

論文 極初期の組織形成が温度履歴養生後のモルタルの特性に及ぼす影響

村田 哲*1・上野 敦*2・大野 健太郎*3・宇治 公隆*4

要旨: 本研究は、コンクリートの給熱養生において、熱作用を受ける前の組織形成の程度が、硬化後の特性に及ぼす影響について基礎的に検討したものである。異なる結合材を用いたモルタルに対して、養生温度を 10℃、20℃ および 30℃ とし、一定の貫入抵抗値を示すまで前養生を行い、蒸気養生を模擬した温度履歴を与え、圧縮強度、静弾性係数および細孔径分布を検討した。その結果、結合材種類に関わらず、貫入抵抗値 3.5N/mm² 以上となるまで前養生することで、温度履歴養生の効果を向上させること、また、この貫入抵抗値となるのに要する積算温度は、前養生温度によらずほぼ一定であることが明らかとなった。

キーワード: 貫入抵抗値, 前養生温度, 温度履歴養生, 積算温度, 結合材

1. はじめに

コンクリートに対する給熱養生は、結合材の反応促進のために行われるが、極初期材齢のセメントペースト組織に対して応力を生じさせる要因にもなる。コンクリートの給熱養生に関連する既往の研究は多く行われている。例えば、給熱養生として蒸気養生を行い、蒸気養生条件および蒸気養生前後の養生条件に着目したもの^{1) 2) 3)}、一定の温度で養生を行い、その養生温度に着目したもの^{4) 5) 6)}、結合材の種類に着目したもの^{7) 8) 9) 10)} などがある。しかし、給熱養生前の組織が、熱作用で生じる応力に耐えるものであるかを検討した研究はほとんどない。

本研究は、熱作用を受ける前の組織形成の程度が、硬化後の機械的性質および細孔構造に及ぼす影響について、基礎的に検討したものである。水結合材比、結合材の種類、熱養生前の養生温度を変えることで、凝結特性の異なるモルタルを作製し、JIS A 1147 のプロクター貫入試験に従い、一定の貫入抵抗値を示す組織構造となるまで前養生を行った。そして、プレキャストコンクリート製品の蒸気養生を模擬した温度履歴を与え、硬化後のモルタルに及ぼす前養生での組織形成の影響を圧縮強度、静弾性係数および細孔構造の観点から検討した。

2. 実験概要

本実験は、次に述べる実験 1 と実験 2 から構成されている。

実験 1^{11) 12)} では、4 種類の結合材と 3 水準の水結合材比の 12 配合のモルタルを用いて、貫入抵抗値 1.0N/mm²、3.5N/mm² (凝結始発) および 28.0N/mm² (凝結終結) となるまで前養生を行った後、温度履歴養生を行ったものを対象に、硬化後の特性への影響について検討を行った。前養生温度は 20℃ とした。また、前養生を行わずに温度履歴養生を行ったものについても検討を行

った。

実験 2 では、前養生温度を 10℃、20℃ および 30℃ とした場合に貫入抵抗値 3.5N/mm² となるのに必要な積算温度を比較することに加え、結合材の種類による硬化後の特性への影響について検討した。モルタルの配合は、結合材の種類が異なる 5 配合とした。前養生は貫入抵抗値 3.5N/mm² までを行い、その後、温度履歴を与えた。また、前養生を行わずに温度履歴養生を行ったものについても

表一 使用材料

記号	材料名	密度 (g/cm ³)	
		実験1	実験2
C	普通ポルトランドセメント	3.16	3.16
F(B)	高炉スラグ微粉末4000	2.89	2.91
F(F)	フライアッシュII種	2.34	2.30
EC	普通エコセメント	3.15	3.15
S	セメント強さ試験用標準砂	2.61	2.61

表二 モルタルの配合 (実験 1)

記号	置換率	W/B	単位量 (g/L)					S
			W	C	EC	F(B)	F(F)	
N40	-	0.4	231.9	579.7	-	-	-	1526.0
N50		0.5	254.3	508.7	-	-	-	1526.0
N60		0.6	271.9	453.2	-	-	-	1526.0
BB40	0.45	0.4	227.6	313.0	-	256.1	-	1526.0
BB50		0.5	250.3	275.3	-	225.2	-	1526.0
BB60		0.6	268.0	245.7	-	201.0	-	1526.0
FC40	0.3	0.4	221.6	387.8	-	-	166.2	1526.0
FC50		0.5	244.4	342.1	-	-	146.6	1526.0
FC60		0.6	262.4	306.1	-	-	131.2	1526.0
E40	-	0.4	231.5	-	578.9	-	-	1526.0
E50		0.5	254.0	-	508.1	-	-	1526.0
E60		0.6	271.6	-	452.7	-	-	1526.0

表三 モルタルの配合 (実験 2)

記号	置換率	W/B	単位量 (g/L)					S
			W	C	EC	F(B)	F(F)	
N50	-	0.45	254.3	508.7	-	-	-	1526.0
BB50			250.6	275.6	-	225.5	-	1526.0
FC50	0.3	0.5	243.7	341.2	-	-	146.2	1526.0
E50	-		254.0	-	508.1	-	-	1526.0
EB50	0.45		250.4	-	275.5	225.4	-	1526.0

*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 准教授 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 助教 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 教授 博士 (工学) (正会員)

検討を行った。

2.1 使用材料およびモルタルの配合

使用材料を表一1に、実験1のモルタルの配合を表一2に、実験2のモルタルの配合を表一3に示す。各配合では、細骨材に標準砂を用い、貫入抵抗値に及ぼす細骨材の影響を一定とするため、セメント強さ試験に用いるモルタルの配合を基準に、単位細骨材量を一定とした。

配合記号では、使用した結合材の種類によって、普通ポルトランドセメントをN、高炉セメントB種（置換率45%）をBB、フライアッシュセメントC種（置換率30%）をFC、エコセメントをE、高炉スラグ微粉末で45%置換したエコセメントをEBと表記している。

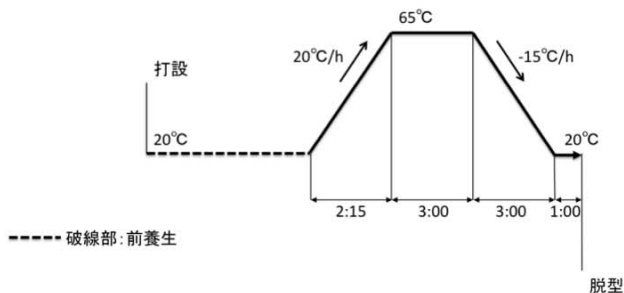
また、本実験では、結合材ごとの熱養生による影響を明確にするため、AE減水剤等の混和剤を使用しないこととした。

2.2 養生条件

実験1では前養生温度を20℃で一定とし、温度履歴養生開始時（前養生終了時）の貫入抵抗値を変化させた。実験2では温度履歴養生開始時の貫入抵抗値を3.5N/mm²で一定とし、前養生温度を変化させた。また、実験の都合上、温度履歴養生の設定値も多少異なっている。以下、実験ごとに設定した養生条件を記す。

表一4 前養生条件（実験1）

配合	前養生温度 (°C)	前養生時間 (h:min)			
		前養生終了時の貫入抵抗値 (N/mm ²)			C: 前養生なし
		A: 28.0	B: 3.5	B': 1.0	
N40	20	5:15	3:25	-	0:30
N50		6:20	4:05	3:50	0:30
N60		7:55	5:05	-	0:30
BB40	20	6:50	3:45	-	0:30
BB50		7:45	4:40	3:45	0:30
BB60		9:10	5:10	-	0:30
FC40	20	6:40	4:45	-	0:30
FC50		7:55	5:40	4:35	0:30
FC60		8:30	6:10	-	0:30
E40	20	9:20	5:50	-	0:30
E50		10:35	7:35	5:50	0:30
E60		12:05	9:10	-	0:30



図一1 温度履歴養生条件（実験1）

(1) 実験1

実験1の前養生条件を表一4に、温度履歴養生条件を図一1に示す。実験1では、前養生温度を20℃で一定とし、貫入抵抗値28.0N/mm²（凝結終結）、3.5N/mm²（凝結始発）および1.0N/mm²となるまで前養生を行った後、温度履歴を与えた。また、前養生を行わずに温度履歴を与えたものについても検討を行った。前養生条件によって、温度履歴養生開始時の貫入抵抗値が28.0N/mm²のものをA、3.5N/mm²のものをB、1.0N/mm²のものをB'、前養生を行わずに温度履歴を与えたものをCと表記している。

(2) 実験2

実験2の前養生条件を表一5に、温度履歴養生条件を図一2に示す。実験2では、10℃、20℃および30℃で、貫入抵抗値3.5N/mm²（凝結始発）となるまで前養生を行った後、温度履歴を与えた。また、前養生を行わずに温度履歴を与えたものについても検討を行った。

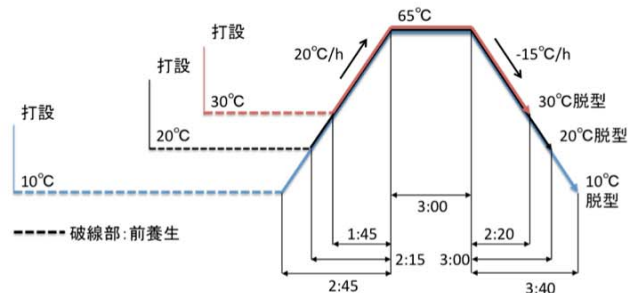
2.3 試験項目

(1) 凝結試験

JIS A 1147に従ってモルタルの凝結試験を行った。また、実験1ではJIS R 5201に従ってセメントペーストの凝結試験も行った。ただし、ミルシートに記載がある場

表一5 前養生条件（実験2）

配合	前養生温度 (°C)	前養生時間 (h:min)	
		B: 前養生あり (前養生終了時の貫入抵抗値3.5N/mm ²)	C: 前養生なし
N50	10	8:40	0:30
	20	4:40	0:30
	30	2:45	0:30
BB50	10	9:25	0:30
	20	5:10	0:30
	30	3:10	0:30
FC50	10	10:10	0:30
	20	5:35	0:30
	30	3:45	0:30
E50	10	10:30	0:30
	20	6:10	0:30
	30	3:40	0:30
EB50	10	12:45	0:30
	20	7:25	0:30
	30	4:15	0:30



図一2 温度履歴養生条件（実験2）

合はその結果を用いた。

(2) 圧縮強度試験

JIS A 1108 に準拠して、 $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ の円柱供試体の圧縮強度を試験した。材齢は、脱型直後（材齢 1 日）および材齢 14 日（脱型後 20°C 、60%R.H.で気中保管）とした。

(3) 静弾性係数試験

JIS A 1149 に準拠して脱型直後（材齢 1 日）の静弾性係数を測定した。縦ひずみは、供試体に貼付したゲージ長 30mm のひずみゲージにより測定した。

(4) 細孔径分布測定

脱型直後（材齢 1 日）の $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ の円柱供試体をコンクリートカッターで 5mm 厚にスライスし、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、ニップで 2.5mm 以上 5mm 以下の粒子に細分化し、真空状態で 1 週間以上乾燥させた。

細孔径分布の測定には、水銀圧入ポロシメータ（測定範囲 5nm~400 μm ）を用いた。

3. 実験 1 の結果および考察

3.1 凝結試験

セメントペーストとモルタルの凝結始発時間および終結時間を結合材および配合ごとに図-3 に示す。凝結の数値化の手法はセメントペーストとモルタルとで異なるが、普通ポルトランドセメントを結合材として使用している N, BB, FC を比較するとセメントペーストとモルタルの凝結時間には $N < BB < FC$ の関係があるとわかる。E はセメントペーストの凝結時間が比較的早いのにに対して、モルタルの凝結時間が遅いが、概ね、セメントペーストとモルタルの凝結時間には相関があるものと考えられる。

3.2 圧縮強度試験

圧縮強度試験の結果を図-4 に示す。また、図-4 から水結合材比 50% のものを抽出し、温度履歴養生開始時の

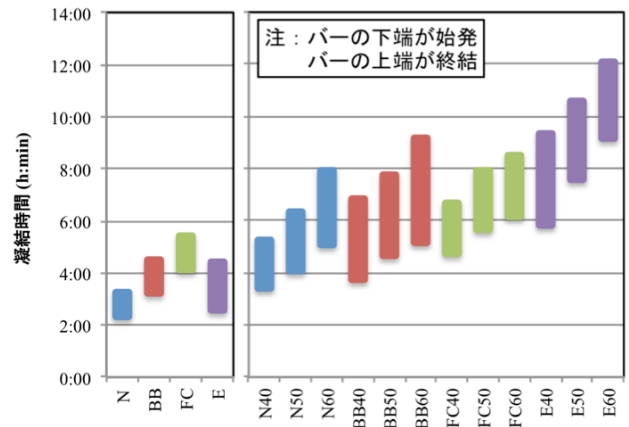


図-3 セメントペーストの凝結始発～終結時間（左）とモルタルの凝結始発～終結時間（右）（実験 1）

貫入抵抗値で整理したものを図-5 に示す。貫入抵抗値 28.0N/mm^2 まで前養生した条件 A は、これを 3.5N/mm^2 とした条件 B と比較し、材齢 1 日で若干の強度増加が見られるが、材齢 14 日では概ね同等となることから、前養生を行っていない条件 C は、著しく強度が低下している。

水結合材比の増加に伴い、凝結時間は長くなるが、圧縮強度は減少している。水結合材比によらず条件 A と条件 B が材齢 14 日で概ね同等の圧縮強度となることから、温度履歴養生開始時の貫入抵抗値によって、適切な前養生を管理できる可能性があると考えられる。

3.3 静弾性係数試験結果

各モルタルの静弾性係数を、温度履歴養生開始時の貫入抵抗値で整理したものを図-6 に示す。温度履歴養生開始時の貫入抵抗値が 1.0N/mm^2 の条件 B' および前養生を行っていない条件 C で、静弾性係数が低下するとわかる。また、温度履歴養生開始時の貫入抵抗値が 3.5N/mm^2

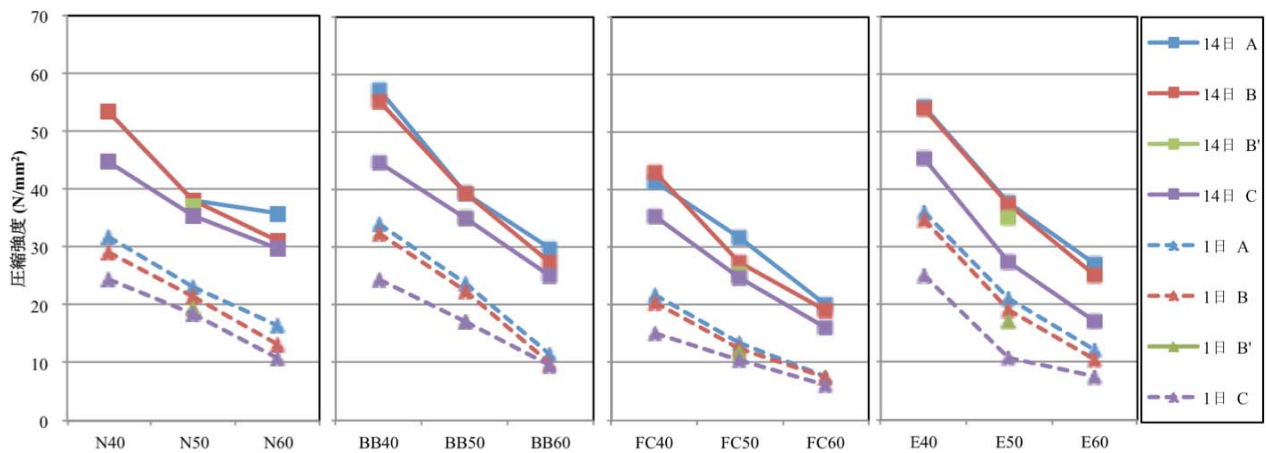


図-4 圧縮強度試験結果（実験 1）

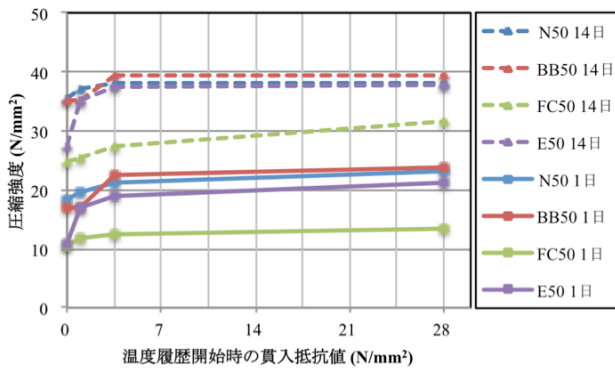


図-5 圧縮強度一貫入抵抗値グラフ (実験 1)

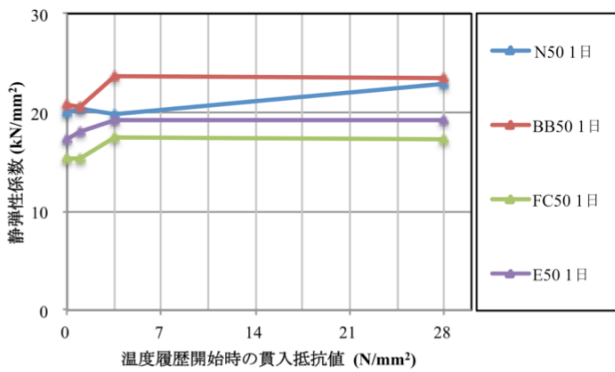


図-6 静弾性係数一貫入抵抗値グラフ (実験 1)

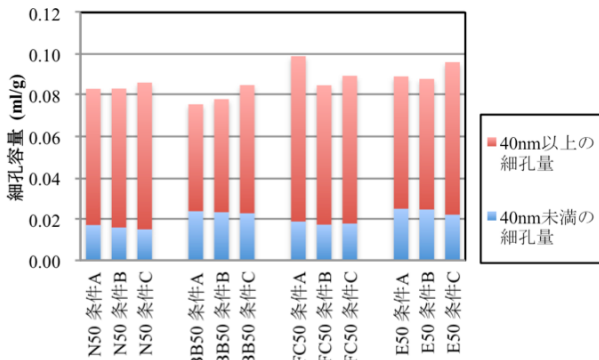


図-7 細孔径分布測定結果 (実験 1)

および 28.0N/mm² の条件 B および条件 A では同程度の静弾性係数を示しており、貫入抵抗値 3.5 N/mm² 以上まで前養生を行ってれば、温度履歴養生による静弾性係数の低下を抑制することができることがわかる。

3.4 細孔径分布測定

細孔径分布測定の結果を水結合材比 50%のものについて整理し、図-7 に示す。既往の研究により、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¹³⁾ことから、本研究では 40nm 以上の細孔量と 40nm 未満の細孔量を用いて細孔径分布測定の結果を整理した。

条件 A と条件 B を比較すると、FC50 以外では、総細

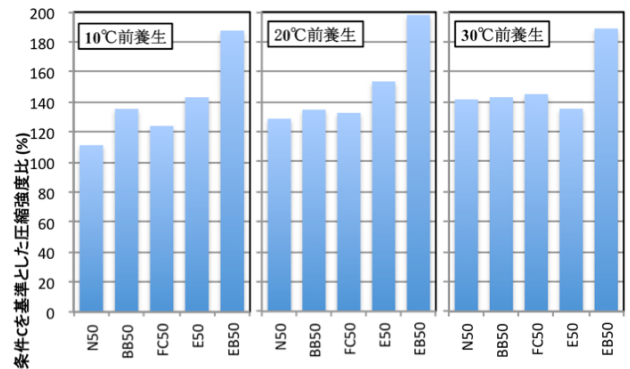


図-8 前養生した場合の圧縮強度比 (実験 2, 条件 B)

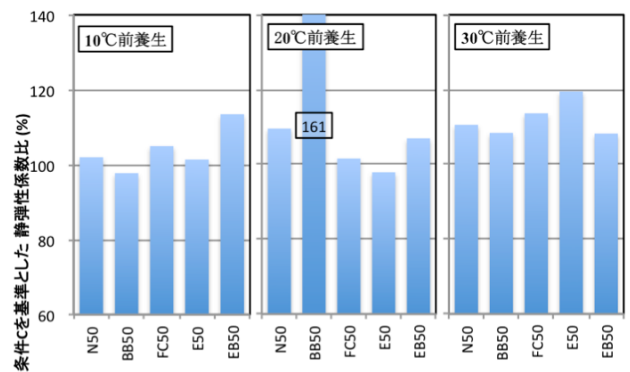


図-9 前養生した場合の静弾性係数比 (実験 2, 条件 B)

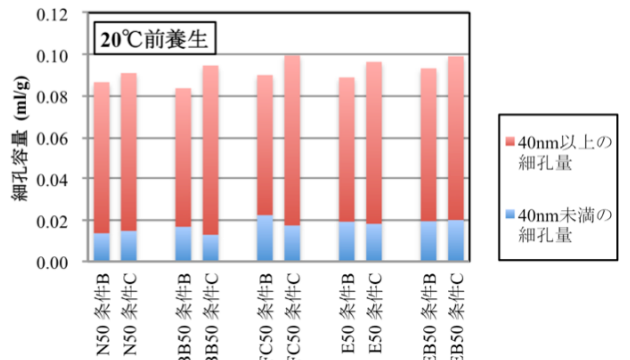


図-10 細孔径分布測定結果 (実験 2)

孔容量および細孔径 40nm 未満の微細な細孔容量に顕著な差は認められない。一方、条件 C では条件 A より 10% 程度総細孔容量が多く、細孔径 40nm 未満の微細な細孔容量も 10% 程度少なくなっており、組織が疎になっているとわかる。

3.5 実験 1 のまとめ

図-5 および図-6 から、貫入抵抗値 3.5N/mm² 以上の前養生を行うことで、その後の温度履歴養生の効果を高めることが示された。一方、1.0N/mm² の前養生では、温度履歴養生による圧縮強度および静弾性係数の増加傾向が小さなものとなり、前養生が不十分であることがわかる。すなわち、前養生による組織形成の観点では、本実

験の条件中では、貫入抵抗値 3.5N/mm^2 を確保することで、その後の温度履歴養生の効果を高めることができる。

4. 実験2の結果および考察

4.1 圧縮強度試験

材齢1日の圧縮強度試験の結果を、前養生を行わない場合(条件C)の圧縮強度を基準にして、図-8に示す。貫入抵抗値 3.5N/mm^2 (凝結始発)まで前養生を行ったことにより、温度履歴養生後の圧縮強度は、概ね30%以上増加することがわかる。

4.2 静弾性係数試験

静弾性係数試験の結果を前養生を行わない場合(条件C)の静弾性係数を基準にして、図-9に示す。圧縮強度と同様に、貫入抵抗値 3.5N/mm^2 まで前養生を行うことにより、温度履歴養生後の静弾性係数が、概ね同等または増加する傾向にある。

4.3 細孔径分布測定

細孔径分布測定の結果を、前養生温度 20°C のものを例に、図-10に示す。貫入抵抗値 3.5N/mm^2 まで前養生を行うことにより、温度履歴養生後の総細孔容量は減少し、細孔径 40nm 未満の微細な細孔容量は同等または若干増加しており、組織が密となっていることがわかる。

4.4 貫入抵抗値 3.5N/mm^2 となる積算温度

貫入抵抗値 3.5N/mm^2 (凝結始発)に着目し、この貫入抵抗値となるまでに要する積算温度 ($^\circ\text{C}\cdot\text{min}$) を計算した。この結果を図-11に示す。本研究では、反応基準温度が未知の結合材も用いているため、積算温度に反応基準温度を含まずに計算した。この図から、貫入抵抗値 3.5N/mm^2 に限定すると、ここまで要する積算温度は、前養生温度に関わらず結合材種類ごとにほぼ一定であることがわかる。すなわち、この養生温度の範囲では、積算温度が同一であれば、同等の前養生の効果が得られることがわかる。これを利用することで、養生温度の異なるモルタルの凝結試験を行うことなく、ある養生温度における凝結試験の結果から、他の養生温度における凝結時間を簡易に求めることが可能となると考えられる。

4.5 前養生温度による影響

10°C 、 20°C および 30°C で前養生を行った配合 N50 の圧縮強度および静弾性係数を図-12に、細孔径分布測定結果を図-13に、それぞれ示す。

圧縮強度、静弾性係数および細孔径分布測定結果において、前養生を行ったものは、前養生温度によらず、ほぼ同じ値であることがわかる。すなわち、貫入抵抗値 3.5N/mm^2 まで前養生が行われていれば、前養生温度によらず、温度履歴養生後の硬化体の物性および細孔構造に顕著な差が生じないことがわかる。

4.6 結合材の種類による影響

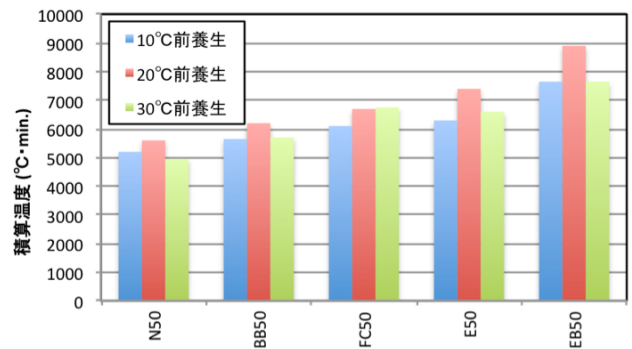


図-11 貫入抵抗値 3.5N/mm^2 となるのに要する積算温度 (実験2)

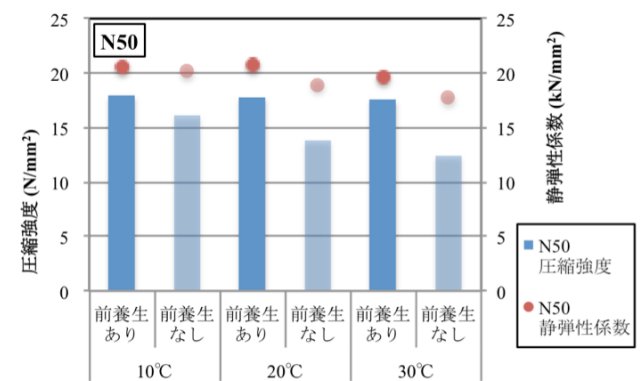


図-12 N50の圧縮強度および静弾性係数 (実験2)

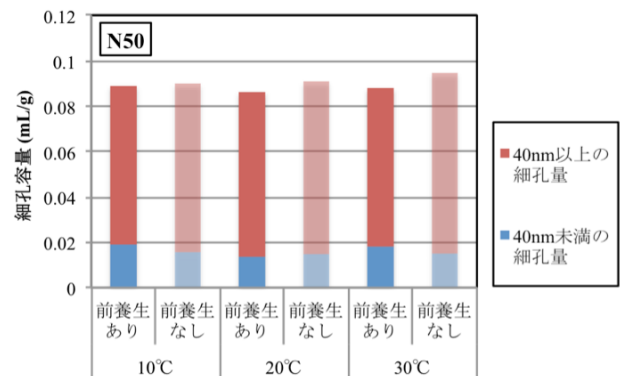


図-13 N50の細孔径分布測定結果 (実験2)

図-8に着目すると、 30°C 前養生のものおよびエコセメントを用いた E50 および EB50 において前養生による強度増進が 140%以上と、顕著であることがわかる。本実験では、前養生温度が高いほど、昇温開始から最高温度到達までの時間が短くなっている。このため、 10°C および 20°C 前養生の場合と比較して、 30°C 前養生では最高温度に達するまでの時間が短く、温度履歴養生による熱負荷が顕著になると考えられる。一方、エコセメントを用

いた E50 および EB50 が、前養生を行うことによって強度が大きく増進している現象は、10℃および 20℃前養生においても確認されている。すなわち、エコセメントを用いたモルタルは、3.5N/mm²まで前養生を行うことによって、概ね、その後の温度履歴養生の効果が大きくなることがわかる。

5. まとめ

本研究では、結合材の種類、水結合材比、熱養生前の養生温度を変えることで、凝結特性の異なるモルタルを作製し、JIS A 1147 のプロクター貫入試験に従い、一定の貫入抵抗値を示す組織構造となるまで前養生を行った後、プレキャストコンクリート製品の蒸気養生を模擬した温度履歴を与え、硬化後のモルタルに及ぼす前養生での組織形成の影響を圧縮強度、静弾性係数および細孔構造の観点から検討した。この結果、本研究の範囲で、次のことが明らかとなった。

- (1) セメントペーストの凝結時間とモルタルの凝結時間は概ね相関がある。
- (2) 水結合材比の増加に伴い、凝結時間は長くなるが、圧縮強度は減少し、細孔構造は疎となる。ただし、貫入抵抗値 3.5N/mm² の前養生を行った場合の温度履歴養生後の圧縮強度および細孔構造がほぼ同値であることから、水結合材比によらず、温度履歴養生開始時の貫入抵抗値によって、適切な前養生時間を管理できる可能性がある。
- (3) 前養生による組織形成の観点では、少なくとも、凝結始発を表す貫入抵抗値 3.5N/mm² を確保することで、その後の温度履歴養生の効果を高めることができる。
- (4) 前養生温度が 10℃～30℃ の場合、貫入抵抗値 3.5N/mm² となる場合に限定すると、ここまでに要する積算温度は、前養生温度によらず結合材種類ごとにほぼ一定である。
- (5) 貫入抵抗値 3.5N/mm² まで前養生が行われていれば、前養生温度によらず、温度履歴養生後の硬化体の物性および細孔構造には顕著な差は生じない。
- (6) エコセメントを用いたモルタルは、3.5N/mm² まで前養生を行うことによって、その後の温度履歴養生の効果が大きくなる。

謝辞

本研究の実施にあたり、東京都コンクリート製品協同組合より研究費の補助を受けた。

参考文献

- 1) 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
- 2) 篠沢和久: 蒸気養生コンクリートの圧縮強度に関する研究, セメント技術年報 22, pp.311~314, 1968
- 3) 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われ, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, pp.567~572, 1993
- 4) Portland Cement Association, Design and Control of Concrete Mixtures, p.7, 1952
- 5) W.H. Price: Factors Influencing Concrete Strength, JI, ACI 1951.2
- 6) 森 寛晃, 久我龍一郎, 高橋晴香, 鶴澤正美: 高温履歴を受けたセメント硬化体の強度発現メカニズムと添加材による物性改善の試み (Journal of the Society of Materials Science, Japan), Vol.59, No.10, pp.743-750, 2010.8
- 7) 岩城一郎, 鈴木一利, 三浦 尚: 低温養生を行った高炉スラグ混和コンクリートの強度回復特性, コンクリート工学年次論文報告書, Vol.20, No.2, 1998
- 8) 久我龍一郎, 森 寛晃, 鶴澤正美: 初期高温履歴を受けた高炉セメント硬化体の養生条件が水和反応に及ぼす影響, 太平洋セメント研究報告, 第 164 号, 2013
- 9) 小川由布子, 宇治公隆, 上野 敦: フライアッシュの結合材としての性能に対する養生温度の影響, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.67, No.4, 482-492, 2011
- 10) 松下哲郎, 丸山一平, 野口貴文, 棚木隆: エコセメントの水和反応の温度依存性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, 2006
- 11) 村田 哲, 上野 敦, 大野健太郎, 宇治公隆: 極初期の硬化特性が温度履歴養生後のモルタルの組織構造に及ぼす影響, 第 68 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第 5 部, pp.1185-1186, 2013
- 12) 村田 哲, 上野 敦, 大野健太郎, 宇治公隆: 給熱養生後のモルタルの強度および静弾性係数に対する極初期の組織形成の影響, 第 69 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第 5 部, pp.1081-1082, 2014
- 13) 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