

設計基準強度 200N/mm² の 超高強度プレキャストコンクリートの実適用

山本 佳城^{*1}・中島 徹^{*2}・渡邊 悟士^{*3}・清水 良広^{*4}・陣内 浩^{*1}・辻谷 薫^{*1}・吉田 泰^{*1}

Keywords : design strength of 200MPa, ultrahigh strength precast concrete, superhigh-rise condominium, steam curing

設計基準強度 200N/mm², 超高強度プレキャストコンクリート, 超高層集合住宅, 蒸気養生

1. はじめに

近年、超高層鉄筋コンクリート造建物の増加とともに、超高強度プレキャストコンクリートの需要も増加しており、設計基準強度（以下、Fc）が 150N/mm² 以上のコンクリートを用いたプレキャスト部材が普及しつつある^{1), 2)}。プレキャストコンクリートの高強度化は、高品質・高耐久な構造体の構築、自由度の高い空間の創生および施工の合理化³⁾などを可能とするため、コンクリートの更なる高強度化による利用効果の増大も期待されている。しかしながら、常温環境下においてコンクリートを養生するような従来の養生方法では、コンクリートの圧縮強度を効率的かつ大幅に増加させることは難しい。そこで著者らは、プレキャスト工場が現有する一般的な蒸気養生設備を利用して、Fc200N/mm² の超高強度プレキャストコンクリートについて、使用材料、調合およびプレキャスト部材の製造方法などの検討を行ってきた^{4), 5)}。

本稿では、超高層鉄筋コンクリート造集合住宅への適用事例としては国内最高強度となる、Fc200N/mm² の超高強度プレキャストコンクリートを取り上げ、プレキャスト部材の製造方法およびコンクリートの品質記録などについて報告する。

2. 計画概要

2.1 建物概要

Fc200N/mm² の超高強度プレキャストコンクリートを適用した建物は、地下 2 階、地上 42 階の鉄筋コンクリ

ート造であり、現在建設中である。主な用途は共同住宅であるが、店舗、事務所、公益施設および駐車場も備わることとなっている。本建物の外観パースを図-1に、建物概要を以下に示す。

工事名称：(仮称)大橋地区第二種市街地再開発事業 1-1 棟新築工事

建物用途：共同住宅・店舗・事務所・公益施設・駐車場

建築主：東急不動産(株) 東京急行電鉄(株) 三井不動産レジデンシャル(株) 有楽土地(株)

設計：大成建設(株)一級建築士事務所

工事監理：(株)東急設計コンサルタント

施工：大成建設(株) 東急建設(株) (株)銭高組

建築面積：3,788.19m²

延床面積：83,583.50m²

階数：地下 2 階 地上 42 階 塔屋 1 階

最高高さ：155.27m

構造種別：鉄筋コンクリート造

2.2 構造・工法概要

地上階の架構形式は純ラーメン構造、地下階は耐震



図-1 適用建物の外観

Fig. 1 External view

*1 技術センター建築技術研究所建築構工法研究室

*2 設計本部構造グループ

*3 東京支店大橋再開発1-1棟新築工事作業所

*4 東京支店PC工場

壁付ラーメン構造である。また、高層部には、地震時に構造フレームが負担する地震力を低減させることを目的として、極低降伏点鋼を間柱のウェブに使用した履歴減衰型の制震機構を採用している。

コンクリートの強度区分は、柱では $F_c30\sim200\text{N/mm}^2$ 、大梁では $F_c30\sim48\text{N/mm}^2$ 、基準階床は $F_c30\text{N/mm}^2$ である。 $F_c200\text{N/mm}^2$ の超高強度プレキャストコンクリートは、高層直下部における柱のうち、地下1階および地下2階の各3本（断面寸法 $0.95\times0.95\text{m}$ 、高さ約 $5\sim8.5\text{m}$ 、コンクリート総量約 40m^3 ）に適用している。また、その他の地下1階および地下2階の柱には、 $F_c140\text{N/mm}^2$ の超高強度プレキャストコンクリート（コンクリート総量約 420m^3 ）を適用している。地下階の軸組図および地下2階の柱伏図を図-2 および図-3 にそれぞれ示す。

地下階における柱は、当初は $F_c80\text{N/mm}^2$ の現場打ちコンクリートにより計画されていたが、 $F_c140\text{N/mm}^2$ および $F_c200\text{N/mm}^2$ のプレキャストコンクリートを採用することで、より広い空間の確保と施工の合理化を図った。これは、コンクリート強度の増大による部材断面の縮小と、それに伴うプレキャスト柱の吊込み重量の軽減により実現されたものである。なお、地上部における主架構については、柱にプレキャスト部材、梁および床にハーフプレキャスト部材（一部、現場打設）を用いたRC積層工法を適用している。

3. $F_c200\text{N/mm}^2$ の超高強度プレキャストコンクリート柱の製造

$F_c200\text{N/mm}^2$ のプレキャスト柱の製造にあたっては、事前に、室内実験および写真-1 に示すようなプレキャスト工場における実大部材の製造実験を実施し^{4), 5)}、コンクリートの使用材料、調合および養生方法などを決定した。これらの事前実験では、①プレキャスト工場が現有する通常の製造設備により実大部材の製造が可能であること、②プレキャスト柱のコア強度と部材同一養生を行った円柱供試体（以下、同一養生供試体とする）の強度は同等であることから、プレキャスト柱の強度は同一養生供試体により判断できること、および③コンクリートが高い耐久性を有していることなどを確認している。なお、事前の製造実験および実製造は、いずれも東京支店千葉PC工場で行った。

3.1 コンクリートの使用材料・調合

3.1.1 使用材料

$F_c200\text{N/mm}^2$ の使用材料および調合を表-1 に示す。

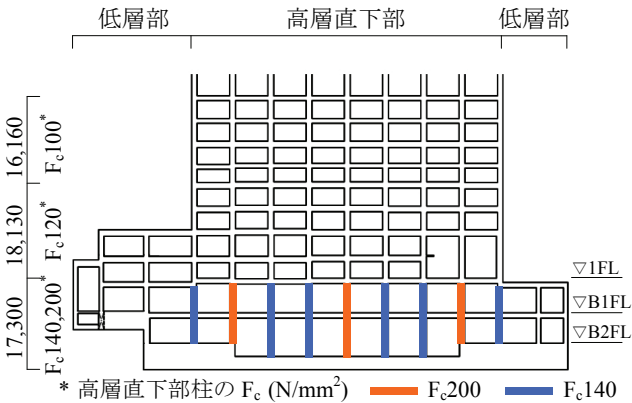


図-2 地下軸組図

Fig. 2 Framing elevation of substructure

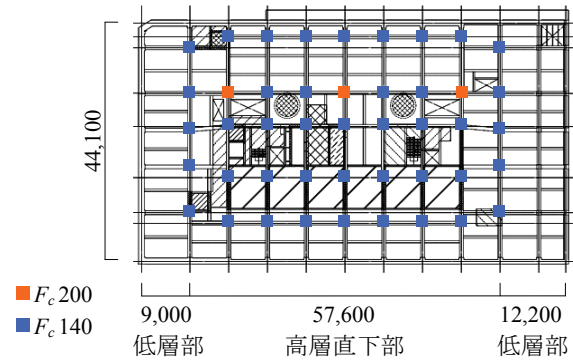


図-3 地下2階柱伏図

Fig. 3 Column plan on second underground floor



写真-1 実大部材製造実験の状況

Photo 1 Manufacturing experiments of actual-size columns

表-1 $F_c200\text{N/mm}^2$ の使用材料および調合条件
Table 1 Materials and mixture proportions of 200MPa

W/B (%)	単位量(kg/m ³)						設定値	
	セメント	混和材	水	細骨材	粗骨材	膨張材	空気量	フロー
14	729	312	150	629	620	30	1.5%	70cm

セメント: 中庸熱ポルトランドセメント(密度 3.21g/cm^3)
混和材: 高強度用混和材(密度 2.51g/cm^3)
細骨材: 大月産安山岩砕砂(表乾密度 2.62g/cm^3)
粗骨材: 大月産安山岩砕石(表乾密度 2.64g/cm^3)
膨張材: 石灰系膨張材
混和剤: ポリカルボン酸系高性能減水剤[収縮低減型]

結合材には、中庸熟ポルトランドセメント、高強度用混和材および石灰系の膨張材を使用した⁴⁾。また、自己収縮の抑制対策としては、膨張材に加えて、収縮低減型の超高強度コンクリート用の高性能減水剤を用いた。粗骨材については、製造された碎石の原石について圧縮強度およびヤング係数を試験する粗骨材厳選技術⁶⁾により選定したものを使用し、コンクリートの圧縮強度の安定化を図った。

3.1.2 調合

コンクリートの単位水量は 150kg/m^3 、水結合材比は 14%とした。また、細骨材率は 50%程度とし、フレッシュコンクリートに高い流動性と十分な分離抵抗性が得られる値として定めた。なお、本調合では、試験により、単位水量を調合上の値に対して $\pm 10\text{kg/m}^3$ の範囲内に収めることで、骨材表面水等の変動により単位水量が増減した場合においても、実際の水結合材比を 13～15%程度とすることができる。また、事前の実験では、水結合材比が 15%のコンクリートについても検討を行っており、この場合においても 200N/mm^2 を上回る圧縮強度が得られることを確認している。

3.2 コンクリートの練混ぜ・打込みおよび養生

3.2.1 練混ぜ

コンクリートの練混ぜ日は延べ 4 日、練混ぜバッチ数は全 39 バッチである。コンクリートの練混ぜには、二軸強制練りミキサ (1.5m^3) を使用し、モルタル先行練りとした。モルタルの練混ぜ時間は 13 分を基本とし、適宜、ミキサの電力負荷値や目視などにより練混ぜ状況を把握し、練混ぜ時間の妥当性を確認した。

図-4 は、同一練混ぜ日および練混ぜ量のコンクリートについて、モルタル練混ぜ時の電力負荷値の測定例を示したものである。負荷値の推移は各バッチで同様の傾向を示しており、6～7 分付近でピークを示した後、13 分付近でほぼ一定の値に収束した。これらの測定例の場合では、同一練混ぜ日内で均質なモルタルが練混ぜられており、いずれも基本とした練混ぜ時間 13 分でモルタルが十分に練り上がっているものと判断された。このような結果は、骨材表面水が比較的安定していたこと、および後述 4.1 のように、単位水量試験により水量の安定化を図ったことにより得られたものだと考えられる。

3.2.2 打込み

コンクリートの練り上がり後は、遠隔操作が可能な自走式トロリーホッパーにより所定の製造ラインまで運搬し、スランプフローおよび空気量などのフレッシュ試験を行った後、打込みを実施した。フレッシュ試

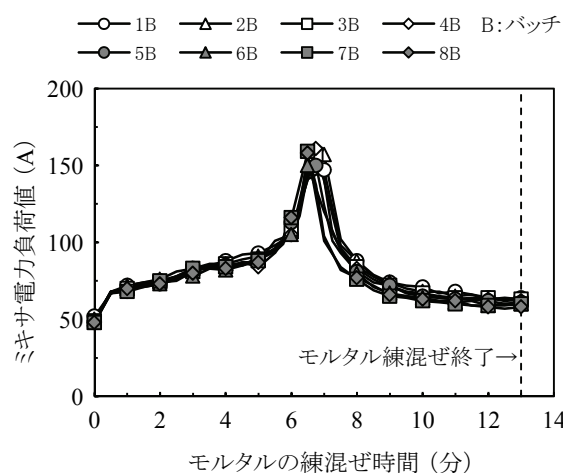


図-4 モルタル練混ぜ時のミキサ電力負荷値の測定例
Fig. 4 Typical measurements of the mixer load current measured during mortar mixings



写真-2 フレッシュ試験の状況
Photo 2 Fresh concrete tests



写真-3 コンクリートの打込み状況
Photo 3 Concrete placing in horizontal position

験および打込み状況を写真-2、写真-3 に示す。本製造では、コンクリートの打込み方向は横打ちとした。なお、打込み方向については、縦打ちおよび横打ちのいずれの場合においても、コンクリートの充填状況は良好であることを事前の実験により確認している。

3.2.3 養生

打込み翌日に脱型したプレキャスト柱には、最高温

度（養生槽内温度） $90\pm5^{\circ}\text{C}$ の蒸気養生を施した。また、最高温度の保持期間は、120 時間以上かつプレキャスト柱が必要強度に達していることを同一養生供試体により確認できるまでとした。そのため、蒸気養生槽には、蒸気養生を中断することなく同一養生供試体を取り出せるよう、供試体取り出し用の開閉窓を設置した。

蒸気養生にあたっては、養生終了後に槽内からプレキャスト柱を取り出す際のコンクリート表面の急激な乾燥を抑制するため、養生前のコンクリート表面に塗布型の乾燥収縮低減剤とラップフィルムによる被覆を施した（写真-4）。蒸気養生の終了後は、プレキャスト柱の表面に断熱材を貼り付け、柱全体を緩やかに除熱させた。

3.3 プレキャスト柱の製造期間

本製造におけるプレキャスト柱の製造期間（コンクリートの練混ぜからの期間）は、蒸気養生終了までが約 1 週間、柱の除熱期間が約 2 週間の、合計 3 週間程度であった。製造されたプレキャスト柱は工場内にストックし、現場の取付け工程に合わせて出荷した。なお、プレキャスト柱の製造では、必要強度に達していることが確認された後に蒸気養生工程が終了するため、出荷後における不具合発生リスクは軽減されている。写真-5 に、 $\text{Fc}200\text{N}/\text{mm}^2$ のプレキャスト柱の設置状況を示す。

4. コンクリートの品質記録

4.1 フレッシュ性状

図-5 に、全ての練混ぜバッチにおけるスランプフロー、50cm フロー到達時間（T50）、空気量および単位水量（水中質量法）の試験結果を示す。

スランプフローは 70～80cm の範囲にあり、写真-2 に示したように、コンクリートは材料分離等を生じることなく高い流動性を有していた。また、T50 は概ね 10 秒前後の値にあったが、単位水量が相対的に小さく



写真-4 ラップフィルム被覆を施したプレキャスト柱

Photo 4 Precast columns were kept covered with plastic wrap before steam curing at 90°C



写真-5 プレキャスト柱の設置状況

Photo 5 Erection of precast column

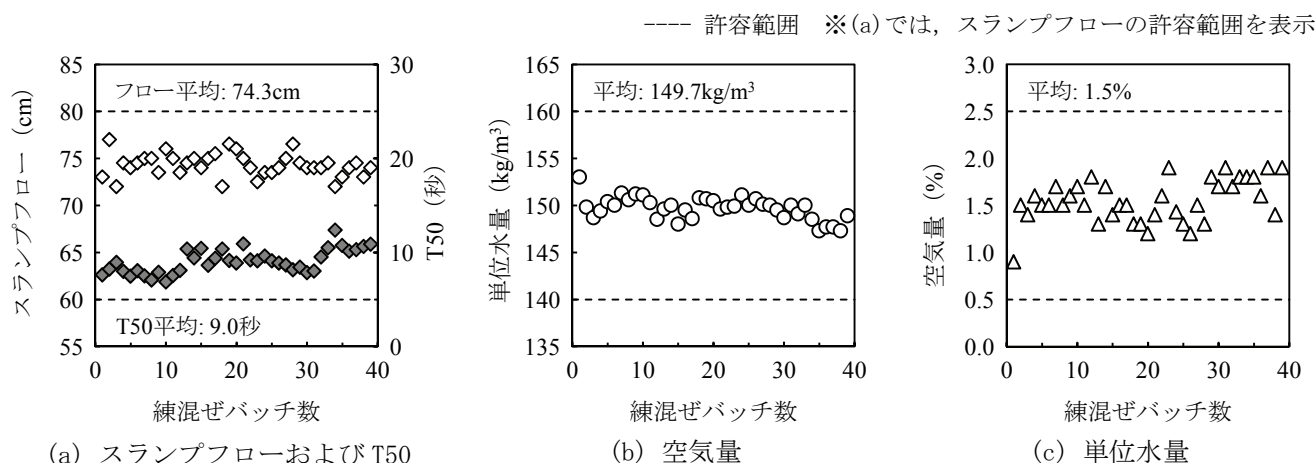


図-5 フレッシュコンクリートの試験の結果

Fig. 5 Results of fresh concrete tests - (a) Slump flow and T50; (b) Air content; and (c) Unit water content

なった 35～40 バッチ付近で、やや大きくなる傾向を示した。空気量は殆どが 1.0～2.0%の範囲にあり、ばらつきは小さい。単位水量については、調合上の値 (150kg/m^3) に対して試験結果に許容範囲内の偏りが生じた場合には、骨材表面水の見直しを行うことにより水量の安定化を図った。これにより、製造した全バッチの単位水量の変動を $145\sim155\text{kg/m}^3$ の範囲に収めることができ、平均値 149.7kg/m^3 が得られた。以上のように、コンクリートのフレッシュ性状については、全ての練混ぜバッチについて概ね設定値通りの品質が得られた。

図-6 に、単位水量とスランプフローおよび T50 の関係を示す。スランプフローおよび T50 の測定値は、同一の単位水量に対してそれぞれ 5cm および 5 秒程度のばらつきを有しているが、全体としては、単位水量が増加するとスランプフローはやや増加、T50 はやや減少する傾向を示している。従って、コンクリートの製造中にスランプフローおよび T50 が大きく変化した場

合には、これらの測定結果を、単位水量試験の結果の補助的な判断材料としても用いるのが良いと思われる。

4.2 圧縮強度

図-7 に、全ての練混ぜバッチから採取した同一養生供試体の圧縮強度の試験結果 (3 本平均) を示す。また、表-2 には、これらの試験結果について練混ぜ日別にまとめたものを示した。図-7 より、各バッチの圧縮強度はいずれも 200N/mm^2 を超えており、変動係数が 1.5%であることから、バッチ間のばらつきも非常に小さいことがわかる。また、表-2 に示したように、日内の平均および変動係数についても、バッチ間の値とはほぼ同等であることから、本製造では品質の安定したコンクリートを製造することができたといえる。

図-8 は、各バッチについて単位水量、空気量および単位容積質量と圧縮強度の関係を示したものである。空気量および単位容積質量は圧縮強度との間に明確な関係を示さなかったが、単位水量については、これが増加すると圧縮強度はわずかに低下する傾向を示した。

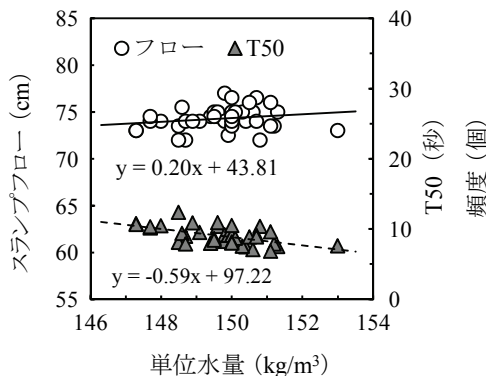


図-6 単位水量とスランプフローおよび T50 の関係

Fig. 6 Influences of unit water content on slump flow and T50

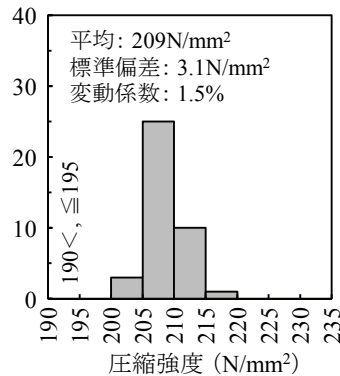
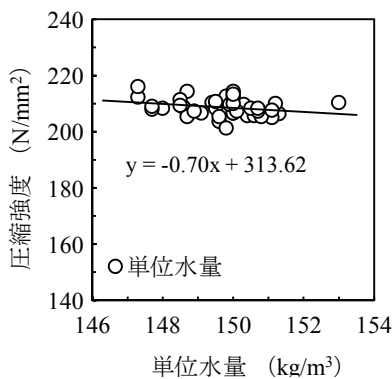


図-7 圧縮強度の試験結果

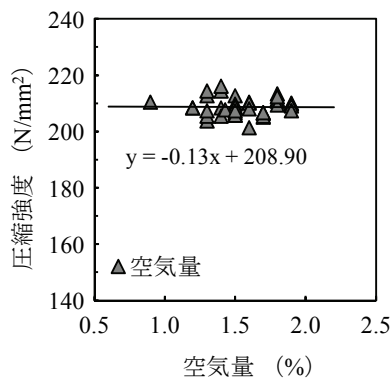
Fig. 7 Histogram of compressive strength test results

表-2 練混ぜ日別の圧縮強度の試験結果
Table 2 Compressive strength test results by date of mixing – (a) average; (b) standard deviation; (c) variation coefficient

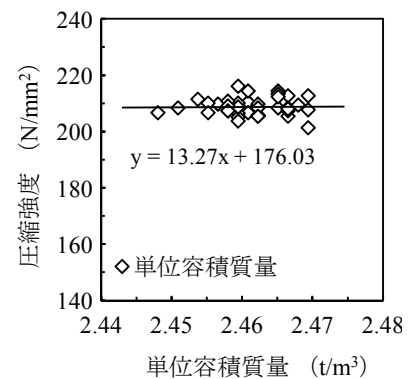
練混ぜ 日数	1 日目	2 日目	3 日目	4 日目
(a) 平均値 (N/mm^2)	209	207	209	210
(b) 標準偏差 (N/mm^2)	3.1	1.8	3.7	3.3
(c) 変動係数 (%)	1.5	0.9	1.8	1.6



(a) 単位水量



(b) 空気量



(c) 単位容積質量

図-8 単位水量、空気量および単位容積質量と圧縮強度の関係

Fig. 8 Relationships between fresh properties and compressive strength of concrete

- (a) unit water content; (b) air content; and (c) density of fresh concrete

しかしながら、本製造では、単位水量をはじめとするコンクリートのフレッシュ性状の変動を大幅に抑制できたことから、 200N/mm^2 を超える安定した強度が得られたものと考えられる。

京急行電鉄(株)、三井不動産レジデンシャル(株)、有楽土地(株)、(株)東急設計コンサルタント、(株)デイ・シイ、太平洋セメント(株)、BASF ポゾリス(株)、甲州砕石(株)、東京検査(株)および他工事関係各位に深く御礼申し上げます。

5. おわりに

設計基準強度 200N/mm^2 の超高強度プレキャストコンクリートを超高層鉄筋コンクリート造集合住宅に適用した事例について報告した。蒸気養生などを含むプレキャスト部材の製造工程には、特別な配慮を要する部分が多く含まれていたが、本製造では品質の安定したコンクリートを適用することができた。

超高層建物の更なる普及や長寿命建物の推進に対して、超高強度プレキャストコンクリートは将来的にも重要な役割を果たしていくことが期待される。今後も、超高強度コンクリートの更なる性能向上を目指して開発を進めるとともに、開発技術の積極的な展開を図る予定である。

謝辞

$\text{Fc}200\text{N/mm}^2$ の超高強度プレキャストコンクリートの実適用にあたり、ご指導とご協力を賜りました東急不動産(株)、東

参考文献

- 1) 岩室大, 渡邊悟士, 服部敦志, 寺内利恵子, 陣内浩: 設計基準強度 150N/mm^2 の超高強度コンクリートの実施適用および品質管理 その1~3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1067-1072, 2008
- 2) 服部敦志, 宮田哲治, 今井和正, 山本佳城: 最新技術を適用した超高層集合住宅の設計と施工, コンクリート工学, Vol.49, No.2, pp.26-31, 2011
- 3) 山本佳城, 宮田哲治, 本岡功成, 服部敦志: 超高強度プレキャスト鉄筋コンクリート構真柱の開発と超高層建物への適用, コンクリート工学, Vol.47, No.8, pp.34~38, 2009
- 4) 並木哲, 渡邊悟士, 黒岩秀介, 陣内浩, 山本佳城, 寺内利恵子: 設計基準強度 200N/mm^2 の超高強度コンクリートの実用化に関する研究 その1~3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.891-896, 2009
- 5) 渡邊悟士, 黒岩秀介, 陣内浩, 山本佳城, 吉田泰, 並木哲: 設計基準強度 200N/mm^2 の超高強度コンクリートの実用化に関する研究 その4 耐久性に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1001-1002, 2010
- 6) 渡邊悟士, 寺内利恵子, 小田切智明, 阿部剛士: 高品質粗骨材選定技術による超高強度コンクリートの品質の安定化, コンクリート工学, Vol.45, No.2, pp.32~40, 2007