低熱ポルトランドセメントとシリカフュームを併用した結合材モルタルの 圧縮強度と内部組織に関する研究

STUDY ON COMPRESSIVE STRENGTH AND INTERNAL ORGANIZATION WITH BINDER USING LOW-HEAT PORTLAND CEMENT AND SILICA FUME

河上 浩 司*, 西本 好 克**, 梶田 佳 寛***

Hiroshi KAWAKAMI, Yoshikatsu NISHIMOTO and Yoshihiro MASUDA

The compressive strength and internal organization of the heat curing test piece and 20℃ seal curing test piece that made with the high strength mortar using the low heat portland cement and silica fume were confirmed.

As a result, the compressive strength of the heat curing test piece at three days is almost equal to that of the 20℃ seal curing at 91 days.

As a result of an internal analysis, the pore size distribution curve and the amount of the calcium hydroxide of the heat curing test piece at three days was almost equal to that of 20℃ seal curing at 91 days.

Keywords : High-strength mortar, Silica fume, Strength development, Temperature career, Microstructure

高強度モルタル, シリカフューム, 強度発現, 温度履歴, 微細構造

1. はじめに

近年、圧縮強度が150N/mm²におよぶ高強度コンクリートの強度発現に関する研究が盛んに行われている。それらの中で、低熱ポルトランドセメントとシリカフュームを結合材とした水結合材比20%以下の高強度コンクリートにおいて、最高温度が60℃程度まで上昇する初期高温履歴を受けた供試体や構造体のコンクリート強度は、若材齢から材齢91日程度までにわたり、標準養生供試体や20℃封かん養生供試体より高強度となりうる事が報告されている^{1),2),3),4)}。しかしながら、これらの多くは確認された温度履歴や強度発現の報告にとどまっておき、コンクリートの内部組織等を確認することで、高強度化に対して何らかの理由付けを行っている報告^{5),6),7)}はまだ少ない状況にある。

本研究は、2種類の結合材を用いて高強度モルタルを練り混ぜ、主に20℃封かん養生供試体と初期高温履歴を受けた供試体を対象に強度発現の確認とモルタルのマトリクス部分の分析を行い、初期高温履歴によって高強度化する現象について、生成物や微細構造の観点から検討を行ったものである。

2. 実験

本実験では供試体をモルタルで作製したが、その理由は以下に記すとおりである。コンクリートは本来複合材料であるが、本実験ではマトリクス部分の分析を行うため混合する材料種類

は少ない方がよく、セメントペーストを用いるのが最良と考えられた。しかし、セメントペーストでは骨材との界面が無い場合、供試体の破壊性状がコンクリートと大きく異なると考えられ、ペースト強度とコンクリート強度とは必ずしも対応しなくなる可能性がある。以上の理由から、本実験はモルタルによって試験を行うこととし、供試体は直径50mm、高さ100mmの円柱供試体とした。

2.1 要因と水準

本実験における要因とその水準を表-1に示す。結合材種類は、低熱ポルトランドセメント単独(記号:L)と、低熱ポルトランドセメントとシリカフュームを併用したもの(LSF)の2種類とした。水結合材比は、低熱ポルトランドセメント単独の場合は3水準、シリカフュームを併用する場合は5水準とした。供試体の養生方法は標準養生、20℃封かん養生そして最高温度を60℃とする加熱養生の3通りとした。内部組織や構造の分析は一部の調査に対して行い、その内容は4項目である。

2.2 温度履歴

加熱養生として設定した温度履歴を図-1に示す。温度履歴は、恒温恒湿槽を使用して与え、4時間の前養生の後に設定した最高温度である60℃には18時間後に到達するように約3℃/hで上昇させた。材齢70時間後に恒温槽から取り出し、20℃の養生室内に用意した簡易断熱箱(厚さ100mmの発泡スチロー

* 三井住友建設技術研究所 工修

** 三井住友建設技術研究所

*** 宇都宮大学工学部建設学科 教授・工博

Sumitomo Mitsui Construction Co., Ltd., M. Eng.

Sumitomo Mitsui Construction Co., Ltd.

Prof., Dept. of Architecture and Civil Eng., Faculty of Eng., Utsunomiya Univ., Dr. Eng.

ルで作製した箱)に移して20℃まで緩やかに降下させ、その後は20℃一定で所定材齢まで存置した。温度履歴は、熱電対を埋め込んだダミー供試体を作製して測定を行った。

2.3 使用材料

使用材料を表-2に示す。使用する細骨材は、吸水率の低さや化学成分を含む品質の安定性という点から、十分な強度が得られることを予備試験により確認したうえで珪砂を選出し、粒度の異なる3種類を混合して粒度分布を調整し実験に使用した。化学混和剤は、シリカフュームを混入しない場合は高性能AE減水剤を使用し、混入する場合は超高強度コンクリート用の高性能減水剤を使用した。

2.4 調合

モルタルの調合を表-3に示す。調合は、使用材料の単位量とともに全結合材質量を1.0としたときの質量比を併せて示している。モルタルの調合は、それぞれの水結合材比に対応する一般的なコンクリートの調合から粗骨材を抜き出した値を考慮して決定した。

2.5 練混ぜと供試体製作

モルタルの練混ぜは、容量50Lの強制パン型ミキサを使用して練り混ぜた。練混ぜ順序は、水以外の材料を投入して空練りを15秒行い、水結合材比が25%以上の調合は水と混和剤を一括投入して120～300秒間練り混ぜた。水結合材比が20%以下の調合は水と混和剤を分割投入とし、水を投入して60秒後に混和剤を投入して300～540秒間練り混ぜた。

水結合材比の小さいモルタルでは、巻き込みエアが多かったが粘性が極端に高く、多少の振動を加えても分離の可能性は無いと判断されたので、モルタルの入った練り盤ごとテーブルバイブレーターで振動させ、巻き込みエアを排除した後に供試体の作製を行った。

2.6 分析内容

内部組織の分析⁹⁾はL30とLSF16の一部に対して実施した。今回実施した分析の項目は、質量含水率、結合水量、水酸化カルシウム量そして細孔径分布である。分析用の供試体は専用とし、圧縮試験供試体と同時に採取し同一の養生を行った。

(1) 前処理

分析を行うにあたり、前処理として試料モルタルをジョークラッシャーで粗粉碎し5.0mmふるいを全量通過させた。ここから2.5mm以上の大きさの粒を20g程度採取し、細孔径分布測定に使用した。残った試料を使用して質量含水率、結合水量及び水酸化カルシウム量の測定を行った。

(2) 質量含水率

質量含水率の算出は、圧縮試験終了後の供試体片を乾燥炉にて105℃で恒量になるまで乾燥させ、乾燥前後の質量差から算出する方法と、分析用のモルタル供試体を破砕した破砕片を20g程度を分取し105℃で3時間乾燥させ、乾燥前後の質量変化から算出する方法の2通りで行った。

図-1 設定した温度履歴

表-1 要因と水準

要因	水準
結合材種類と水結合材比	低熱ポルトランドセメント (L) : 36.7, 28.1, 25.0%
	低熱ポルトランドセメント+シリカフューム (LSF) : 30.0, 25.0, 20.0, 16.7, 14.3%
養生と試験材齢	標準養生 : 28, 91日
	20℃封かん養生 : 3, 7, 28, 91日
	60℃加熱70時間まで(封かん) : 3, 7, 28, 91日
内部組織分析項目	自由水量 (質量含水率)
	結合水量
	水酸化カルシウム量
	細孔径分布

表-2 使用材料

種類	名称	諸物性		記号
セメント	低熱ポルトランドセメント	密度 3.24g/cm ³	比表面積 3280cm ² /g C ₂ S 56%	L
混和材	シリカフューム	密度 2.2g/cm ³	比表面積 22.0m ² /g SiO ₂ 97%	SF
細骨材	珪砂3号(八草産)	真密度 2.66g/cm ³	SiO ₂ 99.6% Ig. loss 0.2%	S1
	珪砂4号(八草産)	真密度 2.66g/cm ³	SiO ₂ 98.2% Ig. loss 0.2%	S2
	珪砂7号(陣屋産)	真密度 2.65g/cm ³	SiO ₂ 91.7%	S3
混和剤	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系		SP1
	超高強度コンクリート用高性能減水剤	ポリカルボン酸系		SP2

表-3 モルタル調合

記号	W/B	単位量(kg/m ³)				SP	単位量(結合材量に対する比)			
		W	C	SF	S		W	C	SF	S
LSF30	30.0%	224	673	75	1348	1.4	0.300	0.9	0.1	1.80
LSF25	25.0%	226	812	90	1231	1.6	0.250	0.9	0.1	1.36
LSF20	20.0%	226	1016	113	1044	1.8	0.200	0.9	0.1	0.93
LSF16	16.7%	224	1208	134	849	2.0	0.167	0.9	0.1	0.63
LSF14	14.3%	223	1405	156	660	2.2	0.143	0.9	0.1	0.42
L40	36.7%	222	606	0	1417	0.9	0.367	1.0	0.0	2.34
L30	28.1%	230	817	0	1330	1.1	0.281	1.0	0.0	1.63
L25	25.0%	239	954	0	1168	1.2	0.250	1.0	0.0	1.22

SはS1 : S2 : S3=2 : 2 : 1で混合

(3) 結合水量

結合水量の測定は、アセトンに1時間浸せきして水和を停止させた後に105℃で3時間乾燥させた試料を用いた。なお、結合水量は以下の手法により算定を行った。

- ①試料の600℃の強熱減量を日本コンクリート工学協会「コンクリートの試験・分析マニュアル」⁹⁾に準拠して測定する。
- ②使用材料もそれぞれの600℃強熱減量を測定する。
- ③各材料の強熱減量と試料中での各材料の混合割合から、各材料に起因する強熱減量を算出する。(1)式により各材料の強熱減量を試料の強熱減量から差し引き、残りを結合水量とする。
- ④練混ぜ時の調合及び含水量から、単位結合材量に対する結合水の割合(結合水結合材比)を(2)式を用いて算出する。

$$WT = L \times (1 - DH/100) - (CL \times CM + SL \times SM + SFL \times SFM) / 100 \quad \cdots (1)$$

$$WT/B = WT / (CM + SFM) \times 100 \quad \cdots (2)$$

ここに、WT：結合水量(%)

WT/B：結合水結合材比(%)

L：600℃強熱減量(%)

DH：質量含水率(%)

CL：セメントの600℃の強熱減量(%)

SL：細骨材の600℃の強熱減量(%)

SFL：シリカフュームの600℃の強熱減量(%)

CM：調合によるモルタル中のセメントの質量百分率(%)

SM：調合によるモルタル中の細骨材の質量百分率(%)

SFM：調合によるモルタル中のシリカフュームの質量百分率(%)

(4) 細孔径分布

細孔径分布の測定は、試料をアセトンに1時間浸せきして水和を停止させた後、D-乾燥で恒量になるまで乾燥させた試料を用

いた。細孔径分布は水銀圧入式ポロシメータを用い、平均細孔直径約0.003～78.1 μmの範囲における圧力とそのときの圧入量(ml/g)を計測した。

(5) 水酸化カルシウム

水酸化カルシウムの測定は、試料20～30mg程度を用いて熱重量-示差熱分析(TG-DTA)を行い、450℃付近の吸熱ピークから水酸化カルシウム生成量を測定し、結合材量に対する生成率を求めた。

3. 実験結果

3.1 フレッシュモルタル

フレッシュモルタルの試験結果を表-4に示す。フレッシュ試験は、圧縮強度と微細構造への影響が特に大きいと考えられる空気量と単位容積質量の確認を行った。L40の空気量は他より相当大きい、L40は粘性が低くテーブルパイププレートによる巻き込みエアの除去を行わなかったことによる。流動性については目視による確認としたが、練混ぜたモルタルはいずれも十分な流動性が確保できていた。LSF16についてフロー値を確認したところ、フロー値は250mmであった。

3.2 温度履歴

ダミー供試体で測定した温度履歴を図-2に示す。設定温度である60℃に到達した後は速やかに設定温度が維持され、温度降下時も急激な温度低下が抑制されていることから、図-1に示した設定温度履歴に近い温度履歴を与えることができた。

3.3 圧縮強度

圧縮試験の結果を表-5に、20℃封かん養生と加熱養生を行ったときの結合材水比と圧縮強度との関係を図-3に示す。LSFの20℃封かん養生では結合材水比7.0で頭打ちの傾向がみられたので、回帰線は結合材水比6.0以下の範囲で算出した。

表-4 フレッシュ試験結果

	空気量 (%)	単位容積質量 (t/m ³)	モルタル温度 (℃)
LSF30	2.7	2.330	21.0
LSF25	2.0	2.381	21.0
LSF20	1.7	2.411	22.0
LSF16	2.3	2.439	23.0
LSF14	2.4	2.442	25.0
L40	5.8	2.258	19.0
L30	1.8	2.381	21.0
L25	2.8	2.405	22.0

図-2 加熱供試体の温度履歴

表-5 圧縮強度

調合 記号	養生	圧縮強度(N/mm ²)			
		3日	7日	28日	91日
LSF30	標準養生	-	-	90.0	102
	20℃一定	44.8	65.6	92.7	111
	60℃加熱	97.3	92.9	99.5	99.9
LSF25	標準養生	-	-	121	128
	20℃一定	65.8	87.5	123	125
	60℃加熱	119	121	124	131
LSF20	標準養生	-	-	146	147
	20℃一定	86.0	110	133	153
	60℃加熱	139	142	141	151
LSF16	標準養生	-	-	159	164
	20℃一定	103	125	154	178
	60℃加熱	163	157	156	172
LSF14	標準養生	-	-	160	182
	20℃一定	113	132	172	181
	60℃加熱	179	185	185	187
L40	標準養生	-	-	66.2	96.8
	20℃一定	27.8	43.8	67.1	90.1
	60℃加熱	65.2	73.4	73.4	91.4
L30	標準養生	-	-	95.7	113
	20℃一定	50.8	67.2	87.0	109
	60℃加熱	93.7	96.0	94.2	112
L25	標準養生	-	-	117	127
	20℃一定	63.9	81.8	106	122
	60℃加熱	99.1	109	107	120

20℃封かん養生では、どちらの結合材とも材齢に伴い強度が増加していくが、加熱養生では、材齢3日の時点での強度発現が著しくなる反面その後の強度増加量は小さく、LSFで強度停滞の傾向が顕著にみられた。

材齢28日と91日における標準養生強度と20℃封かん養生強度との関係を図-4に示す。回帰線を見ると、低熱ポルトランドセメント単独の場合は、標準養生強度は20℃封かん養生強度よりも7%程度高くなる傾向があるが、シリカフュームを併用した場合はどちらの養生の強度もほぼ一致した。

細孔径分布の測定を行ったL30とLSF16の強度発現を図-5に示す。L30とLSF16ともに、加熱養生の強度発現は若材齢で大きく、その傾向はLSF16でより顕著であった。また、その後もある程度の強度増加があるため、材齢91日でもL30とLSF16ともに20℃封かん養生強度と同等となった。

3.4 質量含水率

質量含水率の測定結果を測定方法別に表-6に示す。また、それぞれの方法による測定値の比較結果を図-6に示す。圧縮試験供試体片と破砕片による測定結果はほぼ1:1であり、圧縮試験供試体片による測定結果は妥当な値であると判断された。次に、圧縮試験供試体片で測定した質量含水率の経時変化の例を図-7に示す。なお、材齢0日の質量含水率とは、単位水量と骨材中の水分量の和をフレッシュモルタル単位容積質量で除した値で、低熱ポルトランドセメント単独でもLSFでも10.0%前後であった。

全体的に、質量含水率は水結合材比の低下に伴い小さくな

図-4 標準養生強度と20℃封かん養生強度

図-5 圧縮強度発現

る。養生と質量含水率の関係について検討すると、LSF30～LSF20と低熱ポルトランドセメントでは、標準養生の質量含水率はその他の養生の質量含水率より高い。シリカフュームを併用したLSFでも、比較的水結合材比の大きい調合では外部からの水が浸透していると考えられる。しかし、LSF16やLSF14では、標準養生の質量含水率は他の養生の質量含水率と大きな違いはなく、若材齢から組織が緻密化するために水が浸透しにくいと考えられる。

次に、質量含水率と圧縮強度発現について検討する。低熱

(a) LSF

(b) 低熱ポルトランドセメント

図-3 結合材水比と圧縮強度

表-6 質量含水率

記号	養生	圧縮試験片による含水率(%)				微細片による含水率(%)			
		3日	7日	28日	91日	3日	7日	28日	91日
LSF30	標準養生	-	-	7.93	7.83	-	-	-	-
	20℃一定	7.32	6.82	6.89	6.89	-	6.49	-	7.24
	60℃加熱	7.40	7.38	7.29	7.36	6.27	6.24	-	7.73
LSF25	標準養生	-	-	7.39	7.40	-	-	-	-
	20℃一定	6.78	6.41	6.52	6.54	-	5.78	6.84	7.08
	60℃加熱	7.14	6.86	6.91	7.17	6.11	6.12	-	7.38
LSF20	標準養生	-	-	6.94	7.07	-	-	-	-
	20℃一定	6.00	5.91	6.29	6.20	-	-	-	-
	60℃加熱	6.32	6.45	6.31	6.53	-	-	-	-
LSF16	標準養生	-	-	5.73	6.13	-	-	-	7.23
	20℃一定	5.74	5.52	5.39	5.55	-	5.51	6.27	6.47
	60℃加熱	5.30	5.62	5.57	5.84	5.39	5.07	-	6.58
LSF14	標準養生	-	-	4.65	5.51	-	-	-	-
	20℃一定	5.15	5.51	5.22	5.46	-	-	-	-
	60℃加熱	4.86	4.90	4.75	4.88	-	-	-	-
L40	標準養生	-	-	7.04	6.95	-	-	-	-
	20℃一定	6.90	6.66	6.34	5.99	-	-	-	-
	60℃加熱	5.92	5.96	5.80	5.76	-	-	-	-
L30	標準養生	-	-	6.67	6.53	-	-	-	-
	20℃一定	6.27	6.17	5.80	5.55	-	6.45	5.86	5.95
	60℃加熱	5.64	5.53	5.64	5.32	5.47	5.79	-	5.85
L25	標準養生	-	-	6.76	6.55	-	-	-	-
	20℃一定	6.48	6.11	6.00	5.74	-	6.61	-	6.07
	60℃加熱	5.77	5.58	5.70	5.73	5.78	5.75	-	5.92

ポルトランドセメントでは、20℃封かん養生の質量含水率は材齢3日の時点では加熱供試体の質量含水率より相当大きいですが、材齢28日や91日になると加熱供試体に近づいた。自由水を緩やかに消費しながら水和が進行して、圧縮強度が加熱供試体に追いついていったと推察される。

一方、LSFでは、標準養生と20℃封かん養生とで質量含水率の差の有無に係わらず、圧縮強度が等しくなる傾向がある。セメント単独の場合に比べ、シリカフュームを混入すると極端に緻密化し水の浸透が妨げられるだけでなく、未水和セメントや未反応シリカフュームと自由水の接点がなくなっていくことなどが原因として考えられる。また、LSFでは、加熱供試体の質量含水率は20℃封かん養生より高いことから水の消費が少ないと推測されるにも係わらず、より高い強度が発現している場合がある。

3.5 結合水量

試料を600℃で加熱したときの強熱減量から算出した結合水量を、単位結合材量で除した結合水結合材比を表-7に示す。結合水結合材比は、調合上の水結合材比が低下すると若干低下する。また、結合水結合材比と材齢との関係をみると、低熱ポルトランドセメントでは、材齢に伴い結合水結合材比が増加していく傾向がある。一方、LSFでは材齢と共に結合水量が単純に増加するという結果は得られず、質量含水率の結果と同様の結果となった。シリカフュームを混入したときに、結合水量の増加と圧縮強度の増加の対応がとれない原因として、シリカフュームのポゾラン反応は(3)式に示すように、

…(3)

ここに、CH：水酸化カルシウム

H：水

C-S-H：カルシウムシリケート

水酸化カルシウム中に存在する水分(OH)も消費して反応が進むため、水の消費が少ないことが考えられる。

3.6 水酸化カルシウム量

セメントの水和反応に伴い水酸化カルシウムは生成され、シリカフュームのボゾラン反応に伴い水酸化カルシウムは消費される。すなわち、水酸化カルシウム量の変化は、セメントの水和反応の進行程度やシリカフュームのボゾラン反応の進行程度を測る目安の一つになると考えられる。

単位結合材量に対する水酸化カルシウム量の測定結果を、

図-6 測定法による差異

表-7 結合水結合材比

記号	養生	結合水結合材比(%)			
		3日	7日	28日	91日
LSF30	標準養生	-	-	-	-
	20℃一定	-	6.34	-	7.23
	60℃加熱	6.44	6.04	-	5.87
LSF25	標準養生	-	-	-	-
	20℃一定	-	5.86	6.98	6.69
	60℃加熱	6.16	6.21	-	5.6
LSF16	標準養生	-	-	-	4.95
	20℃一定	-	4.95	5.08	4.64
	60℃加熱	5.17	5.17	-	4.52
L30	標準養生	-	-	-	-
	20℃一定	-	7.18	9.45	9.38
	60℃加熱	9.24	9.32	-	10.2
L25	標準養生	-	-	-	-
	20℃一定	-	7.04	-	8.87
	60℃加熱	8.90	9.02	-	9.14

図-7 質量含水率変化

図-8 水酸化カルシウム量の変化

図-8に示す。L30の水酸化カルシウム量は、20℃封かん養生では材齢に伴い増加し水和の進行がうかがえる。加熱養生の水酸化カルシウム量は、材齢3日では20℃封かん養生より高いが長期材齢ではほとんど増加しない。初期高温履歴により初期強度が増加し、長期強度が停滞することと対応している。

LSF25とLSF16の水酸化カルシウム量をみると、20℃封かん養生では材齢7日以降徐々に減少し、材齢91日ではLSF25とLSF16のどちらもほぼ0%となることから、ポゾラン反応が緩やかに進行したと判断できる。一方、加熱養生では材齢3日で0%となり、その後も0%のまま変化しない。高温履歴によりセメントだけでなくシリカフェームの反応も急激に進行し、セメントの水和によって生成した水酸化カルシウムをすぐさま消費したと考えられる。

3.7 細孔径分布

細孔径分布の測定結果を図-9に、累積細孔量の分布を図-10に示す。累積細孔量とは、その径から78.1 μm までの細孔量の総和で、例えば、直径0.01 μm における累積細孔量は0.01～78.1 μm の範囲の細孔量の総和である。細孔径分布をみると、L30では0.015 μm 近辺に分布のピークがある。材齢の経過に伴い、細孔量のピークは若干小径側に移動するが、細孔量自体の減少がより顕著である。圧縮強度と細孔径分布を比較すると、加熱養生の材齢7日と20℃封かん養生の材齢28日では、圧縮強度が等しいだけでなく細孔量と累積細孔量の分布も非常に類似している。同一の調合であれば圧縮強度と細孔径分布とが良好な対応を示すと推察される。

LSF16では、加熱養生すると材齢3日の時点で細孔量のピークは直径0.010 μm 以下で、また累積細孔量も非常に少ないこ

とから緻密化が進行していると考えられる。また、その後も細孔径分布がほとんど変化しないことから、若材齢において非常に高い強度が得られ、長期材齢における強度増加量が小さいことと対応していると考えられる。一方、20℃封かん養生下の場合、材齢7日ではL30と同じ直径0.015 μm 付近に分布の細孔量のピークを確認できるが、細孔量自体はL30より少ない。また、材齢28日では0.015 μm 付近のピークは消失しより小さい0.010 μm 以下の細孔量が卓越し、材齢91日になると細孔径分布は加熱養生とほぼ一致した。細孔量のピークの大きな変化は、シリカフェームによる緻密化によると考えられる。細孔径分布からも、シリカフェームのポゾラン反応は、20℃環境下では材齢7日以降の長期に渡り進行していると推察された。標準養生の材齢91日での細孔径分布を確認したところ、累積細孔量の分布は20℃封かん養生や加熱養生の材齢91日の分布に近いが0.010 μm 未満の細孔が際だって少なく、文献9)に似た結果を示した。

累積細孔量と圧縮強度との関係の一例を、回帰線とともに図-11に示す。低熱ポルトランドセメントを単独使用した場合とシリカフェームを併用した場合のどちらも、累積した細孔の最小径によらず累積細孔量の増加に伴い圧縮強度は減少する。しかし、L30とLSF16では、累積対象とした細孔径ごとに回帰線の傾きは近いが、同一累積細孔量でも得られる強度はLSF16のほうが大きい。文献10)では、硬化体強度の決定要因として、水和物の生成量や空隙量だけでなく、水和物の種類や水和物自体の強度の影響が報告されている。また、生成するC-S-H水和物中のCaO/SiO₂比が小さいほど水和物の強度は高くなること、シリカフェームのポゾラン反応により水和物

図-9 細孔径分布

図-10 累積細孔量分布

図-11 累積細孔量と圧縮強度の関係の例

図-12 累積した細孔径の最小値と
圧縮強度回帰式の寄与率分布

中の CaO/SiO_2 比はポルトランドセメントの水和物より小さくなることも併せて報告されている。これらが、本実験において、同一累積細孔量でもシリカフュームを併用すると得られる強度が高くなった要因であると考えられる。

次に、累積細孔量と圧縮強度の回帰式の寄与率を、細孔径で整理した結果を図-12に示す。低熱ポルトランドセメント単独であっても、シリカフュームを併用した場合も対象細孔径が $0.020 \mu\text{m}$ 以下になると寄与率は大きくなるが、シリカフュームを併用した場合は、寄与率が最大となる細孔径はより小さい。

文献11)では、 $60\text{N}/\text{mm}^2$ 級までのモルタルの細孔径と圧縮強度との対応を調べ、 $0.050 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 程度の細孔量との圧縮強度との相関が高かったと報告されているが、今回の実験結果からは $100\text{N}/\text{mm}^2$ 程度 (L30) では $0.020 \mu\text{m}$ 程度以上の細孔径が圧縮強度に与える影響が大きく、それ以上の $150\text{N}/\text{mm}^2$ 程度 (LSF16) ではさらに小さい $0.010 \mu\text{m}$ 程度以上の細孔量が圧縮強度に与える影響が大きくなると推察された。

4. まとめ

本研究において得られた知見を以下に示す。

- (1) 低水結合材比の高強度モルタルを 60°C 程度で加熱養生した場合、材齢3日ないし7日で標準養生や 20°C 封かん養生の材齢91日強度相当の強度が発現する。
- (2) 低熱ポルトランドセメントとシリカフュームを併用した結合材に対し 60°C 程度の加熱養生を行った場合、シリカフュームのポゾラン反応が活性化し、水酸化カルシウムの消費程度は、若材齢で標準養生や 20°C 封かん養生の材齢91日に相当する。
- (3) 低熱ポルトランドセメントとシリカフュームを併用した結合材に対し 60°C 程度の加熱養生を行った場合、マトリクスは若材齢で 20°C 封かん養生材齢91日と同程度の緻密度となる。
- (4) 圧縮強度 $100\text{N}/\text{mm}^2$ 程度のマトリクスでは、 $0.020 \sim 78.1 \mu\text{m}$ の累積細孔量と圧縮強度の相関が高く、 $150\text{N}/\text{mm}^2$ 程度になるとそれより小さい $0.010 \sim 78.1 \mu\text{m}$ の累積細孔量と圧縮強度の相関が高かった。

- (5) 同一の累積細孔量の時は、得られる強度はポルトランドセメント単体の結合材よりシリカフュームを併用した結合材の方が高い。

謝辞

本研究の実施にあたり、住友大阪セメント(株)鈴木康範氏、上原伸郎氏、(株)NMBの菅俣匠氏に貴重なアドバイスを頂きました。また、(株)中研コンサルタントの近藤英彦氏には分析作業に関してご尽力いただきました。ここに付して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 河上浩司, 梶田佳寛, 西本好克, 蓮尾孝一: 結合材種類の異なる高強度コンクリートの強度発現性状に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 第576号, pp.23-29, 2004.2
- 2) 21世紀のコンクリート, 2001年度日本建築学会大会(関東)材料施工部門, パネルディスカッション資料, 2001.9.24
- 3) 土谷 正, 清水哲史, 岡沢 智: 超高強度コンクリートの強度発現性および耐久性に関する一考察, 日本建築学会学術講演梗概集, A-1, pp.199-200, 2001.9
- 4) 日本建築学会: 高強度コンクリート施工指針・同解説, 2005.2
- 5) 菅俣 匠, 杉山知巳, 梅沢健一, 岡沢 智: セメント・シリカフュ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
- 6) 陣内 浩, 黒岩秀介, 早川光敬: 初期に高温履歴を受ける高強度セメント硬化体の強度発現性状と微細構造, 日本建築学会構造系論文集, No.542, pp.39-46, 2001.4
- 7) Hiroshi Jinnai, Shusuke Kuroiwa, Mitsutaka Hayakawa, Yoshihiro Masuda: Strength Development and Microstructure of High Strength Cement Paste Subject to High Temperature at Early Age, 6th International Symposium on High Strength / High Performance Concrete, pp.1079-1088, 2002
- 8) 日本コンクリート工学協会: コンクリートの試験・分析マニュアル, 2000.5
- 9) 鳥居和之, 川村満紀: 高温履歴を受ける超高強度コンクリートの微細組織と強度発現性, 第49回セメント技術大会講演集, pp.520-525, 1995
- 10) 例えば 内川 浩: 混合セメントの水和および構造形成に及ぼす混和材の効果, セメント・コンクリート, No.488, pp.33-48, 1987.10
- 11) 羽原俊祐: 硬化コンクリートの組織および空隙構造と物性の関係に関する研究, 慶應義塾大学学位論文, 1992年度

(2005年6月8日原稿受理, 2005年9月29日採用決定)