

免震床を有する建築構造物の地震応答解析結果を視覚化する方法の開発

藤井 康寿¹⁾

本研究では、OpenGLを用いて免震床及びそれを設置した構造物（以下、構造モデルと呼称する）の地震時における動的挙動を視覚的に把握することが可能な3次元描画方法を開発した。地震外力を受けて、構造モデルが動的挙動する様子をレンダリングするには、以下の手順で実現可能である。すなわち、対象とする構造モデルを、床、柱および免震床のブロックに分割（合計で98箇所）し、各ブロックは幅、高さ及び奥行き寸法を有する直方体で構成する。直方体には8個の頂点があるので、構造モデルの実寸法（幅、高さ、奥行き）に対応した頂点の座標値を算出して直方体を形成することで構造モデルが描画できる。次に、描画した構造モデルのブロック代表点に、動的応答解析で得られた絶対応答変位を入力することで、地震外力を受ける免震床を有する構造物の動的挙動が描画できるのである。

さらに、構造物モデルに装備した免震床について、床下に設置される積層ゴムの有無やゴムの特性の違いによる免震効果をレンダリング結果から考察した。

キーワード

OpenGL, 免震床を有する構造物, 地震応答解析結果

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（大場・川口，2011）、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が見られた（日本経済新聞，2011）。

住宅や小中学校など既存の公共施設における地震対策は、建物を補強する耐震化の傾向にあるが、博物館や美術館では貴重な展示物を地震災害から守る対策の一例として、免震機構の導入が図られている。住宅の場合は耐震化することで建物の崩壊を回避することができても、室内の対応が施されていないので、調度品や備品が床上を滑動し転倒することで私達に危害を与える場合がある。

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が地震外力を受

けて、動的挙動する状態をレンダリングすることができ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（本研究で対象とするモデルの場合、合計で98箇所に分割）し、各ブロックは幅、高さ及び奥行き寸法を有する直方体で構成した。これらの直方体には8個の頂点があるため、構造物の実寸法（幅、高さ、奥行き）に対応した頂点の座標値を算出し直方体を形成することで構造モデルが描画できる。次に、描画した構造モデルのブロック代表点に、動的応答解析で得られた絶対応答変位を入力すると、地震外力を受ける免震床を有する構造物の動的挙動がレンダリングできるのである。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況を、時々刻々と変化する構造物の動的挙動との関係から考察することは重要であると考えたからである。なお、これまでの考察方法は次のとおりである。免震床を有する構造物の地震応答解析で求められる応答変位は時刻歴として得ることができた。得られた応答変位から各フロアに設置した免震床と構造物の床の応答曲線を同一のグラフ上に描いて、両曲線の位置関係から免震効果の発揮する状況を推定した。

以上より、本論文では構造物に設置した免震床の免震効果に関して、数値解析の利点を生かしてパラメータを任意に設定して地震応答解析を行った。得られた結果を3次元動画としてレンダリングすることで、免震床が構

¹⁾ 東海学院大学 人間関係学部

造物内で免震効果を発揮する状況を考察した。さらに、免震効果を期待して、床下に設置される積層ゴムが増大するようパラメータを変更すると、免震効果が発揮されず逆効果の自励振動（免震床の変位が構造物の床の変位より増大する現象）が発生することが判った。

1.1 先行研究

藤井・深谷・中川（2004）は、地震の強い揺れによって構造物は健全であっても、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の免震床である。さらに、この床下に図2に示す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、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

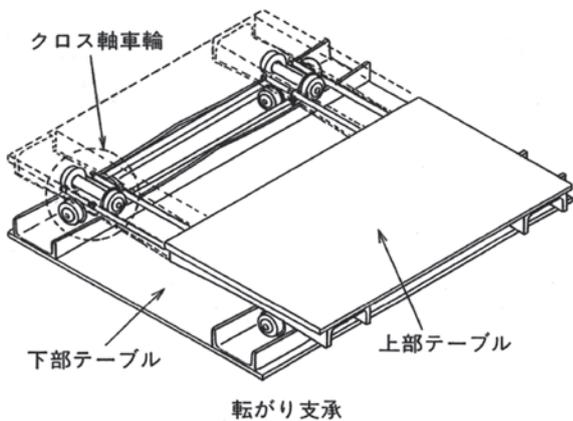


図1 免震台

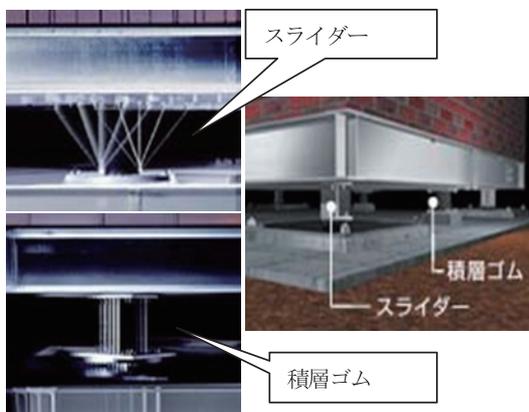


図2 ハイブリット免震構法

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となった。しかし、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。

1.2 教育の目的と利用方法

免震機構は、従来、メーカーの技術者によって免震装置の開発が精力的に行われてきた。例えば、建設会社O社は、土台と椅子との間にあるローラーで揺れを伝えにくくする免震体験装置を開発した。体験希望者は自動車型のいすに座って、実際に観測された地震の最大の揺れを再現して免震効果が発揮される様子が体験できる（中日新聞、2012）。免震装置の広報や一般市民への地震対策の警鐘には効果的である。一方で、学会発表の概要集や企業の広報誌に掲載してあるのは、免震装置の特性を実大実験によって評価した結果が掲載されているのみである。すなわち、免震装置は商品として製作されているので、詳細な情報が公開されていない。いわゆる、情報非公開の箇所があって免震機構の動的現象を教育研究するには困難であった。その上、免震装置の機構のみが着目されて、装置の上に設置した床（免震床）や構造物全体の振動特性には注目されなかった。すなわち、免震機構と構造物を一体で耐震性を考察することは行われなかったのである。

上記の経緯から、藤井等（2004）は免震機構の動力学モデルを考案し、構造物に免震機構を有する床を組み込んだ動的解析プログラムを開発した。

解析プログラムでは免震特性を左右するパラメータが動力学モデルに取り入れてあるので、パラメータの相違による免震特性の比較が可能であることを考察した。その結果、後述（第6章）の解析結果から、比較することが可能になったので、免震機構の教育に活用が広がると考えられる。具体的には、免震機構の動的現象の定式化および、これを組み込んだ振動方程式の表示方法を教育することが可能となる。また、免震機構のパラメータを変更して動的応答解析を種々実施する。これらの結果をOpenGLでレンダリングしてデータベース化を図り、Web上で閲覧可能な動画形式に変換して公開することで、耐震設計の授業で免震床および構造物も含めた免震効果の考察を行う授業の展開が可能となる。

2. 免震床の機構と緒元

本章では、本研究の主題である免震床を有する建築構造物の地震応答解析結果をOpenGLで視覚化する方法を詳述する前に、藤井等（2004）が考案した免震床の機構と諸元について詳述する。また、第3章では、この免震床を装備する建築構造物の諸元および地震応答解析を効率的に行うためのモデル化について概説する。

2.1 免震床の機構

本研究では建築構造物の床免震対策として、図1に示す免震台（鈴木，1997）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ているハイブリット免震工法（一条工務店，2003）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。

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（図3に示すクリアランス）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

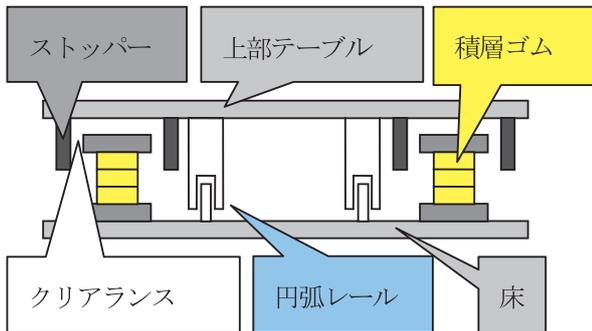


図3 積層ゴムを設置した免震床のモデル図（側面図）

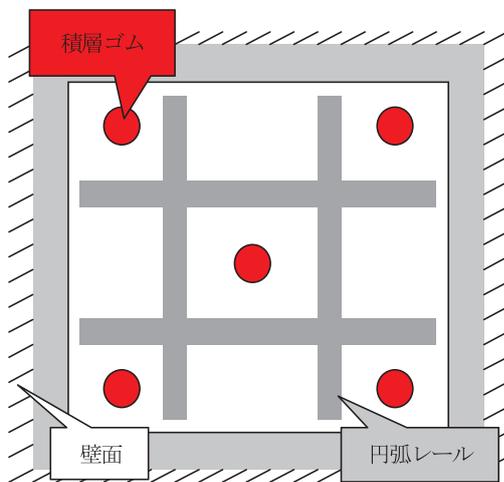


図4 積層ゴムを設置した免震床のモデル図（上面図）

1,000cm, 転がり支承の静止摩擦係数を0.1とした。また、免震床に設置する積層ゴムのバネ抗力およびクリアランスとバネ水平移動量は、岩噌・秋元・石原・榎本（1996）による解析結果から表1に示すパラメータを採用した。

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（図5，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、建築構造設計指針から1m²辺り50kgとなるよう満遍に配置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。

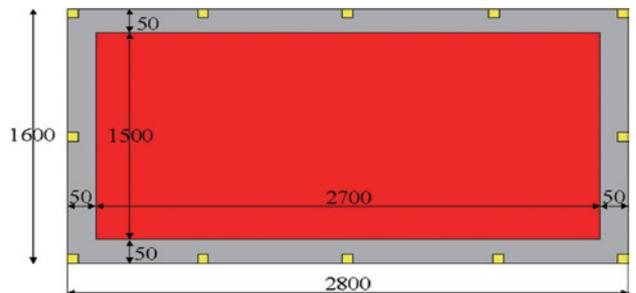


図5 フロアー全体に設置した免震床

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. 免震床を設置する構造物の緒元と縮約

免震床を設置する構造物は高さ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（佐藤鉄工株式会社，2003）とする。対象とする構造物の自由度（105自由度）は高いので、図6に示

す構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）で描画した構造モデルに入力するのである。このとき、代表点番号1～7の重量（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（佐藤鉄工株式会社，2003）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。

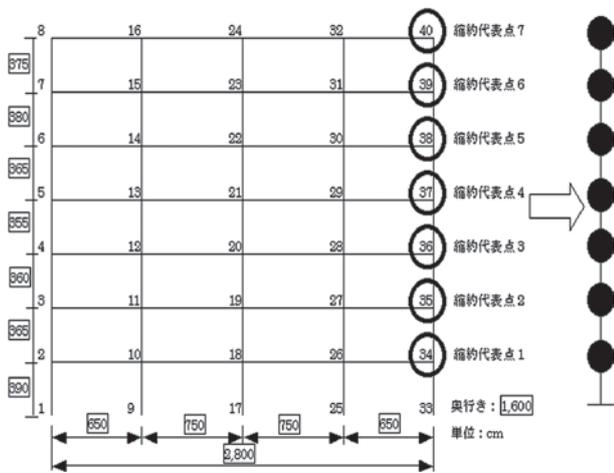


図6 構造物の寸法と節点番号
(数字：節点番号，数字：寸法cm)

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による免震床を有する建築構造物の描画方法

4.1 免震床を有する建築構造物の3次元描画の目的とOpenGLによる描画

地震外力を受ける建築構造物の動的挙動を描画するには、次の手順で実施される。すなわち、詳細な構造物の緒元（各部材の寸法や材料の工学的な特性）を求めて地震応答解析を行うと、解析結果として構造物の絶対応答変位が算出される。得られた絶対応答変位を構造物全て（地震応答解析を実施した箇所）に入力することで動的挙動を再現できる。これらの工程を実現するためには高速演算処理が可能なコンピュータと、高額なソフトウェアを必要とする。しかし、多大なコスト（時間および金銭）をかけないで実現できる方法を提案できれば、1.2節で詳述したように研究および教育分野への活用の広がり、成果が期待できると考えた。

そこで、3章で詳述したように、自由度の大きい構造物であっても、地震外力を受けて動的挙動する状態を再現できるように必要な値のみを算出する手法を考案した結果、解析における多大なコストの軽減を図ることが可能となった。しかし、藤井等（2004）の研究成果においては、得られた解析結果を、描画して再現する手法を呈示するには到らなかった。

本研究では、藤井等（2004）の研究成果を踏まえて地震時における免震床を有する構造物の3次元動的挙動を描画する方法を考案することを目的とした。ただし、多大なコストをかけないという制約条件の中で、OS（Operation System）に依存しないマルチプラットフォーム化が可能な3次元グラフィック表示としてJava3DとOpenGL（ポール・マーツ，2007）の2種類について検討した。このうち、Java3DはOSに依存しないため、異なる環境で実行可能なコードを記述できる反面、ハードウェアに最適化された実行コードを得ることは困難であること、描画表示が高速処理にできないので、本論のレンダリングには不向きであると判断した。一方、OpenGLは、ハードウェアに密着した仕様であるので高速処理が可能な上、豊富なグラフィックライブラリーも装備（床井浩平，2008）されていることから、動的挙動をレンダリングするには適していると判定した。

4.2 免震床を設置する構造物の簡易表示

OpenGLで描画する建築構造物は、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、動的応答解析で4スパン7層構造物として計算を行い、全ての絶対応答変位が求められた後、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7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)。なお、図7は図6における中間の柱3本を非表示にした構成図である。

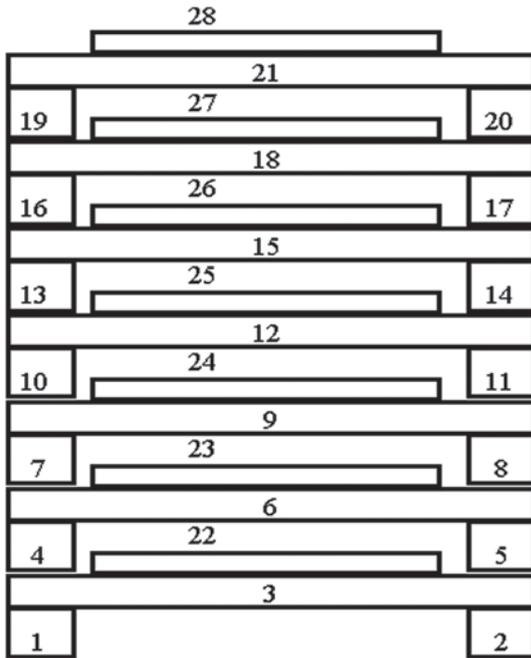


図7 免震床を設置した2スパン7層構造物の直方体による構成図

4.3 免震床を有する構造物モデルの描画方法と描画結果

OpenGLを活用して構造物および免震床を描画するには、図7に示すように構造物の床部分（7箇所）、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。図7の構成図の番号で表すと、床部分は構造物のブロック番号（3、6、9、12、15、18、21）の7箇所、柱正面部分は構造物のブロック番号（1、2、4、5、7、8、10、11、13、14、16、17、19、20）の14箇所と同奥行き部分の14箇所の合計28箇所、免震床部分は構造物のブロック番号（22、23、24、25、26、27、28）の7箇所である。分割したブロックはすべて直方体で構成する。分割に際して、各ブロックの高さは3章で詳述した7つの縮約代表点の高さと一致するように分割する。なお、7つの縮約代表点は図6に示す節点番号（34、35、36、37、38、39、40）である。

構造物および免震床を構成する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スケールにも対応できるように左右の柱に局所座標系を採用した。具体的には、図8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局所座標系（X1、Y1、Z1）、（X2、Y2、Z2）を設置して、それぞれの原点を（x1、y1、z1）、（x2、y2、z2）とした。

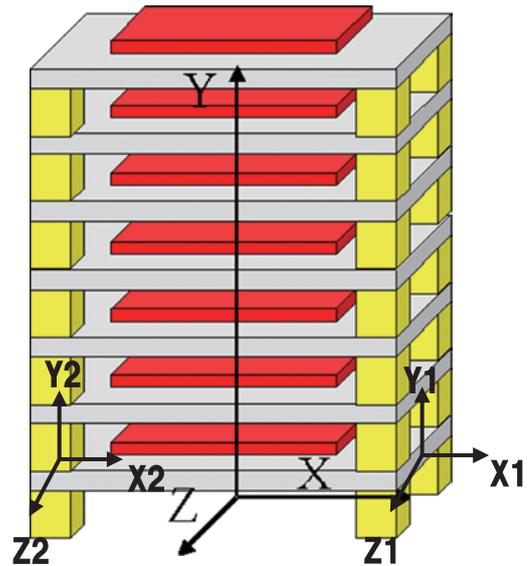


図8 座標系の設定方法

床、柱および免震床の直方体ブロックの頂点座標（8頂点）は、幅（Width）、高さ（Height）、奥行き（Dept）の寸法を用いて表す。具体的には、床、柱および免震床のそれぞれの頂点座標を、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。このとき、各配列の「添え字」は、図7のブロック番号に対応させる。各ブロックの寸法（Width、Height、Dept）をブロック番号に対応させて配列にして扱うことで、プログラムコードの作成が簡潔に記述することができる。

図7に示すブロック1の頂点座標の取り方を図9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 $\{x1+width(1)/2, y1+height(1), z1+depth(1)/2\}$ を算出

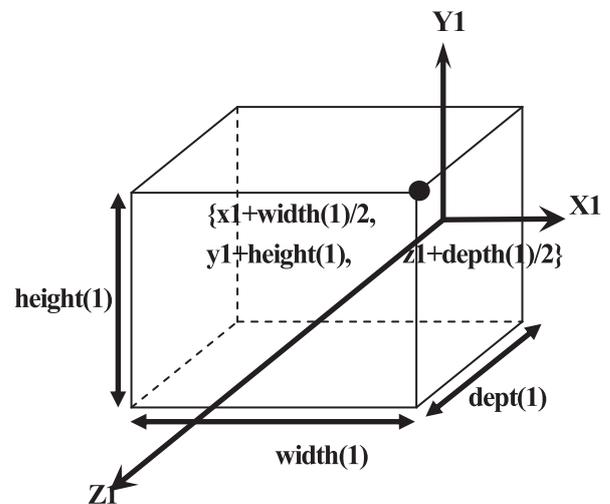
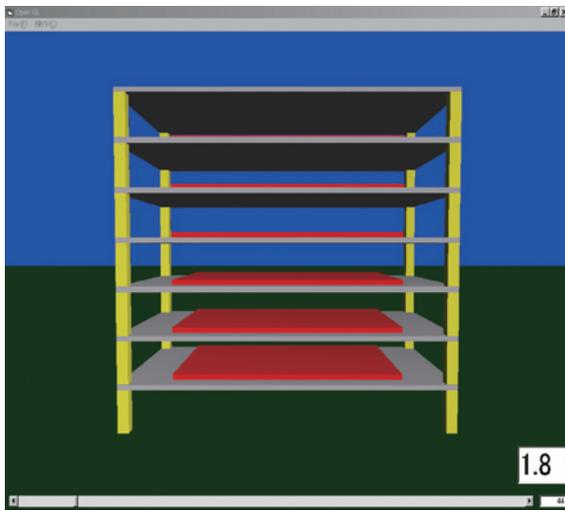


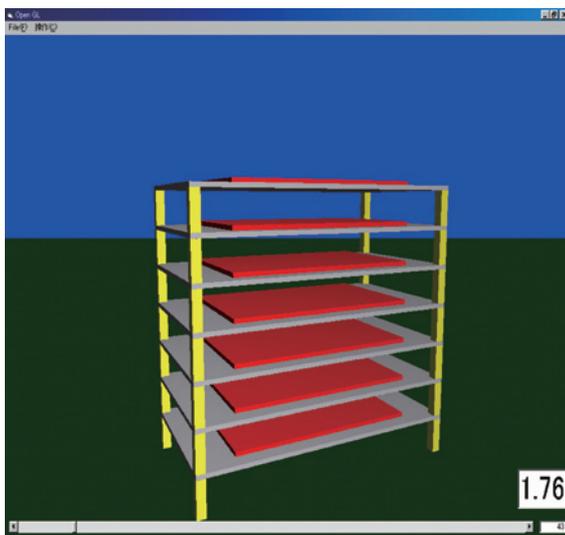
図9 ブロックの頂点座標の取り方（ローカル座標の原点は（x1、y1、z1））

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7の直方体の番号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。

以上の方法で各ブロックの頂点座標値を算出し、OpenGLで描画した静止画像を図10(a)および図10(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可能である。例えば、図10(a)に示す正視図として作図したモデルから、マウスとカーソルキーの操作で図10(b)に示す斜め方向から眺めた描画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が得られる。



(a) 正視図



(b) 斜視図

図10 OpenGLによる構造モデルの描画結果

4.4 構造モデルに地震応答解析結果を入力して動的挙動をレンダリングする方法

構造モデルの動的挙動をレンダリングするには、以下の方法で実現可能となる。構造モデルの静止画像をOpenGLで描画するには、構造物を床、柱および免震床の3領域に分割し、各領域を直方体で構成した。この構造物モデルを構成する直方体の上面や下面の中心座標に、地震応答解析で算出した絶対応答変位を入力するのである。具体的には、以下のように行う。

床の動的挙動をレンダリングするには、解析で得られた右側縮約点における絶対応答変位を各番号 (図7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9に示す直方体の上部面と下部面のそれぞれに対応する絶対応答変位を入力する。一例を挙げると、柱番号4, 5では下部面に床番号3の絶対応答変位、上部面には床番号6の絶対応答変位を入力する。ただし、柱番号1, 2では下部面は地震波、上部面は床番号3の絶対応答変位を入力する。

最後に、免震床の場合は、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に入力する (図7の構造物のブロック番号22, 23, 24, 25, 26, 27, 28)。

5. 解析条件

入力する地震波は最大加速度 700cm/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。地震波を1種類と限定するのは、解析条件の地震波を用いた実大実験の結果 (一条工務店, 2003) より、免震床上の重要物品の転倒に対する判定が 200cm/s^2 を限界値として呈示されたためである。

ビルの床全体を滑動させるということは殆ど水平なレールの上でコロをかませるか潤滑剤によるのが一般的であろう。よって免震床の曲率半径を極めて大きくして1,000cmとする (これは床がレール上で、転がり摩擦がなければ周期 $T=6.35$ 秒の単振動をすることに相当し、ビルの地震応答とはかけ離れている) ので半径方向の加速度による運動は無視してよい。鉄板や鉄骨の接触面では最大静止摩擦係数は0.3~0.4であるから、転がり摩擦 (車輪の転動時の軸受け部の摩擦も合わせたもの) をレール上のすべり摩擦として扱って、これを静止摩擦係数0.1と仮定する (岩増等, 1996)。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、積層ゴムの揺れ幅 (クリアランス) は積層ゴム性能保証変形 (330mm) とほぼ同じ値の30cmとし、積層ゴムの総耐力 (水平剛性) は一個につき、13,000N (=せん断剛性

×変形量)とする。ただし、各床の両側に設置するため、ゴムの総耐力は半分の値にして、解析条件として入力する。したがって、積層ゴムを設置する個数に比例してゴムの総耐力は増加する。本研究では、藤井等(2004)の研究成果から免震効果が最も発揮されたバネ総抗力65,000N(転倒加速度が200cm/s²未満になる)と、4倍の260,000Nとした。また、減衰定数は(岩噌等, 1996)より0.035一定とし、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に設定した(表1参照)。

解析は、藤井等(2004)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。解析の結果、バネの変形が限界値(積層ゴムの性能保証変形)に達したものは、免震床と壁面が衝突して衝撃的かつ過大な加速度が作用した(物品の転倒や破壊が生じた)ことになるので、有効なパラメータの考察対象からは除外している。

6. OpenGL図化プログラムによる免震床および構造物の挙動の解析結果および考察

第5章の解析条件で、地震外力が作用する構造物と免震床の時々刻々と変化する挙動を、OpenGLで描画し考察した。OpenGLによるレンダリングは、描画されたオブジェクト(この場合、構造物と免震床)に時々刻々と変化する絶対応答変位を入力することで動的な連続挙動がコンピュータのディスプレイ上に表示される。このとき、オブジェクトの連続挙動を観察することで現象が把握できるのである。しかし、紙面上に把握した内容を結果として報告するには、例えば、パラパラマンガのように大量の結果を並べて掲載することになり冗長である。したがって、本論では、特定時刻における構造モデルの全体挙動を静止画像として提示しながら、同時に特定の着目点における応答加速度および応答変位の結果も掲載することで動的な連続挙動の考察を行う。このとき、縮約代表点4を特定の着目点とし、文章中の記述はフロアを指す。また、免震床は縮約代表点4の上に装備された状態である(代表点4以外の免震床の考察は、冗長になるので割愛した)。縮約代表点4は、次の理由で選出した。先行研究(藤井等, 2004)において、積層ゴムを装備した免震床は縮約代表点1から4まで設置し、縮約代表点5から7は免震床のみを設置するとき、免震効果が得られたとの報告があった。以上の報告を参考にして、積層ゴムを配置して免震効果が得られた地盤から最も離れたフロアであること、また、構造モデル全体のほぼ中央でもあることから地震の影響を最も受けやすい箇所[振動モード(形状)が最大]として選定した。

掲載する結果は次の3ケースである。なお、免震床の諸元は第2章で詳述したものを各フロアに設置する。最

初に、ケース1は、免震床の滑動現象を考察するため、図1に示す免震床の機構をフロア全体に拡大した積層ゴムを設置しない場合の結果を掲載した。次に、表1に示す2種類の積層ゴム[バネ抗力65,000(N)をケース2、260,000(N)をケース3]の場合について考察を行った。

6.1 免震床の滑動現象について(ケース1による検証)

図11~図14は特定時刻(9, 10, 12, 13sec)におけるOpenGLによる構造モデルをレンダリングした結果の静止画像である。このとき、上記の特定時刻を選んだ理由は、構造モデルと免震床が目視により独立した動的挙動を呈することが観察されたからである。また、図15は地盤に対する縮約点4の相対応答変位と、縮約点4の上

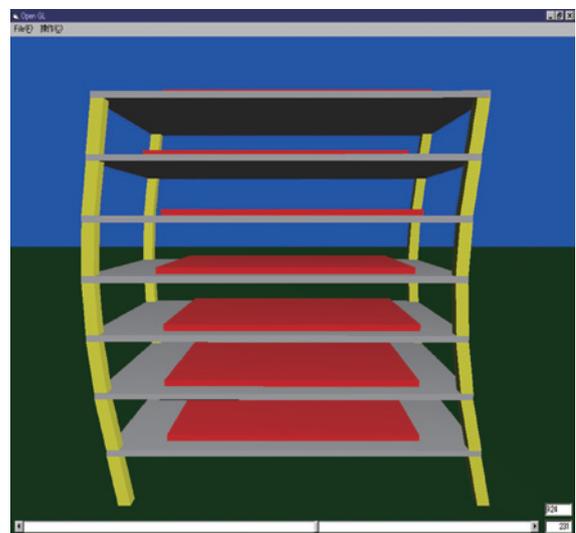


図11 9secにおける免震床の挙動
バネなし

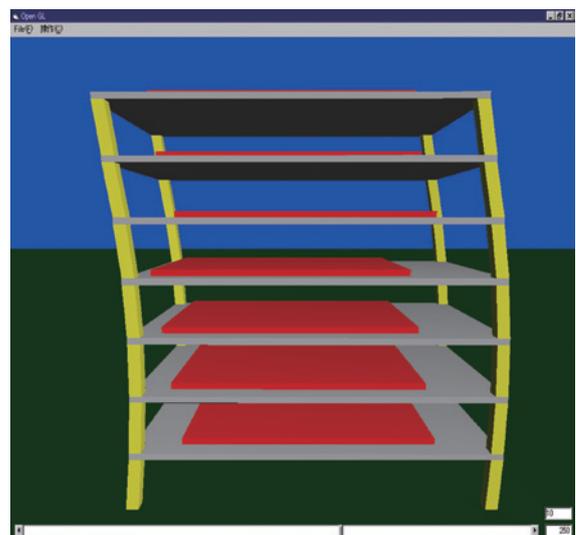


図12 10secにおける免震床の挙動
バネなし

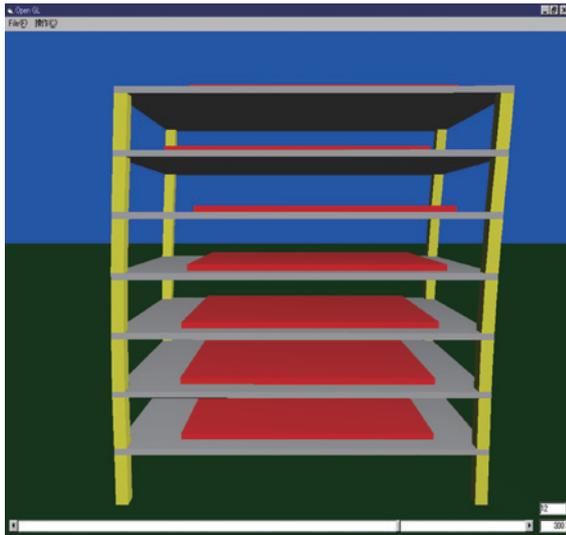


図13 12secにおける免震床の挙動
バネなし

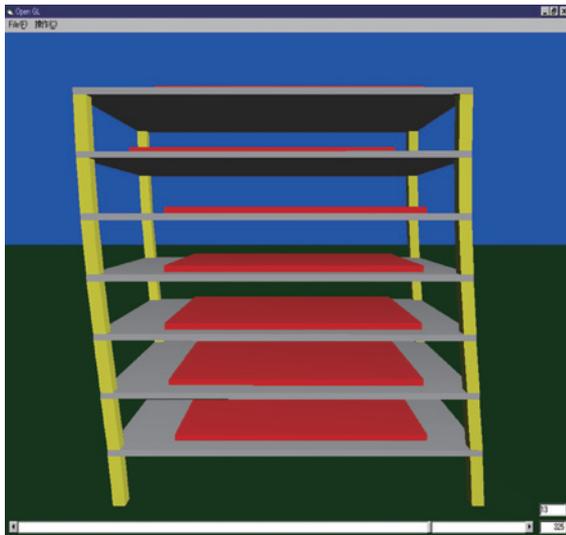


図14 13secにおける免震床の挙動
バネなし

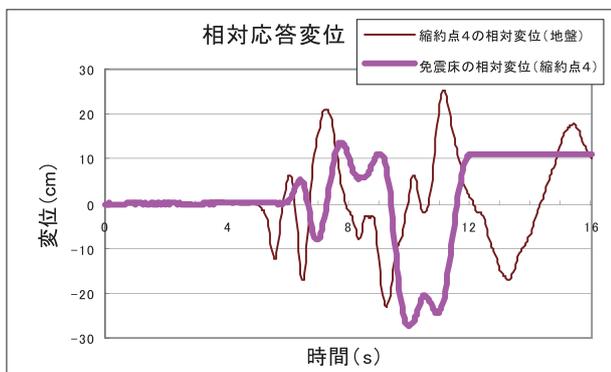


図15 縮約点4とその点に配置した免震床の相対応答変位

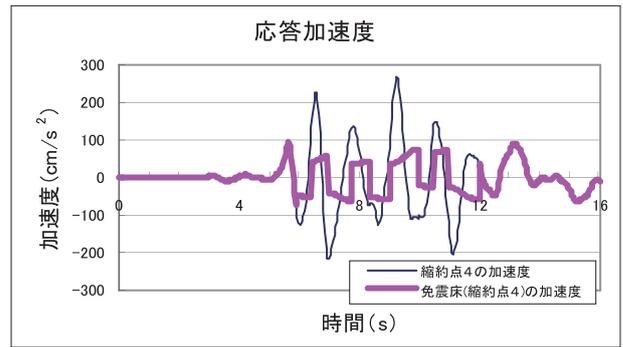


図16 縮約点4とその点に配置した免震床の応答加速度

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16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)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したからである。フロアの加速度が 100cm/s^2 を超過する場合(図15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, フロアとは逆方向に免震床が変位している状態が認識できる。

同時間帯の構造モデルのOpenGL描画による考察は次のようになる。図11より, 免震床はフロアの右側に位置, フロアは左側に位置している。次に図12より, 免震床はフロアの左側に位置し, フロア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フロア上を滑動していると考えられる。さらに図13より, 免震床はフロアの右側に位置し, フロアは右側に位置したままである。これは, 免震床がフロア上を滑動した後に多少の時間差(タイムラグ)をおいて, フロア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における考察のみを行った。しかし, 図16よりフロアの加速度が 200cm/s^2 を超えるような急激な加速度が作用するような時間帯では, 9~12secにおける場合と同じように挙動すると推定される。このことから免震床とフロアが独立した挙動を呈し, 伝達されるべき加速度が半減するという免震床の特性が, 視覚化した構造モデルと免震床のレンダリングを考察することで判明できた。

6.2 免震床の変位が一定になる現象について (ケース1による検証)

図15より, 免震床の相対変位は, 12sec以降ほぼ10cmで推移している。これは図16の加速度に見られるように, 入力地震波の加速度は12sec以降 100cm/s^2 以下(最大静

止摩擦力以下)となり、フロアと免震床のそれぞれの滑動は消滅して免震床が右側約10cmの位置で停止している状況であると判定される。この現象について、OpenGLによる描画結果で考察を行うと次のようになる。すなわち、図13より12secではフロアは右側に位置し、このとき免震床もフロアと同じ右側に位置している。次に、1秒後の13secでは免震床は12secのときと同じ位置に留まり、フロアのみ左側へ移動する(図14参照)。したがって、12~16secでは免震床は右側10cmの一定の位置で留まるが、その間フロアは左右に一回づつ緩やかに揺れる。OpenGLによるレンダリング結果と応答変位の考察から、応答加速度が 100cm/s^2 となる12sec以降では免震床はフロア上の右側で停止状態であることが判明した。

6.3 積層ゴム設置による免震床の変位抑制現象 (ケース2による検証)

図17は、免震床に積層ゴムを設置するときと設置しない場合の応答変位の違いを比較するために、重ね書きした図である。図中の太線はバネ総抗力65,000Nの免震床の応答変位を表わし、細線は積層ゴムを設置しない場合である。図より、地震波入力から約8秒までは同じ応答変位である。しかし、9~11sec間に20cmを超える応答変位があると、積層ゴムが作用して応答変位が抑制されていることが確認できる。

上記のOpenGL描画による考察は次のようになる。図18より9.76secでは免震床とフロアは左側に位置しているが、10.76secではフロアが大きく右へ移動したのに比べて、わずかに右へ移動しているのみである(図19参照)。免震床はフロアと一緒に左へ移動したにも拘らず、約1secの間にフロアは免震床をその場に留めてすばやく右側へ移動したことになる。結果として、フロアには約1sec間に20cm以上の変形が発生したために、免震床の床下に配置した積層ゴムの機能が働いて過大な変位を床に与えないよう抑制効果が作用したと判定できる。

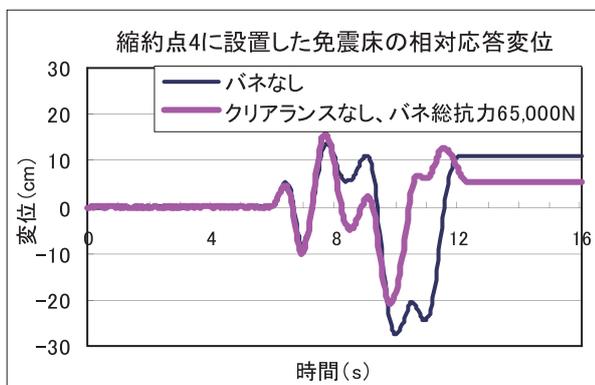


図17 4層に設置した免震床の相対応答変位

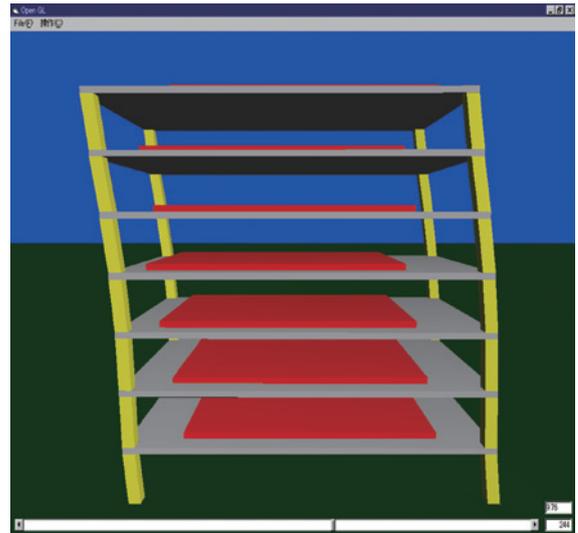


図18 9.76secにおける免震床の挙動
バネ総抗力65,000N
バネ水平移動量30cm, クリアランスなし

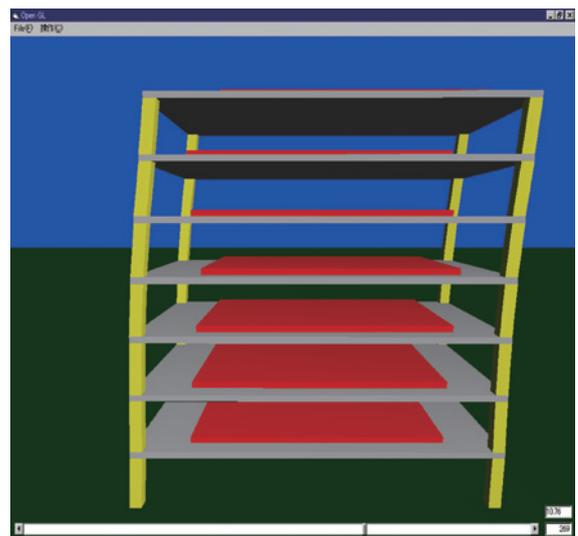


図19 10.76secにおける免震床の挙動
バネ総抗力65,000N
バネ水平移動量30cm, クリアランスなし

6.4 積層ゴムの増加(バネ抗力増大)による免震床の自励振動(ケース3による検証)

藤井等(2004)は免震床に積層ゴムを設置したとき、免震特性を発揮するパラメータを見出すことを主題として動的応答解析を行った。しかし、本研究で積層ゴムのバネ総耐力を増大させるだけでは免震効果を発揮できないケースがあることが判明した。具体的には、積層ゴムのバネ抗力の値を増大させると、構造物のフロアの水平移動より免震床の方が早く移動する現象がOpenGLのレンダリングから観察できたのである。このように連続的に変化する状態を数枚の静止画像で捉えて現象を把握す

ることは困難なことであるが、上述の現象の一端を描画結果と着目点の応答加速度と応答変位から以下の考察が得られた。

図20, 図21より, 9.8sec~10.44sec間(約0.6sec間)に免震床が左から右に移動しているのが観察できる。このとき, 応答加速度は9.8secで飛躍的に増大している(図22参照)。その他, 呈示した結果以外に, OpenGLによるレンダリングでは, 免震床の加速度が 200cm/s^2 を超えると同様の挙動が見られた。免震床の応答変位曲線からフロアの変位よりも大きくなっているのがわかる(図23参照)。

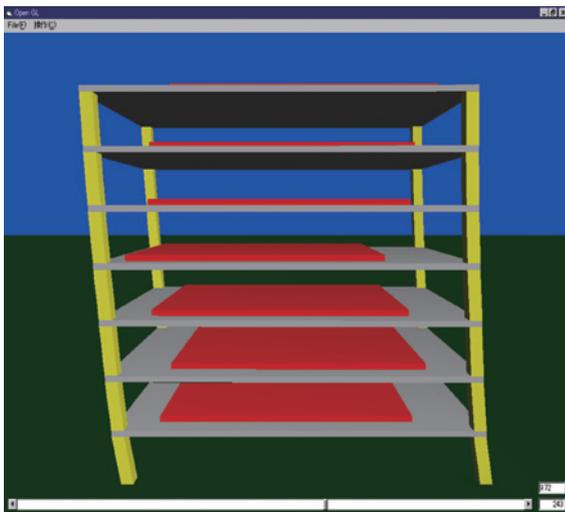


図20 9.8secにおける免震床の挙動
バネ総抗力260,000N
バネ水平移動量30cm, クリアランスなし

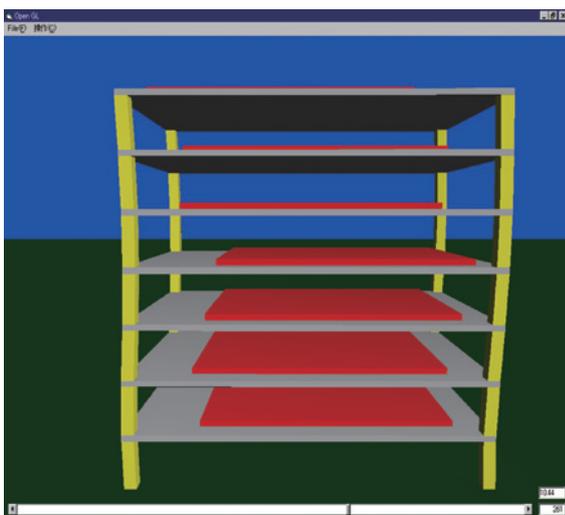


図21 10.44secにおける免震床の挙動
バネ総抗力260,000N
バネ水平移動量30cm, クリアランスなし

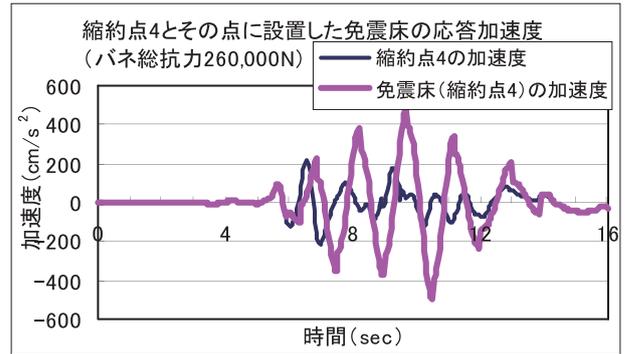


図22 バネ総抗力260,000Nにおける縮約点4と免震床の応答加速度

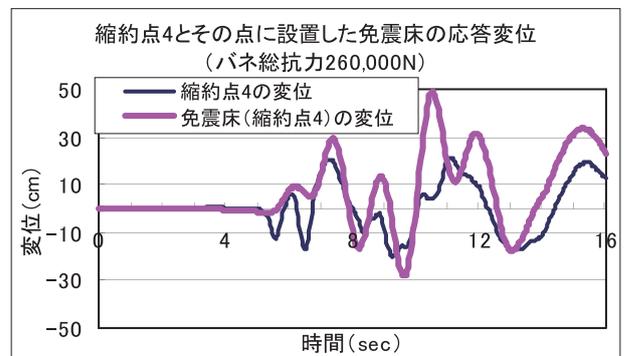


図23 バネ総抗力260,000Nにおける縮約点4と免震床の応答変位

以上の考察から, バネ総抗力を増加させることによりバネの反力作用が増大して, バネのひずみエネルギーが半独立系に滑動する免震床の振動エネルギーとして加算されて, 自励振動(応答変位が増大する現象)を呈したと考えられる。

7. 結論

本研究では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レンダリングする描画手法を考案した。また, 大型コンピュータ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考察を実施した。具体的には, 積層ゴムのない場合, バネの総効力が $65,000\text{N}$ と $260,000\text{N}$ における免震特性について, 構造モデルのOpenGLによる動的描画の任意時刻の静止画像と, 縮約代表点における応答変位や応答加速度を対比させながら考察を行った。その結果, 積層ゴムの増大(バネ総抗力の増加)を図るだけでは免震効果が発揮できず, 逆効果となり得る自励振動(振動エ

エネルギーの増大を招く振動)を誘発する状況を確認した。本論で得られた結論は次のとおりである。

(1) 免震床を有する構造物をOpenGLで描画するに際しては、動的応答をレンダリングすることを念頭において、縮約代表点と同じ高さとなるよう柱、床、免震床をブロックに分割する。分割するブロックはすべて、幅 (Width)、高さ (Height)、奥行き (Dept) の寸法で表して頂点座標 (8頂点)を直線で結んで直方体で構成する。このとき、分割したブロックを組み合わせて全体の構造物を描画するには、構造物最下層中央に設置する全体座標系とは別に、局所座標系を2箇所設置することで、全体座標系との位置関係を考慮することなく描画することが可能となる (図8参照)。また、各ブロックの寸法 (Width, Height, Dept) も、ブロック番号を添え字とする配列 “Width (*)”, “Height (*)”, “Dept (*)” (添え字*は、ブロックの番号)として扱うことで、プログラムコードの作成が簡潔に記述することができる。

このようにして描画された構造モデルのブロック代表点に、解析で得られた絶対応答変位を入力しても、構造モデルを構成する直方体およびそれぞれのブロック間の補間がスムーズかつ断続なく連続的にレンダリングすることが確認できた。

(2) レンダリングを行う際に懸念されたのが、解析結果で得られた応答を入力する箇所がフロア毎に柱、床、免震床の3箇所であるため、構造物の変形が連続的に再現できない (ロボットの腕のように折れ曲がる) 恐れがあることだった。しかし、描画した結果はブロックの上面と下面間は補間されて、構造物の連続的な変形が確認できた。これは次のような理由から実現できたと考えられる。構造物を柱、床、免震床に分割し、これらを大小サイズの違いはあるが直方体の組み合わせで構成した。このとき、各直方体は8つの頂点座標を直線で結ぶことで面を構成して描画しており、構造物全体の変形を直方体レベルで捉え直すと、例えば、上面と下面が変形した場合は、正面から見てせん断変形を生じたときのように平行四辺形に変形するのである。

(3) OpenGLによる描画結果より、積層ゴムを設置しないときの免震床の挙動を視覚的に判定した結果、構造物のフロアが 200cm/s^2 を超えるような急激な加速度となったとき、免震床がフロア上を滑動した後に多少の時間差 (タイムラグ) をおいて、フロアと同様に変位することが描画結果より判定した。このような滑動現象が発生する理由としては、免震床とフロアが独立した挙動を呈し、免震床に伝達されるべき加速度が半減した結果であると判定した。

(4) 積層ゴムを設置した場合、バネ総抗力を増大させると免震床の変位がフロアよりも大きくなる自励震動を

呈することがレンダリングより把握できた。この発生理由としては、バネ総抗力を増加させることでバネの反力作用が増大して、バネのひずみエネルギーが半独立系に滑動する免震床の振動エネルギーとして加算されて、自励震動を起こしたと判定した。

(5) 以上のことから、積層ゴムを設置していない免震床は独立の挙動を呈し、フロアとの間で滑動現象が見られたが、積層ゴムを設置することにより免震床に過大な変位を与えないように抑制効果が働く。しかし、一方で、免震効果を期待するあまりバネ総抗力の増大を図るだけでは、振動エネルギーの増大をまねき自励震動 (応答変位が増大する現象) を発生する要因となることも判明した。

(6) 本研究では、1.2節で記載したように、OpenGLを利用した免震床を有する構造物の動的挙動をレンダリング結果として考察することができるようになった段階である。メーカー側の非公開箇所を独自の動力学モデルを考案して、パラメータの相違による動的挙動の違いを呈示することができた。したがって、考案した動力学モデルの解説と振動方程式に取り込む方法を耐震設計の講義などで教授することが可能となった。また、OpenGLによる動的描画は、例えば、数値解析の利点を活かして様々な解析を行い、パラメータの相違による免震床と構造物の動的挙動を閲覧できるシステムを構築することで耐震教育への活用が期待される。稿を改めて報告したい。

最後に、動画作成用のOpenGLは非常に機能化されたソフトウェアである。しかし、数値解析の結果と動的挙動の静止画像とを併記しながら有用性を論じたので、動画を容易に実現できたかという点で遺憾ながら否である。相応の思考方法の転換を行うことが必要と考える。視覚認識の優れている点は論を持たないので、動的解析の研究や動画の作成や活用が必要とされる教育および研究分野に普及するような研究成果の広がりを期待したい。

引用文献

- 中日新聞朝刊 (2012). 免震 座って比べて, pp. 24.
藤井康寿・深谷定充・中川建治 (2004). 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.
一条工務店 (2003). 一条の免震住宅 Concept & Technology.
岩増高志・秋元将男・石原哲哉・榎本孝雄 (1996). 免震台の開発 日本建築学会大会学術講演概要集, pp. 769-770.
日本経済新聞朝刊 (2011). 長周期地震動, 東京都心まで揺れ波及 高層ビル直撃, pp. 1.
大場康史・川口健一 (2011). 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.iis.u-tokyo.ac.jp/main/Prompt_Report_of_Ibaraki_Airport_kawaguchi_lab_IIS_Univ_Tokyo.pdf) (2012年9月7日).

ポール・マーツ著 (松田晃一, 松田真梨子訳) (2007).

OpenGLの真髄 ピアソン・エデュケーション.

佐藤鉄工株式会社 (2003). 近藤ビル構造設計概要書.

鈴木浩平 (1997). 振動を制する ダンピング技術 オーム社.

床井浩平 (2008). OpenGL入門2 テクスチャーマッピング 工学社.



ふじい こうじゅう
藤井 康寿

1988年岐阜大学大学院工学研究科土木工学専攻修士課程修了。岐阜大学助手、助教授、東海学院大学 教授。博士 (工学) (京都大学, 1996年)。専門は教育工学, 破壊力学, 構造工学。CIEC (コンピュータ利用教育学会) 所属。

Development of a Method for Visualizing Seismic Analysis Result of Space Structures Equipped with Base-Isolated Floors

Kouju Fujii¹⁾

In this study, we have developed a drawing method for simulating seismic analysis results of a space structure equipped with base-isolated floors utilizing OpenGL. Rendering is performed by next procedure. A target space structure model is divided into the block of some floors, columns and base-isolated floors. Then, each divided block is made in the cuboid with the size of width, height and depth. Actually, each cuboid can be drawn by connecting eight top coordinates calculated from actual size of structural model in straight line. Finally, the dynamic behaviour of the space structure equipped with base-isolated floors of earthquake loading can be simulated, when some absolute displacements by seismic analysis are input into some block representative points of space structural model drawn utilizing OpenGL.

Besides, the damping effect of horizontal vibration by the difference of characteristics of the laminated rubber bearing has been verified on base-isolated floors.

Keywords

OpenGL, base-isolated floor, seismic analysis result

¹⁾ Faculty of Human Relations, Tokaigakuin University