

地震と地盤と建物と



工学博士 西尾 宣明

元・東京ガス(株) 基礎技術研究所

地盤の揺れも千差万別

与太郎 大家さん、夕べの地震はよく揺れましたね。震度4はあったんじゃないですか？テレビではこの辺は震度3なんて言っていましたけど。

大 家 やっぱ震度3ぐらいがいいところだったと思いますよ。もっとも、与太郎さんのところは軽量鉄骨のアパートの2階だから少し揺れが大きかったかもしれませんね。

与太郎 大家さん。まさか耐震偽装の手抜きアパートじゃないでしょうね。大家さんは現役の頃地震の研究をしてたって言うから、そんなことはないだろうと思っていますがね。

大 家 その点は大丈夫です。安心して下さい。鉄骨の強度は十分なんですけど、細いのでたわみ易いんですね。それできのうのような地震だと大きく揺れやすかったのだと思います。

与太郎 家の構造でそんなに揺れ方が違うんですか？

大 家 それは大違いです。同じ高さでも木造と鉄骨、それに鉄筋コンクリートなど、構造が違えば、揺れ方はみんな違います。

与太郎 軽量鉄骨だと大きく揺れるんですか？

大 家 そうとも言えませんよ。地震の性質によって

それぞれ揺れ方が大きかったり小さかったりします。お話はそれほど単純ではありませんね。

与太郎 へえー。その地震の性質っていうのはどういうことですか？

大 家 それは大まかに言えば二つのものの組み合わせで決まります。一つは震源の性質です。つまり地核がどんな風に壊れたかということです。もう一つは建築物が建っている地盤の性質です。

与太郎 震源の性質ってどんなふうに違うんですか？

大 家 一口でいうのは難しいけれども、震源の地核のひび割れ——断層のすべりという形を取りますが——それがバリバリと一気に進むとかちょっとゆっくり進むとか、ひび割れの方向が違ったりとか、結構いろいろな違いがあるものです。最近では巨大地震に相当する地核のひずみが長い時間をかけてゆっくりと解放されることがあるとも言われています。つまり、断層がゆっくりゆっくり滑るということですね。スローアースクエークとかサイレントアースクエークなどと呼ばれていますが——。

与太郎 それって、知らない間に地震が終わっているってことですか？

大 家 そういうことになりますね。群発地震みたいに弱い地震は何回も起きるんでしょうけれど

も——。

与太郎 地震が全部そんなだったらいいですね。

それから、地盤の性質ってどんなことですか？

大 家 地核と呼ばれる部分の上には火山活動によるマグマや噴出物が堆積してできた岩や土、それらが風化して堆積した岩や土が積み重なっています。それは地核に比べればかなり柔らかい。そこで地核がひび割れてぐらぐらと揺れれば、その上の堆積層も揺れます。その揺れ方は堆積層の成り立ちによって大きく違ってきます。

とくに大きな差が出るのは地表面から数キロメートル、多くの場合は数百メートルよりも浅いところに堆積している、まだ岩になりきっていない土の部分です。ここではそれを地盤と呼ぶことにしますが、この地盤の固さが千差万別で、同じ地震でも揺れ方がうんと違います。

与太郎 ああ、そうか。テレビの地震速報で震源から遠いのに震度が大きいところやその逆のことがあったりしてちょっと腑に落ちないと思ってたんですけど、そういうことなんですね？

大 家 その通りですね。また、地震計が地盤に直接置かれているか堅固な建物の中に置かれているかなどによっても違いが出るのが考えられます。

固有振動数

大 家 ところで、今の話を実感する簡単な実験ができますから、家に帰ったら与太郎さんもぜひやってみて下さい。

与太郎 へえー、面白そうだな。どうすればいいんですか？

大 家 冷蔵庫には大抵豆腐が入っていますね。それを皿に載せて、テーブルの上で水平に揺するんです。そうすると揺する速さによって豆腐の揺れ方が大きく変わります。一番良く揺れるときの揺する速さ——1秒間に何回揺るかという振動数、つまり何ヘルツという単位で表しますが、それを固有振動数と呼びます。固有振動数と同じ速さで皿を動かせば、豆腐は皿の動きの何倍もの大きさに揺れます。それを共振と言います。揺する速さを固有振動数より2、3割速くしただけで、豆腐はほとんど揺れなくなります。

与太郎 ああ、そうか。皿が震源の動きで豆腐が地盤ということか。震源の動きが地盤の固有振動数に近い

ほど地盤はよく揺れるってことだ。

大 家 そういことです。ところで、同じ豆腐でも絹ごし豆腐と木綿豆腐がありますね。やってみればわかりますが、木綿豆腐のほうが固有振動数が大きいのです。

与太郎 絹ごし豆腐は軟らかい地盤で木綿豆腐が固い地盤ってわけですね。

家に帰ったら早速やってみますよ。だけど、冷や奴が好きなので絹ごしならいつでも冷蔵庫に入ってるけど、木綿はないと思うなあ。帰りがけに買って行かないと。

大 家 必ずしも木綿豆腐を用意する必要はないですよ。絹ごし豆腐を適当に切り分けて、背の高い豆腐と、それより1割か2割背の低いのを作って一緒に揺すってもいいですね。豆腐の幅は広くても狭くてもあまり関係ありません。

同じ豆腐でも厚さによって固有振動数は変わります。厚いほど固有振動数は小さく、つまりゆっくりした振動に共振しやすくなります。

与太郎 この話、何だか電気回路の共振っていうのと似てますね。それはともかく、地盤が軟らかくても薄ければ固有振動数が大きくなるから、固い地盤が厚い場合と似たようなことになるわけですね。

大 家 与太郎さんは電気工事の資格を持っているんですね。そこに気がつけば話は早いですね。

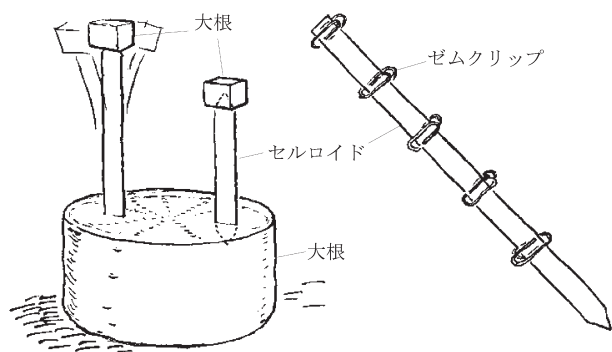
与太郎 今まで地震の震度が同じなら地盤なんかに関係なく同じように揺れるのかと思ってたけど、そうじゃあないんだ。

模型実験をしてみよう

大 家 ところで、豆腐の実験もいいけれど、もう少し手を加えてこんな実験をすると面白いですよ。

〔ガリレオ爺さんは商品の包装に使われていた厚さ0.7ミリぐらいのセルロイド様の物を取り出し、幅約1.5センチ、長さは約11センチ、14センチ、25センチの短冊状に切り出しました。短いほうの2本は両端を図のように尖らせ、一方の端に2センチ×2センチ×1.5センチ程度の賽の目に切り出した大根を刺します。長い1本には大きめのゼムクリップを5個ばかり図のように取り付けました。〕

もう一つ、大根を厚めに輪切りにしたのを用意しました。これに短冊の残った端を差し込み、大根を左右



地盤や建物（振動系）の模型

に動かして短冊の揺れを観察します。]

与太郎 へえー。何だか面白そうだな。

あれ？ 長いほうが揺れるようにすると短いほうはほとんど揺れないですね。

大 家 じゃあ、こんどは揺らす速さを少しずつ速くしてごらんなさい。

与太郎 おお！今度は短いほうが大きく揺れて、長いほうはほとんど動かないですね。

大 家 与太郎さん。（輪切りの）大根は止めたまま、それぞれの短冊の頭を軽くはじいてごらん。

与太郎 こんな具合ですか？ あっ。長いほうがゆっくり揺れますね。

大 家 そう、この自然に揺れる時の振動数が固有振動数というものです。それはこの（セルロイドの）バネの固さと上につけた（大根の）錘りの重さで決まります。短冊の長さが長いほど、また幅が狭いほどバネは軟らかくなり、固有振動数は小さくなります。つまり、振動はゆっくりになります。また、バネの固さが同じならば、錘りが重いほど振動は遅くなります。

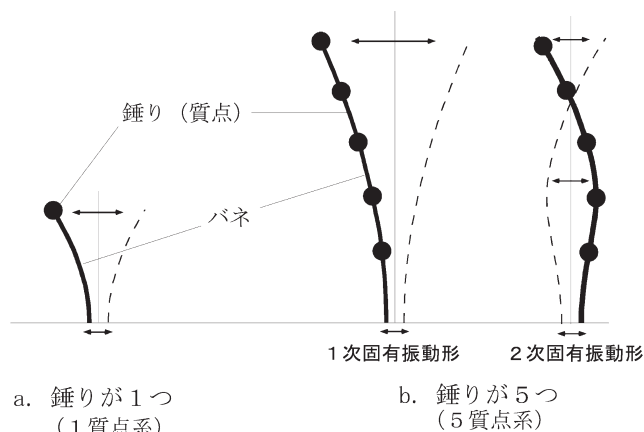
与太郎 そして、この二つの「おもちゃ」が軟らかい地盤と固い地盤に相当するってことですか？

大 家 地盤だけではなく、建物を表していると考えられることもできます。まあ、ピアノやギターの弦でも何でも、振動する固体を一番単純なモデルで表すとこのバネと錘りのようになるということですね。

もう一つ付け加えれば、バネ自身が持っている、エネルギーを吸収して振動を弱めようとする要素——内部摩擦と言いますが、その要素まで考えると、単純なモデルのようだけれども、もう単なるおもちゃとは言えなくなります。

与太郎 ふーん。そうなのか。

それじゃあ、もう一つの長いやつはどんな役に立つ

a. 錘りが1つ
(1 質点系)b. 錘りが5つ
(5 質点系)

モデルの振動の形

んですか？

大 家 地盤でも建物でも、実際にはうんと深かったり超高層ビルのようにうんと高いものがあります。そういうものを1本のバネと1個の錘りで近似するのはいかにも粗っぱい話です。このモデルは高さに沿って分布する構造物の重さを5個のクリップつまり錘りですね——それで表しています。

与太郎さん。これを大根の基礎に刺して、揺すってごらんなさい。

与太郎 ああ、ゆっくり揺るとずいぶん大きく揺れますね。これはバネが長くて錘りが重いせいですか？

大 家 そういふことですね。じゃあ与太郎さん。揺らす速さを少しずつ速くしてごらん。

与太郎 ああっ！面白いなあ。上から2番目と3番目のクリップの間に全然揺れないところができますね。その上と下では揺れる方向が逆になってる。

大 家 そうですね。第二の振動の形ということで2次の振動モードあるいは2次の固有振動と呼ばれています。もっと速く揺すれば揺れない場所——「節」と呼びますが——その節が2つの3次の振動モードができますが、速すぎて手で動かすのは難しいですね。

参考までに、もっともっと速く揺すれば、節が4つの5次の振動モードまで見られる筈です。

与太郎 それって錘りの数だけの固有振動があるということですか？

与太郎 その通りです。ただ、実際の地震ではエネルギーの大半は10分の1ヘルツから10ヘルツ程度と狭い範囲の振動数の成分の中に含まれますから、ものすごく速い震動は問題になりません。せいぜい3次の振動モードぐらいまで考えに入れば、実用的には十分な場合が多いと思います。

親亀の上に子亀、子亀の上に・・・

与太郎 大家さん。このおもちゃ——じゃない，モデルのことはよくわかったんですが，地震の時の建物の揺れ方を考えるにはどうすればいいんですか？

大 家 まず，うんと大きなお皿を考えるんですね。その上に大きくて分厚い豆腐のようなものを載せるんです。これは頭の中で想像するだけでいいですよ。この豆腐は地盤のモデルですから，軟らかいものや固いもの，浅いものや深いものなど，いろいろな状況が考えられます。

この地盤の上にこのセルロイドと大根やセルロイドとクリップのモデルを差し込みます。これが建物ですね。そして最後にお皿を揺すります。これは震源からやってくる地震波ですね。地震波はいろんな振動数，いろんな強さの揺れが混ざり合った，いわば雑音のようなものです。その中で，地盤の固有振動数に近い成分が強く含まれていれば，地盤はその振動数に共鳴していわば増幅することになります。建物の固有振動数が，その増幅された成分の振動数に近ければ，建物はさらに大きく揺すられることになります。

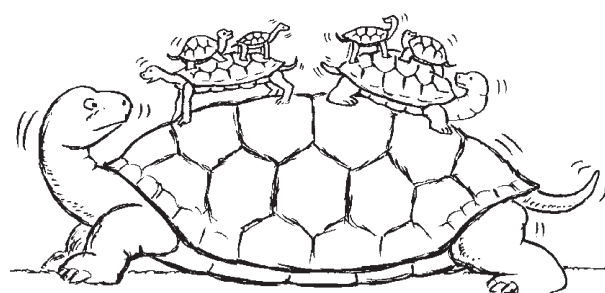
与太郎 そうか。かなり複雑なんだなあ。何か，親亀の上に子亀，子亀の上に孫亀っていう感じですよな。

大 家 その通りですね。その子亀もがっちりした体格のがいると思えば足がひょろひょろと頼りないのがあります。その上の孫亀も背の高いのや低いのがいるわけです。

与太郎 そして親亀の貧乏揺すりも速かったりゆっくりだったりっていうわけか。孫亀がどんな風に揺れるかは結構難しい問題なんだ。

大 家 しかし，概して1次固有振動に近い形で——つまり，高いところほど大きく揺れる傾向がありますから，与太郎さんのところも1階よりは余計に揺れることが多いですよ。

与太郎 ええっ。本当ですか？それじゃあ1階が空い



親亀の上に子亀、子亀の上に孫亀

たら移らせてもらおうかな。

大 家 でも，そのときは1階の部分に2階よりも大きな力が働くから，壊れるとしたら1階ですよ。

与太郎 困ったなあ。あんまり脅かさないで下さいよ。

大 家 これは余談になるけれども，ガス会社では震度5以上でガスが止まるようにガスメーターに感震遮断装置をつけていますね。あれが震度4の地震でも作動することがあります。それを誤作動という人もいますが，それは違いますね。

与太郎 地盤によって揺れ方が違うということだから，極端に言えば1軒1軒揺れ方が違ってもおかしくないわけですね。それに1階と2階でも違ったりするんだから——。とにかく強く揺れたところはガスを止めるのが安全ですよな。

大 家 えらい！与太郎さんすっかり理解してくれましたね。

与太郎 いやあ。今日もいい勉強になりました。大家さん。このおもちゃ——じゃない，モデル——貰って行っていいですか？息子に講義してやりますよ。

大 家 おお，いいですとも。

〔この会話の後で，新潟中越沖地震が起きました。被災された方々の生活の早期の復旧をお祈り申し上げます。〕