知って得する　身近な・Science

柳に風 ― 免震構造のお話

柳に風

工学博士　**西尾　宣明**
元・東京ガス㈱ 基礎技術研究所

これは中国で四川省大地震が起きたばかりの頃のお話です。その約3ヶ月後に北京オリンピックが開催されましたが，その結果についてはすでに皆さんがご存知の通りです。

中国四川省大地震

与太郎　大家さん。こないだの中国の地震，すごかったですねえ。6万人以上も死んだんでしょう？　とにかく，家を無くして被災した人が700万人以上っていうんだからすごいですね。

大　家　本当に驚きましたね。行方不明者がまだ2万人近くいるようだから，死者は8万人を超えるでしょうね。

インターネットで調べた新華社通信の情報では，倒壊家屋が約536万戸というから（5月20日現在）関連する被災者は700万人どころじゃないでしょうね。それも含めて，被災者の総数は4,555万人とありましたよ（6月2日現在）。

与太郎　へえー。すごいもんですね。日本だったら3人に1人は被災者ってことか。国がぶっつぶれちゃいますね。

中国だと ― 人口は10億ぐらいでしたっけ？

大　家　12億と13億の間ぐらいですかね。この人たちはほとんど財産も仕事も失っていると思いますよ。それを救済することはまさに国家の一大事業だと思います。

与太郎　それでも ― ええーと，大体25人に1人じゃないですか。とんでもない数字ですね。北京オリンピックをやるなんて悠長な話じゃないんじゃないですか？

大　家　まったく同感ですね。しかし，世界に対する面子（めんつ）の上からも止めるわけには行かないでしょうね。政府も頭が痛いことだと思います。

与太郎　あの地震，マグニチュードはたしか8だったですか？それって関東大震災のときと同じぐらいじゃないですか？

大　家　そうですね。ほとんど同じ規模の地震と言っていいでしょうね。あのときは家屋の全半壊が合わせて約20万戸でしたね。山崩れや崖崩れもずいぶん多かったんですね。でも，四川省の場合と違って，人が住んでいたのは平地のほうだったから，その影響は少なかったですね。

与太郎　そうか。四川省では山も崩れれば，建物も崩れるし ― 道路は寸断されるし，川が堰き止められてダムができちゃったりするし。どうしようもないですね。

大　家　そうですね。新潟県中越地震のような状態が何十倍もの広さに起きたようなものですね。

与太郎　新聞で見たんですけど，建物の耐震性も低かったっていう話ですね。学校の建物なんか6,900棟もつぶれて生徒が6,000人以上も下敷きになったって書いてあったから，とんでもない話ですね。

大　家　たしかに，耐震設計の基準値も低かったんでしょうね。何しろ，今度動いた断層はこの1千万年ぐらいは大した活動をしていなかったようですから，基準も低く設定されていたかも知れませんね。それに，手抜き工事もずいぶん多かったらしいですね。

設計震度とは

与太郎　それですよ。わたしが我慢できないのは。ほら，例の耐震偽装。それに手抜き工事。鉄筋の本数をごまかしたり水増しセメントを使ったり ― 。職人の風上にも置けないですよ。だって，鉄道の線路を枕木に取り付けるのに，5本に1本ボルトを省くようなもんでしょう？いずれは必ず事故が起きて人が死にますよ。人が死ぬのが分かっていて手を抜くのは殺人とおんなじことじゃないですか。

大　家　いやあ。私も同感ですね。人の命に関わることなのに金銭の利益のために偽装や手抜きをするのは殺人罪を犯すのと変らないと思いますね。

与太郎　それを平気で犯すやつが多いんだから。日本はどうなってるんだか ― 。役人は役人で自分のことばっかり考えて，全然頼りにならないし ― 。

大　家　本当に困ったことですね。我々まともな人間がもっと強くならなければならないんですかね。

ところで，与太郎さんはこんな話をしにきたんじゃないでしょう？

与太郎　あ，そうそう，そうなんですよ。関係ないこともないんですがね。最近免震構造っていうのをよく聞くんだけど，あれはどういうものなんですか？

その前に ― 耐震設計の考え方

大　家　うん。たしかに最近よく聞かれるようになりましたね。でもその前に，一般的な耐震設計の考え方をおさらいしておかなければね。

耐震設計というのは，つまり，地盤が揺れれば建物も揺れる ― 揺れれば建物は変形し，大きな力が加わる。その変形や力を予想して，それに対して安全なように建物を設計するということです。

与太郎　その力っていうのは震度5とか7とかいうのでしょう？それって法律で決まってるんじゃないんですか？

大　家　地震の強さを表す震度とは違って，地域や地盤条件や建物の重要度などによって一定の加速度が決められているんですね。設計震度と言って，重力の加速度との比で表したりします。つまり，建物の重さを1としてその何割ぐらいの力が建物を倒す様に働くかということです。一般の建築物だと最大で300ガルですね。重力の加速度が大体1,000ガルぐらいだから，設計震度は0.3というところです。建物の重さの約30％の力が横向きに働くという想定です。

与太郎　でも，中越地震のとき柏崎の原発では690ガルだったって言うじゃないですか。300ガルの設計じゃ持たないんじゃないですか？

大　家　原発の場合は一般の建物よりずっと大きな加速度を想定していますから，それほど危ないことはないと思います。ただ，それは原子炉本体など，大事な部分の話で，付属設備は一般の場合と同じですね。そういう設備ではやはりかなりの被害があったようですね。

仮に放射能漏れはなかったとしても，付属設備に問題が生じれば発電所として機能しなくなることもありますから，やはり，全体としての耐震性を高めることが必要になりますね。

与太郎　実際の地震じゃ1,000ガルとか2,000ガルなんてこともあるようですよね。そうすると設計震度っていうのに換算すると0.3どころじゃないですね。

大　家　設計震度は1とか2でなければならないことになりますね。しかし，本当に危険かどうかは振動数にもよりますから，一概に加速度だけで判断することはできないんですよ。

一つの例として，私が現役の頃，ガス管のすぐ近くで杭打ち工事をしたときどのぐらい影響を受けるか実測したことがあります。杭打ちの衝撃で2Gや3G，つまり2,000ガルや3,000ガルの加速度が簡単に発生するんですね。しかしそういうのはとても振動数が大きいんです。何百ヘルツ何千ヘルツと言った，とても速い振動なんです。

こんなに速いと変位 ― 地盤の動きの大きさということですが ― それはうんと小さくなって，何ミクロン，つまり千分の何ミリと言った小さなものになりま

す。蚤が武者震いしたようなもんですね。これでガス管が壊れるなんて絶対にあり得ないですね。

与太郎　へえー。じゃあ，柏崎の場合もおんなじなんですか？

大　家　その可能性はありますね。ただ，新聞には振動数のことが何も出ていないので，断言はできませんがね。

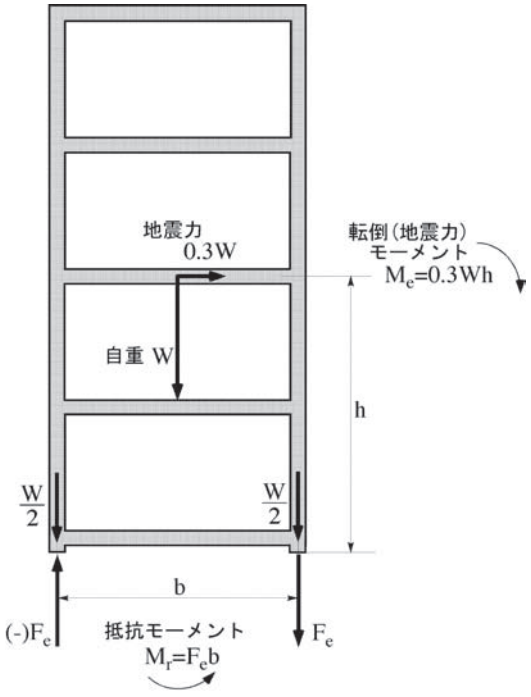
与太郎　そうか。ガル数だけじゃほんとに危険かどうかわかんないんだ。専門家は何で振動数のことを言わないんですかね。

大　家　素人には複雑なことを言っても分からないと思ってるんですかね。でも，それではいつまでたっても一般の人に理解してもらえるようにはなりませんね。

簡単な耐震設計の例

与太郎　それはそうと，その震度を使った耐震設計ってどんな風にするんですか？

大　家　一番簡単な例を挙げれば，図のようなものになりますね。



建物に加わる地震力・反力等の例

左右対称の箱のような建物があって，重さをWとします。その重心の高さhのところに震度0.3，したがって0.3Wの地震力が働くものとします。これによって生じる転倒モーメント ― 建物をひっくり返そうとする偶力のことですが ― それは地震力が作用する高さhを掛けて，図の中のM_eの式のようになります。添字のeは地震（earthquake）の頭文字です。

それに対抗して柱（あるいは壁）にはF_eという力が生まれ，それに建物の幅bを掛けたM_rという抵抗モーメントが発生します。添字のrは抵抗（resistance）の意味です。

この二つのモーメントは釣り合う筈ですから，

$$M_e = M_r$$

として，地震に対する反力が

$$F_e = 0.3Wh/b$$

のように求められます。

与太郎　そうすると，このF_eっていう力に持つように柱の太さや鉄筋の本数を決めるんですね。

大　家　もともと建物の重さが半分ずつ左右の柱にかかっているので，それを足し合わせたものが実際の力になります。左と右を1と2で表せば，それぞれ

左側：$F_1 = W/2-F_e = W/2-0.3Wh/b$
$= (0.5-0.3h/b)\ W$

右側：$F_2 = W/2+Fe = W/2+0.3Wh/b$
$= (0.5+0.3h/b)\ W$

のようになります。

与太郎　ふーん。右と左で違うんだ。それで，左側の柱だけど，幅に対して高さが高いときは括弧の中がマイナスになりますよね。

大　家　そうです。柱の基礎を持ち上げるような力，つまり，引張り力になります。コンクリートの場合は圧縮には強いけれども引張りには弱いという話をしたことがありますね。そこで引張り力を受け持つのが鉄筋の役目になります。

与太郎　その鉄筋の本数をごまかしたんじゃ，たまんないわけだ。

免震構造が役に立った！

大　家　仮にごまかしなどなかったとしても，力に力で対抗するこのような耐震設計には一つの重要な問題が残るんですね。

与太郎　へえー。強いだけじゃ駄目なんですか？

大　家　1994年にアメリカはロサンゼルスでマグニチュード6.7の地震がありました。ノースリッジ地震とも呼ばれています。死者が約60人，負傷者が9,000人以上，被災した建物が約13,000，そのほか高速道

路の大規模な崩壊があったり，水道やガスの輸送管にも大きな被害が生じました。

与太郎　ああ，こっちの新聞にもそんな話が載ってたような気がするな。

大　家　そのノースリッジ地区に大きな病院があったんです。

与太郎　それが手抜き工事だったとか？

大　家　いや，建物にはほとんど被害がなかったんですが，医療のための器械や薬品の棚が倒れたりして，医療もなにもできなくなってしまったんです。

与太郎　そうか。建物が丈夫でも中のものがひっくり返ったんじゃだめなんだ。しかも，地震で怪我人も沢山出てるって言うのに。

大　家　病院だけじゃなくて，大切な美術品などを納めている美術館や博物館などではそれが問題ですね。

実は，その地区に南カリフォルニア大学の病院があって，免震装置を施していたんですね。そこでは建物はもちろん，中の設備や備品類にも何の影響もなくて，平常通りに手術などを続けることができたそうです。

与太郎　へえー。すごいんですね。アメリカじゃ，ずいぶん前から免震装置っていうのを使ってたんですね。

大　家　建物を免震構造にすると建築費も1割以上は高くなりますから，一般の建築にそれほど普及しているわけではないんですが，今話した病院だとか，文化遺産に指定された古い建物とか，大事な公共建築物などにはかなり前から応用されていますね。

与太郎　古い建物の場合はどんな風にするんですか？

大　家　基礎の周りの，外からは見えない部分に免震装置を取り付けて改修するんですね。

日本でも東京上野の国立西洋美術館で，1998年に建物全体の免震化の工事がされていますよ。なにしろ，ル・コルビジェという有名な建築家が設計したものですからね。それに高価な絵や彫刻がひっくり返ってしまったら莫大な損害になりますからね。前庭にある有名な地獄の門というロダンの彫刻も免震台の上に載せるように改修したんですね。

最近ではマンションや戸建ての住宅などにもだいぶ使われ始めているようです。

与太郎　ふうーん。そうなのか。

その免震装置ってどんなものなんですか？

免震装置のいろいろ

大　家　テレビのお笑い番組で，ベトベトツルツルの液体のようなものを敷いた床の上で二人が倒し合いをする余興を見たことがないですか？

与太郎　ああ，あります，あります。大きなプロレスの選手がそれほど強そうでない芸能人に負けたりしてね。大笑いですよ。

大　家　あれは足と床の間の摩擦が無くなるから，自分の動きを思った通りに制御できなくなるんですね。

逆に考えれば，床がどんなに揺れても人には影響しないわけです。免震装置は基礎と建物の間の摩擦を切って，ツルツルにしてしまうものと考えればいいですね。

与太郎　なーるほど。でも，どうやってその摩擦を切るんですか？

大　家　そうですね。金属同士のすべりを利用する「弾性すべり支承」，コロを使った「転がり支承」，バスなどで使われている空気バネのようなものを使った「AIR支承」など，いろいろありますが，良く使われるのは「積層ゴム支承」でしょうか。これは厳密に言えば摩擦を十分に切るものとは言えないんですが，大きな荷重も支えることができる，一番信頼性の高い装置です。ここではそれを例にとって説明しますね。

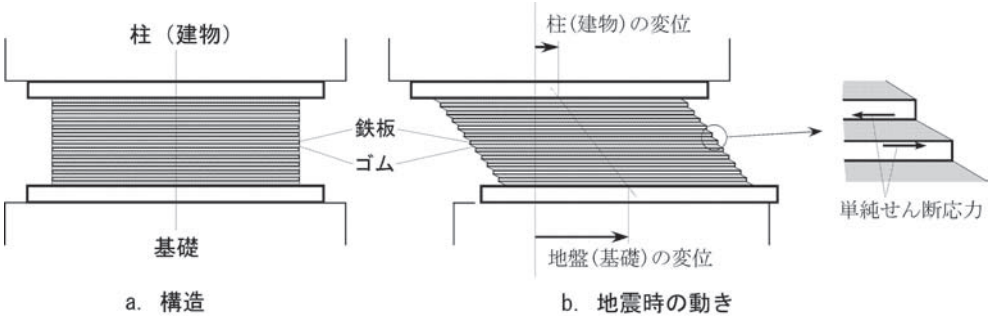
積層ゴム支承の働き

大　家　これは円盤状の薄い鉄板とゴム板を図のaのように交互に積み重ねたものです。積層ゴムと呼びますが…。基礎の部分が地震で ― 例えば右のほうに動くと，bのように各層がずれるように変形して，建物のほうはあんまり動きません。このようにずれる時には，もちろん支承にはせん断力が生じていますから，その分建物にも力が伝わります。しかし，基礎と建物が直接つながっているのに比べたら，伝わる地震力はうんと小さくなります。これが「すべり」と同じような効果になるわけです。

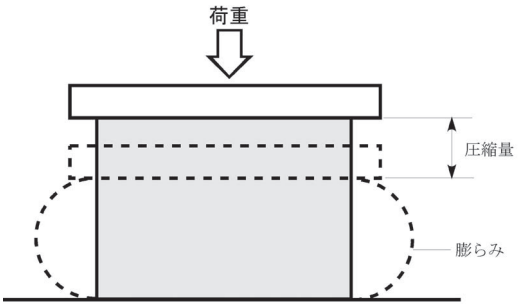
与太郎　ふーん。でも，なんで鉄板とゴム板をそんな風にいっぱい重ねるんですか？

大　家　うん。なかなか良い質問ですね。これはゴムの弱点を抑えながらその性質をうまく利用した，すばらしい発明だと思います。

その前に，直径と高さがあまり違わないような，次



積層ゴム支承の構造と働き



ゴム円柱の圧縮変形（高さ／直径比が大きいとき）

の図のようなゴムの円柱を考えますね。これに大きな荷重を加えると，ゴムの高さは縮み，横方向には大きくふくらんで破線のようになります。こうなることは与太郎さんにも想像がつくでしょう？

与太郎　分かります，分かります。長く置くと，ふくらんだところにはひびが入って，力を取ってやってもゴムは硬くなってて元に戻らないんですよね。

大　家　よく観察していますね。実にその通りなんです。ゴムには半ば液体のような性質があって，このように流動するんですね。流動したままにして置くと酸化したり，ゴムの分子がぶつぶつに千切れたりして，弾力性が無くなってしまいます。

そこで，ゴムの円柱を，今度は薄い鉄板などで包んでみますね。そうするとゴムは横にふくらむことができないから，上下にもほとんど縮まずに荷重を支えることができます。流動もせず空気に触れる部分も少ないからゴムの弾性も劣化しません。

話は変わるけれども，水道の継ぎ手とか水栓などに昔は板状のゴムパッキンがよく使われていましたね。あれが長い間には硬くなって水漏れするようになります。ところが今ではほとんどがO（オー）－リングに変っていますね。あれは溝の中に閉じ込められたゴムは流動しないのでいつまでも弾力性が保たれるという性質を利用しているんです。

与太郎　へえー。そうだったのか。ただ作業しやすいだけだと思ってましたね。

それで，その，積層ゴムっていうのはどんな御利益があるんですか？

大　家　今話した側面を鉄板で包んだゴムの場合，弾力性は保たれるけれどもさっきのb図のように横にずれるような変形はできませんね。

そこでゴムを薄い板にして，上下を鉄板で挟むようにするんです。薄いので，ゴムの内部で隣同士が拘束し合うから流動変形なんかできません。それでO－リングと同じようにいつまでも弾力を保って，しかもかなりの荷重にも耐えることができると言うわけです。

与太郎　なーるほど。さっきのゴムの円柱をうんと薄くすれば，鉄板なんかで囲わなくてもゴムは流れないってことか。それはうまい考えですね。

大　家　しかし，いくらゴムが軟らかくても，薄いので上下を大きく横にずらすことはできません。そこで，同じ物を沢山積み重ねて，bの図のように大きな横ずれができるようにするわけです。

与太郎　それで地震の大きな変位をかわしちゃって，建物はあんまり動かなくできるんだ。

大　家　かわすというのも変だけれども ― まあ，結局はそういうことですね。

繰り返すようですが，鉄板で挟み込むことで流動変形を防ぐと同時に，外気と接触する面積を小さくしてゴムの劣化を防ぐ。ただし，ゴム板を横にずらすような変形はできる。この横にずらす変形を単純せん断変形と言って，ゴムの内部には横にずらす単純せん断応力だけが作用しています。こういう変形ではゴムの体積が変ることもなければ，流動変形することもありません。

これにもゴムの軟らかさが発揮されて，比較的小さ

な力で図のような横ずれ変形ができるわけです。

与太郎　比較的小さいって，横ずれ変形に対していくらか抵抗力があるってことですか？

大　家　それは最初に話したでしょう？せん断応力が生じるということは抵抗力が生じるということです。

与太郎　それで地震の力が少しは建物に伝わるっていうことなんだ。

大　家　実際，「すべり支承」や「転がり支承」のように地盤と建物の間でほとんど完全に縁が切れるというわけではないんですね。しかし，積層の数などをうまく調整することによって，建物の振動を地盤の3分の1とか10分の1という低い水準に抑えることができるんです。

それに，横ずれに対して抵抗力があるということは，地震が終わったら元の位置に戻る復元力もあるということになりますね。ただ滑るだけの支承ではそうは行かないから，元に戻すための別な細工が必要になります。

与太郎　そうなのか。同じゴムでも一塊（ひとかたまり）の円柱にして使うのと薄い板にして重ねるのとではまるっきり性能が違っちゃうんだ。

大家さんがすごい発明って言った意味がよく分かりましたよ。

大　家　もう一つ言っておきますが，積層ゴムだけだと ― ゴムは弾性体なので地震が終わっても建物に生じた揺れがなかなか治まらないことになります。

そこで全く弾性のない鉛の棒を積層ゴム支承の中心に埋め込んで，鉛の塑性変形で振動を減衰させるような方法も採られています。

与太郎　そうか。免震装置ってのがどんなものか少し分かってきましたよ。

多少建築費は増えても，どんどん使うようにしたほうがいいですね。

大　家　病院などの公共的な建物は特にそうですね。