

建物の免震技術

大成建設株式会社 技術センター 技師長

藤井 俊二 *Shunji Fujii*

1. はじめに

地震の多発するわが国では、これまで多くの地震で被害を受け、そのつど新たな教訓を学びながら地震対策技術を向上させてきた。とくに、1968年十勝沖地震では鉄筋コンクリート造の建物が多数崩壊した。その後の研究によって鉄筋コンクリート造の地震対策技術が改良され、その成果は1981年の建築基準法改正で新耐震設計法として法制化された。1995年阪神淡路大震災では、新耐震設計法で設計された建物はそれ以前の設計法（旧耐震設計法）で設計された建物とくらべて被害が格段に少なく、新耐震設計法の有効性が実証された。そのため現在でも1981年以後の建物は耐震性があり、1981年以前の建物は耐震性が不十分な場合があるということが、社会的にも知られるようになってきている。

また、1964年新潟地震では地盤の液状化現象が初めて注目された。その後、液状化に関する研究も精力的に行われたものの、2011年東日本大震災でも広範囲の住宅地で液状化による被害が見られ、液状化の課題がまだ解決

に至っていないことが顕在化した。

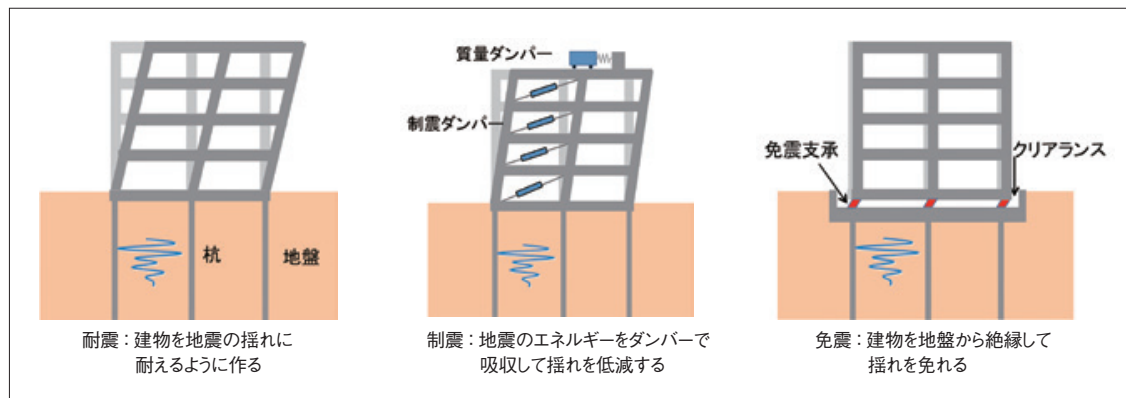
地震対策のなかの一つである免震技術は1980年代に実用化され、阪神淡路大震災を契機に一気に普及が進んだ。東日本大震災では多くの建物で免震効果が実証され¹⁾、病院や庁舎などの災害復旧拠点となる建物や、産業施設の事業継続計画（BCP：Business Continuity Planning）の観点から再び注目を集めている。マンションの免震も安全安心の技術として供給が増えている。本報ではこの免震技術について、原理、普及状況、免震効果の実証例などについて紹介する。

2. 建物の地震対策技術

（1）耐震、制震、免震

建物の地震対策技術は耐震、制震、免震に大別することができる（図1）。耐震は建物を地震の揺れに耐えるように作ることであり、堅固に作る場合やしなやかに作る場合もあるが、いずれの場合も建物が崩壊することがないように作る。建物は地盤に固定されているので、一階は地盤と同じように揺れるが、建物上部

図1 建物の地震対策技術：耐震、制震、免震



では揺れが増幅するのが普通である。大地震の場合、建物は崩壊することなくとも、部分的に損傷して補修の必要性が出る可能性がある。また、固定していない家具の転倒や、棚の物の落下などに注意する必要がある。

制震は地震の揺れが建物内で増幅しないように、建物の骨組みに地震のエネルギーを吸収する「制震装置」を組込む方法である。「制震」という場合には地震対策に特化したものだが、「制振」という用語を使って風や交通振動などを含めた振動全般を対象とする場合もあり、「制振」の方がより広い概念をさす。最近の超高層オフィスビルなどでは、風揺れ対策のための制振装置を組込んだ制振ビルが多くなっている。

免震は建物と地盤との間に免震装置を設置して、建物を地盤から絶縁する地震対策技術である。そのため免震された建物は地盤よりも揺れが小さくなる。建物の損傷を防ぐだけでなく、建物内の家具転倒を防ぎ、居住者の恐怖心を和らげることができる安全・安心の

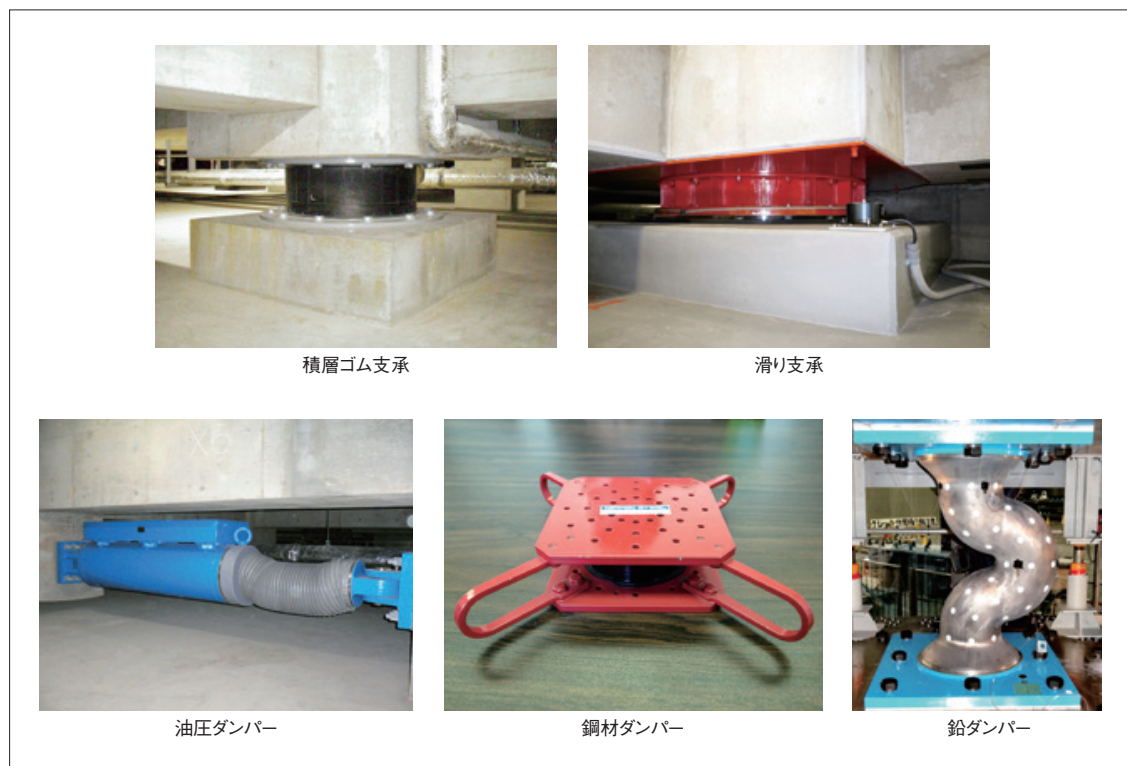
技術といえる。振動台で免震建物を揺らす実験を見ていると、建物が静止して地盤だけが揺れているようなイメージである。

(2) 免震の仕組み

免震装置は建物の重量を支えるとともに地震の横揺れを絶縁する「免震支承」と、免震支承の過大な変形を抑えるための「ダンパー」から構成されている(図2)。免震支承としては薄いゴムと鉄板を多数積層して水平方向の剛性を小さくした「積層ゴム支承」と、テフロンと鉄板の間の低摩擦を利用した「すべり支承」が一般的である。摩擦がほとんどない「ベアリング支承」も住宅など軽い建物では使われている。ダンパーは揺れのエネルギーを吸収して免震支承の過大な水平変位を抑制する装置で、油圧ダンパー、鋼材ダンパー、鉛ダンパーなど各種のものが用いられている。

免震装置を設置する位置としては基礎と建物の間に入れる「基礎免震」という方法が最も多い。このほか柱の上部に装置を入れる「柱

図2 免震装置



大成建設 欄木龍大氏 撮影

図3 免震装置の設置位置

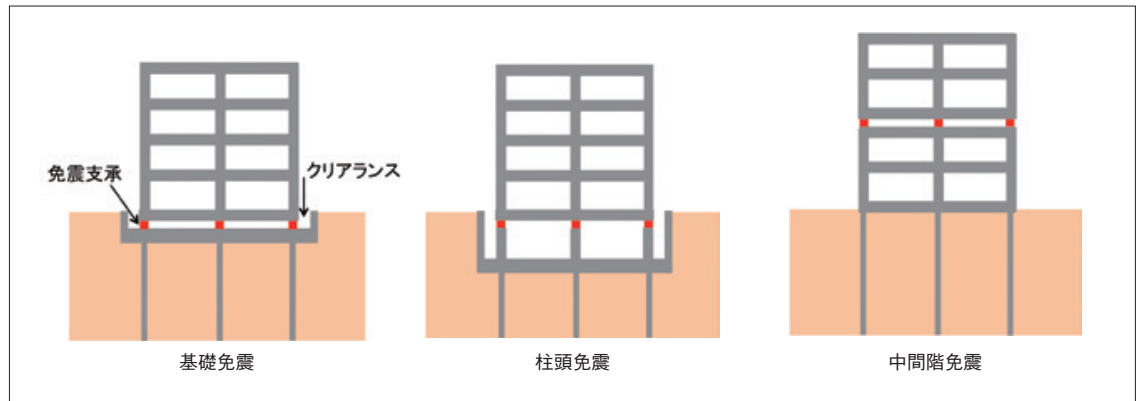
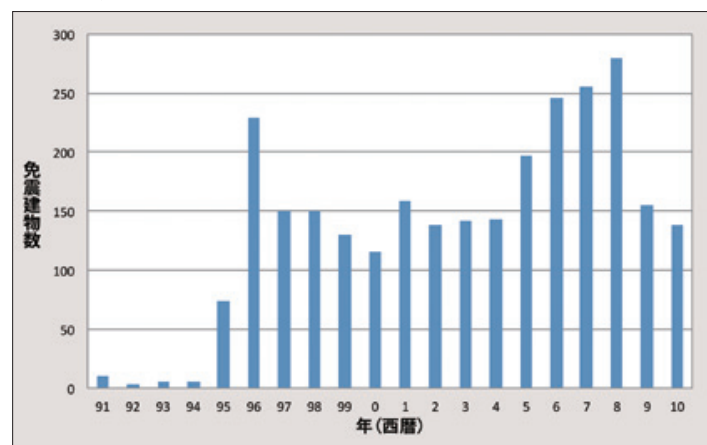


図4 免震建物計画数



(一社) 日本免震構造協会資料より作成

頭免震」、建物の途中の階に装置を入れる「中間階免震」がある(図3)。建物を免震にすると建物と地盤の揺れ方が違うので、建物と周辺地盤との間に50~60cm程度のクリアランスを設け、建物へのアクセス部分には渡り板が設けられる。

免震は水平方向の揺れを低減するのには有効だが、鉛直方向の揺れの低減効果はない。「地震は縦横に揺れるのに、免震は縦揺れには効果がないのではないか」という質問を受けることがあるが、確かにその通りで縦揺れには効果がない。しかし、鉛直方向の地震動は水平方向の地震動よりも小さく、建物本体や家具・什器などは鉛直方向の地震動では損傷しにくい。さらに、これまでの大地震において免震建物では建物本体も内部の生活環境も十分保護されてきているので、普通の建物では水平方向だけに効果のある免震で地震被害

を軽減する効果は十分であるとされている。

3. 免震の開発と普及状況

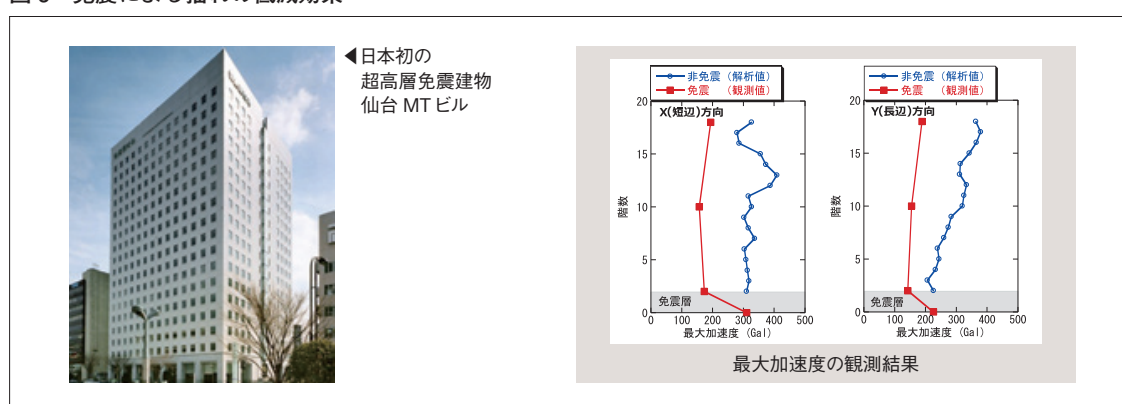
わが国で最初の免震建物は1983年に建設された千葉県八千代市にある免震住宅である。その後ほとんど普及しなかったが、阪神淡路大震災を契機に普及が進んだ。現在ではビルやマンション約3,000棟が免震で建てられている(図4)。免震建物の高層化も進んでおり、オフィスでは35階180m、マンションでは52階180mのものが建設されている。このほか戸建て住宅約4,000棟も免震で建てられている。

海外の普及状況をみると中国600棟、ロシア550棟、イタリア300棟、米国250棟といった程度であり、わが国の免震建物の普及が群を抜いているのが分かる。それでもわが国には床面積が3,000㎡を越える比較的大型の建

図5 建物内部の状況



図6 免震による揺れの低減効果



物が40,000棟、戸建て住宅が30,000,000棟あるから、免震建物はそのごく一部にとどまっているとも言える。

4. 免震効果の実証例

東日本大震災の時、筆者は本郷にある東大構内の9階建て校舎の最上階におり、長時間にわたる揺れを体感した。耐震工学に携わる者であっても、地震後の被害を調査する機会はあるが、大きな揺れを経験することはほとんどない。この時は普段固いと思っている鉄筋コンクリートの建物が、けっこう弾性体としてたわむのだということを実感した。また、揺れの後半には棚に置かれた書籍類が落下して床の上に散乱した。さすがに書棚は建物にきちんと固定されていたので、書棚ごと倒壊ということはなかった。家具類の固定が大切だと普段言っていることの必要性を再確認した。

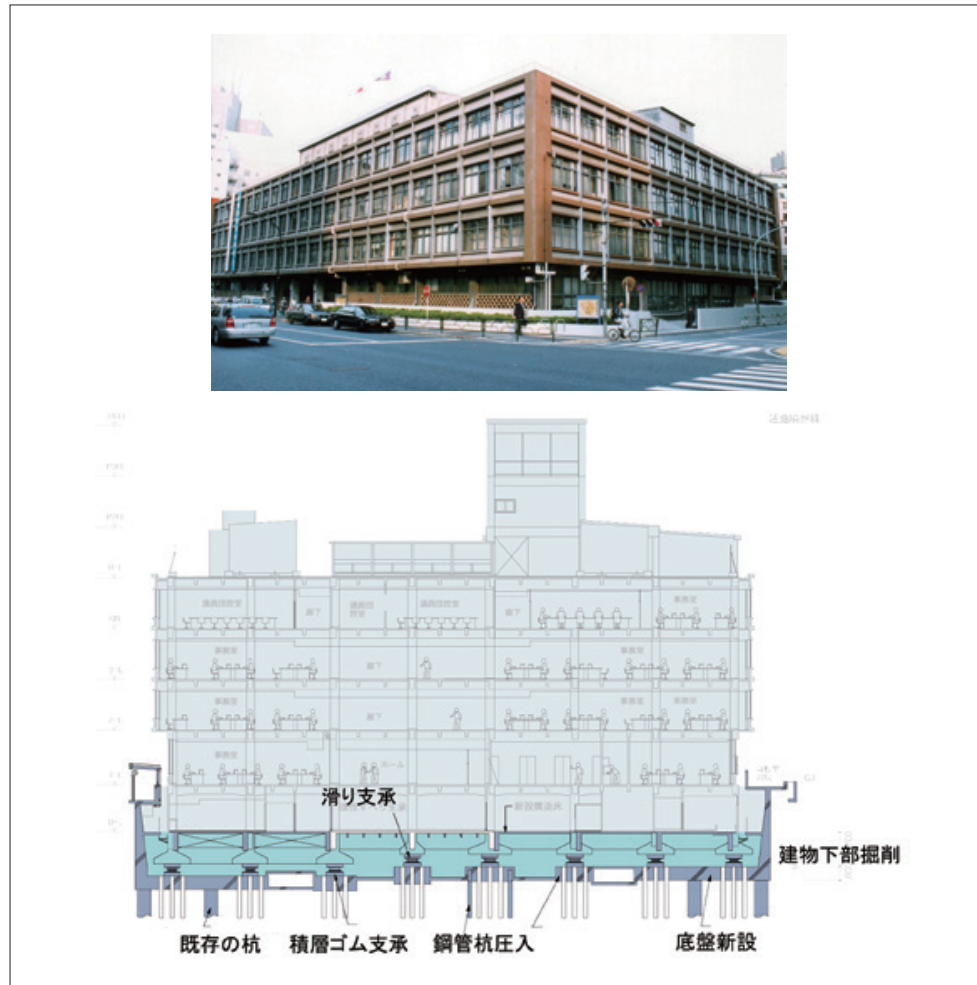
夜中に帰宅してみるとわが家は免震マンションなので、家具や棚の什器などにまったく異常がないことを確認した(図5)。その後、自宅内で余震を何度も経験し、免震建物がゆっくりと揺れることを体感した。

震源に近い東北地方では石巻赤十字病院の事例が有名である。石巻市は震度6弱の揺れと津波によって大きな被害を受けたが、この病院は津波被害から免れることができた。免震建物であったため地震の揺れによる大きな被害はなく、地震直後から医療救護の拠点として活動が行われた。地震時の室内の揺れの様子や、直ちに開始された救護活動、スタッフの活躍などが動画「【日本赤十字社】石巻赤十字病院 ～東日本大震災 初動の記録～」としてアップロードされている²⁾。

宮城県仙台市に位置する仙台MTビルは、1999年に建設された地上18階、高さ84.9mの日本初の超高層免震建物^{※1}である。仙台

※1
超高層建築物
明確な定義はないが我が国では高さ60m以上の建物を呼ぶのが普通である。

図7 免震レトロフィット：東京都豊島区役所本庁舎



MTビルでは地震観測が行われており、東日本大震災の時の揺れが記録されている。図6に最大加速度の観測結果を示す。揺れの大きかったX（短辺）方向でみると、地盤の加速度310Gal※2が建物1階では免震の効果で173Galに低減されている。このビルが免震でなかったらどのくらい揺れたかを、解析から求めて図中に示している。免震ビルでは非免震ビルに比べて揺れが1/2程度に低減されていたと推定される。

5. 様々な免震技術

(1) 免震レトロフィット

普通の建物を免震建物に改修することを「免震レトロフィット」と呼んでいる。東京豊島区役所本庁舎は1961年に建設された地上4

階建ての建物で、2000年に免震構造に改修された（図7）。建物を使いながら建物下部の土を掘削し、積層ゴム支承59基とすべり支承37基の免震装置が設置された。東日本大震災では、近くに建つ分庁舎は免震でなかったため壁などに亀裂が発生し、書棚から本が落ちたりキャビネットが倒れたりといった被害があったのに対して、免震の本庁舎では建物にも室内にも被害はなく地震後も業務が続けられたそうである¹⁾。

免震レトロフィットは庁舎のほか、歴史的建造物を保存するのにも多く用いられる。東京・上野の国立西洋美術館（ル・コルビュジエ設計）、大阪市中心公会堂（旧中之島公会堂）、復原された赤レンガの東京駅舎などの例が有名である。

※2
Gal
ガル、揺れの大きさを加速度で表す単位＝cm/秒²。地震学や耐震工学で使われる。

(2) 事業継続計画 (BCP) と免震

最近では地震後のBCPの観点から、建物本体だけでなくコンピューターや重要機器類の損傷防止と機能維持が求められる場合がある。コンピューターセンターやデータセンターでは、情報機器が乗った床を免震構造にした「床免震」が開発されて適用されている。建物では水平方向の免震だけで有効だったが、「床免震」の場合には上下方向の揺れについても低減したい場合もあり、そのための3次元床免震システムも開発されている(図8)。3次元床免震システムでは情報機器などの荷重を支持しながら、上下振動の固有周期を長周期化するために空気ばねが用いられる。平常時に人が床上に乗ると床が上下に動いてしまうので、平常時にロックが効いて地震時に解除されるブレーキ機構が設置される。

図8 3次元床免震システム：震動台実験中



(3) 原子力施設の免震

原子力施設は最も安全性に留意する必要のある施設である。わが国においては高速増殖炉FBRなどに免震を適用するための技術開発が進められ、成果をまとめて技術指針が作成されているが、免震による原子炉建屋はまだ実現に至っていない。

海外では、南アフリカ連邦のKoeberg軽水炉(1984年)やフランスのCruas軽水炉(1984年)の原子炉建屋に免震が適用されている。現在、南仏のカダラッシュに建設され

つつある核融合炉ITERも、免震で施設の建設が進められている。免震装置493基もすでに設置されており、ホームページで建設の様子を見ることができる³⁾。

6. おわりに

わが国に初の免震建物が建設されて約30年が経過した。1995年阪神淡路大震災で都市災害の恐ろしさを実感して免震の普及が始まり、2011年東日本大震災などで免震の効果が実証されてきた。一方、東日本大震災を契機に「長周期地震動」や「想定外」ということが注目されている。これらの過酷な条件のもとの免震建物の挙動について、独立行政法人防災科学技術研究所の世界最大の震動台「E-ディフェンス」を使って研究が行われ、さらなる安全性の確認がはかられている⁴⁾。

わが国には約3,000棟の免震建物と約4,000棟の免震戸建て住宅があり、諸外国と比べて格段に免震建物の数が多い。病院や庁舎など災害復旧拠点となる建物への普及も進んでいる。また購入者の安全・安心へのニーズに応じて、分譲マンションへの普及が進みつつある。それでも免震建物はまだ建物全体のごく一部であり、さらなる普及によって地震に対する安全の確保と都市機能の維持が促進されることを期待したい。

参考文献

- 1) 日経アーキテクチュア, 特集「免震の真価」, 995, 2011.
- 2) 【日本赤十字社】石巻赤十字病院～東日本大震災 初動の記録～
<http://www.youtube.com/watch?v=Pc1Z07YwcWc>
- 3) ITERのウェブサイト中の Construction (例えば Tokamak Foundations) のサイトで免震装置の設置状況が閲覧できる。
<http://www.iter.org/>
- 4) E-ディフェンスでの震動台実験画像が閲覧できる。
<http://www.bosai.go.jp/hyogo/research/movie/movie.html>

ふじい しゅんじ

東京大学工学部建築学科卒業、同大学院工学研究科修了、工学博士。1974年大成建設入社。鉄筋コンクリート構造、免震・制震構造、液化化対策技術などの研究開発に従事。2000年頃からは研究開発マネージメントのかたわら、既存建物の活用、都市再生分野で活動中。