

超高層建築物の革新的免制振構造 自ら揺れを打ち消す構造システム「BILMUS」

(一財) 建築コスト管理システム研究所・新技術調査検討会

1 はじめに

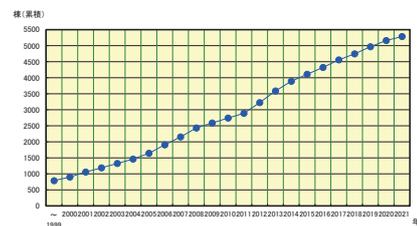
地震国の我が国は、構造規定の強化を図った昭和56（1981）年の新耐震基準法の施行以来、平成7（1995）年1月の兵庫県南部地震の被災を経て、同年12月に「建築物の耐震改修の促進に関する法律（以下、「促進法」という）」を制定し、更に平成18（2006）年1月促進法を改正して計画的な耐震化の推進がされてきた。しかし、平成23（2011）年3月の東日本大震災で、長周期地震動による長時間の超高層ビルの揺れや体育館・音楽ホール等の天井の大規模落下が生じ、非構造部材の耐震性の問題がクローズアップされた。天井の耐震化技術については平成25（2013）年1月の本誌 No. 80の本レポートで取り上げている。

平成25（2013）年11月に促進法が改正され、耐震化目標や具体的な施策の作成と具体的措置が実施される一方、耐震改修認定基準の緩和や建ぺい率・容積率の特例措置、耐震対策の促進のため緊急的・重点的な補助制度の創設が図られ、現在に至っている。なお、耐震改修のための技術要素の事例については、平成28（2016）年4月の本誌 No. 93の本レポートで報告している。

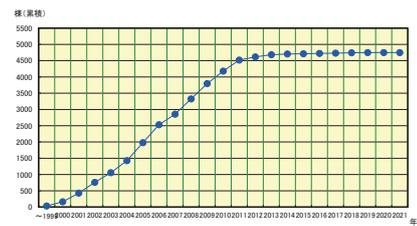
設立30周年を迎えた（一社）日本免震構造協会のデータ¹⁾によると、2021年末時点で協会に登録された免震・制振建物は全国で11,650棟を数えている（図1）。今回、新たな構造形式で建設中の免震制振建物を取り上げ、これからの進展に注目していきたい。

本報では、まず従来の制振構造、免震構造の特徴や事例を紹介し、その上で新たな構造形式の一つとして清水建設が開発した構造システム

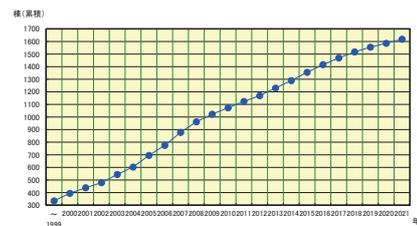
「BILMUS」を取り上げ、その革新的な構造システムの特徴について詳報する（図2）。



(a) 免震建物の計画棟数



(b) 戸建て住宅免震建物の計画棟数



(c) 制振建物の計画棟数

図1 免震及び制振建物の計画推移

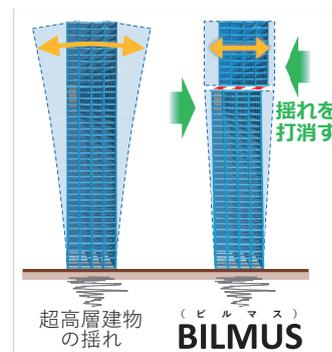


図2 超高層建物と清水建設が開発した新構造システム「BILMUS」の揺れ方のイメージ

2 制振・免震建物の構造

建物の構造形式は、耐震構造、制振構造、免震構造の三つに大別される（図3）。これらの構造形式の違いは、地震エネルギーの処理の仕方にある（図4）。図4に描かれた四角で囲まれた面積は各構造形式が地震時に処理するエネルギー（変形×力）を示している。耐震構造は、地震力に対して構造体（柱・梁・壁・ブレース等）で耐える構造である。作用地震力のすべてを力で抵抗するのが理想的な耐震であるが、通常の耐震構造では建物自体の変形、即ち柱、梁、壁などの損傷（ひび割れや降伏）を許容し、その際のエネルギー吸収で地震の入力エネルギーを処理している。

制振構造は、地震エネルギーの吸収を建物の構造体自身ではなく、「ダンパー」という特殊な装置やシステムで行う構造である。これにより、建物の損傷を抑制しつつ、建物全体の揺れを制御する。更に、鋼材などの履歴系ダンパーを主とする制振構造（制震A）と粘性系ダンパーを主とする制振構造（制震B）とがあり、前者は耐震構造に近い応答性状を示し、後者は免震構造的な性状を示す。近年では、これらを組み合わせた制振構造も増えている。また、制振構造におけるダンパーの設置位置は、各階に分散して配置することが一般的だが、TMD（Tuned Mass Damper）のように建物屋上などに集中配置する装置もある。

免震構造は、建物の特定の層を他の層よりも極端に柔に設計し、意図的に大きく変形させることで建物全体を長周期化し、建物に入力する地震エネルギーの低減を図るとともに、そのエネルギーの大部分をその免震層で吸収する構造である。免

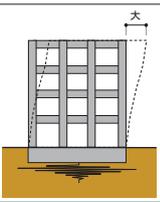
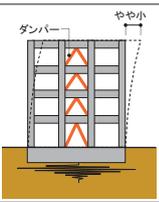
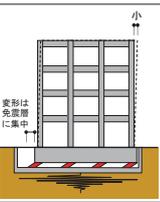
耐震構造	制振構造	免震構造
		
柱・梁などの構造骨組みが強さと粘りで地震に対応	建物に入力された地震エネルギーをダンパーが吸収し、揺れを低減	地盤から建物に作用する地震力を免震装置でやわらかく受け止め軽減

図3 建物の構造形式

震層を設ける位置で、建物と地盤との間に設ける基礎免震と建物の中間層に設ける中間層免震とに分類される。

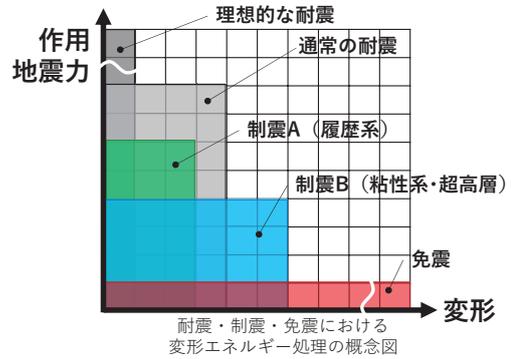


図4 地震エネルギー処理の概念図²⁾

出典：参考文献2)を基に作成

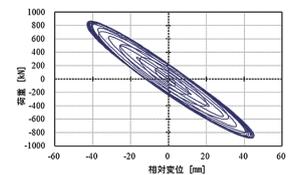
制振建物の事例を図5に示す。a)は2011年東北地方太平洋沖地震の後に制振改修した超高層建物の事例である³⁾。b)のとおりオイルダンパーとc)の荷重変形関係を持つ慣性質量ダンパーとを水平に配置してV字ブレースで力を伝達するシアリンク型で組み合わせた制振ユニットを低層階に集中配置している。制振ユニットは桁行方向、スパン方向ともに14基ずつの28基を配置し、地震エネルギーの大半をこれらの装置で吸収し変形を抑えている。



a) シーバンスS館制振改修 (1991年竣工、2012年改修)



b) シアリンク型制振ユニット



c) 慣性質量ダンパーの荷重変形関係

図5 制振建物の事例

次に、免震建物の事例を図6に示す。a)は1階柱頭に免震層を設けた中間層免震の事例である⁴⁾。免震層を高減衰ゴム系積層ゴムのみで構成し、開放感のあるピロティ空間を創出している。また、b)のとおり免震の可動範囲が地上となる

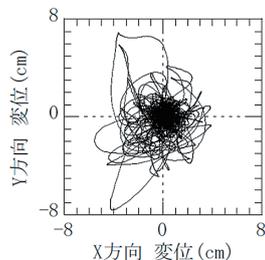
ため、地下を大きく掘削せずすみ、根切りコストを削減できる。また、敷地境界いっぱいまで免震可動範囲を広げられるため狭隘な敷地でも建築面積を最大化できる。なお、c) は2011年東北地方太平洋沖地震の際、当該建物で計測された免震層変形のオービット（軌跡）である。



a) 清水建設技術研究所 本館 (2003年竣工)



b) 1階柱頭中間層免震



c) 免震層変形のオービット

図6 免震建物の事例

3 建物自体を制振装置に

3.1 開発の背景

各地で頻発する巨大地震に対して、建築基準法で規定された最低限の耐震基準では、人命の保護は可能であっても、建物の機能維持や事業の継続、生活の持続、更には経済活動に必要な資産の保全が難しいことは明らかである。このような状況を背景に、特に公共性が高い超高層建物などでは、従来以上の耐震性が求められている。それに加えて、社会の変化とともに建物が複雑化しており、より高い耐震性能の実現と自由な計画とを両立できる革新的な技術の開発が望まれていた。そうした中で清水建設が新たに開発したのが、建物自らで揺れを打ち消すよう振動する建物自体を制振装置化した、革新的構造システムの「BILMUS」である。

3.2 BILMUSとは

BILMUS⁵⁾ は、建物（ビルディング）自身の

一部をマスダンパーとして利用することで、地震や風に対し建物自らが揺れを打ち消し合うよう振動（同調）し、建物全体の揺れを低減する制振システムである。その最大の特徴は、従来の制振建物を凌駕する極めて優れた減衰効果である。従来の各層にダンパーを設ける制振構造を用いたS造の超高層建物と比較し、大幅な応答低減（加速度40～50%、せん断力5～30%、転倒モーメント10～45%）が期待でき、その結果、鉄骨や制振装置などの資機材も削減可能である。更に、基礎免震を採用した超高層免震建物と比較しても、建物頂部の加速度を2分の1程度に低減できる。

3.3 制振の原理

BILMUSはTMDの原理を応用した制振システムである。同調質量ダンパーであるTMDは錘（マス）を重くするほど制振効果も高くなることが知られている。しかしながら、現実的に建物に載せることのできる錘の大きさには制約がある。そこで、大きな錘を建物に載せる代わりに、建物の重量の一部を錘として利用してしまおうというのがこの発想の原点である（図7）。

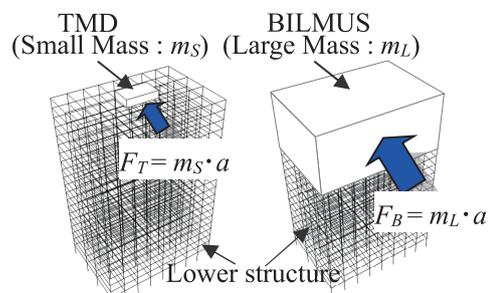
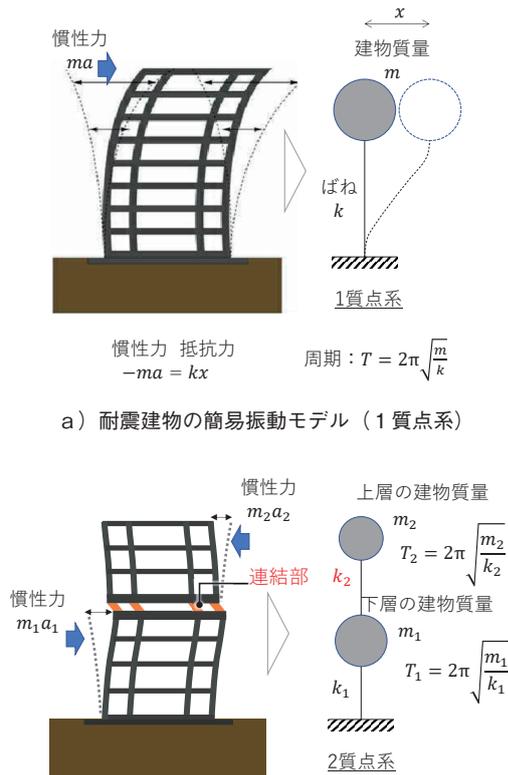


図7 TMDとBILMUSの概念図

建物上層階の重量を錘として利用するためには、通常同じ方向に振動しようとする建物（図8 a)) を互いに打ち消す方向に振動させる必要がある。本システムでは積層ゴムやオイルダンパーなどで構成する連結部を設け上層階と下層階とに分離し、周期調整を行って互いを同調させている（図8 b))。

連結部の設計は、TMDの制御則と同じ定点理論をベースにしている。定点理論はTMDを設置した際に現れる共振曲線上の定点の高さを揃えるための、剛性及び減衰の設計手法である。減衰性

能を最大化する状態を最適同調と呼び、このとき、上層階と下層階の位相は $\pi/2$ ずれた状態となつて、揺れを打ち消し合う振動性状となる(図9)。なお、これまでの中間層免震とBILMUSの決定的な違いは応答低減の対象であり、中間層免震は上部建物の揺れのみを、BILMUSは連結部の上部と下部の両方を応答低減の対象としている点である。



チューンドマスダンパーの原理を応用

質量比: $\mu = \frac{m_2}{m_1}$ 最適振動数比: $\lambda = \frac{1}{\mu+1}$

$T_1 = \lambda T_2$ となるよう**連結部のばね k_2** を設定することで、上層と下層とが揺れを打ち消し合う

b) BILMUSの簡易振動モデル(2質点系)

図8 振動モデル

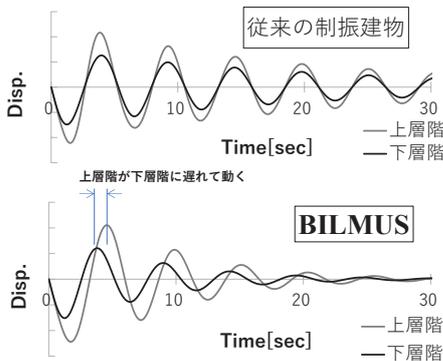


図9 揺れの納まり方のイメージ

3.4 適用の範囲

BILMUSはS造、RC造など建物の構造・用途を問わず適用できる。一方、適用する建物高さについては、高さが100m以上、250m以下が応答低減とコスト低減を両立できるターゲット範囲と考えられる。これは建物高さが250mを超える程度になると風荷重による連結部の変形対策のための装置コストが増大すること、逆に建物高さが100m未満や規模の小さな建物では、わざわざ上層階に連結部を設けるよりも、基礎免震や低層階での中間層免震を採用した方が合理的なケースが多いことによる。

連結部の位置は、上層と下層の建物の質量比 $\mu (=m_2/m_1)$ の設定によって決まる。質量比は大きいほど制振効果が高まるが概ね建物全体重量の半分($\mu \leq 0.5$)が上限である。つまり、建物高さの中間位置が連結層の下限となる。これよりも下層に設けると下層部が短周期化し100m未満の建物と同様に中間層免震とした方が合理的な範囲となる。また、質量比は小さすぎても同調効果が得られない。故に、連結部の位置は質量比 $0.1 \leq \mu \leq 0.5$ を目安に設ける。

3.5 従来構造形式に対するメリット

a) 経済性と環境性

BILMUSは連結部でのエネルギー吸収効率が高いため、各層に設置するダンパー台数を従来比で4分の1程度に削減できる。更に、鉄骨も地震力の低減により5~15%程度削減できる。このため、連結部の資材の増分はダンパー台数と鉄骨などの削減で相殺され、更なる削減にもなる。故に、CO₂削減にも繋がる脱炭素技術としても有用なシステムである。

b) 耐震性の向上

BILMUSを採用する建物は、耐震性能として、JSCA性能メニューの上級ランク(層間変形角Lv1:1/200以下、Lv2:1/100以下)から、更にワンランク上の耐震性能(層間変形角Lv1:1/300以下、Lv2:1/150以下)を実現できる。これにより、Lv2外力に対しても部材の塑性化を許容しない弾性設計が可能となり、大地震後も建物を継続使用できる。

更に、従来の超高層建物では高次の振動モードに起因して上層階の応答加速度が増幅してしまう課題があったが、BILMUSは連結部の効果によりLv2地震に対しても上層階の応答加速度を家具の転倒目安とされる 200cm/s^2 以下に抑えることが可能で、居住者の安全性も確保する。

c) 計画の自由度

BILMUSは、地震力の低減により梁や柱の本数も減らすことができ、意匠設計の自由度を高められる。例えば、外周の柱スパンを通常オフィスの2倍程度に広げることが可能で、居室からの眺望を最大限に享受できるワイドスパンも実現できる。

また、近年の大規模再開発は複合用途で上層階には高級ホテルや住宅が計画されることも多い。BILMUSは、下層階はオフィスに適したS造のまま、上層階は住宅やホテルに適したRC造というように、連結部を介することで容易に構造切替えが可能で、住宅やホテルの商品価値向上にも寄与する。なお、上層階のRC造化はトップヘビーとなり通常は耐震性の面で不利になるが、BILMUSではむしろマスダンパー効果が増すため有利に働く。

3.6 実現する上での課題と解決策⁶⁾

a) 耐風ロック装置

BILMUS (図10) 実現の最大の課題は、地震と強風とでの相反する連結部の変形制御である。連結部は積層ゴム (図11) やオイルダンパー (図12) で構成され、地震時には連結部を大きく変形させてエネルギー吸収する。これに追従できるようなタテ動線には大変形に昇降路のレールが追従できる特殊な免震建物用エレベーターが採用されるが、大地震だけでなく強風に対しても連結部の変形が40mmを超えると安全のため免震建物用エレベーターは運転停止してしまう。頻繁な停止を避けるため強風時は連結部を変形させたくない。そこで、地震と強風とで相反する動きが求められるが、この仕組みとして開発されたのが耐風ロック装置「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500mmの摩擦板を上層部に設けたステンレス板に押し付け、摩擦力を発揮する (図13)。具体的には、1台当たり1,200kNの水平抵抗力がある。最上階の

風速計、連結部の変位計、低層部の地震計の三つのセンサ情報を用い強風時のみ油圧ジャッキを稼動する。ウィンドロックを連結部に複数配置しLv1までの強風に対しては免震ELVが運行できる変位 (40mm) 以下にロックする。ロック中に地震が発生した場合は、即座に自動でジャッキの圧を抜きロック解除する。

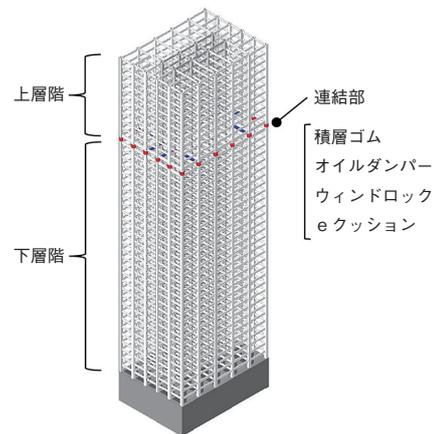


図10 BILMUSの構成要素



図11 積層ゴム支承の例

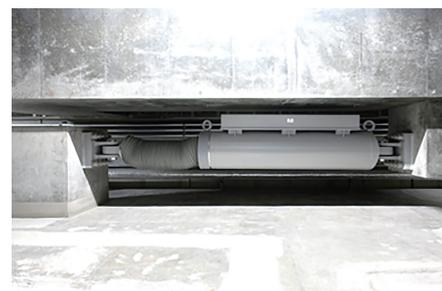


図12 オイルダンパーの例

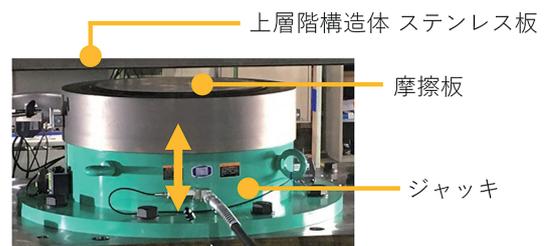


図13 耐風ロック装置 (ウィンドロック)

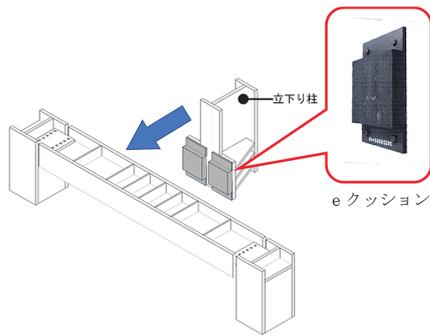


図14 フェールセーフ装置「eクッション」

b) フェールセーフ

想定を上回る地震や暴風が発生した場合の連結部における過大変形を防止するためにフェールセーフ装置「eクッション」が採用されている(図14)。これは、物理的なストッパーとして鉄骨架構にゴムチップからなる緩衝材を取り付けて、衝突の際の衝撃を和らげつつ、変形を抑制する装置である。

c) 模型実験

BILMUSの効果を検証するため、6層せん断模型による振動台実験がなされている。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、最上層の6層目を上層階とし、下部の5層目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いる(図15)。南海トラフ地震を想定した模擬地震動KAI⁷⁾に対する実験の時刻歴応答波形(図16)から分かるように、BILMUS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している。上層階と下層階ともに応答加速度は従来制振に比べ4割以上低減されている(図17)。

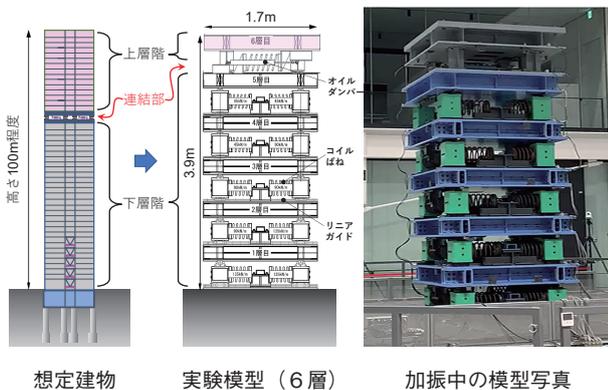


図15 6層振動模型

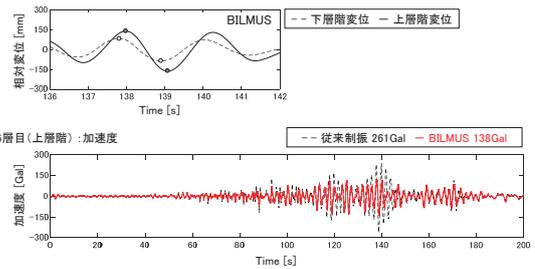


図16 実験の時刻歴応答波形

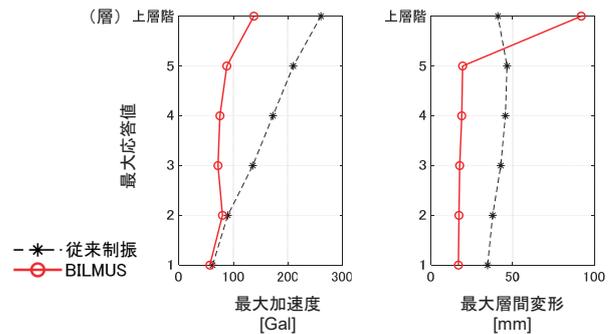


図17 実験の最大応答値

4 まとめ

構造システム「BILMUS」を始めとする新たな制振構造または免震構造の普及が進むことによって、より安全で安心な社会が実現することを期待したい。

本報をまとめるにあたり、牛坂伸也様(清水建設構造計画・開発部)には多大なるご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

(参考文献)

- (一社)日本免震構造協会「免震建築物の計画推移」2023年6月
- 石丸辰治『応答性能に基づく「対震設計」入門』p.10 図1-1, 彰国社, 2004
- 松井和幸、渡辺泰志、岡田睦、鷹羽直樹「「シーパンスS館」制振改修について」『MENSIN』No.78, pp.12-15, (一社)日本免震構造協会, 2012.11
- 半澤徹也ほか「2011年東北地方太平洋沖地震における東京湾沿岸の免震構造物の挙動」清水建設研究報告第88号, 2011.1
- BILMUS(ビルマス)が超高層ビルの構造を革新～絶大な制振効果でレジリエンスを向上させ、経済設計も実現～
https://www.shimz.co.jp/company/about/news-release/2022/2022039.html
- 佐藤宏、今井克彦、牛坂伸也、吉田直人「BILMUS(ビルマス)がもたらす制振革命」『建築技術』2023年3月号, pp.130-135, (株)建築技術
- 国土交通省「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動対策について(技術的助言)」(平成28年6月24日)