

# 論文 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

丸山 晃平\*1・宇治 公隆\*2・上野 敦\*3・大野 健太郎\*4

**要旨:** 本研究では、蒸気養生条件を要因とし、特に前置き時間(1, 3, 5 時間)と温度上昇速度(10, 20, 30°C/h)を変化させ、コンクリートの圧縮強度および、耐久性を支配する細孔構造について検討した。実験より、前置き時間を長くとも、あるいは温度上昇速度を 10°C/h 程度と緩やかにすることで、より緻密な細孔構造を形成し、強度発現も同一水セメント比で標準養生を行ったコンクリートの 90%強の値が得られることを明らかにした。

**キーワード:** 蒸気養生, 前置き時間, 温度上昇速度, コンクリート製品

## 1. はじめに

コンクリート製品の製造にあたっては、生産性の向上を目的として、通常、蒸気養生を実施している。同一配合で比較すると、蒸気養生を行ったコンクリート(以下、蒸気養生コンクリートと記す)は、標準養生を行ったコンクリート(以下、標準養生コンクリートと記す)よりも長期強度、耐久性が低下する傾向にある<sup>1)</sup>。大型コンクリート製品は、取り換えが困難であるため、所要の強度、耐久性を確保するよう十分な注意が必要である。強度、耐久性の向上の一つの方法として、蒸気養生後の湿潤養生が考えられる<sup>2)</sup>が、散水等を行うと表面の色むらが生じ、外観が悪くなりやすいことから、散水は行わないのが一般的である。

本研究では、蒸気養生条件の相違がコンクリート強度および細孔構造に及ぼす影響について検討した。検討項目として、前置き時間と温度上昇速度を取り上げた。なお、強度、耐久性向上の検討のため、標準養生コンクリート、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)、蒸気養生後に水中養生を行ったコンクリートの物性をも把握し、蒸気養生コンクリートとの比較を行っている。

## 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 に示す。蒸気養生コンクリートの配合を表-2 に、標準養生コンクリートおよび現場打ち模擬コンクリートの配合を表-3 に示す。実際のコンクリート製品工場で用いられている配合を参考に、水セメント比は主として 40%、単位水量は 149kg/m<sup>3</sup> とした。な

お、標準養生および蒸気養生後に水中養生を行うコンクリートについては、水セメント比 50%(この場合、単位水量 150kg/m<sup>3</sup>)も作製した。混和剤にはコンクリート製品用 AE 減水剤を用いた。

### 2.2 養生条件

供試体の養生条件を図-1 に示す。本研究では、4 種類の養生条件を取り上げ、コンクリート製品を対象としているため、工場出荷時の目安となる材齢 14 日での強度、細孔構造の評価を主として行う。蒸気養生後に気中保管(以下、蒸気養生後気中保管)を行うものは、約一日かけて蒸気養生を行い、脱型後から温度 20°C、湿度 60%の環境下で気中保管した。蒸気養生後に水中養生(以下、蒸気養生後水中養生)を行うコンクリートは、蒸気養生

表-1 使用材料

項目	品質
結合材(C)	普通ポルトランドセメント, 密度3.16g/cm <sup>3</sup> , 比表面積3310cm <sup>2</sup> /g
細骨材(S)	砕砂, F.M.=3.04, 表乾密度2.63g/cm <sup>3</sup> , 吸水率1.19%
粗骨材(G)	砕石, F.M.=6.66, 表乾密度2.66g/cm <sup>3</sup> , 吸水率0.97%
混和剤(Ad)	コンクリート製品用AE減水剤:ポリカルボン酸エーテル系

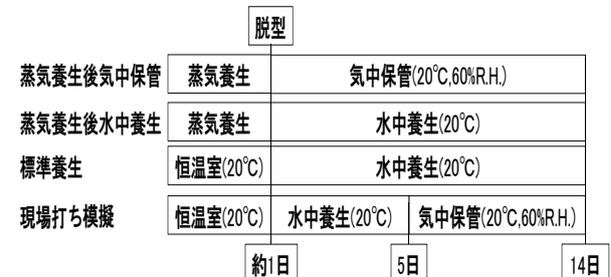


図-1 養生条件

\*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 (正会員)

\*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)

表-2 コンクリートの配合（蒸気養生）

記号*1	W/C (%)	前置き時間(h)	温度上昇速度 (°C/h)	二次養生	粗骨材の最大寸法 (mm)	SL (cm)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				コンクリート製品用AE減水剤(%)
									水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
s40-1-10	40	1	10	気中	20	8	4.5	46	149	388	819	972	C×1.5
s40-1-20			20										C×1.6
s40-3-10			10										C×1.6
s40-3-20		3	20										C×1.5
s40-3-30			30										C×1.6
s40-5-20			5										20
s40-5-30		30											C×1.6
s40-3-20w		40	3										20
s50-3-20w	50	150		310	849	1008	C×1.6						

\*1) 記号は、蒸気養生を表すsに続き、W/C、前置き時間、温度上昇速度の組合せとなっている。また、二次養生として水中養生を行っている場合は末尾にwを付記している。

表-3 コンクリートの配合（標準養生および現場打ち模擬）

養生方法	記号*2	W/C (%)	粗骨材の最大寸法 (mm)	SL (cm)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				コンクリート製品用AE減水剤(%)
							水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
標準養生	n40	40	20	8	4.5	46	149	388	819	972	C×1.5
	n50	50					150	310	849	1008	C×1.6
現場打ち模擬	n40-5w	40					149	388	819	972	C×1.5

\*2) nの後の数値はW/Cを表し、現場打ち模擬の場合は材齢5日まで水中養生であることを表すため、5wを付記している。

生後、20°Cで水中養生を行った。標準養生のコンクリートは、脱型後から材齢14日まで水中養生を行い、現場打ち模擬のコンクリートは、脱型後5日間水中養生を行い、その後気中保管とした。

2.3 蒸気養生条件

前置き時間を含む蒸気養生条件を図-2に示す。大型コンクリート製品を想定し、1日1サイクルの蒸気養生条件に設定した。練上がり温度は20°C一定とし、前置き時間は1、3、5時間の3水準、温度上昇速度は10、20、30°C/hの3水準とした。最高温度は65°C、その保持時間は3時間、温度下降は自然冷却として目標温度下降速度5°C/hで20°Cまで下降させた。

本研究における前置き時間と温度上昇速度の組合せおよび蒸気養生時間を表-4に示す。どの組合せも20時間以内で蒸気養生を終わらせることができ、1日1サイクルでの蒸気養生が可能である。

2.4 試験項目

(1) コンクリートのフレッシュ性状

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) 強度特性

JIS A 1108 に従い、φ100×200mmの供試体を用いて、圧縮強度試験を行った。供試体は、JIS A 1132 に従って

作製した。試験材齢は、脱型時および材齢14日とした。

(3) 細孔構造

コンクリートの強度や耐久性と密接に関係する細孔量を把握するため、細孔径分布を測定した。φ100×200mm

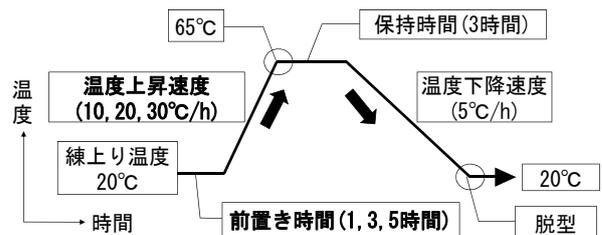


図-2 蒸気養生条件

表-4 蒸気養生時間

前置き時間 (h)	温度上昇速度 (°C/h)	温度上昇時間 (h)	最高温度保持時間 (h)	温度下降時間 (h)	蒸気養生時間 (h)
1	10	4.5	3	9	17.5
	20	2.25			15.25
3	10	4.5			19.5
	20	2.25			17.25
	30	1.5			16.5
5	20	2.25			19.25
	30	1.5	18.5		

の円柱供試体を、強度試験用とは別に各材齢1本用意した。試験材齢は、脱型時および材齢14日とした。

所定の材齢において、コンクリート供試体をコンクリートカッター、ニッパ等により細分化し、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、細骨材が含まれていない粒子を選定して試料とした。試験には、水銀圧入式ポロシチメーター(測定範囲:5nm~400μm)を用い、細孔直径および細孔容積を測定した。

### 3. 試験結果および考察

#### 3.1 フレッシュ性状

フレッシュコンクリートの各種試験結果を表-5に示す。スランプは8±2.5cm、空気量は4.5±1.5%の範囲内に納まり、練上がり温度は17.5~19℃の範囲で約20℃となった。なお、現場打ち模擬のものは、練上がり温度が14℃と低かったが、供試体作製後、速やかに20℃の恒温室で保管したので、影響は小さいと考えられる。

#### 3.2 圧縮強度

圧縮強度試験の結果を表-6に示す。

表-5 フレッシュ性状

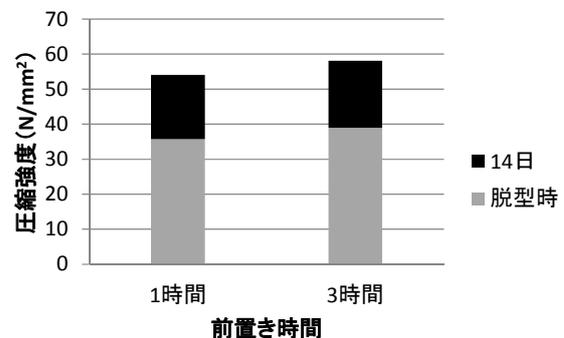
養生方法	記号	スランプ (cm)	空気量 (%)	練上がり温度 (°C)
蒸気養生後 気中保管	s40-1-10	7.5	3.0	17.5
	s40-1-20	7.5	3.6	18.0
	s40-3-10	9.0	4.9	18.0
	s40-3-20	10.0	4.6	19.0
	s40-3-30	7.5	3.8	18.0
	s40-5-20	7.5	4.1	19.0
蒸気養生後 水中養生	s40-3-20w	8.5	4.6	17.5
	s50-3-20w	7.0	5.9	19.0
標準養生	n40	10.5	4.3	18.0
	n50	7.5	5.9	19.0
現場打ち模擬	n40-5w	8.0	3.0	14.0

表-6 圧縮強度試験結果

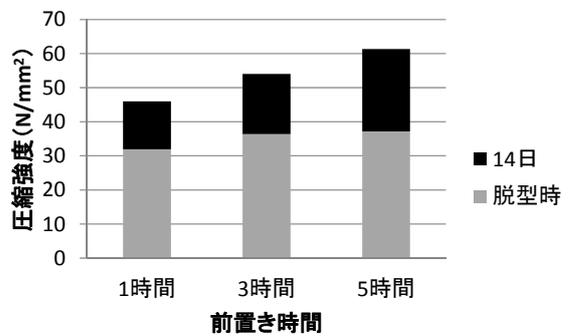
養生方法	記号	圧縮強度試験(N/mm <sup>2</sup> )	
		脱型時	14日
蒸気養生後 気中保管	s40-1-10	35.7	54.0
	s40-1-20	31.9	46.0
	s40-3-10	38.9	58.1
	s40-3-20	36.4	54.0
	s40-3-30	35.8	51.3
	s40-5-20	37.2	61.3
蒸気養生後 水中養生	s40-3-20w	36.4	58.1
	s50-3-20w	24.0	35.7
標準養生	n40	3.6	65.8
	n50	3.3	46.4
現場打ち模擬	n40-5w	10.9	64.2

#### (1) 前置き時間による影響

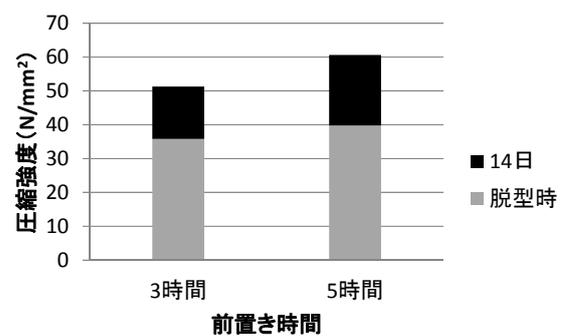
前置き時間(1, 3, 5時間)と圧縮強度(脱型時, 材齢14日)の関係を温度上昇速度(10, 20, 30°C/h)ごとに図-3に示す。図-3(a)より、温度上昇速度10°C/hで緩やかに温度上昇させることにより、前置き時間が1時間であっても、3時間とした場合とほぼ同等の強度発現を示すことが分かる。これは、温度上昇が緩やかであることで、前置き時間が短い場合でも、温度上昇の影響を受けにくく、組織を形成できたためだと考えられる。なお、前置き時間1時間の場合、温度上昇速度10°C/hでは、20°C/hに比べて約2割、強度が増加している。また、温度上昇速度20°C, 30°C/hの場合は、前置き時間による影響が比



(a) 温度上昇速度 10°C/h



(b) 温度上昇速度 20°C/h



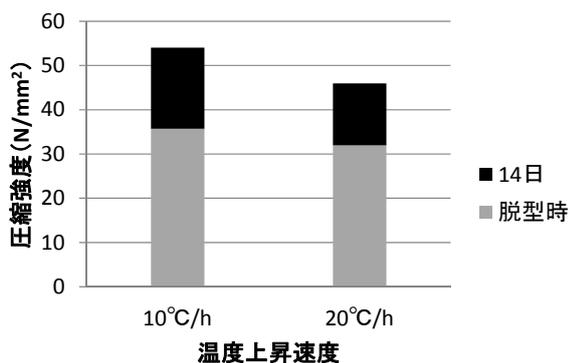
(c) 温度上昇速度 30°C/h

図-3 前置き時間の相違による強度比較

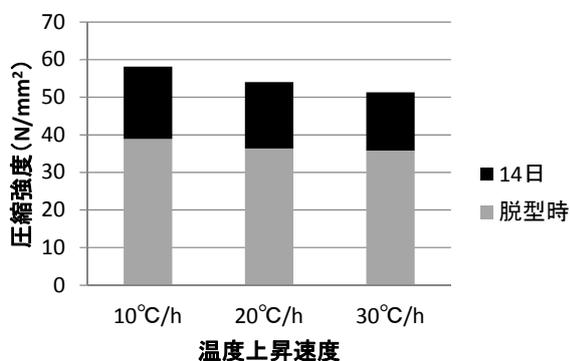
較的顕著に表れており、前置き時間を長くすることで強度も高く発現した。

### (2) 温度上昇速度による影響

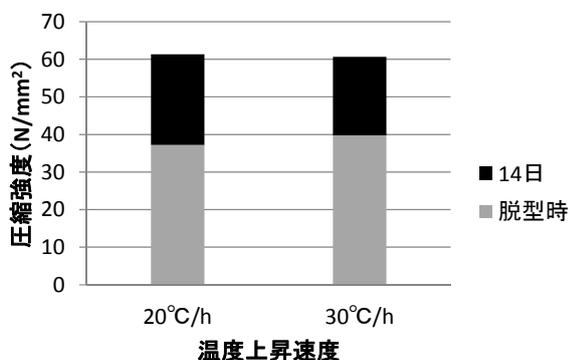
温度上昇速度と圧縮強度の関係を前置き時間ごとに図-4に示す。前置き時間が1時間および3時間の場合、温度上昇速度が大きくなるに伴い、圧縮強度が低下する傾向にあるが、前置き時間を5時間とすると、温度上昇速度を30°C/hとしても、20°C/hの場合とほぼ同等の強度発現を示している。これは、前置き時間中に水和反応が進んだことにより、温度上昇が一般的な速さよりも多少速



(a) 前置き時間 1 時間



(b) 前置き時間 3 時間



(c) 前置き時間 5 時間

図-4 温度上昇速度の相違による強度比較

くなったとしても、その影響を受けにくくなったと考えられる。

### (3) 養生条件による比較検討

標準養生コンクリートと温度上昇速度 20°C/h における蒸気養生後気中保管コンクリートの強度発現特性を図-5に示す。前置き時間を5時間(s40-5-20)とすることで、脱型時から強度が高く発現し、材齢 14 日時点では、同じ水セメント比 40%の標準養生コンクリート(n40)の約 93%の強度発現となる。また、水セメント比 40%の蒸気養生コンクリートは、水セメント比 50%の標準養生コンクリート(n50)と同等以上の強度発現を示した。一方、蒸気養生後に水中養生(s40-3-20w)を行うことで、標準養生(n40)の場合の約 88%の強度発現となることが認められた。

現場打ち模擬コンクリートと温度上昇速度 20°C/h における蒸気養生後気中保管コンクリートの強度発現特性を図-6に示す。標準養生コンクリートの場合と同様に、前置き時間を5時間(s40-5-20)とすることで、同じ水セメント比 40%の現場打ち模擬コンクリート(n40-5w)の約 95%の強度発現となる。ただし、前述の通り、前置き時間が短くなると圧縮強度も小さい。

蒸気養生後に水中養生を行った場合と気中保管を行った場合の強度発現特性について検討する。コンクリー

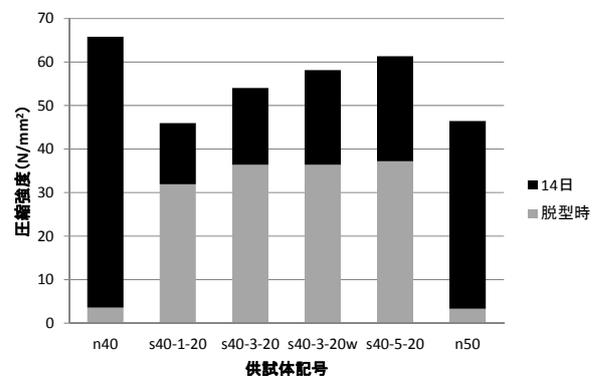


図-5 標準養生と蒸気養生との強度比較

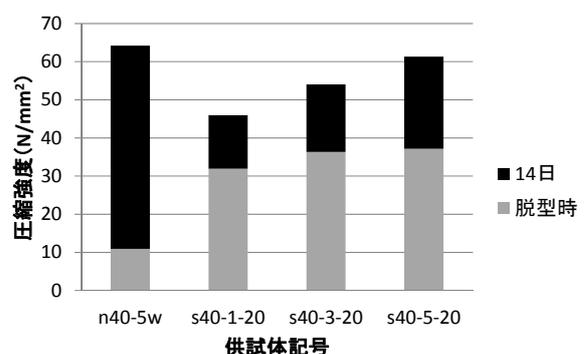


図-6 現場打ち模擬と蒸気養生との強度比較

ト標準示方書の蒸気養生条件を参考に、蒸気養生後に水中養生を行うコンクリートの前置き時間は3時間、温度上昇速度は20°C/hとしている<sup>3)</sup>。図-7には、この条件で比較可能な蒸気養生後気中保管コンクリートを示している。同じ水セメント比40%において、前置き時間5時間のコンクリート(s40-5-20)と温度上昇速度10°C/hのコンクリート(s40-3-10)は、蒸気養生後水中養生コンクリート(s40-3-20w)と同等の強度が得られる。すなわち、前置き時間を5時間と通常よりも長くとも、温度上昇速度を10°C/hとして緩やかに温度上昇させることで、蒸気養生後に気中保管を行った場合でも、蒸気養生後に水中養生を行った場合と同等の強度発現を呈することが明らかとなった。また、図-7には、水セメント比50%のデータも合わせて示している。これから分かるように、水セメント比40%の蒸気養生後気中保管のコンクリートは、水セメント比50%で蒸気養生後水中養生のコンクリート(s50-3-20w)はもとより、標準養生のコンクリート(n50)よりも高い強度発現を示した。このことから、蒸気養生後に水中養生を行えない場合でも、水セメント比を低減することで、現場打ち構造物の一般的レベルの強度であれば確保できることが明らかとなった。

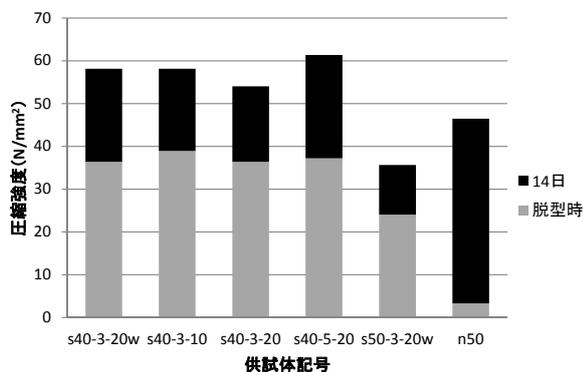


図-7 二次養生条件の相違による強度比較

### 3.3 細孔径分布

#### (1) 前置き時間による影響

温度上昇速度20°C/hにおける、前置き時間の違いによる材齢14日時点の細孔量比較を図-8に示す。総細孔量は多少の差はあるものの、同程度である。細孔径分布について見てみると、前置き時間を5時間と長くとも、50nm~1μmの細孔量が減少し、5~50nmのマイクロな細孔量が増加している。これは、前置き時間中に凝結が開始し、比較的安定した組織のもとで蒸気養生が進み、50nm~1μmの空隙が5~50nmの微細空隙に、また、5~50nmの微細空隙が5nm以下の微細空隙に変わり、緻密化したと考えられる。なお、材齢14日の強度の値に見られる、前置き時間が大きくなるに従って強度が増加す

る傾向とは必ずしも対応していないが、その点については今後のさらなる検討が必要である。温度上昇速度10、30°C/hにおける、前置き時間の違いによる材齢14日時点の細孔量も同様の傾向であった。

#### (2) 温度上昇速度による影響

前置き時間3時間における、温度上昇速度の違いによる材齢14日時点の細孔量比較を図-9に示す。温度上昇速度10°C/hと20°C/hに着目すると、温度上昇速度10°C/hで緩やかに温度上昇させることで、50nm以上の細孔量が減少し、代りに5~50nmのマイクロな細孔が増加しており、細孔構造が緻密化する傾向にあると言える。また、前置き時間1時間の場合も同様の傾向であった。一方、温度上昇速度20°C/hと30°C/hに着目すると、温度上昇速度を30°C/hと通常より速くしても特別な傾向は見られず、逆に、総細孔量が減少し、細孔構造が緻密化しているデータとなっている。これは、前置き時間3時間を十分な前置き時間とみなすことができ、それにより、温度上昇過程の影響を受けずに細孔構造の緻密化を促したと考えられる。このことは、材齢14日の圧縮強度の差が比較的小さいことにも対応していると言える。なお、前置き時間5時間の温度上昇速度の違いによる材齢14日時点の細孔量も同様の傾向であった。

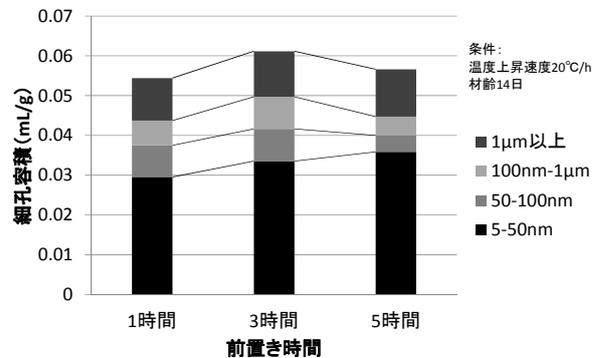


図-8 前置き時間の相違による細孔量比較

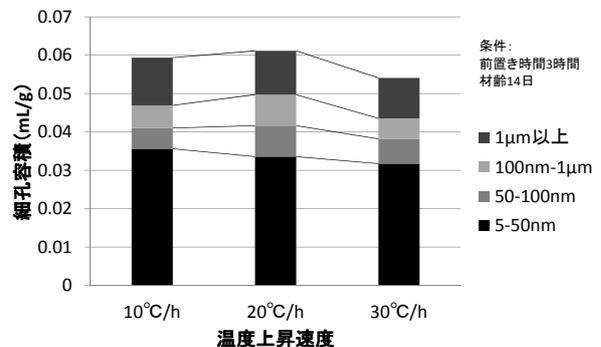


図-9 温度上昇速度の相違による細孔量比較

### (3) 養生条件による比較検討

既往の研究より、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<sup>4)</sup>。ここではその40nm以上の細孔量に着目し、養生条件の違いによる細孔径分布の傾向について検討する。

標準養生コンクリート、現場打ち模擬コンクリートおよび温度上昇速度 20°C/h の蒸気養生コンクリートにおける、材齢 14 日時点での 40nm 以上の細孔量を図-10 に示す。蒸気養生後気中保管のコンクリートは、標準養生コンクリート(n40)や、現場打ち模擬コンクリート(n40-5w)の 1.5~2.0 倍の細孔量となっている。

蒸気養生後水中養生のコンクリートと蒸気養生後気中保管のコンクリートにおける、材齢 14 日時点での 40nm 以上の細孔量を図-11 に示す。蒸気養生後に水中養生(s40-3-20w)を行うことで、40nm 以上の細孔量は気中保管(s40-3-20)に比べて大幅に減少している。また、水セメント比 40%で蒸気養生後気中保管のコンクリート(s40-3-20w)は、水セメント比 50%で蒸気養生後水中養生のコンクリート(s50-3-20w)に比べて 40nm 以上の細孔量は少ない。したがって、耐久性確保の観点から細孔径分

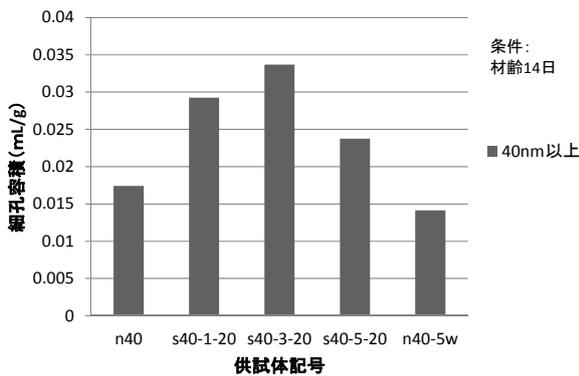


図-10 各種養生条件の相違による 40nm 以上の細孔量比較

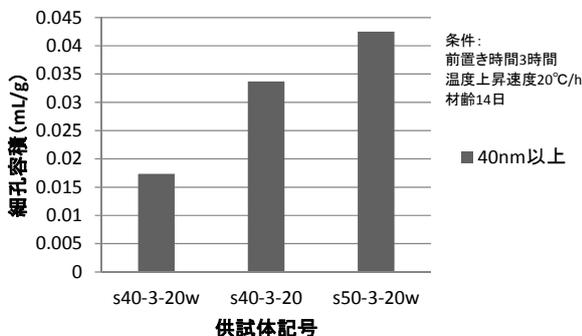


図-11 二次養生条件の相違による 40nm 以上の細孔量比較

布を調整する場合には、蒸気養生後に湿潤(本研究では水中養生としたが)に保つことが重要であるが、大型のコンクリート製品等でそれが困難な場合には、気中保管を前提とし、水セメント比を低減することが必要であると言える。

### 4. まとめ

本研究の範囲内で、以下のことが明らかとなった。

(1) 温度上昇速度を 10°C/h と緩やかにすることで、前置き時間 1 時間であっても、強度および 40nm 以上の細孔量ともに顕著な不具合はない。温度上昇速度 10°C/h では、20°C/h に比べて約 2 割、強度が増加している。

(2) 前置き時間を 5 時間と長くとり、温度上昇速度を 30°C/h としても、強度および 40nm 以上の細孔量に対しては、特に問題とならない。

(3) 蒸気養生後に気中保管を行う場合、前置き時間を 5 時間と長くすることで、同一水セメント比の標準養生コンクリートおよび 5 日間水中養生後に気中保管を行う現場打ち模擬コンクリートの強度とほぼ同等となり、細孔構造も緻密化する。

(4) 蒸気養生後に気中保管を行う場合、前置き時間を 5 時間と長くとり、あるいは温度上昇速度を 10°C/h と緩やかにすることで、蒸気養生後に水中養生を行う場合とほぼ同等の強度を得ることができる。

(5) 水セメント比 50%で標準養生を行ったコンクリートと同等の強度および細孔量を確保するためには、蒸気養生後気中保管するコンクリートの水セメント比を低減する必要がある。

(6) 本研究で検討した蒸気養生時間において、製品の製造は全て可能であり、前置き時間を 5 時間とすることで強度および耐久性を高め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, 1981.12
- 2) 大森淑孝, 河野俊夫: 蒸気養生コンクリートの耐久性におよぼす諸要因の影響, セメント技術年報, Vol.40, pp.431-434, 1986.12
- 3) 土木学会: 2007 年制定コンクリート標準示方書[施工編], pp.429-431, 2008.3
- 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