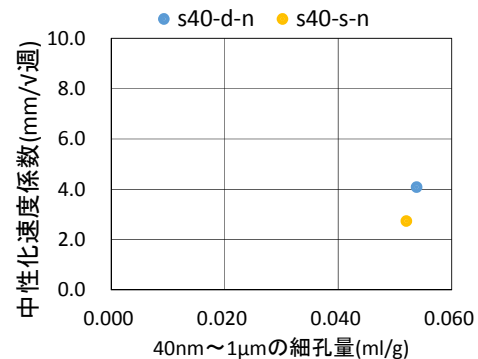


図-8 40nm以上の細孔量と中性化速度係数の関係

用いた場合とした。

養生終了時における細孔構造に着目すると、混和材を用いた1回蒸気養生コンクリート(s40-d-bおよびs40-d-f)は、表層部から内部にわたり100nm以上の細孔量が多く、疎な組織構造である。しかしながら、2回蒸気養生コンクリート(s40-s-bおよびs40-s-f)は混和材料の種類によらず、1回蒸気養生コンクリート(s40-d-bおよびs40-d-f)よりも大幅に総細孔量が減少し、100nm以上の比較的粗大な径の細孔も少ない。このことから、2回目の蒸気養生による水分供給および積算温度の増加によって、結合材の反応が促進し、疎な細孔構造を改善したといえる。

また、図-11および図-12に示す通り、材齢91日においても、混和材の種類によらずに2回蒸気養生コンクリート(s40-s-bおよびs40-s-f)の方が、50nm以下の微細な細孔が若干多く、100nm~1µmの比較的粗大な細孔が少ないことを確認できる。すなわち、2回蒸気養生によって若材齢時の組織形成が進行し、乾燥の影響を抑制することで、長期にわたって100nm以上の粗大な細孔を少なくできるものと考えられる。

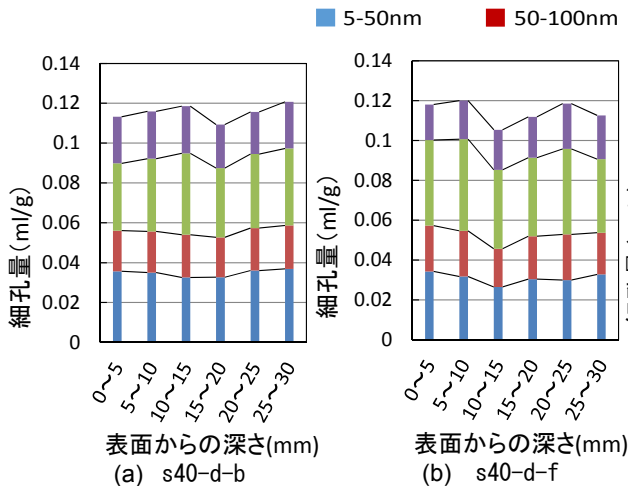


図-9 1回蒸気養生コンクリートの養生終了時の細孔構造 (混和材を用いたコンクリート)

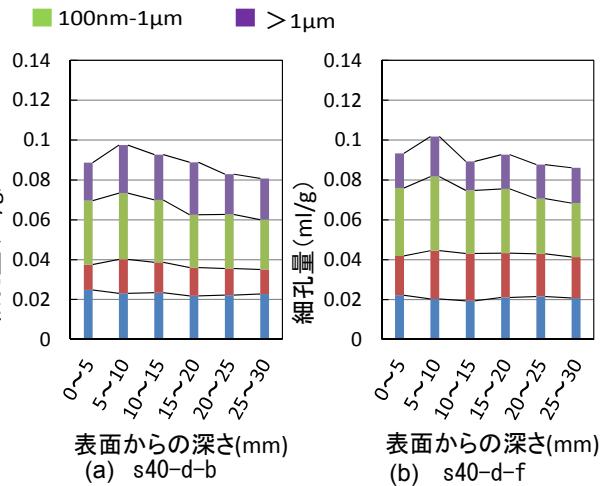


図-11 1回蒸気養生コンクリートの材齢91日の細孔構造 (混和材を用いたコンクリート)

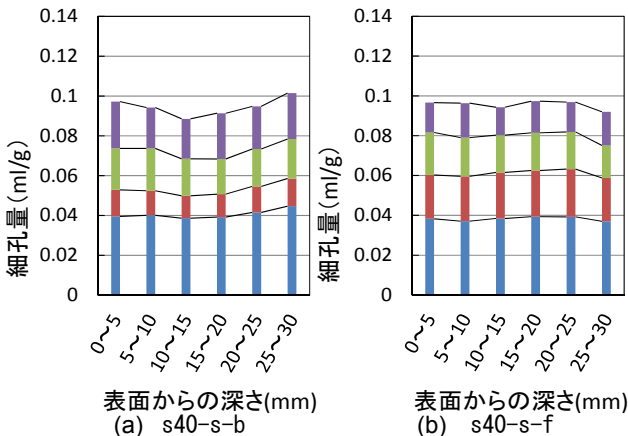


図-10 2回蒸気養生コンクリートの養生終了時の細孔構造 (混和材を用いたコンクリート)

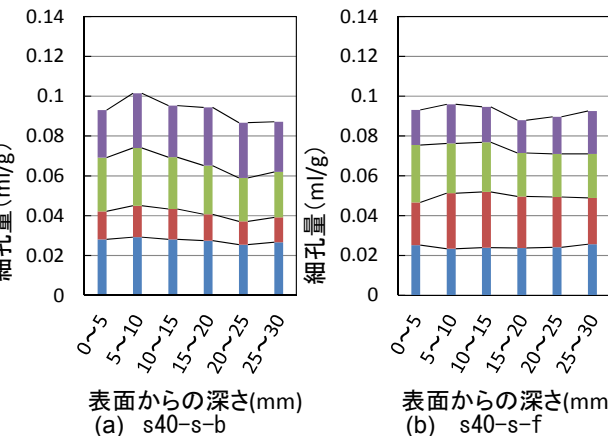


図-12 2回蒸気養生コンクリートの材齢91日の細孔構造 (混和材を用いたコンクリート)

(2) 圧縮強度

図-13に材齢91日における100nm~1µmの細孔量と圧縮強度の関係を示す。同図から、2回蒸気養生コンクリート(s40-s-b: 青色およびs40-s-f: 緑色)は、1回蒸気養生コンクリート(s40-d-b: 橙色およびs40-d-f: 灰色)に比べ、圧縮強度が高いことを確認できる。また、100nm~1µmの細孔量に着目することで、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いた場合において、圧縮強度と概ね良好な相関を得ることができた。

(3) 中性化性状

図-14に40nm~1µmの細孔量と中性化速度係数との関係を示す。2回蒸気養生コンクリート(s40-s-b: 青色およびs40-s-f: 緑色)は、1回蒸気養生コンクリート(s40-d-b: 橙色およびs40-d-f: 灰色)より中性化速度係数が小さい。しかしながら、混和材の種類により、40nm~1µmの細孔量と中性化速度係数の関係は相違する結果となった。

3.4 現場打ち模擬および標準養生コンクリートとの比較

図-15に各養生条件における圧縮強度の比較を示す。同図より、混和材を用いた2回蒸気養生コンクリート

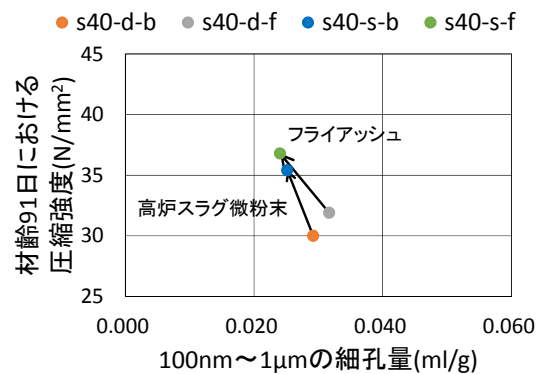


図-13 100nm~1µmの細孔量と圧縮強度の関係 (材齢91日)

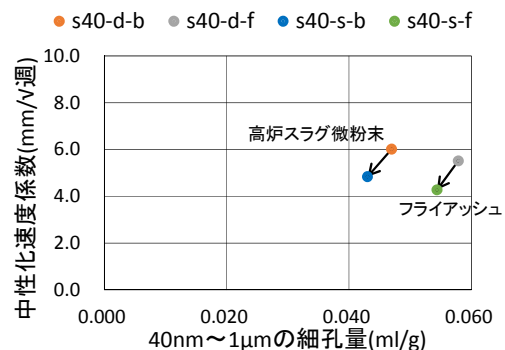


図-14 40nm~1µmの細孔量と中性化速度係数の関係



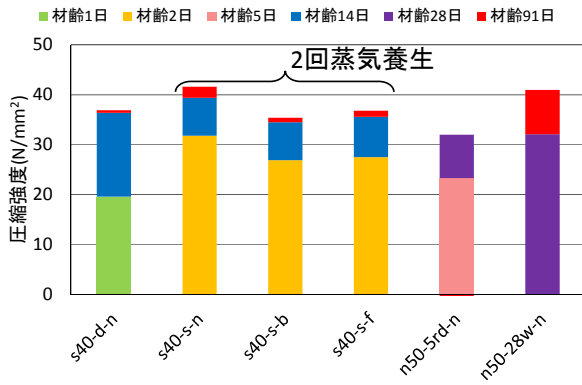


図-15 各養生条件における圧縮強度の比較

(s40-s-b および s40-s-f)は、混和材を用いない現場打ち模擬コンクリート(n50-5rd-n)よりも材齢 91 日における圧縮強度が高く、混和材を用いない 1 回蒸気養生コンクリート(s40-d-n)と同等の圧縮強度を示している。

また、混和材を用いない 2 回蒸気養生コンクリート(s40-s-n)は、標準養生コンクリート(n50-28w-n)と同等の圧縮強度を示した。さらに、2 回蒸気養生コンクリート(s40-s シリーズ)は、混和材の有無によらず、養生終了時における強度が現場打ち模擬コンクリート(n50-5rd-n)の材齢 28 日における強度と同程度であることから、早期に所要の性能を確保できるものと考えられる。

次に、各養生条件における中性化速度係数を図-16 に示す。同図から混和材を用いた 2 回蒸気養生コンクリート(s40-s-b および s40-s-f)は、混和材を用いない現場打ち模擬コンクリート(n50-5rd-n)よりも中性化速度係数が小さく、混和材を用いない一般的な 1 回蒸気養生コンクリート(s40-d-n)および標準養生コンクリート(n50-28w-n)と同程度の値を示した。また、混和材を用いない 2 回蒸気養生コンクリート(s40-s-n)は、他の養生条件よりも中性化速度係数が小さい。

以上のことから、2 回の蒸気養生により組織の緻密化が図られ、プレキャストコンクリート製品における耐久性の向上が見込まれる。

#### 4. まとめ

蒸気養生条件の相違が混和材を用いたコンクリートに及ぼす影響について、本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 2 回蒸気養生を行うことで、養生終了時の強度が高まり、一般的な 1 回蒸気養生コンクリートよりも早期に出荷できる可能性が示唆された。
- (2) 1 回蒸気養生では乾燥の影響で表層部が粗となるが、

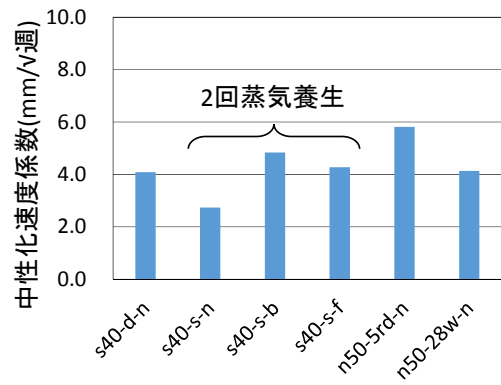


図-16 各養生条件における中性化速度係数

2 回蒸気養生を行うことで細孔構造が緻密化し、品質の向上に効果的である。

- (3) 混和材を用いたコンクリートにおいても、2 回蒸気養生を行うことで早期に所要の性能が確保され、また長期にわたってその性能を発揮する。
- (4) 混和材に高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いた場合、細孔構造と圧縮強度の関係は混和材の種類によらずほぼ同じであるが、細孔構造と中性化速度係数の関係においては相違がある。
- (5) 混和材を用いた場合、2 回蒸気養生することで現場打ち模擬および標準養生コンクリートと同等の性能を発揮する。

#### 参考文献

- 1) 住吉宏，窪山潔，今端太一，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) 武井一夫：蒸気養生中におけるは薄肉部材の乾燥水量に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.19，No.1，pp.667-672，1997
- 3) 寺川麻美，宇治公隆，上野敦，大野健太郎：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，pp.469-474，2012
- 4) 佐々木優衣，宇治公隆，上野敦，原洋介：細孔構造に着目した蒸気養生コンクリートの中性化特性および塩化物イオン浸透性の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1483-1488，2015
- 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