

# 都市景観を変える建築構造形式 (免震構造)



橋 英三郎\*

## City planning and new aseismatic structural design (Base isolating methods for building structures)

**Key Words** : Base isolation, Numerical analysis, FEM, Energy minimization

### 1. はじめに

朝のまどろみを楽しんでいると鐘の音がガラソゴロン、ガラソゴロンと聞こえてくる。あちこちの教会の尖塔が、レンガ色の屋根とグレーの空との境界に心地良いリズムを与え、朝もやの中に聳える。ヨーロッパ中世都市の日曜日の朝である。

ところで京や奈良などは別として日本の大都市は大体、直方体のコンクリートの集まりときままっている。ドームも尖塔も殆ど無い。又、空も建物も地面もグレーでおおわれている。焼け跡から再出発してセッセと50年間にわたって同じような顔つきをした直方体のビル造りに励んできたとも言える。こうした街並みを形成させたのは我が国が地震の巣の上に位置しているということが少なからず影響している。複雑な形状は地震時に応力が部分的に集中したり、振れ振動が生じたりして耐震上あまり好ましくない。又、レンガや石のような変形性能の少ない材料もビルなどの主構造材としては認められていない。地震以外にも、さらに幾つかの理由はある。例えば中世のヨーロッパのように世界中の富を集められるような立場に日本がなかったことや、構造解析の進歩により、アーチやド-

ム形式に抛らないでも講堂や集会所などを四角いビルの中に組み込むことが可能になったことなどである。

勿論、「日本の都市をヨーロッパの中世の都市と同じにせよ」といった時代錯誤的なことをここで言いたいのではない。商業都市のダウンタウンはどの国も似たりよったりである。ただ地震国であるが故に我が国の建築デザイナーに重圧を与えていることも確かだ。デザイナーは数ミリの寸法にも気を使うが、耐震上から設計変更され、出来上がったものに落胆する場合も多いにちがいない。そして建築構造にたずさわる我々にもその責任の一旦があると言わざるをえない。

### 2. 都市と巨大地震

ところで、我が国の基準が特に厳しいかという点必ずしもそうでない。ここで建築関係者以外の方に知らされていないことを2つだけ挙げよう。

1) 我が国の建築基準では、大地震の際にビルは柱がなんとか頑張って立ってさえいれば、クラックだらけで2度と使えなくなっても宜しいとなっている。つまり100年に一度程度の大地震の場合<sup>1)</sup>、人命は守るべきだが、建物の被害は、ある程度しようがないといった考えである。というのは100年に一度の大地震でもびくともしない建物を設計するとコストが高くなりすぎるとの判断が働いている。したがって、もし仮に東京や大阪に大地震がおり、そしてビルが基準通りに設計されていたとするなら、都



\*Eizaburo TACHIBANA  
1942年10月4日生  
1966年大阪大学工学部構築工学科修了  
現在、大阪大学工学部建築工学科、助教授、工学博士、構造力学、計算力学  
TEL 06-877-5111(内線4962)

市全体は一瞬にしてクラックだらけの使い物にならないビルで覆われるはずだし、逆にひび割れ一つ生じないビルがあれば、それは過剰設計であったというそしりを受けることになりかねない。(もっとも構造計算外の間仕切り壁などが意外と良く頑張るので、そのようなことはあまり無いとは思いますが。)

2) 超高層ビルよりも、むしろ7~8階建てまでの中高層ビルが共振という意味で地震に危ないということ。鉄骨造か鉄筋コンクリート造かの違いや地盤が固いか軟弱かとも関係するが、だいたい中高層ビルの1次の固有周期は0.3秒~0.7秒程度であり、それは地震の卓越周期域に近く、共振状態になりやすい。一方、超高層ビルは2秒~7秒程度であり、共振という観点からは被害を受けにくいことになる。

### 3. 免震構造と制振構造

先に述べたように、地震国であるが故に、どの建物も似通ってしまうというハンディキャップ(言い換えるなら耐震性能の要求から、自由な形態を選択する余地が少ない)を克服する一つの光明が最近になって見え初めた。免振構造と呼ばれる構造形式である。地震と共振しやすい中高層の建物の1階床と基礎との間に、パッキングのような材料を挿入し(正式にはアイソレーター、もしくは免震支承)建物の一次固有周期を長くして(2秒~3秒)、地震の卓越する周期から離すことで地震と共振するのを避けるのを目的としている。

地震を受けた場合には、建物は揺れるが、それはガタガタと地面と一緒に激しく揺れるのではなく、一階の床から上部は、ゆっくりと剛体的に揺れる。そのため水平力による柱や梁にかかる曲げ応力が低減されるといった簡単な原理を応用したものである。これは防振や免振として機械工学などで古くから知られている方法であるが、なにしろ建物は何万トン、何十万トンといった重さであり、その中に多く人間が居住している。又、巨大地震は頻度が少なく、入力波スペクトルもまちまちである。それこそ一発勝負に近い賭のようなものである。従って、機械装置の防振対策などとはおのずから異なっ

た別の検討課題が生じ、その解決のため多くの構造技術者の心血が注がれてきた。そして、最近になり建物を免震構造とした場合、上部構造物の設計用地震荷重はかなり低減できるという免振構造本来の目的がやっと叶えられはじめた。通常ビルでは地震水平荷重を重力の20%程度としなければならないが、それが半分程度でも認められるようになった。ロッキングの問題や地盤特性との関連性、長周期成分の大きい地震波では?といった問題など、まだ未知の問題は残されているにせよ、免震構造の信頼性が徐々に認められるようになってきたということである<sup>2)</sup>。

こうした動向は、当然のことながら免震支承が意図通りの性能を発揮するかどうか非常に重要となることを意味する。

### 4. 積層ゴム型免震支承

免震支承で最も多く用いられる形態は積層ゴム型である。数ミリ厚の鉄板とゴムシートを各々30枚程度を交互に重ねたもので、直径が50cmから1m程度、高さが50cm程度のドラム状をしている。

鉄板とゴム層とは接着されており、ゴム層が水平方向の剪断変形を受け持つ。鉄板の果たす役割はゴムが圧縮により外側に膨らむのを拘束し、上下方向の剛性のある程度保持することにある。図1は載荷実験の写真である。

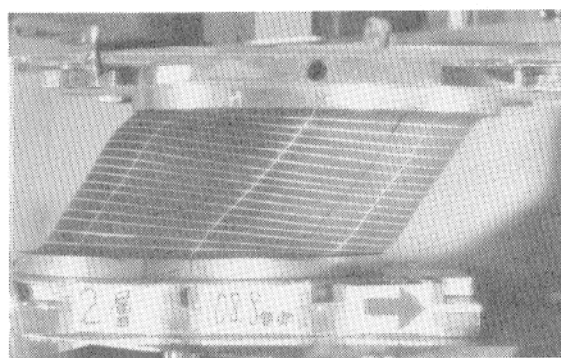


図1 積層ゴム型免震支承の積荷実験

### 5. 積層ゴム型免震支承の解析での問題

積層ゴム型免震支承を用いた構造では、今ま

での主たる構造材料であった鉄やコンクリートを一足飛びに追い抜き、ゴムが構造材料として構造の主役となる。しかも、その性能が建物全体の死命を制する。ところで、免震支承の性能評価は主に実験を通じて行なわれており、解析面からのアプローチは殆ど余技的なものに留まっている。この主な要因としては次の4つの事項を挙げることができる。

- 1) ゴム材料の機械的性質が把握しにくい。
- 2) 100%を越える剪断変形が生じるため、鉄やコンクリートで従来、大変形といわれていたレベルをはるかに越える。
- 3) ゴム材料の非圧縮性が数値解析面で解の不安定さを生じさす。
- 4) 3次元問題となるため、解析に要する演算時間が著しく増大する。

ただ、しかし、それ故に力学解析的アプローチをあきらめて実験的検証のみで良いという訳にもいかない。力学を介しての知見は、実験結果にきちんとした筋道を与え、蓋然性を有する実験結果の安易な外挿や、拡大解釈に含まれる危険性に歯止めを与える力を内包しているからである。

## 6. 免震支承の解析の概要

このような観点から筆者らは積層ゴム型免震支承専用の解析コードRAPID (Rubber Analysis Program for Isolater Deformation)を開発した。このネーミングには開発当初にきめられたもので文字どおり演算時間が少なくてよいという意味がこめられている。その概要を簡単に紹介する。

RAPIDでは有限要素法とエネルギー最小化法とを結合した方法を採用している。又、演算時間短縮のため、通常の有限要素における補間関数(形状関数)にさらに、もう一つ別のマクロな補間関数を導入している。

解析手順を簡単に以下の1)~7)に示す。

1) ゴム材のある位置における歪みエネルギー密度  $w$  を変形テンソルの不変量  $I_1, I_2$  の関数として与える<sup>3)</sup>。(歪テンソルの不変量でないことに注意)

$$w = w(\text{変形テンソルの不変量: } I_1, I_2) \quad (1)$$

この具体的な形式は省略するが<sup>4)</sup>、この式の中で必要となる材料定数に相当する係数は図2に示すような、2軸引張り試験装置を用いて、重回帰分析から直接に求める<sup>5)</sup>。

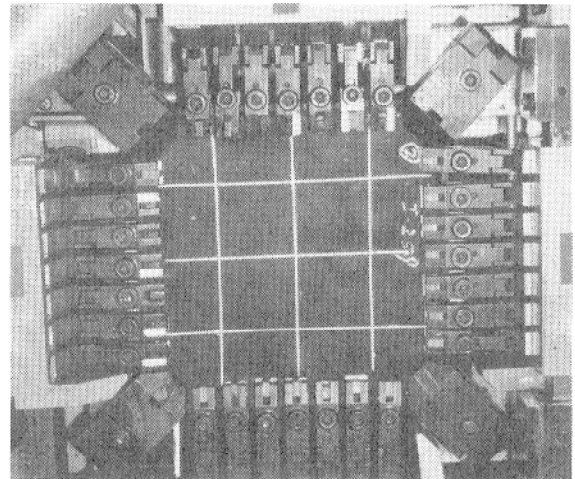


図2 2軸引張り試験装置

2) 変形テンソルの不変量  $I_1, I_2$  は主歪の関数であり、主歪は形状関数を用いることにより、有限要素の節点変位と位置の関数に置き換えることができる。

$$w = w(\text{位置, 節点変位}) \quad (2)$$

3) ここで、マクロな補間関数を導入する。それは、全ての節点変位は、ある有限個のモードベクトル  $V_1, V_2, \dots, V_n$  の重ね合わせで表されると仮定するもので<sup>4)</sup>、モードベクトルの係数を  $a_1, a_2, \dots, a_n$  とし、 $w$  を次の関数形式に置き換える。

$$w = w(\text{位置, } a_1, a_2, \dots, a_n) \quad (3)$$

4) ゴムは非圧縮性が強く、その条件を変形テンソルの不変量  $I_3$  を用いて  $I_3 - 1 = 0$  と簡単に表し(3)式を次の様に変更する。

$$w^* = w(\text{位置, } a_1, \dots, a_n) + p(I_3 - 1)^2 \quad (4)$$

ここで  $p$  は正の十分大きな値の定数である。第2項は、この段階では一見、無意味のようであるが、6)での最小化のプロセスでこの項(ベ

ナルティ一項)をつけておくことより, 条件付き最小化問題が条件なし最小化問題となる.

5)  $w^*$ を体積積分することにより, 免震支承の全歪エネルギー  $W^*$ を  $a_1, a_2, \dots, a_n$ の関数で表す.

$$W^* = W^*(a_1, a_2, \dots, a_n) \quad (5)$$

6) 変形の境界条件  $a_k = a_k^*, a_j = a_j^*, \dots$ を与えて  $W^*$ を最小化するような  $a_1, a_2, \dots, a_n$ を見いだす. (モードベクトルを設定する際, 変形の境界条件が定数として  $a_k = a_k^*, a_j = a_j^*$ の形式で与えられるように配慮している.)

$$W^* \longrightarrow \text{Minimize} \quad (6)$$

この最小化においては非線形計画法における準ニュートン法を用いる. その過程で必要となるヘシアン近似逆行列を求める公式としては遺伝対称性を有し, セカント条件を満たすBFGS公式<sup>6)</sup>を用いる.

7) 求めた  $a_1, a_2, \dots, a_n$ より歪みエネルギー密度分布や歪分布などを得る.

### 7. 解析例

免震支承の解析モデルは対称性から半円柱型とし, 有限要素は4面体5個が一組となった6面体のcomposit elementを用いた. 水平に配された鉄板の間を高さ方向に各3分割, 半径方向に4分割, 周方向に6分割とした. ちなみに鉄板25枚の挿入では高さ方向に78分割となる.

図3は鉄板1枚が中央水平に挿入された場合

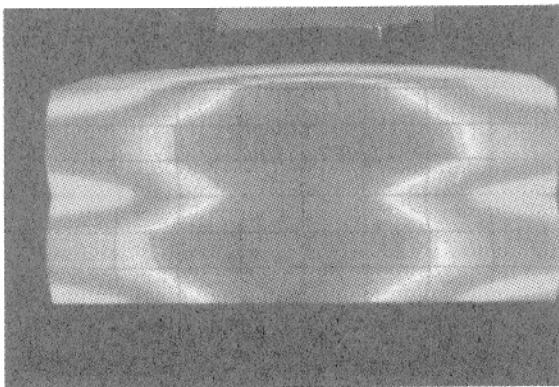
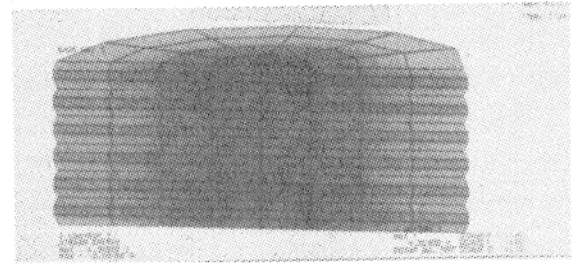
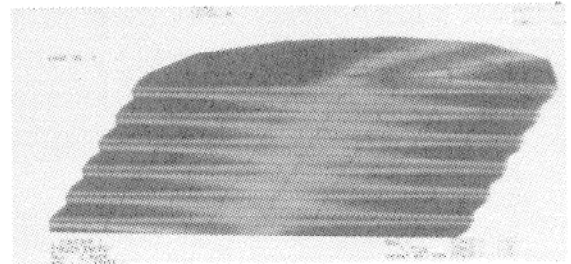


図3 免震支承の圧縮時の歪エネルギー分布(鉄板1枚の場合)



a) 圧縮荷重



b) 圧縮荷重+剪断荷重

図4 免震支承の圧縮および圧縮+剪断の歪エネルギー分布(鉄板5枚の場合)

の圧縮時の歪みエネルギー分布図である. 又, 図4は鉄板が5枚が均等間隔に挿入された場合の圧縮時の歪みエネルギー分布図である.

数値的な諸量の説明は省略する. (この図はカラーでありモノクロの印刷では説明しにくい) これらの図からざっとした変形の感じを読み取っていただければ十分である.

図5は鉄板25枚が挿入された免震支承に, 初めに500トンの圧縮を加え, そののち剪断変形をゴムの総厚さに対して30%キザミで150%まで与えた場合の総歪みエネルギーを計算し, 実験値と比較したものである.

実験値は載荷装置のロードセルで読み取られ

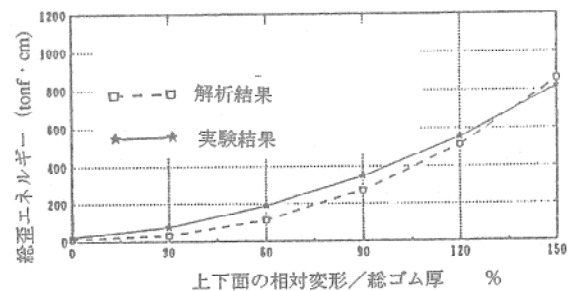


図5 解析値と実験値の総歪エネルギーの比較(鉄板25枚の場合)

た値と変形量より荷重のなした仕事から求めた。  
鉄板 25 枚の場合の解析に要した演算時間は  
50Mips のマシンで約 2 分であった。

### 8. お わ り に

免震構造は、建築物において色々な目的で今  
後も採用されるであろう。地震荷重の軽減によ  
り、より多様で繊細なデザインを可能とし、又、  
一方では重厚な石づくりやレンガ造のような組  
積造にも道がひらける。あるいは、古い味わい  
のある建物を保存するため、床を補剛し、その  
下に免震支承を入れるなども既に検討されてい  
る。

表題の「都市景観を変える・・・」は若干オー  
バーであるが、筆者の願いもこめて、あえてそ  
のままとした。

### 補 注

- 1) 大阪平野では最大地震速度が 40cm/sec 程  
度が通常、設計用として想定される。

- 2) 我が国では既に 100 棟近く建てられている。  
3) Eringen A.C. 1962. Nonlinear theory  
of continuous media. McGRAW-HILL  
4) Tachibana E. Inoue Y. and Fujisawa K.  
1991, Large deformation analysis of base  
isolator in three dimensions, Computa-  
tional Mechanics '91, ICES Publications,  
pp.1060-1065  
5) Moony-Rivlin プロット法や Valanis-Lan-  
del など色々提案されているが、どれも問  
題があり、かといって、川端により提案さ  
れている方法(大変形挙動, ゴム協会誌,  
Vol.45, No.2, 1972 など参照)では計算時  
間膨大となる。ここでは 2 方向の種々の  
組み合わせの 2 軸引張試験で得た歪エネル  
ギーと 2 方向の主歪との対応表から重回帰  
分析により求める。  
6) 今野 浩, 山下 浩, 非線形計画法, 日科  
技連

