

論文 初期高温履歴養生を受けた高強度モルタルの強度発現に関する研究

河上 浩司^{*1}・松田 拓^{*2}・西本 好克^{*3}

要旨：結合材として低熱ポルトランドセメントとシリカフュームを、細骨材として珪砂を使用して、材齢 91 日までに $140\sim 200\text{N/mm}^2$ 程度の強度が得られる高強度モルタルを練り混ぜ、供試体に 20°C 一定養生、最高温度と保持時間をパラメータにした初期高温履歴養生を与えて強度発現性状を確認した。その結果、水結合材比が小さいと、 20°C 一定養生よりも初期高温履歴を受けたほうが、得られる強度が高くなる傾向を確認した。また、温度履歴の条件によっては、材齢 3 日で非常に高い強度が得られるとともに以降の強度増加が小さく、早期の強度判定に用いることができる可能性があることを確認した。

キーワード：高強度モルタル、高温履歴養生、圧縮強度、早期判定

1. はじめに

近年、建築構造物に用いられる高強度コンクリートは、(社)日本建築学会による標準仕様書¹⁾や指針²⁾が対象とする設計基準強度(以下、 F_c)である 120N/mm^2 を超えて、 $F_c150\text{N/mm}^2$ までが実用化されている。このような高強度コンクリートは、ポルトランドセメントの一部をシリカフュームなどの混和材で置換して製造されるが、初期材齢で高温履歴を受けたときの強度発現性状は、強度域により異なることが報告されている。例えば、材齢 91 日までの圧縮強度をみると、 $F_c120\text{N/mm}^2$ 級以下では標準養生や 20°C 封かん養生の強度は初期高温履歴を受けたときの強度を上回るが、 $F_c150\text{N/mm}^2$ 級になると、逆に初期高温履歴を受けたほうが高強度となる^{3,4,5)}。

一般に、構造体コンクリート強度の管理は、ポテンシャル強度が得られる養生を基準にして行われ、 $F_c120\text{N/mm}^2$ 級までの高強度コンクリートでは標準養生を基準とすることが多い。しかし、初期高温履歴を受けたほうが高強度となる $F_c150\text{N/mm}^2$ 級では、必ずしも適当とはいえない。一方、簡易断熱や構造体を模擬した温度履歴を与える養生についても検討されており、構造体

コンクリート強度に近い強度が得られたという報告もある⁶⁾。ただし、これらの養生方法は、そのコンクリートが持つポテンシャル強度とは切り離されている。

そこで、初期の温度履歴が強度発現に与える影響とともに、ポテンシャル強度を得るための養生方法について検討することを目的に、 $140\sim 200\text{N/mm}^2$ 程度の強度が得られるモルタルに設定到達温度(以下、設定温度)と保持時間をパラメータとした温度履歴養生を与え、強度発現性状の検討を行った。

2. 実験概要

実験の要因と水準を表-1に示す。結合材は、低熱ポルトランドセメントとシリカフュームを組み合わせ、シリカフューム置換率は全結合材の内割り 10%とした。水結合材比は、結合材水比として 5.0, 6.0, 7.0 となる 3 水準を設定した。

使用材料を表-2に、モルタル調合を表-3に示す。細骨材は粒度の異なる 3 種類の珪砂を混合して粒度調整を行い使用した。モルタルの調合は単位水量を 220kg/m^3 に統一し、目標 0 打フロー値を $250\sim 300\text{mm}$ 程度、目標空気量を

*1 三井住友建設(株) 技術研究所 博士(工学)(正会員)

*2 三井住友建設(株) 技術研究所 修士(工学)(正会員)

*3 三井住友建設(株) 技術研究所 (正会員)

2.0%以下として、予備練りで化学混和剤の使用量と消泡剤の使用量を決定した。

実験の流れと、作業内容や試験項目を図-1に示す。練混ぜは、容量 50L の強制二軸練りミキサーを使用して行い、その順序は空練りの後に水と消泡剤を加えて練り混ぜ、最後に化学混和剤を添加した。全練混ぜ時間は、LSF20 と LSF16 では 330 秒とし、LSF14 では 510 秒とした。練り上がったモルタルは、振動を与えて巻込み空気を除去してからフレッシュ性状を確認し、供試体の作製を行った。なお、供試体はφ50×h100mm の円柱供試体で、全て封かん状態とした。

初期温度履歴は全てまとめて与え、材齢の基点は最終バッチの注水時刻とした。

初期温度履歴として設定した温度履歴の概略を図-2に示す。以下、温度履歴養生の種類は、設定温度と降下開始時間の組合せで示す。温度は、材齢 4 時間後から 2.86℃/h で上昇させ、設定温度は 40～80℃の間で 4 水準とした。設定温度の保持時間は 2 水準とし、材齢 24 時間後と 70 時間後から温度の降下が始まるようにした。実験時は、恒温恒湿槽で昇温させて所定の設定温度に到達した時点で保温器に移した。降温の時は、急激な温度低下を防止するため、簡易断熱

表-1 要因と水準

要因	水準
結合材種類	低熱ポルトランドセメント+シリカフューム
結合材水比	14.3%, 16.7%, 20.0% (結合材水比7.0, 6.0, 5.0)
養生	20℃封かん, 初期温度履歴養生(8パターン)
温度履歴 設定温度	40, 50, 60, 80℃
養生 温度降下	材齢28時間と70時間後
強度確認材齢	3, 7, 28, 91日 (一部、1日も実施)

表-2 使用材料

種類	名称	記号	諸物性
セメント	低熱ポルトランドセメント	L	密度 3.24g/cm ³ 比表面積 3280cm ² /g C ₂ S 56%
混和材	シリカフューム	SF	密度 2.20g/cm ³ 比表面積 22.0m ² /g SiO ₂ 97%
細骨材	珪砂(八草・陣屋混合)	S	密度 2.66g/cm ³ SiO ₂ 91.7~98.2% lg. loss 0.2%
化学混和剤	高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系

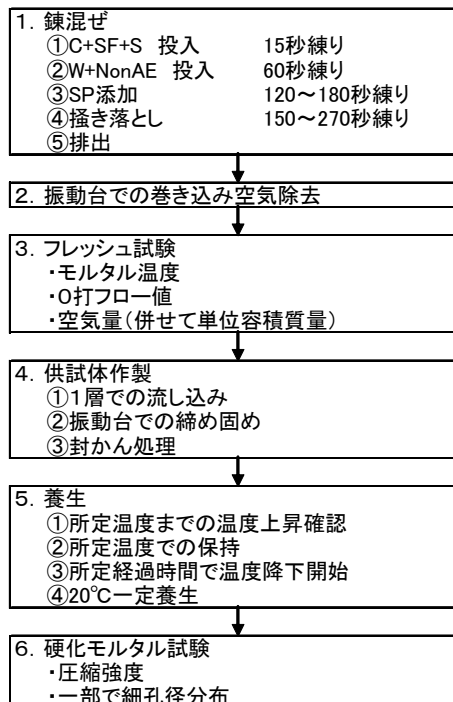


図-1 実験手順

表-3 モルタル調合

記号	W/B	目標空気量 (%)	単位量(kg/m ³)				SP (B×%)
			W	C	SF	S	
LSF20	20.0	2.0	220	990	110	1013	1.0
LSF16	16.7	2.0	220	1188	132	831	1.1
LSF14	14.3	2.0	220	1386	154	648	1.26

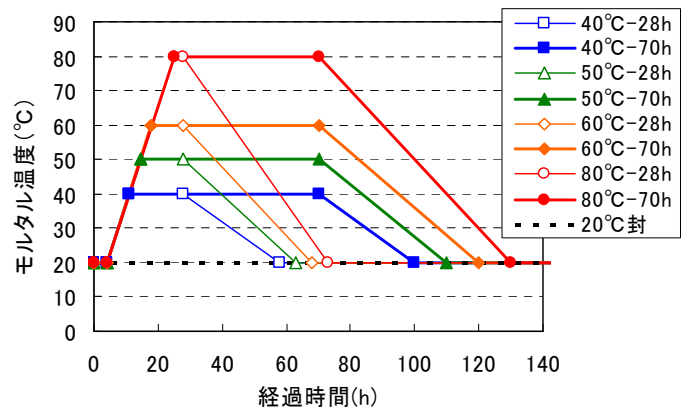


図-2 設定温度履歴

箱に入れて温度を下げ、その後は 20℃の養生室に存置した。なお、モルタルの温度は、温度履歴毎に熱電対を埋め込んだダミー供試体を用意して測定した。

圧縮強度の確認は材齢 3, 7, 28, 91 日を基本として、20℃封かん養生と温度履歴養生のうち設定温度を 40℃と 60℃にしたシリーズでは、材齢 1 日を追加している。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

フレッシュモルタルの試験結果を表-4に示す。0打フロー値は 260~320mm 程度、空気量は 1.1~1.5%となり、ほぼ目標とした性状が得られている。モルタル温度は、水結合材比の低下に伴い高くなるが、これはモルタルの粘性が増加することと練混ぜ時間が長くなることによる。

3.2 温度測定結果

ダミー供試体で測定した初期温度履歴の結果を図-3に示す。それぞれの設定温度に到達した時点で供試体を恒温恒湿槽より取り出していくため、一時的に温度が低下している。温度降下に関しては、いずれも養生室の室温 (20℃) まで降下するには 40 時間程度かかっており、急激な温度低下を防止できている。この結果より、概ね想定した温度履歴を与えることができたと判断した。

3.3 圧縮強度発現

圧縮強度試験結果を表-5に、調合別の強度発現性状を図-4に示す。いずれの水結合材比においても、80℃-70h では材齢 3 日までに非常に高い強度が得られ、それ以降の材齢 91 日までの強度増加はほとんどない。また、60℃-70h でも材齢 7 日までに高い強度に到達し、以降の強度増加は少ない。それ以外の温度履歴条件では、材齢 91 日まで圧縮強度は材齢に伴い増加していく。

(1) 保持時間の影響

同一設定温度における保持時間の影響をみると、保持時間を 70 時間までとしたほうが 28 時

間までより高強度となる傾向がある。その傾向は若材齢で特に顕著であるが、材齢 91 日では強度の差は小さくなる。

(2) 設定温度の影響

設定温度と圧縮強度との関係をみると、その傾向は調合や材齢により異なっている。いずれも、若材齢では設定温度が高いほど得られる強度も高い。材齢 91 日になると LSF20 では 20℃

表-4 フレッシュ性状

記号	0打フロー値 (mm)	空気量 (%)	温度 (℃)	密度 (kg/m ³)
LSF20	280×285	1.4	20.6℃	2376
LSF16	265×270	1.5	22.9℃	2403
LSF14	325×310	1.1	23.2℃	2444

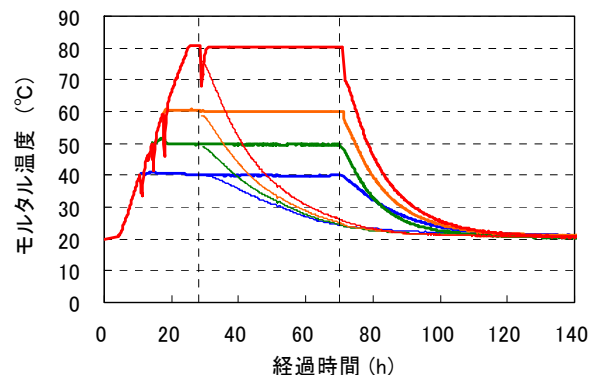


図-3 温度履歴

表-5 圧縮強度試験結果

記号	養生	材齢(日)				
		1	3	7	28	91
LSF20	20℃封かん	32.0	56.5	86.1	127	157
	40℃-28h	58.5	92.1	105	126	149
	40℃-70h	58.5	110	117	131	150
	50℃-28h	—	104	110	120	146
	50℃-70h	—	128	133	130	149
	60℃-28h	99.5	116	120	127	144
	60℃-70h	99.5	139	144	140	150
	80℃-28h	—	133	137	134	147
	80℃-70h	—	145	146	139	148
LSF16	20℃封かん	37.0	68.6	100	145	166
	40℃-28h	69.8	105	118	142	171
	40℃-70h	69.8	125	133	145	163
	50℃-28h	—	121	127	138	166
	50℃-70h	—	147	151	157	169
	60℃-28h	112	135	142	149	168
	60℃-70h	112	163	167	163	178
	80℃-28h	—	153	155	156	168
	80℃-70h	—	167	167	166	169
LSF14	20℃封かん	43.7	83.8	116	156	191
	40℃-28h	88.5	129	141	165	194
	40℃-70h	88.5	149	156	169	197
	50℃-28h	—	146	151	165	193
	50℃-70h	—	171	176	182	197
	60℃-28h	141	159	166	173	197
	60℃-70h	141	180	192	187	197
	80℃-28h	—	179	181	182	197
	80℃-70h	—	206	196	190	202

封かん養生の強度が最も高く、40～80℃の範囲では設定温度や保持時間に関わらずほぼ同強度になっている。LSF16では最高温度との関係は明確とはいえないが、初期温度履歴を受けた供試体の強度は20℃封かんと同等か若干高い傾向がある。なお、最も高い強度が得られたのは60℃-70hであった。LSF14では、初期温度履歴養生を受けた全ての供試体の強度が20℃封かん養生の強度を上回っている。特に80℃-70hでは200N/mm²を超える非常に高い強度が得られている。

(3) 有効材齢による評価

ダミー供試体で実測した温度測定結果より、圧縮強度確認材齢における各温度履歴養生の有

効材齢⁷⁾を式(1)によって算出した。

$$t_T = \sum_{i=0}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0} \right] \quad (1)$$

ここに、 t_T ：有効材齢（日）

Δt_i ：コンクリート温度が T （℃）の期間（日）

$T(\Delta t_i)$ ：期間 Δt_i のコンクリート温度（℃）

T_0 ：定数（=1℃）

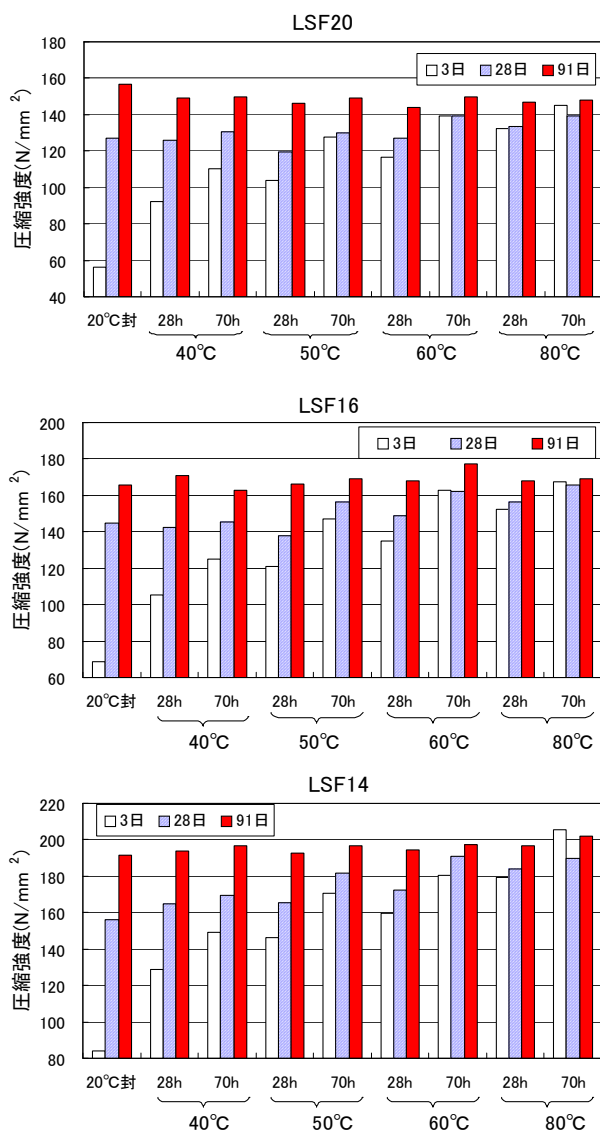
各養生方法の有効材齢の一覧を表－6に示す。有効材齢は、初期温度履歴を与えている範囲である、130時間程度までの温度履歴により左右される。その中でも80℃-70hは、実材齢3日でも有効材齢は23日になるなど特に大きい。

圧縮強度発現性状を有効材齢で評価した結果を図－5に示す。圧縮強度の発現性状は、同一の有効材齢でも到達温度や保持時間により異なり、例えばLSF14をみると、有効材齢10日前後では50N/mm²程度の差が生じている。若材齢における強度は、設定温度が60℃以上になると特に高強度となる傾向がある。

有効材齢で評価しても若材齢における強度に差が生じる原因として、対象としている強度域が非常に高いこと、温度履歴が低熱ポルトランドセメントの活性度に与える影響は普通ポルトランドセメントとは異なること⁸⁾、シリカフェュームの活性度に与える温度の影響⁴⁾が明らかになっていないことなどが考えられる。

3.4 早期判定を行うための養生方法

早期判定を行うための養生方法を検討するにあたり、温度履歴によらず材齢91日で得られる強度を目安にLSF20では140N/mm²以上、



図－4 圧縮強度発現

表－6 有効材齢

記号	養生	材齢(日)				
		1	3	7	28	91
有効材齢 (日)	20℃封かん	1.0	3.0	7.0	28.0	91.0
	40℃-28h	2.0	5.5	9.9	30.9	93.9
	40℃-70h	2.0	7.8	11.6	32.6	95.6
	50℃-28h	—	6.7	10.9	31.9	94.9
	50℃-70h	—	9.5	14.3	35.3	98.3
	60℃-28h	3.0	8.1	12.3	33.3	96.3
	60℃-70h	3.0	13.3	18.7	39.7	102.7
	80℃-28h	—	11.0	15.3	36.3	99.3
	80℃-70h	—	23.4	29.9	50.9	113.9

LSF16では 165N/mm^2 以上、LSF14では 190N/mm^2 以上という強度を指標として判断を行った。比較的早い材齢で該当強度が得られるのは、 60°C -70hと 80°C -70hであり、 60°C -70hでは材齢7日で、 80°C -70hでは材齢3日で水結合材比ごとの該当強度に到達する。これらの養生方法は、低熱ポルトランドセメントとシリカフュームを用いた結合材でコンクリートを製造したときの、得られる強度の判定に使用できる可能性がある。

また、今回の結果において、材齢91日の時点で最高強度が得られた養生方法を、ポテンシャル強度を得るための養生方法と仮定すると、LSF20では高温履歴を受けていない 20°C 封かん養生といえるが、LSF16やLSF14では、 60°C -70hや 80°C -70hがポテンシャル強度を得るための養生と考えられる。

3.5 細孔径分布による検証

前節において、早期判定を行うための温度履歴と材齢について圧縮強度より検討を行ったが、内部組織の生成状況による検証も必要と考えられる。そこで、一部の養生方法の代表的な材齢において細孔径の分布状況を確認した。分析にあたり、所定の材齢でアセトンに浸せきして水和を停止させた後D-乾燥を行い、恒量になった試料を用いて水銀圧入式ポロシメータにより計測した⁷⁾。なお、測定範囲は平均直径 $0.0043\sim 250\mu\text{m}$ の範囲である。

細孔径分布の例として、LSF16の測定結果を図-6示す。なお、グラフには既報⁵⁾の発表デー

タも含まれている。細孔径の分布状況について 20°C 封かん養生をみると材齢7日では $0.015\mu\text{m}$ 付近にピークがあるが、材齢28日までにピークは消失し材齢91日ではほとんど $0.010\mu\text{m}$ 未満の細孔となる。 20°C 封かん養生では、材齢に伴い緻密化が進行しているといえる。 40°C -70hを

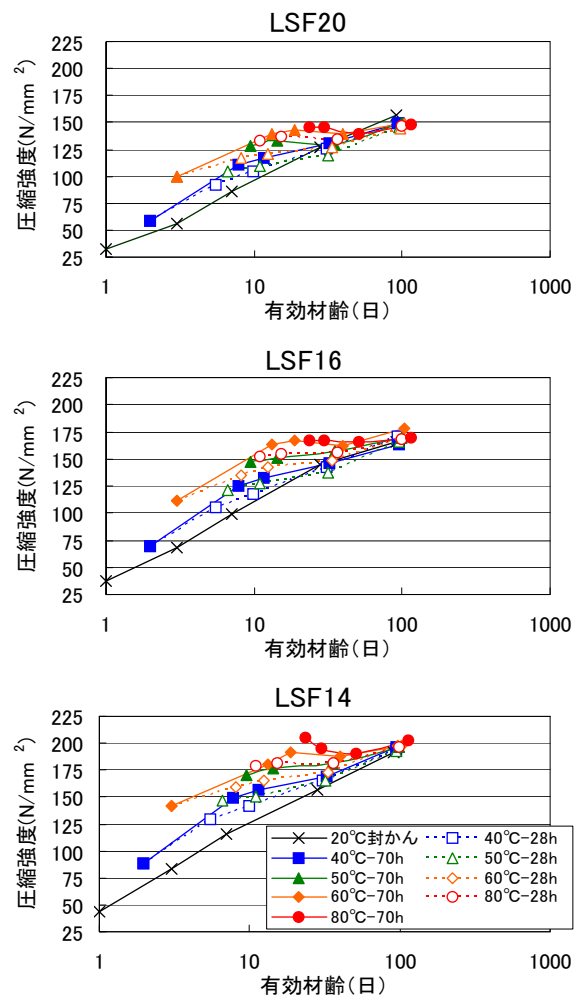


図-5 有効材齢と圧縮強度

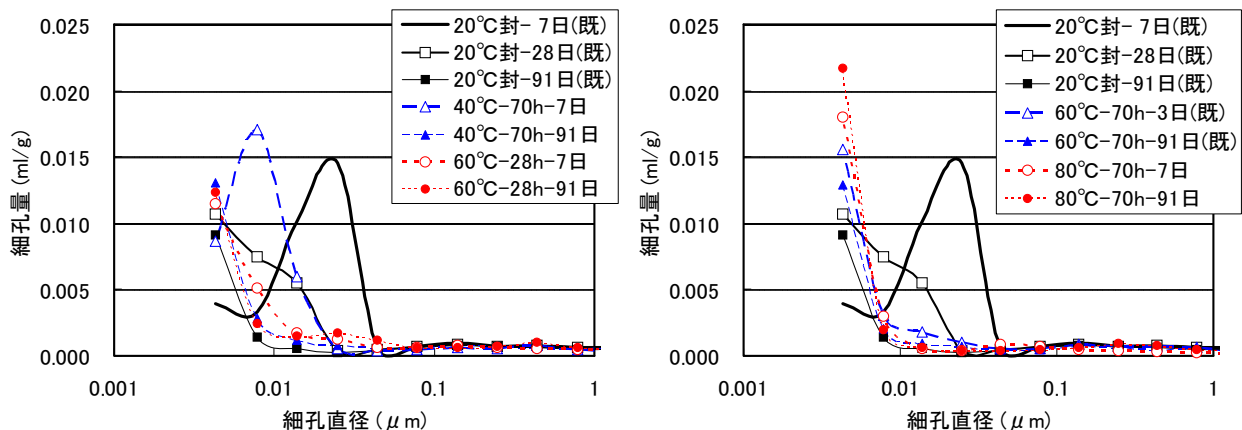


図-6 LSF16の細孔径分布(既発表データ⁵⁾は(既)と表記)

みると、材齢 7 日ではやや径が小さい $0.010\mu\text{m}$ 付近にピークがみられる。また、 $60^{\circ}\text{C}-28\text{h}$ をみると材齢 7 日の時点でピークはないが、 $0.010\mu\text{m}$ 程度の細孔も多少存在している。しかし、 $40^{\circ}\text{C}-60\text{h}$ と $60^{\circ}\text{C}-28\text{h}$ のいずれも、材齢 91 日では細孔径はほとんど $0.010\mu\text{m}$ 未満となり、 20°C 封かん材齢 91 日と同様の分布となっている。一方、 $60^{\circ}\text{C}-70\text{h}$ をみると、材齢 3 日の時点で細孔径の分布状況は 20°C 封かん養生の材齢 91 日とほとんど変わらない。 $80^{\circ}\text{C}-70\text{h}$ では材齢 3 日の測定は行っていないが、材齢 7 日の時点で非常に緻密化していること、 $60^{\circ}\text{C}-70\text{h}$ は材齢 3 日ですでに緻密であることを考えると、材齢 3 日で 20°C 封かん養生の材齢 91 日と同程度まで緻密化していると推察される。細孔径分布の確認結果からも、 $60^{\circ}\text{C}-70\text{h}$ や $80^{\circ}\text{C}-70\text{h}$ は若材齢で緻密化が相当すすんでいることが明らかであり、早期判定への適用が可能と考えられる。

4. まとめ

水結合材比 20%以下の高強度モルタルについて、初期の温度履歴条件と材齢 91 日までの強度発現との関係として以下の知見が得られた。

1. 20°C から 80°C の設定温度では、若材齢においては温度が高いほど得られる強度は高い。一方、材齢 91 日になると温度の影響は小さくなる。
2. 高温履歴の保持時間を 24 時間までと 70 時間までとした場合では、70 時間までのほうが得られる強度は高い。
3. ポテンシャルに近い強度を得るための養生として、LSF20 では 20°C 封かん、LSF16 や LSF14 では $60^{\circ}\text{C}-70\text{h}$ や $80^{\circ}\text{C}-70\text{h}$ が適当といえる。
4. 60°C を材齢 70 時間まで保持した場合は材齢 7 日で、 80°C を 70 時間後まで保持した場合は材齢 3 日で非常に高い強度が得られており、強度の早期判定に使用できる可能性がある。

5. 初期高温履歴を受けた高強度モルタルは、細孔径分布の観点からも若材齢で非常に緻密化していることが確認された。

本研究は、モルタルを対象に限られた温度条件下での強度発現を検討したものである。今後はコンクリートへの適用を目指し、更なるデータ収集を行い、検討を続ける所存である。

謝辞 本実験にあたり、(株)中研コンサルタント、住友大阪セメント(株)の各位にご協力いただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5, 2003
- 2) 日本建築学会：高強度コンクリート施工指針(案)・同解説, 2005.2
- 3) 陣内 浩ほか：設計基準強度 150N/mm^2 クラスの高強度コンクリートによる実大 RC 柱の施工性と構造体強度発現性状の検討, 日本建築学会技術報告集, 第 17 号, pp.1-5, 2003.6
- 4) 菅俣 匠ほか：セメントーシリカフェーム系結合材の水和反応と強度発現性の関係に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1287-1292, 2004.7
- 5) 河上浩司ほか：高強度コンクリートの圧縮強度発現と微細構造に関する実験研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1317-1322, 2005.6
- 6) 藤井和俊ほか：高強度コンクリートの簡易断熱養生方法に関する一考察, 日本建築学会技術報告集, 第 17 号, pp.11-14, 2003.6
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書[構造的能照査編], pp.30-31, 2002
- 8) 伊藤憲雄ほか：養生過程で温度履歴を受けたコンクリートの活性化エネルギーと有効材齢, コンクリート工学論文集, Vol.15, No.1, pp.103-112, 2004.1