

RC 超高層建物用コンクリートに関する研究 (その7)

——高強度コンクリート部材の強度発現特性に関する考察——

淵田 安 浩 長 尾 覚 博
一 瀬 賢 一 中 根 淳

Experimental Study on High-strength Concrete for High-rise Reinforced Concrete Building (Part 7)

——Study on Strength Developments of High-strength Concrete Members——

Yasuhiro Fuchita Kakuhiro Nagao
Ken-ichi Ichise Sunao Nakane

Abstract

This report describes the results of an experimental study on full-scale members of high-strength concrete with a specified concrete strength (F_c) of 60MPa. The principal results are stated below: ① Strength developments of small-section members are more advantageous than those of large-section members, and strength differences between members are small in high-strength concrete. It was confirmed that high-strength concrete is difficult to dry and is affected by high-temperature history from hydration heat in early age. ② Vertical members of F_c 60MPa, particularly columns, don't exhibit vertical strength differences in comparison with normal concrete. It was found that the movement of water and the effect of consolidation are slight in the high-strength members of fresh concrete. ③ It was determined that F_c 60MPa concrete has a low standard of drying and differences between members and parts as compared with normal concrete.

概 要

本報告では、構造物実大模擬部材を使用した F_c 60MPa 級の高強度コンクリート実証試験結果をまとめ、普通コンクリートとの性状を比較した。主な結果は以下の通りである。① 高強度となるほど部材間の強度差は小となり、 F_c 60MPa 級では、大断面より小断面の方が強度発現が有利となる。これは、高強度ほど乾燥が進みにくく、むしろ水和熱による材令初期の高温履歴の影響が顕著なためと推察される。② F_c 60MPa 級の垂直部材(特に柱部材)では普通コンクリートと異なり、高さ方向の強度差がほとんど認められない。これは、フレッシュコンクリート部材中の水分移動が小さく、圧密の影響が少ないことによると推察される。③ F_c 60MPa 級のコンクリートは、普通コンクリートと比較して、組織が緻密であるため、乾燥の度合いが少なく、各部材・部分の強度差が小さいと推察される。

1. はじめに

鉄筋コンクリート造は、一般に優れた耐火性、経済性、耐久性等により用いられてきた。それらの優れた性能を取り入れ、鉄筋コンクリート構造物を建築するためにコンクリートおよび鉄筋を高強度化してきた経緯がある。RC造の高強度化に関して、高さ60mを超える超高層建物が施工されるようになり、建設省総合開発プロジェクト「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」(略称: NewRC)の最終報告¹⁾がなされ、現在

F_c 60MPa級のコンクリートについては、ほぼ実用化段階である。しかしながら、強度発現の生ずるメカニズムについて調査された例は少ない。

本報告では、高強度コンクリートの強度発現のメカニズムを調査するため、 F_c 60MPa・48MPa級の高強度コンクリートおよび F_c 21MPa級の普通コンクリートの実験結果から、①部材間、②部材の高さ方向の強度発現に及ぼす影響について、主要な要因として、温度履歴、水分移動(含水率の変化)、圧密を取り上げ、高強度コンクリート特有の強度発現特性について検討した。

表-1 使用したコンクリートの調合(単位: kg/m³)

W/C(%)	W	C	S	G	Ad(C×%)	Air'(%)	S/A(%)	Sl'(cm)	Sf'(cm)
59.4	187	315	802	977	0.25	4.0±1	45.5	18.0±2.5	-
38.7	167	431	781	994	1.40	3.0±1	45.8	21.0±2.5	-
29.0	165	569	710	975	1.60	2.5±1	42.7	23.0±2.5	50±15

ここでW/C:水セメント比, W:単位水量, C:単位セメント量, S:単位粗骨材量,
G:単位細骨材量, Ad:混和剤, Air':目標空気量, S/A:細骨材率,
Sl':目標スランプ値, Sf'目標フロー値

表-2 模擬部材の寸法

模擬部材	形状(単位: mm)
柱	Fc60: 1,000×1,000角 Fc21: 600×600角
梁	幅600×せい800
壁	200厚
スラブ	200厚

表-3 調査項目一覧

項目	方法等
圧縮強度	抜き取りコアによる強度試験
単位容積質量	抜き取りコアによる
温度履歴	部材内部の温度測定 熱電対
圧密力(側圧)	コンクリート内部の圧力 土圧計
含水率	部材内部の湿潤度の測定 電極法 ³⁾
水セメント比	打設直後と安息状態に達した時点の測定 質量による方法・塩酸溶解熱法
空気量	フレッシュ時および硬化後の部材 空気室圧力方法・リニアトラバース法 JIS A 1128
細孔量	硬化後の部材 ポロシチメータ法 ASTM C457-71

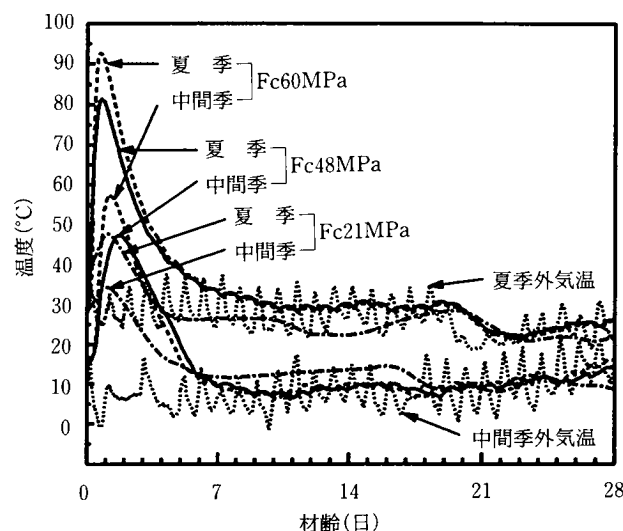


図-1 柱中心部の温度履歴

2. 実験の概要

実験は、表-1に調合を示す高強度コンクリートおよび普通コンクリートについて、柱・梁・壁・スラブの実大構造物模擬試験体の実験結果に基づき、温度履歴、水分移動(含水率の変化)、圧密力、水セメント比、単位容積質量および細孔量(空気量)の変化を取り上げ検討した。また、季節間の差異を検討するため、実験は夏季(8月)および中間季(3月)に行った。なお、普通コンクリートについては、筆者らの過去に行った実験データ²⁾に基づき、以下のデータおよび考察に盛り込んだ。水セメント比29.0%および38.9%の調合を高強度コンクリート(Fc60およびFc48)、59.4%を普通コンクリート(Fc21)と呼ぶ。

表-2に本実験に用いた模擬部材の概寸を示す。表-3に調査項目およびそれらの測定方法の一覧を示す。表中で電極法³⁾とは、電極をコンクリート中に埋設し、電極間の抵抗および熱電対による温度の測定値から、あらかじめ測定した校正曲線により含水率を求める方法である。

3. 実験の結果および考察

3.1 部材間の検討

3.1.1 温度履歴 図-1に各季節各強度ごとの柱部材中心部の温度履歴を示す。高強度コンクリートで雰囲気温度が高いほど、最高温度に達する時間が短く、外気温とはおよそ5日から7日で同調した。

表-4に部材内最高温度と平均圧縮強度を示す。普通コンクリートでは垂直部材の強度が高く、水平部材が低い傾向にあるのに対して、高強度コンクリートでは打込み温度および最高温度の低い、断面の薄い部材ほど強度発現は大きかった。また、表-5に最高温度と圧縮強度の相関を示し、2者の関係を確認した。普通コンクリートでは最高温度が高いほど強度が大き(正の相関)、高強度コンクリートの中間季では逆に、温度が低いほど強度が大き(負の相関)。以上のように、相関関係を調べることによって、普通コンクリートでは高温ほど、高強度では低温ほど強度が大き(負の相関)ことが明らかとなった。

表-4 最高温度と圧縮強度

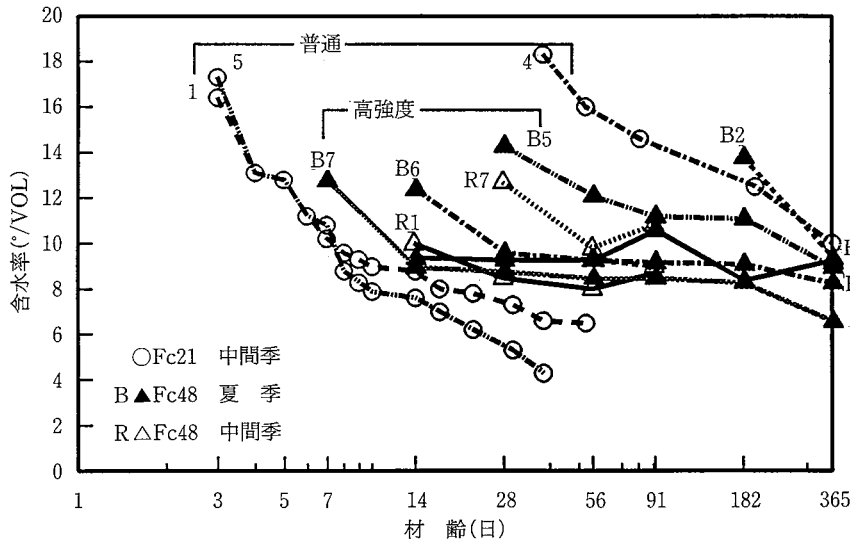
(単位: °C, MPa)

Fc 部材	夏季					中間季				
	打込み 温度	最高 温度	圧縮強度		打込み 温度	最高 温度	圧縮強度			
			4週	13週			4週	13週		
21	柱	29.0	51.0	26.0	26.5	19.5	37.0	23.6	26.1	
	梁		37.0	22.4	23.6		30.8	20.2	24.2	
	壁		37.0	26.8	29.0		25.0	23.2	26.6	
	スラブ		30.5	22.8	20.6		21.5	21.5	26.0	
48	柱	31.4	81.1	48.1	53.1	14.0	47.3	56.3	63.4	
	梁		73.0	44.1	47.8		32.9	56.7	67.6	
	壁		56.7	47.2	53.0		22.4	60.1	69.5	
	スラブ		47.9	45.0	47.1		16.9	52.8	61.9	
60	柱	31.0	92.3	68.6	74.9	13.0	57.2	76.7	83.3	
	梁		86.5	64.4	68.3		47.5	78.7	85.8	
	壁		67.0	66.3	71.0		30.7	81.3	90.4	
	スラブ		59.6	68.3	73.5		26.6	80.6	87.6	

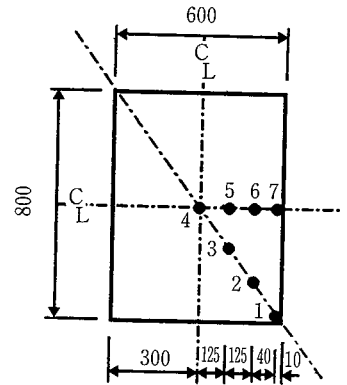
表-5 最高温度と圧縮強度の相関

	夏季		中間季	
	4W	13W	4W	13W
Fc21	0.556	0.533	0.272	-0.248
Fc48	0.307	0.390	0.152	-0.094
Fc60	-0.177	-0.052	-0.959	-0.869

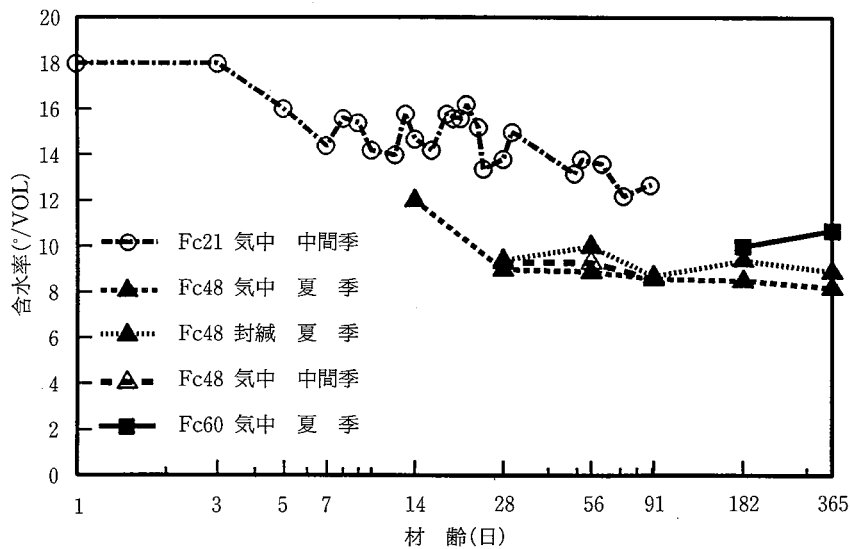
正の相関: 大きい値と大きい値の相関大
負の相関: 小さい値と大きい値の相関大
0に近い相関: 関連が少ない



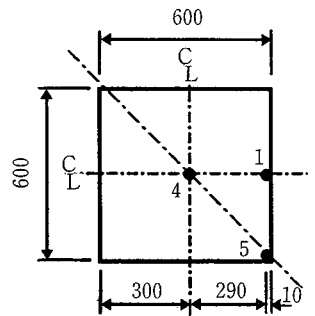
(a)部材



高強度コンクリート (Fc48) 梁



(b)現場養生供試体



普通コンクリート (Fc21) 柱

電極の埋設位置

図-2 含水率の経時変化

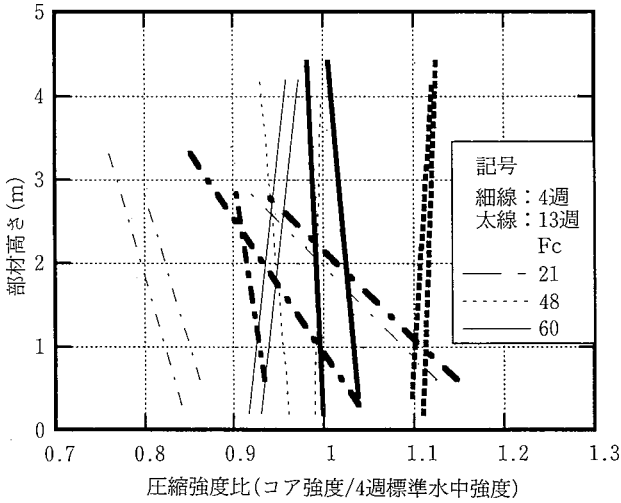


図-3 コア強度比の高さ方向分布

3.1.2 含水率の変化 図-2 に(a)高強度および普通コンクリートの構造物躯体内部と(b)現場養生供試体の含水率変化状況を示す。高強度コンクリートでは、含水率差が部材内外および部材間で存在せず、各部材とも含水率変化を示したので、図(a)には最小断面が同寸法となるように、高強度に梁部材、普通に柱部材を示した。

高強度では1カ月から1年を経過しても、部材内外においておよそ10%付近で変化を示さなくなり、自由水が水和により結晶水となり(内部乾燥)、これ以上乾燥が進まないものと推察される。また、現場養生供試体でも同様に1カ月から1年を経過しても養生の差が現われず、外部からの乾燥の影響がほとんどないといえる。これとは逆に、普通コンクリートでは元の含水率が高いこともあるが長期間を経過しても、含水率変化が一定に落ち着く傾向がみられず、内外の水分移動が長期的に続くと考えられる。完全にセメントが水和するとされる水セメント比よりも大きいこともあり、自由水が外部に完全に逸散していると推察される。

また、試験体の大きさが含水率変化に及ぼす影響は、高強度コンクリートより普通コンクリートの方が大きいことを確認した。高強度コンクリートは、調査の段階から単位水量が少ないこともあり、部材中の含水率変化および部材中の含水率の内外勾配は小さいといえる。

したがって、高強度コンクリートは、普通コンクリートと比較して、どのような養生条件下においても、外部からの乾燥の影響を受けにくいコンクリートであるといえる。

3.2 高さ方向の検討

3.2.1 圧縮強度 図-3 に4週標準水中養生供試体強度に対する柱部材のコア強度比の高さ方向分布を示す。この図によれば、高強度コンクリートでは部材内高さ方向の強度分布は存在しないが、普通コンクリートでは部材の上方となるにしたがって、強度発現が抑えられ、圧縮強度比が小さくなることがわかる。また、13週でも普通コンクリートでは強度比が0.9に達しない部分がある

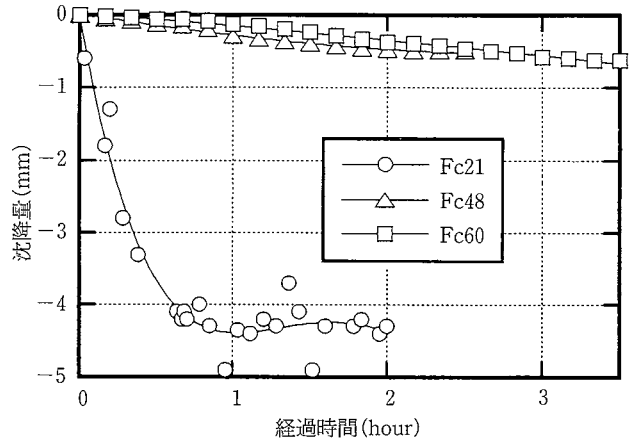


図-4 沈降量の経時変化

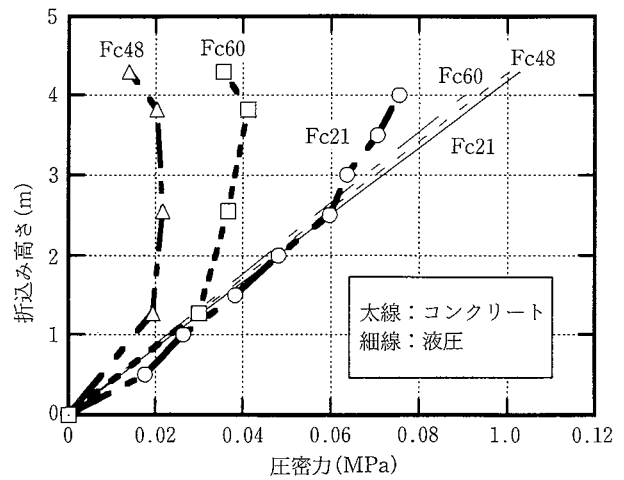


図-5 柱内圧密力の高さ方向分布

のに対して、高強度では4週の時点から0.9を超えており、柱部材高さ方向での強度差が小さく、強度管理上も容易であるといえる。

3.2.2 圧密力 図-4 に柱天端で測定した沈降量の経時変化を示す。普通コンクリートと高強度コンクリートでは沈降量が大幅に異なる。図-5 に高強度および普通コンクリートの柱内圧密力の変化状況を示す。柱内の圧密力分布は、普通コンクリートおよび高強度コンクリートいずれにおいても、打込み高さの低い部分でほぼ液圧分布を示した。

高強度コンクリートでは、フレッシュ状態でモルタルの粘性が高く、組織が緻密であるため、沈降量が小さく、自由水の移動が非常に少ないと考えられ、柱試験体上部まで打設完了する途中で、下部が硬化を始めたと考えられ、圧密力の解放が観察された。これは、高強度コンクリートでは、単位容積当たりにも占める粉体の量が多く、一般に凝結が早く進行すると考えられるためである。

一方、普通コンクリートでは沈降量も大きく、自由水の移動が多いと考えられ、コンクリートの組織が圧密の影響を受けやすく、高さ方向の強度差を生ずる²⁾。

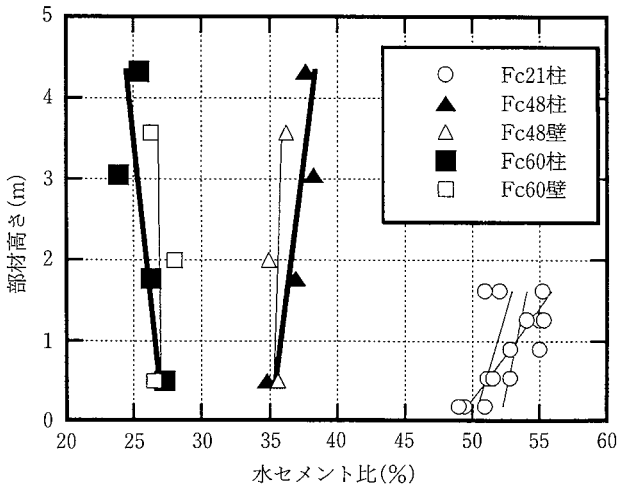


図-6 水セメント比の高さ方向分布

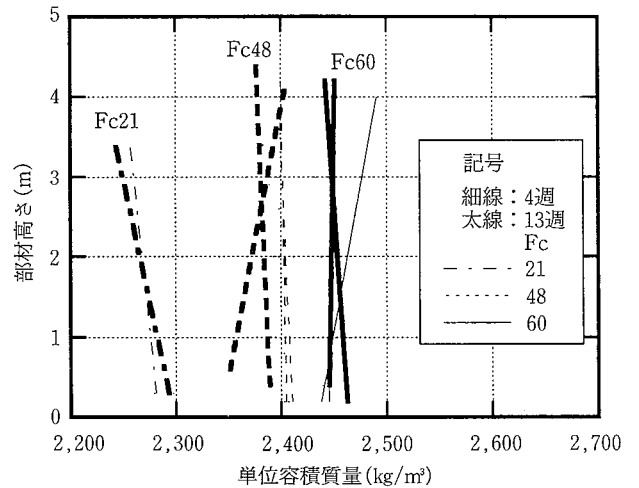


図-7 単位容積質量の高さ方向分布

表-6 主要な要因と圧縮強度の相数

関係	相関係数		
	Fc21	Fc48	Fc60
高さ方向と圧縮強度	0.997999	0.526259	0.790602
高さ方向と水セメント比	0.946667	0.845077	0.724631
高さ方向と単位容積質量	0.998985	0.699101	0.346625

3.2.3 水セメント比 図-6 に垂直部材の打設後、沈降が停止した時点（安息状態）での水セメント比を示す。安息状態は図-4 で沈降量に大幅な変化が認められなくなった時点を目指す。高さ方向の強度差を生ずる要因として、調合に応じて沈降量の差が大きく異なり、水分移動が生じたと考えられる。ここで、高強度コンクリートでは高さ方向の差異を生じていないが、普通コンクリートでは上方ほど水セメント比が大きくなり、強度発現が小さかったことを裏付けている。なお、図中の普通コンクリートの結果は、文献⁹⁾に基づいた。

3.2.4 単位容積質量 図-7 に単位容積質量の高さ方向分布を示す。高強度コンクリートでは高さ方向に差異は認められないが、普通コンクリートでは上方ほど単位容積質量が小さくなった。

3.2.5 各要因間の相関 表-6 に主要な要因と圧縮強度の回帰分析による重相関係数を示す。普通コンクリートでは圧縮強度の高さ方向分布の相関が強いことは明らかである。強度発現の高さ方向の差異を生ずる要因である水セメント比および単位容積質量は、小さい強度ほど相関が強いといえる。

以上のように、高強度コンクリートでは沈降量は小さく、水セメント比から判断される水分移動は認められず、強度発現の要因と考えられる高さ方向の物性的な差異がないことを確認した。これに対し、普通コンクリートでは水セメント比および単位容積質量が圧縮強度の高さ方向分布の要因として最も大きなものと考えられる。

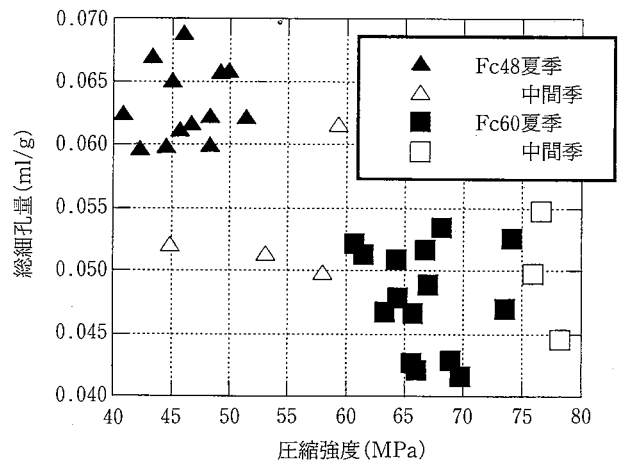


図-8 総細孔量と圧縮強度の関係

3.3 強度発現の微細構造による検討

3.3.1 細孔量 図-8 に総細孔量と圧縮強度の関係を示す。Fc48 より Fc60 の方が総細孔量は少なく、強度発現が有利であるといえる。高さ方向分布や季節間の差異はごく少量で水セメント比の違いによって、細孔分布が異なり強度発現に影響を与えたものと考えられる。

3.3.2 空気量 図-9 に空気量と圧縮強度の関係を示す。調合時に設定した空気量は異なるが、高強度コンクリートでは少なく、普通コンクリートは多いことが観察された。これは、高強度コンクリートでは、フレッシュ時からコンクリート中の組織が緻密であることによると考えられる。3.3.1 で述べた微細な細孔量と圧縮強度の関係と一致している。

また、図-10 に空気量の高さ方向分布を示す。普通コンクリートでは、上方ほど空気量が多くなる傾向であるが、高強度コンクリートでは高さ方向とは関係なく空気量が分布することが観察できた。このことは、高強度で高さ方向で強度差が生じないことの要因でもと考えられる。

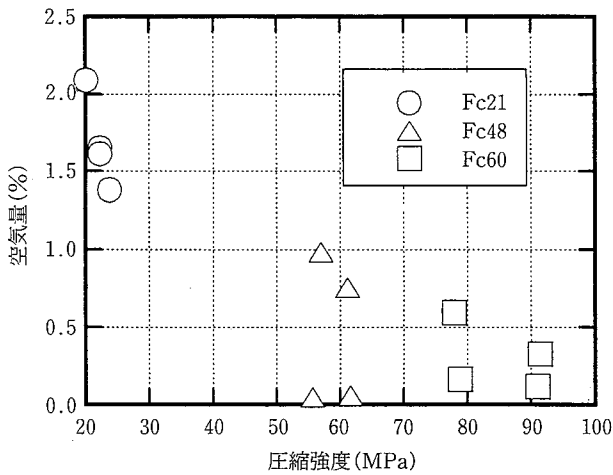


図-9 圧縮強度と空気量の関係

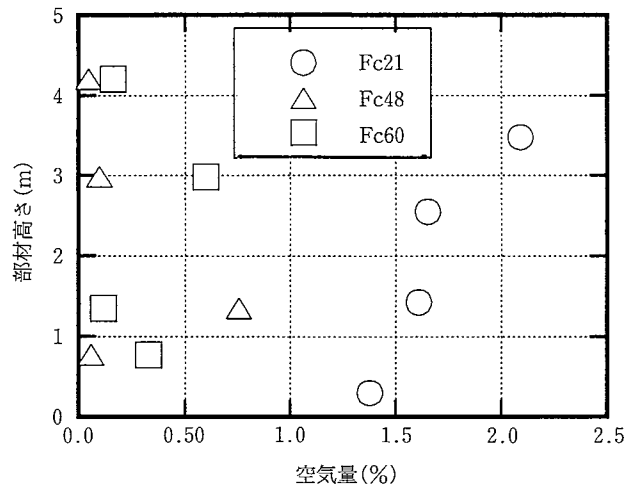


図-10 空気量の高さ方向分布

4. 結論

本論文では高強度コンクリートにおける強度発現の要因について、(1)部材間、(2)部材の高さ方向による強度発現の影響を、主に温度履歴、水分移動(含水率の変化)、圧密の観点から考察し、高強度コンクリート特有の強度発現性状について検討した。また、超高層建物用コンクリートに関する強度管理法等については前報までに報告した²⁾。以下に、結果の要約を示す。

① 高強度コンクリートとなるほど部材間の強度差は小となり、Fc60MPa級では、大断面より小断面の方が強度発現が有利となる。これは、高強度コンクリートほど乾燥が進みにくく、水和熱による材令初期の高温履歴の影響が顕著なためと推察される。

② Fc60MPa級の垂直部材(特に柱部材)では、普通コンクリートと異なり、高さ方向の強度差がほとんど認められない。これは、フレッシュコンクリート部材中の水分移動が小さく、圧密の影響が少ないことによると推察される。

③ Fc60MPa級の高強度コンクリートは、普通コンクリートと比較して、組織が緻密であるため、乾燥の度が少なく、各部材・部分の強度差が小さいと推察される。

参考文献

- 1) 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工法分科会報告書, (財)国土開発技術センター, (1993)
- 2) 高橋, 他: 構造用躯体コンクリートの強度管理に関する研究(その1~その9), 大林組技術研究所報, No.16~31, (1978~1985)
- 3) 田畑, 洪, 鎌田: 電極法によるコンクリート含水量の測定らによる含水率測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A, p.117~118, (1976)
- 4) 鎌田, 吉野, 他: 水銀圧入法の応用による構造体コンクリートの強度推定の試み(その1~その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), p.107~110, (1977)
- 5) 久保田, 高橋, 中根, 永井: 構造体コンクリートの強度管理に関する研究(その21), 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), p.491~492, (1981)