高強度コンクリートを用いた実大柱部材の 材齢15年における強度性状および中性化 STRENGTH AND CARBONATION OF HIGH-STRENGTH CONCRETE IN FULL-SCALE COLUMNS AT THE AGE OF 15 YEARS

杉山 央*, 榊田佳寛**, 阿部道彦***, 安田正雪****
*Hisashi SUGIYAMA, Yoshihiro MASUDA, Michihiko ABE
and Masayuki YASUDA*

This paper describes a study on the long-term strength development and carbonation of high-strength concrete in full-scale models. Four types of full-scale columns were made of two high-strength concretes, which design strength were 60 and 100 N/mm² (Fc60 and Fc100), respectively. Core specimens were drilled out of the columns at the age of 15 years. The compressive strength and carbonation depth of the core specimens were tested. As a result, the increase of strength from 91 days to 15 years was clearly recognized in both Fc60 and Fc100 concretes. The strength of core specimens taken from the center of the column was higher than that of core specimens taken from the corner of the column. The carbonation depth at 15 years is 0 mm, in both Fc60 and Fc100 concretes. However, the consumption of Ca(OH)₂ and production of CaCO₃ were revealed by XRD analysis. C₃S and C₂S still remained in both Fc60 and Fc100 concretes at 15 years.

Keywords: *High-strength concrete, Full-scale experiment, Core specimen, Long-term strength development, Carbonation, X-ray diffraction analysis*

高強度コンクリート, 実大実験, コア供試体, 長期強度発現, 中性化, X線回折

1. はじめに

鉄筋コンクリート造建築物の高層化を図るため、近年、建築工事において高強度コンクリートが広く使用されている。建築分野における高強度コンクリートは、1980年代に大手建設会社が高層鉄筋コンクリート造集合住宅の設計・施工法を競って開発した時の要素技術として研究開発が進められた。当初はスランプが15cm前後のコンクリートであったが、やがて流動化剤や高強度用高減水性混和剤（現在の高性能AE減水剤）の開発により、スランプが21cm程度の軟練りコンクリートが使用されるようになった。1988年から5箇年にわたって実施された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¹⁾」（略称：「総プロNew RC」）では、設計基準強度600kgf/cm²（60N/mm²）でスランプが21～25cmの高強度コンクリートを対象として、使用するセメント・骨材・混和材料の品質基準およびそれらの材料を用いたコンクリートの調合方法・施工方法・品質管理基準が作成された。さらに、設計基準強度600kgf/cm²を超えるコンクリートを開発するためのコンクリート用材料の開発、品質評価方法、調合方法および施工方法についても検討が進められた。その研究成果はJIS、学協会の仕様書、指針等に幅広く有効活用され²⁾、今日の高強度コンクリートの技術の普及に大きく寄与した。

このように建築工事に用いられる高強度コンクリートは近年急速

に普及した材料であるが、その歴史は比較的浅く、長期的な性状については明らかにされていない。総プロNew RCから15年を迎えたが、本研究は当時作製され、以後は屋外で暴露されている実大試験体を調査することにより、高強度コンクリートの長期性状を明らかにすることを目的とした。総プロNew RCでは高強度コンクリートを用いた実大施工実験が計画され、設計基準強度600kgf/cm²のコン

写真1 柱試験体の外観 (右からNo.2, No.3, No.4, No.5)

* 国土交通省国土技術政策総合研究所住宅生産研究室
室長・工博

** 宇都宮大学工学研究科地球環境デザイン学専攻
教授・工博

*** 工学院大学工学部建築学科 教授・工博

**** 東洋建設株式会社美浦研究所材料研究室 主任研究員

Director, Housing Production Division, National Institute for Land Infrastructure and Management, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture, Utsunomiya Univ., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kogakuin Univ., Dr. Eng.
Senior Researcher, Technical Research Institute, Miho, Toyo Construction

クリートを用いたラーメン架構（2層）の施工実験、ならびに設計基準強度1000kgf/cm²（100N/mm²）および600kgf/cm²のコンクリートを用いた実大柱部材の施工実験が行われた³⁾。本研究では後者の実大柱部材試験体（以降、柱試験体）を対象とし、材齢15年におけるコア強度および中性化深さを調査した。また、柱試験体からコンクリート試料を採取してX線回折法により組成分析を行った。本研究の成果は、高強度コンクリートの長期的な性状を明らかにするための重要な基礎資料となり、今後高強度コンクリートの適切かつ合理的な調合設計・製造方法を確立することに活用されることが期待される。

写真1に研究対象である高強度コンクリートを用いた柱試験体を示す。なお、総プロNew RC実施当時は重力単位が用いられていたが、その後国際単位系であるSI単位へ移行したため、本研究ではSI単位に従って強度等を表記することとする。

2. 実験概要

2.1 柱試験体の概要

(1) コンクリートの使用材料および調合： 使用材料の種類および物性値を表1に示す。なお、表1中の高強度用高減水性混和剤は柱試験体作製当時の呼称であり、今日の高性能AE減水剤と同じである。コンク

リートの調合およびフレッシュ性状の試験結果を表2に示す。コンクリートの製造は、容量3.0m³の強制二軸ミキサを備えたレディーミクストコンクリート工場で行った⁴⁾。Fc60は結合材として普通ポルトランドセメントのみを使用したAEコンクリートであり、スランブ21～25cm、空気量3%、材齢91日で設計基準強度60N/mm²をそれぞれ満足するように調合を定めた^{5),6)}。Fc100は結合材として普通ポルトランドセメントとシリカフュームを質量比で9:1に混合して使用したnon-AEコンクリートであり、空気量2%以下、材齢91日で設計基準強度100N/mm²をそれぞれ満足するように調合を定めた^{5),6)}。スランブは25cmを目標としていたが、先行して練混ぜたFc100-Aの

表1 使用材料の種類および物性値

セメント	普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm ³)
混和材	シリカフューム(比表面積:20000cm ² /g、密度:2.20g/cm ³)
細骨材	①鹿島産陸砂(表乾密度:2.62g/cm ³ 、吸水率:1.25%、FM:2.65) ②葛生産石灰砕砂(表乾密度:2.69g/cm ³ 、吸水率:1.66%、FM:2.59) ※細骨材は①と②を質量比7:3の割合で混合して使用した。
粗骨材	岩瀬産砕石(表乾密度:2.66g/cm ³ 、吸水率:0.59%、FM:6.71、実積率:61.1%)
化学混和剤	(Fc100用) アミノスルホン酸系高強度用高減水性混和剤 (Fc60用) ポリカルボン酸系高強度用高減水性混和剤

表2 コンクリートの調合およびフレッシュ性状の試験結果

コンクリート 記号	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	調合						フレッシュ性状の試験結果 (荷卸時)			
			単位量(kg/m ³)						スランブ (cm)	スランブフロ (mm)	空気量 (%)	コンクリート 温度(℃)
Fc100-A	20.0	39.6	160	720	80	531	910	C×1.7%	23.0	436×436	1.3	26.0
Fc100-B	20.0	39.6	160	720	80	531	910	C×2.0%	25.9	608×598	1.0	27.0
Fc60	27.0	44.1	165	611	-	713	910	C×1.9%	25.4	675×620	3.7	26.0

※ アミノスルホン酸系高強度用高減水性混和剤(Fc100用)、ポリカルボン酸系高強度用高減水性混和剤(Fc60用)

図1 柱試験体No. 2の形状・寸法・コア採取位置

図2 柱試験体No. 3、No. 4およびNo. 5の形状・寸法・コア採取位置

表3 柱試験体の作製条件

試験体	コンクリート 調合	型枠の種類	打込み方法	養生方法
柱No. 2	Fc100-A	合板型枠	VH分離打ち	材齢1日で脱型、その後 6日間シート掛け養生を 実施した。
柱No. 3	Fc100-B	合板型枠	一体打ち	
柱No. 4	Fc60	鋼製型枠	一体打ち	
柱No. 5	Fc60	合板型枠	一体打ち	

※合板型枠の厚さは12mm、鋼製型枠の厚さは3.2mmである。

スランブが目標値より小さかったため、Fc100-Bでは化学混和剤の添加量を増やして目標値を満足するようにした。コンクリートの製造から型枠への打込みまでに要した時間は30～40分であった⁴⁾。なお、表2に示したフレッシュ性状の試験結果は荷卸時における試験結果である。

(2) 柱試験体の種類： 柱試験体の形状・寸法を図1および図2に示す。また、柱試験体の作製条件を表3に示す^{3), 4)}。柱No.2および柱No.3は設計基準強度を100N/mm²としており、柱No.2では調合Fc100-Aのコンクリートを、柱No.3では調合Fc100-Bのコンクリートをそれぞれ使用した。柱No.2および柱No.3に共通して、型枠には合板（厚さ12mm）を使用した。柱No.4および柱No.5は設計基準強度を60N/mm²としており、柱No.4では鋼製型枠（厚さ3.2mm）、柱No.5では合板型枠を使用した。なお、当初は柱No.1（設計基準強度100N/mm²、調合Fc100-A、鋼製型枠使用、VH分離打ち）も作製したが、材齢15年を迎える以前に解体している。

(3) コンクリートの打込みおよび養生： コンクリートの打込みは1991年10月8日に実施された。場所は茨城県つくば市の建設省建築研究所（現在は独立行政法人建築研究所）内の実験場である。表3における打込み方法のうち、VH分離打ちとは梁下までシュートを用いてコンクリートを打ち込んだ後、柱・梁接合部の梁筋を落とし込み、再度梁筋の上からコンクリートを打ち込む方法である。ただし、実際には柱・梁接合部の梁筋は設置しなかった。また、一体打ちとは、梁筋が最初から設置してある型枠内に連続してコンクリートを打ち込む方法である³⁾。コンクリートの打込みは最大吐出量65m³/hのブーム式ポンプ車（ブーム実長22.4m）を用い、VH分離打ちでは圧送管先端のフレキシブルホースを型枠の最下部まで挿入し、コンクリートの天端上昇にともなってホースを引き上げ、梁下すなわち図1における柱・梁接合部の下端までコンクリートを打ち込んだ。その4時間20分経過後、柱・梁接合部のコンクリートを打ち込んだ。また、一体打ちでは梁筋の上部からコンクリートを落とし込み、柱試験体の天端までコンクリートを連続して打ち上げた。コンクリートの打込み速度は25m³/hとした⁴⁾。材齢1日に脱型し、材齢7日までビニールシートで柱試験体全面を覆って養生した。これ以降は写真1に見られるように日射や雨がかり等を防ぐものは設置せず、屋外に暴露した。表4に

試験体作製から材齢15年の試験までの気象条件を示す。日平均気温の年平均値は、東京に比べて2～3℃低い環境である。また、柱試験体と同じコンクリートを用いて標準養生円柱供試体（φ100×200mm）を作製した。

2.2 実験方法

(1) コア採取および圧縮強度試験： 図1および図2に柱試験体からのコア採取位置を示す。1つの柱試験体につき中央部および隅角部の2箇所から鉛直方向に高さ2900mmのコアを採取した。採取したコアは、所定の高さ位置で長さ200mmに切断・研磨し、圧縮強度試験に供した。試験材齢は28日、91日および15年である。材齢28日および91日の試験結果については、すでに山浦らにより報告されている⁷⁾。材齢15年については、2007年6月28日にコアの採取、切断および研磨を行い、翌日に圧縮強度試験を実施した。正確には材齢15年8ヶ月である。標準養生円柱供試体については、材齢28日および91日に圧縮強度試験を実施している。

(2) 中性化深さ試験： 材齢15年において、柱No.3および柱No.5の図2に示す位置より中性化深さ試験に用いるコア試験体を採取し、円柱の中心軸と平行方向に割裂させた。割裂面にフェノールフタレイン1%溶液を噴霧した後、JIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」に従って中性化深さを測定した。

(3) X線回折分析： 材齢15年において、図2に示すように柱No.3および柱No.5の中央部、隅角部および表面部（中性化深さ測定用試験体の上面部）からコンクリート小片を採取し、ハンマーを用いて5mmのふるいを通過して2.5mmのふるいにとどまる大きさに破碎した。水和反応を停止させるため、アセトンに約24時間浸した後、真空凍結乾燥器を用いて、温度-50℃、真空度7.0Pa以下の条件で3日間乾燥させた。続いて、乾燥終了後の小片に内部標準物質として酸化マグネシウム（MgO）を内割りで20mass%加え、遊星型ボールミルを用いて微粉砕し、X線回折分析用の試料とした。X線回折分析における測定条件は、ターゲット：Cu、管電圧：40kV、管電流：20mA、測定範囲：2θ=5～70deg、ステップ角度：0.02deg、計数時間：1秒である。

表4 茨城県つくば市の気象条件

年	日平均気温の 年平均値(℃)	日最高気温の 年平均値(℃)	日最低気温の 年平均値(℃)	最高気温 (℃)	最低気温 (℃)	湿度の 年平均値 (%)	降水量(mm)	日照時間 (h)	降雪(cm)
1991	14.1	19.1	9.3	36.8	-8.5	75.0	1841.0	1804.1	1
1992	13.6	18.9	8.6	36.9	-7.1	76.0	1282.0	1909.1	18
1993	13.1	18.2	8.3	33.2	-7.3	77.0	1380.5	1725.7	0
1994	14.4	19.9	9.4	37.0	-8.7	75.0	1050.5	2130.9	38
1995	13.7	19.2	8.6	36.0	-8.3	74.0	1159.5	2070.7	1
1996	13.2	18.7	8.0	37.8	-8.4	75.0	1082.5	2092.8	28
1997	14.2	19.7	9.0	35.9	-7.5	76.0	1002.5	2184.7	2
1998	14.3	19.4	9.7	35.9	-7.1	81.0	1523.0	1568.5	32
1999	14.6	20.2	9.4	35.0	-8.1	73.0	1164.5	2077.0	2
2000	14.4	19.9	9.4	35.7	-7.6	70.0	1382.0	2079.0	6
2001	13.8	19.5	8.6	36.6	-9.4	69.0	1220.5	2100.6	28
2002	14.2	19.6	9.1	35.9	-6.9	72.0	1069.5	2062.3	0
2003	13.6	18.7	8.9	33.8	-8.6	75.0	1385.5	1762.5	10
2004	14.8	20.4	9.5	37.3	-7.0	74.0	1606.5	2232.5	7
2005	13.7	19.2	8.6	34.4	-7.4	74.0	1132.0	2067.9	27
2006	14.2	19.0	9.6	34.6	-7.5	77.0	1616.5	1672.1	26
2007	15.4	20.7	10.5	37.7	-5.3	75.0	1085.5	1980.8	0

※気象庁統計データによる。

※1991年10月に柱試験体作製。2007年6月に材齢15年コア採取。

3. 実験結果および考察

表5にコア供試体の圧縮強度試験結果を示す。なお、本研究では材齢15年における高強度コンクリートの強度性状を主対象としているが、表5には既発表⁷⁾である材齢28日および91日の試験結果も示した。以降では、これらも含めて考察を行う。材齢91日では柱No.2中央部および柱No.3隅角部で設計基準強度に到達していないコア供試体も見られたが、コア平均強度はそれぞれの柱試験体で設計基準強度を満足した。材齢15年ではすべてのコア供試体が設計基準強度を満足した。

3.1 実大柱部材の垂直方向における強度分布

図3にコア供試体の採取高ささと強度の関係を示す。毛見ら⁸⁾、Kasaiら⁹⁾の研究報告に代表されるように、一般的に40N/mm²以下の強度レベルのコンクリートでは圧密や密度の高い材料（セメントや骨材）の沈降による影響により、上部よりも下部に位置するコンクリートの方が強度が高くなることが知られている。しかし、梅本ら¹⁰⁾の実験結果からもわかるように、60N/mm²を超える高強度コンクリートでは粘性が高いため、材料の密度の違いによる沈降なども少なく、垂直方向における強度差は40N/mm²以下のコンクリートよりも小さくなることが考えられる。

本研究では、Fc60N/mm²級の柱No.4および柱No.5の中央部における材齢15年のコア供試体強度は、上部よりも下部の方が高い傾向が認められた。材齢91日においても同様の傾向が認められている⁷⁾。これに関連して、下川ら¹¹⁾は本研究で対象としている柱試験体に混入した気泡の量を調査しており、特に柱No.5では高さ位置によって気泡量のバラツキが大きいことを報告している。高強度コンクリートは粘性が高いため、打ち込み時に混入した気泡が抜けにくくなる。このため、棒形振動機の挿入位置あるいは加振時間によってコンクリート中における気泡の分布にバラツキが生じ、コア供試体強度に影響を及ぼしたことも推察できる。

一方、Fc100N/mm²級の柱No.2および柱No.3の材齢28日、91日および15年におけるコア供試体強度は高さ位置によって差があるが、コア供試体の採取高ささと強度には明確な関係が認められなかった。

3.2 実大柱部材の部位による強度性状

図4に部位別（中央部および隅角部）によるコア供試体強度の関係を示す。高強度コンクリートは単位セメント量が多く、しかも柱のような断面厚の大きなコンクリート部材に用いた場合は、セメントの水和熱が部材内部に蓄積されることにより温度上昇が生じ、高

表5 コア供試体の圧縮強度試験結果

(単位: N/mm²)

材齢 試験体 高さ(mm)	28日								91日								15年							
	柱No. 2		柱No. 3		柱No. 4		柱No. 5		柱No. 2		柱No. 3		柱No. 4		柱No. 5		柱No. 2		柱No. 3		柱No. 4		柱No. 5	
	中央	隅角	中央	隅角	中央	隅角	中央	隅角	中央	隅角	中央	隅角	中央	隅角	中央	隅角	中央	隅角	中央	隅角	中央	隅角	中央	隅角
300	110.8	92.7	118.2	98.0	78.3	80.0	73.9	75.9	96.6	110.3	114.0	97.7	84.7	83.8	91.8	87.5	137.6	128.8	146.2	139.2	129.7	115.7	132.4	107.0
600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	143.6	132.7	146.6	130.5	125.6	114.7	134.7	119.6
900	105.9	75.3	114.4	90.2	79.9	80.7	61.5	74.4	104.1	110.4	107.2	111.5	86.4	73.6	84.7	85.9	141.4	129.6	137.2	130.6	121.1	116.5	125.6	107.8
1200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	135.2	122.2	131.2	137.9	116.7	126.9	130.4	111.6
1500	114.8	110.9	78.0	111.1	61.6	78.3	72.2	76.4	113.3	113.8	114.5	88.1	81.1	82.9	81.0	73.9	132.3	126.7	134.2	131.8	121.6	123.5	126.4	123.6
1800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	132.3	121.5	140.9	134.8	115.1	110.4	115.1	110.2
2150*	-	104.9	-	85.9	-	75.4	-	69.8	-	107.6	-	109.8	-	74.2	-	83.1	135.5	140.8	144.0	130.9	110.5	123.6	108.7	111.3
2550	115.4	113.0	114.5	102.7	67.5	68.8	66.5	69.8	105.1	103.8	106.7	95.7	80.3	79.9	72.2	87.4	135.8	148.8	150.3	131.1	110.2	110.5	110.9	114.1
平均	111.7	99.4	106.3	97.6	71.8	76.6	68.6	73.2	104.8	109.2	110.6	100.6	83.1	78.9	82.4	83.6	136.7	131.4	141.3	133.3	118.8	117.7	123.0	113.2
標準偏差	3.8	14.0	16.4	8.9	7.6	4.3	4.9	2.9	5.9	3.3	3.6	8.8	2.5	4.3	7.1	5.1	3.8	8.7	6.2	3.3	6.5	5.9	9.4	5.4
変動係数(%)	3.4	14.1	15.4	9.2	10.5	5.6	7.1	4.0	5.6	3.1	3.3	8.8	3.0	5.4	8.6	6.1	2.8	6.6	4.4	2.5	5.5	5.0	7.7	4.8
コア平均	105.5		101.9		74.2		70.9		107.0		105.6		81.0		83.0		134.0		137.3		118.3		118.1	
標準養生供試体	117.9		122.9		83.6				129.7		136.8		94.7				-		-		-		-	

※中央部では、柱・梁接合部の鉄筋を避けるため、高さ2100mmの位置よりコア供試体を採取した。

図3 コア供試体の採取高ささと強度の関係

図4 部位とコア供試体強度の関係

温状態となる。この初期材齢での高温履歴は、コンクリートの強度発現に大きな影響を及ぼすことが知られている^{12), 13)}。特に、コンクリート部材が履歴した最高温度が高いほど長期的な強度増進が停滞することが報告されている^{14), 15), 16)}。

本研究で対象とした柱試験体の打込み後の温度履歴を計測した報告¹⁷⁾によれば、Fc60N/mm²級の柱No.4の中央部における最高温度は70.0℃、柱No.5の中央部における最高温度は72.7℃、柱No.5の隅角部における最高温度は約54℃であった。柱No.4および柱No.5については、材齢28日で隅角部の方が中央部よりも高い強度を示したが、材齢15年では中央部の方が隅角部よりも高い強度を示した。

一方、Fc100N/mm²級の柱No.2の中央部における最高温度は76.6℃、柱No.3の中央部における最高温度は74.5℃、柱No.3の隅角部における最高温度は約55℃であった¹⁷⁾。柱No.2および柱No.3については、材齢28日、91日および15年において中央部の方が隅角部よりも高いコア強度を示す傾向が認められた。

すべての柱試験体に共通して、隅角部よりも高い最高温度を履歴した中央部の方が、材齢15年では高いコア強度を示す結果となった。これは、隅角部と中央部の水分条件の違いに起因したものと考えられる。すなわち、柱試験体を覆っていたビニールシートを材齢7日で撤去した後は、柱試験体表面より水分の蒸発が進行するため、表面に近い隅角部の方が中央部よりも含水率が低い状態となる。加えて、降雨の場合、材齢28日および91日にコア採取した後の残穴に雨水が溜まるため、この水分が残穴に近接した材齢15年の中央部コア採取部分に供給されたことも考えられる。このように

柱試験体の中央部の方が隅角部よりも含水率が高い状態が長期間維持されることにより、セメントの水和反応が円滑に進行し、より高い長期強度を示したものと推察される。

3.3 実大柱部材の平均強度

図5に柱試験体の平均コア供試体強度を示す。また、図6に材齢91日コア供試体強度に対する強度比を示す。

Fc60N/mm²級の柱No.4および柱No.5では、材齢91日以降も継続して強度が増進したことがわかる。材齢91日から15年までの強度増加は、柱No.4では37.3N/mm²、柱No.5では35.1N/mm²であった。また、材齢15年コア強度の91日コア強度に対する比は、柱No.4では1.46、柱No.5では1.42であった。嵩ら¹⁸⁾は強度レベル30～40N/mm²（水セメント比57%）の実大壁試験体の材齢28日から25年までのコア強度を調べているが、その調査結果によれば材齢91日から15年までの強度増進は少なく、材齢15年コア強度の91日コア強度に対する比は0.93～1.22であった。強度レベル50～60N/mm²（水セメント比32～38%）の実大柱試験体の材齢10年までのコア強度を調べた研究¹⁹⁾によれば、材齢10年コア強度の91日コア強度に対する比は1.21～1.48であり、試験体によっては本研究と同程度の強度比が報告されている。

本研究の柱No.4および柱No.5で長期的な強度増加が大きかった理由として、①水セメント比が小さいため、材齢91日においても未水和セメントが多く残っており、91日以降も水和反応が継続したこと、②部材厚の大きな柱試験体であるため、内部の水分が比較的長期間保持されたこと等が考えられる。

図5 柱試験体の平均コア供試体強度

図6 材齢91日コア供試体強度に対する強度比

Fc100N/mm²級の柱No.2および柱No.3では、材齢28日から91日までの強度増進は小さいが、91日から15年までの強度増進は大きい。材齢91日から15年までの強度増加は、柱No.2では27.0N/mm²、柱No.3では31.7N/mm²であった。また、材齢15年コア強度の91日コア強度に対する比は、柱No.2では1.25、柱No.3では1.30であった。Fc100N/mm²を超える高強度コンクリートでは、材齢28日から91日までの強度増進が小さいことは陣内らの研究²⁰⁾においても報告されている。しかし、この強度レベルのコンクリートはまだ歴史が浅いため、材齢1年以降の長期的な強度性状については明らかにされていない状況にあった。本研究の柱No.2および柱No.3で長期的な強度増加が大きかった理由として、柱No.4および柱No.5と同様に水セメント比が小さいため、材齢91日においても未水和セメントが多く残っており、この未水和セメント部分が長期にわたって水和反応したことが考えられる。

材齢15年コア強度の91日コア強度に対する比は、柱No.2および柱No.3の方が柱No.4および柱No.5よりも小さな値となった。すなわち、140N/mm²付近で強度増加が緩慢になっている傾向が伺える。渡邊らの研究²¹⁾では、100N/mm²を超える強度レベルのコンクリートにおいては粗骨材の強度がコンクリート強度に大きく影響することが報告されている。本研究で用いた粗骨材については140N/mm²付近よりコンクリート強度に及ぼす影響が顕在化したことも推測される。

柱No.2および柱No.3において、打込み方法の違いによる材齢15年コア強度の明確な違いは認められなかった。また、柱No.4および柱No.5において、型枠種類の違いによる材齢15年コア強度の明確な違いは認められなかった。なお、材齢28日および91日においても、打込み方法、型枠種類の違いに起因したコア強度の差異は認められなかった²²⁾。

3.4 実大柱部材の材齢15年における中性化深さ

表6に材齢15年における中性化深さ試験結果を示す。柱No.3および柱No.5に共通して、中性化深さは0mmであった。また、写真2にフェノールフタレイン1%溶液噴霧後の試験体を示す。フェノールフタレイン1%溶液を噴霧した試験体割裂面のすべてが赤紫色に着色している。和泉ら²³⁾は本研究で対象としている柱試験体と同じコンクリートを用いて促進中性化試験（二酸化炭素濃度5%、促進中性化期間13週間）を実施している。その結果、材齢1日に脱型し、材齢7日まで封かん養生したFc60のコンクリート試験体では中性化深さが2.8mm、同じくFc100-Bのコンクリート試験体では中性化深さが0.7mmであった。

実際の建築物から採取したコア供試体の中性化を調査した玉井らの研究²⁴⁾ではコア強度が50N/mm²を超えるコンクリートでは中性化速度係数が1mm/√year以下となり、中性化があまり進行しないことが報告されている。また、屋外暴露した試験体の中性化に関する既往の研究報告からデータを抽出・整理した長谷川らの研究²⁵⁾では、標準養生28日強度が60N/mm²以上になると中性化速度係数が0mm/√yearになることが報告されている。陣内ら²⁶⁾は水セメント比21.4～71.4%の範囲のコンクリートを用いて促進中性化試験（二酸化炭素濃度5%）を行っており、促進中性化期間26週間において水セメント比40%以下のコンクリートは中性化しなかったことを報告している。

表6 中性化深さ試験結果（材齢15年）

試験体	中性化深さ (mm)
柱No. 3	0
柱No. 5	0

写真2 フェノールフタレイン1%溶液噴霧後の試験体
（上段の2つはNo.3、下段の2つはNo.5）

本研究で対象とした実際の強度が70N/mm²を超える高強度コンクリート（水セメント比27%以下）については、一般大気中で材齢15年が経過しても中性化していないことが明らかとなり、既往の研究報告からも予想される結果が得られた。

3.5 実大柱部材から採取した試料のX線回折分析

本研究では、材齢15年の柱試験体より採取したコンクリート小片をもとに試料を作製し、 $2\theta=5\sim70(\text{deg})$ の範囲のX線回折分析を行ったが、特徴的な傾向が認められた $2\theta=15\sim23(\text{deg})$ の範囲および $2\theta=27\sim35(\text{deg})$ の範囲の分析結果を取り上げ、それぞれ図7、図8に示す。なお、X線回折分析では試料ホルダへの粉末試料の詰め具合（圧力）のわずかな違いにより測定結果であるピーク強度に差異が生じる^{27)、28)}。このため、内部標準物質として加えた酸化マグネシウムのピーク強度I(MgO)を基準としたピーク強度比I/I(MgO)をそれぞれの試料について計算し、図7および図8における縦軸の変数とした。

図7において、 $2\theta=20.84(\text{deg})$ に認められるピークは、コンクリート中の細骨材に含まれているSiO₂成分によるものである。柱No.3では中央部、隅角部および表面部の各試料間でピーク強度比が異なることから、細骨材の含有率が若干異なることがわかる。一方、柱No.5ではそれぞれの試料についてピーク強度比がほぼ同じであることから、細骨材の含有率に大差がないことがわかる。なお、シリカフュームにもSiO₂成分が含まれているが、非晶質であるため、X線回折分析におけるピークとして検出されることはない。

柱No.5では $2\theta=18.00(\text{deg})$ にCa(OH)₂のピークが認められる。中央部、隅角部に比べて表面部の方がCa(OH)₂の量が少ないことがわかる。一方、柱No.3ではCa(OH)₂のピークは認められない。これは柱No.3のコンクリートに使用されているシリカフュームがボゾラ

図7 X線回折分析結果 (2θ=15~23deg)

図8 X線回折分析結果 (2θ=27~35deg)

ン反応する際に Ca(OH)_2 を消費したためと考えられる。

図8では、柱No.3と柱No.5に共通して、 $2\theta=29.40(\text{deg})$ に CaCO_3 のピークが認められる。本研究で用いた細骨材および粗骨材のX線回折分析を別途行っており、細骨材および粗骨材には CaCO_3 が含まれていないことを確認している。このため、図8で認められた CaCO_3 は、 Ca(OH)_2 が CO_2 と反応することによって生成されたものと考えられる。図7に示された結果を加味すると、柱No.5では表面部の方が中央部や隅角部に比べて Ca(OH)_2 の量が少なく、 CaCO_3 の量が多いことがわかる。すなわち、外気に近いコンクリート表面部から中性化が進行していることがわかる。一方、柱No.3においても表面部で CaCO_3 の量が多いが、柱No.3では各試料間で細骨材含有率の差異が認められたため、定量的な比較を正確に行うことは困難であった。

フェノールフタレインの変色域は $\text{pH}8.2\sim10.0$ の範囲であり、 $\text{pH} < 8.2$ の酸性側では無色、 $\text{pH} > 10.0$ の塩基性側では赤紫色を示す^{29), 30)}。3.4の結果を加味すると、本研究で対象とした実際の強度が 70N/mm^2 を超える高強度コンクリートでは、材齢15年においてフェノールフタレイン1%溶液を噴霧する方法により中性化と判定されるまでには至っていないが、コンクリート中の Ca(OH)_2 が空気中の CO_2 と反応し、 CaCO_3 に変化する過程がわずかながら進行していることがわかる。

また、図8では柱No.3と柱No.5に共通して、未反応の C_3S および C_2S のピークならびに両者のピークが重なって現れている部分(図8中で■点で表した角度のピーク)が認められる。3.3では、材齢91日から15年までのコア強度の増加が大きかった理由として、水セメント比が小さいため材齢91日においても未水和セメントが多く残っていたことを取り上げた。X線回折分析により、材齢15年

においても未水和セメントが残存していることが明らかになった。材齢15年以降も残存している C_3S および C_2S が水和反応し、コンクリート強度が増進することも考えられる。

4. まとめ

高強度コンクリートの長期的性状を明らかにすることを目的として、総プロNew RCで作製された設計基準強度 100N/mm^2 級および 60N/mm^2 級のコンクリートを用いた実大の柱試験体を対象に材齢15年におけるコア強度および中性化深さを調査し、以下の結果を得た。

- 1) 柱試験体より鉛直方向に高さ 2900mm のコアを採取し、所定の高さ位置で切断・研磨した供試体の圧縮強度試験を行ったところ、材齢15年ではすべてのコア供試体が設計基準強度を満足していた。
- 2) コア供試体の採取高さとの強度の関係については、 $\text{Fc}60\text{N/mm}^2$ 級の柱試験体の中央部において、材齢15年では上部よりも下部の方がコア強度が高い傾向が認められた。 $\text{Fc}100\text{N/mm}^2$ 級の柱試験体では、コア供試体の採取高さとの強度には明確な関係が認められなかった。
- 3) $\text{Fc}60\text{N/mm}^2$ 級、 $\text{Fc}100\text{N/mm}^2$ 級の柱試験体に共通して、材齢15年では中央部の方が隅角部よりも高いコア強度を示した。
- 4) 材齢91日以降も継続して強度が増進し、材齢15年コア強度の材齢91日コア強度に対する比は、 $\text{Fc}60\text{N/mm}^2$ 級の柱試験体では $1.42\sim1.46$ 、 $\text{Fc}100\text{N/mm}^2$ 級の柱試験体では $1.25\sim1.30$ であった。
- 5) $\text{Fc}60\text{N/mm}^2$ 級、 $\text{Fc}100\text{N/mm}^2$ 級の柱試験体に共通して、材齢15年における中性化深さは 0mm であった。
- 6) X線回折分析を行ったところ、材齢15年ではコンクリート中の

Ca(OH)₂が空気中のCO₂と反応してCaCO₃に変化していることが明らかになった。また、外気に近い表面部の方が中央部よりもCaCO₃の量が多かった。フェノールフタレイン1%溶液を噴霧する方法により中性化と判定されるまでには至っていないが、表面部から中性化が進行している傾向が伺えた。

- 7) Fc60N/mm²級、Fc100N/mm²級の柱試験体に共通して、材齢15年においても未水和のC₃SおよびC₂Sが残存していた。

謝辞

本研究で調査対象とした実大の柱試験体は、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（昭和63年度～平成4年度）」の一環として作製されたものである。当時関係された諸氏のおかげで今般貴重なデータを入手することができた。ここに記して、深く謝意を表す。なお、材齢15年の調査・分析については、第一著者が平成20年3月まで在籍していた独立行政法人建築研究所の研究課題の一部として実施したことを付記する。

参考文献

- 1) 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、(財)国土開発技術研究センター、1993.3
- 2) 榊田佳寛、上村克郎、友沢史紀、清水昭之、阿部道彦ほか：高強度鉄筋コンクリートを用いた施工実験のまとめと施工標準への反映 (New RC 実大施工実験 その31)、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp.359-360、1992.8
- 3) 岡本公夫、上村克郎、友沢史紀、清水昭之、榊田佳寛ほか：高強度鉄筋コンクリートを用いた施工実験の概要 (New RC 実大施工実験 その1)、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp.299-300、1992.8
- 4) 佐藤孝一、榊田佳寛、平賀友晃、上西隆ほか：柱形試験体による高強度コンクリートの施工性の検討 (New RC 実大施工実験 その5)、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp.307-308、1992.8
- 5) 下川浩児、榊田佳寛、田中恭一、橋爪進ほか：高強度コンクリートの調査に関する実験 (New RC 実大施工実験 その2)、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp.301-302、1992.8
- 6) 田中恭一、榊田佳寛、阿部道彦、平賀友晃ほか：実機プラントにおける高強度コンクリートの調査実験 (New RC 実大施工実験 その3)、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp.303-304、1992.8
- 7) 山浦一郎、岡村一臣、岡本公夫、下川浩児ほか：高強度コンクリートを用いた柱形試験体のコア強度性状 (New RC 実大施工実験 その22)、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp.341-342、1992.8
- 8) 毛見虎雄、平賀友晃ほか：比較的マシなコンクリート構造物の強度分布 (その1～2)、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp.227-230、1978.9
- 9) Yoshio Kasai and Isamu Matsui : Studies on concrete strength of structure in Japan, RILEM symposium control of concrete structures, June 1979, Stockholm Sweden
- 10) 梅本宗宏、篠崎 徹、板谷俊郎、平賀友晃：低発熱ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートの柱構造体強度の検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.18, No. 1, pp.309-314、1996
- 11) 下川裕一、須藤栄治、清水昭之、寺田謙一ほか：高強度コンクリートの締固めと充填性の検討 (New RC 実大施工実験 その18)、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp.333-334、1992.8
- 12) 仕入豊和、地濃茂雄：コンクリートの初期強度に及ぼす温度条件 (20～90℃) の影響、日本建築学会論文報告集、第320号、pp.1-11、1982.10
- 13) 地濃茂雄、仕入豊和：コンクリートの強度発現性状に及ぼす温度履歴条件 (20～90℃) の影響、日本建築学会論文報告集、第337号、pp.8-14、1984.3
- 14) 杉山 央、榊田佳寛：初期高温履歴を受けたコンクリートの長期強度発現性、日本建築学会構造系論文集、第515号、pp.23-30、1999.1
- 15) 杉山 央：高強度マスコンクリートの温度履歴特性と強度発現性、コンクリート工学、Vol.38, No.7, pp.3-9、2000.7

- 16) 榊田佳寛、佐藤幸恵、友澤史紀：高強度コンクリートの構造体中での強度発現性と調査強度、日本建築学会構造系論文集、第537号、pp.13-20、2000.11
- 17) 岡村一臣、山浦一郎、塩見伊津夫、須藤栄治ほか：高強度コンクリートを用いた柱形試験体の内部温度とコア強度の関係 (New RC 実大施工実験 その23)、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp.343-344、1992.8
- 18) 嵩 英雄、玉井孝幸、阿部道彦、友澤史紀ほか：25年経過した実大 RC 壁体における普通および流動化コンクリートの構造体強度に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第612号、pp.9-15、2007.2
- 19) 安田正雪、榊田佳寛、高橋宏治ほか：高強度コンクリートを用いた実大柱の長期強度試験結果 (材齢約10年)、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp.361-362、2005.9
- 20) 陣内 浩、黒岩秀介、早川光敬、並木 哲ほか：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.1-6、2003.6
- 21) 渡邊悟士、黒岩秀介、陣内 浩、並木 哲：高強度コンクリートの圧縮強度に影響を及ぼす粗骨材物性に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第588号、pp.21-27、2005.2
- 22) 松本雅之、中根 淳、一瀬賢一、岡本公夫：高強度コンクリートの強度発現に及ぼす各種施工要因の検討 (New RC 実大施工実験 その26)、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp.349-350、1992.8
- 23) 和泉意登志、阿部道彦：せき板存置期間と初期養生が高強度コンクリートの品質に及ぼす影響 (New RC 実大施工実験 その17)、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp.331-332、1992.8
- 24) 玉井孝幸、林 静雄、榊田佳寛、兼松 学ほか：構造体コンクリートの圧縮強度と中性化の実態調査、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp.459-460、2006.9
- 25) 長谷川拓哉、千歩 修：文献調査に基づく屋外の中性化進行予測、コンクリート工学年次論文集、Vol.28, No.1, pp.665-670、2006
- 26) 陣内 浩、並木 哲、黒岩秀介、渡邊悟士：高強度コンクリートの長期的な長さ変化と中性化に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第594号、pp.9-15、2005.8
- 27) 加藤誠軌：X線回折分析、内田老確圃、1994
- 28) 桜井敏雄：X線結晶解析の手引き、裳華房、1997
- 29) 理化学辞典、岩波書店、pp.1155、1998
- 30) 理工学辞典、日刊工業新聞社、pp.1260、1996

(2008年4月9日原稿受理、2008年6月4日採用決定)