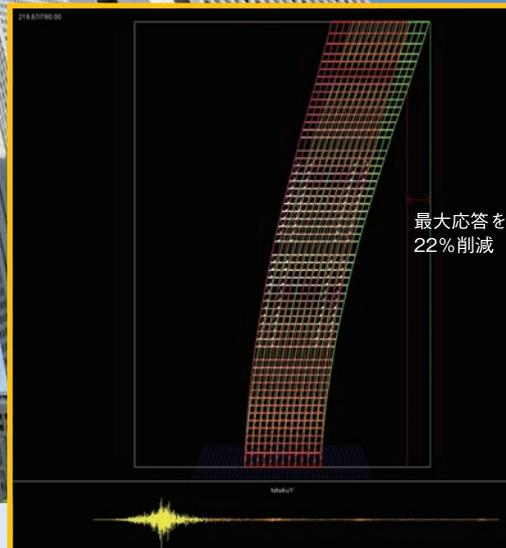


Techno Scope

超
高層ビルの
免震・制振技術

東日本大震災を契機として、長周期地震動の存在が注目されるようになった。長周期地震動は、震源から遠く離れていても減衰せずに伝わり、超高層ビルなどと共振し、地面の揺れがおさまっても長時間、後揺れが続く現象である。南海トラフ地震をはじめ今後の巨大地震に備えて対策が必要となっている。長周期地震動の特徴や、最新の免震・制振技術を紹介する。



新宿センタービルの、東日本大震災における短辺方向の揺れの解析。揺れ幅を50倍にして強調。緑の線がダンパーなし、赤い線がダンパーありの状態を示す。ダンパーを入れたことにより、最大応答が22%低減されている。(資料提供:大成建設(株))

問題視される長周期地震動

2011年3月11日に発生した東日本大震災は、震源地から遠く離れた関東や大阪などの都市部も襲った。西新宿の超高層ビル群では地面の揺れが止まっても、ゆっくりとした大きな揺れが10分以上続いた。また、震源からの距離が750kmを超える大阪湾岸でも、超高層ビルの上層階で大きな揺れを観測した。この日、震源地から遠く離れた超高層建築物を揺らしたのは、長周期地震動である。

長周期地震動とは、数秒間かけてゆっくり繰り返す長い周期の揺れのこと、ガタガタと小刻みに揺れる短周期地震動とは異なる特性を示す。短い周期の揺れは、エネルギーは大きい、その揺れは持続することなく比較的早く減衰する。長周期地震動は地震時に発生し、減衰せず遠く離れた場所まで到達する。一方、建物自体も固有の周期を持ち、振り子の棒が長ければ長いほど、行って戻ってくるまでの周期が長くなるように、建物自体の高さが高くなればなるほど、その固有周期も長くなる。鉄筋コンクリートの建物の場合、高さ(m)×0.02=固有周期(秒)と概算することができる。長周期地震動は、周期数秒から数十秒の固有周期を持つ高層ビルや石油タンク、長大橋

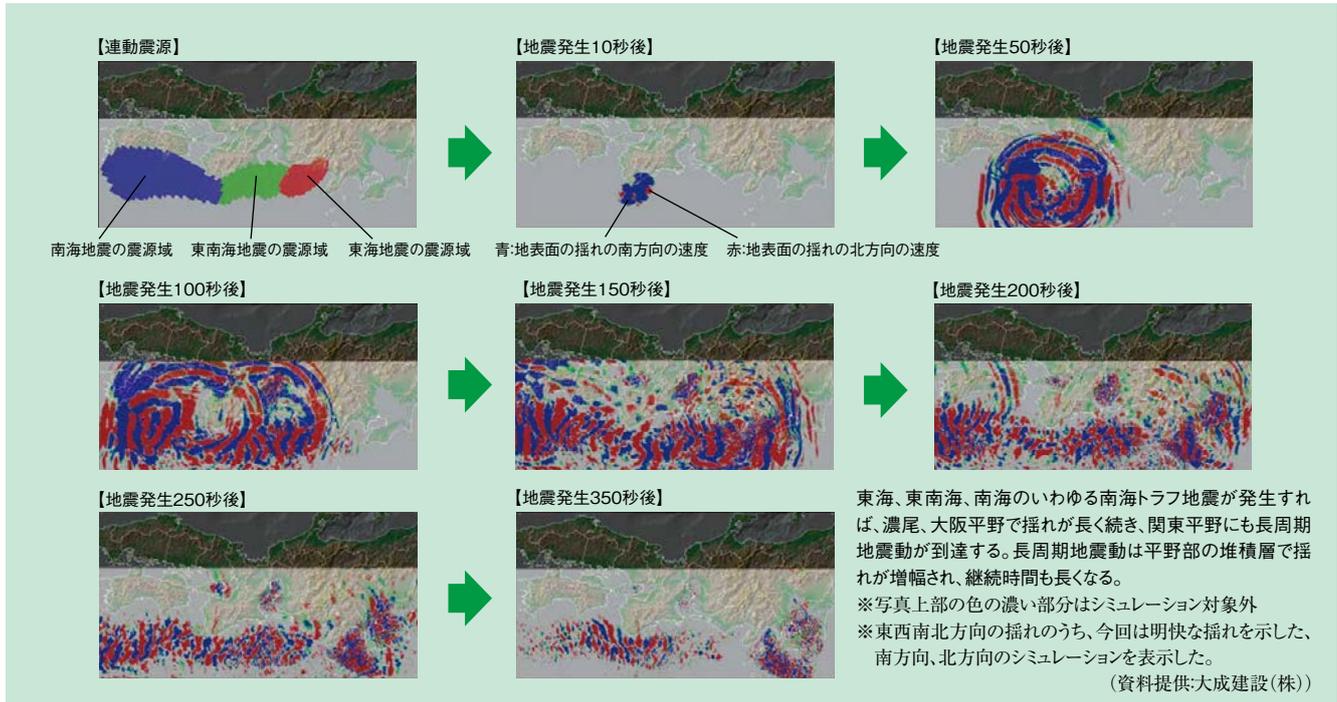
梁などの長大構造物とは共振しやすいが、一般の住宅などの低層、中層の建築物には大きな影響を与えることは少ない。

また、長周期地震動は関東平野や大阪平野など、平野部の堆積層で揺れが増幅され、継続時間も長くなる傾向にある。この地域は高層ビルや長大構造物などが多く存在する都市部であり、大きな被害が懸念されている。超高層建築物は、長周期地震動に襲われても、ただちに倒壊する恐れはないが、何度も大きな揺れに見舞われた場合、累積疲労による耐震性能の低下や部分的な損傷の可能性が考えられる。また、内外装や窓などの非構造部材の損傷や、本棚やコピー機など、家具や装置の転倒や移動が報告されている。建物内にいた人の体感として、非常に長い揺れの中、船酔いに似た感覚や、過去に経験したことのない揺れに恐怖感を覚えたという声も多数出ている。

今後の巨大地震への備え

長周期地震動が着目され始めたのは、2003年に発生した十勝沖地震で、このとき震源から約200km離れた苫小牧の石油貯蔵タンクで大規模な火災が発生した。原因は石油タンク

■南海トラフ地震発生時の長周期地震動伝播シミュレーション



の地下構造の影響で増幅した長周期地震動が、タンク内の液面の揺れと共振し、その結果タンク外に石油が溢れ引火したと考えられている。以降、長周期地震動の長大構造物への影響が積極的に調べられるようになった。

東日本大震災では、防災科学技術研究所のK-NET(全国強震観測網)、KiK-net(基盤強震観測網)をはじめ、気象庁、大学、自治体などの観測機関により、余震も含め、多くの強震記録が得られた。その結果、本震による揺れの継続時間が非常に長いのが特徴的であった。

また今後、南海トラフで巨大地震が発生した場合、長周期地震動の揺れの強さは、東日本大震災時と比較して、東京で約2~3倍、大阪で5倍にもなり、揺れる時間も長くなる可能性が指摘されている。

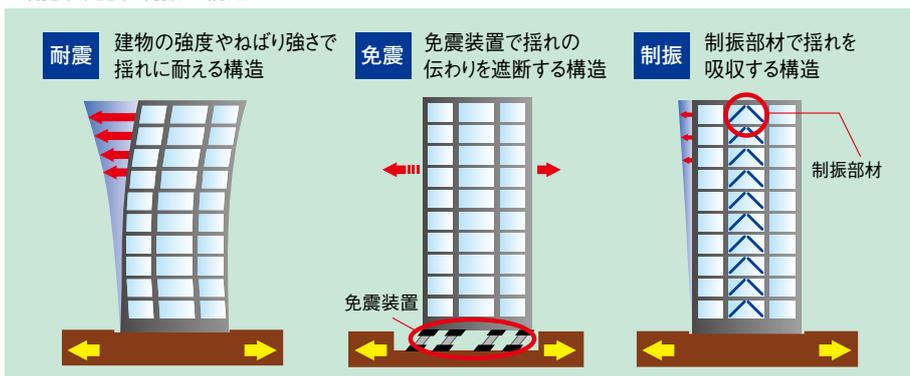
2010年12月から、国土交通省は日本建築学会などの提言を踏まえ、超高層建築物等における長周期地震動の対策試案を

発表、大臣認定を受けた超高層建築物、免震建築物の中で、長周期地震動による影響が大きいものについて再検証し、必要な補強を行うよう要請している。日本には超高層建物は約2500棟あり、そのうち、長周期地震動の影響を受けやすい周期2秒程度以上の建物(高さ約70~100m以上)は、約1100棟ある。

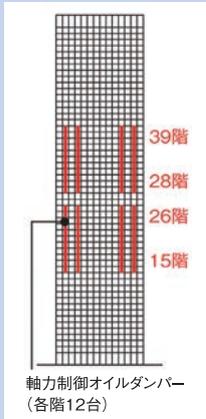
長周期地震動を抑えるには、変形を小さくし、揺れをできるだけ早く収める必要がある。個々の建物に耐震診断を行った上で、制振部材を設置するなどの対策を実施すれば、構造躯体に与える影響が抑えられ、被害は大幅に軽減されることが考えられる。

一般的な地震対策には大きく「耐震」、「免震」、「制振」があるが、「耐震」が建物自体の強さで揺れに抵抗するのに対し、「免震」は建物と基礎を免震装置により切り離し、建物に入力される地震エネルギーを低減、吸収する。また「制振」は柱や梁などの構造材にダンパー等を付け揺れのエネルギーを吸収し、建物へのダメージを低減するものである。このうち長周期地震動対策としては、耐震は構造自体を強化するため柔構造である超高層ビルには適さない場合がある。一方、免震は地震エネルギーの低減、吸収に大きな効果を発揮するが、既存の超高層ビルに施すには大がかりな工事が必要で、新設での採用が主となっている。既設の超高層ビルの長周期地震動対策としては制振装置を設置するのが現時点では最善と考えられている。

■耐震、免震、制振の構造



■新宿センタービルへの長周期地震動対策



計288台の制振ダンパーを設置した新宿センタービル。工事は約10か月、夜間のみ実施された。



新宿センタービルに設置されたダンパー。柱や梁、基礎など既存の構造に負担をかけないよう、大きな力がかかると減衰力が小さくなる変位依存型オイルダンパーを用いた構法が採用された。

●新宿センタービルでの観測結果(R階短辺方向の後揺れの比較)

減衰定数

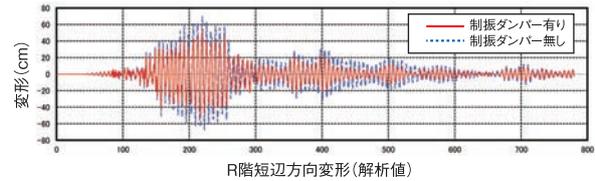
・短辺方向の建物の減衰が1.3%から2.7%に増加

応答低減効果(解析的検討)

・最大変形

制振ダンパーなし：R階短辺方向 69.8cm(解析値)

制振ダンパーあり：R階短辺方向 54.2cm(観測値)←22%低減



制振ダンパーを設置した結果、最大加速度R階短辺方向で29%、後揺れは51%それぞれ低減された。

(資料提供:大成建設(株))

東日本大震災で効果を発揮した長周期地震動対策

他に先駆けて超高層ビルの長周期地震対策を実施したのは東京・西新宿の新宿センタービルである。1979年に竣工された地下4階、地上54階建ての超高層ビルで、2008年から2009年にかけて、長周期地震動対策が施された。これは200mを超

す既存超高層ビルでは国内初の試みとなる。計288基の制振ダンパーを、層間変形角(建物の上の階と下の階の水平方向のずれ)が大きくなる15階から26階、28階から39階の各フロアに設置した。

3月11日の東日本大震災において、新宿センタービルの長周期地震動対策は効果を発揮した。ビルの最大変形はダンパーなしの場合、解析値69.8cmなのに対し、ダンパーありの場合、観

地震を表す単位

地震の大きさを表す単位として有名なのは気象庁による10段階の震度であるが、長周期地震動による長大構造物の揺れの大きさを表現するのに、震度を使用するのは適切ではない。同じ震度でも、建物の固有周期によってその揺れ方は変わり、被害の状況も異なるからである。現在、特に決まった指標はないが、気象庁によって「長周期地震動に関する情報のあり方検討会」が2011年11月より設置され、一般にもわかりやすい長周期地震動の情報の伝え方が検討されている。

一方、揺れを表す単位としては、地震そのものの規模を表すマグニチュードや、地震動の大きさを加速度で表し、振動の激しさを表現する数値としてガル(gal)が使われている。建築基準法では、耐震基準を中地震と大地震に分け、前者を「稀な地震」と呼び、震度5強程度の地震時に建物としての機能を保持することを定め、後者を「極めて稀な地震」と呼び、震度6強の地震時に建物の倒壊を防ぎ、人命を保護することを定めている。

■東日本大震災における免震装置の効果



代ゼミタワー。積層ゴムとオイルダンパーを使用したセミアクティブ免震装置を採用。建物の揺れをセンサーで検知し、最も揺れを抑える最適減衰力をコンピュータで計算し、オイルダンパーを制御している。3.11時は通常通り講義が行われていたという。

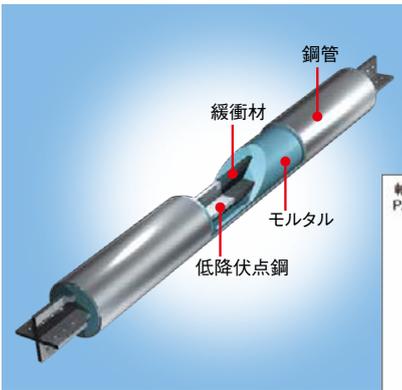
●代ゼミタワーでの観測結果

震度階 (計測震度)	最大加速度(ガル)			最大変位(cm)解析値	
	X(短辺)	Y(長辺)	Z(上下)	X(短辺)	Y(長辺)
R階	46.1	50.9	234.6	17.2	13.5
17階	66.0	34.1	87.4	—	—
地下1階	29.2	31.7	43.8	—	—
免震層	—	—	—	7.9	8.0
MB2階 震度4(4.4)	97.7	63.6	40.1	—	—

最大変位は最上階の短辺方向で17.2cm、平均の層間変形角は1320分の1だった。

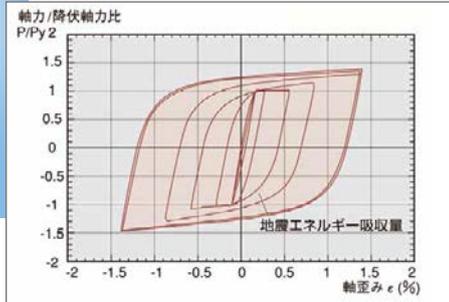
(資料提供:大成建設(株))

■低降伏点鋼を使用した制振ブレースの構造例



低降伏点鋼を芯材とし、これをモルタルを充填した鋼管が覆う。芯材とモルタルの間には緩衝材が存在する。

■鋼製ダンパーの復元力特性例



芯材が座屈せずに安定して塑性変形することで、制振ダンパーとして優れた性能を発揮する。



鋼製ダンパーの適用例：東京工業大学緑が丘1号館

(資料提供:新日鉄エンジニアリング(株))

測値で54.2cmと22%低減した。さらに最大加速度はダンパーなしの場合、解析値228.1ガルに対し、ダンパーありの場合、161.3ガルと29%低減した。地震終了後、変形が地震終了時の振幅の半分になる時間がダンパーなしの場合が50.2秒、ありの場合が24.5秒と半減した。

また免震装置を設置した東京・建物でも良好な観測結果を得ている。2008年に竣工した東京・代々木ゼミナール本部校ビルは、地下3階、地上26階、高さ134mの建物で、セミアクティブ免震というシステムを採用していた。これは建物の揺れをセンサーで検知し、最も揺れを抑える最適減衰力をコンピュータで計算し、ダンパーを制御している。3月11日時は、MB2階で加速度が約98ガルだったが、最上階では46ガルまで軽減した。最大変形は最上階の短辺方向で17.2cmと、免震層から上の構造の平均層間変形角(水平方向のずれを階高で割った値)は1320分の1だった。

最新の免震・制振装置

最近ではどのような免震・制振装置が実際に使用されているのだろうか。近年、免震または制振装置を採用する物件が増加し、免震装置を設置した建物は2,800棟、制振装置を設置した建物は1000棟を超えている(日本免震構造協会会員を対象とした調査)。

免震装置は様々な種類があるが、「支承」と「ダンパー」を組み合わせた例が多い。支承は建物を支え、地震時に建物をゆっくりと移動させる役割を行う。ゴムと鋼板を交互に重ねた「積層ゴム支承」やPTFE(四フッ化エチレン樹脂)が鋼板上を滑る「すべり支承」、ボールベアリングがレールを転がる「転がり支承」などがある。特に積層ゴム支承は優れた特性を持ち、ゴムの柔らかさによって地震時に水平方向にゆっくり移動し、鋼板

の硬さによって、重い建物を安定して支える。登場以来、免震装置の発展、普及に大きく貢献している。また種類にもよるが、支承はいつまでも続く揺れを止めることができないため、揺れのエネルギーを吸収し、振動を抑えるダンパーが付加される。

一方、制振装置は、建物の空間設計や制御する振動形態が多岐にわたることから、素材、機構、設置方法等、さまざまな種類がある。制振装置で最も多く使用されているのが鋼製ダンパーで、次にオイルダンパー、粘性体ダンパー、粘弾性ダンパー等となっている。鋼製の制振部材は塑性変形によってエネルギー吸収効果を得ることができ、また比較的安価である。

例えば制振ダンパーとして多くの実績を持つ低降伏点鋼を使用したブレース(筋違)は、低降伏点鋼が柱や梁などの構造部材より早く塑性変形することで、地震による揺れや衝撃を集約的に吸収する。地震時は、低降伏点鋼が縮んだり伸びたりして地震エネルギーを吸収し、柱や梁を守る。これまでに数百件の実績を持ち、評価も高い。

建設会社関係者によると、東日本大震災以降、建物の施主や各種メディアなどから、制振や免震装置についての問い合わせが増えたという。これまでの計画を変更して免震装置の導入を検討している新設物件もある。また、東京都庁をはじめ既存超高層ビルも制振対策を計画するところが増えている。

今後は免震、制振装置の耐久性向上や、費用対効果の面も含め、制振、免震部材の交換時期の見極めも必要になってくる。さらには構造の安全性だけではなく、建物内にいる人の安心感も考慮する必要がある。非構造部材の強化や装置の転倒防止などを始め総合的な対策が重要である。

●取材協力 一般社団法人日本免震構造協会、大成建設(株)、新日鉄エンジニアリング(株)

●文 藤井 美穂