

設計基準強度 300 N/mm^2 の 超高強度プレキャスト RC 長柱の開発と適用

山 本 佳 城・今 井 和 正・水 谷 太 朗

近年、超高強度コンクリートを利用した細径の鉄筋コンクリート柱に関する開発が進められており、建築分野では、超高強度コンクリートは、これまでの主な用途であった高層建築以外の建物にも適用されつつある。本稿では、このような細径の柱に関して、より開放的な室内空間と安全性の高い架構の実現を目指した取り組みとして、設計基準強度 300 N/mm^2 の超高強度プレキャストコンクリートを用いた細径の柱の開発と適用状況について紹介する。

キーワード：超高強度コンクリート，設計基準強度 300 N/mm^2 ，プレキャスト，RC 長柱，接合方法

1. はじめに

圧縮強度が 100 N/mm^2 を超えるような超高強度コンクリートは、これまで超高層集合住宅における下層階の鉄筋コンクリート柱（RC 柱）に主に用いられてきた。一方、近年では、コンクリートのさらなる高強度化やプレキャスト化に関する材料・製造方法の開発とともに、その有効な適用部材として細径の RC 柱に着目した開発も進められており、設計基準強度（Fc）が 200 N/mm^2 以上となる細径の RC 柱が高層建築以外の建物にも適用されている^{1), 2)}。

本稿では、このような細径の RC 柱に関して、従来のコンクリート強度を上回る $\text{Fc}300 \text{ N/mm}^2$ の超高強度プレキャストコンクリートを使用し、さらに、柱の内法高さ L と直径 D の比（L/D）を、RC 規準³⁾の仕様規定である 15 を超えるようなものとした事例について紹介する。なお、本稿では、L/D が 15 以上となるような柱を「RC 長柱」と称する。

2. $\text{Fc}300 \text{ N/mm}^2$ の RC 長柱の開発

（1）超高強度プレキャストコンクリート

$\text{Fc}300 \text{ N/mm}^2$ のプレキャストコンクリートに関する開発では、コンクリートの強度や耐久性に関する試験室での実験や、コンクリートの施工性や部材製造に関するプレキャスト工場での実機実験を行い、コンクリートの使用材料、調合および養生方法などを定めた。実機実験では、実大 RC 柱のほかに、断面積やコンクリートの打込み方向を変化させた模擬部材を作製

し（写真—1）、そこから $\phi 100 \text{ mm}$ のコンクリートコア供試体を採取して（写真—2）、部材中における圧縮強度の発現状況を調査した。



写真—1 実機実験における模擬部材の例



写真—2 コア採取状況（ $\phi 200 \text{ mm}$ 模擬部材）

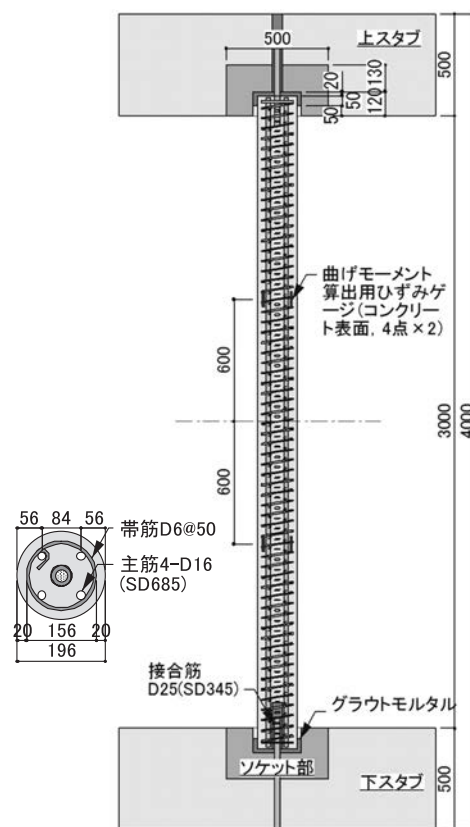
(a) コンクリートの使用材料および割合

Fc300 N/mm² のプレキャストコンクリートは、部材に高温養生を施して作製する。そのため、結合材は、フレッシュ時の流動性ととも、高温養生時の強度発現性が向上する産業副産物等をセメントに混合して構成した。その他の使用材料は、砕石、砕砂、収縮低減型のポリカルボン酸系高性能減水剤および鋼繊維である。水結合材比は 12.0 %，単位水量は 163 kg/m³，空気量は 2.5 % とし，スランプフローについては，細径の RC 柱への充填性を考慮して，70 cm 程度のフローが得られるように調合した。

(b) コンクリートの養生

脱型後のコンクリートには，はじめに，シート被覆等による湿潤養生を行い，その後，高温養生を施した。湿潤養生の期間は，プレキャスト部材と同じ条件で養生した $\phi 100 \times 200$ mm の供試体（同一養生供試体）の圧縮強度により判断することとし，120 N/mm² 以上が得られるまでとした。

高温養生における養生雰囲気最高温度は 190℃ とし，温度上昇勾配および下降勾配については，それぞれ 20℃/h 以下および 10℃/h 以下とした。



図—1 構造実験試験体の形状と配筋

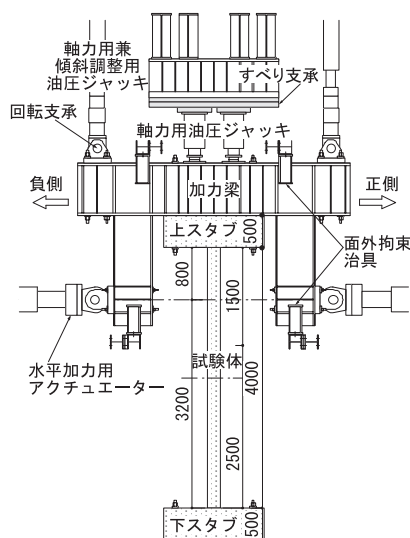
(2) 構造性能

(a) RC 長柱端部の接合方法

RC 長柱を適用する建物では，RC 長柱には主に軸力を負担させ，耐震壁により水平剛性を確保し，さらに免震・制振システムとの併用により，全体として地震時安全性を確保する架構を想定している。ここで，RC 長柱の端部の接合部には，火災時などにおいて座屈長さを抑制するため，水平変形が小さい時点では高い回転剛性が求められ，一方，地震時には優れた水平変位追従性も必要となってくる。これらを同時に実現させるため，RC 長柱とその端部の受け側とは接合筋のみで定着させ，受け側の凹状ソケットに挿入した端部周辺をグラウトモルタルで拘束する，半剛接合による方法を考案した⁴⁾（図—1）。

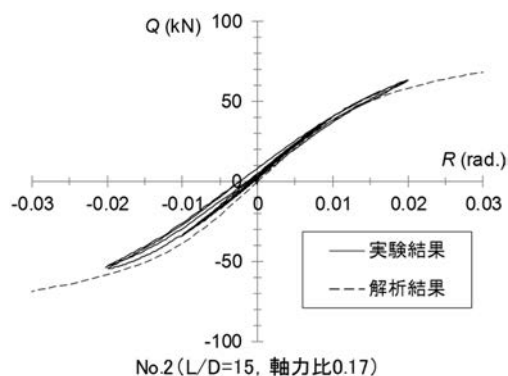
(b) 構造実験

圧縮強度 300 N/mm² 級のコンクリートを使用し，端部を考案した接合方法とした場合の，RC 長柱の地震時水平変位追従性や鉛直荷重支持能力などを把握するために，一定軸力下での水平加力実験および一定水平変位下での軸圧縮実験などを行った。試験体（図—1）の L/D は 15 または 20 とし，軸力比の水準は 0.17，0.25 および 0.33 とした。また，水平加力実験の加力方法は，一定軸力下で水平変位漸増正負交番繰返し載荷を行う曲げせん断加力とした（図—2）。



図—2 加力方法

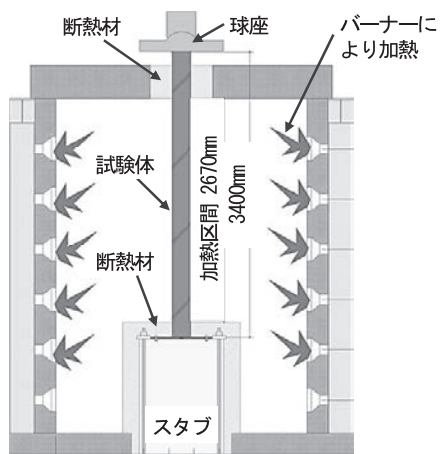
実験結果として，例えば，水平加力実験におけるせん断力 Q と部材角 R の関係（図—3）からは，超高強度コンクリートを用いた長柱の特徴である大きな弾性領域が見てとれる。また，いずれの試験体も $R = \pm 1/50$ rad. まで安定して軸力を保持しており，優れた水平変位追従性が確認された。以上のような実験に加え，付加曲げモーメントや座屈が構造性能に及ぼす影響などについても解析的な検討⁵⁾を行い，RC 長柱の設計に必要な資料を整備した。



図—3 セン断力—部材角関係の例

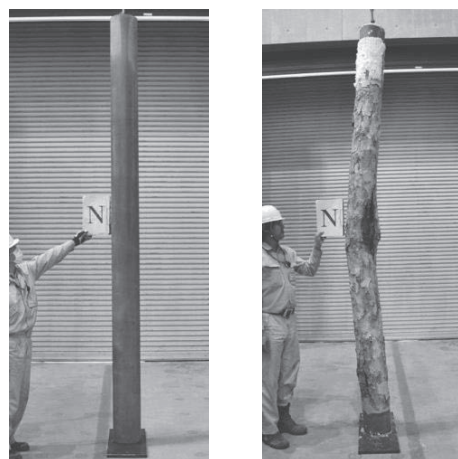
(3) 耐火性能

火災が生じた場合の細径の RC 長柱では、柱の断面が小さく温度が早期に上昇するため、鉄筋やコンクリートといった構成材料の力学性能の低下が部材の耐火性能に及ぼす影響が大きくなる。また、座屈長さ／直径が大きな場合では、高温時における構成材料のヤング係数の低下により部材の曲げ剛性が大きく低下するため、座屈破壊の可能性も高くなる。そこで、実際の建物（3章に示す）を想定した Fc300 N/mm² の実大 RC 長柱試験体を製作し、載荷加熱実験（図—4）により耐火性能を検証した。



図—4 載荷加熱方法

実験では、鉛直荷重や座屈長さ／直径などの条件について、実際の建物を考慮して定めた。また、所定の鉛直荷重を載荷した後、ISO834 の標準加熱温度曲線に従った加熱を行い、試験体が荷重支持能力を喪失するまでの時間（耐火時間）を計測した。実験前後の試験体の状況を写真—3 に示す。実験後の試験体は「く」の字状に曲がっており座屈破壊したものと考えられるが、耐火時間については、適用建物に要求される 60 分に対して 112 分であったことから、十分な耐火性能を有しているものと判断された。



実験前

実験後

写真—3 実験前後の試験体の状況

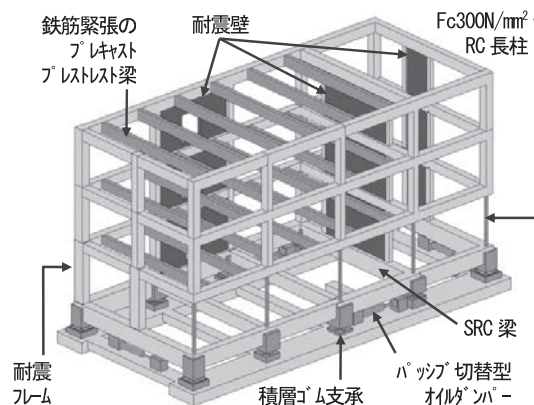
3. 建物への適用

(1) 建物概要

建物の外観を写真—4 に、構造概要を図—5 に示す。本建物は、約 30 × 14 m の矩形平面を有する事務所ビルである（地上 3 階、塔屋 1 階、軒高 12.75 m、建築面積 427.57 m²、延床面積 1,277.32 m²）。基礎は直接基礎、地上部は両方向とも耐震壁付ラーメン構造の



写真—4 建物の外観



図—5 構造概要

鉄筋コンクリート造である。また、本建物では、天然ゴム系積層ゴム支承とパッシブ切替型オイルダンパーを用いた基礎免震を採用している。

$\text{Fc}300 \text{ N/mm}^2$ の RC 長柱は 1 階南面の柱 5 本に適用し、2 章に示した検討結果などに基づき、柱の直径 D は 220 mm の円形、内法高さ L は 3,750 mm とした ($L/D \div 17$)。また、建物の東西面と北面に耐震要素をコ形に配置し、地震時の水平力とねじれに対する剛性を確保した。

(2) $\text{Fc}300 \text{ N/mm}^2$ の RC 長柱の製造

(a) コンクリートの練混ぜ、養生および強度管理計画

コンクリートの調合および養生方法などは、事前の検討 (2 章) で定めた方法とした。コンクリートの練混ぜには二軸強制練りミキサ (1.5 m^3) を使用し、打込みにはコンクリートバケットおよびバイブレーターを用いた (写真—5)。



写真—5 コンクリートの打込み状況

コンクリートの圧縮強度の検査では、RC 長柱と同一断面の模擬部材 ($\phi 220 \times 1,100 \text{ mm}$) を作製し、ここから採取した $\phi 100 \times 200 \text{ mm}$ のコア供試体を用いて試験を行うこととした。本建物では、計 6 バッチ製造したコンクリートの全てについて模擬部材を作製し、材齢 28 日に試験を実施した。

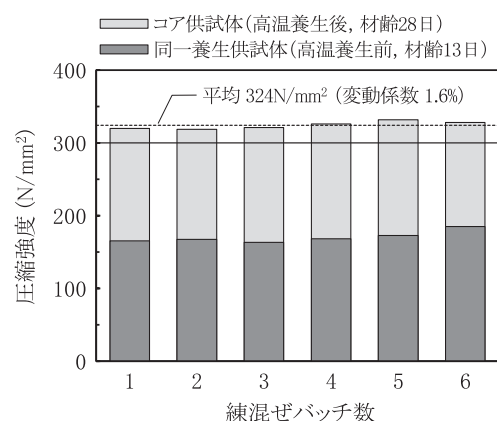
(b) コンクリートの品質

フレッシュコンクリートのスランプフローおよび空気量は安定しており、いずれも目標値と同程度の値が得られた。また、 $\phi 220 \text{ mm}$ への充填性を考慮してスランプフローを 70 cm と大きめに設定したが、材料分離や繊維の偏り等は生じなかった (写真—6)。

高温養生前における同一養生供試体の圧縮強度、および高温養生後におけるコア供試体の圧縮強度を図—



写真—6 コンクリートのフロー状況



図—6 圧縮強度の試験結果

6 に示す。高温養生前の強度は $163 \sim 185 \text{ N/mm}^2$ であり、材齢 13 日で所定の強度以上であることを確認した。また、高温養生後の材齢 28 日の強度は $319 \sim 332 \text{ N/mm}^2$ であり、いずれのバッチも $\text{Fc}300 \text{ N/mm}^2$ を十分に確保するとともに、変動係数の小さな安定した品質が得られた。なお、材齢 91 日にも圧縮強度を測定したところ (代表的な 3 バッチ)、平均 333 N/mm^2 で材齢 28 日と概ね同等の強度であった。

写真—7 に RC 長柱の設置状況を示す。 $\text{Fc}300 \text{ N/mm}^2$ の超高強度コンクリートによる RC 長柱を適用



写真—7 RC 長柱の設置状況

することにより、一般的な強度のコンクリートを使用した場合に想定される柱と比較して、柱の断面寸法を1/3程度に低減することができ、開放的な室内空間と安全性の高い架構を実現した。

4. おわりに

$F_c300\text{ N/mm}^2$ の超高強度プレキャストコンクリートを用いたRC長柱について、開発概要と適用事例を紹介した。開発にあたっては、コンクリートの製造方法の確立、地震時の水平変位追従性および火災時の鉛直荷重支持性能の確保などが特に重要な課題であり、これらを達成することで、安全性の高い架構で開放的な室内空間を実現することができた。本稿で紹介した技術が、超高強度コンクリートのさらなる普及・発展に貢献できれば幸いである。



《参考文献》

- 1) 辰濃達, 山本佳城, 河合邦彦, 河本慎一郎: 超高強度コンクリートにより構築された立体都市広場の設計および施工, コンクリート工学, Vol.50, No.7, pp.621-627, 2012.7
- 2) 奥出久人, 木原隆志, 中野達男, 石川裕次: プレキャスト工法を活用した(仮称)吹田市立スタジアムの設計・施工, コンクリート工学, Vol.53, No.11, pp.986-991, 2015.11

- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, pp.144-147, 2010.2
- 4) 岡田直子, 今井和正, 村松晃次, 服部敦志, 小室努: 超高強度コンクリートを用いたRC長柱の構造性能(その4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.113-114, 2011.7
- 5) 岡田直子, 今井和正, 服部敦志, 小室努: 圧縮強度 300 N/mm^2 級の超高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート造長柱の構造性能, 日本建築学会構造系論文集, No.704, pp.1535-1545, 2014.10

【筆者紹介】



山本 佳城 (やまもと けいき)
大成建設㈱
技術センター 建築技術研究所
主任研究員



今井 和正 (いまい かずまさ)
大成建設㈱
技術センター 建築技術研究所
主任研究員



水谷 太郎 (みずたに たろう)
大成建設㈱
設計本部 特定プロジェクト部設計室
室長