

論文

[1040] 超高強度コンクリートによる柱構造体の強度発現性状の検討

陣内 浩^{*1}・黒羽健嗣^{*2}・並木 哲^{*3}・後藤和正^{*4}

1. はじめに

近年、建築構造物の超高層化・高耐久性化の要求を実現するために、設計基準強度 800、1000 kgf/cm² (以下、Fc 800、Fc 1000) といった超高強度の現場打ちコンクリートの実用化が望まれるようになった。通常、高強度コンクリートの調合では水セメント比を小さく設定することになるため、単位結合材量が大きくなり、夏季に柱など断面の大きな部材 (断面寸法80×80cm程度以上) に使用すると、部材中心におけるコンクリートの温度が高くなる。このため、既に実用化している普通ポルトランドセメントを用いたFc 600 クラスでは、柱の長期強度が標準養生を大幅に下回ることがあると報告されている。¹⁾ そこで著者らは、超高強度コンクリートを実用化するにあたり、Fc1000クラスについても柱構造体の強度発現性状の調査・検討を行い、調合計画および品質管理方法を確立する資料とすることとした。

2. 材料調合の選定

2.1 使用材料

結合材 (記号B) としては、ポルトランドセメントを基本とし、調合によってスラグ石膏系結合材、シリカフェームを内割りで混入した。スラグ石膏系結合材とは、高炉スラグ微粉末に無水石膏を加えたものであり、これを結合材に内割りで混入することにより、結合材の構成成分の改善と粒度分布の改善によるコンクリートの流動性の向上、および高温履歴を受けた場合のコンクリートの強度発現性状の改善を期待した。使用した結合材の試験成績例を表-1に示す。細骨材は5種類の混合砂を、粗骨材は2種類の砕石を検討した。使用した骨材の試験成績を表-2に示す。化学混和剤としては、アミノスルホン酸系高性能AE減水剤 (比重1.13、固形分量30%) を使用した。

表-1 結合材の試験成績例

種類	記号	比重	比表面積 (cm ² /g)	SiO ₂ (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	CaO (%)	強熱減量 (%)
普通ポルトランドセメント	NC	3.16	3,290	-	1.6	2.0	-	1.3
早強ポルトランドセメント	HC	3.14	4,540	-	1.5	2.9	-	1.0
スラグ石膏系結合材	BG	2.90	7,580	19.2	4.3	26.5	41.4	0.1
シリカフェーム	SF	2.20	190,000	92.0	3.0	-	2.0	2.5

表-2 細・粗骨材の試験成績

	種類	記号	最大寸法 (mm)	絶乾比重	表乾比重	実積率 (%)	吸水率 (%)	粗粒率
細骨材	硬砂岩系砕砂:陸砂A=8:2	硬砂岩+陸A	5	2.61	2.64	-	1.05	3.45
	石英片岩系砕砂	石英砕砂	5	2.55	2.58	-	1.02	2.84
	石灰岩系砕砂:陸砂A=8:2	石灰+陸A	5	2.64	2.64	-	1.05	3.17
	安山岩系砕砂:陸砂A=8:2	安山+陸A	5	2.55	2.60	-	2.07	3.06
	陸砂B:陸砂A=8:2	陸B+陸A	5	2.53	2.58	-	2.07	3.28
粗骨材	硬砂岩系砕石	硬砂岩砕石	20	2.65	2.67	57.7	0.79	6.50
	石英片岩系砕石	石英砕石	20	2.60	2.62	60.4	0.64	6.44

*1 大成建設 (株) 技術研究所 材料研究グループ、工修 (正会員)
 *2 大成建設 (株) 技術研究所 材料研究グループチームリーダー、工博 (正会員)
 *3 大成建設 (株) 技術研究所 材料研究グループ (正会員)
 *4 大成建設 (株) 技術研究所 材料研究グループ、工修 (正会員)

2. 2モルタルによる検討

(1)目的

超高強度コンクリートに適した結合材、細骨材を選定するため、モルタルによる検討を行った。

(2)実験方法

検討要因と水準を表-3に示す。調合は8調合とし、いずれも水結合材比は20%とした。モルタルは、20℃室内においてホバルト型ミキサ（容量30リットル）を用いて練り混ぜ、高性能AE減水剤の添加量によってモルタルスランプ13cm程度に調整した。流動性試験としてモルタルスランプを採用したのは、モルタルの柔らかさをJIS R 5201のテーブルフローの測定可能範囲（30cm）より大きく設定したためである。また、モルタルスランプ13cmという値は、13cm程度がコンクリートのスランプ24cm程度に対応する柔らかさと判断し、設定した。

試験項目の中で沈入試験²⁾とは、重錘により質量を変化させることのできる円筒棒を、容器につめたモルタルに鉛直に沈入させ、円筒棒の質量と平均沈入速度（深さ0～7cm間）を測定する試験である。（図-1参照）1回の試験に対して、重錘の質量は3種類以上変化させるものとした。この試験により得られたデータを直線回帰し、平均沈入速度が1.5 cm/sとなるときに円筒棒の質量を粘性特性値Vgとした。同一スランプで比較した場合、Vgの大きいものは、小さいものに対して相対的に粘性が高いと判断される。

圧縮強度試験用供試体の養生方法は、標準養生および加熱養生の2種類とし、長期材齢における強度発現性状に初期高温履歴がおよぼす影響を検討した。加熱養生とは、恒温恒湿槽内において、断面寸法80×80cm程度の一般的な柱の温度履歴³⁾を模擬した図-2の温度を与えた後、温度20℃、湿度80%という条件で封かん養生を行ったものである。

(3)実験結果および考察

M-1～M-4の調合について、高性能AE減水剤使用量を変化させ、各々2点ずつのモルタルスランプと粘性特性値Vgの関係を求めたものを図-3に示す。これによると、同一スランプであってもシリカフェームを混入することでVgが小さくなっており、粘性抑制に有効であることが推察される。

表-3 検討要因と水準

	W/B	結合材(質量比)	細骨材	減水剤量
M-1	20	HC:BG:SF=7:2:1	硬砂岩 +陸A	B×1.60%
M-2		HC:BG=7.5:2.5		B×2.00%
M-3		NC:BG:SF=7:2:1		B×1.70%
M-4		NC:BG=7.5:2.5		B×2.10%
M-5	%	HC:BG:SF=7:2:1	石英砕砂	B×1.55%
M-6			石灰+陸A	B×1.65%
M-7			安山+陸A	B×1.70%
M-8			陸B+陸A	B×1.65%
共通	モルタルスランプ 13 cm			
試験項目	○モルタルスランプ モルタル用スランプコーン（上端5cm、下端10cm、高さ15cm）により測定。 ○沈入試験 図-1の沈入試験器によって測定 ○圧縮強度（φ5×10cm供試体） 標準養生、加熱養生の2種類を試験			

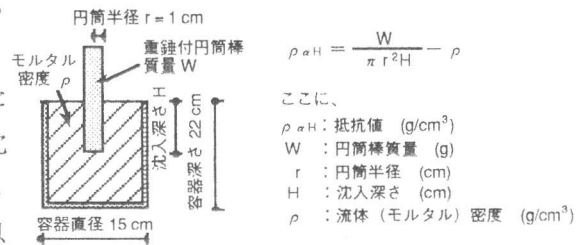


図-1 沈入試験器

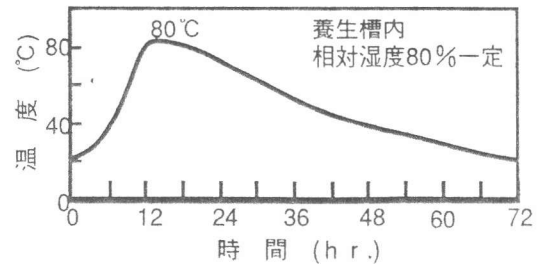


図-2 温度履歴

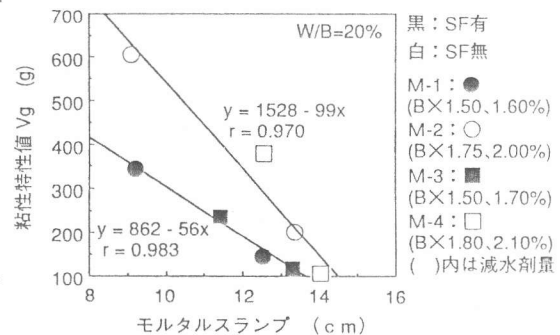


図-3 モルタルスランプと粘性特性値Vgの関係

結合材の違いを比較した材齢91日圧縮強度を図-4に示す。標準養生、加熱養生とも、最も高い圧縮強度は早強ポルトランドセメント・スラグ石膏系結合材・シリカフェームの組み合わせで得られた。また、3成分系の結合材の組み合わせでは、加熱養生をしたものの圧縮強度は標準養生と同等であり、スラグ石膏系結合材を混入した2成分系では、加熱養生をしたものの圧縮強度が標準養生を上回った。

細骨材の違いを比較した材齢91日圧縮強度を図-5に示す。これから、標準養生、加熱養生とも、石英片岩系の砕砂を使用したモルタルが圧縮強度に最も有利であり、他の細骨材を使用した場合は、ほぼ同等の圧縮強度となった。

2. 3コンクリートによる検討

(1) 目的

モルタル実験の結果から、石英片岩砕砂および硬砂岩砕砂+陸砂Aの組み合わせを選定し、コンクリート実験により、材料・調合を検討した。

(2) 実験方法

検討要因と水準を表-4に示す。練り混ぜは、容量100リットルのパン型ミキサを用い、モルタルの先練り後、粗骨材を投入する方法とした。コンクリートの流動性は、高性能AE減水剤使用量で調整したが、計画よりも減水剤量が多くなった調合では、水結合材比が若干大きくなった。

圧縮強度試験用供試体の養生方法は、標準養生および加熱養生(図-2)の2種類とした。

(3) 実験結果および考察

水結合材比と高性能AE減水剤使用量の関係を図-6に示す。結合材をポルトランドセメント・スラグ石膏系結合材・シリカフェームの3成分系とした場合は、水結合材比の低下とともに高性能AE減水剤使用量が漸増している。しかし、ポルトランドセメントにスラグ石膏系結合材、シリカフェームのどちらかを混入した2成分系の場合は、水結合材比22%を下回ると使用量が急激に増大している。これは、フレッシュコンクリートの流動性に、結合材の構成成分と粒度分布の違いが影響をおよぼすためと考えられる。

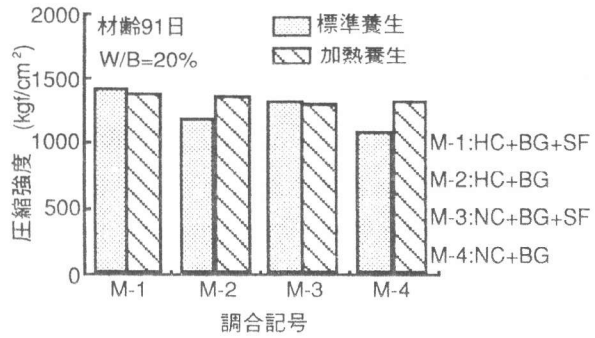


図-4 圧縮強度(結合材の比較)

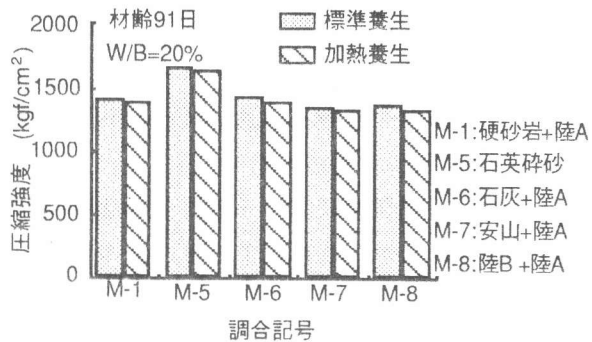


図-5 圧縮強度(細骨材の比較)

表-4 検討要因と水準

	W/B	結合材(質量比)	細・粗骨材	
C-1	18%	HC:BG:SF=7:2:1	石英砕石	
C-2		NC:BG:SF=7:2:1	石英砕砂	
C-3	22%	HC:BG:SF=7:2:1	硬砂岩砕石	
C-4				HC:SF=9:1
C-5				HC:BG=7.5:2.5
共通事項	水量150kg/m³、粗骨材かさ容積0.58m³/m³ スランブ24cm、スランブフロー45cm			
試験項目	○スランブおよびスランブフロー ○圧縮強度(φ10×20cm供試体) 標準養生、加熱養生の2種類を試験			

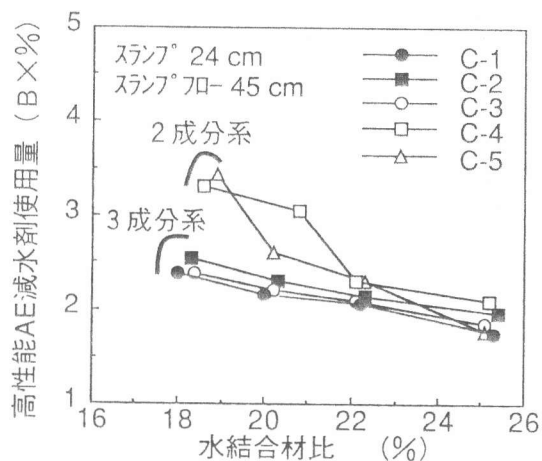


図-6 高性能AE減水剤使用量

標準養生材齢91日における結合材水比と圧縮強度の関係を図-7に示す。本研究で採用した材料の組み合わせの場合、水結合材比25%以下とすることで、いずれの調合も 1000 kgf/cm² 以上の圧縮強度を得ることができたが、材料の組み合わせによって圧縮強度には大きな差が生じた。最も高強度となったのは、早強ポルトランドセメントがベースの3成分系結合材と石英片岩系骨材を使用したコンクリートであり、標準養生で 1800 kgf/cm² 程度となった。これに対し、3成分系結合材と硬砂岩系骨材を使用したものは、10~20%低くなった。また、結合材の組み合わせにより圧縮強度を比較すると、HC+BG+SF > HC+SF > HC+BGの順序であった。

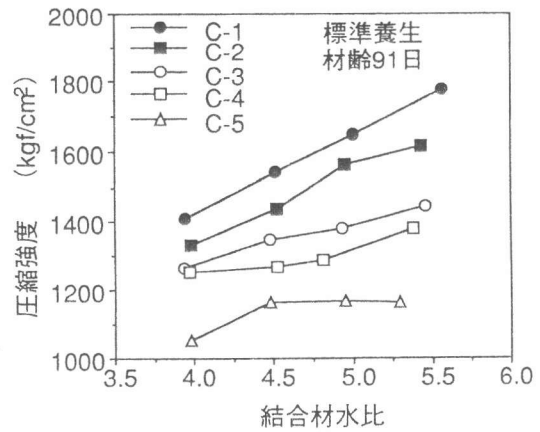


図-7 結合材水比と圧縮強度

材齢91日圧縮強度における標準養生と加熱養生の比較を図-8に示す。これによると、スラグ石膏系結合材の混入量が多いほど、標準養生に対して加熱養生の圧縮強度が高いことが分かる。そこで、NC:BG:SF=7:2:1、NC:SF=9:1、NC=10の3種類の結合材によるペースト(W/B=20%)供試体を作製し、X線回折を行った。供試体はφ5×10cmとし、加熱養生を行った後に材齢7日まで封かん養生を行った。X線回折の結果を図-9に示す。これより、スラグ石膏系結合材を混入したものは、他のものよりもエトリンガイトのピーク(図中、Eで表示)が大きく現れていることが分かる。

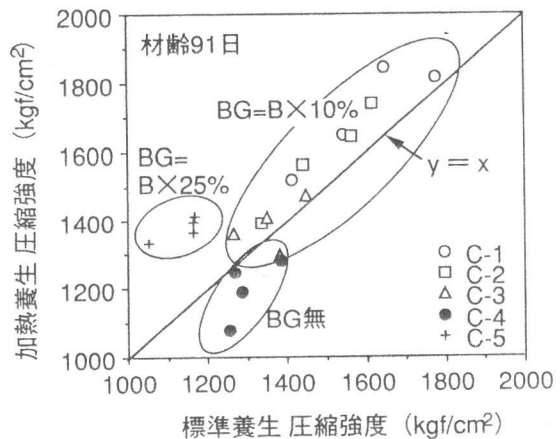


図-8 標準養生と加熱養生の比較

スラグ石膏系結合材を含む3成分系結合材使用のコンクリートの場合、このエトリンガイトの生成量の多さが、初期高温履歴を受ける条件での圧縮強度発現に有利に働いているものと推察される。

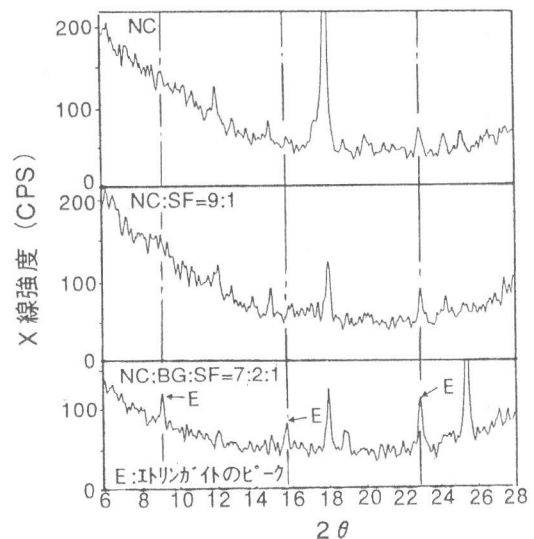


図-9 X線回折結果

3. 柱構造体強度の検討

3. 1 目的

Fc 800、Fc 1000、Fc 1500 を目標とするコンクリートによる柱構造体の強度発現性状を把握するため、柱模擬部材を作製し、構造体強度の調査を行なった。

3. 2 実験方法

(1) 調合

材料・調合の選定実験の結果より、性能および実用性を考慮し、表-5の条件を設定した。結合材としては流動性が良く、高強度が得られる3成分系を採用した。骨材としては、Fc800、Fc 1000には硬砂岩系を、Fc1500には石英片岩系を採用した。

(2)練り混ぜおよび試験測定

練り混ぜには水平2軸型ミキサ（容量1m³）を使用し、モルタル先練り後、粗骨材を投入する方法とした。フレッシュコンクリートの試験項目および圧縮強度用供試体の養生条件を表-5に示す。断熱養生³⁾とは、φ10×20cm供試体を、図-10の断熱養生装置内で養生することで、簡易的に柱の内部温度に近い温度履歴を供試体に与える方法である。

(3)柱模擬部材

柱模擬部材の形状を図-11に示す。断面寸法は、実際の建物を想定し、800×800mmとした。柱の中間部を切り取った状態を模擬するため、上下端部はポリスチレン板（厚100mm）を配して断熱した。コンクリート打ち込み後の部材は、材齢3日で型枠を脱型し、以後、雨のかからない状態で外気温養生を実施した。コンクリート温度測定位置および圧縮強度測定用コア採取位置を図-11に示す。

3. 3 実験結果および考察

(1)フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの性状試験結果を表-6に示す。コンクリートは、現場打ち可能となるようにC-6、C-7をスランプ25cm以上に、C-8をスランプ24cm程度に高性能AE減水剤使用量で調整したが、Fc1500を目標としたC-6は、C-7、C-8に比べ、粘性が高かった。

(2)コンクリート温度

各調合の柱構造体中心部（図-11、①）の温度測定結果を

表-5 検討要因と水準

	W/B	結合材(質量比)	細・粗骨材
C-6	20%	HC:BG:SF=7:2:1	石英碎石・同碎砂
C-7	22%	NC:BG:SF=7:2:1	硬砂岩碎石
C-8	27%	NC:BG:SF=7:2:1	・同碎砂+陸A
共通	水量150kg/m ³ 、粗骨材かさ容積0.58m ³ /m ³		
試験項目	○スランプおよびスランプフロー フロー速度 ○圧縮強度（φ10×20cm供試体） 柱構造体コア、標準養生、封かん養生、断熱養生の4種類を試験		

表-6 フレッシュコンクリートの試験結果

調合	W/B (%)	減水剤使用量 (B×%)	練り混ぜ時間	スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	フロー時間 (S)			空気量 (%)	練り上り温度 (°C)	単位容積質量 (kg/l)
						30cm	40cm	50cm			
C-6	20	2.00	4分30秒	25.0 以上	60.0	2.00	5.37	14.88	1.3	29.4	2.443
C-7	22	2.00	5分00秒	25.0 以上	75.0	1.20	2.04	3.61	0.4	26.9	2.466
C-8	27	1.80	6分00秒	24.0	47.5	1.28	1.31	-	1.3	26.2	2.423

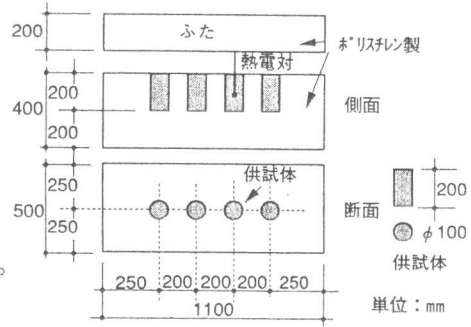


図-10 断熱養生装置

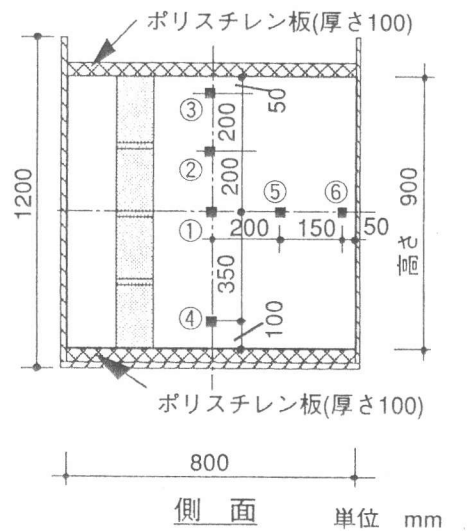
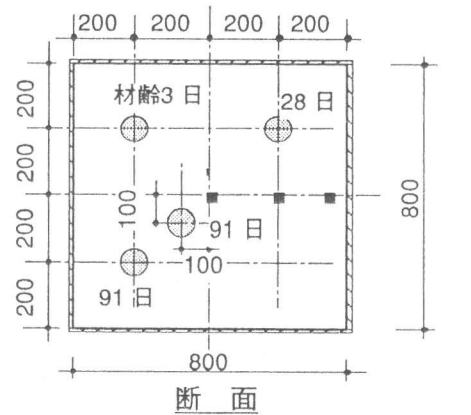


図-11 柱模擬部材詳細

図-12に示す。単位結合材あたりの温度上昇量は、HC+BG+SFでは0.084℃/kg、NC+BG+SFでは0.080℃/kgであった。

調合C-6 (Fc 1500) の柱構造体部位別最高温度を図-13に示す。これによると、上下を断熱することにより、軸方向の温度差は5℃以下となった。また、コア採取位置の温度は中心より約5℃、断熱養生供試体の温度は中心より約15℃低くなった。

(3) 圧縮強度

いずれの調合においても、柱上部から下部にかけてコア供試体側面に現れた粗骨材の面積は約33%程度と一定であり、大きな分離現象は認められなかった。材齢とコアの圧縮強度の関係を図-14に示す。各調合とも材齢3日で高強度が得られ、以後の材齢経過に伴う強度の増進は小さいことが分かる。C-7については、標準養生および断熱養生の圧縮強度を同時に示した。標準養生の強度はコア強度と比較して材齢初期に低く、材齢91日で同等になった。断熱養生は、比較的コア強度に近い強度発現性状を示した。この傾向は、C-6およびC-8についても同様であった。

材齢91日におけるコアおよび各養生供試体の圧縮強度を図-15に示す。これによると、初期に高温履歴を受けた構造体コアにおいても、標準養生と同等以上の強度を発現している。この傾向は、前記のモルタル実験およびコンクリート実験の加熱養生供試体の結果と同様であった。また、いずれの調合も、目標設計基準強度よりも高い圧縮強度が得られた。

4. まとめ

本研究の結果、Fc800~1500kgf/cm²を目標とする超高強度コンクリートの材料・調合の選定、および柱構造体の強度発現性状に関する基礎資料が得られた。

参考文献

- 1) 一瀬賢一・中根 淳・阿部道彦・岡本公夫:各種養生した高強度コンクリートの強度発現性状の比較 (New RC実大施工実験 その27)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.351-352、1992.8
- 2) 黒羽健嗣・早川光敬・伊東靖郎:モルタルの流動性に関する新試験法の提案、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.277-278、1983.9
- 3) 飯島真人・戸祭邦之・黒羽健嗣:設計基準強度600kgf/cm²を目標とした構造体強度の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.545-546、1989.10

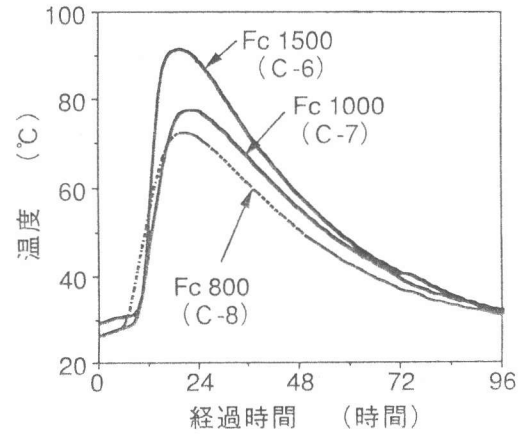


図-12 柱中心部のコンクリート温度測定結果

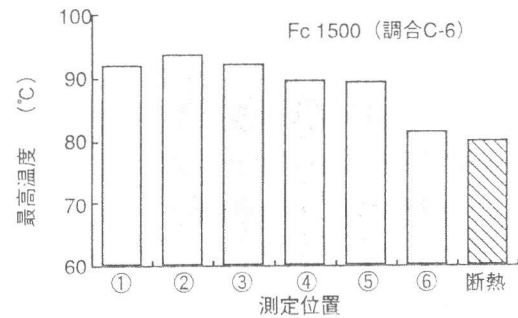


図-13 温度測定位置と最高温度の関係

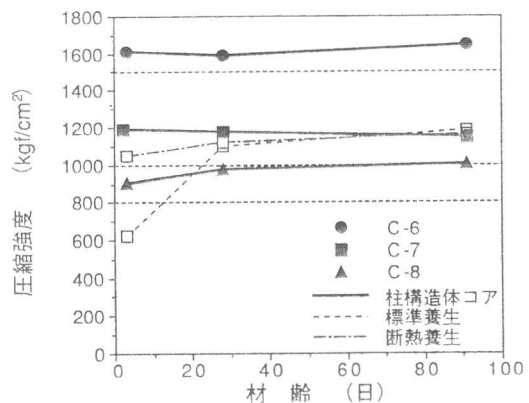


図-14 材齢と圧縮強度の関係

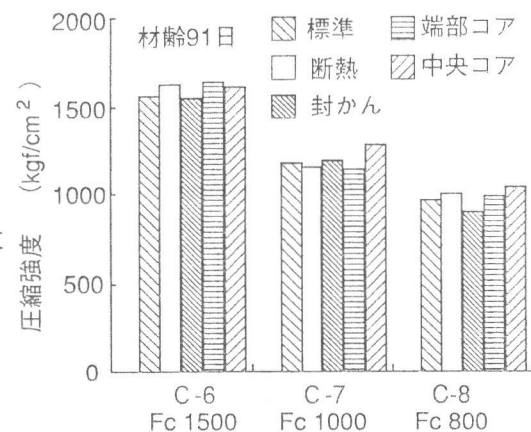


図-15 各養生方法と圧縮強度の関係