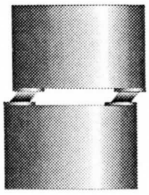
巻頭言



免震構造のひろがりに向けて

和田章(東京工業大学)

免震建築のラッシュ

六甲山の北側ではあるが神戸市の中に2棟の免震構造があり，兵庫県南部地震のとき，その一つ郵政省のWEST ビルでは約300cm/s²の地震動を受けた。建物内部の揺れはその1/3から1/4となり，わが国で初めて免震構造が本格的な地震を受けその効果を発揮した記録となった。何度もいわれていることであるが，このちょうど1年前にアメリカのロサンゼルスの北にあるノースリッジで大きな地震があり，震源地からは離れていたもののいくつかの免震構造があり，それぞれがその機能を発揮した。とくに素晴らしかったのは，南カリフォルニア大学の病院建築の場合である。兵庫県南部地震と同じように明け方の地震であったが，免震構造であったため，全く被害はなく，ちょうど準備されていた手術も滞りなく行われた。多くの雑誌，新聞に書かれているように，この2棟の免震建築の性能の素晴らしさがきっかけとなり，わが国に免震構造のラッシュが起きた。とくに兵庫県南部地震を受けた集合住宅の場合，倒壊は免れたものの大きな損傷を受け，多額の修繕費用が必要だったもの，取り壊さざるをえなかったものなどがあり，神戸に住んでいる人たちだけでなく，一般の国民に大きなショックを与えた。このような背景のもと，免震構造の初期のラッシュは集合住宅に集中した。

兵庫県南部地震から3年目の昨年は，このラッシュは少々おさまったようである。しかし，最近の統計を調べると，集合住宅だけでなく病院，公共建築，旧基準により設計された耐震性に不安のある建物の免震構造による耐震補強などが次々に行われ，免震構造の素晴らしさが多くの人たちに認識されてきたといえる。それでも，年間に建てられる免震構造の床面積は年間の建築総工事床面積の1% にも達していないそうである。わが国に初めて積層ゴムを用いた免震構造が建設されたのは，15年以上前である。新しい技術が本当に定着するには多くの時間がかかるものである。ここで扱われているような免震構造の特集は何度ももたなくてはならない。

免震構造の採用の判断

建築を建てるのは施工者である。設計は設計者，つまり建築家，構造設計者および設備設計者の協力によって進められる。建築の規模を決め予算を決めるのは発注者である。建築の構造形式を決めるのはどの段階であろうか。免震構造または制振構造がメニューに加わる以前には鉄筋コンクリート造，鉄骨造，鉄骨鉄筋コンクリート造の3種類の構造形式が基本であった。これらを決めるのは構造設計者であった。構造設計者は設計の重要な場面で，免震構造の提案を本当に行っているのであろうか。建物の高さが30m までの建物の場合，特殊な工法を用いなければ構造に関する確認申請に要する労力はかなり少ない。最近では，高層建築にも免震構造が使われるようになったが，一般的には30m 以下の高さの建物に免震構造が使われることが多い。申請手続きが面倒であるため，免震構造の採用を踏みとどまっていることはないのであろうか。

構造設計者が提案しないのであれば，建築家の方々にお願いしたい。ぜひ，発注者に免震構造の利点を説明し免震構造を採用するように説得していただきたい。このような問題でもっとも信頼のもてる判断をしていただけるのは，発注者かもしれない。建築を建てる目的，初期建設費，もし大きな地震に見舞われたときの被害，そのために業務が滞ることによる損害，何よりもその建物で仕事をする人たちの命を大事に思っているはずであるからである。日本における新築の建物の1割，さらに2割，3割の建物が免震構造を用いるようになるためには，発注者に向かって，この特集号のような説得活動を行わなければならない。

発注者にも気になることがある。長年，いままでの方法で建物をつくってきて，次のプロジェクトに免震構造を採用すると，その建物だけが耐震的に安全になってしまい，その他の建物のことが説明できなくなる。一度，免震構造の採用を認めると，横並びの理論で，次から次に免震構造の要求が出てきて，予算面で対応できなくな

るなどの話である。「思い立ったときが吉日」という格言がある。免震構造の採用が適切と判断されるプロジェクトには免震構造を採用していただきたい。これらの蓄積によって，都市を徐々に耐震的にしていくことができるはずである。

耐震設計レベルの相場

現在使われている耐震基準の前，1981（昭和56）年春まで使われていた耐震基準では，構造物の重量に震度0.2を乗じて，構造物に与えるべき水平力を計算し，これによって生じる応力と鉛直荷重による応力を組み合わせた応力が材料の短期許容応力度以内にあることとなっていた。現在の知見で振り返ると，このレベルを超える地震力が作用した場合の壊れ方について何も考えていないという意味で，大きな問題があったことになる。現在，多くの組織でこの時代に建てられた建築物に対して耐震診断が行われ，耐震性の不足している建物が多いことがはっきりしてきたが，無理もないことである。

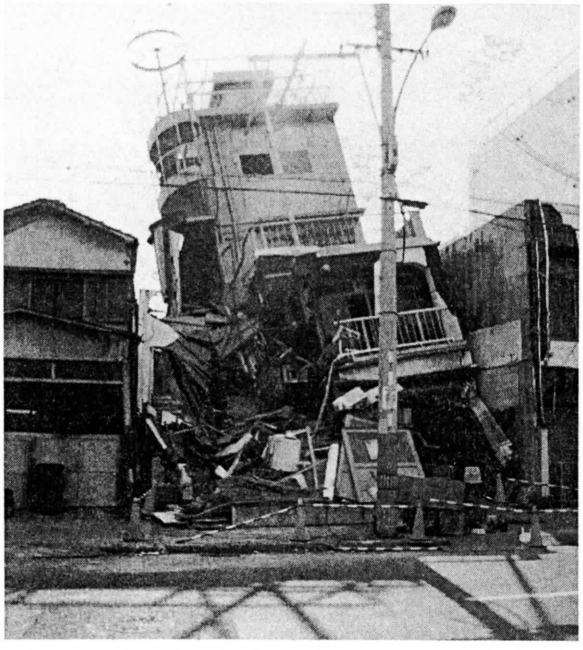
現在使われている耐震基準は兵庫県南部地震クラスの大地震動を受けたとき，建物が損傷しても人命は守ろうという考えでつくられている。その意味で，兵庫県南部地震の被害統計は現行の耐震基準の目標がほぼ満たされたことを示している。地震後の社会の受けた印象によると，財産価値の維持，建物の機能維持までを望まないこれらの基準が社会にとって満足できるものとは思われないが，人命を守るという最低の条件を満足したという意味で，社会の不安を取り除いているといえる。

この基準はまれに起こる大地震動に対しては，構造物の大きな塑性変形を許容し，この塑性変形能力によって地震入力エネルギーを吸収しようとする考えである。応答倍率を2.5とすると建築基準法施行令で示されている，1Gの弾性応答は，入力地震動として最大加速度が約400 cm/s²の地震動を考えていることになる。兵庫県南部地震の震度7の区域にはこのレベルを超えた地震動が作用したといわれているが，大地震時の人命保護という見地では，適切な規模の設計地震力といえる。免震構造の耐震設計はこのレベルより若干強い設計用地震入力つまり，日本建築センターの高層建築物評定委員会において長年使われているレベル2の地震動を用いている。免震構造の場合，この入力に対して応答せん断力係数は0.15を超えることはほとんどない。上部構造に生じる層せん断力の高さ方向の分布は，一般の基礎固定の建物のように上層に向かって大きく増幅することはなく，最上層でも0.25から0.3程度である。このとき，免震層に発生する変形は20cm から30cm である。一般的に使われている積層ゴムの直径は60cm 以上であり，1m を超えるものもある。ゴム総厚は15cm 前後よりは大きい。直径の1/2以内またはゴム総厚の約2倍以内の変形は積層ゴムにとって，十分安定変形範囲である。基礎固定の一般的な建築物では人命保護を対象としているレベル2の地震動に対して免震構造はこのように安定的な状況に収めることができる。

設計している建物の寿命の間に，その建設地で起きうる地震動の最大値は非常にまれな頻度のものを含めれば上記のレベルを超えることもありうる。しかし，上部構造の最終的な水平耐力は短期許容応力度設計のための水平力の1.5倍程度はある。積層ゴムはゴム層厚の4倍近くの水平変位まで変形させることができる。レベル2の入力に対し，上部構造を許容応力度設計，免震層に生じる変形を大きくても30cm 程度に収めてあれば，上に述べた程度の余裕を持たせることができ，きわめてまれに起こる最大級の地震動に対しても，問題は生じないと考えられる。

400棟を超える免震構造の設計が行われているから，個々に異なった設計が行われているはずである。それでも，以上に述べた内容が現在の日本の免震構造レベルのおおよその相場といえよう。

基礎固定の一般の建築物の耐震設計では，先にも述べたように上部構造そのものに塑性変形を許容している。建物全体に塑性変形を分散させる難しさ，分散させた塑性変形による損傷を修復する難しさ，この2点を考えても，基礎固定建物のルーティン化された耐震設計のほうがよほど難しいことが分かる。免震構造の設計に関する確認申請手続きが一般の構造と同じか簡単な扱いになってもよい。



一般社会へのメッセージ

免震構造の普及のための記事をいろいろな雑誌に書いてきた。ここでは1997年秋に日本経済新聞に書かせていただいた記事を転載させていただく。一般向けに書いた記事である。

最近のニュースで，縄文時代に木造の建物が建てられていたとの遺跡調査が報告された。縄文時代にも周辺に大きな森や林はあったろう，１万年以上も続いた時代に，木材を使って家を建てようとした人がいないと考えるほうが不自然である。各時代，最善の努力と工夫をして人間は暮らしているはずである。

同じころの新聞に，東京に大きな地震が襲ったことを想定した災害予測が紹介されている。死者は７千人とある。解説には過小評価ではないかと書かれているが，阪神地震において６千数百人の方が亡くなられたことを考えると，同感である。問題は，読者が傍観者として，これらの記事を読み流してしまうことにある。関東地震から74年が過ぎようとしている。これからそう遠くない時期に大きい地震は起きるであろう。阪神地区に建てられていた建物とその他の地域にある建物に何も違いはない。大変な地震災害になると思う。このままでいたら自分もその一人になると考えたほうがいい。家族や友人のことも考えて欲しい。大切なのは命だけではない。この何倍もの人たちが大きなけがを受ける。その上，毎日の幸せな生活，仕事，世界の政治・経済活動の中での日本の役割，ここまで発展した社会を一瞬に壊してしまうことになる。

われわれは，建築に関する多くの技術を培ってきた。最新の耐震技術は，建物の下部を水平方向に動きやすくつくり地震動を建物の中に入りにくくする「免震構造」と，建物の骨組をしなやかにつくり，その骨組に地震のエネルギーを吸収するダンパーを組み込む「制振構造」である。縄文時代の人びとがやっていたように，われわれも最善の方法で建築を建てなくてはならない。

建築基準法に規定されている耐震設計法では２段階の強さの地震動を考えている。第１レベルは，建物の重量の20％ の力が横から作用するとし，これに対して建物には何も問題が起きず，元の形に戻るように考えている。これは普通の建物が60年間は使われるとして，その間に数回は受ける程度の地震動（80ガルから100ガルの加速度で地面が揺れる）の大きさに対応した考えである。

第２レベルは，建物の寿命の間に受けるであろう最大級の地震動として，上記の５倍（400ガルから500ガル）を考えている。これに対して建物を無損傷にすることは難しいため，ある程度壊れてもしかたないとし，倒壊だけは防いで，中にいる人を救おうと考えている。そのために，骨組を粘り強くつくる方法が用いられるが，壊れることを認めているため，地震後には，点検，修復が必要であるし，場合によっては取り壊すことになる。現行の建築基準法によった建物で，阪神地震を受けて倒壊はしなかったものの，その後に取り壊された実例もある。

建物が病院であったり計算機センターである場合の機能，これらばかりでなく，すべての建物がそれぞれ機能や生活をもっているわけであるが，これらを継続的に維持させようという考えは，建築基準法の中にはない。

大きな企業，公的な機関のように，全国に多くの建物を

所有しているような場合，個々の建物を十分に強くつくるために多くの費用を使うより，少ない費用ですべての建物をつくり，地震後に壊れたものだけ建て直すほうが経済的という確率計算は成り立つ。しかし，個人の所有である住宅の場合は倒壊してしまえば，すべてを失うことになる。阪神地震の後に，免震マンションが爆発的に建設され，ほとんどが完売されたのはこれが理由である。地震直後にも機能を維持させたい多くの建物に，免震構造が使われるようになったのもこのためである。

被害の影響がその建物だけにおさまらず，対外的に大きな影響を及ぼす政府の中枢の建物，原子力発電所などに免震構造が使われることをさらに期待する。

地震工学における最も重要な知見に，建物の固有周期は高さの高い建物ほど，高さに比例してゆっくりになり，地震時に建物に作用する力は，ゆっくり揺れる建物ほど小さくなる性質がある。例えば，建物の高さが5倍になれば，作用力は1/5になる。約30年前に建設された霞が関ビルもこの性質を利用して設計され，地震国日本に超高層建築の建設が可能になった。さらに，揺れを小さくするために，減衰性能を高めることが有効であることも分かっている。東京・新宿などにある高層建築の固有周期は約5秒であり，最近の超高層建築には，揺れを小さくするためにダンパーを建物の各階に組み込む制振構造が多く採用されている。

免震構造は，建物と基礎構造の間の縁を切ってつくり，建物の重量は間違いなく支え，水平方向にはできるかぎり柔らかく支持する方法でこの間をつなぎ，ここにダンパーを組み込むことによってつくられる。ここを免震層と呼び，ここには数ミリの厚さのゴムと鉄板を30から40の層状にして作る積層ゴムが使われる。これに，建物が載ったときの鉛直方向の縮みは2から3ミリ程度であり，ほとんど問題ではない。ゴムの上に建物を載せることに心配はご無用である。

これによって，建物の高さに関係なく，4秒程度の周期でゆっくり揺れる建物をつくることができる。先ほど，建物に作用する力は固有周期がゆっくりになるほど，小さくなる性質があることを述べたが，これに鋼材，鉛，粘性体などを用いたダンパーを組み込んで免震構造はつくられるため，免震層の上の建物に作用する水平方向の力は，レベル2の地震動を受けても，建物の重量の10% から15% 程度にしかならない。この力は，基礎が固定されている従来の建物がレベル1の地震動を受けたとき（20%）より小さい。一言でいえば，普通の建物に比べ，数倍以上安全であることになる。建物内部の揺れ方も同時に小さくなり，建物の柱や梁に生じるゆがみも，一般の建物が小さな地震を受けたときよりも小さくなる。病院でも計算センターでも何も問題は起きない。当然，建物の財産価値も失わない，人びとも安全である。生活はそのまま続けられる。

建設費が気になるであろう。最近の話題では，従来の工法とほぼ同額，場合によっては安い建設費でできるという話もある。若干建設費が高くなったとしても，もし大きな地震を受けたときに普通の建物の中にいたことを想像して比べて欲しい。結果は免震構造とは大違いである。人の命はお金には換えられない，毎日の幸せな生活を続けられる価値は何ごとにも代えられない。イニシャルコストでなくライフタイムで考えるべきである。

最新の話題として，高さが60m を超える超高層建築の基部に積層ゴムを組み込み，免震構造にすることで，建物をさらにゆっくり揺れるようにする「高層免震」の技術が開発されている。この効果は抜群である。街区をそのまま免震構造にしてしまうことも考えられている。21世紀に向け，日本の免震，制振の技術は世界をリードして進み始めたといえる。

大きな組織の場合，過去から継承されてきた方法を，継続的に維持することが第一となりがちである。新しい技術の普及の妨げになる場合もある。しかし，これらに属する人々が免震構造の良さを理解された後には，「次のプロジェクトには免震構造を」と互いに競い合うようになるに違いない。21世紀を目前にして，免震構造，制振構造が常識になることを大いに期待する。

免震構造の健全な普及を目的として，1993年に日本免震構造協会が設立され，活発な活動を続けている。ホームページ http://www.jssi.or.jp/を見て欲しい。

（わだ あきら―東京工業大学教授・建築物研究センター長）