

高強度コンクリートの強度発現に与える 初期温度履歴の影響に関する研究

Study on the Influence to Strength Development of High-Strength Concrete by Temperature Career at Early Age

河上 浩司 HIROSHI KAWAKAMI
松田 拓 TAKU MATSUDA
西本 好克 YOSHIKATSU NISHIMOTO

本論文の目的は、材齢 91 日において構造体コンクリート強度が、標準養生供試体の強度を上回る条件を調べることである。実験は、低熱ポルトランドセメントとシリカフェームを混合した結合材で作製した供試体にモデル温度履歴を与えて強度発現を確認した。その結果、水結合材比が 17%以下のコンクリートが硬化初期に 60℃まで加熱されると、構造体コンクリート強度は、標準養生供試体の強度を超える傾向があることを確認した。

キーワード：強度発現、高強度コンクリート、温度履歴、低熱ポルトランドセメント、シリカフェーム

This study was carried out for the purpose of clarifying the conditions in which the 91st day strength of the structural concrete exceeds that of the standard curing specimen. Under the model temperature profiles, the strength development of specimens made with low-heat portland cement and a binder containing silica fume was investigated. As a result, it was confirmed that the strength of the structural concrete with a water-binder ratio of 17% or less tends to exceed the standard curing specimens when heated at 60 degrees in the initial stages of the setting period.

Key Words: Strength Development, High-Strength Concrete, Temperature Career, Low-Heat Portland Cement, Silica Fume

1. はじめに

近年、高層 RC 造をはじめとする建築構造物において、使用されるコンクリートの設計基準強度は、建築工事標準仕様書・同解説鉄筋コンクリート工事 (JASS 5) の19節「高強度コンクリート」において主な想定範囲とされている「 36N/mm^2 を超え 60N/mm^2 以下」¹⁾をはるかに超えて 100N/mm^2 に至っている。このような、いわゆる超高強度コンクリートは、セメント単体での製造が非常に困難であり、ポルトランドセメントにシリカフェームをはじめとする特殊混和材を混入した結合材を使用するのが一般的である。現在、超高強度コンクリート用結合材の強度発現性状に関する研究は数多く行われており、最近では設計基準強度 150N/mm^2 級の高強度コンクリートについての報告例も見られる^{2),3),4)}。

このような既往の研究のほとんどで 1m 角程度のブロック試験体の上下を断熱した模擬柱試験体を製作し、温

度履歴とともに試験体より採取したコア強度について報告がなされている。これらの報告の中で、材齢91日程度までの強度発現の傾向として、標準養生供試体よりもコア供試体や簡易断熱養生供試体のような高温履歴を受けた供試体のほうが高強度となる場合があることや、その中でも低水結合材比のコンクリートほどその傾向が強いという報告がいくつかなされており³⁾、筆者らも過去に同様の報告を行っている^{5),6)}。

しかしながら、これらの研究のほとんどはそれぞれのケースでの報告にとどまっており、初期高温履歴を受けたコンクリートの圧縮強度が標準養生や20℃で養生された供試体の強度を上回る範囲や、その温度履歴の条件について検討を行った例はほとんどない。そこで今回、水結合材比20%以下の高強度コンクリートを対象に、結合材種類、最高温度およびその保持時間に起因する温度履歴をパラメータとして強度発現性状を確認し、最高温度や積算温度などとの関係について整理した。その結果よ

表-1 試験パラメータ

要因	水準	備考
結合材の組合せ	3種類	結合材A L1+SF1 結合材B L2+SF1 結合材C (SFC, プレミックス)
水結合材比(W/B)	3水準	20.0%, 16.7%, 14.3%
養生方法	8種類	標準水中 20℃封かん モデル温度 設定最高温度40℃(28h, 70h, 100hまで保持) モデル温度 設定最高温度60℃(28h, 70h, 100hまで保持)
試験材齢	5材齢	3, 7, 28, 91, 182日

表-2 使用材料

材 料		仕 様	記号	
結合材	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:3350cm ² /g, C ₃ S:24%, C ₂ S:56%	L1
			密度:3.22g/cm ³ , 比表面積:3510cm ² /g, C ₃ S:32%, C ₂ S:51%	L2
		シリカフェームプレミックスセメント	密度:3.08g/cm ³ , 比表面積:6170cm ² /g, L2をベースに内割10%のSF2を工場でプレミックス	SFC
	混和材	シリカフェーム	密度:2.20g/cm ³ , 比表面積:22.6m ² /g, SiO ₂ :95.6%, Ig. loss:1.4% 密度:2.24g/cm ³ , 比表面積:17.6m ² /g, SiO ₂ :95.2%, Ig. loss:1.5%	SF1 SF2
骨材	細骨材	砂(鬼怒川産川砂)	表乾密度:2.58g/cm ³ , 吸水率:2.09%, FM:2.47	S
	粗骨材	硬質砂岩碎石(硬質砂岩)	表乾密度:2.65g/cm ³ , 吸水率:0.60%, 実積率:58.9%	G
化学混和剤		高性能減水剤	ポリカルボン酸系	SP

表-3 セメント試験結果

セメント・結合材	L1	L2	SFC
圧縮強さ (N/mm ²)	3日	—	13.1 (-)
	7日	16.7 (≧7.5)	18.7 (≧7.5)
	28日	53.8 (≧22.5)	57.7 (≧22.5)
	91日	79.2 (≧42.5)	81.0 (≧42.5)
水和熱 (J/g)	7日	188 (≦250)	227 (≦250)
	28日	258 (≦290)	288 (≦290)
試験方法	JIS R 5201 (W/C50.0%で試験)		New RC案 ⁶⁾ (W/B30.0%で試験)

() 内は規定値

り、強度発現に与える初期高温履歴の影響と、初期高温履歴養生を受けるコンクリートの強度が標準養生や20℃封かん養生供試体を上回る条件について検討した。

2. 実験概要

(1) 実験パラメータ

今回の実験における要因と水準との関係を表-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ェームとを組み合わせたものとし、シリカフェームの置換率はすべて単位結合材量の内割10%と定めた。使用した3種類の結合材における低熱ポルトランドセメントとシリカフェームの組み合わせとその混合方法は以下に示すとおりである。結合材の組み合わせ種類は、L1+SF1(結合材A)とL2+SF1(結合材B)、そしてL2+SF2(結合材C)である。セメントとシリカフェームの混合方法として、結合材AとBではコンクリートを練り混ぜる時に

粉末状のシリカフェームを別途に混入した。結合材Cは工場でシリカフェームがプレミックスされており、混合後の物性は表-1中のシリカフェームプレミックスセメント(SFC)に示すとおりである。

水結合材比(W/B)は、20.0%、16.7%、14.3%の3水準に設定した。また、養生方法は標準水中養生と20℃封かん養生、そして封かん養生供試体に対し恒温恒湿槽を用いて6種類(設定最高温度2種類×保持時間それぞれ3種類)のモデル温度履歴を与えた計8種類であり、詳細については後述する。

(2) 使用材料

今回の実験で使用した材料を表-2に示す。低熱ポルトランドセメント(記号:L)は、生産者が異なる2種類(L1, L2)を使用した。また、使用したシリカフェーム(SF)も生産者の異なる2種類(SF1, SF2)を使用している。

低熱ポルトランドセメントのL1とL2を比較すると

表-4 シリカフェーム試験結果

種類・記号		SF1	SF2
活性度指数 (%)	7日	109 (≧95)	97 (≧95)
	28日	118 (≧105)	117 (≧105)
試験方法		JIS A 6207	

() 内は規定値

表-5 コンクリート調合

記号	W/B (%)	B/W	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					空気量 (%)
				W	C	SF	S	G	
A20	20.0	5.0	47.4	150	675	75	718	819	2.0
A16	16.7	6.0	42.6	150	810	90	593	819	2.0
A14	14.3	7.0	37.0	150	945	105	468	819	2.0
B20	20.0	5.0	47.3	150	675	75	715	819	2.0
B16	16.7	6.0	42.5	150	810	90	589	819	2.0
B14	14.3	7.0	36.7	150	945	105	463	819	2.0
C20	20.0	5.0	47.3	150	750	—	715	819	2.0
C16	16.7	6.0	42.5	150	900	—	590	819	2.0
C14	14.3	7.0	36.8	150	1050	—	464	819	2.0

物性にそれぞれ若干の差がみられ、比表面積およびエーライト (C₃S) 量の割合は L1 のほうが L2 に比べ 8% ほど小さく、ピーライト (C₂S) 量の割合は逆に L1 のほうが L2 に比べ 5% ほど大きい。

セメントの圧縮強さと水和熱の試験結果を表-3に示す。試験は L1 と L2 についてはJIS R 5201⁷⁾に、結合材 Cは New RC 案⁸⁾に従って行っている。L1 と L2 は水セメント比50%での試験結果であり、本実験の対象範囲とは大きく異なるが、この条件で圧縮強度を比較すると材齢7日では L1 のほうが10%程強度は低い、材齢91日になると両者の強度はほぼ同等となる。また、水和熱は L1 のほうが材齢7日で15%以上、28日でも10%程度少なく表-2に示したセメント化学組成の差が確認できる。結合材Cは水結合材比30%の結果であるが、規定値に対して十分に大きな値が得られている。

表-2よりシリカフェームの物性を比較すると、SF1 と SF2 では比表面積に大きな差がみられる。また、表-4よりシリカフェームの活性度⁹⁾を比較すると、材齢7日では比表面積が大きい SF1 の活性度は SF2 に比べて10%以上高いが、材齢91日の活性度はどちらもほぼ同等となっている。

そのほか、細骨材は鬼怒川産の川砂、粗骨材は葛生産の硬質砂岩砕石を使用した。化学混和剤は、超高強度コンクリート用のポリカルボン酸系高性能減水剤を使用した。

(3) 調合

コンクリートの調合を表-5に示す。コンクリートの調合記号は、結合材の記号と水結合材比の整数部分の組み

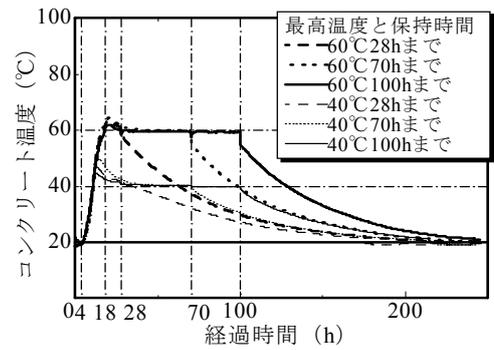


図-1 模擬柱試験体の温度履歴の例と設定モデル温度履歴

合わせて表すこととする。今回の実験では、結合材種類以外の影響を極力除外するために、すべての調合で単位水量と単位粗骨材量を一定値に設定した。

(4) 供試体の作製

今回の実験では、同一の調合で設定温度を60°Cと40°Cの2種類設定したため、結合材種類ごとに60°Cシリーズ(記号: H)と40°Cシリーズ(記号: L)の2つのシリーズに分けて練り混ぜた。この際、シリーズ間の強度差を確認するため、標準養生と20°C封かん養生の供試体を採取した。

コンクリートは、容量100ℓの強制2軸練りミキサを使用して1バッチあたり65ℓを練り混ぜ、練り盤で2バッチ分を混合して一試料とした後に供試体を採取した。練り混ぜは、すべてモルタルの先練りを行い120~360秒練り混ぜ、粗骨材を投入した後は120~180秒練り混ぜた。コンクリートの目標練り上がり温度は20°Cとし、必要に応じて練混ぜ水に冷水を使用した。

20°C封かん養生供試体とモデル温度履歴を与える供試体は、製作後直ちにラップで封かんし、温度履歴を与える供試体は速やかに恒温恒湿槽へ移動した。設定したモデル温度履歴は、これまでに行った模擬柱試験体の温度履歴や、周囲を発泡スチロールで断熱した試験体の温度履歴を考慮して設定したもので、模擬試験体の温度履歴の例と設定した温度履歴を図-1に示す。与えたモデル温度履歴は、練り上がり後に4時間の前養生を行い、単位時間あたりの温度上昇量を3°C/hourとして、高温側の設定最高温度である60°Cには18時間後に、低温側の設定最高定温度である40°Cには約11時間後に到達させてい

表-6 フレッシュ試験結果

調査記号	フロー (cm)	70-50cm (sec)	70-停止 (sec)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	単位容積質量 (t/m ³)
A20	57.8	19.2	51.7	2.4	20.0	2.414
A16	64.0	18.7	121.2	2.2	21.5	2.449
A14	64.3	38.6	150.6	2.5	23.5	2.459
B20	55.5	20.4	65.4	2.5	20.0	2.435
B16	69.0	19.1	139.6	2.3	21.5	2.429
B14	67.8	38.4	130.4	2.8	26.5	2.458
C20	70.5	8.9	90.1	2.1	19.0	2.405
C16	71.0	14.4	124.1	2.3	19.5	2.442
C14	66.3	32.2	134.9	1.7	20.0	2.475

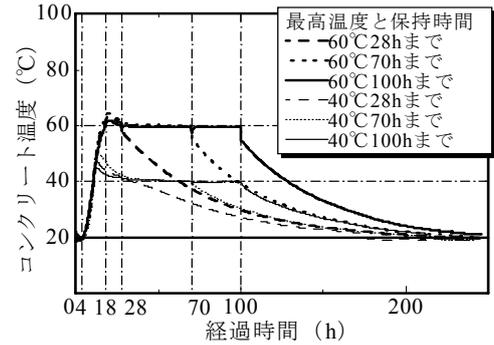


図-2 測定温度

る。設定温度に到達した後はそれぞれの設定最高温度を保持し、所定の経過時間とした28時間、70時間、そして100時間で恒温恒湿槽から取り出した。取り出した供試体は、養生室中に存置した100mm厚の発泡スチロールで覆われた簡易断熱箱の中で20°Cまで徐々に冷却し、以降は試験材齢まで20°Cで養生した。なお、コンクリートの温度は、熱電対を設置したダミー供試体を用意し測定した。

3. 試験結果

(1) フレッシュ性状

コンクリートのフレッシュ試験結果を表-6に示す。スランプフロー値の範囲は55～71cm、空気量の範囲は2.0% ± 1.0%であった。50cmフロー時間は、水結合材比20.0%と16.7%に関しては10～20秒程度であったが、14.3%については30秒以上となり粘性が極端に高くなっている。全体的に、結合材Cではその他の2種類に比べ50cmフロー時間が早い傾向があり、プレミックスされている効果と考えられる。コンクリートの練り上がり温度は19.0～26.5°Cの範囲となった。その中で、水結合材比が14.3%のコンクリートでは、所要の性状を得るために必要な練混ぜ時間が長くなりコンクリート温度が高くなる傾向がある。

(2) 温度履歴

ダミー供試体で測定された温度履歴の例を図-2に示す。設定した到達温度である60°Cや40°Cに到達した直後は、コンクリート自体の発熱や熱容量の影響により、一時的に設定最高温度よりも高くなっている。また、簡易断熱箱の断熱性により急激な温度降下が抑制されていることがわかり、全体的には想定した温度履歴に近い履歴である。

(3) 圧縮強度

圧縮強度の試験結果を表-7に、試験体記号の説明を表-7の右下に示す。試験体記号は結合材種類、水結合材比、シリーズの設定最高温度区分、そして養生方法もしくは設定最高温度を保持した時間の順で示している。

標準養生供試体と20°C封かん養生供試体について、材齢別の結合材水比と圧縮強度との関係を図-3に示す。なお、図中には材齢3日、7日、28日そして91日の回帰線を示す。結合材種類ごとの強度発現の傾向や強度の大小関係は、標準養生と20°C封かん養生のどちらも同様であった。圧縮強度は、材齢3日や7日では結合材種類に関係なくほぼ同強度であるが、材齢28日以降になると一貫して結合材Aが高強度となる傾向がみられる。シリカフェームの物性が多少異なっても得られる強度に与える影響は比較的小さいという報告¹⁰⁾があることから、ベースとするセメントの違いと考えると、結合材AではベースセメントL1中のC₂S量がより多いことが長期強度増加量が大きくなった一因と考えられる。

結合材Bと結合材Cの圧縮強度を比較すると、結合材水比5.0では各材齢で強度が一致しているが、より結合材水比が高い領域をみると、結合材Bのほうが材齢91日の強度が高い。結合材Bと結合材CではベースセメントはL2で同一であるが、今回の結果の範囲ではSF1を使用した結合材Bのほうが最終的に高強度となった。シリカフェームの影響は比較的小さいと仮定すると、混合方法が異なる影響が考えられるが、今回の実験の範囲では未確認である。

標準養生と20°C封かん養生供試体の強度の関係を図-4に示す。100N/mm²近辺ではわずかに標準養生のほうが大きい領域もあるが、全体的には標準養生と20°C封かん養生との間は大きな強度差は確認できない。一般に、圧縮強度が100N/mm²程度までのコンクリートでは、標準養生のほうが20°C封かん養生より高強度となるといわれているが¹¹⁾、圧縮強度が150N/mm²に至る高強度コンクリートでは、組織が緻密化するため標準養生でも外部が

表-7 圧縮強度試験結果

設定温度	記号	圧縮強度(N/mm ²)					記号	圧縮強度(N/mm ²)					記号	圧縮強度(N/mm ²)				
		3	7	28	91	182		3	7	28	91	182		3	7	28	91	182
60℃	A20-W	-	83.6	116	142	147	B20-W	-	87.6	123	141	141	C20-W	-	83.7	121	133	136
	A20-S	-	82.1	115	138	142	B20-S	-	88.3	119	137	136	C20-S	-	84.1	115	133	132
	A20-28h	-	112	117	132	130	B20-28h	-	124	126	128	132	C20-28h	-	114	122	118	122
	A20-70h	-	118	129	130	131	B20-70h	-	130	133	140	137	C20-70h	-	121	126	123	126
	A20-100h	-	119	127	131	137	B20-100h	-	132	137	136	134	C20-100h	-	124	130	127	124
	A16-W	-	102	137	152	157	B16-W	-	95.5	130	143	145	C16-W	-	98.8	128	138	141
	A16-S	-	92.9	133	159	153	B16-S	-	94.5	124	142	149	C16-S	-	101	125	134	141
	A16-28h	-	124	135	153	153	B16-28h	-	128	144	141	150	C16-28h	-	127	130	136	139
	A16-70h	-	137	146	156	154	B16-70h	-	145	142	140	141	C16-70h	-	139	142	138	138
	A16-100h	-	138	149	153	156	B16-100h	-	145	141	145	140	C16-100h	-	137	144	142	142
	A14-W	-	105	142	166	166	B14-W	-	103	129	151	147	C14-W	-	101	144	140	146
	A14-S	-	98.4	147	169	156	B14-S	-	104	132	156	148	C14-S	-	110	139	142	147
	A14-28h	-	140	147	159	159	B14-28h	-	140	144	157	151	C14-28h	-	146	146	150	146
	A14-70h	-	157	158	165	165	B14-70h	-	151	155	151	150	C14-70h	-	146	145	148	150
A14-100h	-	149	152	165	164	B14-100h	-	143	152	156	163	C14-100h	-	143	149	148	152	
40℃	A20-W	60.8	86.9	127	140	140	B20-W	58.7	81.8	118	126	136	C20-W	58.7	78.7	116	126	130
	A20-S	61.3	84.0	121	133	140	B20-S	59.3	82.7	110	123	131	C20-S	58.2	79.2	116	129	125
	A20-28h	-	103	122	128	135	B20-28h	-	102	115	125	126	C20-28h	-	104	114	123	126
	A20-70h	-	111	120	134	134	B20-70h	-	111	114	117	125	C20-70h	-	107	117	125	128
	A20-100h	-	111	124	134	139	B20-100h	-	105	112	130	124	C20-100h	-	110	117	125	124
	A16-W	75.3	101	140	142	155	B16-W	69.0	96.1	124	142	142	C16-W	74.0	105	134	141	146
	A16-S	76.6	98.2	132	145	159	B16-S	71.6	94.6	127	141	142	C16-S	73.9	100	131	145	145
	A16-28h	-	114	134	145	147	B16-28h	-	105	128	131	133	C16-28h	-	118	130	137	142
	A16-70h	-	122	131	144	144	B16-70h	-	115	130	131	133	C16-70h	-	120	131	137	139
	A16-100h	-	124	133	136	144	B16-100h	-	117	135	132	133	C16-100h	-	126	129	136	139
	A14-W	89.4	112	143	157	157	B14-W	88.2	105	137	155	145	C14-W	89.6	108	142	145	143
	A14-S	89.1	105	140	152	154	B14-S	87.6	107	134	151	159	C14-S	88.0	108	140	145	148
	A14-28h	-	131	146	152	156	B14-28h	-	123	135	146	147	C14-28h	-	128	143	148	139
	A14-70h	-	132	150	155	160	B14-70h	-	132	139	146	143	C14-70h	-	134	143	145	150
A14-100h	-	140	150	150	163	B14-89h	-	127	140	145	152	C14-89h	-	137	143	146	149	

凡例) A 20 - W
 A : 結合材種類 (A, B, C)
 20 : 水結合材比 (20.0, 16.7, 14.3%
 小数点以下切捨て)
 W : 養生 (W:標準, S:20℃封,
 28h~100h : 温度保持時間)

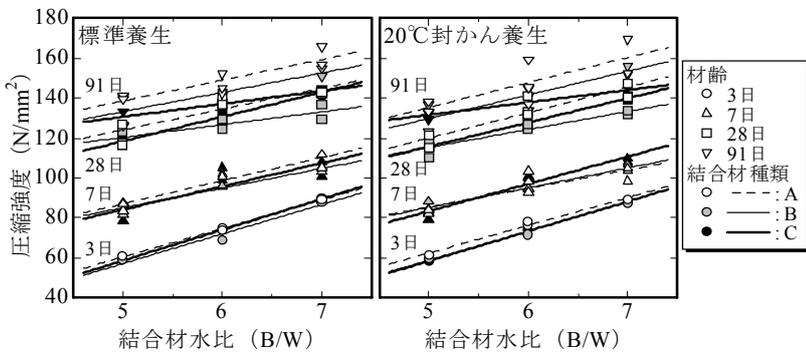


図-3 結合材水比と圧縮強度
 (標準養生, 20℃封かん養生)

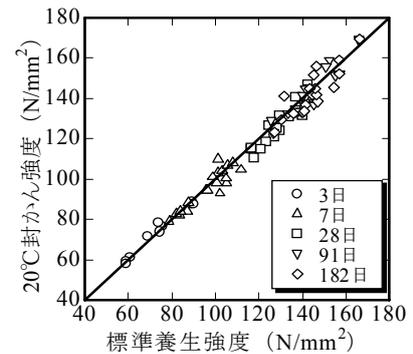


図-4 標準養生と20℃封かん養生強度

ら水が浸透しにくくなることや、浸透しても未反応の結合材との接点が少なくなるために、20℃封かん養生との強度差が小さくなったと考えられる¹²⁾。

次に、加熱養生供試体の強度発現性状を図-5に示す。材齢7日から91日までの強度増加の傾向は、標準養生や20℃封かん養生と同様に結合材Aが結合材Bや結合材Cに比べて大きく、最終的に得られる強度も高くなることが確認できる。

設定到達温度を60℃とした場合、結合材Aでは材齢7日の圧縮強度は、28時間後まで保持した供試体よりも70時間後までや100時間後まで保持した供試体のほうが高

強度となる。しかし、材齢91日における圧縮強度は保持時間によらずほぼ同強度となった。一方、結合材Bや結合材Cでは、材齢7日だけでなく材齢91日においても、28時間後まで保持した供試体の圧縮強度は、70時間後までや100時間後まで保持した供試体と比べて低いものがみられた。

設定到達温度を40℃とした場合、すべての結合材で設定到達温度を60℃とした場合より低強度となる傾向がみ

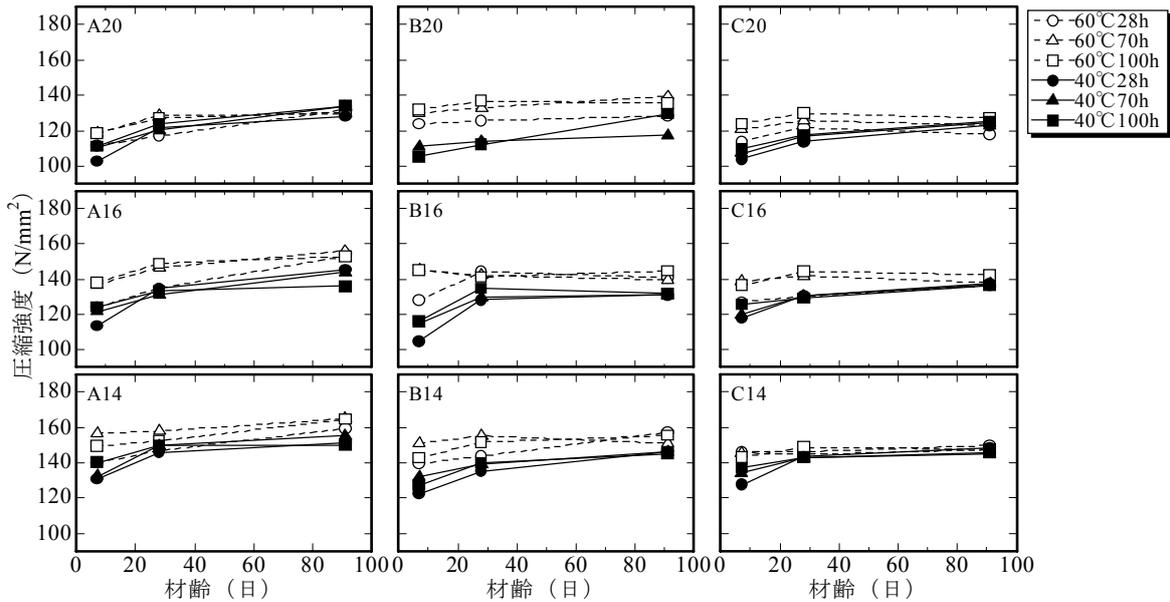


図-5 加熱養生供試体の強度発現

られた。材齢7日では、28時間後まで保持した供試体の圧縮強度はより長時間保持した供試体より低い、材齢91日になると設定温度の保持時間と得られる圧縮強度の間に明確な傾向は確認できなかった。

4. 温度履歴と強度発現性状の検討

今回の実験結果をみると、設定到達温度を40℃とするよりも60℃と設定したほうが、若材齢から長期材齢にかけて得られる強度が高いことが確認された。菅俣らの報告¹³⁾によると、最高温度が70℃程度まで上昇するとシリカフェームの反応が20℃環境下よりも活性化し、強度増加に貢献すると考察されている。今回の実験結果より、最高温度が60℃でもシリカフェームの反応はより活性化するが、40℃では20℃養生と比べて大きく活性化するには至っていないと考えられる。

今回の実験では、設定最高温度とその保持時間、すなわち初期の温度履歴の状態により強度発現性状が異なることが確認されたので、温度履歴を同一指標で評価する方法として式(1)で示される積算温度法¹⁴⁾による評価を試みた。

$$M = \sum_{i=0}^n \Delta t_i [T(\Delta t_i) + T_0] \quad (1)$$

ここに、M：積算温度 (°D・D)

Δt_i ：コンクリート温度がT (°C) の期間 (日)

T(Δt_i)：期間 Δt_i のコンクリート温度 (°C)

T₀：定数 (=10 °C)

一般に、コンクリートの強度発現を積算温度で評価した場合、水和開始時の強度発現が緩やかな範囲 (以下、STEP1と称す)、水和反応が最も活発化し急激に強度が増加する範囲 (STEP2)、その後の長期材齢に至る強度増加が緩やかになる範囲 (STEP3) に分類される¹¹⁾。

コンクリート調合ごとに積算温度で強度発現を評価した結果を図-6に示す。図中の回帰線は、20℃封かん養生、60℃加熱養生と40℃加熱養生の設定到達温度ごとに回帰を行った結果を示している。初期に高温履歴を受けた超高強度コンクリートやそのセメント硬化体は、材齢7日でも非常に高い強度が得られることが報告されている^{12),13)}。そこで、加熱養生を行った供試体は材齢7日でもSTEP3の範囲にあると考え、加熱養生を行った供試体ではその設定到達温度に関わらず、勾配の緩やかな1直線で評価した。

加熱養生供試体について設定到達温度による回帰線の差を検討すると、全体的に回帰線の傾きは60℃養生より40℃養生のほうが大きく、40℃養生の強度は材齢が経過するに従い60℃養生の強度に追いついていく傾向を示す。特に、A20やC20では材齢91日以前に40℃養生の回帰線は60℃養生の回帰線と交差し、40℃養生の強度は60℃養生の強度を追い越す。その他では、40℃養生の強度は60℃養生の強度に追いつかないか、追いついてもその材齢は材齢91日以降であった。

20℃封かん養生供試体をみると、積算温度が90°D・Dから840°D・Dの範囲 (材齢3日から28日に相当) で強度は大きく増加し、それ以上になると強度増加が緩やかになっている。今回、強度確認を行った領域はSTEP2から

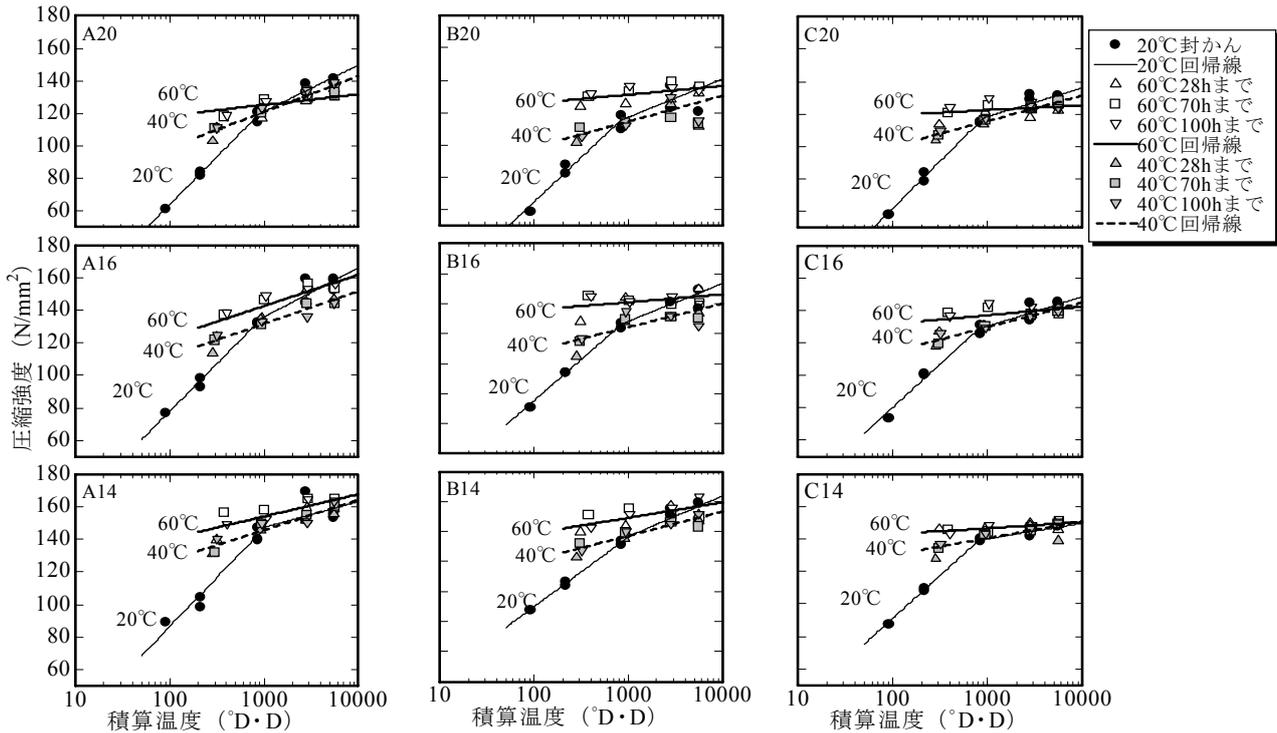


図-6 積算温度と強度発現

STEP3の範囲にあったと考えられることから、回帰線は $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 以下の範囲と、 $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 以上の範囲に分けて回帰を行い2直線で評価した。

20°C封かん養生供試体と加熱養生供試体の強度発現性状を比較すると、設定到達温度が40°Cの場合、20°C封かん養生の強度は材齢28日前後で40°C養生の強度に追いつき、その後はほぼ同等か上回る。この傾向は、結合材種類や水結合材比の値に関わらず共通である。設定到達温度が60°Cの場合についても、20°C封かん養生の強度は60°C養生の強度に追いついていく。ここで、水結合材比が20%のA20やC20では、20°C封かん養生強度は材齢28日から91日の間に60°C養生の強度を追い抜いているが、水結合材比が17%以下になるといずれの結合材であっても同等となるのは材齢91日以降であった。

水結合材比が20%以下の範囲の超高強度コンクリートの強度発現性状において、60°C程度の高温履歴を受けることで初期材齢での強度発現が著しく大きくなるが、その後は強度増加が非常に小さくなることが確認できた。さらに水結合材比が14~17%程度のコンクリートでは、初期高温履歴を受けると若材齢の時点で20°C封かん養生の材齢91日強度と同等以上の強度が発現していることが認められた。

実強度が $150\text{N}/\text{mm}^2$ に至る高強度コンクリートにおける積算温度と強度発現との関係を到達最高温度別に模式的に表すと、図-7のようになると考えられる。STEP2に

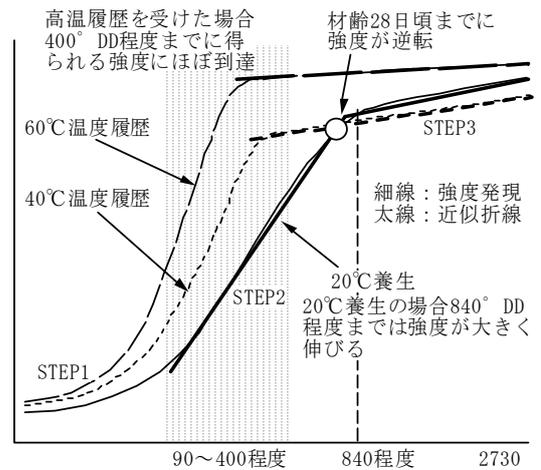


図-7 強度発現モデル

あたる期間が、20°C養生では材齢28日頃まで持続するのに対し、高温履歴を受けた場合は $300 \sim 400^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 程度までとなり、材齢7日までには相当の強度が発現する。また、到達する温度によりシリカフェームの活性化の程度が異なるため、得られる強度に変化が生じると推察される。

5. 結論

本論で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 水結合材比が17.0%程度以下(設計基準強度として $120\text{N}/\text{mm}^2$ 程度以上)の高強度コンクリートでは、

構造体コンクリート強度が標準養生や20℃封かん養生の91日強度を上回る場合がある。

- 2) 水結合材比が 17.0% 程度以下のコンクリートが、到達温度60℃の初期高温履歴を10時間以上受けた場合、構造体コンクリート強度が標準養生や20℃封かん養生強度を上回った。
- 3) 水結合材比が 17.0% 程度以下のコンクリートであっても初期高温履歴の最高温度が40℃では、その受熱時間に関わらず構造体コンクリート強度が標準養生や20℃封かん養生強度を上回ることにはなかった。
- 4) ビーライト量が51%と56%の低熱ポルトランドセメントでは、上記強度発現の傾向に違いは確認できなかった。

謝辞：本研究を行うにあたり、サンプルの提供をいただきました住友大阪セメント(株)、宇部三菱セメント(株)、東京エスオーシー(株)、(株)ボゾリス物産の関係諸氏に感謝の意を表します。また、本研究の実施にあたりご指導頂きました宇都宮大学工学部建設学科 梶田佳寛教授に深謝いたします。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，2003
- 2) 陣内 浩ほか：設計基準強度 150N/mm² 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
- 3) 神代泰道，一瀬賢一，都築正則，斎藤 賢：ジルコニア起源シリカ質微粉末混合セメントを用いた超高強度コンクリートの性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.27, No.1, pp1057-1062, 2005
- 4) 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
- 5) 河上浩司ほか：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
- 6) 河上浩司，西本好克：Fc100N/mm² 級の高強度コンクリートの強度発現性に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24, No.1, pp.369-374,2002
- 7) 日本工業規格「セメントの物理試験方法」，JIS R 5201，1997
- 8) 建設省総合技術開発プロジェクト 鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発，平成4年度 高強度コンクリート分科会報告書，1993.3
- 9) 日本工業規格「コンクリート用シリカフェウム」，JIS A 6204，2006
- 10) 陣内 浩ほか：シリカフェウムの品質が高強度コンクリートの施工性と構造体コンクリート強度に及ぼす影響，日本建築学会技術報告集，No.18, pp.1-6,2003.12
- 11) 梶田佳寛，佐藤幸恵，中村成春，嵩 英雄：低発熱型セメントを用いたマスコンクリートの強度発現性と調合強度の補正，日本建築学会構造系論文集 第 533 号，pp.7-12,2000.7
- 12) 河上浩司，西本好克，梶田佳寛：低熱ポルトランドセメントとシリカフェウ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，日本建築学会構造系論文集，No.599, pp.1-7,2006.1
- 13) 菅俣 匠，杉山知己，梅沢健一，岡沢 智：セメント-シリカフェウ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報告集，Vol.26, No.1, pp.1287-1292, 2004
- 14) 日本建築学会：寒中コンクリート施工指針・同解説，1998
- 15) 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 第 542 号，pp.39-46, 2001.4