

立体都市広場の架構計画および施工

災害時における人々の集中に配慮した地下空間の実現

小室 努^{*1}・是永 健好^{*2}・河合 邦彦^{*3}・辰濃 達^{*4}
征矢 克彦^{*4}・河本 慎一郎^{*4}・甲斐 隆夫^{*5}

Keywords : Taisei super concrete, Fc250, slender column

大成スーパーコンクリート, Fc250, 細柱

1. はじめに

人々が集まる都市の広場には、動線確保・憩いの場の提供・緑化などが求められ、交通ネットワークや建築物との関係を維持しながら、快適な空間確保が都市計画上重要なとなる。また、大地震などの災害時においては、人がさらに集中することが想定され、余裕のある空間確保とともに、高い構造安全性が要求される。

空間と安全性両方の確保の解決策の一つとして、超高強度コンクリートの利用があげられる。超高強度コンクリートは、超高層集合住宅の高層化と長スパン化を求める多くの実績があるが、この用途に限らず、大きな軸圧縮耐力を期待する部位への適用が考えられる。例えば、通常の軸力を支える柱でも、断面を極力小さくし、軸力を主に負担させ水平力の負担をさせない細柱への適用があげられる。また、長スパン梁や大型スラブ等の水平部材をプレストレストコンクリート部材とし、断面を小さくして軽量化を求める場合も考えられる。

超高強度材料を使用した細柱やプレストレストコンクリート部材を採用することにより、都市の広場において空間や視界確保のために小さい部材断面としながらも、高い安全性を確保し、長寿命建築を実現することが可能となる。ここでは、超高強度コンクリートを、駅周辺施設の広場に適用した計画内容

を示す。

2. 建築概要

本建築の外観および概要を図-1に示す。主用途を事務所とする地上23階建の超高層オフィス棟および地上・地下広場で構成される立体都市広場（タウンゲート）が計画されている¹⁾。



建物名称：御茶ノ水ソラシティ
建物用途：事務所・育成用途・商業・駐車場
設計：大成建設株式会社一級建築士事務所
監理：株式会社久米設計
施工：大成建設株式会社東京支店
構造種別：鉄筋コンクリート造・鉄骨造・免震構造
階数：地下2階、地上23階、塔屋2階
建物高さ：109.99m
敷地面積：9,547m²
建築面積：4,172m²
延べ面積：101,786m²
施工時期：2010.11～2013.3

図-1 建物外観パースおよび建築概要

Fig.1 Perspective and outline of building

*1 技術センター 建築技術研究所 建築構工法研究室

*2 技術センター 建築技術研究所

*3 東京支店 建築工事作業所

*4 設計本部 構造グループ

*5 建築本部 技術部

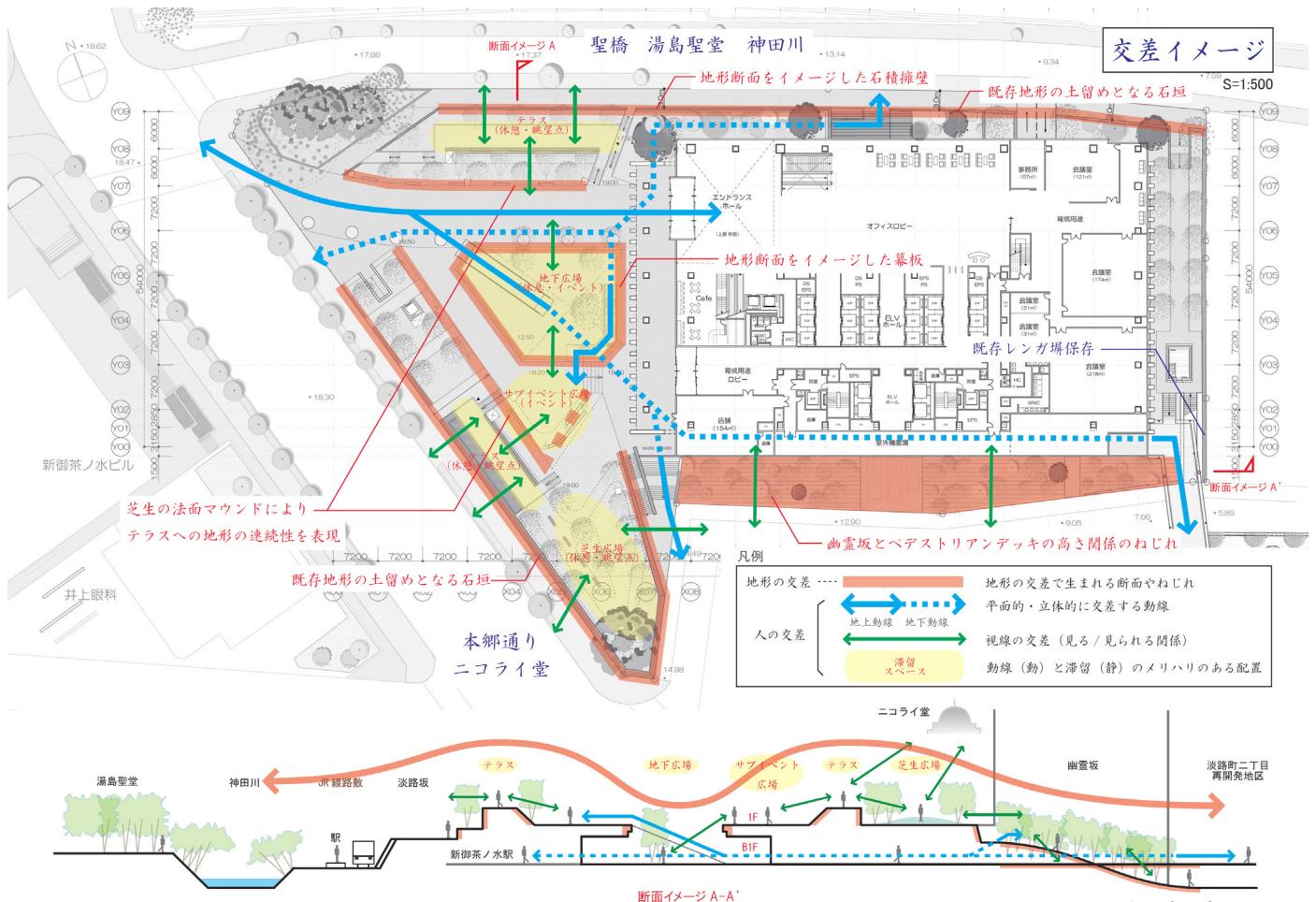


図-2 地形および人の交差のイメージ
Fig.2 Image of intersection of land and human

本計画の最大の目的は、東京都都市再生特別地区制度の活用により、高度土地利用活用を図りながら、近隣に対し地域貢献を行うことである。この実現のために、地下鉄新御茶ノ水駅から本建物およびブリッジで接続する隣接再開発エリアへ続くバリアフリー動線を実現し、地上と地下をスムースにつなぐ賑わいの商業空間を創出することが立体都市広場に求められた。立体都市広場は、約 3,000m² の緑豊かな地上広場と地下鉄改札口に接続する約 1,400m² の地下広場が一体となる大規模な計画とした。

図-2 に、計画地およびその周囲の地形の高低差やねじれ（地形の交差）と地上・地下の人の動線・滞留・視線（人の交差）のイメージを示す。台地と低地を結ぶ坂（道）を計画地に引き込み、交通の主要結節点としての動線と視線（見る/見られるの関係）をデザインするため、広場の中心に位置する吹き抜け空間の開放性が非常に重要となった。図-3 に、吹き抜けを中心とする立体都市広場のイメージを示す。地上広場は、緑化を充実させて安らぎと潤いのある

空間とし、地下広場は、賑わいと活気のある空間とすることを計画した。このような計画において、吹き抜け周りの構造要素（柱）は存在感を極力少なくすることが求められる一方で、災害時を考慮し、人がさらに集中することも想定し、高い構造安全性が要求された。



図-3 立体都市広場のイメージ
Fig.3 Image of three dimensional urban plaza

3. 構造計画概要

3.1 構造設計方針

構造形式概要を図-4に示す。超高層オフィス棟は、21mを超えるロングスパン空間が計画され、これに高い耐震性能が求められた。また、当該敷地には地下鉄2線が存在しており、本建物が影響を及ぼしてはならない。これに対して、超高層オフィス棟は中間層免震構造とし、高い耐震性能をS造大梁とCFT造の柱の架構で実現した。

立体都市広場は、植栽や土壌の積載による大きな重量の地上広場を支える人工地盤により構築するが、大地震時には不特定多数の人々が立体都市広場に集中することが考えられ、高い構造安全性能が求められた。これに対し、立体都市広場はRC造とし、人工地盤を支持する主要な柱、梁については、超高強度コンクリートを採用し、高い余裕度で安全性を確保するとともに、部材断面を縮小化し、視認性の高い開放的な地下空間計画の実現に貢献した。

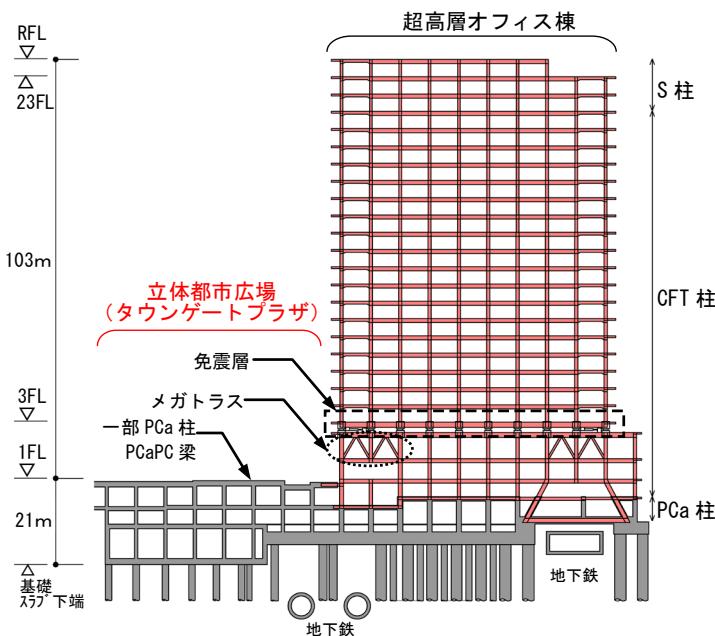


図-4 構造形式概要

Fig.4 Outline of structure

3.2 立体都市広場の構造設計概要

立体都市広場の略伏図を図-5に示す。1階部分は広大な面積を有し、かつ植栽や土壌の積載による大きな重量の地上広場（重量約 20kN/m^2 ）を支える人工地盤としている。ロングスパン部分には超早強・超高強度コンクリート（ $\text{Fc}100\text{N/mm}^2$ ）のプレキャス

トプレストレストコンクリート（以下、PCaPC）で、断面をI形とし、ウェブに連続した孔を有する梁（以下、T-POP：Taisei Precast Optimized beam with Prestress）を採用し、断面を極限まで縮小して軽量化を計った。また、当該梁を支持する吹抜け周りの柱は、大きな軸力を支持するため、 $\text{Fc}250\text{N/mm}^2$ の超高強度PCaコンクリート（大成スーパーコンクリート：TAISEI Sustainable and Permanent Concrete）を用いた $\phi 400\text{mm}$ の細柱とした。

人工地盤部分の構造架構概要を図-6に示す。細柱とT-POPの組み合わせによる架構により、立体都市広場は吹抜けを中心とする地上と地下を連続させた一体的空間を実現し、立体都市広場の動線確保と視認性を満足することが出来た。

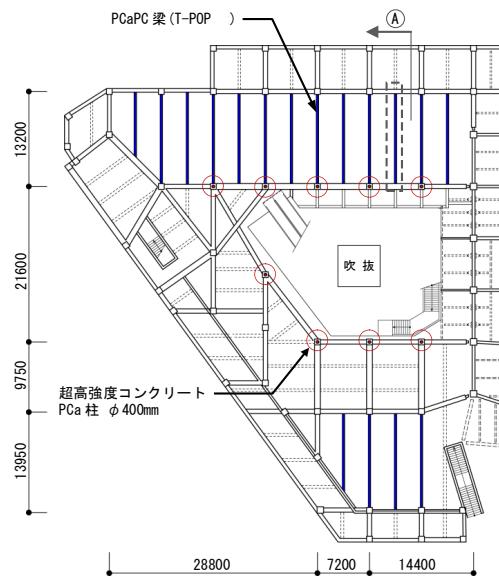


図-5 立体都市広場の略伏図

Fig.5 Structure plan of urban plaza

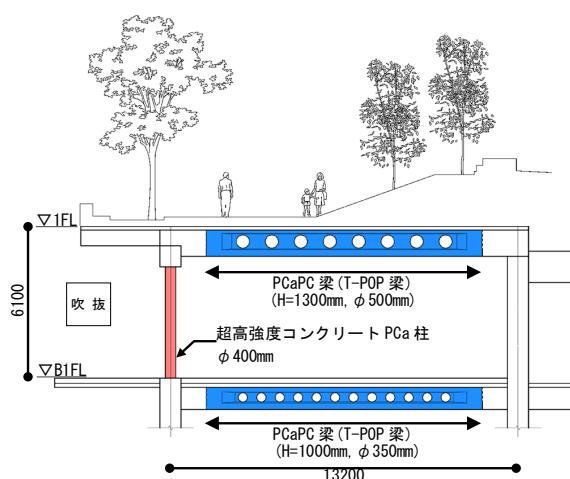


図-6 人工地盤部分の構造架構（A断面）

Fig.6 Structure of artificial ground (section A)

4. I形断面PCaPC有孔梁の設計・製作

緊張材として従来のPC鋼線に代わり、高強度異形鉄筋(SD590, SD685)を利用したプレテンション方式PCaPC梁を実用化し、建物に適用してきた^{2),3)}。この梁は、下端軸方向の配筋は緊張材のみで良く、高強度コンクリートを用いることで高い応力レベルの導入が可能となり、梁の断面寸法を小さくできる。さらに、梁断面の極小化を追求し、製造の合理化を目指したI形断面のPCaPC有孔梁(T-POP)を開発し、その構造性能および耐火性能を確認してきた⁴⁾。

本建物の立体都市広場の人工地盤を支える梁およびその直下のロングスパン架構においては、重量物を支持しながら、大地震時の避難場所としての安全性を確保することが求められた。そこで、上記に示したT-POPの適用を試みた。T-POPの配筋詳細図を図-7に、断面詳細図を図-8に示す。開口は、鉄骨梁とほぼ同等となる開口の高さ0.35H(H:梁せい)、開口間ピッチ2D(D:開口径)とし、設計基準強度Fc100N/mm²の超高強度コンクリートを採用し、I形断面のウェブ部分の厚さ100mmとした。梁下端の緊張材として、高強度異形鉄筋SD590(4-D38, 4-D41)を採用した。

梁中央部の応力に対して、パーシャルプレストレスの設計としてひび割れの発生を抑止する断面設計を行い、高耐久性な構造体とした。図-9にB1階のT-POP設計時の梁中央部分の断面応力を示す。設計時中央下端応力は1.7N/mm²となっており、曲げひび割れ応力3.3N/mm²に対して十分低い値になっている。また、梁の終局曲げ耐力は長期荷重の2.3倍と高い安全性を有している。

T-POPに使用したコンクリートの調合を表-1に示す。このコンクリートには、火災時の爆裂防止対策として有機纖維を混入した。調合の選定にあたって

は、今まで実施適用してきたT-POPの製造実績を基に、結合材種類、水結合材比、混和剤種類、製造時の養生方法・時間などについて実製造工場において実機実験を行い、検討した結果、結合材には早強ポルトランドセメントをベースに特殊高強度混和材を混ぜたものを使用した。実大I形試験体を製作し、部材同一養生試験体強度で管理することで構造体コンクリート強度(実大試験体からコア抜きした供試体)を満足することを確認し、コンクリート打設後18時間でプレストレス導入時強度80N/mm²(設計基準強度100N/mm²)の強度発現が得られるような調合、養生方法とした。

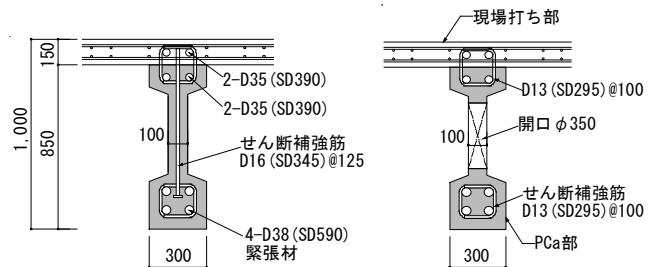


図-8 PCaPC梁(T-POP)の断面詳細図

Fig.8 Sectional detail of PCa PC beam (T-POP)

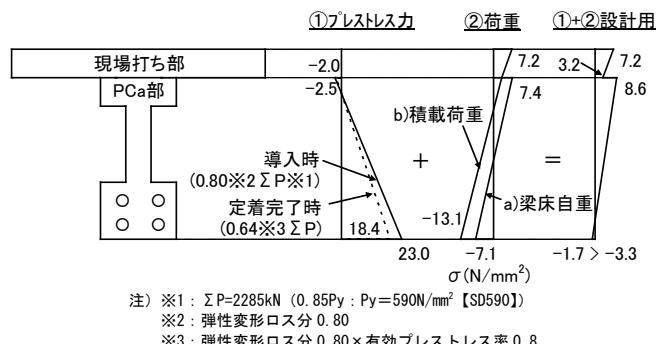


図-9 PCaPC梁(T-POP)設計時の断面応力(梁中央部分)

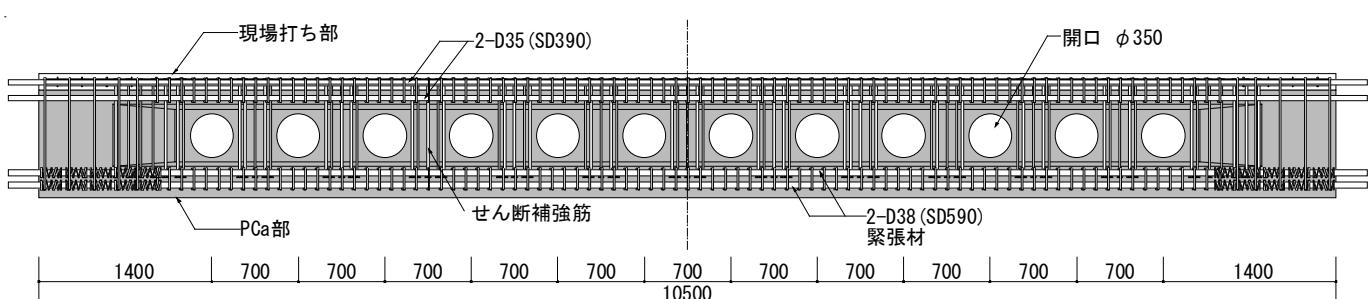
Fig.9 Sectional design stress of PCa PC beam(T-POP)
(center part of beam)図-7 PCaPC梁(T-POP)の配筋詳細図
Fig.7 Detail of reinforcement of PCa PC beam (T-POP)

表-1 コンクリートの調合

Table 1 Mix proportion of concrete

設計基準 強度 (N/mm ²)	水結合材 比 (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				
			水	結合材	細骨材	粗骨材	高性能 減水剤
100	20	2.0	160	800	611	875	15.20

写真-1 にフレッシュコンクリートの試験状況を示す。スランプフローの目標値 55cm に対して±10cm 以内であることを確認した。T-POP の製作は、製作工程 1 サイクルあたり 1 台または 2 台同時の製作とし、計 45 台 (32 バッチ) の梁を製作した。図-10 に製作した全ての部材のプレストレス導入時 (18 時間) 強度と 28 日強度の結果を示す。18 時間強度は 100N/mm² 級 (バッチ間の変動係数 6.1%)、28 日強度 140N/mm² 級 (バッチ間の変動係数 2.7%) といづれも所定の強度を充分満足しており、設計の品質を安定して確保していることを確認した。



写真-1 コンクリートのフロー状況
Photo 1 Slump flow of concrete

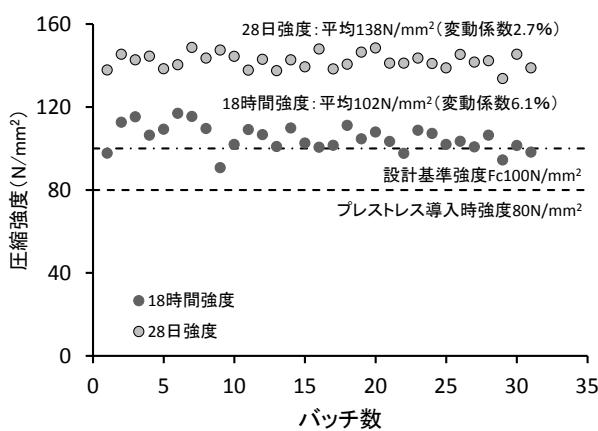


図-10 コンクリート試験結果
Fig.10 Result of concrete strength test

T-POP の製作は、緊張用のアバットを有する PCa 工場にて行った。T-POP の製作手順を以下に示す。

- 1) ベンチ上で梁配筋を行った後、アバットにより鉄筋に所定の緊張力 (0.85Py : Py=590N/mm²) を与える。鉄筋の緊張は、緊張力の管理に加えて、鉄筋の伸びも確認しながら実施した。(写真-2)
- 2) 側面の型枠をセット後、コンクリートを打設する。打設後の養生は、梁のコンクリート温度が上昇しそぎないことと鋼製型枠とコンクリートの温度差ができるだけ少なくする事に配慮した蒸気養生の温度勾配の設定やシート養生計画とした。
- 3) 18 時間後、導入時コンクリート強度 (80N/mm²) を確認した後、アバットの緊張を解放することによりプレストレス力を導入した。
- 4) プレストレス力導入後は、コンクリートのクラック等の目視確認や梁のむくり量等の実測確認を行い、設計で想定した品質が保たれていることを確認した。(写真-3)



写真-2 PCaPC 梁(T-POP) の製作状況
Photo 2 Fabrication of PCa PC beam (T-POP)



写真-3 PCaPC 梁(T-POP)
Photo 3 PCa PC beam (T-POP)

5. 超高強度コンクリート細柱の設計

高強度コンクリートを使い、柱の断面を極力小さくし、軸力を主に負担させる細柱を建物に適用してきたが²⁾、さらに強度の高い超高強度コンクリートを使用した PCa 細柱を開発し、構造性能および耐火性能を確認した^{5), 6)}。Fc200 クラスの RC 造細柱の構造実験結果（せん断力 Q-部材角 R 関係）の一例を図-11 に示す⁵⁾。RC 造細柱の地震時の水平変形追随性を把握するために実施した曲げせん断実験である。柱長さ $h=3,000\text{mm}$ 、柱断面 $b \times D=200 \times 200\text{mm}$ 、軸力比 $\eta=1/6$ とした RC 長柱 ($h/D=15$) の結果である。部材角関係 $R=1/100$ 程度でひび割れが確認されたが、除荷時には、ひび割れは閉じ、残留変位もほぼゼロであり、安定的な挙動が確認された。最終的に、 $R=1/37$ までの高い変形能力が確認できた。

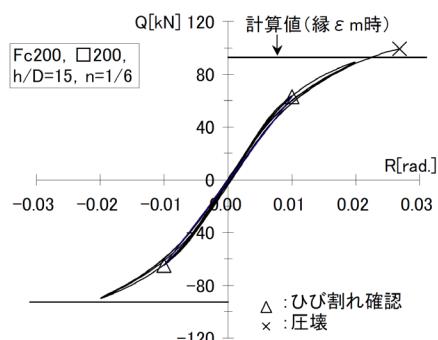


図-11 RC 造細柱のせん断力-部材角関係

Fig.11 Shear-member angle relation of RC slender column

これらの知見を持って、本建築に Fc250 の超高強度コンクリートを利用した細柱の採用を検討した。本建築においては、さらなる変形追随性の確保を目指し、柱頭および柱脚の両側とも柱主筋を定着しないディテールとした。細柱の代表的な配筋詳細図を図-12 に示す。細柱の断面は $\phi 400\text{mm}$ 、長さは $L=4,520\text{mm}$ 、長さ径比は $L/\phi=11.3$ である。超高強度コンクリートを採用することで、長期荷重時の軸力比を 0.07 と、通常の設計と比較して 3 倍以上の高い安全性を確保した。また、柱の頭部および脚部を半剛接合とすることで、水平力の負担を小さくし、地震時の応力を最小限にし、耐久性の高い材料であることも合わせて、長寿命建築を実現できた。

コンクリートの調合や細柱の製造・施工に関しては、本誌「設計基準強度 250N/mm^2 超高強度コンクリートの開発と適用」⁷⁾を参照されたい。

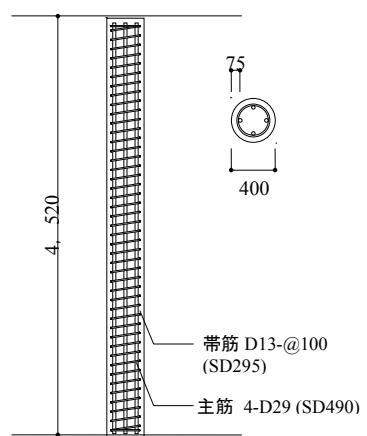


図-12 細柱の配筋詳細図

Fig.12 Reinforcement detail of slender column

6. おわりに

大地震等の災害時において、人が集中することが想定される、大規模広場には、余裕のある空間確保とともに、高い構造安全性が要求される。

本報では、超高強度コンクリートを、駅周辺施設の広場に適用した計画内容を示した。広場を構成する主要な柱、梁に、超高強度コンクリートを採用し、高い余裕度で安全性を確保するとともに、部材断面を縮小化し、視認性の高い開放的な地下空間計画の実現に貢献した。このように超高強度コンクリートは、今まで設計してきた建築物以上に、付加価値の高い空間を計画できる材料である。社会基盤の安全性に貢献できるように、適用検討を継続する。

参考文献

- 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
- 小室努、藤野宏道、河本慎一郎、河村亮：制震システムを取り入れた事務所建築の設計および施工、コンクリート工学、Vol.44, No.10, pp.36-41, 2006.10
- 有山伸之、関清豪、西本信也、竹崎真一、甲斐隆夫：みなとみらいセンタービルの設計、プレストレストコンクリート、Vol.53, No.4, pp.31-38, 2011.7
- 河本慎一郎、飯島真人、竹崎真一、馬場重彰：多数開口を有する I 形 PCaPC 梁の開発、コンクリート工学、Vol.48, No.8, pp.9-17, 2010
- 岡田直子、今井和正、坂口裕美、村松晃次、寺嶋知宏、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、大成建設技術センター報、第 43 号、pp22-1-7, 2010
- 加藤雅樹、道越真太郎、馬場重彰、坂本成弘、山本佳城、黒岩秀介、陣内浩、辻谷薰、吉田泰： 300N/mm^2 級超高強度コンクリートを用いた RC 柱の耐火性能、大成建設技術センター報、第 44 号、pp40-1-4, 2011
- 山本佳城、黒岩秀介、並木哲、道越真太郎、辰濃達、河本慎一郎：設計基準強度 250N/mm^2 超高強度コンクリートの開発と適用 大成建設技術センター報、第 45 号、pp18-1-4, 2012