

PC トラス梁を有する超高層免震建物の設計・施工

— ザ・パークハウス 福岡タワーズ —

小関 誠子*1・西村 章*2・二木 秀也*3・高山 一斗*4

超高層建物の設計において、メガストラクチャー架構（コアチューブ、アウトリガー耐震壁、プレストレストコンクリートトラス梁（以降PCトラス梁）の構成）と免震構造を組み合わせることで、開放的かつ眺望豊かな良質な住空間を実現した。とくに、プレストレスを導入したトラス梁により、免震材料への地震時軸力低減や最適配置を可能とし免震性能を大きく向上させた。

キーワード：PCトラス梁、コアチューブ、アウトリガー耐震壁、超高層、免震

1. はじめに

本計画は、福岡を代表する景観地区のひとつといえるシーサイドももちの中に位置し、福岡 PayPay ドームに近接した54,000 m²を超える敷地（図 - 1）に、商業エリアと住宅エリアを組み合わせ、新たな都市環境の創造を目指した一体開発事業である。

本報告は、住宅エリアにおいて、プレストレストコンクリート（以降PC）技術を用いたメガストラクチャー架構と免震構造を組み合わせたツインタワーの超高層免震建物（写真 - 1）の設計・施工に関する報告である。



図 - 1 一体開発事業の計画敷地周辺環境

2. 建築概要

建物名称：ザ・パークハウス福岡タワーズ
 建設地：福岡県福岡市中央区地行浜2丁目
 設計：三菱地所設計・竹中工務店 共同企業体
 施工：(株)竹中工務店
 建築面積：1,206.18 m²（住宅エリアI期）
 延べ床面積：41,092.67 m²（住宅エリアI期）
 最高高さ：100.45 m
 階数：地上28階
 構造形式：免震構造（基礎免震）
 構造種別：鉄筋コンクリート造（1階PC梁）
 基礎形式：場所打ち鋼管コンクリート拡底杭
 液状化対策：耐液状化格子状地盤改良工法



写真 - 1 建物全景写真



*1 Seiko OZEKI

(株)竹中工務店 九州支店
設計部 構造1グループ



*2 Akira NISHIMURA

(株)竹中工務店 本社
技術本部 技術戦略部



*3 Shuya FUTATSUGI

(株)竹中工務店 九州支店
設計部 構造1グループ



*4 Kazuto TAKAYAMA

(株)竹中工務店 九州支店
設計部 構造1グループ

3. 建築計画

本計画は、福岡の中心地区天神から西に4 km に位置しており、立地条件は、3方向に、海・山・街と全方位に良好な眺望を有し、北側には、ドームや福岡タワーなどの福岡を象徴するシンボリックな建物も点在する。

上記の立地条件に合せ、「海辺の風景（自然の情景やおおらかさ）を感じる上質な日常のあるレジデンス」を設計コンセプトに、空と大地と海をつなぐイメージをもつ湾岸エリアの景観の新たなシンボルとなる建物を計画した。

本計画建物は、一体開発事業エリアの中の住宅エリア内に超高層住宅棟2棟（分譲住宅584戸）を東西に、その2棟をつなぐように共用棟、また、2棟に近接して駐車場棟を配置する構成となっている（図-2）。

住宅棟は、付加価値を高めるために開放感ある住空間と全方位の眺望のために特徴的な六角形平面形状となっており、建物中央にエレベーターシャフトを含む共用部があり、外周部に住戸が配置されている（図-3）。

住戸の配置は、20階以下の階は1フロアに3か所配置したアウトリガー耐震壁に分割され9～12住戸、21階以上の階では、アウトリガー耐震壁も無く、また、スラブが梁型の無いフルフラットスラブとしていることから、きわめて自由度の高い住戸レイアウトを可能としている。

建物外観は、黒を基調とした外装材に加えて、建物外周部にある手摺りを利用し波を連想させるファサードとなっている。また、建物頂部にはホバリングスペースも有する。

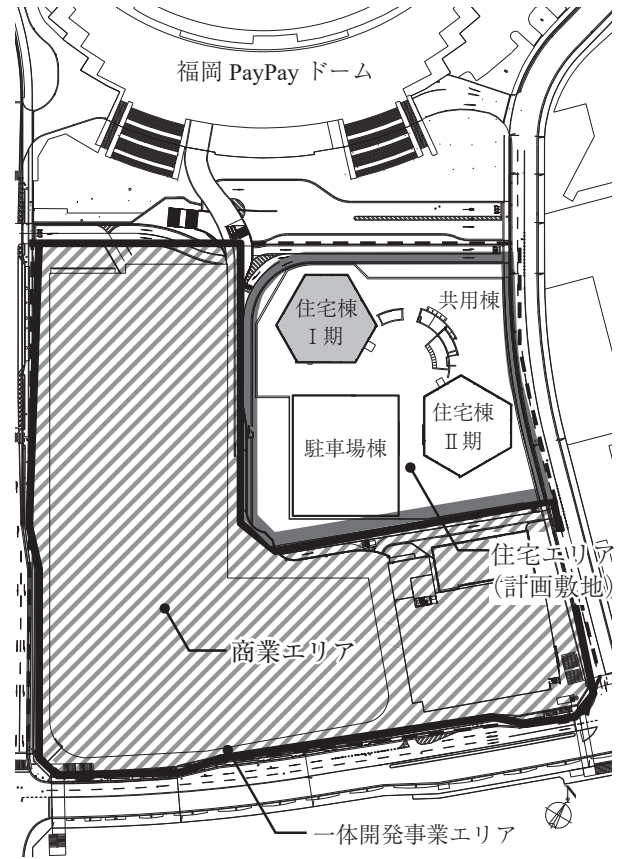


図-2 一体開発事業と計画敷地

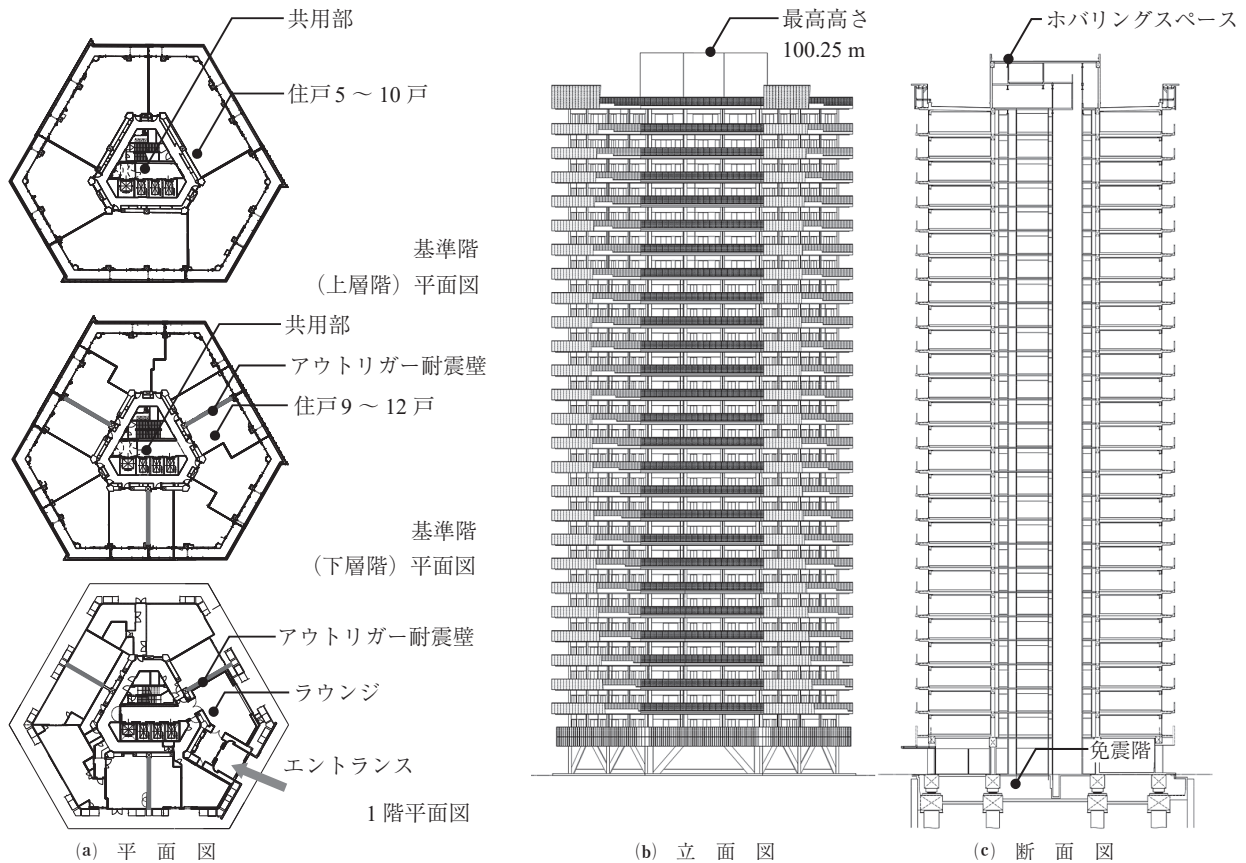


図-3 平面 立面 断面図

4. 構造計画

4.1 全体計画

構造計画は、住宅としての安全性確保の観点、かつ、風の強い臨海敷地の特性も考慮して、風揺れから大地震までの幅広い揺れに対応できる高性能な免震システム（パッシブブロック免震システム）を採用した。

本免震システムは、風揺れをロックできるパッシブ型ロック機構付きオイルダンパーを用いることで、大地震時の免震周期を7秒以上とし、地震力を大幅に低減している。その結果、上階の建物外周柱は、超高強度コンクリート（Fc110 N/mm²）の一部採用と合せて600 mm角のきわめてスリムなPCa部材とし、上部構造体のシンプル化・スリム化を図るとともに、高品質で生産性の高い構造体とした（図 - 4, 5）。

基礎構造は、先端深さ GL - 19.2 m 程度の風化砂岩を支持層とし、地震時の変形追随性・耐力確保を考慮し、場所打ち鋼管コンクリート拡底杭を採用した。また、セメント系地盤改良体（1000 φ, ラップ200 mm）で各杭を格子状に囲い込み液状化を防止する耐液状化格子状地盤改良工法を採用し、杭の耐震安全性を高めている（図 - 4）。

上部架構は、上質な住空間を実現するために可能な限り梁型の無いシンプルな構造形式とし、メガストラクチャー架構とした（図 - 5）。

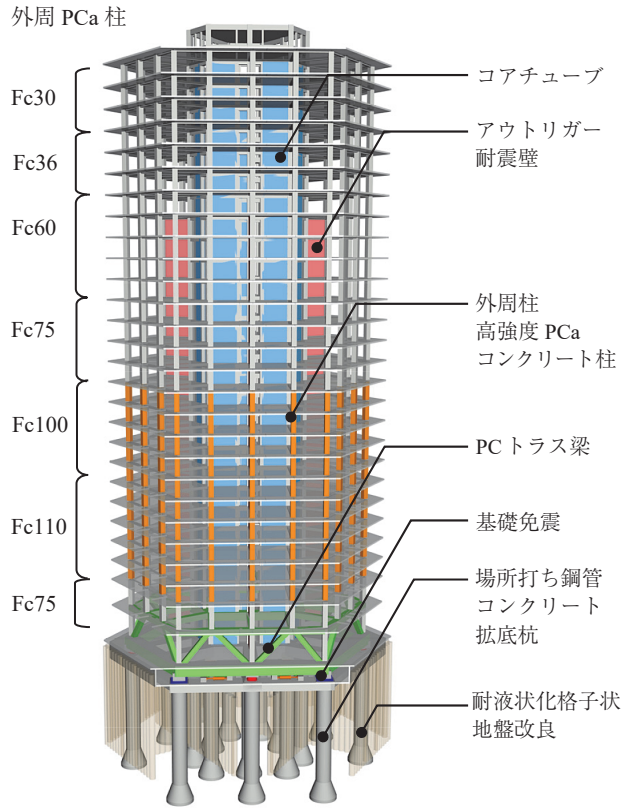


図 - 4 構造パース

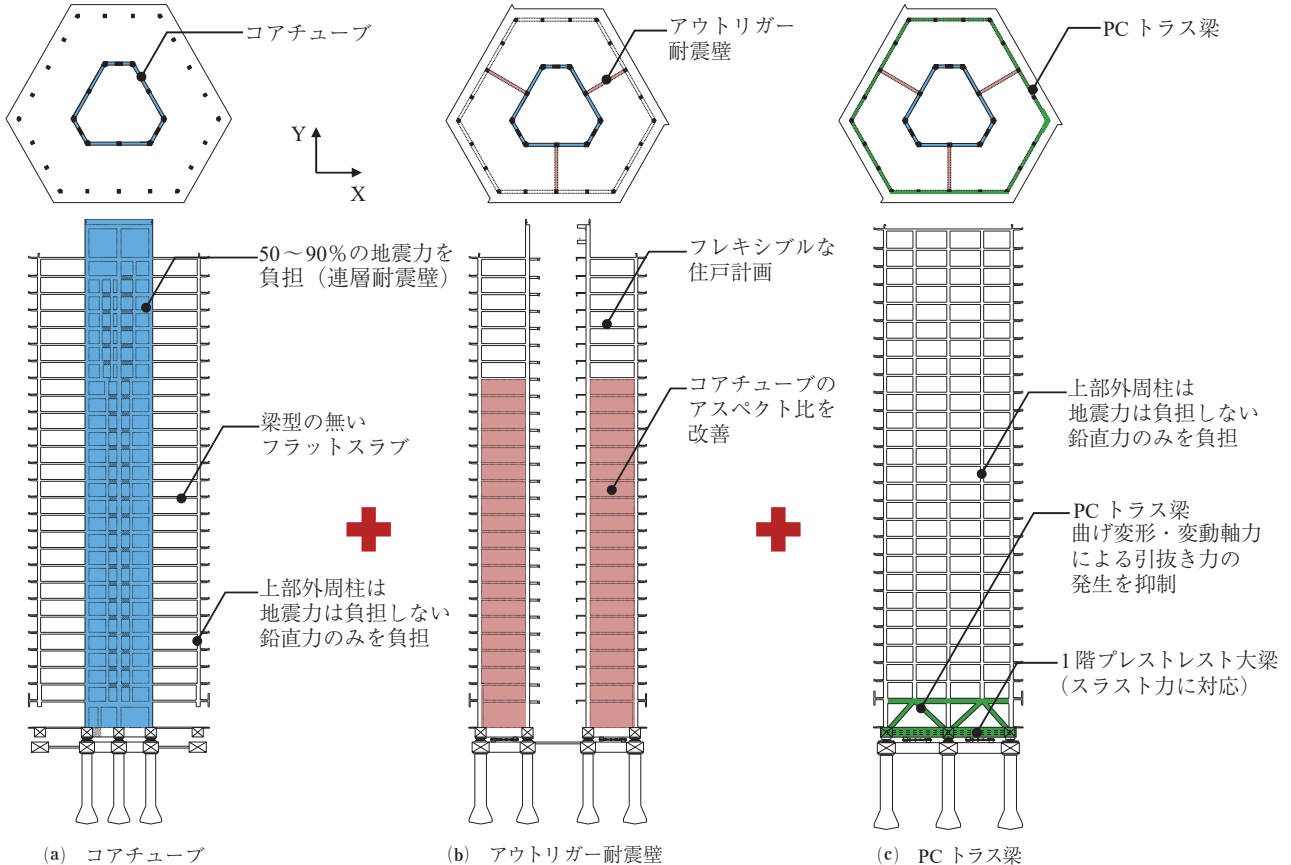


図 - 5 メガストラクチャー架構の地震力抵抗要素

4.2 メガストラクチャー架構

本建物で採用したメガストラクチャー架構は、前頁の図-5に示すように、(a)コアチューブ、(b)アウトリガー耐震壁、(c)PCトラス梁の3つの地震力抵抗要素で構成しており、建物全体の地震時変形を抑制している。

3つの地震力抵抗要素を図-6に構造パースで示す。コアチューブは、六角形の平面形状で最下階から最上階までの連層耐震壁架構（柱・梁・耐震壁で構成され、一部開口付き）で、抵抗要素(b)(c)を組み合わせることにより地震力の大部分（基準階で50～90%）を負担している。その結果、図-6に示すように、住戸部分をフルフラットスラブ（鋼管ボイドスラブ：厚さ400mm）とし、建物外周部柱は地震力を負担せず鉛直力のみを支えている。また、建物外周部柱は超高強度コンクリート（Fc110 N/mm²）を採用したPCa柱とし、柱断面をスリム化（600×600mm程度）し眺望を確保するとともに、施工の生産性も向上させている。

ただし、上記のコアチューブの平面寸法はY方向で16m程度で、建物外周柱間寸法35m程度に対して46%程度と小さく、軒高92.7mに対するアスペクト比は5.8程度と大きく、脚部端部で大きな変動軸力が生じ、免震材料の設計が不可能となる。そこで、抵抗要素(b)のアウトリガー耐震壁を20階まで3方向に設けてスタンスを大きくし、建物全体としての立体効果で抵抗するように工夫した。

建物の1階外周部分に設けた抵抗要素(c)のPCトラス梁は、2階床梁・斜柱・1階床梁で構成されており、上述の抵抗要素(b)のアウトリガー同様に、コアチューブの全体曲げ変形抑制効果によるコアチューブ脚部の軸力変動を低減し建物外周部へ分散させている。

PCトラス梁の軸力伝達概念図を図-7に示す。トラス下弦材となる1階大梁には大きな引張力（スラスト力）が生じるため、スラスト力を上回るプレストレスを導入することで高い安全性を担保している。

PCトラス梁を採用した最大の利点は、免震材料の設計にある。仮に、建物上部の外周柱を1階にそのまま降ろした場合、建物隅部およびアウトリガー耐震壁直下の免震材料は、地震時変動軸力により免震材料に大きな引抜力が発生し、免震材料の設計が困難となる。一方、本計画はPCトラス梁を採用することで、長期軸力を隅部とアウトリガー耐震壁直下に集約でき、免震材料の設計を可能とする。さらに、免震材料も集約できることから、免震材料を大型化・効率化することで、免震周期を長周期化し免震性能を向上できる。また、一般的には引抜力が大きく作用する建物隅部にも低摩擦弾性すべり支承を配置することが可能となり、さらなる長周期化が実現できた。

また、(a)コアチューブ内部の床は鉄骨造で無柱空間とすることで、鉄骨を地組みした状態で、上部にクレーンで設置するユニット化施工を可能とし、コンクリート数量を大幅に低減でき、生産性に大きく寄与している。

以上、一般的に柱・梁・耐震壁で構成され構造架構と異なるメガストラクチャー架構を考案し、良質な住空間の創出と生産性向上を両立することができた。

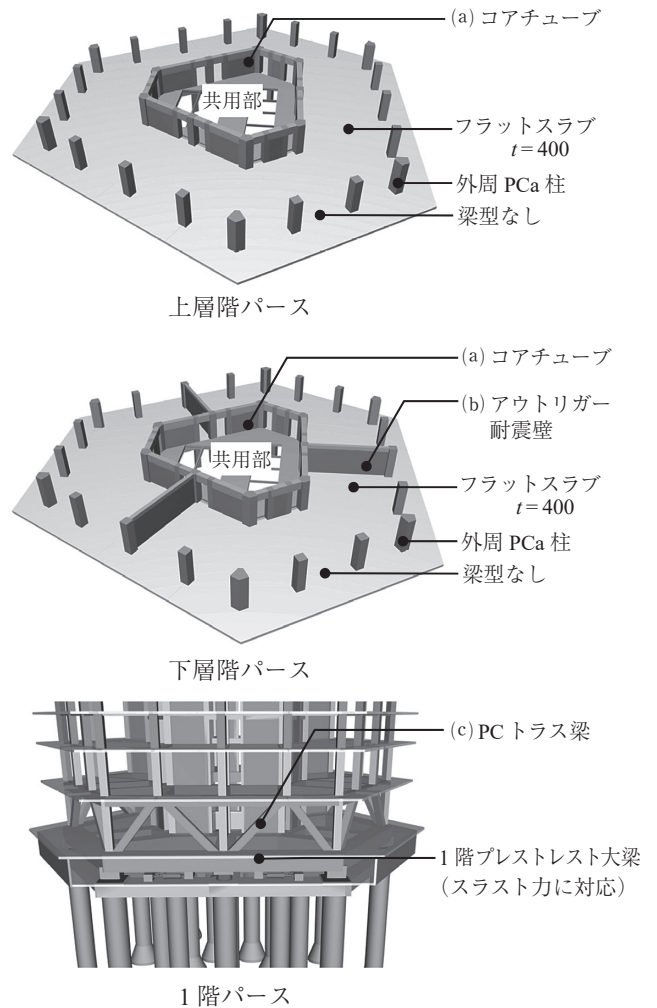


図-6 地震力抵抗要素（構造パース）

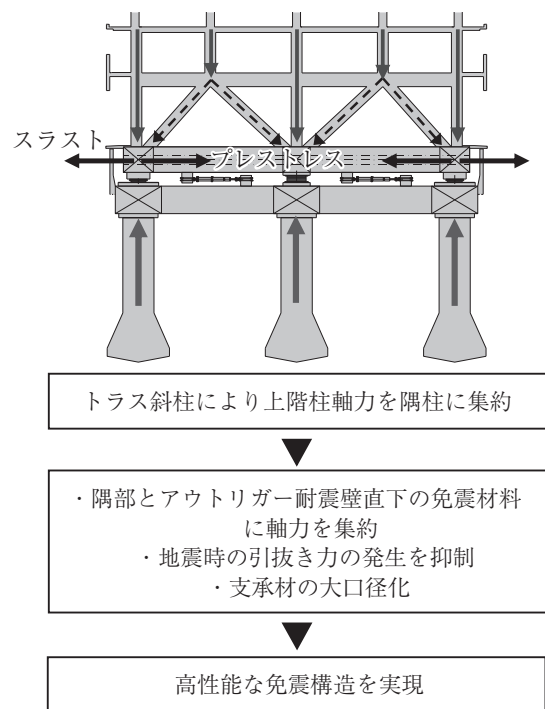


図-7 PCトラス梁の概要

4.3 プレストレストコンクリート梁 (PCトラス梁)

1階建物外周部のPCトラス梁は、図-8に示すようにスパンにより2種類の形状(トラス①,トラス②)があり、六角形の平面形状に合わせて図-9に示すように交互に配置している。したがって、建物外周部全スパンにプレストレスを入れることで、力が閉じ安定した形状となっている。

プレストレス導入方式は、PC鋼材によるポストテンション方式として、導入緊張力は、摩擦と定着時の滑動による引張力の減少を考慮して摩擦係数 $\mu=0.25$ 、プレストレス率 $\lambda=0.004$ として算出し、表-1に示すように、トラス①は、スラスト力 $P1=13\ 100\text{ kN}$ に対して、初期導入緊張力は $P1_0=16\ 500\text{ kN}$ 、トラス②は、スラスト力 $P2=9\ 600\text{ kN}$ に対し、初期緊張力は $P2_0=11\ 000\text{ kN}$ とし、クリープ後の導入張力低下後でもスラスト力以下にならないように設定した。

ケーブルの配列は、スラスト力をキャンセルさせることが主目的であることから、表-1の1階大梁断面図に示すように梁断面の中心とし、不静定応力(曲げ)を生じさせない位置とした。また、トラス梁①②鋼材位置を上下にずらし、梁端部定着部でPC鋼材が干渉しない位置とした。

なお、PC梁部材の断面設計においては、プレストレス力を考慮しない場合の応力に対して配筋量を決めているため、十分な余力を有している。

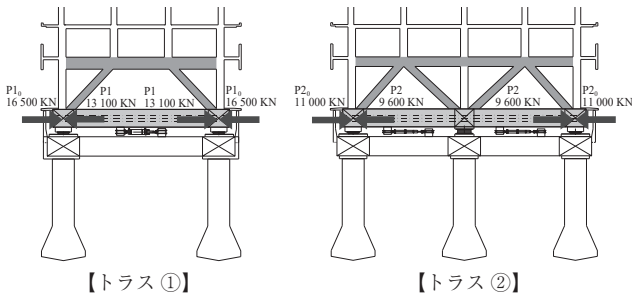


図-8 1階外周部のPCトラス梁

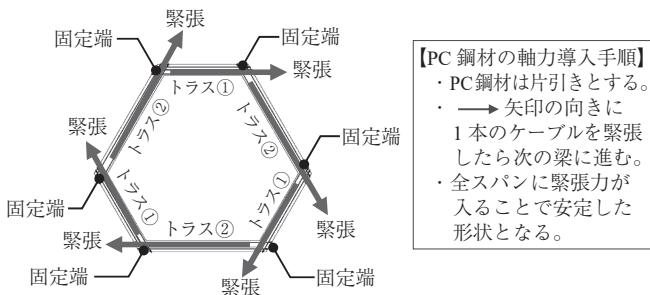


図-9 PC導入図(1階)

表-1 トラス別PC導入軸力

【トラス①】	
梁断面	2 200×1 850
主筋	18-D38 (SD490)
導入 PC 鋼材	12C-11-12.7 mm
施工時総緊張荷重 (kN)	P = 16 500 kN
【トラス②】	
梁断面	2 200×1 850
主筋	18-D38 (SD490)
導入 PC 鋼材	8C-11-12.7 mm
施工時総緊張荷重 (kN)	P = 11 000 kN

4.4 免震システム

本計画の免震システムは、博多湾に近接するため風の影響が懸念されるエリアであること、また、堅固断層から比較的近いことを考慮し、風揺れから大地震まで対応できるパッシブロック免震システムを採用した(図-10)。

この免震システムは、通常時~小さな風荷重レベルでは、パッシブ型ロック機構付オイルダンパーにより免震層変形を油圧剛性でロックされており、レベル1より小さい地震荷重レベルでロックが自動解除され、柔らかい免震層剛性に切り替わることで長周期化が図られる(図-11)。

本建物の免震材料の配置を図-12に示す。基本的に大型の天然ゴム系積層ゴム支承で建物を支持し、減衰は2種類の粘性系ダンパーで吸収する仕組みとしている。また、建物隅部には、PCトラス梁により免震材料への引抜力が低減できたことから低摩擦弾性滑り支承を設置している。

さらに、想定外地震を考慮し、建物擁壁との間に衝突を緩和する防舷材も設置している。

したがって、メガストラクチャー架構・プレストレス導入トラス梁などの工夫とパッシブロック免震システムにより、風揺れによる安心から大地震時の安全まで対応できる構造を実現できた。

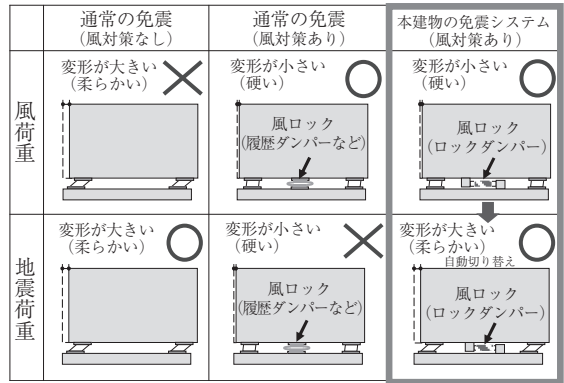


図-10 免震システムの概要(基本思想)

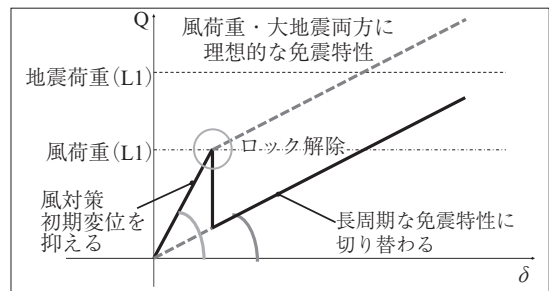


図-11 免震システムの概要(復元力特性概念図)

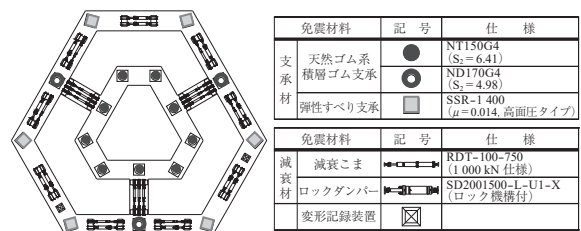


図-12 免震材料配置図

5. 耐震性能および地震応答性状の確認

5.1 上部架構の耐震性能評価（静的解析）

メガストラクチャー架構の効果を確認するために図 - 13 に示す 3 つの静的解析モデルにて比較検証した（一貫解析プログラム）。Type1 は(a)コアチューブのモデル，Type2 は Type1 に(b)アウトリガー耐震壁を加えたモデル，Type3 はさらに Type2 に(c)PC トラス梁を加えたモデル（設計モデル）である。外力は，L2 地震時相当の設計用せん断力とし，変形や応力状態を比較した。

各解析モデルの Y 方向地震時水平変位を図 - 14 に示す。上部架構の建物頂部の変形を比較すると，設計モデル Type3 は，Type2 から 6% 程度低減，Type1 の 67% 程度に低減されることから，とくに(b)アウトリガー耐震壁の変形抑制効果が高いことがわかる。また，図 - 14 右図に示す，有限要素解析プログラムによる詳細解析結果も，おおむね両者の解析は一致しており，一貫解析プログラムの妥当性を検証している。

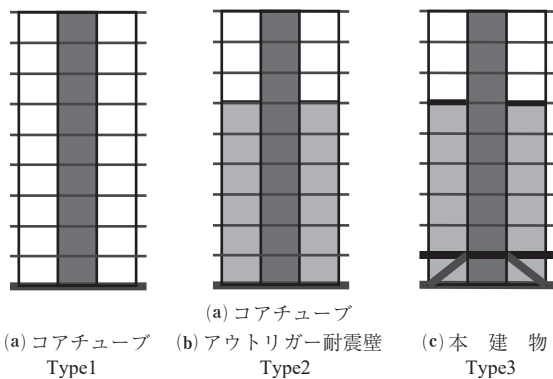


図 - 13 静的解析の検討モデル

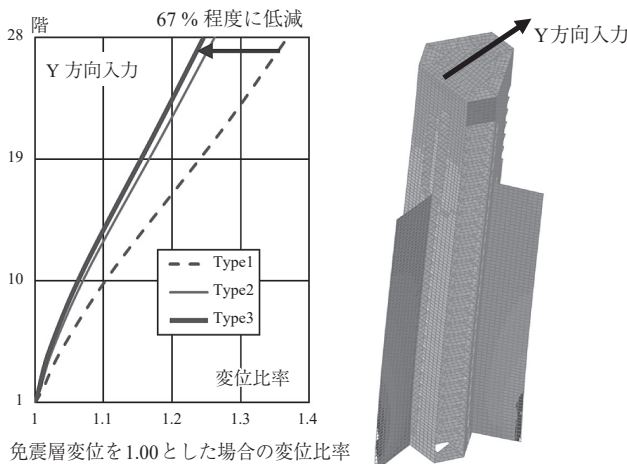


図 - 14 メガストラクチャー架構の最大変位と軸力図

5.2 免震性能評価（動的解析）

3 つの抵抗要素を組み合わせたメガストラクチャー架構による免震効果を確認するために，時刻歴応答解析（レベル 2 地震：告示波ランダム位相）を実施した。とくに PC トラス梁による免震材料の集約効果等を比較するために，PC トラス梁の無いモデルを Case1，有るモデルを Case2（設

計モデル）として比較した（図 - 15）。

最大応答値分布の結果を図 - 16 に示す。(a)最大加速度は全体的に Case2 の方が小さく，また，(b)最大応答変位では Case2 の方が免震層変位は大きいが上層階ではかなり変形が抑制されており免震効果の高さがうかがえる。また，(c)最大層間変形角，(d)最大層せん断力については，上層階で Case2 が若干大きくなる傾向を示すが，中層階以下では大幅な応答低減が図られている。

免震材料の変動軸力の結果を表 - 2 に示す。免震材料への軸力集約効果の高い Case2 では，短期（水平・上下地震時）軸力時にまったく引抜力が生じていないが，Case1 の場合は，(b)アウトリガー耐震壁直下で引抜力が発生し，また，隅部の軸力変動も大きい。

上部架構を工夫し，免震計画の自由度を高めた結果，免震性能が高いことを解析的に示せた。

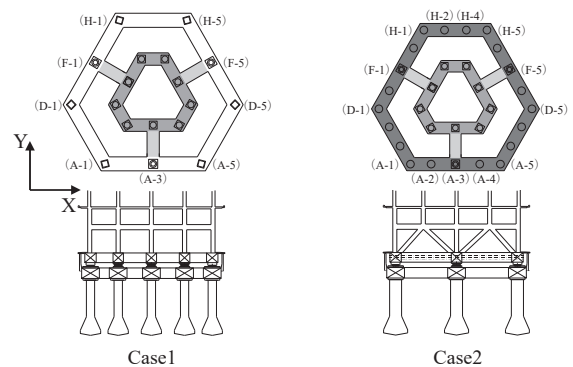


図 - 15 時刻歴応答解析の検討モデル

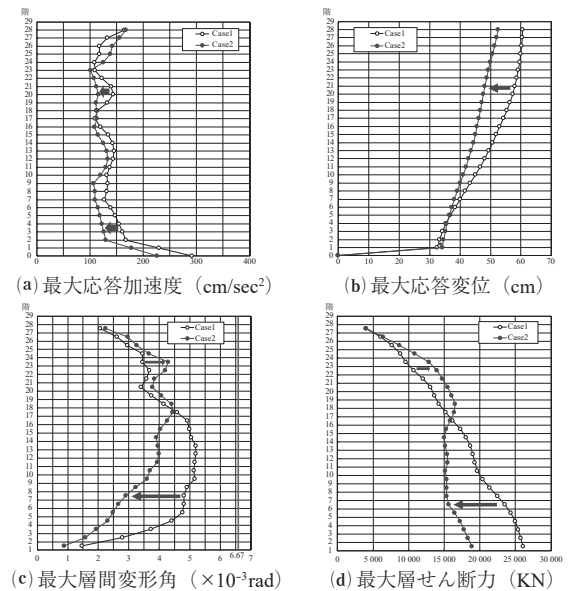


図 - 16 応答解析結果比較

表 - 2 免震材料の引き抜き力

地震方向	位置	Case	長期 (KN)	圧縮 (KN)	引張 (KN)
X方向	F-1 (アウトリガー直下)	Case1 (正加力)	22 126	9 136	-4 140
		Case2 (正加力)	29 348	22 711	5 102
	D-1 (隅部)	Case1 (正加力)	12 364	13 061	5 642
		Case2 (正加力)	35 556	40 534	19 200
Y方向	A-3 (アウトリガー直下)	Case1 (正加力)	22 837	9 576	-4 127
		Case2 (正加力)	28 409	18 985	1 940
	H-1 (隅部)	Case1 (負加力)	14 019	16 236	7 824
		Case2 (負加力)	34 515	39 310	18 601

6. 施 工

6.1 全体施工計画と実績

I期工事は、一体開発の大型商業施設の施工のためにII期工事の施工ヤードを提供する必要があるため、狭い施工ヤードでの工事となり、工期21か月の厳しい施工条件であった。そのため、鉄筋先組工法やサイト・工場PCa化、また、ユニット工法などを駆使し、上階では7日タクトによる工期内の竣工を目指し、これを実現させた。

6.2 プレストレス工事

シース管工事は、大口径の先組鉄筋の中にシース受筋を事前に配置しシース管を所定の位置に固定した。PC鋼材挿入工事(写真-2)と緊張工事(写真-3)は、建物側躯体と擁壁とのクリアランス750mmの狭い空間での施工となり、六角形平面で6本の大梁に時計回りに1段ごとに移動して緊張した。緊張力導入は油圧管理にて実施し緊張力の管理は、装置の圧力とPC鋼材の伸び量の両方で行った。緊張が完了すると、アンカーヘッド内にくさびが噛みこんだ状態で固定し、余長部分を切断した。最終的に、グラウトを注入し、緊張部の躯体端面処理を行い工事完了とした。



写真 - 2 PC鋼材挿入工事

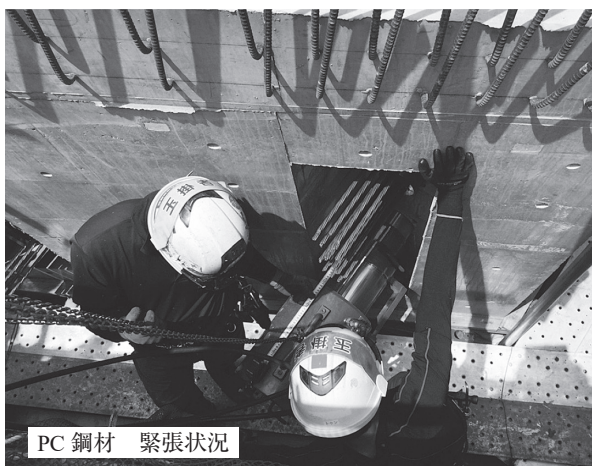


写真 - 3 PC緊張工事

6.3 鉄筋工事・PCa工事・免震工事

2種類のPCトラス梁が交わる建物隅部は、配筋の納まりが厳しく、写真-4示すようにBIMにより詳細な検証を行い、写真-5のように斜柱にテンプレート治具などを用いて精度よく施工できた。写真-6は、上部の建物外周PCa柱とフラットスラブ底面を示しており、梁型のないシンプルな構造体であることがわかる。写真-7は、免震層の大口径免震支承材や本免震システムで重要なバッシブ型ロック機構付きオイルダンパーなどを示している。

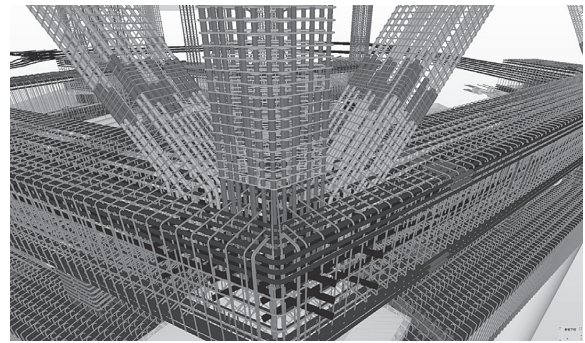


写真 - 4 BIMによるトラス脚部配筋検討

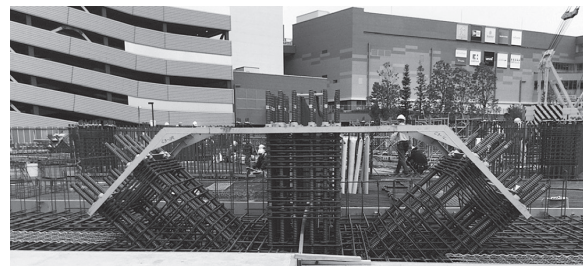


写真 - 5 トラス斜柱配筋(鉄筋保持用治具)



写真 - 6 上部PCa柱・フラットスラブ

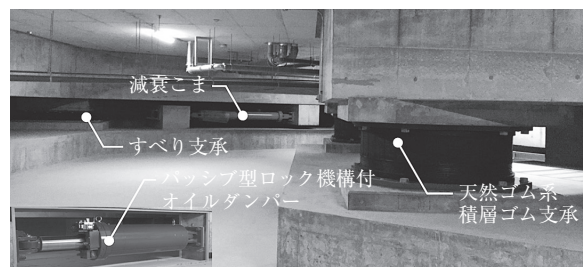


写真 - 7 免震材料設置状況

7. おわりに

現在、ツインタワーのうちⅠ期工事が竣工（写真 - 8, 9）し、Ⅱ期工事が2020年12月末竣工を目指し施工中である。柱部材のPCa化、梁型のない構造などにより、施工の生産性向上を図ることができ、7日/1フロア（1300㎡）タクトを実現した。

本建物の構造設計上重要な要素であった1階のPCトラス梁は、完成後もその姿を見ることができ、写真 - 10, 11に示すように、外観のアクセントとなっている。

本計画は、ドーム近隣エリアにおいて、一体開発事業による大型商業施設と超高層住宅により賑わいをもたらし、また、新しい都市環境を形成するとともに、湾岸エリアの新たなシンボルとなっている。



写真 - 8 建物全景



写真 - 9 アプローチ外観



写真 - 10 1階PCトラス梁外観①



写真 - 11 1階PCトラス梁外観②

【2020年4月30日受付】