

# 超高層集合住宅に設計基準強度 $200 \text{ N/mm}^2$ の 超高強度コンクリートを施工

梅本 宗宏

超高強度コンクリートは、超高層 RC 造集合住宅の高層化の重要な技術のひとつとして技術開発が進められてきた。最近では  $\text{Fc}200 \text{ N/mm}^2$  以上の超高強度コンクリートが実用化され、超高層の柱部材以外にも適用部位が広がり、使用事例も報告されている。本稿では、開発の最先端事例を紹介するとともに、 $\text{Fc}200 \text{ N/mm}^2$  以上の適用物件と、超高層集合住宅に実用的なレディミクストコンクリートとして現場適用した事例について紹介する。

キーワード：超高層 RC 造, 集合住宅, 超高強度コンクリート,  $\text{Fc}200 \text{ N/mm}^2$ , 現場打ち, シリカフェューム

## 1. はじめに

RC 構造を支えるコンクリート材料施工技術の中で、特に 21 世紀になって技術開発が進んだものとして、超高強度コンクリート技術が挙げられる。特に超高強度コンクリートは、超高層 RC 造集合住宅の高層化を進めるうえで、重要な技術のひとつとして技術開発が進められてきた。

コンクリートの高強度化は、1988～1993 年度の 5 年計画で行われた建設省の官学民総合開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造構造物の超軽量・超高層化技術の開発」<sup>1)</sup> (通称 NewRC 総プロ) を契機として飛躍的に技術開発が進められ、超高層集合住宅の着工件数の増加とともに高強度化が進んできた<sup>2), 3)</sup>。また、あわせて現在の超高強度コンクリートには欠かせない混和材であるシリカフェュームをプレミックスした実用的なセメント<sup>4)</sup>の開発と、低粘性化技術を実現した超高強度コンクリート用の高性能減水剤の開発<sup>5)</sup>もあり、最近では設計基準強度 (以下  $\text{Fc}$ )  $200 \text{ N/mm}^2$  以上の超高強度コンクリートが実用化され、筆者らも研究開発を進めてきた<sup>6), 7)</sup>。また、 $\text{Fc}200 \text{ N/mm}^2$  以上の超高強度コンクリートでは、超高層 RC 造の柱部材以外にも適用部位が広がっており、柱部材のスレンダー化や大スパン化などを目的に、使用される例も報告されている。ここでは、開発の最先端事例を紹介するとともに、 $\text{Fc}200 \text{ N/mm}^2$  以上の適用物件と実用的なレディミクストコンクリートとして現場適用した事例について報告する。

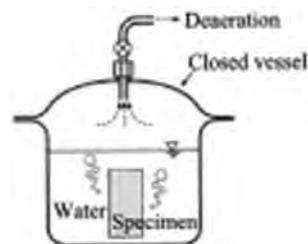
## 2. 超高強度コンクリートの事例

### (1) 最高強度のコンクリート

現在、国内の実験室レベルで開発が進んでいる最高強度のコンクリートは、圧縮強度として  $464 \text{ N/mm}^2$  と報告<sup>8)</sup>されている。この新しいセメント材料は、粉体工学理論にもとづいて、3 成分の粉体を最密充填処方となるように設計され、これまでセメント・コンクリートの分野では適用されていない新素材微粒子を採用し、水結合材比 15% としてこの強度を実現している。材料は、通常の流し込みで型枠に打ち込んだ後、材齢 2 日で脱型し、30 分程度の脱気吸水処理 (図—1) を行ない、水分を外表面から内部に供給できるとしている。その後に実施する 2 段階の熱養生でセメントと水が活発に反応し、きわめて緻密な硬化体が得られたことを報告している。

### (2) $\text{Fc}200 \text{ N/mm}^2$ 以上の適用事例

一般に、シリカフェュームを結合材に使用している  $\text{Fc}150 \text{ N/mm}^2$  を超えるコンクリートは、シリカフェュームのポズラン反応の温度依存性<sup>9)</sup>によって、材齢初



図—1 脱気給水処理

表一 1 Fc200 N/mm<sup>2</sup>以上の適用事例

Fc	200	200	200	200	300
適用建物部位	自社実験施設, S+RC3 階建て 柱 2 本: 外径 250, h4500	超高層集合住宅 RC42 階建て 地下 PCa 柱 3 本: □ 950, h5000 ~ 8500	超高層集合住宅 RC55 階建て 1F 柱: □ 1200, h2700	スタジアム RC6 階建て (一部 RPC) スリム柱 10 本: □ 350	自社事務所ビル RC3 階建て 細柱 5 本: φ 220, h3750
W/B	11.7%	14%	12.5%	不明	12.0%
特徴	レミコン 現場蒸気養生 (90℃) 耐火実験あり (鋼繊維 +PP 繊維)	プレキャスト部材 蒸気養生 (90℃) 膨張材	レミコン 現場保温加熱養生 (80℃) 鋼管 RC 柱, 鋼繊維 コア強度管理	プレキャスト部材 技術審査証明取得	プレキャスト部材 高温養生 (190℃) 耐火実験あり
文献	10)	11)	12)	13)	14)

期の高温履歴が強度発現に大きく寄与するため、コンクリート温度の確保が非常に重要となる。このため、適用事例のほとんどが蒸気養生したプレキャスト部材として用いられ、現場施工事例も現場蒸気養生もしくは保温加熱養生を行っている。表一 1 に報告された Fc200 N/mm<sup>2</sup> 以上の適用例<sup>10)~14)</sup>を示す。

### 3. Fc200 N/mm<sup>2</sup> レディミクストコンクリート適用事例

#### (1) 建物概要

筆者らは、都内の再開発事業に Fc200 N/mm<sup>2</sup> 超高強度コンクリートを大臣認定取得したレディミクストコンクリートとして適用した。建物外観を写真一 1 に示す。建物は、地上 55 階・地下 2 階・塔屋 2 階で、建築物の高さは約 180 m の鉄筋コンクリート造 (一部鉄骨造) である。2 階から 55 階までは住戸階であり、



写真一 1 建物全景

地下 1 階は駐車場、駐輪場、地下 2 階は設備諸室等、1 階~3 階の一部にはエントランスホール等の住宅共用施設等がある。基準階では、住戸ゾーンが中央部の階段、エレベーター等のコアを囲んで口の字型に外周部に配置された形態となっている。また、コア南側には地下 1 階を乗り入れレベルとした 2 基のタワーパークが 30 階まで建物内に配置されている。

Fc200 N/mm<sup>2</sup> コンクリートの適用箇所は、1 階中柱の 4 本で、鋼管 RC 柱を採用した。また、その上下の 1 階・2 階柱梁接合部にも適用した。超高強度コンクリート柱については、火災時の爆裂防止対策として、ポリプロピレン繊維混入のコンクリートおよび当社保有の被覆材による爆裂防止工法 (FIRECC 工法、性能証明取得) を採用している。管理強度 200 N/mm<sup>2</sup> の超高強度コンクリートは、2013 年 5 月に 1 階柱梁接合部、7 月に 1 階柱、2 階柱梁接合部の 3 回に分けて打込を行った。

#### (2) 使用材料および調合

表一 2 に使用材料を、表一 3 に調合表を示す。結合材にはシリカフェウム混入セメント (低熱ポルトランドセメントにシリカフェウム (比表面積 19.8 m<sup>2</sup>/g)

表一 2 使用材料

種類	記号	物性等
セメント	C	シリカフェウム混入セメント (密度 = 3.08 g/cm <sup>3</sup> )
混和材	SF	シリカフェウム (密度 = 2.26 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 = 9.46 m <sup>2</sup> /g)
細骨材	S	硬質砂岩砕砂 (表乾密度 = 2.59 g/cm <sup>3</sup> )
粗骨材	G	硬質砂岩砕石 (表乾密度 = 2.64 g/cm <sup>3</sup> )
混和剤 1	SP	特殊高性能減水剤 (SSP-104 改 3)
混和剤 2	SRA	収縮低減剤 (ポリエーテル誘導体)
鋼繊維	SFb	径 0.16 mm, 長さ 13 mm

表一 3 調査表

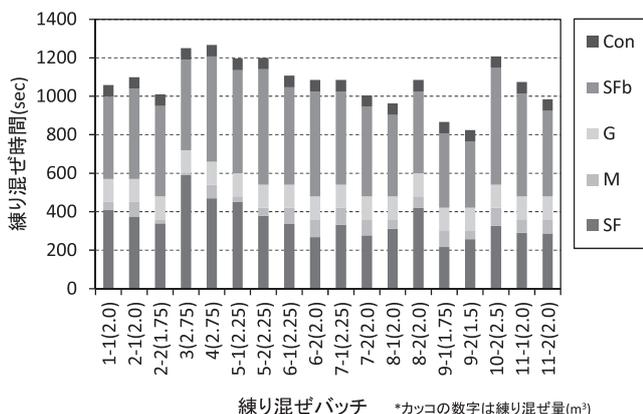
W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						添加量
		W	C	SF	S	G	SRA *1	
12.5	32.4	155	1116	124	350	744	10	SFb *2
								40

\* 1 SRA は練混ぜ水の一部として添加。  
 \* 2 SFb は容積の外割で 0.5 vol.% 添加。

を 10% プレミックスしたもの) と、混和材としてさらに産地と粒度の異なるシリカフェーム (比表面積 9.46 m<sup>2</sup>/g) をセメント内割で 10% 置換して使用し、水結合材比は 12.5% とした。また、自己収縮低減のため収縮低減剤を練混ぜ水の一部として 10 kg/m<sup>3</sup> 添加し、鋼繊維 (径 0.16 mm, 長さ 13 mm) を容積の外割で 0.5 vol.% (40 kg/m<sup>3</sup>) 添加した。

### (3) コンクリートの製造

練混ぜは、モルタル先練りとし、セメントと別に添加するシリカフェームは作業員によるミキサ手投入とした。練混ぜ量は、1 バッチあたり 1.5 m<sup>3</sup> から 2.75 m<sup>3</sup> で、1 バッチまたは 2 バッチを合わせてアジテータ車に積み込んだ。モルタルの練混ぜ時間は、シリカフェーム投入完了後約 60 秒とし、ミキサの動力負荷および目視の判断により、モルタルの練混ぜ状況を確認した。モルタルの練混ぜ完了後、粗骨材を投入し、120 秒練り混ぜた。その後、ファイバボールを防止するために、鋼繊維を投入機により分散させながら、ミキサ上部の投入口より投入した。鋼繊維投入完了後、60 秒間練り混ぜた後、アジテータ車に積み込んだ。図一 2 に、コンクリートの練混ぜ時間結果を示す。モルタルの練混ぜは、練混ぜ量によってシリカフェーム投入量が異なるため、投入時間は 300 ~ 600 秒となった。鋼繊維も同様に投入時間は、344 ~ 607 秒となり、コンクリート 1 バッチ当たりの練混ぜ時間は、約 14 ~ 21 分で、平均 18.5 分となった。また、練混ぜバッチ



図一 2 コンクリートの練混ぜ時間結果

ごとの計量誤差は、各バッチとも手動で調整したため、粗骨材が最も大きく ± 1% 程度、セメントが最小で、各材料とも非常に小さい誤差であった<sup>12)</sup>。

### (4) フレッシュ試験結果

表一 4 にフレッシュ試験の結果を示す。フレッシュ試験の結果は、いずれも目標フロー値である 70 ± 10 cm と目標空気量 1.0 ± 1.0% を十分に満足する結果であった。また、コンクリート温度および塩化物量も規定値を満足した。外気温は、1 階柱梁接合部打込み時は 23 ~ 28 °C, 1 階柱打込み時は 27 °C, 2 階柱梁接合部打込み時は 32 ~ 36 °C であった。

表一 4 フレッシュ試験の結果

打込箇所	台数	スランブフロー (cm)	50 cm フロー (秒)	停止時間 (秒)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	塩化物量 (kg/m <sup>3</sup> )	外気温 (°C)
1 階柱梁接合部	1	72.0	11.4	164.0	1.6	27	0.04	23
	2	67.5	10.1	180.0	1.3	29	-	25
	3	67.0	13.6	180.0	1.1	30	-	28
	4	69.5	12.5	180.0	1.1	30	-	26
1 階柱	1	75.5	10.5	180.0	1.3	31	0.06	27
	2	76.5	11.2	180.0	1.3	31	-	27
	3	72.5	13.5	180.0	1.3	32	-	27
	4	73.5	11.5	180.0	1.3	33	-	27
2 階柱梁接合部	1	72.0	9.6	180.0	1.1	34	0.04	32
	2	66.5	12.1	151.3	1.0	35	-	34
	3	69.5	11.2	155.6	1.0	36	-	36

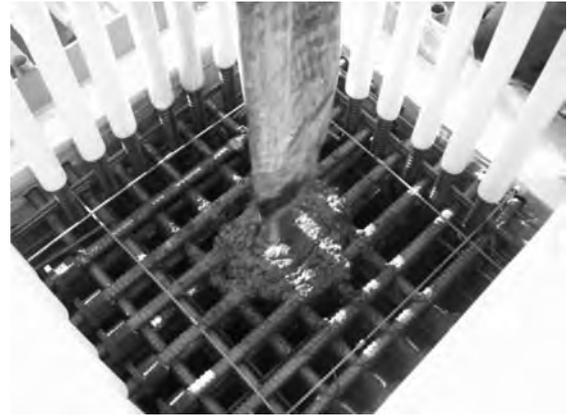
### (5) 打込み状況および養生状況

写真一 2 に 1 階柱施工状況を示す。コンクリートは、一般的なコンクリートバケットによる打込みとし、パイプレータによる簡易な締固めを行った。また、柱梁接合部は養生を行うために梁と工区分けを行い、柱梁接合部のみでコンクリートを打ち込んだ。1 階柱および 1 階・2 階柱梁接合部の打込みでは、コンクリートはいずれも良好なワーカビリティを示し、問題なく充填施工することができた。

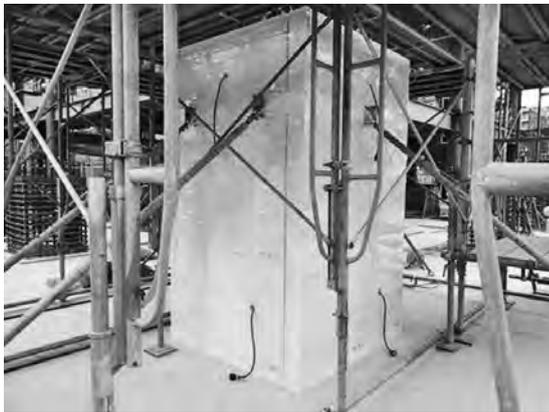
写真一 3 に 1 階柱外観を、写真一 4 に 1 階柱のパネルヒータ設置状況を示す。柱の養生方法は、側面 4 面および天端に断熱材を設置し、主筋を保温材で被覆し、柱上部を断熱シートで覆い、断熱シート内部にヒータを設置した。パネルヒータ設置位置は、柱脚部とした。部材温度管理位置は、柱下端レベルから 50 mm 上部、柱表面から X, Y 方向とも 50 mm の深さの地点とし、所定の温度が確保できるようにパネルヒータの制御を行った。また、この地点のコンクリート温度をモニタリングし、この地点の温度と同じ温度となるよ



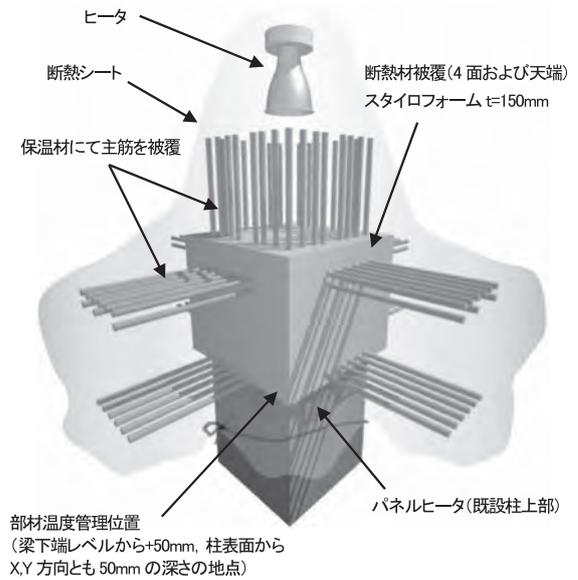
写真一 2 1階柱施工状況



写真一 5 柱梁接合部の打込み状況



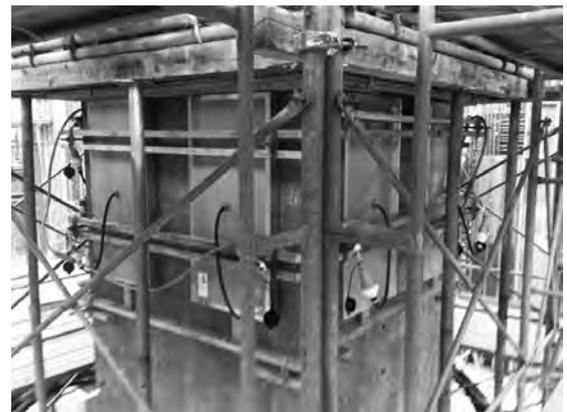
写真一 3 1階柱外観



図一 3 柱梁接合部の養生概要



写真一 4 1階柱のパネルヒータ設置状況



写真一 6 柱梁接合部のパネルヒータ設置状況

うに模擬柱の温度を制御した。

写真一 5 に柱梁接合部の打込み状況を、図一 3 に柱梁接合部の養生概要を示す。また、写真一 6 に柱梁接合部のパネルヒータ設置状況を示す。柱梁接合部の養生は、柱同様に構造体コンクリートの側面 4 面と天端を  $t = 150 \text{ mm}$  の断熱材 (スタイロフォーム) で

覆い、既設柱上部にパネルヒータを設置し、コンクリートを加熱した。柱・梁主筋は保温材で被覆し、さらに柱梁接合部全体を断熱シートで覆い、断熱シートの内側にヒータを設置した。部材温度管理位置は、柱と同様とした。

表一5 構造体コンクリートの強度管理方法

模擬柱部材の寸法	作成頻度	養生方法	試験材齢	強度判定方法
0.4 m × 0.4 m × H0.7 m	1 体 / 1 車毎	保温養生	28 日または 91 日	採取コア 1 本（中央）からの供試体 3 本の平均強度値が管理強度 200 N/mm <sup>2</sup> 以上*1*2
1 m × 1 m × H1 m	1 体 / 50 m <sup>3</sup> 以上かつ 1 体 / 日毎（1 車目）	部材温度追従養生	28 日または 91 日	採取コア 2 本（中央・端部）からの供試体 8 本において 1 本の強度値が管理強度の 95% 以上*2 かつ平均強度値が管理強度以上*2

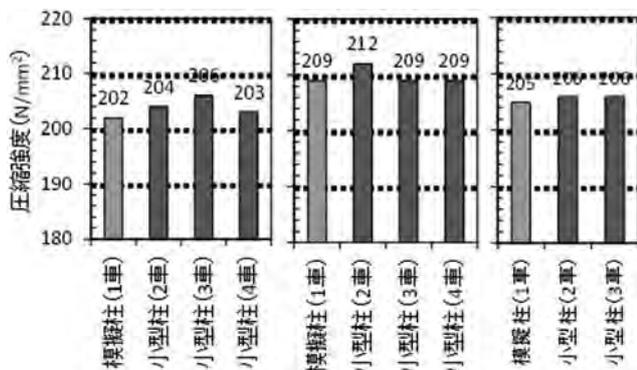
\* 1：打設後 14 日間の平均養生温度が当該部材に比べ模擬柱部材において大きく上回った場合は、強度試験値を補正する。

\* 2：圧縮強度試験における最小値は、棄却検定を行い異常値の場合は棄却する。強度判定は、棄却検定後に行う。

(6) 強度管理結果

表一5に構造体コンクリートの強度管理方法を示す。構造体コンクリートの強度管理は、アジテータ車 1 台ごとに模擬柱または小型柱を作成し、採取したコア供試体で行った。1 台目のアジテータ車のコンクリートで模擬柱を作成し、2 台目以降は小型柱を作成した。試験材齢は 28 日または 91 日とし、各材齢の直前でコアを採取した。

図一4に強度管理結果を示す。3 回の打込みのすべてのアジテータ車において、材齢 28 日におけるコア供試体の平均強度で判定強度の 200 N/mm<sup>2</sup> 以上となり、判定基準を満足した。また、材齢 28 日のコア強度では、平均 206.5 N/mm<sup>2</sup>、標準偏差 3.0 N/mm<sup>2</sup>、変動係数 1.46%と極めて安定していた。



図一4 強度管理結果 (材齢 28 日コア強度)

4. おわりに

国内における超高強度コンクリートの最先端と適用事例について報告した。RC 造集合住宅の高層化を基本として発展してきた超高強度コンクリートであるが、市場ニーズの多様性や設計自由度の拡大に貢献し、その用途を広げつつある。しかしながら、200 N/mm<sup>2</sup> を超える領域では、高温養生や蒸気養生が前提となり、部材の大きさや運搬に制限も加わってくる。今後は、建築物のニーズに合わせた多様な使い方で超高強度コ

ンクリートが研究・適用されていくものと考えている。



《参考文献》

- 1) 国土交通省建築研究所：鉄筋コンクリート構造物の超軽量・超高層化技術の開発，建築研究報告，No.139，2001
- 2) 日本建築学会：高強度コンクリート技術の現状（2009），pp.379-401，2009
- 3) 石川祐次：ポスト NewRC（超高強度 RC 構造），コンクリート工学，Vol.54，No.5，pp.458-463，2016.5
- 4) 鳴瀬浩康・井上敏克・古賀康男・石中正人：超高強度コンクリートへの挑戦（150 N/mm<sup>2</sup> クラスに対応したシリカフェーム混入セメントの開発，セメント・コンクリート，No.697，pp.8-15，2005.3
- 5) 菅俣匠・杉山知己・梅沢健一・岡沢智：超高強度コンクリート用高性能減水剤のフレッシュ性状改善効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.927-932，2002
- 6) 井戸康浩・梅本宗宏・菊田繁美・端直人：200 N/mm<sup>2</sup> 級超高強度コンクリートの基礎的研究（その 1～その 2），日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），A-1，pp.997-1000，2010.9
- 7) 井戸康浩・梅本宗宏・端直人：Fc200 N/mm<sup>2</sup> 級超高強度コンクリートの構造体コンクリートに関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，pp.1249-1254，2013
- 8) 河野克哉・中山莉沙・多田克彦：世界最高強度セメント系材料の開発，太平洋セメント研究報告，第 169 号，pp.20-29，2015
- 9) 菅俣匠・小泉信一・原田 健二・岡沢智：150 N/mm<sup>2</sup> 級コンクリートの強度発現性に及ぼすシリカフェーム反応率の影響，コンクリート工学論文集，Vol.18，No.2，pp.1-11，2007
- 10) 三井健郎・小島正朗・高尾全・菅田昌宏・三橋博三：設計基準強度 150～200 N/mm<sup>2</sup> 超高強度繊維補強コンクリートの開発と実構造物への適用，日本建築学会技術報告集，第 16 巻，第 32 号，pp.21-26，2010
- 11) 山本佳城・中島徹・渡邊悟士・清水良広：設計基準強度 200 N/mm<sup>2</sup> の超高強度プレキャストコンクリートの超高層鉄筋コンクリート造住宅への適用，コンクリート工学，Vol.48，No.8，pp.37-42，2011.8
- 12) 梅本宗宏・芦田哲・進士裕道・濱田聡：Fc200 N/mm<sup>2</sup> の超高強度コンクリートを用いた RC 造集合住宅の設計・施工—西富久地区第一種市街地再開発事業一，コンクリート工学，Vol.53，No.6，pp.558-563，2015.6
- 13) 奥出久人・木原隆志・中野達男・石川祐次：プレキャスト工法を活用した（仮称）吹田スタジアムの設計・施工，コンクリート工学，Vol.53，No.11，pp.986-991，2015.11
- 14) 今井和正・山本佳城・加藤雅樹・村松晃次：設計基準強度 300 N/mm<sup>2</sup> のコンクリートを用いた RC 細柱の開発と適用，コンクリート工学，Vol.51，No.12，pp.959-966，2013.12

【筆者紹介】

梅本 宗宏（うめもと むねひろ）  
戸田建設㈱  
技術開発センター構造技術ユニット  
主管

