

論文 結合材の凝結特性と温度履歴がモルタルの特性に及ぼす影響

多田 真人*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ける前養生の重要性の観点から、凝結始発時間に結合材の化学組成が及ぼす影響と、前養生時間短縮の観点から、前養生温度を 20℃、30℃および 40℃とした場合に、前養生温度がモルタルの硬化後の物性に及ぼす影響について検討した。その結果、凝結始発時間と結合材の化学組成との相関が確認されたため、凝結始発時間を結合材の化学組成から簡易的に予測できる可能性が示唆された。また前養生温度が高いと、凝結始発時間に関わらず概ね 10～20%強度が低下した。すなわち凝結が遅い結合材ほど前養生温度を高くすることが前養生時間短縮の観点から効果的であるとわかった。

キーワード：貫入抵抗値, 化学組成, 前養生温度, 昇温速度, 最高温度, 降温速度, 結合材

1. はじめに

プレキャストコンクリート製品の製造では、生産性の観点から常圧蒸気養生が行われることが多い。蒸気養生での温度履歴は、本質的には、結合材の種類や水結合材比によって変更されるのが合理的である。しかし、現状は、使用材料や配合に基づいて温度履歴を変更していない場合が多く、温度履歴を変更している場合であっても工場での試験によって判断するに留まっている。

これまで、結合材の種類による硬化特性と給熱開始までの養生（前養生）の有効性に着目した検討を行ってきた。この結果、結合材の種類に関わらず、JIS A 1147 に規定のプロクター貫入抵抗値で 3.5N/mm²、(凝結始発となる貫入抵抗値)まで初期の組織を形成することによって、その後の温度履歴養生の効果が高くなることが明らかとなった¹⁾。

本研究では、はじめに、昇温過程、最高温度保持過程および降温過程の各条件が、貫入抵抗値 3.5N/mm² まで前養生を行ったモルタルに及ぼす影響について整理した。次に、前養生の重要性の観点から、凝結始発時間に結合材の化学組成が及ぼす影響について検討すること、また、前養生時間短縮の観点から、前養生温度を 20℃、30℃および 40℃とした場合に、前養生温度がモルタルの硬化後の物性に及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

本実験は次に述べる実験 1、実験 2、実験 3 および実験 4 から構成されている。

実験 1 では温度履歴養生時の昇温速度が 4 種類のモルタルの特性に及ぼす影響について検討した。実験 2 では、温度履歴養生時の最高温度保持過程が 6 種類の結合材の

表-1 使用材料

試料	記号	密度 (g/cm ³)			比表面積 (cm ² /g)		
		実験1	実験2	実験3および4	実験1	実験2	実験3および4
普通ポルトランドセメント	N	3.16	3.16	3.16	3120	3210	3240
普通エコセメント	E	3.15	3.15	3.15	4060	4060	4010
高炉スラグ微粉末4000	BFS	2.89	2.90	2.90	4380	4360	4410
フライアッシュII種	FA	2.28	2.38	2.30	4220	4080	4390
セメント強さ試験用標準砂	S	2.61	2.61	2.61	-	-	-

表-2 化学組成

試料	記号	使用した実験	化学組成(%)					
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
普通ポルトランドセメント	N	実験2	20.27	5.20	2.77	64.09	1.30	2.07
		実験3および4	20.67	5.02	2.85	63.96	1.30	2.08
		実験2	17.12	6.80	3.73	61.62	1.58	3.25
普通エコセメント	E	実験3および4	17.54	6.61	3.70	61.29	1.62	3.24
		実験2	33.40	14.69	0.36	42.75	6.12	0.00
高炉スラグ微粉末4000	BFS	実験3および4	33.59	14.66	0.39	43.11	5.70	0.00
		実験2	56.38	27.34	4.62	2.42	1.29	0.34
フライアッシュII種	FA	実験2	60.16	26.25	3.75	1.87	1.03	0.25
		実験3および4	60.16	26.25	3.75	1.87	1.03	0.25

モルタルの特性に及ぼす影響について検討した。実験 3 では、温度履歴養生時の降温過程が 6 種類の結合材のモルタルの特性に及ぼす影響について検討した。実験 4 では 6 種類の結合材のモルタルを用い、凝結始発時間に対する結合材の化学組成の影響と、前養生温度がモルタルの特性に及ぼす影響について検討した。

2.1 使用材料およびモルタルの配合

基材とするセメントには表-1 に示す普通ポルトランドセメントおよび普通エコセメントを用いた。実験 2、実験 3 および実験 4 では、結合材としての反応性を示す指標として反応性物質の比率、すなわち CaO/SiO₂ 比に着目した整理を行うことを考えたため、セメントを含む単体の鉱物質微粉末の化学組成を蛍光 X 線分析により試験した。この結果は、表-2 に示すとおりである。

混合セメントを含む結合材としての水準は普通ポルトランドセメントのみを用いたもの(記号:N)、普通エコセメントのみを用いたもの(記号:E)、普通ポルトランドセ

*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)

表-3 実験1のモルタルの配合

記号	置換率	W/B	単位量 (g/L)					S
			W	N	E	BFS	FA	
N	-	0.5	254	509	-	-	-	1526
E	-		254	-	508	-	-	
BB	0.45		250	275	-	225	-	
FC	0.3		243	341	-	-	146	

表-4 実験2のモルタルの配合

記号	置換率	W/B	単位量 (g/L)					S	CaO/SiO ₂ 比	S.M.
			W	N	E	BFS	FA			
N	-	0.5	254	509	-	-	-	1526	3.16	2.54
E	-		250	-	508	-	-		3.60	1.63
BB	0.45		244	276	-	225	-		2.08	2.35
EBB	0.45		254	-	275	225	-		2.17	1.95
FC	0.3		250	342	-	-	146		1.47	2.05
EFC	0.3		244	-	342	-	146		1.52	1.70

表-5 実験3および4のモルタルの配合

記号	置換率	W/B	単位量 (g/L)					S	CaO/SiO ₂ 比	S.M.
			W	N	E	BFS	FA			
N	-	0.5	254	509	-	-	-	1526	3.09	2.63
E	-		250	-	508	-	-		3.49	1.70
BB	0.45		244	276	-	225	-		2.06	2.39
EBB	0.45		254	-	275	225	-		2.14	1.99
FC	0.3		250	341	-	-	146		1.39	2.24
EFC	0.3		244	-	341	-	146		1.43	1.87

メントまたは普通エコセメントの質量の45%を高炉スラグ微粉末で置換したもの（高炉セメントB種相当。混合セメントとしての記号:BB, EBB）、普通ポルトランドセメントまたは普通エコセメントの質量の30%をフライアッシュで置換したもの（フライアッシュセメントC種相当。混合セメントとしての記号:FC, EFC）とした。この結果、本研究で対象とした結合材は合計で6種類となる。ただし実験1のみEBBおよびEFCを除いた4種類の結合材を対象としている。

細骨材には、JIS R 5201に規定の、密度2.61g/cm³のセメント強さ試験用標準砂を用いた。

各実験のモルタルの配合、CaO/SiO₂比およびシリカ比(=SiO₂/(Al₂O₃+Fe₂O₃)) (記号:S.M.)を表-3、表-4および表-5に示す。

モルタルの配合は、水結合材比(W/B)を0.50、セメント強さ試験用の配合を基準に、モルタル中の細骨材の絶対容積を一定とした。

2.2 モルタル中のCaO/SiO₂比とシリカ比

(1) CaO/SiO₂比

CaO/SiO₂比は活性の低いSiO₂に対する活性の高いCaOの含有率の比となっているため、CaO/SiO₂比が高いと反応性の高い結合材であると考えられる。NとEを比較すると、一般に、EはC₃Aが多くC₂Sが少ない。C₃Aが多いため、初期のC₃Sの反応は遅れる傾向にあるがC₃Sの反応が始まれば、凝結速度としてはNと同程度の速度を示す。本研究では、温度履歴開始前の前養生を、同じ

表-6 温度履歴

実験	前養生温度 (°C)	前養生時間	昇温速度 (°C/h)	最高温度 (°C)	最高温度保持時間 (h)	降温速度 (°C/h)
実験1	20	凝結始発時間	20	65	3	-15
			40			
			60			
			80			
実験2	20	凝結始発時間	40	55	4.545	-15
				65	3	
				75	1.744	
実験3	20	凝結始発時間	40	65	3	-15
						∞
実験4	20	凝結始発時間	40	65	3	-15
						30
						40

貫入抵抗値となるまで実施していることから、E、または、Eを基材とした混合セメントの反応性を表す指標の1つとしてCaO/SiO₂比を用いた整理を行うこととした。

(2) シリカ比

S.M.は本来、セメント製造工程において、調合原料の化学組成を管理するための比率であり、管理特性値として活用されるものである²⁾。

本研究では、凝結時間の簡易評価のために表-2から結合材のS.M.を算出した。

凝結始発時間はC₃Sから生成されるC-S-Hの核生成の時期に概ね対応し、特に液相のCa(OH)₂の溶解度積の変化が凝結に深い関わりあることが明らかとなっている³⁾⁴⁾。そこで反応主体であるC₃Sの反応を阻害するC₃AおよびC₄AFの比を簡易的に表したSiO₂/(Al₂O₃+Fe₂O₃)比、すなわちS.M.によって凝結特性の評価を試みた。なおC₂Sは極初期にはほとんど水和していないものとして、上記の式から除いている⁵⁾。

2.3 温度履歴の条件

(1) 実験1

実験1の温度履歴条件を表-6に示す。前養生温度は20°Cの一定として、各モルタルの凝結始発まで前養生を行う場合と、前養生を行わないものの2水準とした。前養生を行わない場合については接水からの時間を30分の一定として昇温を開始した。昇温速度は20, 40, 60および80°C/hの4水準とした。最高温度は65°C、最高温度保持時間は3時間、降温速度は-15°C/hの一定とし、20°Cで1時間静置した後、脱型した。

(2) 実験2

実験2の温度履歴条件を表-6に示す。各モルタルは、凝結試験による結果に基づき、20°C条件下で凝結始発となるまで型枠中で静置し、温度履歴を行った。また、比較のため配合EおよびFCについて型枠中に打ち込んだ直後に温度履歴を開始した場合についても後述の圧縮強度試験に供した。

最高温度は、一般的に用いられる65°Cを中心に±10°C

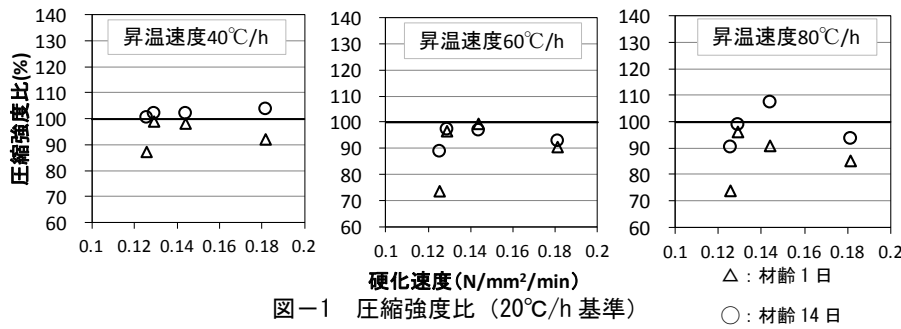


図-1 圧縮強度比 (20°C/h 基準)

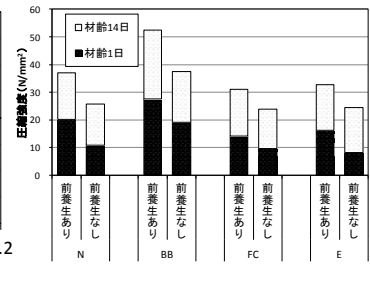


図-2 昇温速度 40°C/h の圧縮強度

表-7 凝結時間試験の結果

配合	N	BB	FC	E
凝結始発時間(min)	310	325	360	420
凝結終結時間(min)	480	515	495	615
硬化速度(N/mm ² /min)	0.144	0.129	0.181	0.126

の3水準とした。最高温度の保持時間は、最高温度が異なっても、温度履歴養生の昇温工程以降のみかけの総積算温度が一定になるように調整した。すなわち、ここでの総積算温度とは、昇温過程、最高温度保持過程、降温過程での積算温度の総和を表している。最高温度 65°C の場合の最高温度保持時間を3時間とし、これを基準として、各最高温度での保持時間を計算した。この結果、最高温度が 55°C の場合、保持時間は4時間32分となり、最高温度が 75°C の場合、保持時間は1時間44分となっている。昇温速度は 40°C/h、降温速度を -15°C/h、後養生を 20°C で1時間行った。

(3) 実験3

実験3の温度履歴条件を表-6に示す。前養生温度は 20°C の一定とし、各モルタルの凝結始発時間まで前養生を行った。

降温速度を -15°C/h の徐冷と降温過程を行わずにそのまま後養生を行う急冷の2水準とした。

昇温速度は 40°C/h、最高温度は 65°C、最高温度保持時間は3時間、20°C で1時間静置した後、脱型した。

(4) 実験4

実験4の温度履歴条件を表-6に示す。前養生温度を 20°C、30°C および 40°C の3水準とし、凝結時間試験によって求められた各モルタルの凝結始発時間を前養生時間とした。昇温速度は 40°C/h、最高温度は 65°C、最高温度保持時間は3時間、降温速度は -15°C/h の一定とし、20°C で1時間静置した後、脱型した。

2.4 試験項目と方法

(1) 凝結時間

本研究では、結合材種類の異なるモルタルを、凝結始発となるまで前養生した後に温度履歴を行うことを基本としている。このため、凝結試験を、JIS A 1147 に従って試験した。

(2) 圧縮強度と静弾性係数

モルタルの圧縮強度試験は、JSCE-G 505 に従い、φ50×100mm の円柱供試体を用いた。材齢は、温度履歴養生直後(材齢1日)および14日とした。各供試体は、試験材齢によらず温度履歴養生後に脱型し、材齢14日のもの、所定材齢となるまで 20°C、60%R.H の恒温恒湿室

内に保管した。

モルタルの静弾性係数試験は、JIS A 1149 に準拠した。材齢は温度履歴養生直後(材齢1日)のみとした。これは、給熱養生後の組織構造の指標として静弾性係数を位置付けているためである。

本検討では、型枠内に打ち込まれた状態で前養生され、そのままの状態温度履歴養生を行うため、熱伝導率の高い使い捨ての鋼製型枠を使用した。また、温度履歴養生中の乾燥を防止する観点から、型枠に打ち込んだ状態で、打込み面を塩化ビニリデンフィルムで封緘した。すなわち、本検討での給熱養生の状態は、封緘温度履歴養生ということになる。また、材齢14日の供試体は、温度履歴養生後には乾燥状態で保管されていることとなる。

3. 昇温速度、最高温度および降温速度がモルタルの強度および静弾性係数に及ぼす影響

3.1 昇温速度がモルタルの強度および静弾性係数に及ぼす影響⁶⁾

モルタルの凝結試験の結果を表-7に示す。この結果に基づいて、凝結始発時間を各結合材の前養生時間に設定した。凝結始発時間および凝結終結時間を直線とし、この直線の傾きを硬化速度とした。

前養生を凝結始発まで行った場合について、一般的に適用される昇温速度の 20°C/h 時の圧縮強度に対し、40、60、および 80°C/h 時の圧縮強度の比と硬化速度の関係を図-1に示す。昇温速度が圧縮強度へ及ぼす影響と硬化速度の関係は明確とはならないことがわかる。

昇温速度 40°C/h では、圧縮強度比 20°C/h の圧縮強度とほぼ同等であるが、昇温速度 60 および 80°C/h の圧縮強度比は、昇温速度 20°C/h の圧縮強度比より低下する傾向にある。すなわち、前養生による組織の形成が良好な場合、40°C/h 程度の昇温速度であれば圧縮強度への及ぼ

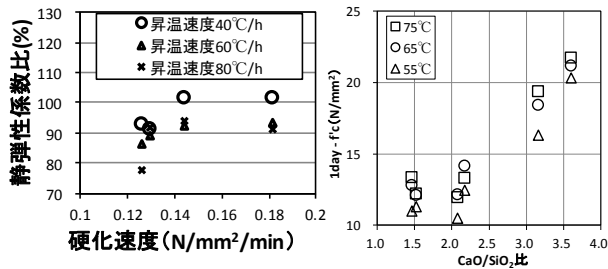


図-3 静弾性係数比
(20°C/h 基準)

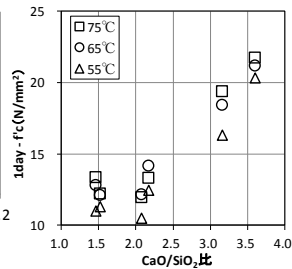


図-4 圧縮強度
(材齢 1日)

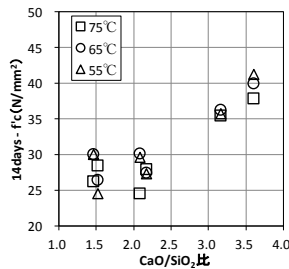


図-5 圧縮強度
(材齢 14日)

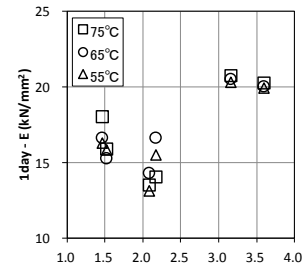


図-7 静弾性係数
(材齢 1日)

す影響は小さいと考えられる。

昇温速度 40°C/h における各モルタルの圧縮強度を図-2に示す。前養生を貫入抵抗値 3.5N/mm²まで行ったものに対し、前養生を行わないものは、いずれの結合材を用いた場合でも 30%程度強度が低下した。このことから、前養生を凝結始発時間程度行うことで、熱応力に耐えうる組織が形成され、この組織が昇温速度上昇による熱応力の影響を軽減することがわかる。

前養生を凝結始発まで行った場合の昇温速度 20°C/h における静弾性係数に対する、昇温速度 40, 60 および 80°C/h における静弾性係数の比と硬化速度の関係を図-3に示す。圧縮強度と同様に、結合材の硬化速度によらず、昇温速度 40°C/h では、昇温速度 20°C/h の静弾性係数とほぼ同程度となっている。そして、昇温速度 60 および 80°C/h の静弾性係数は、昇温速度 20°C/h の静弾性係数より低下する傾向となっている。すなわち、前養生による組織の形成が良好な場合、40°C/h 程度までの昇温速度であれば静弾性係数への影響も小さいことがわかる。

3.2 最高温度がモルタルの強度および静弾性係数に及ぼす影響⁷⁾

前養生を凝結始発まで行った場合の、結合材の CaO/SiO₂ 比と材齢 1日および 14日圧縮強度の関係を、図-4および図-5に示す。材齢によらず CaO/SiO₂ 比の増加に伴い、圧縮強度が直線的に増加することがわかる。すなわち、本研究での結合材の水和反応による強度発現は、主にカルシウム系の材料の水和に依存していることがわかる。最高温度が圧縮強度に与える影響では、材齢 1日において、最高温度が高いほど圧縮強度が高くなる傾向を示した。また、CaO/SiO₂ 比が低いと、最高温度による影響は高くなる傾向にある。材齢 14日においては低 CaO/SiO₂ のモルタルにて最高温度が高いと強度が低下する場合があった。この原因は不明であるが、CaO/SiO₂ 比が 1.5~2.0 程度を下回る場合で、材齢 14日を基準とする場合、最高温度を低く設定することが有効と考えられる。

前養生の有無による圧縮強度への影響について、配合 E および FC で、最も厳しい条件となる最高温度 75°C の

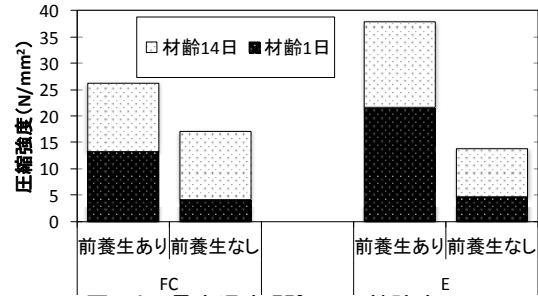


図-6 最高温度 75°Cの圧縮強度

場合を例に図-6に示す。前養生なしの場合はどちらの配合においても強度低下が顕著であり、給熱前の前養生の重要性が明確に示されている。

前養生を行った場合の、結合材の CaO/SiO₂ 比と材齢 1日における静弾性係数の関係を図-7に示す。材齢 1日の圧縮強度と同様に、最高温度が高いと静弾性係数が増加する傾向がみられる。また CaO/SiO₂ 比が低い場合は最高温度による静弾性係数への影響が大きくなる傾向となるとわかる。

3.3 降温速度がモルタルの強度および静弾性係数に及ぼす影響

前養生を凝結始発まで行った場合について、徐冷工程を経た場合の圧縮強度に対し、急冷した場合の圧縮強度の比と CaO/SiO₂ 比の関係を図-8に示す。

材齢 1日の場合、急冷したものは CaO/SiO₂ 比によらず、徐冷したものと比較し 20%程度強度が低下している。材齢 14日の場合は、急冷したものは結合材によらず、徐冷したものと比較し概ね 10%程度低下したが、FC, E は材齢 14日で降温条件の違いはみられなかった。

降温速度が速いことで圧縮強度が低下する理由は大きく 2つが考えられる。一つは供試体内外に温度差が生じることによって起きる熱応力が組織を破壊すること、もう一つは急冷水準における降温過程分の積算温度、すなわち給熱エネルギーが少ないことである。前者に関しては、材齢 14日で FC や E のように、降温条件の違いが圧縮強度に及ぼす影響がほとんどなかったため、φ50×100mm のモルタルの圧縮強度試験である本実験においては、供試体内外の温度差による影響は少なかったものと考えられる。ただし、部材厚が大きいものやマスコン

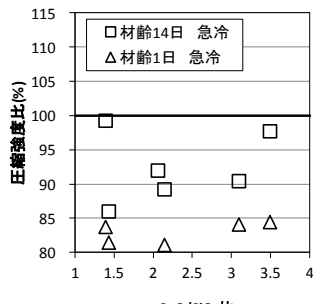


図-8 CaO/SiO₂比 圧縮強度比 (徐冷基準)

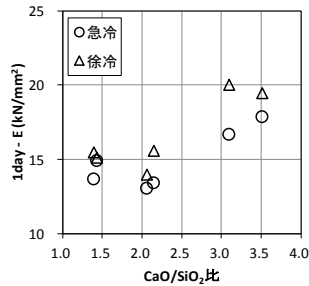


図-9 静弾性係数 (材齢1日)

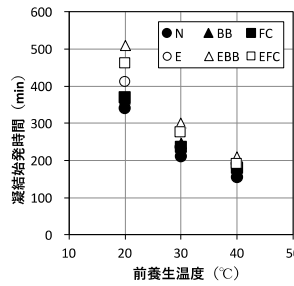


図-10 凝結始発時間と温度の関係

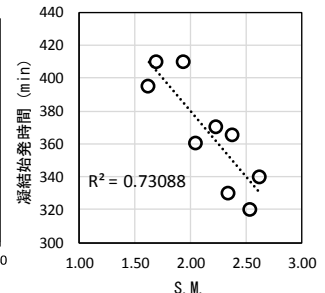


図-11 凝結始発時間とS.M.の関係

クリートにおいては温度ひび割れの考慮が必要である。後者に関して、急冷を行った場合、材齢1日(脱型直後)の方が材齢14日より強度低下率が大きいと、給熱エネルギーの差が強度に及ぼす影響がより顕著に現れたと考えられる。また、初期に強度発現しないことで、イオンや水が移動しやすい組織構造が作られたため、材齢14日の強度が回復したことも考えられる。

前養生を凝結始発まで行い、その後、温度履歴養生を行った場合の、静弾性係数とCaO/SiO₂比の関係を図-9に示す。CaO/SiO₂比と静弾性係数には明瞭な相関はないことがわかる。降温条件による静弾性係数の低下率は概ね15%程度であった。ただしEFCのように急冷を行っても、徐冷の場合の静弾性係数と同程度になる結合材もあった。降温条件が静弾性係数に与える影響は、この供試体寸法の場合、圧縮強度同様、小さいものと考えられる。

3.4 まとめ

昇温速度については、これを40°C/h程度まで早めても、3.5N/mm²となるまで前養生を行って行けば、通常の昇温速度で作製したモルタルと同等の特性をもつことが明らかとなった。前養生を行わず40°C/hの昇温過程を経た場合や、前養生を行わずに最高温度を75°Cとした場合、モルタルの圧縮強度および静弾性係数は顕著に低下した。また、徐冷による過程を行わない場合、モルタルの圧縮強度は低下する傾向にあったが、徐冷による過程を行ったものの圧縮強度と同程度となる結合材もあった。

以上のことから、昇温過程、最高温度保持過程、降温過程の条件よりも、給熱前の組織形成、すなわち前養生過程が重要となるとわかった。

そこで、前養生の重要性の観点から、凝結始発時間に結合材の化学組成が及ぼす影響について検討すること、また前養生時間の短縮の観点から、前養生温度を20°C、30°Cおよび40°Cとした場合に、前養生温度がモルタルの硬化後の物性に及ぼす影響について検討することとした。

4. 前養生温度および結合材の化学組成がモルタルの強度

および細孔構造に及ぼす影響

4.1 凝結時間

前養生温度が異なる場合の凝結時間試験の結果を図-10に示す。結合材の種類によらず、前養生温度が高いほど凝結始発時間は直線的に短くなるのがわかる。

Eを基材とした混合セメントモルタルは、Nを基材とした混合セメントモルタルと比較すると、前養生温度が高いほど、前養生時間短縮の効果大きくなる傾向にある。すなわちEを基材とした混合セメントモルタルに対して前養生温度を高くすることは、前養生時間の短縮の観点では効果的であると考えられる。

養生温度20°Cにおける凝結始発時間とS.M.との関係を図-11に示す。

S.M.が減少すると凝結始発時間が遅くなる傾向がみられる。セメントの水和の誘導期における反応は、セメント粒子の表面に生成された水和物を通過する物質移動抵抗が反応の律速段階であるとすれば、水和物がセメント粒子表面に多く形成されるほど、物質移動抵抗は大きくなり反応速度は低下する。S.M.の小さい(酸基成分中のAl₂O₃やFe₂O₃の割合が多い)結合材が凝結遅延傾向にあることは、セメント粒子表面にエトリンサイトなどのアルミン酸カルシウム水和物をより多く生成しているためと考えられる。

4.2 圧縮強度

温度20°Cでの凝結始発時間と前養生温度20°Cの時の圧縮強度を基準にした圧縮強度比との関係を、材齢ごとに図-12および図-13に示す。凝結始発時間によらず概ね一定の割合で強度が低下していることがわかる。また、30°Cと40°Cでの圧縮強度比の違いは小さいが、凝結始発時間が長い結合材の場合は、40°Cの方が圧縮強度が高い。すなわち、凝結始発時間が遅い結合材に対して前養生温度を高くすることは、前養生時間の短縮の観点で効果的であると考えられる。

4.3 静弾性係数

温度20°Cでの凝結始発時間と、前養生温度20°Cの時の静弾性係数を基準にした静弾性係数比との関係を図-

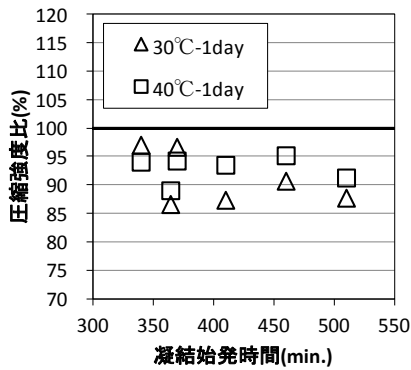


図-12 材齢 1日 圧縮強度比 (20°C基準)

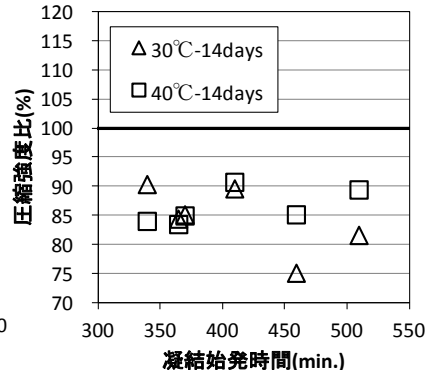


図-13 材齢 14日 圧縮強度比 (20°C基準)

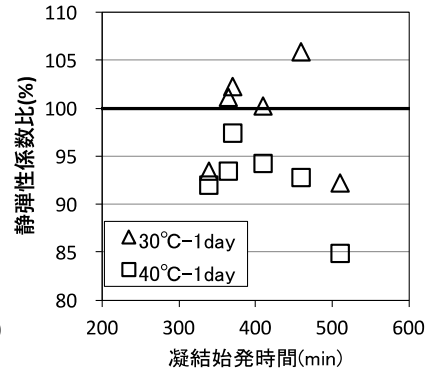


図-14 静弾性係数比 (20°C基準)

14に示す。凝結始発時間と静弾性係数比には明瞭な相関はないことがわかる。このことから、結合材の凝結特性が、前養生温度が異なるモルタルの硬化後の組織構造に及ぼす影響は小さいと考えられる。前養生温度 30°Cの場合は、概ね前養生温度 20°Cの時の静弾性係数と同程度となり、前養生温度 40°Cの場合は前養生温度 20°Cの時の静弾性係数より低下し、その低下率は概ね 10%程度であった。

5. まとめ

本研究では、有効な前養生を行うことを前提に、凝結時間および結合材の化学組成を結合材の凝結特性の指標として、温度履歴養生時の前養生温度、昇温速度、最高温度および降温速度が硬化後のモルタルに及ぼす影響について、圧縮強度および静弾性係数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) 貫入抵抗値が 3.5N/mm² となるまで前養生した場合、昇温速度 40°C/h 程度までであれば、モルタルの強度、静弾性係数および細孔径分布は 20°C/h で作製されたモルタルと同程度となった。

(2) 結合材の CaO/SiO₂ 比が低いと、最高温度がモルタルの圧縮強度、静弾性係数および細孔構造に及ぼす影響は大きくなる傾向にあり、特に CaO/SiO₂ 比が 1.5~2.0 程度以下の場合、最高温度を低くすることが有効となる。

(3) 前養生をしないで昇温速度を高めた場合や、前養生をしないで最高温度を高めた場合、顕著に圧縮強度が低下する。

(4) 徐冷による降温過程を行わない場合、モルタルの圧縮強度は 10%程度の低下傾向にあったが、ほとんど強度が低下しない結合材もあった。

(5) 凝結始発時間と結合材の化学組成との相関が確認されたため、必要な前養生時間を結合材の化学組成から簡易的に予測できる可能性が示唆された。

(6) 前養生温度が高いと、凝結時間に関わらず概ね 10~20%モルタルの圧縮強度が低下した。また、30°Cと

40°Cでの圧縮強度比の違いは小さいが、凝結時間が長い場合は 40°Cの方が圧縮強度が高い傾向となる。

謝辞

東京都コンクリート製品協同組合より研究全体に対する研究費の助成を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 村田哲, 上野敦, 大野健太郎, 宇治公隆: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.481-486, 2015
- 2) 佐藤健: セメントの諸比率・係数の工学的意味 (セメント化学雑論【8】), セメント・コンクリート No.402, pp.49-53, 1980.8
- 3) 川田尚哉, 根本明洋: カルシウムシリケートの初期の水和過程, セメント技術年報 XX, pp.68-74, 1966
- 4) 内川浩: 混合セメントの水和および構造形成に及ぼす混合材の効果<その2>, セメント・コンクリート No.484, pp.81-93, 1987
- 5) 丸山一平, 松下一郎, 野口貴文, 細川佳史, 山田一夫: エーライトおよびビーライトの水和反応速度に関する研究-ポルトランドセメントの水和機構に関する研究 その1-, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.650, pp.681-688, 2010
- 6) 多田真人, 上野敦, 大野健太郎, 宇治公隆: 結合材の種類および温度履歴養生時の前養生と昇温速度がモルタルの特性に及ぼす影響, 土木学会第 71 回年次学術講演会講演集, 第 V 部, pp.583-584, 2016.9
- 7) 多田真人, 上野敦, 大野健太郎, 宇治公隆: 結合材の化学組成および温度履歴養生時の最高温度がモルタルの特性に及ぼす影響, 土木学会第 72 回年次学術講演会講演集, 第 V 部, pp.761-762, 2017.9