

# 次世代型免震構造のすすめ



京都大学

川瀬 博

小生は地震工学、それも強震動予測と構造物の被害予測およびその対策を専門としており、今や鉄骨構造や鉄筋コンクリート構造と並ぶ各種構造の1つとも言える免震構造の専門家ではないのであるが、それでもよいとのことなので、今回は巻頭言に相応しい格調の高さは諦めていただき、地震入力の特徴と応答性状から見た次世代型免震構造のあるべき姿について、拙意を開陳させていただきたい。

そもそも免震構造とは、1つには構造物の固有周期を長周期化することにより、地震時に上部構造に生じる加速度を低減し、その安全性を確保するという極めて単純な原理に立脚しているが、もう1つにはある特定層の剛性を極端に減らすことによりそこに変形を集中させ、その層でエネルギー吸収を効率よく行う、所謂ソフトファーストストーリーの原理を活用した構造でもある。第一原理は超高層建物でも同様に活用しているわけであるが、第二原理によって現在の免震構造は免震構造足り得ているわけである。

今日では超高層マンションは免震超高層にしておいた方が売れ行きがいいそうで、さらに超高層部分の揺れを抑えるために制震デバイスを入れるともなれば、もはや第二原理はどれだけ有効に活用されているのか明確ではなくなりつつある。免震超高層が提案された初期の頃は、免震に超高層を組み合わせたら両者が共振して大変なことになる、などという荒唐無稽な意見が専門家から出たと仄聞しているが、昨今の免震超高層ブームを見るとそんな時代も遠い昔の感がある。免震と超高層を組み合わせれば全体系の一次固有周期が延びるだけのことなので、第一原理からすればいいことには違いない。

では何も問題がないかという、これが大ありなのである。そもそも第一原理は「入力地震動はどこでも同じように周期が長いと減少する」という前提

に基づいている。実際全国どこでも告示スペクトル+浅層地盤の増幅で設計してよいとされているのであるが、当然のことながら日本の大都市はすべからく深い堆積盆地上に立地しているので、その堆積盆地の深さと平均S波速度から決まる卓越周期が存在し、主として盆地生成表面波により、その卓越周期成分は、他の周期成分よりもずっと大きくなる。これは1968年の十勝沖地震の八戸での記録の分析をした時代から、つまり超高層の黎明期から周知の事実である。しかし2011年の東北地方太平洋沖地震による770km離れた大阪湾岸の超高層建物に予期せぬ被害が発生するまでは、実際に深い盆地構造の影響が構造物応答にこれほど影響を与えたと設計者は考えていなかったのではないか。

では第二原理はどうか。第二原理にも課題が突きつけられている。すなわち考慮すべき入力レベルが年々大きくなってきており、その結果として免震層の変形が過大になる可能性が出てきたのである。通常免震層は地下に設けられるので、周辺地盤（の擁壁）との間には所定のクリアランスが設けられているが、レベル2を上回る地震動が入力すればクリアランスを超えて上部構造が変位し、周辺地盤に衝突することになる。しかしこのクリアランスを大きくすることは建物床面積を減らすことに直結するのでむやみに大きくすることもできない。

そこで免震層を中間階に持って来る中間層免震の提案がなされるのは論理的帰結であるが、ピロティ形式の中低層建物は別にして、超高層の中間階で免震化することは多数の配管やエレベータの問題を考えると事実上不可能と言わざるを得ない。この問題はどこからくるのかと考えればそれはすべからくある層に変形を集中させてそこでエネルギーを吸収させるという第二原理から導き出されていることがわかる。

単純に言えば変形を1層に集中させることで対応する物理モデルが簡単になるので、その地震時設計は明瞭簡潔になるが、同時に本来建築構造物が誇ってきた高い不静定次数による冗長性が失われており、一步間違えばフォールト・トレラントでもロバストでもない危険構造物を造ってしまう可能性があるという認識が重要である。設定できる減衰量に限界のある高減衰積層ゴムや鉛プラグ入り積層ゴムのみに頼った設計を見聞きする度にその感を強くする。

ではここで指摘した問題を一気に解決できるそんなうまい話があるのであろうか。私が提案する次世代型免震なら第一原理の問題も第二原理の問題もすんなりと解決できる。その事例を写真1に示す。

これは平成27年12月12日と19日の2週にわたってNHKで放送された「超絶 凄ワザ!地震に打ち勝て!究極の「揺れない住宅」対決」で我々が用いた全層免震模型試験体である。その要求は「重量2kgまでの木材で5層の建物を造り、それに計10kgの錘を載せた状態で1g (1000Gal) の地震動を入力しても1階・3階・5階に載せたゆで卵をφ26mmのワッシャーから落とさないほど揺れを小さくせよ」というものであった。ゆで卵は0.1g (100 Gal) 以上で容易に転倒するので、上から下まで応答を1/10以下にする必要がある。しかし非木材部品は400gまでに制限されているので動的制御の制震システムなどは使えない。つまりパッシブで何とかするしかない。

そこで我々が用いたのが写真の全層免震構造である。しかも各層の免震装置は円弧状のレールに車輪を載せ、極力減衰を排除している。円弧（正確にはサイクロイド曲線）上を滑る構造物の固有周期は重力振子の原理により円弧の半径だけで決まるので、長周期化が容易で、かつ釣り合い位置での運動エネルギーが最大応答変位での位置エネルギーに変換されるため、最大応答変位が簡単に予測できる。この模型の場合、最下層では設計周期は約5秒、各層では約2秒にしている。それを直列につないでいるので系の一次固有周期は10秒ほどになっている。

実際には各階には変形制限装置が付加されているのでそれよりも多少短くなっているが、ここでのポイントは全層免震化によって、全体周期を10秒以上にするとともに、各階の層間応答変形量をできるだけ減らし、変形の集中を抑えることにある。

まず、10秒免震ならなぜ指摘した盆地応答の問題

が解決するか。それは日本の堆積盆地では10秒を超える周期帯で大きな増幅を示す盆地はまずないことによる。すなわち免震周期は通常4秒や5秒では足りず、さらに7~8秒では関東平野の中心部等で最悪の応答になるが、10秒を超えてしまえばもはや盆地による表面波の生成・増幅を心配する必要はない。

しかし10秒免震を免震層1層で達成しようとするところでの応答変位が過大となる可能性が生じ、それを抑えようと免震層の減衰を増大させると今度は加速度が増大してしまって10秒免震の意味が薄くなる。これを全層免震で達成すれば各層の変形は1/100程度に十分収まり、通常の層間変形角応答に対するディテールで十分対応が可能である。なおここでいう全層免震は実際に各階を免震化する必要は必ずしもなく、上部構造が水平方向に十分柔軟で、かつ上下方向には均質で、その層間応答が十分小さいレベルに収められるのなら実現性がある。

以上、ここで提案する次世代型免震構造とは、超長周期化と全層免震化による現在の免震構造の抱える深刻な課題を一気に解決する免震構造である。私が知らないだけで既にそういう免震構造の提案がなされているのであれば己の不明を羞じるほかないが、もしそのような免震構造の研究開発は未だ行われておらず、拙文がきっかけとなってそれに対する挑戦が各処で始まるのであれば望外の喜びである。

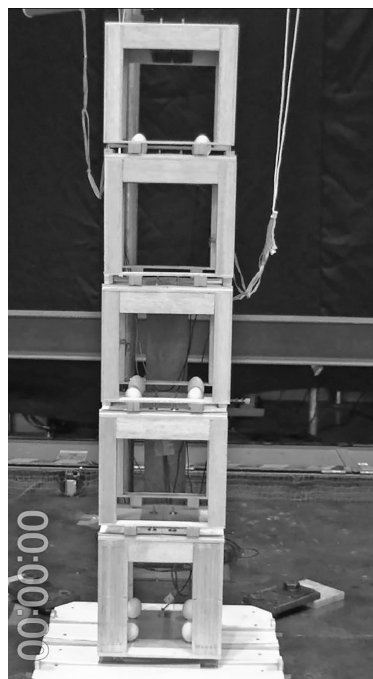


写真1 NHKの番組で用いた全層免震模型試験体の予備試験風景