

神谷町トラストタワー



青木 貴
清水建設



今井 克彦
同



久保山 寛之
同



田中 鉄也
同

1 はじめに

本建物は、高効率・大容量の制振フレームにより一般的な超高層建築物に対し1ランク上の耐震性を確保するとともに、当社開発の制振装置であるシミズ・スイングマスダンパー（SMD）を組み合せ、さらなる耐震性・居住性向上を実現した建物である。

2 建築計画概要

建 築 主：森トラスト株式会社

建 設 地：東京都港区虎ノ門四丁目24-6他

用 途：事務所、ホテル、共同住宅、店舗等

基本設計：株式会社安井建築設計事務所

実施設計：清水建設株式会社一級建築士事務所

施 工：清水建設株式会社

敷地面積：16,210m²

延床面積：195,191m²

階 数：地上38階 地下3階 塔屋2階

最高高さ：約180m

構造形式：制振構造（鉄骨造、柱CFT造）

本建物は、港区虎ノ門エリアに開発する「東京ワールドゲート」街区の核となる超高層複合用途施設である。「世界と東京をつなげるゲート」としての役割を担うべく、外国人の集積に対応した都市機能の導入や防災対応力の強化をはかり、国際競争力のある施設の実現を目指した。

建物構成を図2に示す。オフィス部は1フロア約1,160坪のメガプレートとし、海外企業を含む様々なテナントのニーズに対応可能なフレキシビリティを確保した。ホテル・サービスアパートメント、住宅は切替層を介しオフィス部からセットバックして構築し、外国人等の短期・中期滞在の受け皿としての機能を整備している。セットバックのための切替層は設備配管スペース及び制振装置（SMD）設置スペースとして活用している。また、国家戦略特区の認定を受け、生活支援施設の設置や緑地・広場・歩行者通路の整備等、都市機能整備・都市環境の向上を意図した様々な対応を行っている。



図1 建物外観パース

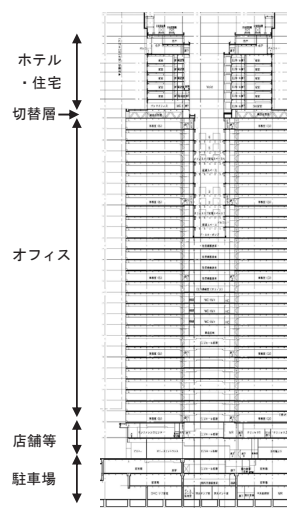


図2 建物構成

3 構造計画

3.1 設計クライテリア

耐震性能目標を表1に、風揺れに対する居住性能目標を表2に示す。基本設計の方針に基づき、一般的な超高層建築物に対し1ランク上の性能設定として、各地震動レベルにおける層間変形角の目標値を通常の1.5倍に設定するとともに、極めて稀に発生する地震動（レベル2）においても部材に塑性化を生じさせず、構造体を無被害に留める事とした。設計入力地震動を表3に示す。観測波、告示に基づき作成した模擬地震動3波に加え、長周期地震動を含むサイト波6波を用いた。また表3に示したほか、レベル2を超える地震動に対する余裕度検証も行っている。

風荷重については、暴風時には地震時と同様の性能設定を行っているほか、風揺れに対して表2に示す「居住性能評価指針（日本建築学会）」におけるランクⅡを目標とした。

表1 耐震性能目標

地震動レベル	レベル1 稀に発生する地震動	レベル2 極めて稀に発生する地震動
構造体性能	無被害 (補修不要)	無被害 (補修不要)
部材	弾性 (短期許容応力度以下)	弾性 (塑性化を生じさせない)
層間変形角	1/300 以下	1/150 以下

表2 風揺れに対する居住性能目標

性能目標	再現期間	1年
ランクⅡ*	ホテル・住宅	H-30 以下
	事務所	H-50 以下

*日本建築学会：居住性能評価指針（2007年版）による

表3 設計入力地震動

地震動レベル	レベル1 稀に発生する地震動	レベル2 極めて稀に発生する地震動
①観測波	入力強さを25cm/secに基準化 El Centro、Taft、Hachinohe	入力強さを50cm/secに基準化
②告示波	平12建告第1461号第4号（イ）に定める加速度応答スペクトルに適合した地震動3波 海洋型：HACHINOHE位相、直下型：JMA神戸位相ランダム位相	平12建告第1461号第4号（イ）に定める加速度応答スペクトルを5倍とした地震動3波
③サイト波	—	・1923年大正関東地震 ・都心南部直下型地震（2013）
④長周期波	—	・学会波（東海+東南海位相） ・学会波（東北地方太平洋沖地震観測位相） ・大崎総研波（3連動平均） ・平成27年12月国交省ハブコ波

3.2 構造架構概要

建物規模、要求性能を鑑み、制振構造を採用した。1ランク上の耐震性能を確保するため、コア部ELVシャフト空間に、高効率・大容量の制振ダンパーを集約配置したフレームを構築した。これにより、オ

フィス専有部や外周部にダンパーの無い架構を実現している。

高層階に至るセットバック部には切替層を設けメガトラスを配置し、上層の軸力を確実に伝達できるよう配慮した。切替層部分にはSMDを設置し、風居住性を確保するとともに、地震時の応答低減効果・後揺れ低減効果の更なる向上をはかっている。

事務所階は最大柱スパン21.6mの無柱空間を実現するため、鉄骨造ラーメン架構とした。柱はCFT造とし、高軸力・長柱となる低層には、Fc120、590N/mm²級鋼材からなる超高強度CFT柱を採用した。高層階外周柱はアウトコラム形式とする事で柱形が出ない室内空間を構成しており、コア部に配置した耐震ブレースが耐震要素及び高層階のムチ振り現象抑制の役割を担っている。また、各階に「シミズの鉄骨梁横座屈補剛工法」を活用して大梁横補剛材を削減し、設備配管ルート自由度確保や間仕切り壁との取合い納まり改善をはかっている。

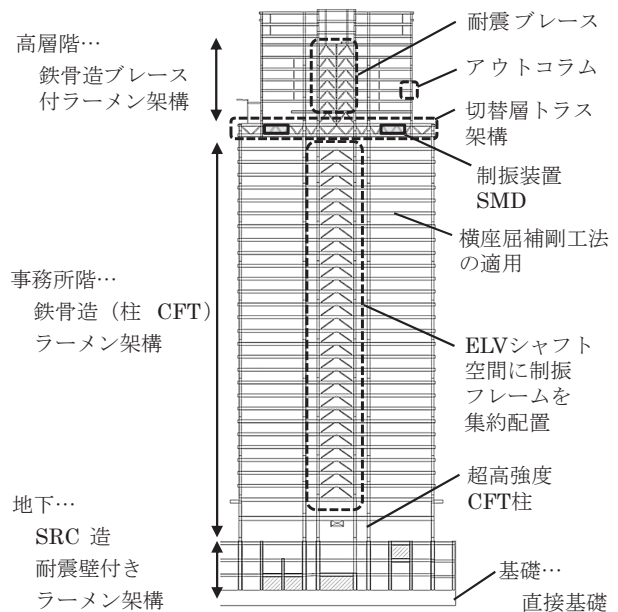


図3 構造架構概要

3.3 高効率・大容量の制振フレーム

1ランク上の耐震性能を実現するために、高効率・大容量の制振フレームにより、制振効果を最大限まで高めた構造架構を構築した。制振フレームの構成を図4に示す。制振装置には、速度依存型のオイルダンパーと変位依存型の摩擦ダンパーの2種を採用した。これら特性の異なるダンパーを組合せ、更にSMDを付加する事で、様々な特性の地震動に対して応答低減効果を発揮させる狙いとした。また、地震応答後に残留変形が生じないダンパーで構成し、レベル2地震動でも塑性化させないという性能目標を架構全体で実現している。

シアリンク型で組み込むオイルダンパーは、2層間設置とし、地震時の応答量を増幅させ制振効率を高めた。さらに長スパンの梁間方向では、取付部1か所に対しダンパーを2段に配置し、大容量化をはかった。

摩擦ダンパーは剛塑性型の履歴特性を有する制振効率の高いデバイスである。最大減衰力2000kNの大容量タイプを用い、またブレース型と壁型を適材適所で使い分け、省スペースでも高い制振効果を発揮できるようにした。

上述の通り「多段・多層・多様」により高効率・大容量化したダンパーを建物へ組み込むにあたり、本建物の特徴である大きなコア部ELVシャフト空間を活用した。建築・設備的な干渉物が少ないシャフト空間に制振装置を集約配置し、高い制振効果を有しながらもオフィス専有部や外周部に制振装置の無い計画を可能にした。また吹抜け空間でスラブが取付かないことから、オイルダンパーの二層間設置が可能であり、また二段配置時の有効階高減少による制振効果の減少を最小限に抑えることができています。ELVシャフト空間への組み込みにあたっては、ダンパーとELV機械や区画間仕切り壁との納まりを慎重に検証するとともに、シャフト支持フレーム部材をダンパーの面外変形抑制に兼用する等、スペースや架構の合理化をはかった。

以上の計画により、1ランク上の耐震性能を、建築・設備計画と調和し省スペースにて実現した。ELVシャフト空間は建物が高層になるほど広大になる傾向があるため、本計画の制振フレームは今後の超高層建築物に導入できる汎用性を有していると考えている。

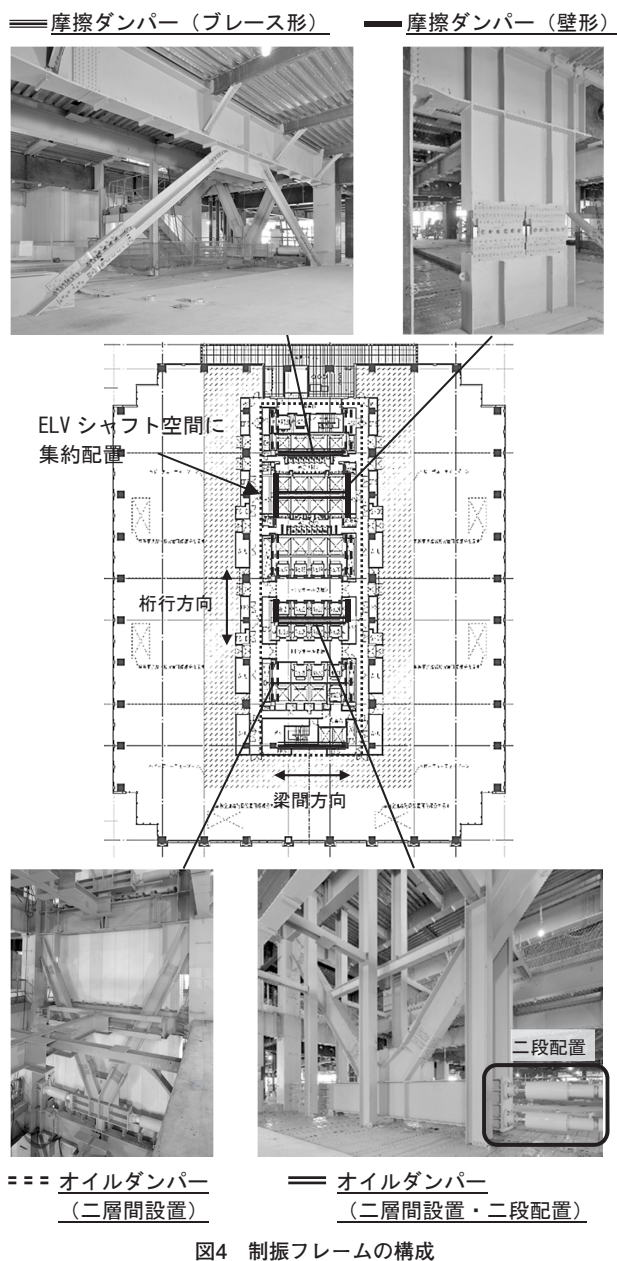


図4 制振フレームの構成

3.4 シミズ・スイングマスダンパー SMD

1ユニットの外観を図5に、その構成要素を図6に示す。

1ユニットは、鋼製の錘を2段に重ねた積層ゴム4脚にて支持している。2段の積層ゴムは、支承材の他に復元材として機能させるため、積層ゴムの曲げ変形を拘束できる耐力および剛性を有する中間梁を介して連結されている。各方向には建物に入力された揺れのエネルギーを吸収するオイルダンパーを配置している。また、周期調整のための回転慣性質量装置であるダイナミックスクリュー（DS）を搭載している事が最大の特徴となっている。

SMDは、建物周期に同調させた質量を建物応答と反対方向に動かして揺れを制御するTMDの一種であるが、DSの設置方向に慣性質量を付加し、実質量を増幅させずに長周期化させる事で、1ユニットでの2方向同調が可能である。この特徴により同調に必要な実質量、即ち錘が小さくなり、装置をコンパクトにできる利点を活かし、本建物ではトラスで囲まれた切替層内へ設置した。

設置状況を図7に、要素諸元を表4に示す。付加制振として設置しているため、錘重量380tのユニット4基で、地上部総重量に対して約1%の重量である。なお、レベル2地震動に対して±1.0mのストロークを確保しているが、これを超える変形に対しては、建物主要構造部と錘部の間に設置した防舷材で衝突

表4 SMD構成要素諸元

錘	鋼製 (380t)
積層ゴム	せん断弾性率 G0.29 外形 600φ 限界変形 648mm
DS	回転慣性質量 200t ストローク±600mm
オイルダンパー (リニア型)	減衰係数 X:250 Y:300kN・sec/m 最大速度 125cm/sec ストローク±600mm



図8 フェールセーフ機構

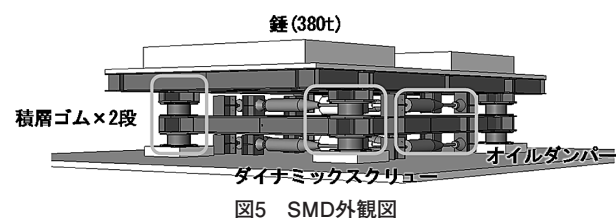


図5 SMD外観図

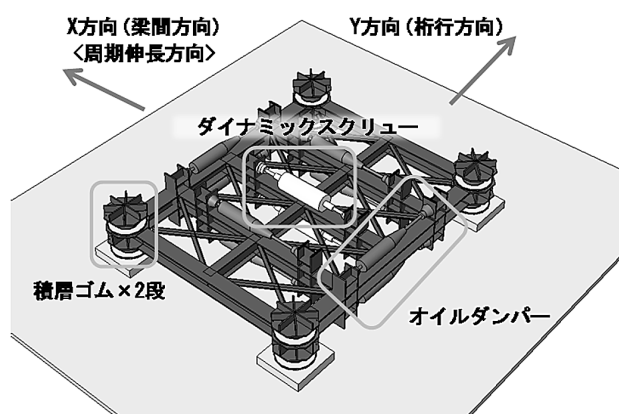


図6 SMD構成要素図



図7 SMD設置状況



図9 実大実験試験体

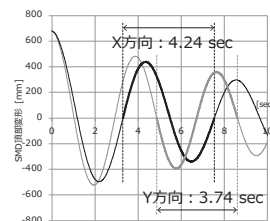


図10 自由振動波形

エネルギーを吸収するフェールセーフ機構によって、過大変形を抑制する。

実装にあたり、図9に示す実大試験体を用いて、設置時の施工性や点検性を検証すると共に、2方向の周期を自由振動実験にて確認している。図10に得られた自由振動波形を示す。同図中、X方向がDSを設置して長周期化させた方向である。実験による周期は両方向とも理論値通りとなり、2方向で異なる周期コントロールが可能であることを確認した。これにより、SMDが2方向同調を省スペースで実現でき、方向によって周期が異なる等の様々な建物に対して有用なデバイスである事が確かめられた。

4 耐震・居住性能の確認

4.1 耐震性能の確認

3.1にて示した設計用入力地震動を用いた地震応答解析により、耐震性能及び制振システムの応答低減効果の確認を行った。応答低減効果の確認においては、SMDを考慮した場合としない場合の双方を検証した。

解析モデルを図11に示す。構造フレームは基礎位置を固定とした曲げ剪断モデルとし、オイルダンパーは附帯フレームの剛性を考慮したMaxwell型で、摩擦ダンパーは取付部剛性を初期剛性、すべり耐力を折れ点荷重としたバイリニア形でモデル化した。切替層に設置するSMDについては、4ユニットを個別にモデル化しており、積層ゴムは線形バネ、オイルダンパーはMaxwell型でモデル化し、DSは慣性質

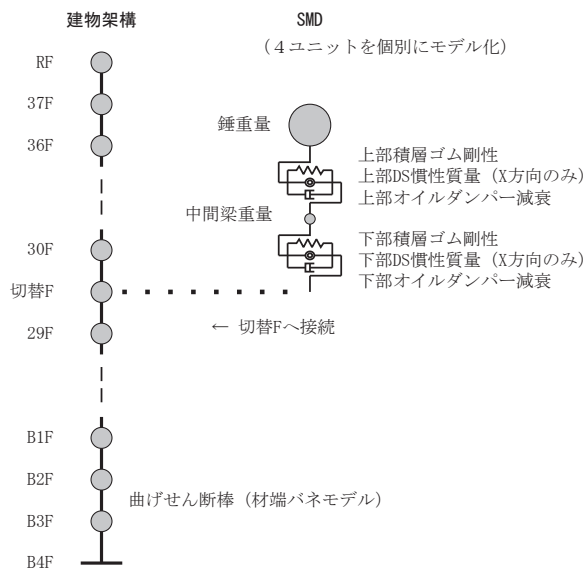


図11 解析モデル概要

量要素としてオイルダンパーと並列に接続した。各ユニットは2層のモデルとし、中間梁部分、錘部分それぞれに質量を与えている。また、SMDを設置した場合の検討においては、その構成要素のばらつきについて、カタログ値での状態（Normal）を標準に、積層ゴムの経年変化も含めた高剛性および高減衰となる低温側（Hard）およびその反対の高温側（Soft）の検討を実施している。

なお、質点系モデルとは別に、立体弾塑性骨組モデルを用いて、ねじれによる挙動や部材レベルの検証を行っている。

レベル2の地震動における層間変形角の最大値は、非制振の場合1/100を上回るのに対し、制振装置考慮の場合は1/150を下回る。制振装置によって最大応答値は0.6倍以下に低減され、1ランク上の耐震性能目標を各層・各地震波で満足していることが確認できている。また、立体弾塑性骨組モデルを用いた検証により、レベル2地震動にて各部材が塑性化せず、部材レベルでの性能目標も満足している事を併せて確認した。

長周期地震動対策としてSMDを設置した事による応答低減効果を確認する。長周期波（東北位相）における最大層間変形角の分布をSMDの有無で比較して図12に示す。事務所階を中心に各層で応答が低減されており、その効果が確認できる。最大変形量は、装置ストロークに対して80%程度であり、積層ゴムのひずみ量は265%（ $\leq 400\%$ ）となる。また、オイルダンパーの最大速度、DSの負担力についても、限界値に対して余裕がある事を確認している。

各ダンパーのエネルギー吸収量について、地震動

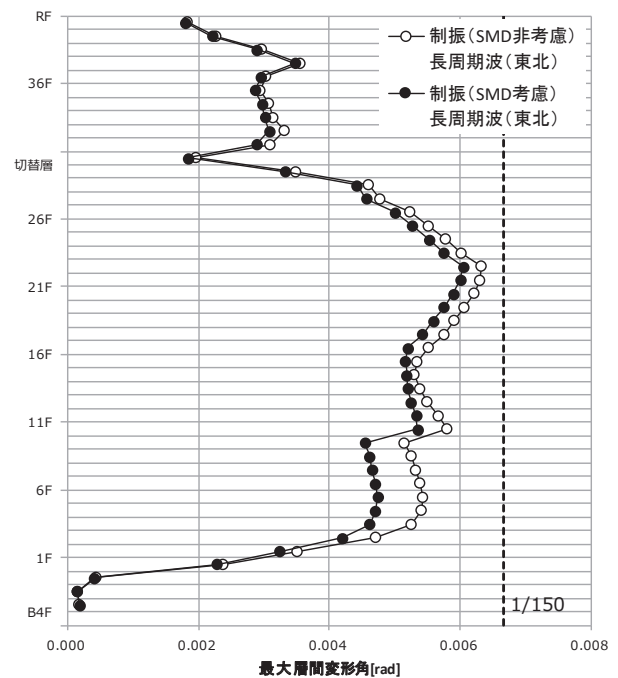


図12 地震時最大応答層間変形角_SMD有無

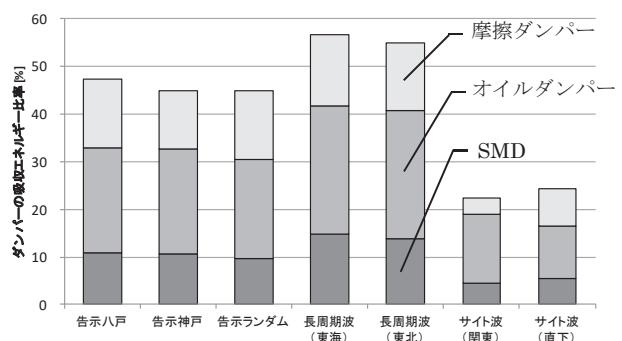


図13 各ダンパーのエネルギー吸収割合

ごとの比率を図13にそれぞれ示す。オイルダンパーが11～27%、摩擦ダンパーが3～15%、SMDが5～15%となっており、特性の異なる各ダンパーがそれぞれ効果を発揮していることが分かる。またSMDについては、特に長周期波の2波で応答低減への寄与が大きい。なおサイト波2波において吸収比率が小さいのは、建物応答そのものが他の地震波の場合より小さく、架構の内部粘性減衰によるエネルギー吸収が支配的となるためである。

長周期地震動に対する応答低減効果の確認として、長周期波（東北位相）での建物頂部水平変位の時刻歴波形を図14に示す。非制振の場合と比較して、最大応答値だけでなく、地震動継続時間中を通して応答値を低減している事がわかる。

また図15に示すように、地震動終了後の後揺れも早期に収束しており、後揺れによる変形が震度0相当となるのに要する時間は、非制振に対して半分以下に低減されている。

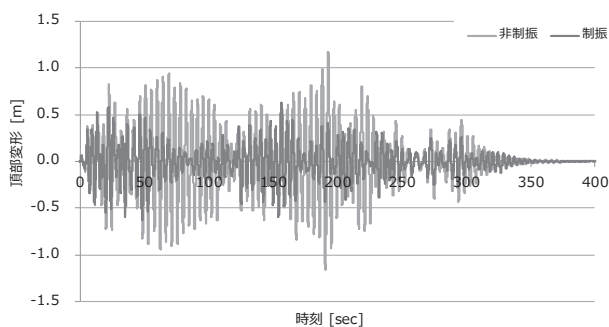


図14 長周期波（東北位相）での頂部時刻歴変形

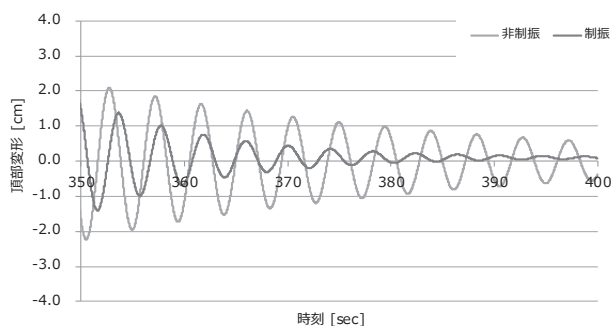


図15 地震動終了後の頂部時刻歴変形

以上より、本建物にて計画した制振システムは、最大応答値に対する性能目標を満足する事に加え、後揺れ等の継続的な揺れの低減といったさらなる性能向上が実現可能である事を確認した。

4.2 風居住性の確認

地震動に対してだけでなく、風揺れに対する居住性確保に対してもSMDの効果を確認する。風洞実験結果を用いた再現期間1年風力に対する最上階の応答結果を居住性能曲線とともに図16に示す。確認においては、装置の各構成要素のばらつきを考慮した。また一般的に、竣工時の建物周期は設計時の想定より短くなる傾向にある事、風揺れには仕上げ材等の剛性が寄与する事を考慮し、設計周期に対して20%

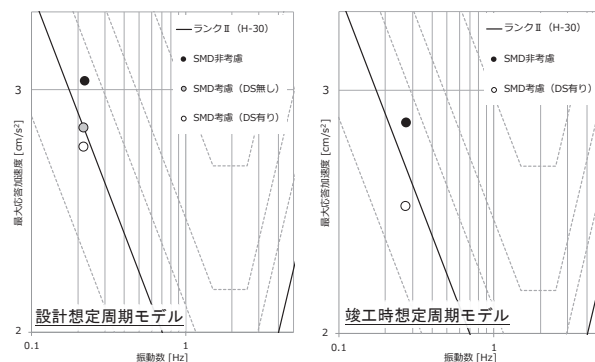


図16 風居住性の検証

短くなる想定のもと質量および剛性を調整したモデルによる検証も行った。各図は、風洞実験で最大風力風向である風向0度（建物短辺方向に向かう風向）の結果を示している。

どちらのモデルにおいても、SMDを設置しない場合には要求性能（ランクⅡ）を満足しないが、設置により構成要素のばらつきを含めて要求性能を満足する結果が得られている。また、参考としてDSを考慮しない場合の結果を併せて示すが、DSの周期伸長による応答低減効果が確認できる。なお、現在当建物は施工中であるが、上棟後より振動計測を継続的に実施し、建物の実周期がSMDの性能検証において想定している範囲内であることを確認している。

5 おわりに

高効率・大容量の制振フレームとSMDの組合せにより、1ランク上の耐震性能を確保し、さらに風揺れや地震後の後揺れにも対応する制振システムを実現する事ができました。本建物は2016年10月に着工し、2020年3月に竣工を迎えます。設計段階から今日に至るまで、非常に長い期間にわたり、建築主様をはじめ、関係者の皆様方には多大なご協力を頂きました。ここに御礼申し上げます。