

免震構造の特長・歴史・安心感

和田章
東京工業大学教授

免震構造の特長

普通の建築の場合、そのなかで動くものはドアとサッシだけである。自動車、車両の車輪を支えているばね、ショックアブソーバの構造、飛行機の離着陸時に使われる脚の構造などでは外的な振動・衝撃を軽減・防止するために積極的に動くメカニズムを導入している。建築構造だけが地面に固定されて作られなくてはならない理由はない。

サンフェルナンド地震のさいのタコイマダム、宮城県沖地震のさいの東北大学での記録にあるように、地震時に構造物内に働く応答加速度は1G (980 cm/s²) に達することが実証されている。剛性の高い低層建物が弾性応答すると、高層ビルの設計に用いられている地震動を同じ強さで入力した場合に、1Gを超える最大応答加速度が得られることも周知であり、現行の建築構造設計における二次設計はこれを基本として組み立てられている。

この応答に対して、1Gの水平力に耐えるほど強くない代わりに靱性、変形能力のある建物を作り、地震時の入力エネルギーを構造物の塑性変形によるひずみエネルギーに置換させるとというのが今の一般的な耐震設計の考え方である。

この結果として、建物は変形できることがもっとも重要事項であると考えられすぎているように思われる。例えば、柱梁で囲まれた窓台等の雑壁の周囲にスリットを設けることの行きすぎがその最たるものである。

このように現在の設計法で建てられる中層の建物は、大地震を受けると、建物が壊れない場合は1Gに近い加速度応答を生じ建物内部は騒然とした状態となり、逆に、靱性に期待した変形能力のある建物では応答加速度は前者に比べ若干小さくなるが、大きな層間変位を受けることになる。一般の人々は自分の住んでいる部屋が地震時に菱形に変形するものの、崩壊することはないという話を聞かされてはいるものの、そのことを常に気にしながら生活しているわけではない。このことは一般の大工、左官、建具屋として働く人々についても言えることで、建物ががっちりとして変形しないものと思いついで工事をやっている場合がほとんどであろう。その結果、応答加速度は若干小さくなるものの変形能力のある構造の場合は、外装、間仕切り壁等の二次構造が建物の変形についていけず、大きく壊れてしまう。もし、すべての工事をその相手である建物が変形することを考慮して行ったとすると、日常生活の方が、雨漏り、気密性、遮音性などの点で成り立たなくなってしまう。

これに対し地盤と建物を絶縁しようとした免震構造は、ほとんどの地震入力エネルギーを免震装置部分の変形によって吸収させる方法である。絶縁という意味では、建物を地盤から完全に浮かした状態が想定できる。もし、これが可能であれば、建物は絶対原点に対して不動となり、まったく振動現象を生ぜず地表面だけが動いた状態となる。しかし現状では、ある水平剛性をもったばねで建物と地盤をつないでいるので、絶縁しているとは言いきれない。その結果、免震構造といえども、地震に対して応答し、上部構造も振動する。しかし、免震装置部分を変形しやすく作ってあるため、上部構造の層間変形は小さく、応答加速度も小さくなる。このように、大きく変形しているのは免震装置部分だけである点が特長である。一

般の住人は装置部分が変形することだけを忘れないように生活すればよく、上部構造の層間変形は小さいので自分の住んでいる空間が菱形に変形することは忘れてもよい。

免震構造の歴史

現在、建設されている免震構造は鉛直剛性に比べて1/1000と極端に水平剛性の小さな積層ゴムを支承として用い、それぞれの設計者が独自に考案したダンパーを組み合わせたものがほとんどであり、建設中のものも含め70棟の免震建築が我が国に建てられている。これは、単なる流行ではなく真に免震構造の特長が理解されて来たからであると思う。免震構造の歴史については佐野利器・武藤清共著の『家屋耐震並耐風構造』(1935年発行)に詳しく述べられている。その中では家屋の耐震構造を図2のように分類して説明を進め、特に絶縁構造(免震構造)のアイデアをいろいろ紹介し、現在の積層ゴムのような理想的な支持装置がなかったためと思うが、昭和10年の段階では免震構造を一般にはお薦めできないとして結んでいる。

積層ゴムの利用によって我が国に次々に免震構造が建てられ始めた数年後に、大橋雄二・山口昭一が『建築技術』(1987年5月号)に10ページにわたって免震構造の歴史を書いている。これによると最も古い論文は1891年の河合浩蔵による「地震ノ際大震動ヲ受けザル構造」であり、米国において英国人医師J.A. Calantarientsが1909年に特許として提案したより18年も前であったことになる。その後、関東大震災の後には、鬼頭健三郎と山下興家の特許が1924年にとられている。1927年には中村太郎の「地震動エネルギー吸収設備」の提案が行われ、1928年には岡隆一によって「免震基礎」研究開発が始められている。これは1932年に特許となり3棟の建物に使われ、現存している建物もある。1934年には真島健三郎によって「耐震家屋構造」の特許がとられたが、これは現在言われているSoft Storyの考え方と同じものである。その後の研究としては鷹部屋福平の「制震性耐震構造」(1940年)、大築志夫のローラーとバネを用いた「減震構法」(1951年)、小堀鐸二の「制度構造に関する一連の研究」(1954年以降)、園部泰寿の「吊り下げ構造の制度構造」(1957年)がある。

1964年には勝田干利によって電気-油圧式の自動制御系を利用した免震装置の研究が発表されている。現在話題となっているコンピューター制御による免震・制震構造の走りである。1965年にはニュージーランドで開かれた第3回世界地震工学会議で松下清夫・和泉正哲によって数値解析による免震構造の可能性に関する論文が発表されている。その後、1969年のスコピエの小学校、1970年代に入り、マルセイユの小学校、南アフリカの原子力発電所等にゴム支承を使った免震構造が建てられるようになり現在につながっている。積層ゴム支承とダンパーを組み合わせた形式による免震構造はニュージーランド、米国海岸にも数棟建てられているが、多田英之・山口昭一によって2階建個人住宅(1983年)に用いられたことから始められた我が国が現在では最も多くの免震構造所有国となっている。1989年夏には本会から『免震構造設計指針』が出版され、本年暮には改定版が出されることになっている。従来からの耐震設計法と同格の構造法として免震構法が肩を並べる時代も遠くないと考える。

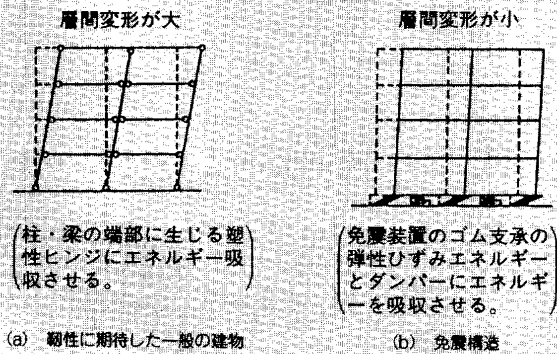


図1 従来の耐震建築と免震構造

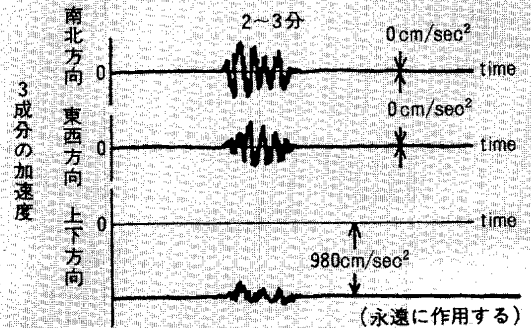


図3 重力の加速度を考慮した地震動の3成分と経続時間

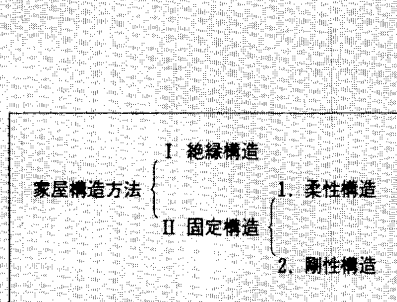


図2 佐野利器と武藤清の耐震構造の分類

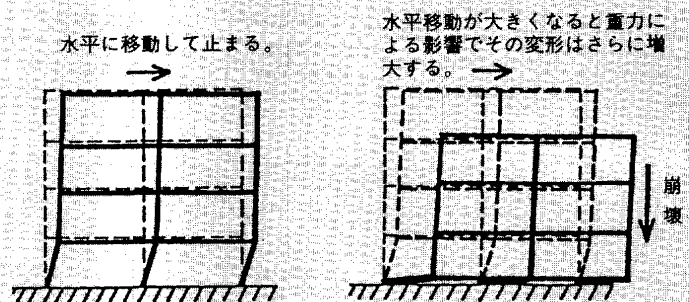


図4 地震時の建物の崩壊への重力の影響

免震構造の安心感

構造設計において、自重の計算として考慮されているから忘れられているわけではないのであるが、常時に作用している重力の加速度は 980 cm/s^2 と非常に大きい。一般の耐震設計で考えている水平動の加速度成分はこれの $1/5 \sim 1/2$ であり、建物が大地震時に崩壊するかしないかを決定するのは水平力ではなく重力であると言っても良いほどである。図3は、地震が始まる前から終わった後までの加速度記録を水平2、鉛直1の3成分について模式的に書いたものである。水平方向の2成分は2~3分間で終了してしまうのに対して鉛直成分は絶対値も大きく経続時間も長い(無限)ことがよく分かる。

メキシコ、アルメニアの地震災害を見るまでもなく重力の影響が大きいことは図4の左右の図を見比べるとよく分かる。左図に書いたように水平力だけが作用しただけでは建物は横にずれるだけで崩壊することはない。しかし、右図を見て分かるように、常時には垂直に立っていたことにより建物の重量を支えることができていた柱は、傾いてしまうと、重力の効果でさらに傾こうとするため、ついには2階の床が地面に着くまで変形が止まらず崩壊してしまう。

免震構造に使用されている積層ゴムは 1000 kg/cm^2 の鉛直圧に耐え、荷重除荷によって弾性回復したと言われるほどの耐荷力があり、現状では 100 kg/cm^2 の圧力を常時に作用させても問題ないと言

われている。一般の建物の柱に用いられているコンクリートの長期許容圧縮応力度は $70 \text{ kg/cm}^2 \sim 100 \text{ kg/cm}^2$ であるから、積層ゴムの強さはコンクリートと同等以上であると言える。言い換えると最下階の柱の下部にそれと同じまたは小さい断面の積層ゴムを置くことによって建物を支持でき、免震構造を作ることができることになる。免震構造は非常に現実的な構法であると言える。

さらに、一般の建物では鉛直荷重を支持している柱・梁に地震時の変形を強要し、塑性変形に伴うエネルギー吸収までを期待している。これに比べ免震構造では積層ゴムはかなりの大変形まで弾性変形が可能であり鉛直支持能力を消しなうこともないので建物を支えることに専念させることができる。この上に地震時の変位振幅を減少させるためのダンパーを併用することになるが、ダンパーはほとんどの場合鉛直荷重を受けない仕組みとしているため、水平動の制御だけに専念させることができる。

以上述べてきたように、地震時の建物の崩壊現象には重力の影響が大きいこと、従来の建物では重力への抵抗部材に水平方向の力、エネルギー吸収までを期待していたことに対し、免震構造では鉛直荷重の支持と水平動によるエネルギー吸収を独立した部材に負担させていることが、免震構造の持つ最も大きな安心感であると考え