

みなとみらいセンタービル設計

有山 伸之^{*1}・関 清豪^{*2}・西本 信哉^{*3}・竹崎 真一^{*4}・甲斐 隆夫^{*5}

本建物では、大地震後においても建物機能を維持できる高い耐震性能と地震時の揺れを抑え居住者の安心感を確保するために、免震構造（積層ゴム支承＋弾性すべり支承）と制振構造を組み合わせた構造システムを採用した。

上部構造は居住性と経済性を考慮し、主体構造を RC 造とした。フレキシブルなオフィス空間確保するために約 23 m の柱型のない無柱空間とし、外周部の壁柱は外装材を兼用している。長スパンと壁柱という相反する条件を解決するため、プレキャスト工法によるプレストレストコンクリート梁（PCaPC 梁）を長期部材として配置し、端部を近似的ピン接合とすることで壁柱に働く面外曲げを抑えた。地震時水平力は、壁柱とそれを貫通する鉄骨梁からなるフレームに負担させ、鉄骨梁の中央部ウェブパネルに極低降伏点鋼を用いることにより、地震エネルギーを吸収させるとともに壁柱に作用する力を制御している。

高品質で経済性・施工性に優れた鉄筋コンクリート造による超高層オフィスの可能性を示すことができた。

キーワード：超高層 RC、プレキャスト、プレストレス、免震、制振

1. はじめに

高い耐震性能と自由な空間を有した長寿命建築物を可能にする新たな制振システムとして、弊社は TASMO（TAisei Smart suppression system with MOonitor）と呼ぶエネルギー吸収集約型制振システムの開発と設計^{1,2)}を行ってきた。本建物では、好立地における事業性の高いテナントビルとして経済合理性の追求と同時に高い付加価値を目指し、このシステムを適用・展開することによって、高レンタルで居住性の高いフレキシブルな空間、高い耐震性能の確保、さらに環境に配慮した超高層ビルを目指した。

本建物は横浜市みなとみらい地区に建つ地上 21 階の超高層オフィスビルである。1～3 階を店舗、4～21 階を事務所としている。基準階は、80.4 × 54.8 m の整形な平面形状でありセンターコア形式としている。高レンタルな空間を実現するため、事務室は 22.8 m ロングスパンの無



写真 - 1 建物全景

2. 建築概要

所在地：横浜市西区みなとみらい 3 丁目

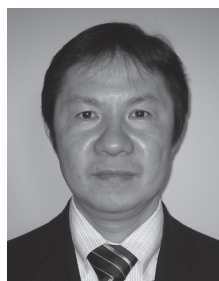
用途：事務所、店舗、駐車場

階数：地上 21 階、地下 2 階

高さ：98.20 m

延床面積：95 220 m²

構造：鉄筋コンクリート造、（一部鉄骨造および鉄骨鉄筋コンクリート造）



^{*1} Nobuyuki ARIYAMA

大成建設(株) 設計本部
シニアエンジニア



^{*2} Kiyohide SEKI

大成建設(株) 設計本部
構造Ⅲ群 統括



^{*3} Shinya NISHIMOTO

大成建設(株) 設計本部
シニアエンジニア



^{*4} Shinichi TAKEZAKI

大成建設(株)
技術センター 課長



^{*5} Takao KAI

大成建設(株) 建築本部
主事

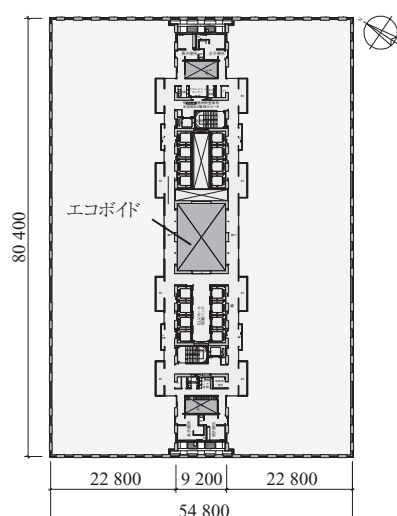


図 - 1 基準階平面図 (単位: mm)

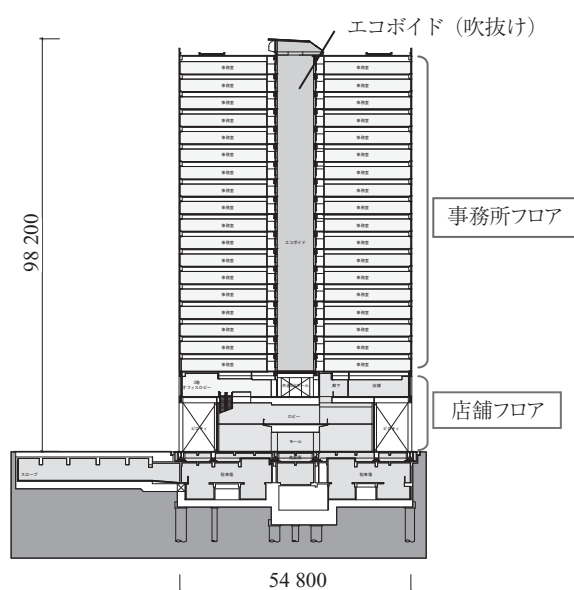


図 - 2 断面図 (単位: mm)

柱空間とし、かつ柱型のない壁柱を採用した。この壁柱は構造体と外装材とを兼用しており、垂直に伸びる特徴的なファサードデザインを形成している。コア部の中心には、壁柱で構成されたエコボイトと呼ばれる吹抜け空間を有し、その頂部に設置された太陽光自動追尾システムにより、光を建物内部へ導き、省エネとともに明るい共用部空間を実現している。また、建物の前面には公開空地を設けて緑豊かなリビングガーデンとし、ヒートアイランドの防止にも寄与している。これらの環境対策の結果、横浜市よりCASBEEのSランクの認証を得ている。

3. 構造概要

本建物では、大地震後においても建物機能を維持するため、免震構造と制振構造 (TASMO) を組み合わせた構造システムを採用した。上部構造では22.8 mのロングスパンと壁柱という相反する条件を解決するため、プレキャスト

プレストレストコンクリート梁 (PCaPC 梁) を用いて鉛直荷重のみを負担させ、壁柱に面外曲げが作用しないよう梁端部を近似的ピン接合とした。一方、地震時水平力は建物外周およびコア部に配された壁柱とそれらを貫通する鉄骨梁からなるフレームに負担させている。鉄骨梁の中央部ウェブパネルには極低降伏点鋼 LY100 を採用し制振梁とすることにより、地震エネルギーを吸収させるとともに壁柱に作用する力を制御することによって厚さ 400 mm の外装材を兼用した PCa 壁柱を実現した。17 階以上の鉄骨梁は弾性梁とすることにより、架構全体に復元力を付与し、地震後の残留変形を抑えている。基礎は GL-15 ~ 40 m にある土丹層を支持層とする場所打ちコンクリート杭とした。

4. 耐震設計

4.1 耐震設計方針

耐震保有性能の確認は、設計用地震動を用いた非線形時刻歴応答解析に基づいて行った。表 - 1、表 - 2 にそれぞれ目標耐震性能および設計用入力地震動を示す。

表 - 1 目標耐震性能

地震動のレベル	レベル 1 地震動	レベル 2 地震動
告示呼称	稀に発生する地震動	きわめて稀に発生する地震動
上部構造	許容応力度以内 層間変形角 1/200 以内	弾性限耐力 ^(※) に達しない 層間変形角 1/100 以内 制震部材の累積損傷度 0.2 以下
免震層	積層ゴム支承 ・引抜き力が生じない すべり支承 ・すべり変位 50 cm 以内 ・浮上りが生じない	積層ゴム支承 ・圧縮限界強度以内 ・引張限界強度 1.0 N/mm ² 以内 すべり支承 ・すべり変位 50 cm 以内 ・浮上りが生じない
地下部分	許容応力度以内	許容応力度以内
基礎	許容応力度以内	終局強度に達しない

(※) 各層ごとに最初に降伏ヒンジが発生する時の層せん断力

表 - 2 設計用入力地震動

採用地震波		レベル 1 稀に発生する地震動		レベル 2 きわめて稀に発生する地震動		継続時間 (s)
		最大加速度 (m/s ²)	最大速度 (m/s)	最大加速度 (m/s ²)	最大速度 (m/s)	
告示波	告示波 (El Centro 位相)	0.922	0.103	3.685	0.537	120.00
	告示波 (Taft 位相)	0.822	0.095	3.378	0.493	120.00
	告示波 (Hachinohe 位相)	0.670	0.086	3.853	0.400	120.00
観測波	El Centro 1940 NS	2.554	0.250	5.108	0.500	53.76
	Taft 1952 EW	2.483	0.250	4.966	0.500	54.40
	Hachinohe 1968 NS	1.667	0.250	3.333	0.500	51.00
模擬波	横浜模擬地震動	—	—	4.158	0.570	80.00
	TOKAI NS	—	—	1.024	0.228	350.00
	TOKAI EW	—	—	1.338	0.215	350.00

4.2 解析モデル

解析モデルを図 - 4 に示す。解析モデルは、上部構造の地上 21 層に免震層を加えた 22 質点のモデルとし、免震層下部床位置を固定とした。復元力特性は、SRC 梁部の 1、2 層および弾性梁部の 16 ~ 21 層は武田モデル、制振部の 3 ~ 15 層はトリリニア型とした。免震層のばねは、積層ゴム支承と弾性すべり支承を表すばねを並列に配置

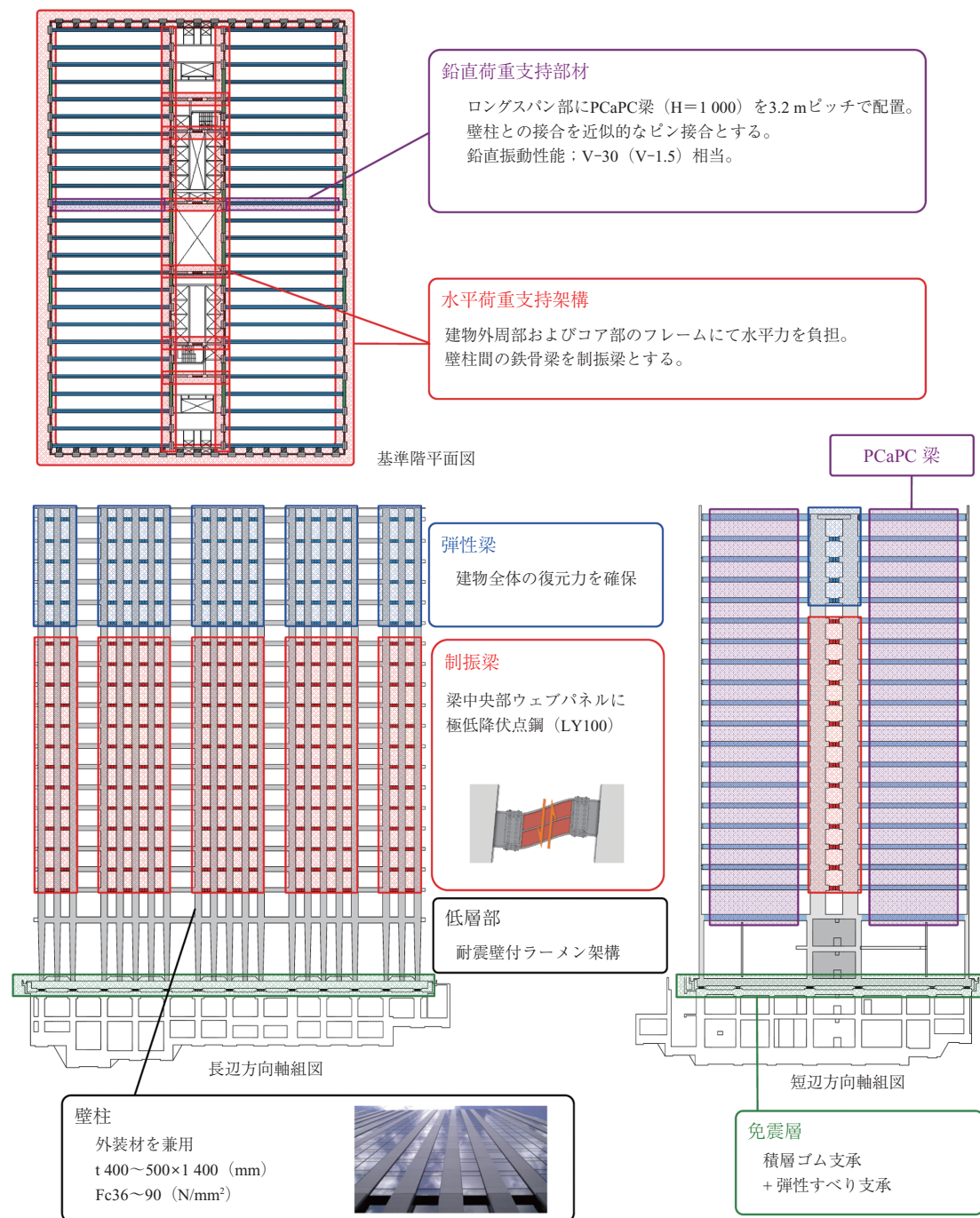


図 - 3 構造概要図

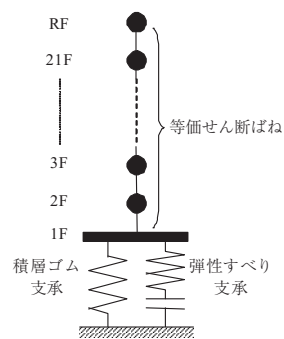


図 - 4 動的解析モデル

した。減衰定数は、上部構造 1 次モード振動に対して $h = 2\%$ の瞬間剛性比例型とした。免震支承の減衰は考慮しないこととした。

4.3 解析結果

建物重量は約 108 万 (kN)、基礎固定時の固有周期は、X 方向 2.78 秒、Y 方向 2.17 秒である。図 - 5 に応答解析結果 (短辺方向) を示す。最大応答層間変形角は、レベル 1 で 1/325、レベル 2 で 1/184 であり、設計クライテリア以内となった。最大応答加速度は、レベル 2 時で 200 (cm/s²) 程度となっており免震による低減効果が現れている。

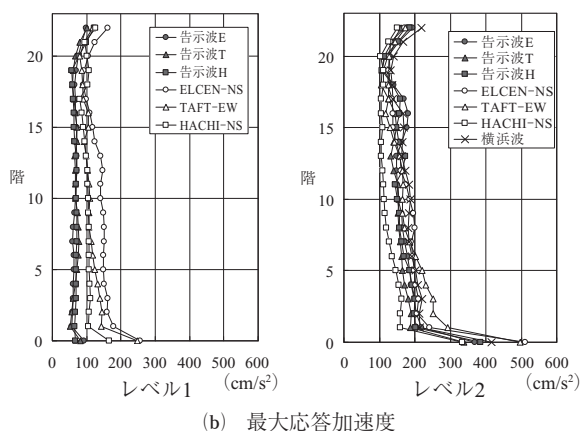
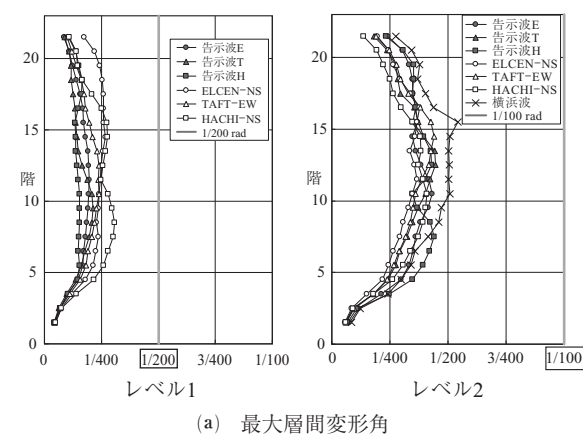


図 - 5 応答解析結果 (短辺方向)

表 - 3 検討ケース

ケース	① 免震+制振	② 免震のみ	③ 制振のみ
制振効果	有り	無し (上部弾性)	有り
免震装置	有り	有り	無し

4.4 ケーススタディ

免震構造と制振構造を組み合わせた効果について、ケーススタディを行った。検討ケースを表 - 3 に示す。ケース①は、免震と制振を組み合わせた本建物のケースであり、ケース②は、①において上部構造を弾性としたケース(免震のみ)、ケース③は①において非免震としたケース(制振のみ)とした。入力地震動は告示波(EI Centro 位相)を採用した。入力レベルはレベル2とレベル3(レベル2×1.5倍)とした。レベル3は、本建物の安全余裕度レベルに相当する。図 - 6 に検討結果を示す。免震と制振を組み合わせたケース①は、ケース②(免震のみ)、ケース③(制振のみ)に比べて応答層せん断力が低減されており、レベル2時で②の約70%程度、レベル3時ではさらに低層部の低減が見られる。最大応答加速度は免震を採用したケース①と②がいずれも小さく、免震構造による加速度低減効果が現れている。ケース③(制振のみ)の場合でも中～高層部はレベル2時に200 (cm/s²) 前後となっており、本制振システムが加速度低減に有効であること

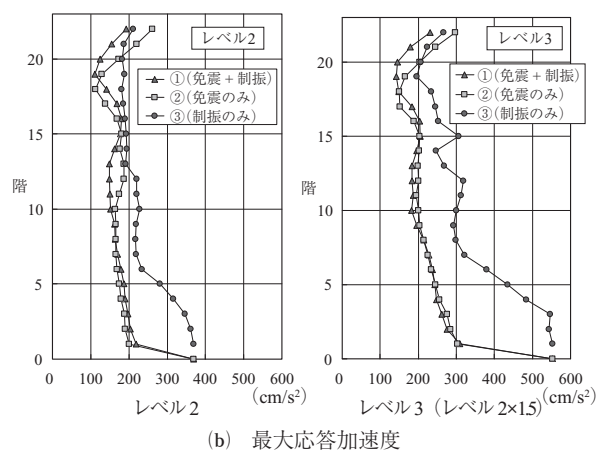
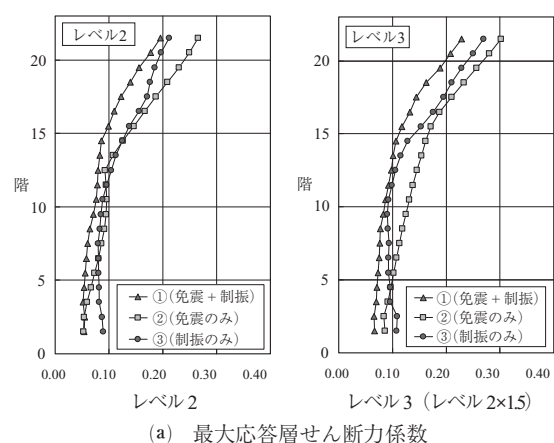


図 - 6 ケーススタディ検討結果

を示している。

表 - 4 にエネルギー吸収割合を示す。ケース①では制振部材で約20%、免震層で約70%、ケース②では免震層で80～90%、ケース③では制振部材で約80%となった。制振効率が高い本システムにおいて免震と組み合わせることにより、さらなる応答低減効果が期待できる。

表 - 4 地震エネルギー吸収割合 (%)

レベル	吸収部位	① 免震+制振	② 免震のみ	③ 制振のみ
レベル2	上部履歴	19	0	76
	上部粘性	15	18	24
	免震層	66	82	0
レベル3 (レベル2×1.5)	上部履歴	19	0	80
	上部粘性	9	11	20
	免震層	72	89	0

4.5 制振梁の損傷度の検討

鉄骨梁の梁中央部ウェブパネルに用いた極低降伏点鋼LY100の最大ひずみおよび累積損傷度を確認するためにフレームモデル解析を行った。フレームモデルは、図 - 7 に示すように壁柱および梁を線材に置換し、鉄骨造の境界梁の中央部のせん断変形には図 - 8 に示す非線形特性を与え、履歴則はノーマルトリニア型とした。1階床には免震装置の水平剛性および鉛直剛性を有するばね要素を配

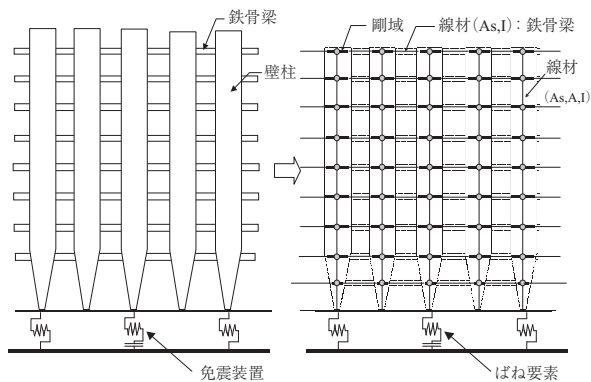


図 - 7 平面フレームモデル

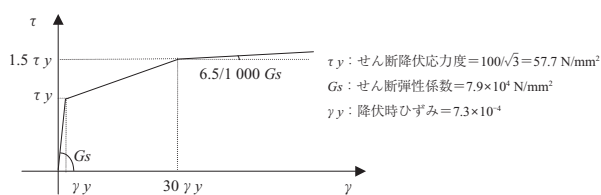


図 - 8 極低降伏点鋼を使用したせん断パネルの履歴則

置した。表 - 5 にレベル 2 時の最大せん断ひずみ γ_{max} と最大累積損傷度 $D^3)$ の一覧を示す。図 - 9 に制振部材の $\tau - \gamma$ 関係を示す。いずれの入力地震動に対しても許容累積損傷度 $D = 0.2$ を下回っていた。

5. PCaPC 梁

5.1 PCaPC 梁の設計

図 - 10 に PCaPC 梁の概要を示す。PCaPC 梁は短辺方向に 3.2 m ピッチに配置した。運搬および揚重計画から 22.8 m スパンのうち中央部 16.5 m 部分を 2 台一組の PCaPC 梁とし、端部は一体の現場打ちとした。梁せいは 1 000 mm とし、PCa 部は天井内設備の自由度を高めるため梁せいの 1/3 以上の梁貫通孔 $\phi 400 \text{ mm}$ が連続する有孔梁となっている。通常、このスパンでは鉄骨梁とすることが一般的であるが、その場合、居住性能の確保が困難な場合が多い。本建物では PCaPC 梁を採用することにより、鉛直振動に対する居住性能として二人歩行時で V-30 (V-1.5) 相当を確保している。

PCaPC 梁の断面寸法を最小限にする構造的な解決策として、高強度材料の使用と高い応力レベルのプレストレスを検討した。その結果、Fc80 のコンクリートおよび緊張材として高強度鉄筋 SD685 を使用することで、梁せい 1 000 mm の断面が可能となった。PCa 部の緊張用鉄筋は、製造限界定尺長さが 12 m であるため約 18 m $(= 12 \text{ m} + 12 \text{ m}/2)$ と効率的な長さとした。従来のプレストレストコンクリート梁では限界のあった梁断面の縮小化・梁貫通孔配置に対し、高強度軸方向鉄筋を主筋に使用し、これ自体を緊張材とすることで、余分な軸方向鋼材が不要となり、かつ効果的な位置に緊張力を与えることができ、さらに梁貫通孔の自由な配置が可能になることが本構法の特徴であ

表 - 5 最大せん断ひずみ、最大累積損傷度一覧

項目	位置	地震波	レベル 2 応答値	
			X 方向	Y 方向
最大せん断ひずみ γ_{max} (rad)	発生階	ELCENTRO	0.011	0.009
			14F	10F
		TAFT	0.010	0.010
			15F	11F
		HACHINOHE	0.011	0.007
			7F	10F
		告示波 E	0.012	0.012
			6F	9F
		告示波 T	0.012	0.006
			14F	10F
最大累積損傷度 D	発生階	ELCENTRO	0.001	0.001
			16F	14F
		TAFT	0.001	0.001
			16F	14F
		HACHINOHE	0.003	0.001
			11F	8F
		告示波 E	0.003	0.002
			5F	8F
		告示波 T	0.003	0.001
			16F	8F
		告示波 H	0.002	0.001
			11F	14F

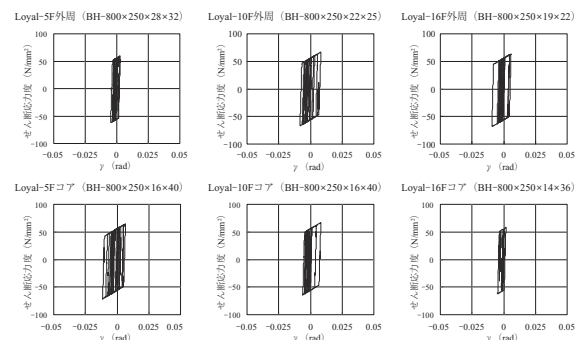


図 - 9 制振部材の $\tau - \gamma$ (レベル 2 X 方向, 告示波 E)

る。また、定着具やグラウト工事が不要となるプレテンション方式を採用した。鋼材のリラクゼーション試験、実大梁の製作試験⁴⁾、半年間の長期載荷試験⁵⁾、および開口付 PCaPC 梁の曲げ・せん断破壊実験⁶⁾を行い、構造性能と安全性の確認を行っている。開口付 PCaPC 梁のせん断破壊耐力は、PC 規準値の 3 倍以上の結果となった(写真 - 2)。また、PCaPC 梁の耐火性能については、高強度コンクリート Fc80 の爆裂対策として有機繊維 1.5 kg/m³ を配合し、開口付 PCaPC 梁実大試験体による載荷加熱実験⁷⁾を行った。その結果、保有耐火時間が 3 時間以上であることを確認した(図 - 11)。

5.2 PCaPC 梁端部ピン接合の開発

梁を支持する薄い壁柱へ過大な面外曲げが作用しないように、端部は図 - 12 に示す近似的なピン接合を意図した納まりを開発し、実大実験によりせん断耐力および回転性能を確認した。実験の結果、端部の固定度は剛接合の場合に比べて 20 % 程度となり、また端部ブラケット部のせん断強度については、長期設計荷重の 3 倍以上の余裕度を有

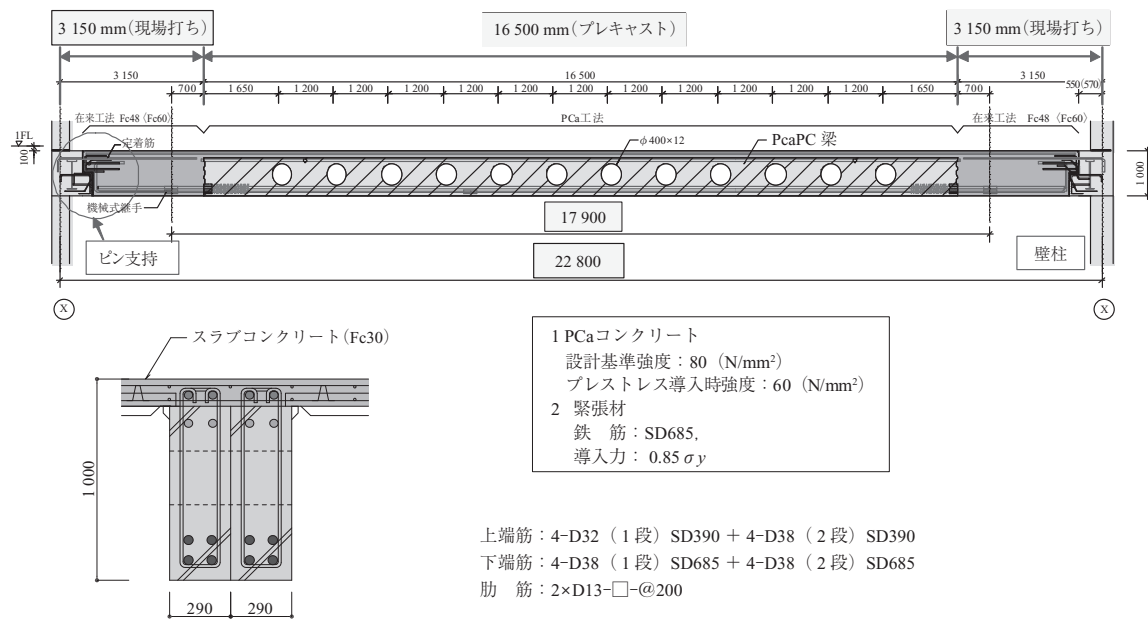


写真 - 2 開口部最終破壊状況

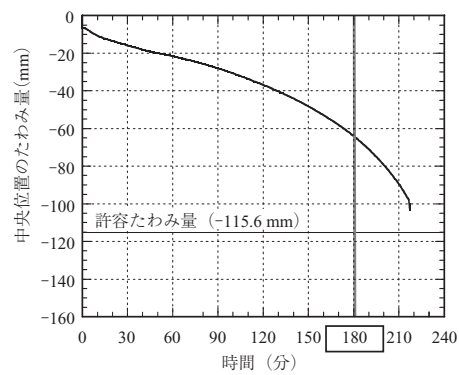


図 - 11 梁中央たわみ量の時間変化

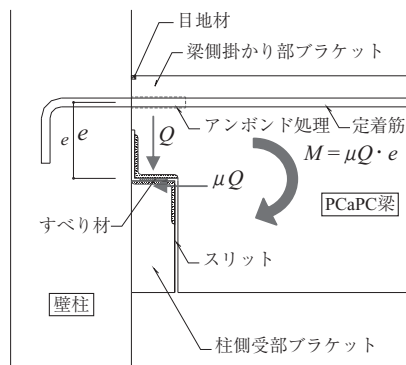


図 - 12 PCaPC 梁端部ピン接合の概要

していることを確認した⁸⁾。

5.3 PCaPC 梁の製作

PCaPC 梁は、1 層に 100 台、合計 2 000 台もあるため生産能力を考慮し、3 工場に分けて製造した。効率的に製作するために、コンクリート打設後 16 時間でプレストレス導入時強度の 60 N/mm² 以上が確保できるように結合材に早強セメントと高強度混和材を使用する調査とした。製造

方法の概要を図 - 13 に、製作状況を写真 - 3 に示す。1 つの緊張台で 3 台同時に梁の製作を行い、軸力導入管理は緊張力と高強度鉄筋の伸び関係にて行った。また、製作に先立ち実大施工試験 (写真 - 4) を行い、プレストレス導入時の変形性状、製作後の変形進行状況を検討し、鉛直変形の増加は 2 か月程度で収束することを確認した⁴⁾。

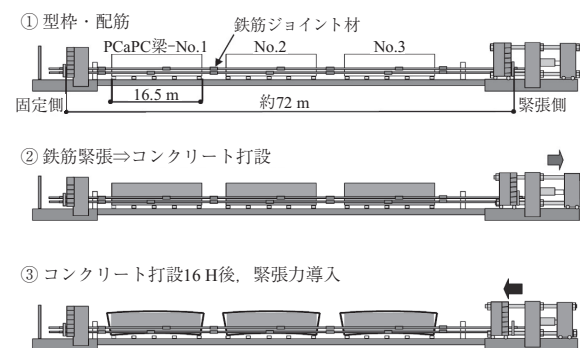


図 - 13 PCaPC 梁 (鉄筋緊張) の製造方法

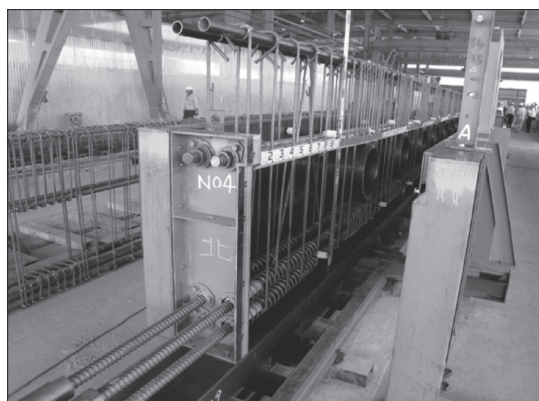


写真 - 3 PCaPC 梁の製作状況

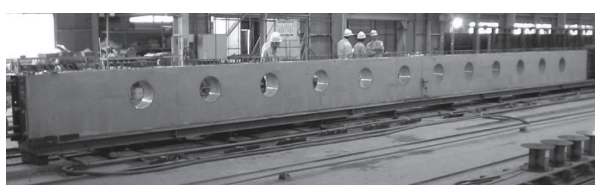


写真 - 4 実大施工試験体

6. 高強度コンクリート PCa 部材の品質管理

今回のように大量の柱および梁 PCa 部材を製造する場合、複数の工場での製造が避けられず、製品の品質を極力均一化する必要がある。そこで実際に製造した PCa 部材について、設計基準強度 Fc80 および Fc90 のコンクリートを対象とし、各工場における圧縮強度および単位水量のばらつきデータを把握し、品質の確認を行った。図 - 14 に PCa 梁 Fc80 の圧縮強度のばらつきデータの例を示す。

7. 施工計画 (RC 積層工法)

本建物では、外周部の壁柱が外装材を兼用するため、精度良く建方を行うことが求められた。そのため3階以上の壁柱はすべて工場にて PCa 化し、現場ではその PCa 壁柱に対して上下方向には鉄筋の機械式継手によって、左右方

向には境界梁と高力ボルトによって接合を行った。また、効率よく安全かつ最短のサイクル工程とするため、床スラブおよび PCaPC 梁端部のみを在来工法による施工とした結果、1フロアの施工サイクルを7日とし、かつ高品質な躯体の構築を可能とした。サイクル工程図を図 - 15 に、PCaPC 梁の設置状況を写真 - 5 に示す。

8. モニタリングシステム

本建物では、制振装置の健全性および地震時の建物の応答性状をつねに監視できるモニタリングシステムを採用している。図 - 16 にシステムの概要を示す。加速度計は免震ピット階、1階、20階床の3箇所に設置され、制振装置である境界梁の極低降伏点鋼部分にはひずみ計と累積ひずみ計を合計8箇所設置し、毎日定時における常時測定と地震時測定を行っている。ひずみ計から累積塑性変形を算定し、地震時における建物の健全性をネットワークを介して遠隔地においても把握できるシステムとしている。

9. おわりに

本建物では、常時の鉛直荷重を支持する部位と地震力を負担する部位を分離した制振システムに免震構造を組み合わせることで、より高い耐震性能を確保することができた。さらに PCaPC 梁を採用することにより、ロングスパンと高い居住性を兼ね備えた無柱空間を実現するとともに、PCa 化工法により高品質で経済性および施工性に優れた鉄筋コンクリート造による超高層オフィスビルの可能性を示すことができた。

謝 辞

前田製管株式会社殿には、PCaPC 梁および PCa 柱の実大試験体の製作に協力いただき、実施適用前の貴重な設計資料を得ることができました。また、昭和コンクリート工業株式会社殿には、本建物の PCaPC 梁製作にあたり、日々の施工方法の工夫・改良等により、品質確保に尽力いただきました。さらに(株)伊藤製鉄所殿には緊張材としての多大なる高強度鉄筋の品質確保に尽力いただきました。ここに謝意を表します。

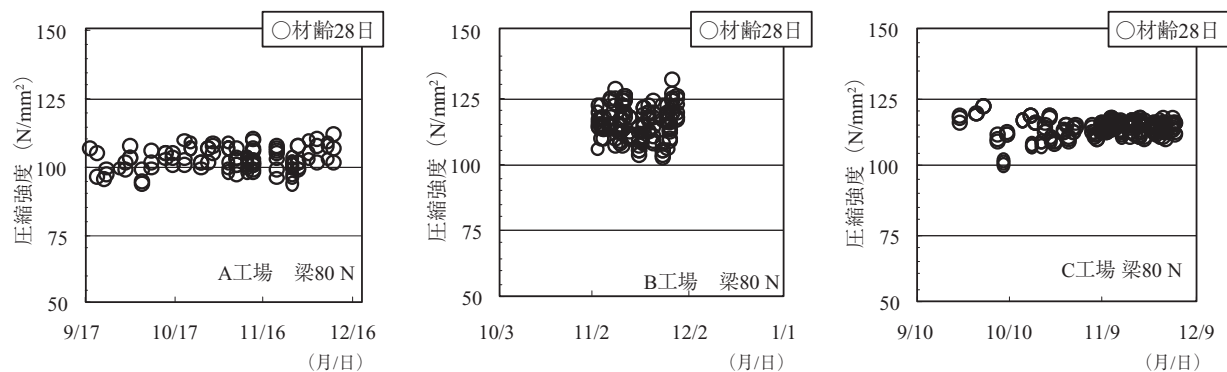


図 - 14 圧縮強度のばらつきデータ (PCa 梁 Fc80)

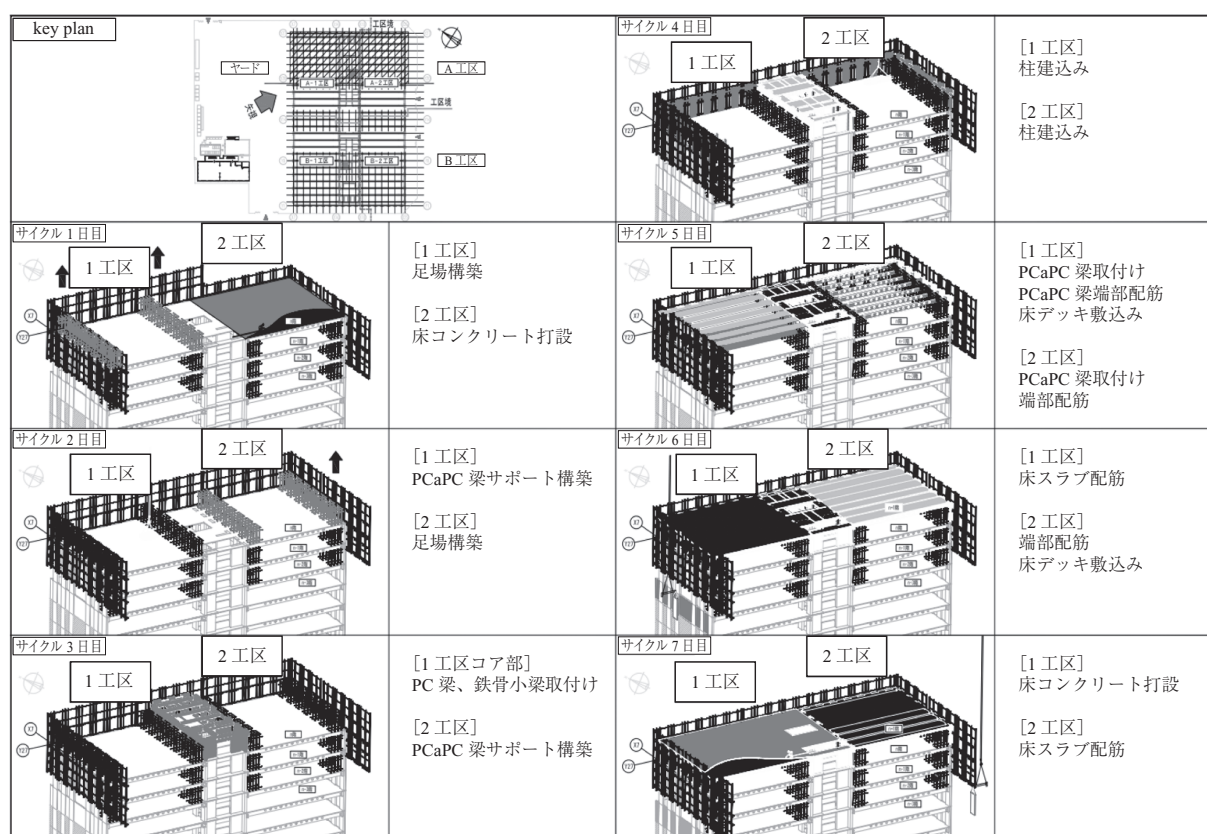


図 - 15 地上建方サイクル工程図



写真 - 5 PCaPC 梁設置状況

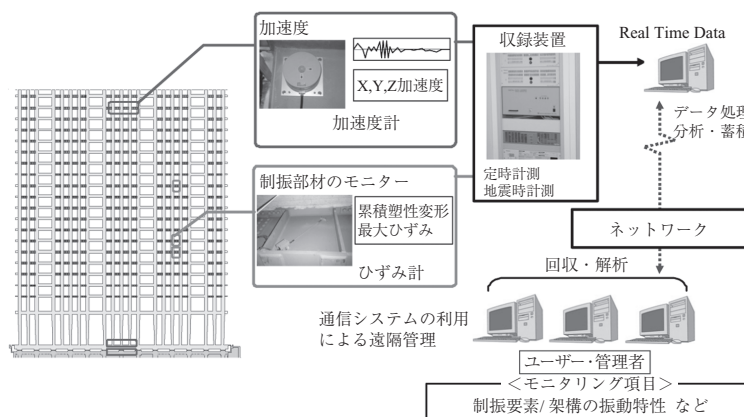


図 - 16 モニタリングシステム

参考文献

- 1) 村瀬, 小室他: エネルギー吸収集約型制振システムの開発 (その1~3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp.825-830, 2006
- 2) 河本, 小室他: エネルギー吸収集約型制振システムのRC造架構への適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造V, pp.33-36, 2007
- 3) 泉 満, 他: 極低降伏点鋼を用いたせん断降伏型制振部材の低サイクル疲労実験 (その6~9), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造C, 1996年 (近畿), 1997年 (関東)
- 4) 甲斐, 竹崎他: 大開口を有する PCaPC 梁の実大施工実験, 日本

- 5) 河本, 小室他: 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, (その1~2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.755-758, 2006
- 6) 河本, 竹崎他: 開口を有するプレテンション方式 PCaPC 梁の構造性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.949-950, 2008
- 7) 馬場, 道越他: 開口を有するプレテンション方式 PCaPC 梁の耐火性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2 防火, pp.167-168, 2009
- 8) 有山, 西本他: 長大スパン PCaPC 梁の半固定仕口の開発 (その1~2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.925-928, 2008

【2011年5月31日受付】