1989- 3 SAMPLE

総研・CRI

第26回東京工業大学総合研究館講演会

制振・免震技術の現状と展望

平成元年 3 月17日(金)

主催　東京工業大学総合研究館
共催　東京工業大学研究・情報交流センター
後援　財団法人　理工学振興会

免震構造の歴史と原理

東京工業大学助教授　和田　章

1．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が、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足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して、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２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の水平力に静的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体の塑性変形によるひずみエネルギーに置換させるというのがいま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、柱はり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、大地震時の応答層間変形を階高の1/100まで許容し、この変位が残留変形として残る可能性もある、などである。

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が壊れないという話を聞かされてはいるものの、そのことを常に忘れずに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込んで工事を行な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２次構造が建物の変形について行けず、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なったとすると、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Base Isolation Systemによる免震構造は、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を想定でき、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せずに地表面だけが動いた状態となる。しかし現状では、或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。

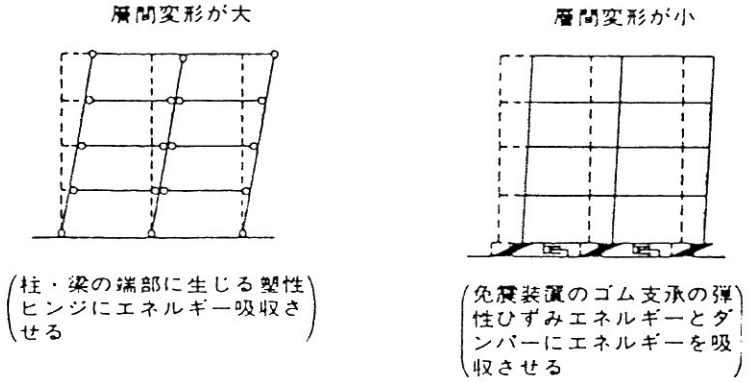


図1　従来の耐震建築と免震建築

免震構造として建てられた建物について地震観測が行なわれている。これによると、地表の観測加速度に比べ上部構造の応答加速度は1/3～1/4となっている。しかしこれらの記録を分析すると、思いのほか短かい周期成分が含まれており、船に乗っているようにゆらりゆらりと揺れるようになっていない。1次固有周期をさらに大きくし、ダンパーの性能を改良することにより、揺れ心地の良い免震構造を開発し得ると考える。しかし、この開発において最近問題となっていることに、免震構造がその効果を発揮する地震動のレベルを毎年1度は来るようなレベルに置くか、50年から100年に1度のような大地震に置くかというかなり基本的なことがある。この結論はここでは出さないが、中小地震のバンパーと大地震用のダンパーを併用した免震建築も建設されるようになっている。

2．免震構造の歴史

現在、流行のように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、それぞれの企業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、今年中には約30棟の免震建築が我国に建てられることになる。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」昭和10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）を一般にはお薦め出来ないとして結んでいる。

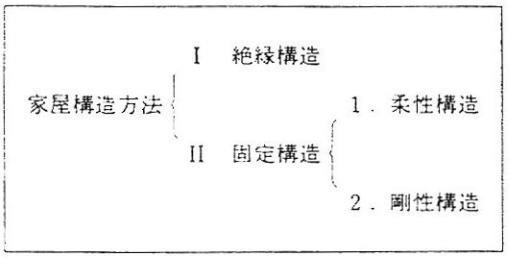
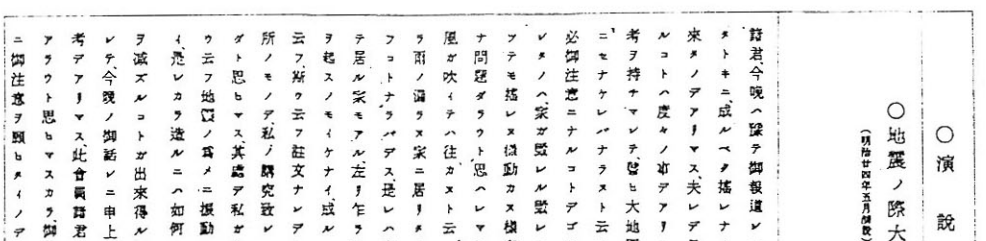


図２　佐野利器と武藤清の耐震構造分類

最近では大橋雄二、山口昭一が建築技術の昭和62年５月号に10ページに亘って免震構造の歴史を書いている。これによるともっとも古い論文は1891年の河合浩蔵による「地震ノ際大震動ヲ受ケザル構造」（図３）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 First 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、小堀鐸二の制震構造に関する一連の研究」1954年以降、園部泰寿の「吊り下げ構造の制震構造」1957年がある。

1964年には勝田千利によって電気－油圧式の自動制御系を利用した免震装置の研究（図４）が発表


○演　說

○地震ノ際大震動ヲ受ケザル構造

（明治廿四年五月講演）

工學士　河合浩蔵演說

市東謙吉速記

諸君今晩ハ態テ御報道ヲマレメ通リ、私ニ地震ガ揺リマレメトキニ成ルベク揺レナイ構造ノ家ヲ造レト云フ注文ガ來タノデアリマス、夫レデ日本ノ如キハ隨分常ニ地震ノ揺ルコトハ度々ノ事デアリマレテ其地震ノ爲メニ壞ヘレメ考ヲ持チマレテ、壞ヒ大地震ガ揺リテモ此家ガ潰レヌヤウニセナケレバナラヌト云フコトハ、諸君ガ御建築ノトキニ必御注意ニナルコトデゴザリマセウ、只私ガ此頃頼マレマレタノハ家ガ壞レル壞レヌト云ノデハイケナイ、地震ガ揺フテモ揺レヌ振動カヌ横家ヲ造レト云フ、是レハ隨分厄介ナ問題ダラウト思ハレマス、ナヤウド雨ガ降ッテハ往カヌ、風ガ吹イテハ往カヌト云フヤウナモノデアリマス、併シ乍ラ雨ノ漏ラヌ家ニ居リ、風ニ煽ケヌ家ニ住ミタイト云フコトナラバデス、是レハ亦方法モゴザリマス、現ニヤウテ居ル家モアル、左リ乍ラ地震ノ揺フトキニ、多少ノ振動ヲ起スノモイケナイ、成ルベク振動ガナイ方ガ宜レイト云フ、斯ウ云フ注文ナレバスルト之ヲ今日自分ガ御話レスル所ノモノデ、私ノ講究致レマレタコトハ、餘程六ケレイ問題ダト思ヒマス、其處デ私ガ今日造フタト云フノハ是迄ニヤウ云フ地震ノ爲メニ振動セヌ家ヲ造フタト云フノデハナイ、是レカラ造ルニハ如何ニレテ其振動力ノナイ、否振動力ヲ減スルコトガ出來得ルデアロヲト云フ小サナ考ヲ持出レテ、今度ノ御話レニ申上ケル譯ノ次第デアリマス、此會員諸君中デハ地震學會ノ御方モ御出デアラウト思ヒマスカラ、御心附キノ點ガ有ラバ充分ニ御注意ヲ願ヒタイノデアリマス

図３　建築雑誌明治24年60号より河合浩蔵の演説の初めの部分を抜粋

U.D.C. 699.84 : 624.15 : 621.-52

日本建築学会論文報告集
第102号・昭和39年9月

自動制御による免震法の研究（I）

（特に自動制御免震法の原理と理論）

正会員 勝 田 千 利*
同 益 頭 尚 和**

要　約

本研究は，電気-油圧式の自動制御系を利用した，著者の新しい構想による免震装置について，数種類の方法をのべ，その計算値と実験値とを比較検討したものである。（実験については「自動制御による免震法の研究Ⅱ」参照）結果を要約すれば，次の5項目となる。

1. 大出力時の応答速度のはやい電気-油圧式の制御系をもつこの免震装置は，地震時の低い周波数の激しい地動に対してよい免震性能をもっている。

2. この装置は，免震装置として使用できるばかりではなくて，地震計の支持台として利用すれば，見掛け上，振子の固有周期をながくし，減衰常数（Damping Factor）を大きくするはたらきがある。

3. 自動制御による免震装置の伝達関数は，装置に使用する地震計の固有周期，減衰常数と，振動検出器，増巾器，油圧系等の常数をふくむ関数としてあらわされる。

したがって，各常数を適切にえらぶことによって，希望する周波数帯で動作する免震装置をつくることができる。

4. 著者の実験結果では，振動台振動周波数 1 c/sec，振巾 ±5 cm の正弦波形の振動をあたえたとき，免震台振巾/振動台振巾≒0.03 であった。

5. 自動制御による免震装置を実際に構造物に応用するためには，更に，大形のサーボ弁やアクチュエーターの研究と，x, y 2方向に動作する免震装置の機構を開発しなければならない。

§1. まえがき

従来の免震構造の研究は，約 30 年以前より，主として岡隆一氏，によって研究が発表され，いくつかの建築物に実際に採用された。また約 20 年以前大築志夫氏により研究が発表された。

岡氏の方法には動的に長さの変化する垂直振子が使用され，大築氏の方法には1組のベアリングとスプリングが使用されている。

これらの方法で免震性能を向上するためには，振子又はスプリングの固有周期を地動の周期（0.1～5 sec）よりも充分に長くしなければならない。しかし，振動系によるこれらの方法では，振子等の固有周期を十分長くすることはなかなかむづかしい。

著者の新しい構想による方法では，電気-油圧式の制御系（サーボ機構）を免震装置に利用している。この方法では，振動系の免震装置のような振子，スプリング，ダンパーは使用せず，電気-油圧式のサーボ機構，即ち機械的および電気的な機器を使用する。

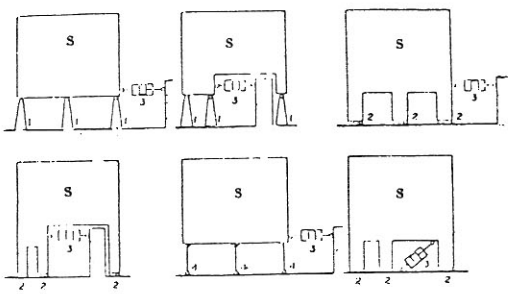
自動制御による免震装置は，地震時の約 0.1～10 c/sec の低い周波数の激しい不規則な地動の免震に適している。

§2. 電気-油圧式自動制御による免震装置の原理と要素について

本論では，水平動に対する著者の免震方法を説明する。上下振動，回転振動の免震方法も全く同様に説明することができる。

第1図は構造物に自動制御による免震装置を応用した例である。第1図の 1,2,4 は鉛直荷重を支持し，上部構造体の水平変位に対する抵抗力が非常に小さく設計される支持部分であり，3はサーボ弁により制御されるアクチュエーターをふくむ水平支持材である。この水平支持材は，建造物平面上で，x,y 2方向に用いる。

第2図は本方法の原理図，第3図は本装置の構成図と



1：上端球座，下端球面の支持柱
2：ボール・ベアリング
3：アクチュエーターをふくむ水平支持材
4：鉛直荷重を支持し，層剪断力に対してきわめて可撓的な支持柱

第1図　自動制御免震装置の構造物への応用例

* 東京工業大学　教授　工博　** 東京工業大学　助手（昭和39年7月3日本稿受理，討論期限40年2月末日）

図4　日本建築学会論文報告集第102号昭和39年9月より勝田千利、益頭尚和の論文の要約部分を抜粋

されている。現在話題となっているコンピュータ制御による免震・制震構造の走りである。1965年には New Zieland 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後れて始めた我国が現在では最も多くの免震構造所有国となっている。本年夏には日本建築学会から「免震構造設計指針」が出版されることになっており、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。

3．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、一般の耐震設計で考えている水平動の加速度成分に比べ2倍から数倍と大きく、建物が大地震時に崩壊するかしないかを決めるのは水平力でなく重力であると言っても良い程である。図5は、地震が始まる前から終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

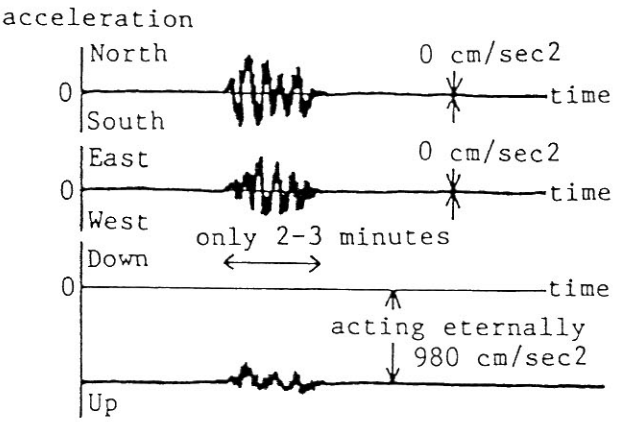


図5　重力の加速度、地震動と経続時間

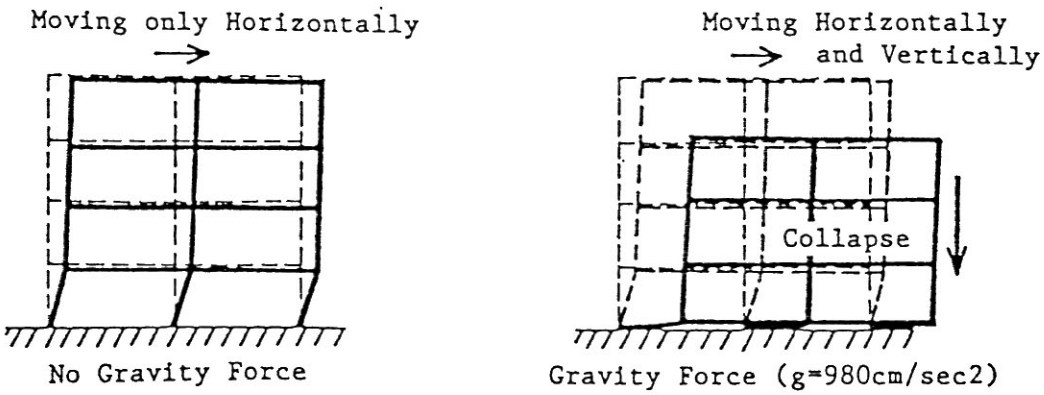


図6　地震力を受けた建物の崩壊への重力の影響

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。

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6の左右の図を見比べるとよく分る。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づ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、遂には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。

図7に示すように免震構造に使用されている積層ゴムは1000g/cm²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程の耐荷力があり、現状では100kg/cm²の圧力を常時に作用させても問題ないのではないかと言われている。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70kg/cm²～100kg/cm²であるから、この両者の強さは同等であると言える．言い換えると最下階の柱の下部にそれと同断面積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り、この構造は非常に現実的な構法であると言える。

さらに、一般の建物では図8の右図に示すように鉛直荷重を支持している柱自身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

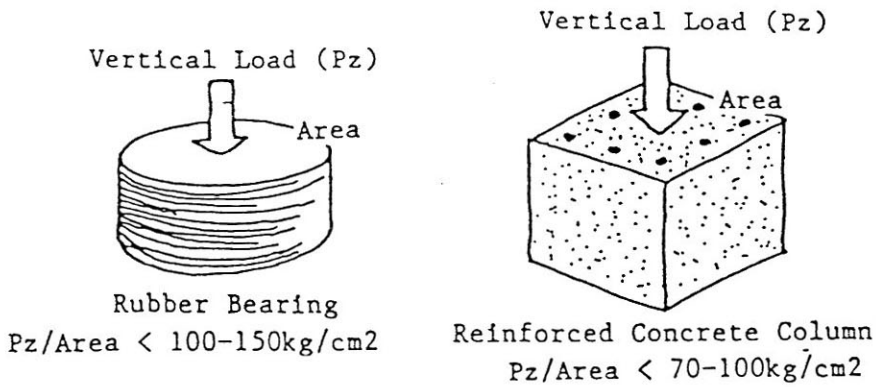


図7　免震構造の支承と一般の建物の柱の鉛直荷重支持能力

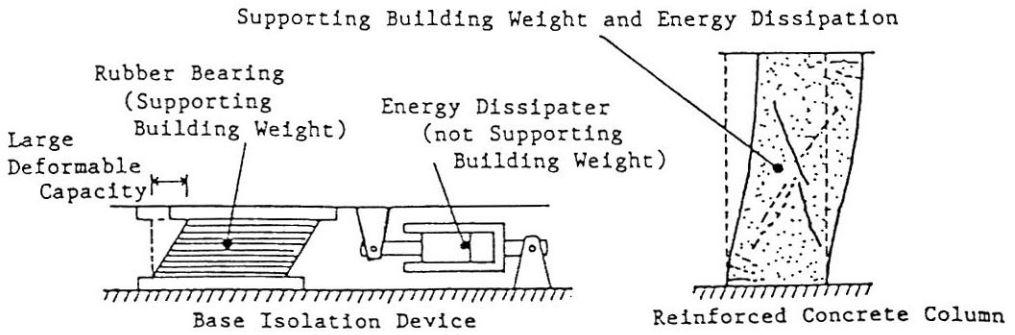


図8　免震構造の支持装置とエネルギー吸収装置に対する一般の建物の柱へ要求される機能

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、これ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することができる。

以上述べて来たように、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る。