

揺れない建物を！ 免震・制振技術

近年の建築構造技術の発展に伴い、地震の揺れに「耐える」耐震建築だけでなく、揺れを最小限に「免れる」免震建物や、揺れを「制御できる」制振建物の開発が行われてきた。とくに1995年の兵庫県南部地震以降、免震・制振建物は飛躍的に増加している。

免震・制振建物の概要

建物は、自分の固有周期より短い周期を持つ地盤の揺れに対しては応答加速度が小さくなる。地震動の主要な加速度成分は周期1秒程度以下であることが多いので、建物の固有周期を数秒まで伸ばせば上部構造の加速度応答をかなり小さくすることができる。いわゆる免震建物は、建物基部と地盤の間に水平剛性を減らす支持機構を挟み、水平方向の固有周期を1～数秒まで伸ばしたものを指す。通常は減衰機構が併用され、20%程度の大きな減衰定数を与えることにより、さらに応答を減じている。図1に免震建物の応答加速度低減の原理を示した。

免震装置はさまざまな機構が提案されているが、支持機構は積層ゴム(図2)が主で、天然ゴム系の積層ゴムに何らかの外付ダンパーを併用したもの、鉛を積層ゴムに内蔵して減衰性能をもたせた鉛プラグ入り積層ゴム、ゴムそのものに減衰性能を加えた高減衰積層ゴム、などが多用されている。外付ダンパーには鉛や鋼材の塑性変形、粘性体や摩擦によるエ

ネルギー吸収を利用したものなどがある。

図3に免震建物の応答低減効果を非免震建物との比較により直接示した例を挙げておく。通常の建物が地盤に対して上部ほど大きく増幅するのに対して、免震建物ではほぼ水平に剛体的にゆっくりと揺れる。なお免震装置は建物を支持するという機能を併せ持つために、上下方向の剛性は低くしにくく、上下動に関する免震は困難である。

一方、通常の建物にダンパーなどの応答を減らす装置を付与することを制振と呼ぶ。図4に制振建物の概念例を挙げる。建物の層間変形を利用したダンパーには、免震のダンパーと同様に、金属の塑性変形や摩擦力、粘性体・粘弾性体などの減衰力を利用するものがある。また建物の固有周期に同調した小さな付加振動系を屋上などに設置して振動エネルギーを吸収するTMD(同調質量ダンパー)や、水槽中の液体の振動を利用したスロッシングダンパーも開発されている。これらの制御力が建物の振動に伴って受動的に発生するものであるのに対し、人工的な加力源とエネルギー源を建物に備え、振動状態に対して最適な制御力を能動的に発生させる制振機構もある。前者をパッシブ制振、後者をアクティブ制振とよぶことがある。免震も広義にはパッシブ制振に含める場合もある。アクティブ制振は機械分野では日常的に行なわれている制御技術であり、制御性能もパッシブ制

振より高くできるはずであるが、強い地震動に対しては必要エネルギーが膨大となるため適用例は少ない。むしろ剛性や減衰の大きさを応答性状に応じて可変にするタイプのアクティブ制振が有効との考え方もある。一方、中小地震や強風の揺れに対しては有効であり、高層建物の居住性向上や重要な施設の振動障害対策(たとえば通信アンテナや精密機器を持つ建物など)には実用化されている。

以上のような制振機構は、周期の長い柔構造に適用されることが多い。また地震のみを対象としない場合には「制震」と区別して用いられるのが一般的である。

免震・制振建物の歴史

建物の下に「ころ」や「滑り板」のようなものを敷いたり、軟らかな柱で支えたりして、地震の水平衝撃力が建物に伝わらないようにするアイデアは古くからあった。近代的な建物に関しても、1906年のサンフランシスコ大地震、1891年濃尾地震および1923年関東大地震などの悲惨な地震災害の後に多数の提案があり、建築技術者以外が考案したものも少なくなかった。今世紀後半になって地震動が観測され、電子計算機による応答解析が行なわれるようになって、免震・制振建物の理論的検討が始められた。小堀によるアクティブ制震の概念(1957)や、松下・和泉による免震の理論的検討(1965)がその嚆矢である。しかし日本の耐震技

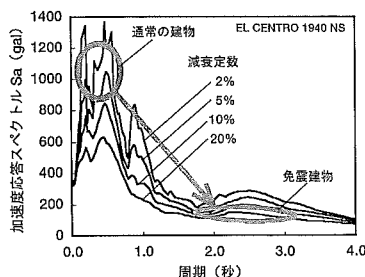


図1 免震建物の応答加速度低減の原理

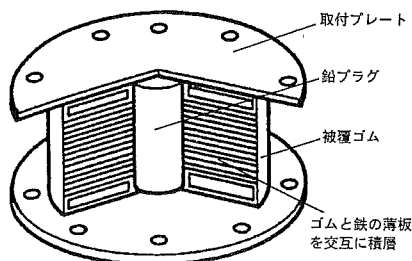


図2 積層ゴム支承(鉛プラグ入り)

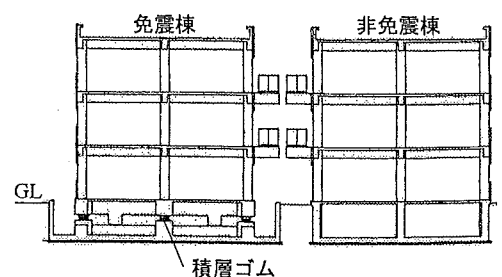


図3a 免震・非免震建物の地震応答の比較(実大試験棟)

術の研究開発が急速に進歩した1960～70年代には、多くの建築技術者はその実現性をまともに考えていなかったとさえ言える。海外では1970年代にフランス、ニュージーランド、アメリカなどで開発が進められていたが、日本で免震が脚光を浴び始めるのは1980年代に入ってからである。この時期に実用化の気運が高まった背景には、当時フランスが原子力発電所に免震を採用して建設コストを抑え衝撃を与えたこと、超高層建物・原子力発電施設に続く日本の耐震構造技術の新たなフロンティアという意味もあった。その後の免震建物の技術開発は順調であり、1980年代末には実用化された。しかし、広く一般的に認知され普及するまでには1995年兵庫県南部地震による社会的関心の高まりを待たねばならなかった。

免震建物の現状

免震建物の設計は、建築基準法38条にしたがって個別の詳細検討と建設大臣による認定が必要とされており、実際には(財)日本建築センターによる評定を経て認められる。この評定を通過した物件の推移を図5に示す。1994年までの約10年間ではわずか82棟であったが(とはいえ当時でも世界有数)、兵庫県南部地震の年だけでほぼ同数、翌年は一挙に前年の2.6倍になっている。用途の内訳を見ると集合住宅が全体の4割を占め、特に96年度は6割近い。一方、97～98年度は不況

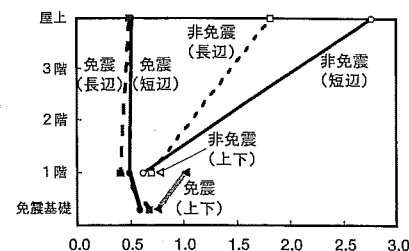


図3 b 地表に対する最大加速度応答倍率

を反映して総数が減少しているが、ほとんど集合住宅のみの減であり、事務所や官庁・病院・学校等は横ばいとなっていて、個人の安全意識が景気やコストに影響されることがうかがえる。地域分布は関東が6割以上を占め、次いで愛知・静岡を含む東海が多く、以下関西、東北・北海道の順となる。建物規模は拡大しており、床面積5,000㎡以上の割合が94年以前の26%から98年度には57%まで増加した。免震はもともと低層建物に適するが、最近では軒高60mを超えるものも現れている。

免震建物の最近の話題

既存建物の耐震改修の一手法として、既存基礎の下に免震装置を設置する工法が実用化されている。一般に免震レトロフィットと呼ばれており、当初は歴史的建造物の保存のための手法として導入された。しかし一方で、コストと工期を減じつつ、場合によっては上部建物を使用しながら耐震改修を行なうことも可能という利点を持ち、都市部の膨大な既存不適格建物の耐震改修にあたって有力な手法として注目されている。東海地域では中部大学で実施例がある。

住まいの安全に対する関心から免震住宅の要求は高いが、従来はほとんどが規模の大きい非木造集合住宅のみであった。免震機構そのものに加えて、上述の設計の個別評定にかかる追加コストと時間の

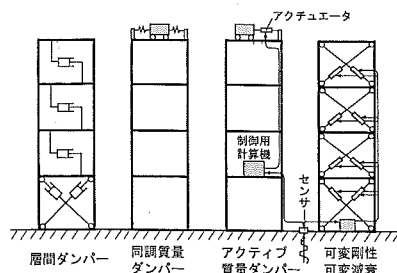


図4 制振建物の例

制約が普及を妨げていたと言える。これに対して今年9月からは免震住宅の一般評定制度が始まり、あらかじめ「システム」としての評定を受けることにより、同型式の免震建物の評定を簡素化できる環境が整えられた。この制度により戸建免震住宅の普及が促進されるものと思われる。木造等の戸建住宅は建物が小さく軽いので、周期を長くすることが難しいが、滑りやベアリングを用いた支持機構が開発されている。

免震建物は特別な振動特性を持たせて地震力をうまく「免れる」ことを前提にしている。したがって入力地震動の特性の把握は設計にあたって非常に重要である。とくに地震動の長周期成分に影響を与える深い地盤構造は、新しい調査結果が得られつつあるケースが多く、十分考慮しなければならない。本連載の第2回(5月号)図2に、名古屋市内の数100m～1km以上の深い地盤構造に由来する卓越周期分布と免震建物建設地点の図を載せておいた。名古屋市の西部では免震構造の固有周期に近い卓越周期を持つところも多く、震源の特性如何では共振する成分を持つ可能性もある。

現在、建築基準法の性能規定化が進められており、設計者の的確な判断がますます重要になっている。免震・制振がいかに優れたポテンシャルを持っていても、入力地震動の特性を軽視した安易な設計は戒められるべきであろう。

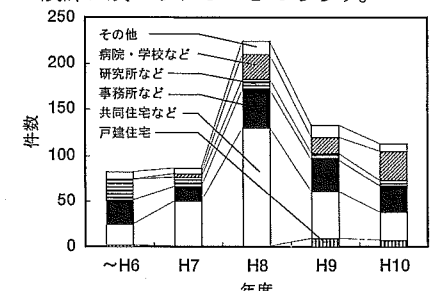


図5 免震建物の用途別評定数の推移