

BILMUS (ビルマス) がもたらす制振革命

芝浦プロジェクト S 棟

今井克彦

近年、社会が急速に変化する中、人々が暮らす都市も機能の高度化などが進み、変化が求められている。国際競争力の強化、賑わいや回遊性などの創出、甚大化する災害への防災性、インフラや街区整備など課題は多い。都市再生特別措置法の施行や国家戦略特区制度の創設などもあり、現在各地で大型再開発が計画され、新たな「街づくり」が進められている。

多様化・複雑化する都市において、様々な用途と機能を有する超高層複合建物は大きな役割を担い再開発には欠かせない。一方、安全・安心な街づくりでは、超高層建物の地震や風に対する揺れの制御が不可欠である。建物が大型化・複雑化し、求められる性能も多様化・高度化している今、より効率的に揺れを制御するシステムが求められている。

建物自体を制振装置化する「BILMUS」は、従来とは異なる概念により揺れを半減させるシステムである。本報では BILMUS を、採用した「芝浦プロジェクト S 棟」と共に紹介する。

キーワード：超高層建物、制振システム、同調質量ダンパー、建物重量活用、長周期地震動

1. プロジェクト概要

芝浦プロジェクトは、区域面積約 4.7 ha、高さ約 230 m、延床面積約 550,000 m² のオフィス・ホテル・商業施設・住宅を含む、約 10 年間に及ぶ大規模複合開発である。浜松町駅を中心とした周辺地域との回遊性の強化、防災対応力の強化、舟運活性化、水辺の賑わい空間の創出、周辺環境資源との連続性を意識した質の高い都市空間の創出など、本地区のみならず東京全体のさらなる賑わいの創出と、国際競争力の向上に資する国家戦略特別区域計画の特定事業として、未来につながる街づくりを目指すものである。

建物の構成としては、S 棟・N 棟のツインタワーと 2 棟をつなぐ低層棟、外構に配された独立店舗などからなる計画である（図—1、写真—1）。

表—1 建築概要

事業主体	野村不動産(株)、東日本旅客鉄道(株)
主要用途	オフィス、商業、ホテル、共同住宅、駐車場他
建築設計	(株)横総合計画事務所、清水建設(株)一級建築士事務所
構造設計	清水建設(株)一級建築士事務所、Arup
施工	S 棟：清水建設(株)、N 棟：未定
構造	S 造 + SRC 造 + RC 造
延床面積	約 550,000 m ²
階数	S 棟：地下 3 階地上 43 階建 N 棟：地下 3 階地上 45 階建
工期	S 棟：着工 2021 年 10 月、竣工 2025 年 2 月 N 棟：着工 2027 年度、竣工 2030 年度



図—1 パース左の超高層ビルが S 棟



写真—1 外観施工中写真（撮影：2023 年 9 月）

超高層タワー棟は、3層構成のツインタワーとし、ELVのバンク分けに合わせ、上層階をセットバックさせる建物形態とする。壁面が分節化されることで、周辺ビルのスケール感と調和するとともに、空が広く見える開放的な海辺景観の形成を目指している。

2024年現在施工中のS棟は、1階～34階が商業施設・オフィス、35階以上がラグジュアリークラスのホテルである（図-2）。超高層の概念を覆す視界に柱のない空間は、街とつながる境界のない低層空間（写真-2）を生み出すとともに、「空と海から得られる開放感」と「都心で働くこと」を融合させ新たな働き方「TOKYO WORKation」を提案する。開放的な眺望や快適な居住空間を実現する上層階のホテルは、最上級のパーソナルなサービスとラグジュアリーな体験を提供する。街づくりにおける多様化・複雑化する空間の創出は、超高層建物に対する要求を多岐にわたらせる。異なる用途が積層する複合施設となり、要求される空間や性能が異なり全体を統一するのが難しい中、より効率的に制振効果を発揮するシステムが求められる。S棟は制振システム「BILMUS（ビルマス）」（以下、本システムという）により、街に新たな空間や機能を創出し、未来につながる街づくりに相応しい超高

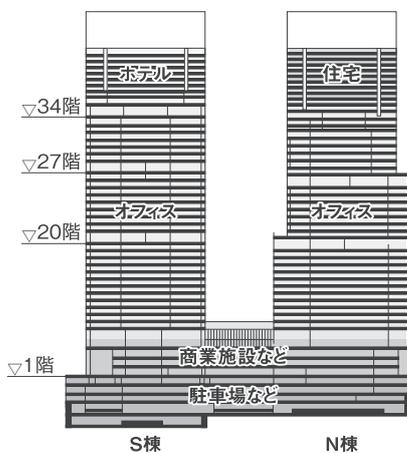


図-2 ツインタワーの用途構成



写真-2 低層施工中写真（撮影：2023年7月）

層複合建物となっている。

2. 本システム概要

本システムはTMD（同調質量ダンパー）の原理を応用し、建物自身の重量をマスダンパー化する制振システムである。積層ゴムやオイルダンパーなどで構成される連結部を介し、上層階をマスダンパーとして下層階に同調させることで、建物全体の応答を低減する。連結部より上部の建物の応答を低減するとともに、その動きを利用して連結部下部の応答も低減する仕組みであり、免震層より上部の建物の応答を低減する免震建物とは応答低減の概念が異なる（図-3）。連結部の設計は、TMDと同様に定点理論に基づく定点の高さを揃える剛性、定点が最大となる減衰とすることで、減衰性能を最大化することができる。この状態を最適同調と呼び、上層階と下層階の応答時の位相が最もずれた状態となる。揺れを打ち消し合うような振動性状とすることで、通常の制振と比較して減衰性能を大きく向上できる（図-4、5）。

本システムは、比較的高い位置に連結部を設置するため、上層部の揺れ、いわゆるむち振りを抑えることもできる。さらに上層・下層を独立させ、かつ上層階をマスダンパー化したシステムであることから、建物全体の耐震性能を向上させつつ上層階をRC造に切替えることができる。揺れだけでなく音や振動に対して

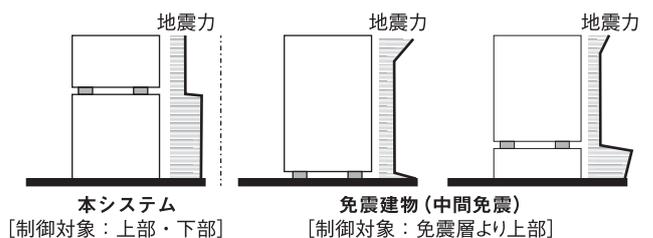


図-3 本システムと免震建物の違い

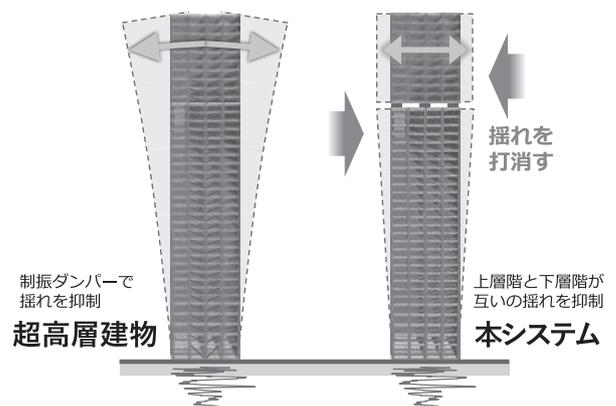
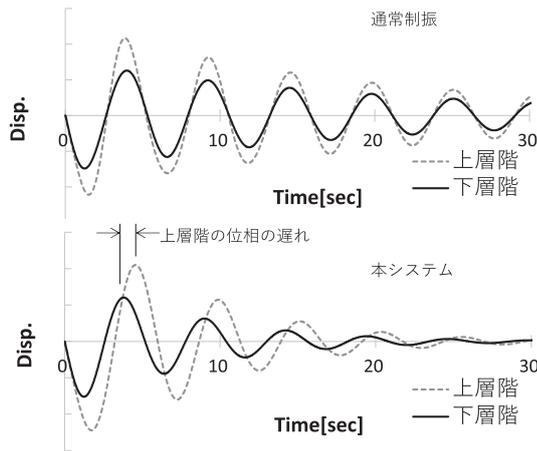


図-4 通常制振と本システムの揺れ方のイメージ



図一五 通常制振と本システムの揺れの納まり方のイメージ

も、通常の免震・制振の超高層建物では実現できない性能が可能となる。

3. 本システムの開発とS棟に取り入れた経緯

本建物の防災対策・災害対応能力には、被害の最小化、防災拠点化、入居テナント業務継続支援、宿泊客の支援を目的として、十分な耐震性の確保が求められた。通常、耐震性を高めるためには、各所に制振ダンパーなどを設置し、揺れを吸収させる必要がある。しかし、200 m 超クラスの超高層の場合、この制振ダンパーの必要台数が過大となり、建築計画にも影響を及ぼす。上層部の揺れ（むち振り）を抑えることが難しく、ラグジュアリーホテルが上層階に計画される複合建物では要求される空間と性能がうまく整合しない場合もある。

耐震性の向上やむち振りの対策として、建物頭頂部にマスダンパーなどの重りを載せ、揺れを打ち消す方法もあるが、スペースの確保や重り分の負担が建物にかかるなど、載せられる重りの重量＝制振効果に限界がある。

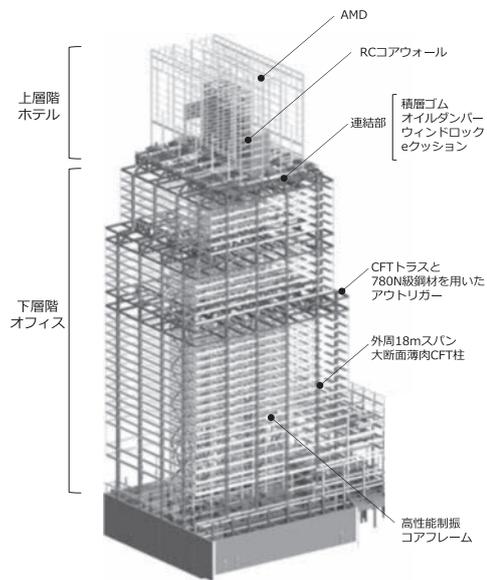
そこで、本システムを開発しS棟に採用した。下層階では高い制振効果を発揮しつつ、鉄骨数量や制振装置台数を大幅に削減することができ、開放的な眺望と有効面積の拡大を実現している。上層階では、従来の制振に対し揺れを半減させ、ホテルの家具・什器の転倒や内外装の損傷を大幅に低減するとともに、地震や強風が発生しても、ラグジュアリーホテルに相応しい居住性を確保することが可能となる。従来の超高層に比べ柱を極端に少なくしたオフィス空間の実現などにおいても、絶大な制振効果を発揮する制振システムが必要であり、本システムの採用が不可欠であった。上層階が3段階にセットバックした建物形態と空間構

成を利用し、最上部のセットバック位置に連結部を挿入することで、外観や空間を崩さず採用することができている（図一六）。

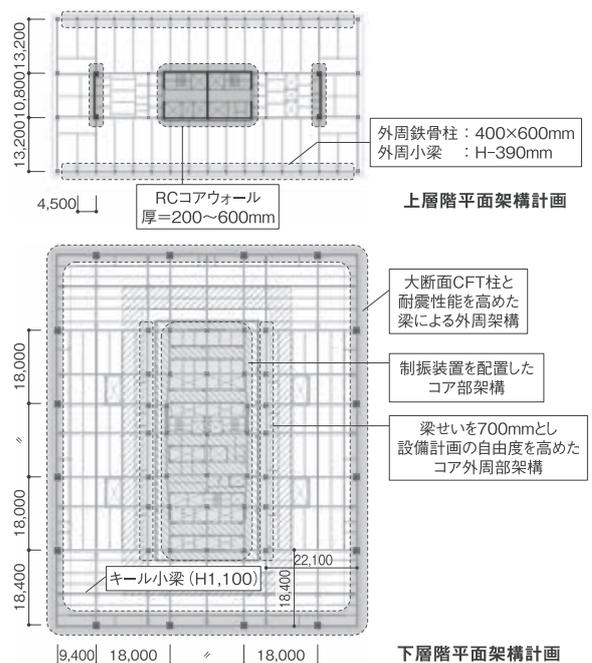
4. 構造架構概要

(1) 平面架構計画（図一七）

下層階は、整形な形のセンターコアのオフィスである。外周のスパンを18 mとし、低層部で最大1,400 mm角となる大断面CFT柱で、軸力を集中して支持する。外周の柱を大断面化し、外周大梁には大地震時にも塑



図一六 S棟全体架構パース



図一七 平面架構計画（上：上層階，下：下層階） S = 1 : 2,000

性ヒンジを計画しないなど、外周架構の性能を高めることで、外周をロングスパン化したことによる建物全体のねじれ剛性の低下に配慮した。

オフィスの奥行は22.1 mであり、角部は18.4 × 9.4 mの跳ね出し架構となる。基準階の大梁せいは1,100 mmとし、外周部とコアの間に大梁と同じ梁せいのキール小梁を配置することで、床の剛性を確保し、歩行時の床振動にも対応した。

また、コア最外部空調機械室に配した大梁はせいを700 mmとし、フロア内へのダクトを梁下展開可能な自由度の高い計画とした。

上層階は、南北方向に長辺をもつ長方形平面の外周部に客室を配置したホテルである。鉄骨造のコアをホテル階はRCコアウォールに切り替えることで、コア内の振動や音を客室と遮断している。さらに、コアウォールに地震力を負担させることで、長辺方向の外周鉄骨柱を小型化し、外周梁を梁せいの小さな小梁とすることで、客室の開放性を高めた計画とした。

(2) 立面架構計画 (図-8)

3層構成で20, 27, 34階でセットバックする建物形態において、それぞれのセットバック階のトランスファ部材をアウトリガーとして活用することで、コアの曲げ変形を抑える架構とする。大きな軸力が作用する20階と、27階のトラス斜材はCFTとし、さらに20階ではトラスが取り付く柱のパネル部に780 N級鋼材を採用することで、剛性と耐力を確保し、上部架構を確実に支持する冗長性にも配慮した架構としている。

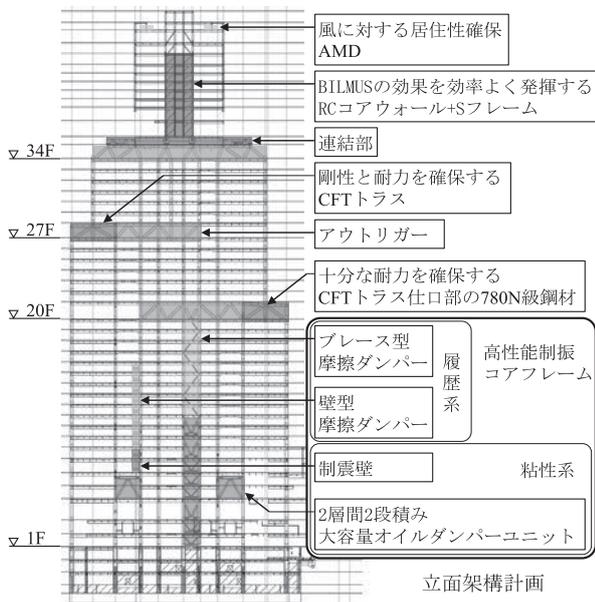


図-8 立面架構計画

最上部のセットバック階である34階の直上(地上約170 m)に連結部を設け、本システムとした。

下層階は、制振装置付ラーメン架構とし、低層部に制振装置を集中させることで、本システムと合わせて建物全体の制振効果を高めている。

上層階は、RCコアウォール付ラーメン架構とし、十分な剛性と重量を確保することで、本システムの効果を効率よく発揮させている。

(3) 制振システム

ホテル階の重量を活用した本建物の本システムは、下層階に対する上層階の質量比を約20%確保することで、大きな減衰性能を建物全体に実現している。一般に同調系の制振システムは、実際の剛性や重量のばらつきへの配慮が必要となる。本建物では定点理論に基づく最適同調に対し、剛性・減衰ともに約3倍となるように連結部を設計し、敢えて連結部のパラメータを最適同調から外すことで、ばらついた場合にも、減衰性能の急激な変動が起きないようにし、ロバスト性を確保している(図-9)。

低層階の制振システムは、粘性系ダンパーとしてシアリンク型のオイルダンパーと制振壁を採用し、履歴系ダンパーとしてブレース型と壁型の摩擦ダンパーを採用した。シアリンク型のオイルダンパーは2層間に二段積み設置することで大容量かつ効率よくエネルギーを吸収する配置とした。連結部ロック時や小さな揺れに対しては、主に低層集中制振が効果を発揮する計画としている。

本システムと低層集中制振を掛け合わせることで、小さな揺れから大きな揺れ、長周期地震などの特性の異なる地震や風に対応したシステムとなっている。

5. 構造設計クライテリア

未来につながる街づくりを担う超高層複合建物に相

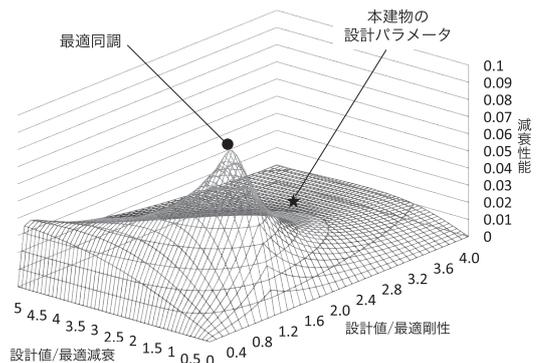
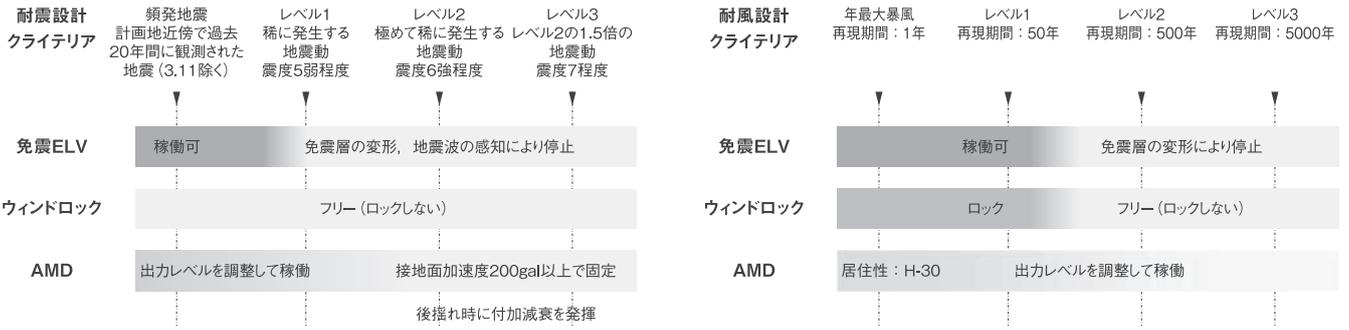


図-9 TMDの最適同調と設計パラメータ



図—10 設計クライテリア

応しい性能を確保するため、本建物では耐震・耐風性能に加え、居住性や機能性についてもクライテリアを策定した(図—10)。

地上約170mに位置する連結部を貫通するELVは、連結部の変形にレールが追従できる免震ELVを採用する。免震ELVは、連結部の水平変形に応じて稼働条件が定められている。具体的には、水平変位が20mmに達すると低速運転となり、40mmを超えると最寄り階に停止する。ラグジュアリーホテルにアクセスするこの免震ELVの稼働条件が、建物の機能性に直結するため、地震時・強風時ともに免震ELVの稼働条件を設計クライテリアに盛り込んでいる。

耐震性能としては、通常設計に用いられるレベル1、レベル2の地震動に加え、計画地近傍で過去20年間に観測された地震(東日本大震災を除く)を頻発地震と定義し、小さい地震でも建物の機能性を損なうことがないようにクライテリアを設けた。また、計画地で発生することが想定される最大級の地震をレベル3と定義し、連結部の健全性と、建物の安全性を確保するクライテリアとした。

耐風性能としては、再現期間の期待値が1年の風から、5000年の風に対してクライテリアを定め、安全性はもちろん、機能性、居住性を確保した。

6. 連結部の設計

上記クライテリアは、大地震などの大きな外乱に対しては連結部を変形させることで建物全体の減衰性能を向上させ、小さな外乱に対しては免震ELVを稼働させるために連結部の変形を制限するという二律背反な条件となっている。

この課題を解決しつつ、本システムの減衰付加性能も満足させる連結部は、天然ゴム系積層ゴム、鉛プラグ入り積層ゴム、オイルダンパーに加え、強風時に連結部の変形を抑止する「ウィンドロック」、巨大地震の際に連結部の過大変形を防止する安全装置「eクッ

ション」で構成される。

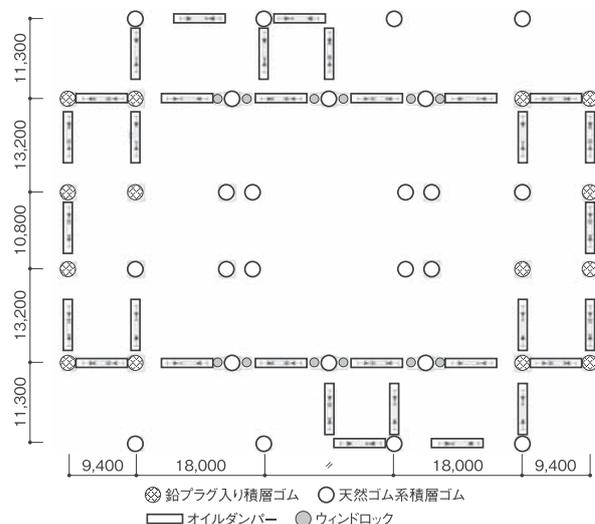
鉛プラグ入り積層ゴムは、初期剛性が高いため、策定したクライテリアに合致するが、鉛降伏後には連結部に残留変形が生じてしまう。そこで、ゴムの復元力と、鉛の残留変形のバランスからゴムと鉛の量を設計し、残りの減衰をオイルダンパーで補う計画とした(図—11)。

7. 本システムを実現する開発と実証実験

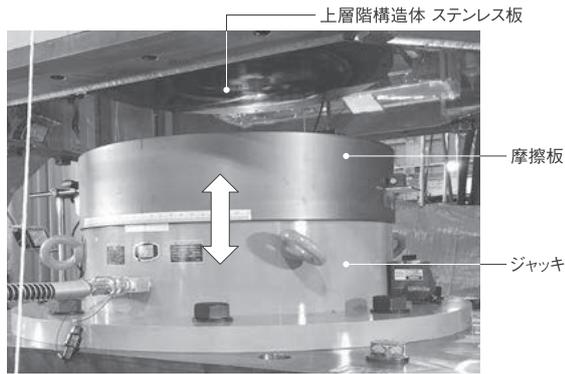
(1) ウィンドロック

本システムを実現するうえでの最大の課題は、強風に対する連結部の変形制御であった。強風時の連結部の変形を抑止するために新たに開発したのがウィンドロックである。ウィンドロックは油圧ジャッキで直径700mmの摩擦板を押し上げ、上層部に設けたステンレス板に押し付けることで生じる摩擦力によって、ブレーキの効果を発揮する(図—12)。

強風時のみ作動させるため、最上階に設置する風速計と、連結部の変形、低層部の地震計によって油圧ジャッキを制御する。



図—11 連結部の構成 S = 1 : 1,200



図一12 ウィンドロック

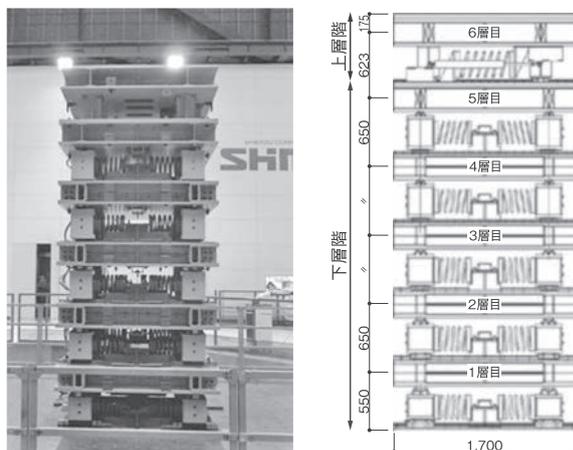
具体的には、4,000 kNの押し付け力を発揮する油圧ジャッキと、摩擦係数0.3の摩擦板で構成される。ウィンドロックを連結部に12台配置することで、再現期間50年までの強風（レベル1）に対し、免震ELVが稼働できる変形（40 mm以下）に連結部をロックする。ロック時に地震が発生した場合は、即座にジャッキの圧を抜くことで、ロックを解除する制御としている。

(2) 振動台実験

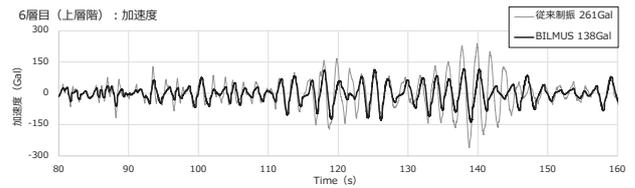
本システムを開発するにあたり、効果を検証するために、6層せん断模型による振動台実験を清水建設技術研究所の大型振動台「E-Beetle」にて行った。各層は鋼材による質量とリニアガイド・コイルばね・オイルダンパーによって構成される。最上層の6層目を上層階とし、下部の5層に対する質量比は約0.22である。

6層目に設置したコイルばねとオイルダンパーで連結部を模擬しており、比較対象とした通常制振では6層目のコイルばねの剛性を変えることにより特性の違いを表している（図一13）。

本システムでは、上層階と下層階の変形に位相差が生じ、揺れを打ち消し合うことで建物全体の応答を低減



図一13 振動台実験の6層せん断模型



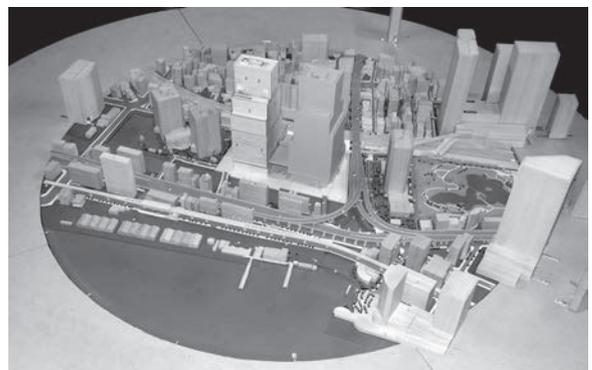
図一14 実験結果

する効果が得られた。南海トラフを想定した模擬地震動KA1に対して、通常制振に比べ上層階と下層階の応答加速度が4割以上低減することを確認した（図一14）。

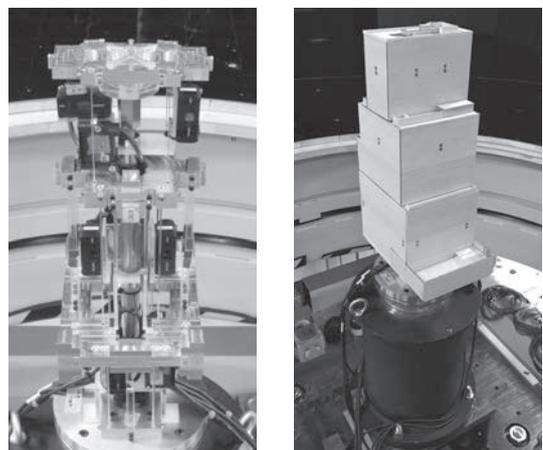
(3) 風洞実験（弾性模型による空力振動実験）

本建物は、高さ170 mに連結部を設けているため、通常の制振建物よりも周期が長く、上層で不連続に変形が大きくなる。空力振動については、免震建物においても理論式や既往の研究がないため、弾性模型による風洞実験を清水建設技術研究所の大型風洞実験棟にて行い安全性を確認した。

連結部上部の変形が不連続に大きくなる振動モードを有するため、線形の振動モードを対象とするロッキング振動模型では振動モードの再現が困難であるため、3質点系の弾性模型を用いて風洞実験を行った（図



図一15 風洞実験の様子



図一16 3質点系の弾性模型（左：内部，右：外装取付後）

— 15)。

弾性模型は、質点系の中心に剛なダイアフラムを設置し、ダイアフラム間を剛性に関する相似則を満足する板ばねで接続することにより、全体の剛性を相似する。ダイアフラムに付加質量を設置することにより質量を相似し、ダイアフラムに付加された木製の外形材により形状を再現する。減衰は支柱頂部のシリコンオイル、各層をつなぐ粘弾性シートを用いて調整した(図— 16)。

風洞実験から、設計風速 100 m/秒 (レベル 3: 82 m/秒) を超えるあたりからやや応答が増大する傾向がみられたが、実験を行った設計風速 120 m/秒までは空力不安定振動時に見られる応答の急激な増加は確認されなかった。

8. おわりに

BILMUS は、地震国日本の超高層複合建物に新たな可能性を開く。東京湾岸に従来の超高層の概念を覆す本プロジェクト (S 棟) の空間が現れたとき、建物と街はつながり一人一人が居心地よく過ごせる新たな暮らしが実現する。

未来の社会に向けて、地域のレジリエンスを実現し、サステナブルな都市開発の実践に BILMUS が大きく貢献している。

JICMA

[筆者紹介]

今井 克彦 (いまい かつひこ)

清水建設㈱

設計本部 構造設計部 2 部

