

# OpenGL を用いた地震応答解析結果の視覚化プログラムの開発と建築構造物への適用

藤井 康寿\*

Email: fujii@tokaigakuin-u.ac.jp

\*: 東海学院大学人間関係学部子ども発達学科

Key Words OpenGL, 3次元描画プログラム, 構造物の地震時動的挙動

## 1. はじめに

2011年に発生した東日本大震災は私たちに地震発生後の津波の脅威を実感させた。しかし、津波より前に、震度7の地震による建物の倒壊、あるいは倒壊しなくとも地震の大きな揺れによって甚大な被害をもたらしたことは記憶に新しい。特に建物が健全であっても、室内のつり天井の落下<sup>(1)</sup>、コンピュータ機器や彫刻等の貴重な展示品の転倒被害などが相次いだ。さらに、震源から遠い都心まで地震波が伝わり、高層ビルには10分以上に亘ってゆっくり揺れる「長周期地震動」が起こり、室内にあるOA機器やインテリアが地震の揺れとともに床上を激しく移動して転倒落下する映像<sup>(2)</sup>が見られた。

一般に、住宅や小中学校など既存の公共施設の地震対策は耐震化する傾向にあるが、博物館や美術館では貴重な展示物を地震の被害から守る対策として、免震機構の導入が図られている。住宅は耐震化することで建物の崩壊を回避することが可能となっても、室内にある調度品や備品は床との静止摩擦係数が小さいので滑動や転倒して危害を与える場合がある。

著者等は文献3において地震の強い揺れによって、室内にある家具などの調度品やコンピュータなどの備品が転倒や落下することによる人への危険性を回避することを目的として、ビルの床免震対策の一方式を検討した。具体的には、図1に示す免震台を拡大して、ビルの床全体に設置する方式で免震床(2重床)を設定して、この床下に積層ゴムとスライダを併設して、床の相対変位が限界値を超過すると作動する機構を考案した。これを高さ25.9m、幅28.0m、奥行き16.0mの4スパン7層構造の事務所ビル内に設置して、免震効果を発揮する積層ゴムの抗力の大きさ、積層ゴムの水平移動量および免震床と積層ゴムが接触するまでの長さ(クリアランス)を、著者等により考案した滑動と衝突機構を有する構造物の動的解析プログラムを用いて決定した。地震応答解析結果より、免震効果を発揮する各種パラメータの決定は可能になったが、事務所ビル全体の構造物および各階に設置した免震床の地震時における動的挙動を視覚的に把握することは困難であった。

本論文では、OpenGLの優れたグラフィックライブラリーを活用して、免震床を有する構造物を3次元描画する方法を考案した。具体的には、対象とする建築構造物を、床、柱および免震床のブロックに分割し(本

研究で対象とするモデルの場合、合計で98箇所に分割)、各ブロックを幅、高さ及び奥行き寸法を有する六面直方体で構成した。各六面直方体には8個の頂点があるため、構造物の実寸法に対応した頂点座標値(幅、高さ、奥行き)を算出し入力することで3次元描画が可能となることを示す。さらに、得られた3次元描画結果(静止画像)に、地震外力を作用させて動的挙動する状態をシミュレートすることが可能な手法も考案した。このように免震床と構造物の動的挙動の視覚化を試みたのは、免震効果が期待される免震床の滑動状態を、時々刻々と変化する構造物の動的挙動との関係から検証することは重要であると考えたからである。

以上より、本論文ではフロア毎に設置した免震床の免震効果に関して、パラメータを任意に設定できる数値解析の利点を生かして地震応答解析を行い、3次元動的挙動としてシミュレートすることで、免震床が構造物内で免震効果を発揮する状況を検証した。

## 2. 免震床の機構と緒言

### 2.1 免震床の機構

本研究では構造物の床免震対策として、図1に示す免震台を構造物の床全体に拡大する方式で免震床を設置する。さらに免震床には図2に示すように、住宅用土台に設置されるハイブリット免震工法を構成する積層ゴムとスライダを併設して、床の相対変位が限界値を超過すると作動する機構を考案した。

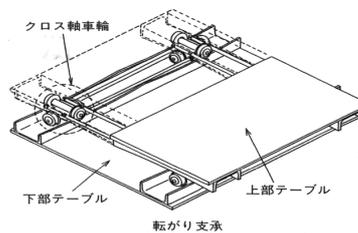


図1 免震台

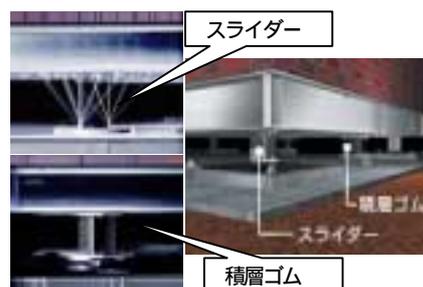


図2 ハイブリット免震構法<sup>(3)</sup>

2.2 免震機構のモデル化

本研究で取り扱う免震床の機構は、図2のハイブリット工法で設置される積層ゴムを応用し、免震台の上部テーブルの下に積層ゴムを設置し、フロアが許容揺れ幅以上になると、ストッパーに接触して積層ゴムが機能する機構とする。具体的には図3、図4に示すように、円弧レールの間に積層ゴムを設置して、その両側に許容揺れ幅を設けてストッパーを設置する機構である。揺れ幅がクリアランスを超過すると積層ゴムが作用する機構である。上部テーブルはストッパーに接触して積層ゴムが機能するまでは円弧レール上を移動することになるが、この円弧レールの曲率半径を1,000cm、転がり支承の静止摩擦係数は0.1とした。また、免震床に設置する積層ゴムのバネ抗力とクリアランスとバネ水平移動量は、表1に示すパラメータを採用した<sup>(4)</sup>。

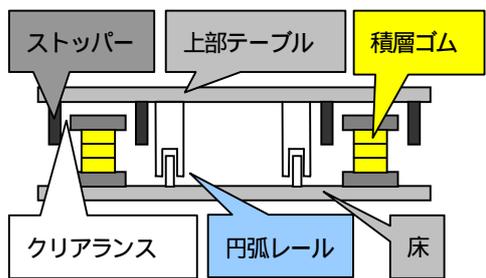


図3 積層ゴムを設置した免震床のモデル図 (側面図)

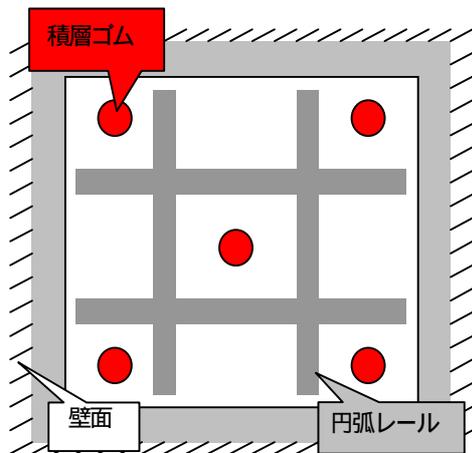


図4 積層ゴムを設置した免震床のモデル図 (上面図)

表1 免震床に設置する積層ゴムのバネ抗力、クリアランスとバネ水平移動量

積層ゴムの 個数	バネ抗力 (N)	クリアランス (cm)	バネ水平移動量 (cm)
10	65,000	0	30
40	260,000	0	30

2.3 免震床の緒元

本研究で取り扱う免震床は、図1に示した免震台のスケールを大きくして部屋の床全体に広げた1,500cm×2,700cmの大きさで、厚さ1cmの鉄板を想定する(表2参照)。また、免震床上に設置される大型コンピュータ等のオフィス機器の重量は1m<sup>2</sup>辺り50kgとし

て、免震床の重量とオフィス機器の重量を加算した値を用いる。地震応答解析においては、この免震床を後述のビルの各層(この場合7層)に設置して、固定重量ではなく滑動重量データとして入力する。

表2 免震床の寸法及び重量(1層あたり)

	免震床の寸法	免震床の滑動重量
フロアー全体に設置	1,500cm × 2,700cm	52,042.5kg

3. 免震床を設置する建造物の緒元と縮約

3.1 建造物の緒元

免震床を設置する建造物は高さ25.9m、幅28.0m、奥行き16.0mの4スパン7層構造(奥行き2スパン)の事務所ビル<sup>(5)</sup>とする。対象とする建造物の自由度(105自由度)は高いので、図5に示す建造物の右側柱の節点7ヶ所に水平変位のみを抽出して、7自由度(7つの代表点)に削減する縮約を行って解析の効率化を図った。このようにして得られた代表点の動的応答挙動を、第4章で詳述する床及び柱を幅、高さ、奥行きで構成される六面直方体の98ブロック(床:7ブロック、柱:84ブロック、二重床:7ブロック)で描画した建造物に入力するのである。このとき、各代表点重量(死加重)および免震床重量(LL荷重)などは表3に示す値を入力する。なお、表中のLL荷重は設計書記載の数値であるが、床(フロア)と床上に設置される大型コンピュータ等のオフィス機器の重量に相当するものである。

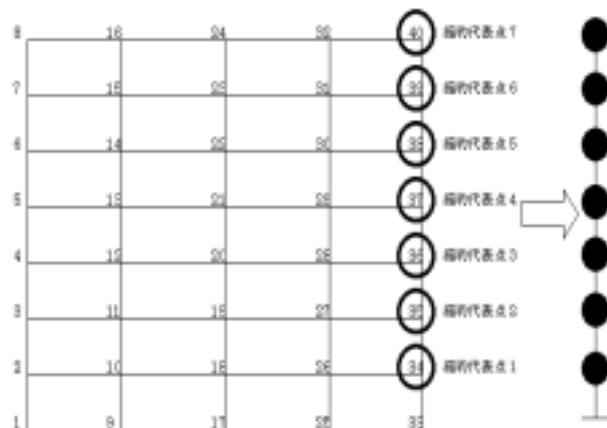


図5 建造物の節点番号及び縮約代表点番号

表3 縮約代表点(7自由度)における減衰定数、重量データ、LL荷重

代表点番号	節点番号	各モードの減衰定数	死荷重	LL荷重
1	34	0.05	591.84	29.32
2	35	0.1	578.76	29.85
3	36	0.5	555.87	29.85
4	37	0.75	532.44	29.85
5	38	1	574.14	23.81
6	39	1	530.38	19.20
7	40	1	601.54	17.05
合計(単位:ton)			3,964.97	178.93

4. OpenGL による建造物及び免震床の描画方法

4.1 免震床を設置する建造物の簡易表示

OpenGL でシミュレートする構造物は、構造物全体および免震床の動的挙動を視覚的に認識できるように左右の柱と免震床以外は非表示として描画した。すなわち、動的応答解析においては 4 スパン 7 層構造物として計算を行い、全ての応答変位が得られた後、左右の柱に関する応答結果のみをピックアップして描画した。

具体的には、図 6 に示すように、柱は各階 4 箇所計 28 箇所とした。また、免震床は第 2 章で詳述した機構を有するものを各階の床の上に設置した（図中の番号 22 から 28）。

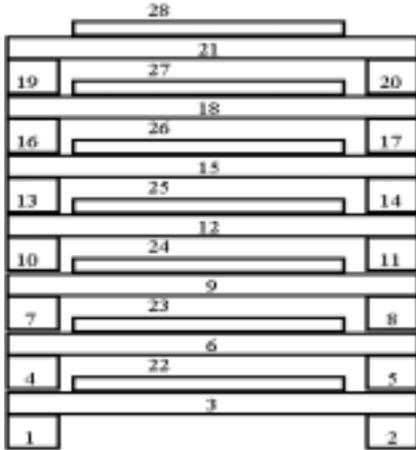


図 6 免震床を設置した 2 スパン 7 層構造物の六面直方体による構成図

#### 4.2 免震床を有する構造物モデルの描画方法と描画結果

OpenGL による構造物および免震床の描画は図 6 で示すように、構造物の床部分（7 箇所）と柱部分（各階につき 4 箇所×7 階=28 箇所）と免震床（7 箇所）の各ブロックに分割する。分割したブロックはすべて六面直方体で構成する。

構造物および免震床を構成する六面直方体ブロックの個々の頂点座標を設定するには、座標設定を容易に、かつ、さまざまな構造物の寸法にも対応できるように左右の柱には局所座標系を採用した。具体的には、図 7 に示すように、構造物の最下層中央と全体座標系 (X, Y, Z) の原点が一致するように構造物を配置する。また、構造物左右 4 本の柱の最下層中央には局所座標系 (X1, Y1, Z1), (X2, Y2, Z2) を設置して、それぞ

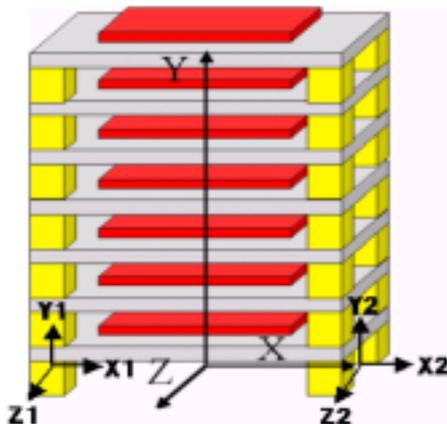


図 7 座標系の設定方法

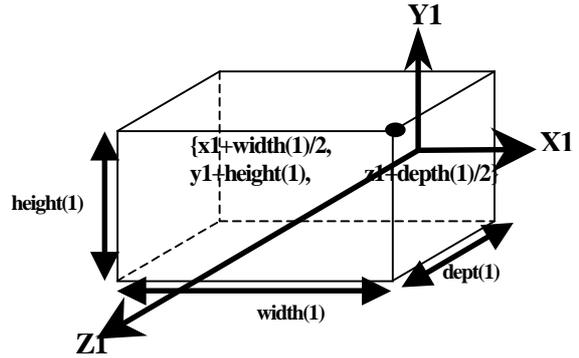
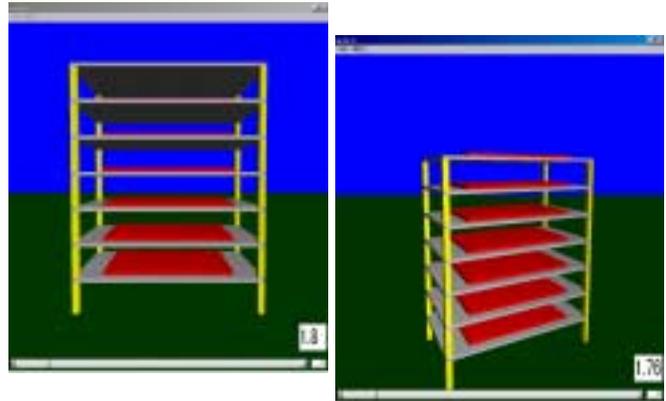


図 8 ブロックの頂点座標の取り方（ローカル座標の原点は(x1, y1, z1)）



(a) 正視図

(b) 斜視図

図 9 OpenGL による免震床を設置した構造物の描画結果

れの原点を (x1, y1, z1), (x2, y2, z2) とした。

床、柱および免震床の六面直方体ブロックの頂点座標（8 頂点）は、六面直方体の底面中央を中心座標とする配列 “Width(添え字)”, “Height(添え字)”, “Dept(添え字)” の寸法を用いる。ここで、各配列の「添え字」は、図 6 の各ブロック番号に対応させる。

ブロック 1 の頂点座標の取り方を図 8 に例示する。上述したように 1 個のブロックに対して、幅、高さ、奥行きを用いて頂点座標を表し、図中の点で示した頂点の座標 {width(1)/2, height(1), dept(1)/2} を算出し、局所座標系(x1, y1, z1)の座標値を加えることで、全体座標系(X, Y, Z)における頂点座標として設定できる。また、ブロック 1 より上のブロック（図 6 の六面直方体の番号 4,7,10,13,16,19）の頂点座標に関しても、各層の高さを順時加えるだけで設定が可能となる。

以上、各ブロックの頂点座標値を算出し、OpenGL で描画した免震床を有する構造物の静止画像を図 9(a)および図 9(b)に示す。OpenGL は機能として視点と注視点を設定することができる。例えば図 9(a)に示す正視図として作画したモデルから、マウスとカーソルキーの操作で図 9(b)に示す斜め方向から眺めた結果も表示することが可能となる。このように OpenGL で描画したオブジェクトはあらゆる位置や角度からの観察が可能であり、インタラクティブな操作性を得ることができる。

#### 4.3 免震床を有する 3 次元構造物に地震応答解析

結果を入力してシミュレートする方法

免震床を有する構造物の OpenGL による動的応答のシミュレートは、床、柱及び免震床の 3 領域に分割することで実現する。

床の動的応答をシミュレートするには、解析で得られた右側縮約点における絶対変位を各番号（図 6 の構造物のブロック番号 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21）の中心座標へ入力する。また、柱の場合は、図 8 に示す六面直方体の上部面と下部面のそれぞれに対応する絶対変位を入力する。最後に、免震床は、解析で得られた免震床の絶対応答変位をブロックの中心座標を入力する。

5. 解析条件

入力する地震波は最大加速度  $700\text{cm/s}^2$  に基準化された兵庫県南部地震（NS 方向）とする。解析時間は 16 秒として、解析時の数値積分に際しては、0.02 秒の時間間隔で記録されている加速度をさらに 20 等分して 0.001 秒間隔で行う。

免震床は、レールの曲率半径を 1,000cm、レール上の転がり（滑り）摩擦とみなし、これを静止摩擦係数 0.1 と仮定する。転動（滑動）時の動摩擦係数と静止摩擦係数の比（= 動摩擦係数 / 静止摩擦係数）は 0.5 とした。積層ゴムの機構においては、積層ゴムの総耐力（水平剛性）は一個につき 6,500N とし、設置する個数に比例する。滑動床の両側に 30cm の許容揺れ幅を想定して、バネ長さ（積層ゴムの最大揺れ幅）が 30cm、クリアランス 0cm とする。解析は、著者らによる滑動と衝突機構を持つ構造物の動的解析プログラムを活用する。

6. 解析結果および考察

図 10 ~ 14 は特定時刻(9, 10, 12, 13sec)における OpenGL による免震床を有する構造物の静止画像である。また、図 15(a)は地盤に対する縮約点 4 の相対応答変位と、その上に設置した免震床（曲率半径 1,000cm、静止摩擦係数 0.1、積層ゴム設置なし、壁面衝突なし）の相対応答変位を示したものである。図 15(b)はその加速度である。このとき図中の変位と加速度における +（プラス）は免震床が右方向に位置する状態を意味する。

縮約点の相対変位とその位置の免震床の変位曲線(図 15(a))の形状は大きく異なるが、最大値の絶対値はほぼ同じ値を示している。これは静止摩擦係数が 0.1 と微小なため、免震床が構造物とは独立した挙動を呈するからである。床の加速度が  $100\text{cm/s}^2$  を超過する場合(図 15(a)の 9 ~ 12sec)には、縮約点の変位に対して、多少の時間差(タイムラグ)の後、床とは逆方向に免震床が変位している状態が認識できる。

同時間帯の構造物と免震床の OpenGL 描画による検証は次のようになる。図 10 より、免震床は床の右側に位置、床は左側に位置している。次に図 11 より、免震床は床の左側に位置し、床は右側に位置している。これは、構造物は地震波により左から右に変位しているが、免震床の絶対変位は変わらずに床上を滑動していると考えられる。さらに図 12 より、免震床は床の右側に位置し、床は右側に位置したままである。これは、免震床が床上を滑動した後、多少の時間差（タイムラ

グ）において、床と同様に右側に変位したものと考えられる。

本節では 9 ~ 12sec における検証を行ったが、図 15(b)より床の加速度が  $200\text{gal}$  を超えるような急激な加速度が作用する時間帯では同様な挙動を示すものと推定される。このことから免震床と床が独立した挙動になり、免震床に伝達されるべき加速度が半減する特性を、描画による視覚化を行うことで検証できると判明した。その他、バネ抗力増大による免震床の自励振動などの結果および考察は、当日の発表で紹介したい。

7. まとめ

本論では地震時の免震床を有する建築構造物が地震外力を受けるときに見られる動的挙動を、OpenGL を活用して動画として再現する解析手法を考案した。また、大型コンピューターや貴重な文化財を地震による甚大な被害から守るために、フロア - 毎に設置される免震床の免震効果について、床下に設置される積層ゴムの特性の違いによる検証を実施した。

参考文献

- (1) 大場康史, 川口健一: "東北地方太平洋沖地震による茨城空港ターミナルビル内天井落下に関する速報(第2版)", [http://space.itsu-kyo.ac.jp/aircraft/Report\\_of\\_Ibaraki\\_Airport\\_Keiwagachi\\_lab\\_ITS\\_Utsu\\_Tokyo.pdf](http://space.itsu-kyo.ac.jp/aircraft/Report_of_Ibaraki_Airport_Keiwagachi_lab_ITS_Utsu_Tokyo.pdf)
- (2) "長周期地震動, 東京都心まで揺れ波及 高層ビル直撃", 日本経済新聞朝刊 (2011.3.11)
- (3) 藤井康寿, 深谷定充, 中川建台: "滑動機構と積層ゴムを装備する免震床の動的応答特性と床免震対策の一提案", 第3回日本制震(振)シンポジウム論文集, pp.25-34 (2004).
- (4) 岩崎高志, 秋元将男, 石原哲哉, 榎本孝雄: "免震床の開発", 日本建築学会大会学術講演要集, pp.769-770 (1996.9).
- (5) 近藤ビル構造設計概要書, 佐藤鉄工株式会社.

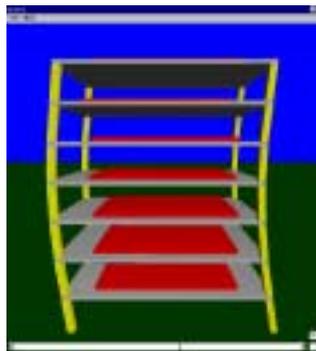


図 10 9sec における免震床の挙動(バネなし)

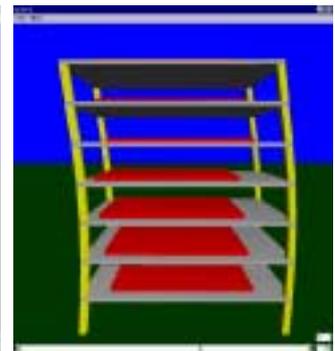


図 11 10sec における免震床の挙動(バネなし)

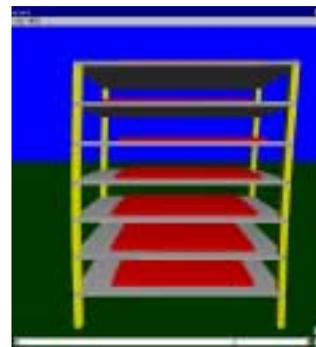


図 12 12sec における免震床の挙動(バネなし)

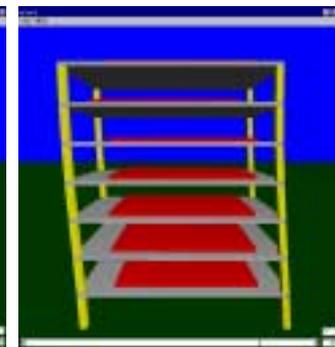
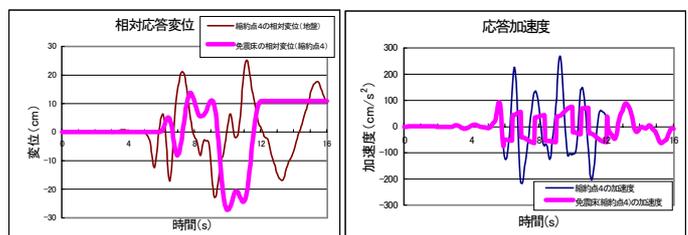


図 14 13sec における免震床の挙動(バネなし)



(a) 相対応答変位 (b) 応答加速度  
図 15 縮約点 4 とその点に配置した免震床