

# Fc150 N/mm<sup>2</sup> 超高強度コンクリートの開発

## Development of High-Strength Concrete (Fc150 N/mm<sup>2</sup>)

小林 利充*	和田 高清**
Toshimitsu Kobayashi	Takakiyo Wada
鹿籠 泰幸**	西浦 範昭***
Yasuyuki Shikamori	Noriaki Nishiura

### 要 約

近年、高層集合住宅の需要も拡大する中、設計基準強度の要求も非常に高いものとなっている。本論では、設計基準強度が 150 N/mm<sup>2</sup> クラスの超高強度コンクリートの実用化を目的に、各種結合材を用いて実験を行い、フレッシュ性状及び模擬試験体などによる硬化性状を検討している。また、その結果をもとに、実大施工実験を行い、各種性状を検討し、超高強度コンクリートに関する技術を確立している。更に、得られた成果をもとに、建築基準法第 37 条第二号による大臣認定を取得しており、その概要も併せて報告する。

### 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 材料実験
- § 3. 施工実験
- § 4. 大臣認定
- § 5. おわりに

### § 1. はじめに

「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」(New RC プロジェクト)<sup>1)</sup>の成果が発表されて以来、高層建築物に鉄筋コンクリート(RC)造が適用される傾向が増加している。一般に、高層 RC 造建築物を建設する場合、設計基準強度の要求も非常に高いものとなり、近年においては、設計基準強度 130 N/mm<sup>2</sup> までの超高強度コンクリートが実用化<sup>2)</sup>され、今後はさらに高強度化が進むものと考えられる。

本論では、最大設計基準強度が 150 N/mm<sup>2</sup> クラスの超高強度コンクリートの実用化を目的に、高強度結合材を用いて実験を行い、フレッシュ性状及び硬化性状を検討している。また、その結果をもとに、実大施工実験を行い、各種性状について検討している。さらに、建築基準法第 37 条第二号による大臣申請の概要を報告する。

\* 建築設計部構造課

\*\* 技術研究所

\*\*\* 建築部計画課

### § 2. 材料実験

#### 2-1 実験概要

##### (1) 使用材料及び調合

コンクリートの使用材料及び調合は、表-1 及び表-2 に示す通りである。目標値として、スランプフローは、水結合材比が 20% 以上の場合 55 から 65 cm、水結合材比が 20% 未満の場合 70 から 75 cm とし、空気量は水結合材比にかかわらず 2.0% 以下(シリカフェームプレミックスセメントは 1.0 または 1.5%) とした。また、一部の調合で、自己収縮ひずみを低減するため、収縮低減剤を使用している(水の一部に置換)。更に、火災時の爆裂性能を向上させるために、ポリプロピレン繊維(PP 繊維)の使用を検討しており、水結合材比 25% 以下の一部の調合で実施し、添加量は一律 0.2 vol% とした。

##### (2) コンクリートの製造及び実施時期

コンクリートの製造は、JIS 表示許可のレディーミクストコンクリート工場(東京都中央区)において実施した。また、コンクリートの製造は、2 軸強制練りミキサ(公称容量: 6 m<sup>3</sup>)を用いて行い、練混ぜ方法としては、ミキサにかかる負荷及び練混ぜ効率を考慮し、モルタル先行練り方式を採用した。なお、練混ぜ時間は、調合及び季節によって異なるが、モルタル 45 から 600 sec、粗骨材投入後 60 から 180 sec とした。また、実施時期は、3 シーズン(冬期、標準期、夏期)にわたって実施した(後述する SH シリーズについては、3 シーズンを 2 回行っている)。

(3) 供試体及び柱模擬試験体の作製

供試体の作製（標準水中養生・簡易断熱）は、コンクリート製造後、フレッシュ性状を確認した後に実施した。また、柱及び床スラブ模擬試験体の作製は、練り上がり30分後に実施した。ここで、PP繊維は、プレーンの試験体作製後、トラックアジテーター車に3回に分けて投入し、各60sec合計180sec攪拌した後試験に供した。なお、柱模擬試験体の概要を図-1に示す（一部の柱模擬試験体について、外周部または内部に断熱材を設置した）。

(4) 試験項目

試験項目を表-3に示す。

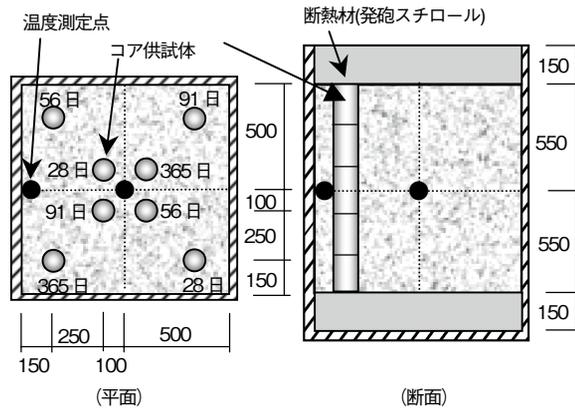


図-1 柱模擬試験体の概要（一例）

表-1 使用材料

分類	種類
セメント (C)	シリカフェウムセメント (SC) (密度: 3.08g/cm <sup>3</sup> )
	高ビーク系中熱ポルトランドセメント (HC) (密度: 3.20g/cm <sup>3</sup> , C <sub>2</sub> S: 46%)
	シリカフェウムプレミックスセメント (SPC) (密度: 3.07g/cm <sup>3</sup> )
細骨材 (S)	岩瀬産砕砂 (表乾密度: 2.58g/cm <sup>3</sup> , FM2.63)
	万田野産山砂 (表乾密度: 2.59g/cm <sup>3</sup> , FM2.62)
粗骨材	岩瀬産砕石 (表乾密度: 2.65g/cm <sup>3</sup> , FM6.60)
混和材	シリカフェウム (SF) (密度: 2.20g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 200,000cm <sup>2</sup> /g)
	ポリプロピレン繊維 (PP) (48μm, 10mm・20mm)
混和剤	高性能 (AE) 減水剤 (SP) (ポリカルボン酸系)
	収縮低減剤 (R) (ポリエーテル誘導体)

[注] PP : W/B20%以上-L : 10mm, W/B20%未満-L : 20mm

表-2 調合条件の一例

No.	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						SP使用量 (B×%)
		W	C	SF	S	G	R	
SH-20	20	155	775	—	702	824	—	1.55
SH-16	16	155	969	—	540	824	—	1.95
SH-14	14	155	1107	—	424	824	—	2.40
SH-13	13	155	1192	—	353	824	—	2.75
MH-30	30	160	533	—	844	864	—	1.30
MH-25	25	160	640	—	754	864	—	1.30
MH-20	20	155	775	—	676	840	—	1.45
MH-16	16	155	969	—	528	824	—	1.85
HH-20	20	155	698	78	698	824	—	1.70
HH-16	16	155	872	97	535	824	—	2.20
HH-14	14	155	996	111	418	824	—	2.65
SPC-30	30	160	533	—	855	851	—	0.95
SPC-25	25	160	640	—	767	851	—	1.15
SPC-20	20	155	775	—	717	811	—	0.85
SPC-16	16	155	969	—	552	811	—	1.20
SPC-13	13	155	1192	—	365	811	—	1.75
SPC-13R	13	155	1192	—	365	811	10	1.50

[注] B (結合材) : C (セメント) + SF (シリカフェウム)

No.	材料の組合せ	備考
SH シリーズ	SC - 砕砂 - 砕石	一部 PP, R 添加
MH シリーズ	SC - 山砂 - 砕石	一部 PP 添加
HH シリーズ	HC - SF - 砕砂 - 砕石	一部 PP 添加
SPC - 30,25	SPC - 山砂 - 砕石	一部 PP 添加
SPC - 20,16,13	SPC - 砕砂 - 砕石	一部 PP, R 添加

表-3 試験項目

分類	試験項目・試験方法
フレッシュ性状	スランプフロー試験: JIS A 1150
	空気量試験: JIS A 1128
	コンクリート温度: 棒状温度計
硬化性状	圧縮強度 (標準養生・簡易断熱 <sup>3)</sup> ・コア) 試験: JIS A 1108, 1107
	コンクリート温度: T形熱電対

2-2 フレッシュ性状に関する実験結果

表-4には、フレッシュ性状を示す。いずれの調合及び季節においても、目標値をほぼ満足する結果が得られた。図-2には、水結合材比と柱部材内の最高温度の関係を示す。同一の水結合材比で比較した場合、HHシリーズの最高温度が最も高くなる傾向にある。

表-4 フレッシュ性状

No.	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	C 温度 (°C)
SH-20	60.5~72.0	1.0~2.0	13.0~35.0
SH-16	61.5~80.0	0.9~2.0	14.5~37.0
SH-14	69.0~75.0	1.3~1.7	17.0~37.0
SH-13	68.5~77.5	1.1~2.0	17.0~37.0
HH-20	56.0~69.5	1.0~1.8	19.0~35.0
HH-16	62.0~76.0	1.4~2.0	19.0~36.0
HH-14	72.0~81.5	1.4~2.0	20.0~37.0
SPC-20	59.0~64.5	0.9~1.3	13.0~34.0
SPC-16	65.0~77.5	0.8~1.5	15.5~35.5
SPC-13	67.5~79.5	1.1~1.4	19.0~37.0

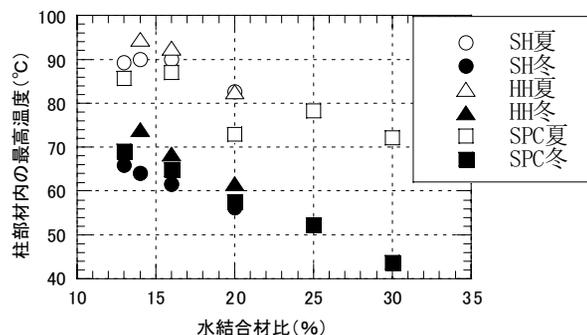


図-2 水結合材比と柱部材内の最高温度の関係

2-3 硬化性状に関する実験結果

図-3及び図-4には、28日標準養生強度及び91日コア強度と結合材水比の関係の一例(夏期)を示す。結合材の種類にかかわらず、結合材水比の増加に伴って標準養生及びコア強度は増大する傾向にある。また、結合材の種類に着目すると、SHとHHの強度発現性はほぼ同程度である。但し、結合材が同一でも、細骨材の種類によって強度発現性が異なり、本研究の限りでは、山砂よりも砕砂を使用した方が、強度発現性は高くなる。

図-5には、強度補正值(28S<sub>91</sub>)を28日標準養生強度で除して無次元化し、最高温度との関係に整理した。無次元化した値は、結合材の種類及び打設時期にかかわらず、最高温度と高い相関性が見られ、最高温度が高くなるほど低下する傾向が見られる。

図-6には、コア強度に及ぼす温度の影響を確認するため、従来の柱模擬試験体の周囲に断熱材を設置し比較試験を行った。その結果、温度が高いものほどコア強度も高い傾向が見られ、既往の文献<sup>4),5)</sup>でも同様の結果が報告されており、超高強度領域では、温度が高くなるほどコア強度が高くなり、図-5の結果と合わせて、強度補正值は小さくなるものと考えられる。

図-7には、材齢91日の簡易断熱養生強度とコア強度の関係を示す。強度が高い領域においては、簡易断熱養生強度の方が多少高くなるが、高い相関性が見られ、超高強度コンクリートの領域においても、簡易断熱養生強度によるコア強度の推定が可能であると考えられる。

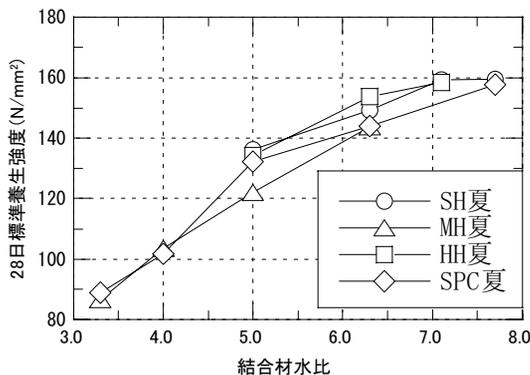


図-3 結合材水比と28日標準養生強度の関係

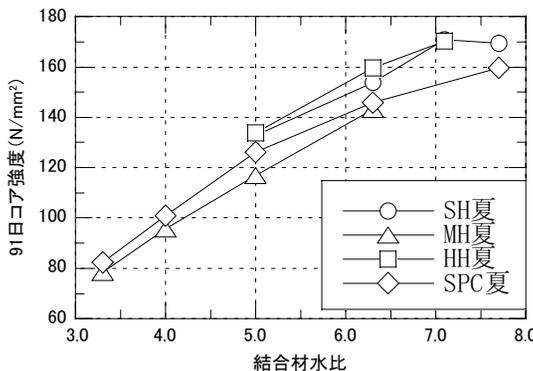


図-4 結合材水比と91日コア強度の関係

図-8には、PP繊維の添加が強度に及ぼす影響を示す。28日標準養生強度及び91日コア強度共に添加前後の強度発現性が同程度になっている。従って、0.2 vol%の添加量では、強度に影響を及ぼさないと考える。

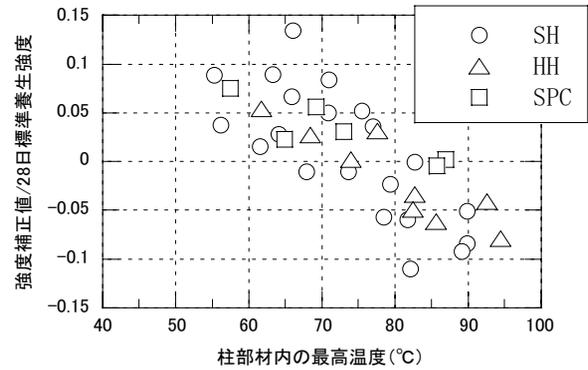


図-5 柱部材内の最高温度と強度補正值/28日標準養生強度の関係

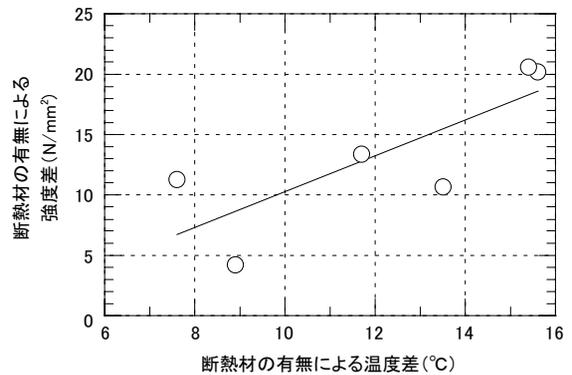


図-6 断熱材の有無による温度差と強度の関係

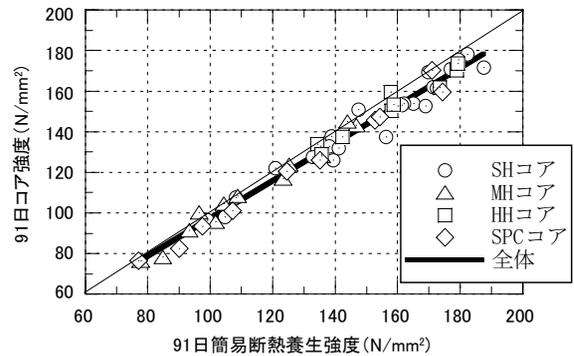


図-7 91日簡易断熱養生強度と91日コア強度の関係

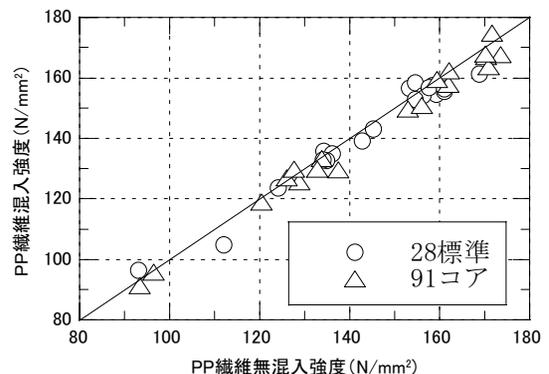


図-8 ポリプロピレン繊維が強度に及ぼす影響

2-4 長期性状に関する実験結果

図-9 から図-11 には、結合材の種類ごとの各材齢におけるコア強度を示す。季節ごとに比較すると、夏期においては、概ね 28 日での強度発現性は高いが、その後の強度増進があまり期待できない。一方、冬期においては、28 日での強度発現性は多少低い傾向にあるが、その後の強度増進は、結合材の種類及び水結合材比にかかわらず、大きい傾向が見られ、材齢 1 年 (365 日) のコア強度は、一部を除いて最も高くなる傾向にある。

§3. 施工実験

3-1 実験概要

(1) 使用材料及び調合

想定する設計基準強度は、150 N/mm<sup>2</sup> 及び 120 N/mm<sup>2</sup> とし、これまでの実験結果を踏まえて、使用材料 (表-5) 及び調合 (表-6) を決定した。なお、目標値として、スランブフローは、水結合材比 14% が 75 cm, 水結合材比 17% が 70 cm とし、空気量はいずれも 1% とした。

(2) コンクリートの製造

コンクリートの製造は、2-1(2)と同様に行った。なお、練混ぜ時間は、水結合材比 14% の場合、モルタル 600 sec, 粗骨材投入後 180 sec, 水結合材比 17% の場合、モルタル 300 sec, 粗骨材投入後 120 sec とした。

(3) 供試体及び実大柱の作製

供試体及び実大柱の作製は、現場 (茨城県つくば市戸田建設技術研究所敷地内) に到着した後、フレッシュ性状を確認し、標準養生供試体を作製した。その後、爆裂防止対策としてポリプロピレン繊維を添加 (17% : 0.15 vol%, 14% : 0.2 vol%) し、再度フレッシュ性状及び標準養生供試体を作製し、実大柱の打設をコンクリート用バケツ (容量 : 4 m<sup>3</sup>) を用いて実施した。なお、実験に用いた実大柱は、図-12 に示すように、断面寸法 1005 × 1005 mm, 高さ 3000 mm の実大柱試験体とし、配筋は、主筋 28-D41 (USD645), フープ筋 □-D16 @ 100 (SPR785) とした。また、構造体コンクリート強度の比較用として、同一断面で無筋の高さ 1050 mm (上下を断熱材) の柱模擬試験体を作製した。なお、実大柱試験体におけるコア供試体は、各試験体の垂直方向に対して、中央部及び端部、並びに高さ方向 3 箇所 で水平方向に採取した。なお、実験は 11 月に実施した。施工実験の状況を写真-1 に示す。

(4) 試験項目

試験項目を表-7 に示す。

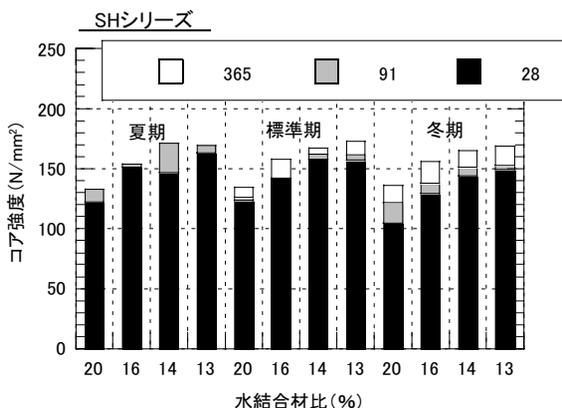


図-9 水結合材比とコア強度の関係 (SH)

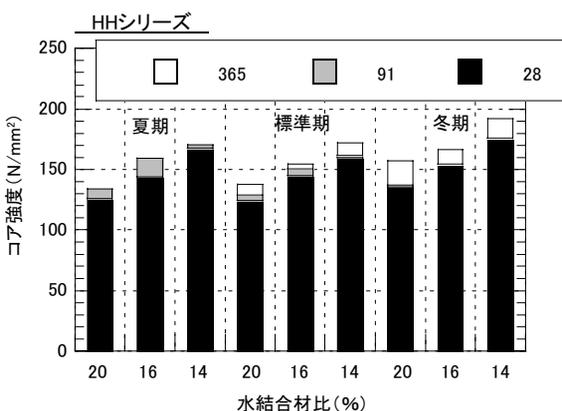


図-10 水結合材比とコア強度の関係 (HH)

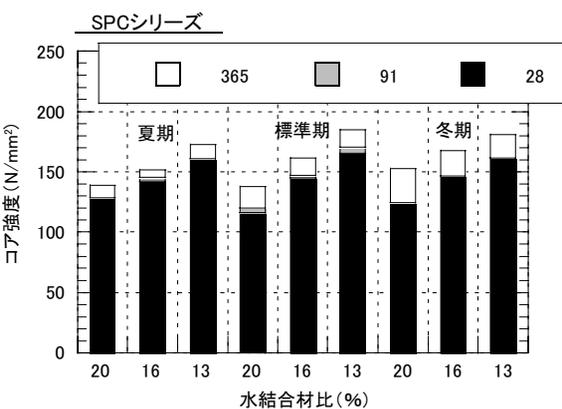


図-11 水結合材比とコア強度の関係 (SPC)

表-5 使用材料

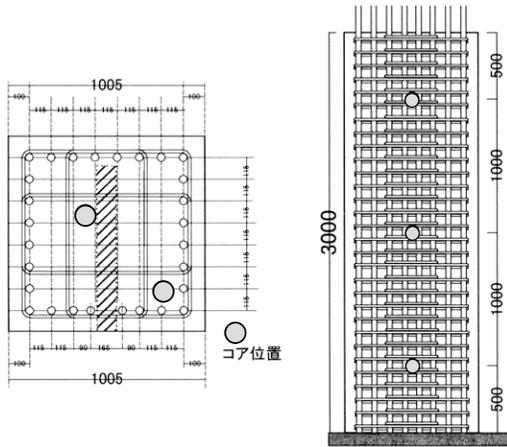
分類	種類
セメント	高ビーライト系中庸熟ポルトランドセメント (密度 : 3.20 g/cm <sup>3</sup> , C <sub>2</sub> S : 46%)
細骨材	岩瀬産砕砂 (表乾密度 : 2.58 g/cm <sup>3</sup> , FM2.62)
粗骨材	岩瀬産砕石 (表乾密度 : 2.65 g/cm <sup>3</sup> , FM6.60)
混和材	シリカフェーム (密度 : 2.20 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 : 200,000 cm <sup>2</sup> /g)
混和剤	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系, 固形分 30%)

表-6 調合条件

W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					SP 使用量 (B×%)
	W	C	SF	S	G	
14	155	996	111	421	824	1.975
17	155	821	91	583	824	1.750

表一七 試験項目

分類	試験項目・試験方法
フレッシュ性状	スランプフロー試験 (SF) : JIS A 1150
	空気量試験 (Air) : JIS A 1128
	コンクリート温度 (CT) : 棒状温度計
	O ロート試験 (O) : JSCE-F512
硬化性状	圧縮強度 (標準・簡易断熱) 試験 : JIS A 1108
	圧縮強度 (コア) 試験 : JIS A 1107
	静弾性係数試験 : JIS A 1149
	コンクリート温度 : T 形熱電対
	自己収縮 : JCI 超流動コンクリート案
	コンクリートの均一性 : 粗骨材分布



図一十二 実大柱試験体の概要



写真一 施工状況

3-2 フレッシュ性状に関する実験結果

表一八には、施工実験で使用したコンクリートのフレッシュ性状を示す。試験結果からも分かるように、いずれの調合においても、受入れ時のフレッシュ性状としては、目標とするスランプフロー及び空気量をほぼ満足する結果が得られた。また、受入れ後に、ポリプロピレン繊維を混入することで、スランプフローが12から15cm程度小さくなり、50cmフロー到達時間も4から8sec程度遅くなる傾向が見られた。しかしながら、実際の施工においては、本実験と同様にコンクリート用バケットを使用することで、十分に施工が可能であることを確認した。

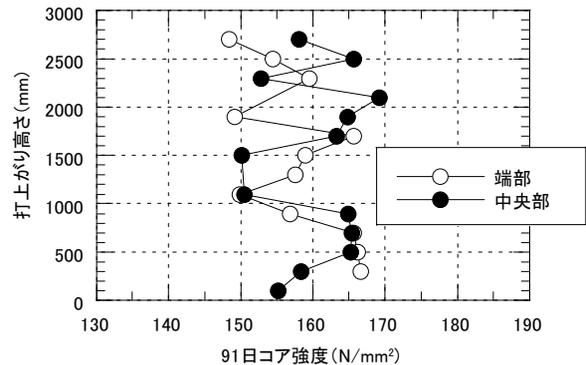
表一八 フレッシュ性状に関する結果

W/B	試験場所	SF (50F)	Air	O	C.T
14	プラント	66.5 (12.7)	2.1	55.9	24.5
	受入時	70.0 (13.0)	1.0	77.1	20.5
	PP 添加後	58.5 (17.3)	1.0	51.3	19.5
17	プラント	64.0 (10.5)	1.8	50.5	22.5
	受入時	76.5 ( 7.7)	1.1	45.0	19.0
	PP 添加後	61.0 (16.4)	1.1	45.2	19.0

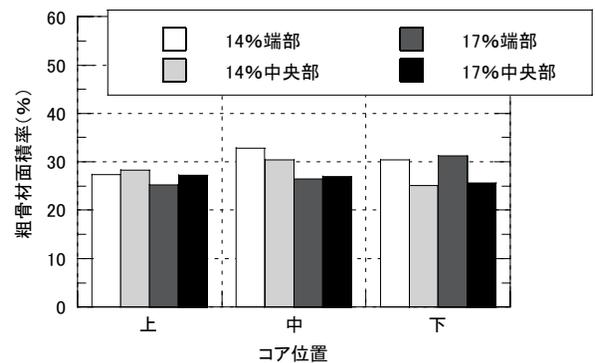
[注] SF:スランプフロー(cm), 50F:50cmフロー到達時間(sec), Air:空気量(%), O:Oロート(sec), C.T:コンクリート温度(℃)

3-3 硬化性状に関する実験結果

図一十三には、実大柱試験体の高さ方向に対するコア強度の分布を示す(水結合材比:14%)。試験結果からも分かるように、材齢91日におけるコア強度は、中央部または端部にかかわらず、150から170N/mm<sup>2</sup>の間に分布しており、若干のバラツキが見られた。また、採取位置が強度に及ぼす影響としては、顕著な差異は認められない。本実験では、強度分布を考察する上で、粗骨材の分布が要因になると考え、粗骨材面積率の測定を行った(図一十四)。その結果、水結合材比にかかわらず、柱の中央部と端部では、柱上部ではばらつきが見られないものの、柱中部及び柱下部においては、多少のばらつきが見られた。



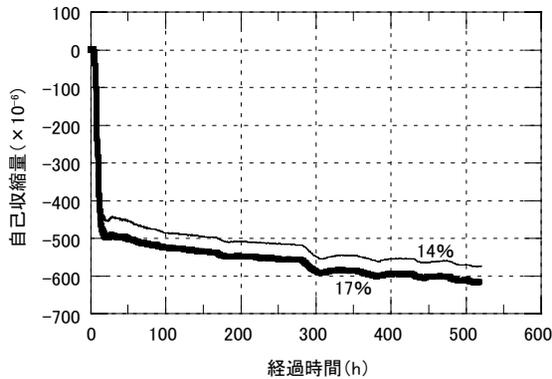
図一十三 91日コア強度と打ち上がり高さの関係



図一十四 コア位置と粗骨材面積率の関係

3-4 自己収縮に関する実験結果

図一15には、自己収縮性状を示す。いずれの水結合材比においても、自己収縮は24時間以内で急激に進行し、500時間で570×10<sup>-6</sup>程度(14%)、600×10<sup>-6</sup>程度(17%)であった。また、図中には示していないが、ポリプロピレン繊維を混入した試験体もほぼ同様の結果であった。



図一15 経過時間と自己収縮量の関係

§ 4. 大臣認定

平成12年に改正された建築基準法37条(法37条)では、コンクリートが指定建築材料になっており、建築物の基礎、主要構造部などにコンクリートを使用する場合、①JIS A 5308(レディーミクストコンクリート)に適合したもの(法37条一号)、もしくは、②コンクリートの品質に関する技術的基準に適合することを国土交通大臣が認定したもの(法37条二号)を使用する必要がある。そこで、開発した超高強度コンクリートは、設計基準強度が150 N/mm<sup>2</sup>であるため、JISを逸脱し、法37条二号が適用されるため、国土交通大臣の認定が必要となる。本論では、現状において最高レベルの大臣認定を取得するまでの概要として、超高強度コンクリートの性能評価に関する具体的な内容を表一9に示す。申請に当たり、当社のこれまでの実績(認定取得最高設計基準強度: 100 N/mm<sup>2</sup> MCON-0634)及び材料・施工実験の内容が評価され、最高設計基準強度が150 N/mm<sup>2</sup>であるにもかかわらず、短時間で国土交通大臣の認定(認定番号: MCON-1770)を取得することができた。なお、大臣申請は、本社建築設計部構造課と技術研究所が行った。

§ 5. おわりに

本論では、高強度結合材を適用した材料実験及び実大施工実験を実施することで、最大設計基準強度150 N/mm<sup>2</sup>の超高強度コンクリートに関する技術を確立し、これらの成果をもとに、法37条二号による大臣認定を取得した経緯を述べた。なお、本実験は、戸田建設との共同研究の一環として行ったものである。

表一9 性能評価の概要

項目	内容
性能評価機関	財団法人建築総合試験所
件名	西松建設-晴海小野田レミコン式 高強度レディーミクストコンクリート
申請者	西松建設株式会社 晴海小野田レミコン株式会社
圧縮強度の基準値 (Fc)	①低熱ポルトランドセメント: 42~80N/mm <sup>2</sup> ②シリカフェームセメント: 60~150N/mm <sup>2</sup> ③シリカフェームプレミックスセメント: 60~130N/mm <sup>2</sup>
申請図書	①申請概要(別添・別表・付表) ②品質基準書 ③高強度コンクリート製造管理基準 ④コンクリート製造工場 ⑤資料(調合・標準偏差・施工標準・品質管理記録・大臣認定取得実績)
申請日程	2007.3.16: 第1回目総試打合せ 2007.6.7: 第2回目総試打合せ 2007.6.14: 第1回性能評価委員会 2007.6.28: 第3回目総試打合せ 2007.7.12: 第2回性能評価委員会 2007.8.6: 第3回性能評価委員会 2007.8.6: 性能評価書の交付 2007.11.12: 認定書の発行

謝辞: 本実験を遂行するに当たり、太平洋セメント、竹本油脂、晴海小野田レミコンの関係諸氏にご協力頂いた。付記して謝意を表します。

参考文献

- 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, (財)国土開発技術センター, 1988~1992.
- 黒岩ほか: 実施工におけるFc130 N/mm<sup>2</sup>コンクリートの品質管理結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), A-1 材料施工, pp. 543-544, 2004.
- 小林ほか: 150 N/mm<sup>2</sup>級超高強度コンクリートの実用化に関する実験的研究(その2 結合材の影響), 本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), A-1 材料施工, pp. 535-536, 2004.
- 陣内ほか: 設計基準強度150 N/mm<sup>2</sup>クラスの超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, No. 17, pp. 1-5, 2003.
- 小澤ほか: 超高強度コンクリートの構造体中での発熱性状と強度発現に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No. 58, pp. 381-386, 2004.