

高強度鉄筋を利用したPCaPC梁の開発と適用

竹崎 真一^{*1}・馬場 重彰^{*2}・是永 健好^{*1}・小室 努^{*3}・
河本 慎一郎^{*3}・飯島 真人^{*4}・甲斐 隆夫^{*4}

Keywords : *pretensioning system, prestress, high strength rebar, multiple large openings, structural performance, fire resistance*

プレテンション方式、プレストレス、高強度鉄筋、複数大開口、構造性能、耐火性能

1. はじめに

建物に求められる性能は高度化かつ多様化しており、耐震安全性のみならず、地球環境に配慮した長寿命建築が指向されている。このため、建物には計画自由度が高く、将来の用途変更やレイアウト変更にも対応できる大スパン空間が求められている。大スパン空間を構築する技術として、当社独自のプレテンション方式プレキャストプレストレストコンクリート(PCaPC)梁を用いたT-POP(Taisei Precast Optimized beam with Prestress)を開発中であり、すでに幾つかの建物に実施適用されている。また、T-POPでは従来のPC梁より大きな梁貫通孔の設置が可能となっており、設備機器の大型化や将来の設備計画の変更にも対応可能となっている。

本報では、T-POP概要と、複数大開口の可能性を検討する目的で実施した実大PCaPC梁の構造および耐火試験について報告する。併せて、T-POPが適用された代表的な2つの事務所ビルについて紹介する。

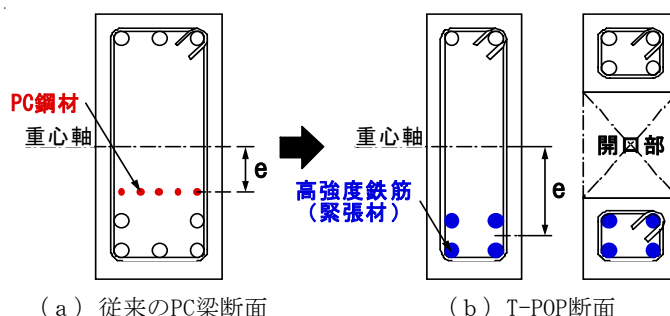
2. T-POP 概要

写真-1に複数大開口を有するPCaPC梁(T-POP)を、図-1に緊張材として従来のPC鋼材に代わり、高強度鉄筋を用いた場合の梁断面を示す。高強度鉄筋を緊張材に使用したプレテンション方式PCaPC梁に高強度コンクリートを適用したT-POPでは、スパン20mクラスの無柱の大空間を実現することができる。また、偏心距離(e)が長い位置にプレストレスが導入できるため、同等の吊上げ力を得るのに必要な鋼材量が削減できるとともに、梁断面の縮小化、部材の軽量化が図れる。また、高強度鉄筋(緊張材)以外の軸方向鉄筋が



写真-1 複数大開口を有するPCaPC梁 (T-POP)

Photo 1 PCaPC beam with multiple large openings



(a) 従来のPC梁断面

(b) T-POP断面

図-1 PCaPC梁断面

Fig.1 PCaPC beam section

ないため、梁中央位置に大きな開口が設けられる。さらに、プレキャスト工場で製作されるため、現場工期の短縮、高品質の確保、建築廃材の低減が図れる。加えて、部材断面を縮小化・軽量化しても、歩行などによる振動障害が少なく、遮音性にも優れているため、快適な建築空間の創造が可能となっている。

3. 複数大開口を有するPCaPC梁の性能試験

プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説¹⁾(以下、PC規準)では、PC梁の開口部に対する設計法や開口の大きさなどの構造規定が記されている。しかし、PC規準に示される開口の大きさは梁せいひの1/3以下となっており、設備機器の大型化や将来の設備計画の変更に対応するためには、この大きさ以上の開口が必要となっている。PCaPC梁において、その可能性を検討する

*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防災研究室

*3 設計本部構造グループ

*4 建築本部技術部

目的で、規定値以上の大きさの開口を複数有する実大試験体による構造および耐火試験を実施した。ここでは、その試験概要と試験結果について述べる。

3.1 構造性能

緊張材にSD685を用いたPCaPC梁のプレストレス導入時の付着性状および、長期的な構造性能の把握を目的に、実大試験体を製作し、長期載荷試験、長期載荷後の曲げせん断試験を実施し、既報²⁾にて報告している。

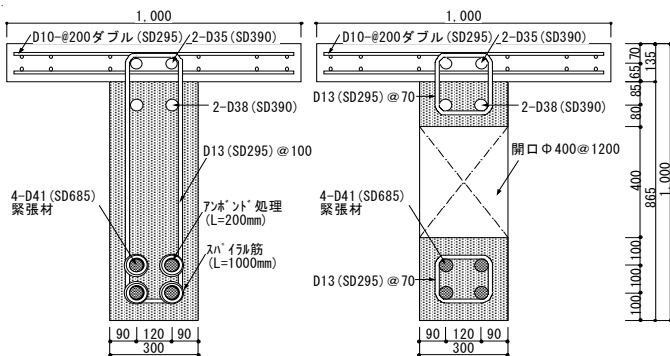
本報では、複数大開口を有するPCaPC梁の構造性能の把握を目的として実施した、実大曲げせん断試験の概要とその結果について述べる。

3.1.1 試験概要

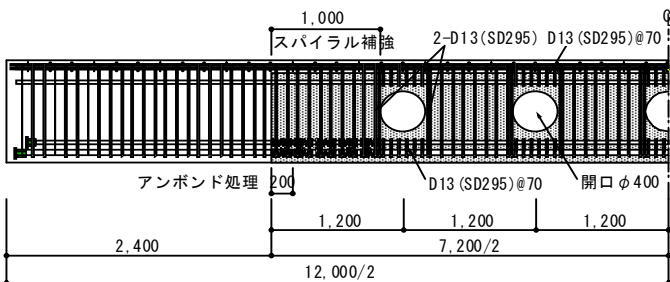
表－1に試験体一覧を、図－2に試験体形状寸法(No.1)を示す。試験体はその断面が実大の2体であり、いずれも直径400mm(0.4D, D:梁せい)の開口が1,200mm間隔で配置されている。試験パラメータは開口部せん断補強筋であり、No.1では普通強度鉄筋のD13(SD295)を、

表－1 試験体一覧
Table 1 List of specimens

試験体名	緊張材	緊張力 ΣP (kN)	平均プレストレス σ_{ave} (N/mm ²)	開口部せん断補強筋
No. 1	4-D41 SD685	3120 (0.85Py)	12.0 (0.8 ΣP により算出)	D13-□-@70 (SD295, Pw=1.2%)
No. 2				U12.6-□-@70 (SBPD1275/1420, Pw=1.2%)



(a) PCaPC梁端部断面 (b) 開口部断面



(c) 試験体形状・配筋

図－2 試験体形状寸法 (No.1)

Fig.2 Figure of specimen

No.2では高強度せん断補強筋のウルボンU12.6を用いている。試験体の断面形状は幅×せい=300×1,000mm(PCaPC部300×865mm)、長さは12,000mm(PCaPC部7,200mm)である。下端主筋は4-D41(SD685)とし、この主筋すべてを緊張材と兼用している。使用するコンクリートはPCa部がFc80、後打ち部がFc24である。PCa部のコンクリートには、打設後に蒸気養生を施し、打設16時間後に設計用プレストレス導入時強度の60N/mm²以上であることを確認してプレストレスを導入した。表－2にコンクリートの材料試験結果を示す。

加力は単純梁形式の対称2点集中載荷による、変位漸増の一方方向繰返し載荷とした。まず、加力点－支持点間距離が5,000mm(載荷①)で部材角R=1/50radまで載荷し、その後、両支点を内側に2,000mm移動して(載荷②)最大耐力まで載荷した。図－3に加力方法を示す。

3.1.2 試験結果

写真－2に開口部位置の最終破壊状況を示す。載荷①において、両試験体とも部材角R=1/500radまでにひび割れは発生せず、初ひび割れの発生はR=1/200rad時でのスパン中央下端の曲げひび割れであった。その後、開口部を斜め45度に横切るせん断ひび割れが発生し、加力の進展とともに支点方向へ拡大した。載荷②の最終サイクルにおいて、両試験体とも加力点に近い開口部位置でのせん断ひび割れと梁上端での圧壊が顕著となった。

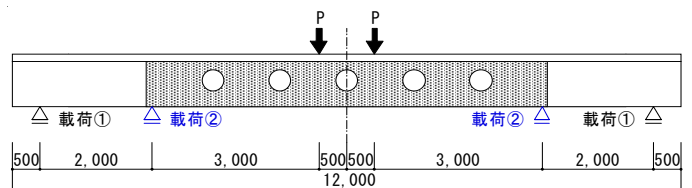
図－4に載荷①、載荷②での、試験体自重を考慮した、せん断力－梁中央たわみ関係を示す。図中にはPC規準に示される曲げ破壊耐力、許容せん断力、せん断破壊耐力および、試験での諸現象発生位置も示している。

載荷①において、初期剛性、ひび割れ発生荷重、最大耐力に試験体間で有意な差は見られなかった。また、セ

表－2 コンクリート材料試験結果

Table 2 Material properties of concrete

	材令 (日)	PCa部 (Fc800)			梁後打ち部、スラブ (Fc24)		
		σ_B (N/mm ²)	$cE(\times 10^4)$ (N/mm ²)	σ_t (N/mm ²)	σ_B (N/mm ²)	$cE(\times 10^4)$ (N/mm ²)	σ_t (N/mm ²)
No. 1	PS導入時	63.9	3.36	4.01	---	---	---
	加力時	96.6	3.71	4.81	45.2	2.69	3.21
No. 2	PS導入時	66.7	3.27	4.43	---	---	---
	加力時	97.9	3.73	5.30	46.9	2.74	3.47



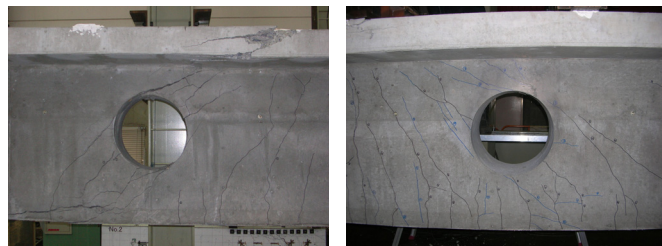
図－3 加力方法

Fig.3 Test set-up

せん断ひび割れ発生荷重はPC 規準に示される許容せん断力計算値とほぼ一致した。部材角 $R=1/100\text{rad}$ 程度で梁下端筋が降伏すると、徐々に剛性が低下するものの、載荷①での最終サイクルとなる $R=1/50\text{rad}$ まで耐力低下することなく、そのループ形状は紡錘形の良い履歴特性を示した。また、最大荷重はPC 規準に示される曲げ破壊耐力計算値と良好に対応した。

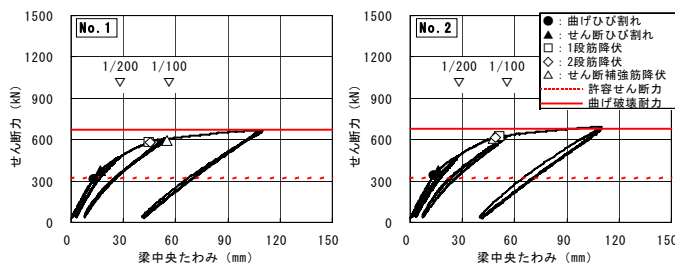
載荷②において、No. 1 では梁中央たわみ量が約 90mm ($R=1/40\text{rad}$) 時の開口位置でのせん断破壊により、No. 2 では 125mm ($R=1/28\text{rad}$) 時の開口部上端でのせん断破壊により耐力低下を示した。せん断破壊耐力試験値はNo. 1 で 1,100kN、No. 2 で 1,230kN であり、開口補強筋として普通鉄筋を使用したNo. 1においても、PC 規準に示される計算値 (266kN) の 4 倍以上であり、設計長期荷重 (200kN) の 5 倍以上であった。

以上の結果から、PC 規準に示される規定値 ($D/3$, D : 梁せい) 以上の開口を複数有する実大PCaPC 梁は、設計長期荷重に対して十分なせん断耐力を有していることを確認した。

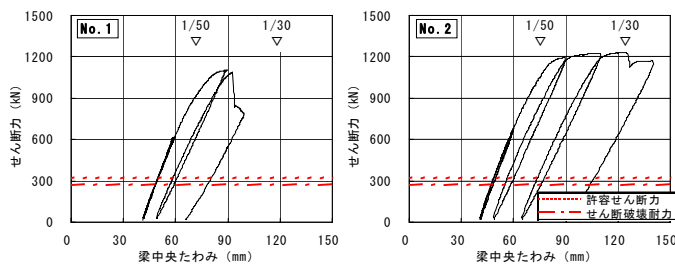


(a) No. 1 (b) No. 2

写真-2 最終破壊状況
Photo 2 Fracture patterns



(a) 載荷①



(b) 載荷②

図-4 せん断力-梁中央たわみ関係
Fig.4 Relationship of shear force and deformation

3.2 耐火性能

複数大開口を有する実大PCaPC 梁の耐火性能の把握を目的として、載荷加熱試験を実施した。以下、耐火性能について記述する。

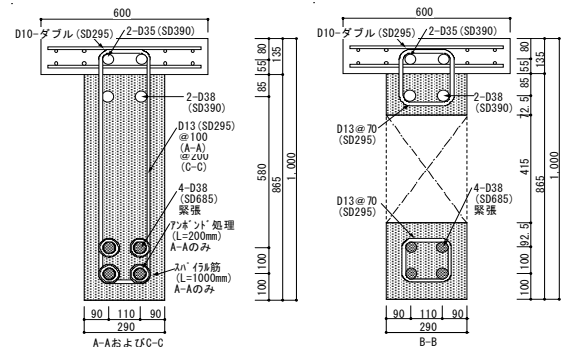
3.2.1 試験概要

試験体一覧を表-3、試験体形状寸法 (No. 1) を図-5 に示す。試験体は実大スケールの3体とし、いずれの試験体も径 415mm の開口を有し、開口間距離は 1,200mm である。試験変数は、せん断補強筋仕様および載荷荷重である。試験体の断面形状は幅×せい=290×1,000mm (PCaPC 部 290×865mm), 長さ 7,500mm である。下端筋は 4-D38 (SD685) であり、これらの主筋すべてを緊張材として兼用している。本試験体はプレテンション方式にてプレストレスを導入し、プレストレスの導入はコンクリート打設後 16 時間後におこなった。なお、導入時のコンクリート強度は約 90N/mm² であった。コンクリートの

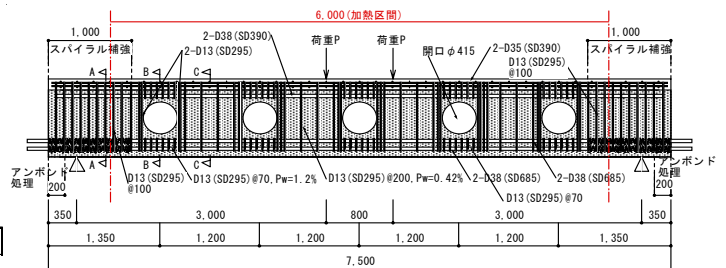
表-3 試験体一覧
Table 3 List of specimens

試験体名	緊張力 (kN)	せん断補強筋	開口部 せん断補強筋	中央位置 での作用 モーメント M (kN×m)	曲げ耐力 Mu* (計算値) (kN×m)	M/Mu
No. 1	2655	D13-□-@200 (SD295, Pw=0.42%)	D13-□-@70 (SD295, Pw=1.2%)	1242 (設計長期 荷重)	2588	0.48
No. 2		U12.6-□-@100 (SBPD1275/1420, Pw=0.84%)	U12.6-□-@70 (SBPD1275/1420, Pw=1.2%)			
No. 3		D13-□-@200 (SD295, Pw=0.42%)	D10-□-@140 (SD295, Pw=0.34%)	2025		0.78

* Mu = $\Sigma 0.9 \text{ at } \sigma_y d$ として評価



(a) PCaPC 梁端部断面 (b) 開口部断面



(c) 試験体形状・配筋

図-5 試験体形状寸法 (No. 1)
Fig.5 Figure of specimen and test set-up

表-4 コンクリートの調合
Table 4 Mix property of concrete

水結合材比 W/B (%)	空気量 (%)	最大粗 骨材径 Gmax (mm)	単位量 (kg/m ³)			
			水 W	結合材 B	細骨材 S	粗骨材 G
25	2.0	20	155	620	826	833

結合材：普通セメント：高強度混和材=9：1

細骨材：硬質砂岩砕砂(表乾密度2.63 g/cm³)粗骨材：硬質砂岩砕石(表乾密度2.65 g/cm³)表-5 圧縮強度結果
Table 5 Material properties of concrete

試験体名	PCaPC部				梁後打ち部、スラブ			
	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン ン比	含水率 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン ン比	含水率 (%)
No. 1	111	43.0	0.21	3.50	44.4	---	---	6.64
No. 2	119	42.8	0.21	3.19	38.7	27.4	0.19	6.71
No. 3	106	41.4	0.20	3.40	41.0	---	---	6.68

表-6 鋼材の材料試験結果
Table 6 Material properties of steel

鋼材種別	降伏点 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
D38 (SD685)	742	197	947	9.70
D38 (SD390)	418	184	640	19.3
D35 (SD390)	445	183	657	20.0
U12.6 (SBPD1275/1420)	1364	216	1480	7.08
D13 (SD295)	348	192	493	21.6
D10 (SD295)	367	185	518	19.3

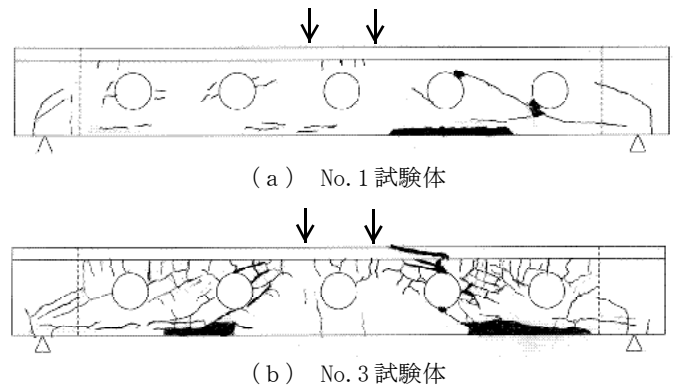
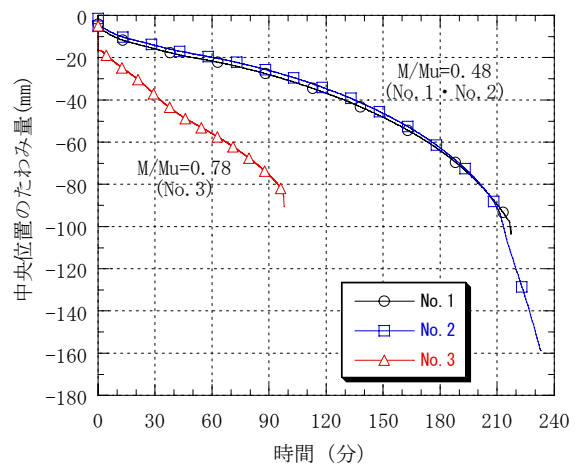
調合を表-4, 試験時の圧縮強度結果を表-5および鋼材の材料試験結果を表-6に示す。コンクリートには爆裂防止用として有機繊維を1.5kg/m³混入した。

加力方法は、支点間距離を6,800mm(支持条件は片側ピン片側ピンローラー), 載荷位置を支点から3,000mm位置とし, 4点曲げとした。載荷加熱試験中, 試験体中央位置のたわみ量を測定した。所定の荷重を載荷後, IS0834に規定されている標準加熱曲線により加熱した。

3.2.2 試験結果

各試験体とも爆裂は認められず, 荷重支持能力を失った時間(耐火時間)は, 216分(No. 1), 232分(No. 2)および97分(No. 3)であり, 設計長期荷重を載荷したNo. 1, No. 2は3時間の耐火性能を有していた。また, 載荷加熱試験後のひび割れ状況を図-6に示す。試験後のひび割れ状況は, No. 1とNo. 2試験体ではほぼ同じ状態であり, 開口間でのせん断ひび割れおよび下端筋に沿う付着割裂を生じた。No. 3試験体では, 加力点近傍の開口位置でのせん断ひび割れ, 梁上端での圧壊および下端筋に沿う付着割裂によるコンクリートの剥落が認められた。なお, 付着割裂によるコンクリートの剥落は, 荷重支持能力を失う直前で観察された。

試験体中央位置でのたわみ結果を図-7に示す。荷重条件が等しいNo. 1およびNo. 2ではほぼ等しく, 耐火時間におけるたわみ量は, No. 1で97mm(変形角1/35rad),

図-6 ひび割れ発生状況
Fig.6 Crack patterns図-7 試験体中央位置でのたわみ結果
Fig.7 Vertical deformation at middle of span vs heating time

No. 2で約156mm(変形角1/22rad)であった。荷重条件の異なるNo. 1およびNo. 3を比較すると, 荷重が大きいほどたわみ量および速度も大きい。No. 3の耐火時間時のたわみ量は84mm(変形角1/40rad)であり, 荷重が大きいほど耐火時間時のたわみ量は少なかった。

以上の結果から, 大開口を複数有する実大PCaPC梁は, 設計長期荷重に対して3時間以上の耐火性能を有することを確認した。

4. T-POP 適用事例

4.1 大成札幌ビル

建物概要

建設地 : 札幌市中央区

設計・監理 : 大成建設(株) 一級建築士事務所

施工 : 大成建設(株) 札幌支店

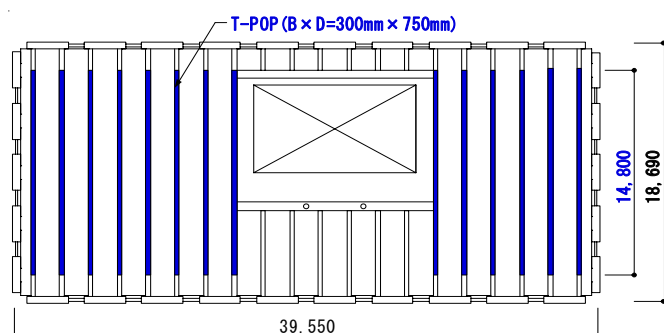
用途 : 事務所 店舗

建築面積 : 770 m²延床面積 : 6,970 m²

階数 : 地上8階 地下1階
 建物高さ : 34.57 m
 構造 : 鉄筋コンクリート造 鉄骨造
 工期 : 2005年7月～2006年6月



写真－3 建物外観
 Photo 3 Building facade



図－8 基準階構造伏図
 Fig.8 Structural framing plan of standard floor



写真－4 建物の内部状況
 Photo 4 Internal space of building

大成札幌ビルは、札幌市に建設された地上8階、地下1階の建物であり、地下階および1階から3階を店舗、4階以上を事務所としている。平面形状は約40m×20mの整形な長方形である。写真－3に建物外観を、図－8に基準階構造伏図を示す。本建物には、高い耐震性能と大スパン空間の構築および、長寿命建築を可能にした知的制振システムTASMO (TAisei Smart suppression system with MOnitor)が採用されている。TASMOは地震時のエネルギーを吸収する部位と常時の鉛直荷重を支持する部位を完全に分離した、新たな構造システムとして開発された。その構造は、建物外周に設置した剛性の高い壁柱と、それらをつなぐ鋼材ダンパーを有する境界梁で構成されており、外周の壁柱間のロングスパン部分(約19m)には緊張材としてD41 (SD685)を使用したT-POP (14.8m)が用いられ、約110台採用されている。写真－4に建物の内部状況を示す。

4.2 みなとみらいセンタービル

建物概要

建設地 : 横浜市西区

設計・監理 : 大成建設(株) 一級建築士事務所

施工 : 大成建設(株) 横浜支店

用途 : 事務所 店舗

建築面積 : 5,198 m²

延床面積 : 95,220 m²

階数 : 地上21階 地下2階

建物高さ : 99.80 m

構造 : 鉄筋コンクリート造 鉄骨造

工期 : 2007年9月～2010年5月(施工中)

みなとみらいセンタービルは、横浜市みなとみらい地区に建設中の地上21階、地下2階の建物であり、地下階を駐車場、1階から3階を店舗、4階以上を事務所としている。平面形状は約80m×55mの整形な長方形である。



図－9 建物外観パース
 Fig.9 Building facade perspective

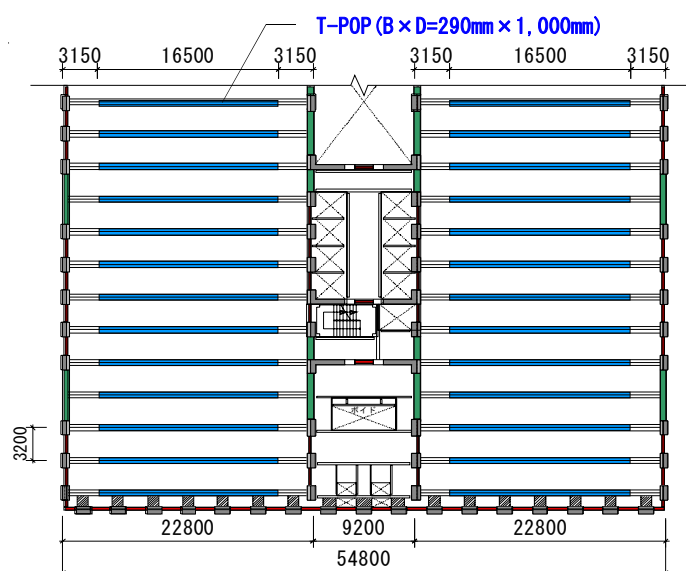


図-10 基準階構造伏図
Fig.10 Structural framing plan of standard floor

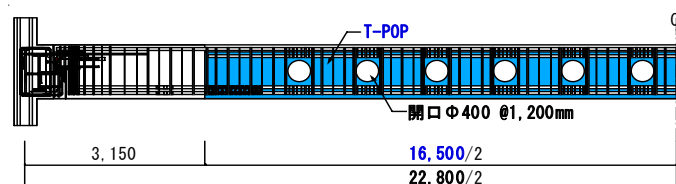


図-11 ロングスパン梁の形状寸法
Fig.11 Figure of long span beam

図-9に建物外観パースを、図-10に基準階構造伏図を示す。構造は、建物外周とコア周りに設置したRC造壁柱とそれらをつなぐ鋼材ダンパーを有する境界梁で構成した制振構造TASMOに加え、1階床下にハイブリッドTASS免震を設けた中間層免震構造とすることで、超高層建物を実現している。外周とコアの間のロングスパン部分(約23m)には緊張材としてD38(SD685)を使用したT-POP(16.5m)を1フロアあたり約100台、合計約2,000台採用している。また、このT-POPには前述の試験結果から、設備配管用の大開口が多数(直径400mm, 1,200mm間隔)設けられ、階高の有効活用が図られている。図-11に本建物に採用されているロングスパン梁の形状寸



写真-5 設備配管設置状況
Photo 5 Installation situation of facility piping

法を、写真-5に開口部への設備配管設置状況を示す。

5. おわりに

緊張材に高強度鉄筋を用いた、当社独自のプレテンション方式PCaPC梁に高強度コンクリートを適用したT-POPでは、スパン20mクラスの大空間がスリムな梁断面で創造できる。また、構造および耐火試験の実施により、従来のPC梁より大きな開口を複数設置することが可能となり、将来の設備計画の変更にも柔軟に対応できる。さらに、T-POPが採用された2つの事務所ビルについて紹介した。

現在、より高強度な材料の使用と、断面形状の最適化による、T-POPのさらなる縮小化、軽量化を進めている。また、主に事務所ビルに適用されているT-POPを、今後はその特長を生かし、工場、倉庫、学校、病院等、様々な用途の建物に実施展開していく予定である。

参考文献

- 1) 日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説, 1998
- 2) 竹崎, 是永他：高強度異形鉄筋を用いたプレテンション方式PCaPC梁の構造性能, 大成建設技術センター報 第39号(2006)