

やじろべえ型免震構造(SFS21)の研究開発

佐武 直紀 (技術研究所) 猿田 正明 (技術研究所) 真瀬 伸治 (技術研究所) 北村 佳久 (設計本部) 磯田 和彦 (設計本部) 堀 富博 (設計本部)

Development of Isolated Balanced Structure (Seismic Free System 21)

by Naoki Satake, Masaaki Saruta, Shinji Mase, Yoshihisa Kitamura, Kazuhiko Isoda and Tomihiro Hori

Abstract

The new seismic-free system (SFS21) is developed under the concept of longevity and earthquake-proof design of buildings. This system consists of two parts. One is the RC core-shaft on top of which a seismic-free mechanism composed of double-layered rubber bearings is installed. The other is the office or residential space hanging from the hat-truss constructed over the seismic-free mechanism. In this paper, we describe the main concept of SFS21, some of analytical studies, static loading tests of rubber bearings and shaking table tests of 1/25-scale SFS21 model. The shaking table tests use a 3-dimensional model which employs double-layered bearings. The results of the analyses and shaking table tests show that the fundamental natural period is longer than ten seconds, and the acceleration earthquake responses at the hat-truss become less than a sixth of those at the top of the core-shaft. Simulation analyses using a 3-dimensional frame model are also performed, and it is clarified that this model is useful for simulating the dynamic behavior shown by the shaking table tests. These results indicate that SFS21 has high seismic isolation performance.

概 要

著者らは、建物の超寿命化と合理的な耐震設計というコンセプトの下、新しい免震構造システム(SFS21)の研究開発を行った。システムは、2段積層ゴムの免震機構を頂部に搭載したコンクリートコアシャフトと、免震機構を介して上部に組まれたハットトラスからケーブルで吊り下げられた居室部分から成る。本論文では、SFS21の概要、質点モデルによる振動性状の検討、免震用積層ゴムの要素実験について述べた後、縮尺1/16模型による振動台実験についてやや詳しく述べた。振動台実験は、2段式積層ゴムを搭載した模型を用い、試験体の振動特性と地震波加振による応答性状について様々な角度から検討した。併せて3次元立体モデルによる実験結果のシミュレーション解析も行い、実験結果との比較から解析モデルの妥当性を検証した。以上の結果から、SFS21の免震機構が当初の意図通りスムーズに動作し、免震効果が充分発揮されることが確認できた。

§ 1. はじめに

建築が社会的なストックとなるためには、その建築が長い時間、社会の中で生き続けることが必要である。建築の長寿命化を考える上で重要なことは、それ自身の劣化防止と同時に、自然災害に対しても十分な耐力を持つことである。特に我が国の場合、地震災害に対し、建築が国民の生命と財産を守ることが何よりも求められる。同時に、近代建築の基本的な素材である鉄(鋼材)、コンクリート、ガラスの特徴を生かしつつ、長寿命・耐災害の建築構成を試みるのが、地球環境保全の観点から意義があると考えられる。

著者らは、上記のコンセプトに基づき、新しい免震システムであるやじろべえ型免震構造(SFS21, Seismic

Free System)を開発し、その実用化へ向けて実験や解析による検討を行ってきた。本論文では、まずSFS21の概要を述べ、次に、質点モデルによる振動性状の検討、実大免震用積層ゴムの要素実験について述べる。引続き、縮尺1/16模型試験体による振動台実験についてやや詳しく述べ、さらにシミュレーション解析による検証を加え、SFS21の優れた免震性能を実証した結果を述べる。

§ 2. SFS21の概要^{1),2)}

2.1 やじろべえ型免震構造の原理

建築を地震・風などの自然外力から守るためには、直接外力に抵抗するのではなく、これを合理的に受け流しな

から建築を支えることが、最も有効かつ安全である。古くから伝わる『やじろべえ』の原理は、このような思考にふさわしい構造システムといえる。この構造は、基本的に引張りと圧縮という2つの力学特性によってつり合いが成立している。大きな引張耐力を有する鋼材と、大きな圧縮耐力を有するコンクリートが、この構造の素材として最適となる。

以上の概念を、高さ100m、21階建のセンターコア形式オフィスビルに適用した場合の断面・平面を図-1、図-2に示す。本構造は、頂部に地震時の変形を絶縁する免震装置を搭載した高強度コンクリートのコアシャフトと、免震装置を介してその上部に組まれたハットトラスから高強度の引張材(ケーブル等)によって吊り下げられた居室部分を組み合わせ、やじろべえ型免震構造である。従来の基礎免震構造と異なり、建物の重心が免震装置より下方に位置し、振子の効果による復元力を利用できるため、基礎免震構造に比べ、より長周期の安定した免震システムを構成できる。図-1に示す建物の場合、周期を10秒以上に伸ばすことが可能である。

コアシャフト頂部とハットトラスとの間に組み込まれた免震装置は、居室部分の鉛直荷重をコアシャフトに伝達しつつ、前後左右の相対変形と、頂部に生じる相対回転とを吸収できるよう、積層ゴムを球面状に2段に組み込んだ仕組みで成り立つ、『ダブル免震』方式である。上部の球面は、建物上部に位置する仮想の回転中心を焦点に持つ。一方、下部の球面は、コアシャフトの曲げ変形モードによる影響を小さくするのに有効となる。図-3に示すように、振子スウェイ、振子回転、コアロッキングの3種のモードの相対変位を、2段に組み込んだ積層ゴムの変形により吸収することができる。吊り下げられた居室部分の内側構面は鉄骨筋違構造とし、居室部分の剛性を高めるように設計する。さらに、居室部分の揺れやねじれ変形は、コアシャフトとの間に各種のダンパーを組み込むことで制御する。

2.2 施工計画

施工は、ハットトラスを地上で組立て、コアシャフトのコンクリート打設とともにハットトラスを上昇させる。これを全天候揚重システムとして利用し、吊り部分の鉄骨、床デッキプレート、外壁を吊り上げる。これにより、仮設や重機が省略できるため、天候に左右されない安全な施工が可能となり、工期も短縮される。また、各階の床構造や内外装は、地震応力や層間変形から解放されるため、各階同一とすることができ、標準化が図れる。

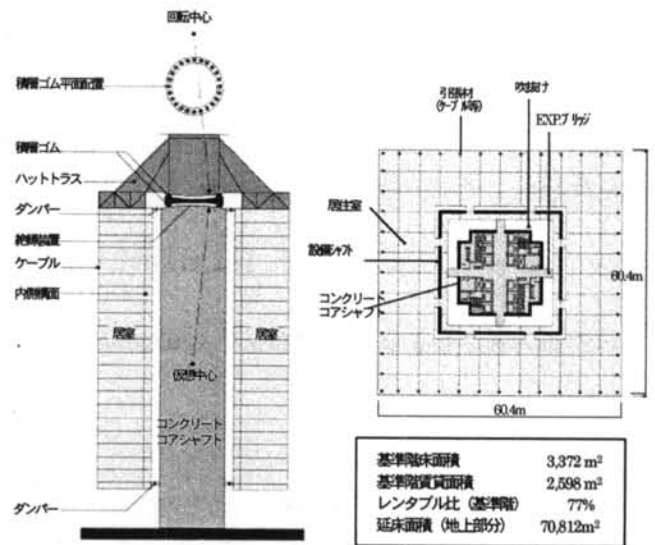


図-1 SFS21の概念図 図-2 想定建物の平面図

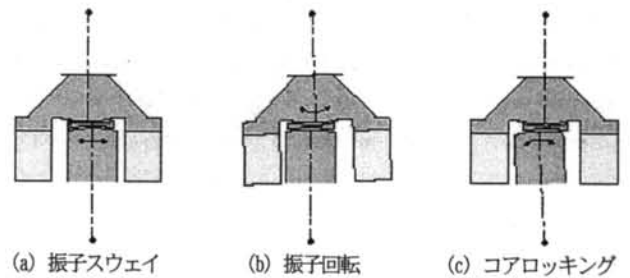


図-3 SFS21における3つのモード

以上の長所を生かし、建設費を通常の耐震構造とほぼ同等、基礎免震構造より数%安くすることが可能になる。

2.3 SFS21による期待効果

ここまで、SFS21の構造、構法、および経済面の効果について述べた。SFS21は、在来の建築とほぼ同じ建設費で超長周期の免震システムを構築できるため、発生する地震の大きさや性質にかかわらず優れた免震性能を発揮し、長期間にわたり建物機能の維持を目指すことができる。

また、建築計画面からも、以下の諸効果を期待できる。

- ① 地上面の開放：地上面に接するのはコアシャフトのみで、設置面積を建築面積の1/10程度にできるため、残りの地上面を公共空地や交通などの用途に利用できる。
- ② 居室部分のフレキシビリティ：建物外周はケーブルによる吊り構造であるため、広い無柱空間を確保できるほか、自由な階高設定が可能となる。
- ③ 多機能なエコシャフト：コアシャフトと居室部分の間の吹抜部を通風、採光、メンテナンス等に活用できる。
- ④ 建物群への適用：周期の異なる建物同士を連結するこ

とで、地震時の揺れを更に小さく抑えられるため、建物群としてより安全性の高い都市区域を創出できる。

§ 3. 質点モデルによる振動性状の検討^{1),2)}

3.1 簡易モデルによる振動理論

やじろべえ型免震構造の振動性状を簡便に表現するため、2質点の簡易モデルによる振動方程式導出と固有値解析を行った。

図-4に示すハットトラスおよび居室部分(§ 3.ではこれらを合わせて振子部とよぶ)を剛体とみなし、RC コアシャフト部分(コア部)の変形は無視する。その結果、コア頂部で凹型に上下2段に重ねた積層ゴムの変形のみを考慮した、図-5に示す2自由度系のモデルを構成できる。コア部と接する積層ゴムが上に凸となるため、振動モデルの支点はコア頂部より R_1 だけ下となる。回転角は反時計回りを正とした。

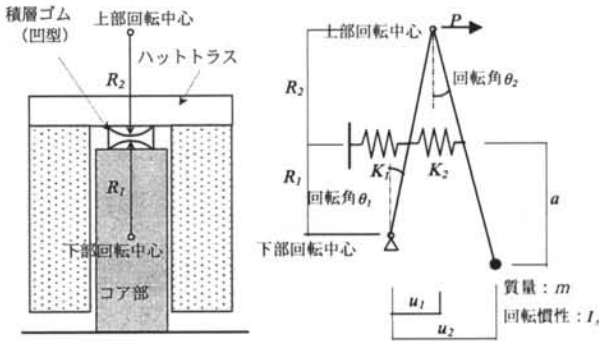


図-4 構造の概要 図-5 2自由度簡易振動モデル

振子部の上部回転中心廻りのつり合いは、ハットトラスを含む剛体部分の質量 m と重心廻りの回転慣性モーメント I_θ 、重力加速度 g を用いて、式(1)で表わされる。

$$I_\theta \theta_2 + m u_2 (R_2 + a) + K_2 R_2^2 (\theta_2 - \theta_1) + mg \theta_2 (R_2 + a) = 0 \quad (1)$$

また、上部回転中心に作用する水平反力 P は式(2)となる。

$$P = -m u_2 - K_2 R_2 (\theta_2 - \theta_1) \quad (2)$$

一方、コア頂部に配置された2段重ね積層ゴムにおける下部回転中心廻りのつり合いは、式(3)で表わされる。

$$P(R_1 + R_2) + K_1 R_1^2 \theta_1 + K_2 R_1 R_2 (\theta_2 - \theta_1) - mg(R_1 + R_2) \theta_1 = 0 \quad (3)$$

ただし、

K_1, K_2 : 上段、下段の積層ゴムの水平剛性

上部回転中心での水平変位を u_1 、振子部の重心位置での水平変位を u_2 とすると、 u_1, u_2 は式(4)で表わされる。

$$u_1 = -(R_1 + R_2) \theta_1, \quad u_2 = u_1 + (R_2 + a) \theta_2 \quad (4)$$

式(1)~式(4)より θ_1, θ_2 に関する振動方程式が得られる。

以下の展開は紙面の都合により省略するが、2段重ねの積層ゴムを同一諸元($R_1 = R_2 = R, K_1 = K_2 = K$)とすれば、 ω^2 に関する2次方程式が式(5)のように導かれる。

$$C_1 \omega^4 - 2C_2 \omega^2 + C_3 = 0 \quad (5)$$

ただし、

$$C_1 = 4mR^2 I_\theta \quad (6a)$$

$$C_2 = I_\theta (KR^2 - mgR) + mK(R^2 + a^2)R^2 + m^2 g(R^2 - a^2)R \quad (6b)$$

$$C_3 = 2\{KR^2 + mg(R+a)\}(KR^2 - mgR) - K^2 R^4 \quad (6c)$$

式(5)を解けば、1次と2次の固有周期 T_1, T_2 が得られる。

回転半径 R を変化させた時の固有周期の変化を図-6に示す。21階建て試設計建物で想定している、免震機構部の回転半径 $R=50$ mの場合を、図-6に一点鎖線で示した。なお、 $R=50$ mの場合について1次と2次の固有

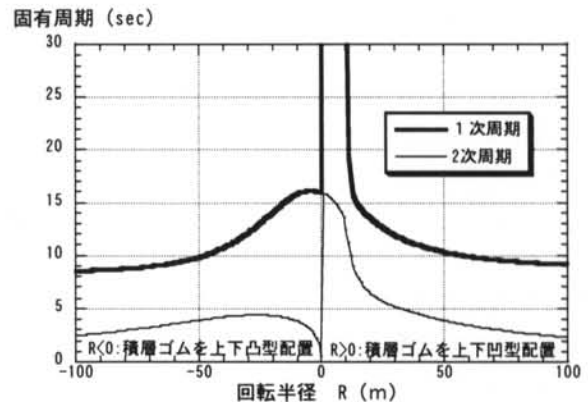


図-6 簡易振動モデルにおける回転半径と固有周期との関係

振動モードを求めてみると、振子部の仮想回転中心はそれぞれ免震機構部の112m上方と46m下方に位置し、図-3で示した振子スウェイモード、振子回転モードにそれぞれ対応している。

3.2 想定建物モデルの応答解析

想定建物(コア高さ60mの21階建オフィスビル)に対応する振動モデルにより弾性地震応答解析を行い、応答性状を検証した。

解析モデルは、試設計に基づく部材設定の後、質量を各階床レベルに集約させた84質点(各層4質点)の2次元モデルである。コア部はH型鋼の境界ばりで連結された2本の曲げせん断棒とし、振子部は左右各20質点ずつを剛なハットトラスから吊り下げた。左右の質点の水平変位は等しく設定した。最上部および最下部の質点とコア部との間にはオイルダンパーを設置した。コア頂部には、凹型に上下2段の積層ゴムを設置してハットトラスを支持させた。回転半径は上下とも50mとした。なお、振子効果による復元力は、質点間をつなぐ水平方向ばねでモデル化した。減衰は、コア部の振動に対応する3次モードに対し、2%の剛性比例型とした。

解析モデルの固有周期は1次10.8秒、2次4.3秒、3次0.9秒で、3.1で述べた簡易モデルとほぼ同じ値となった。

入力地震動には、想定関東地震波(最大加速度 332cm/s^2)、BCJ-L2波(同 356cm/s^2)、JMA-Kobe波(同 818cm/s^2)を用いた。解析の結果、振子部の応答は概ね 100cm/s^2 程度以下に収まっており、十分な免震効果を有することが確認できた。

§4. 免震用積層ゴムの要素実験^{3),4)}

4.1 実験の目的

SFS21では、従来の免震構造のように、積層ゴムが軸力下で単純に水平せん断変形を受けるのではなく、上下フランジが回転しながらせん断変形する。その特性を把握するため、実大の積層ゴムによる要素実験を行った。

4.2 実験概要

4.2.1 試験体

試験体には、実大の500φの天然ゴム系積層ゴムを用いた。積層ゴムの諸元は、内部鋼板:3.1mm厚×29層、内部ゴム:3.4mm厚×30層、 $S_1=36$ 、 $S_2=4.9$ 、内部ゴムせん

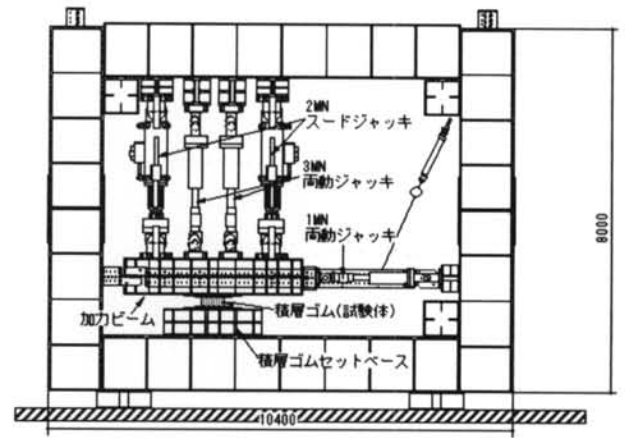


図-7 加力フレームの概要

断弾性係数 $G=0.39\text{MPa}$ である。

4.2.2 加力装置と測定計画

加力は、反力フレーム内に積層ゴムを固定し、水平方向には6MNの両動ジャッキにて、鉛直方向には3MNの両動ジャッキ2台と2MNのスードジャッキ2台を用いて行った。加力フレームの概要を図-7に示す。

測定は、各ジャッキの荷重をロードセルにて行うとともに、加力ビームの水平・鉛直変形などを対象に行った。

4.2.3 実験内容

本実験では、以下の3項目について実験を実施した。

- ① 性能確認実験 積層ゴムの鉛直方向および水平方向に対する基本性能を確認するための実験で、鉛直方向は $9.8\text{MPa} \pm 2.9\text{MPa}$ による等価剛性を、水平方向は面圧 9.8MPa におけるせん断歪 $\gamma=200\%$ での等価剛性により求めた。
- ② 回転性能確認実験 積層ゴムの回転剛性を確認するための実験で、面圧 1MPa 、 14.7MPa 、 19.6MPa をパラメータとして、積層ゴムの固定されている加力ビームに $\pm 1/100 \sim 1/50$ の回転を与えた。
- ③ 回転を伴う水平変形性能確認実験 積層ゴムの上下フランジ間に回転が生じた際の水平方向復元力特性に与える影響について確認するための実験で、1) 積層ゴムの下側フランジと固定ビームとの間に傾斜のついたプレート(傾斜角: $1/100$ および $1/50$)を挿入して行う実験、2) 水平変形に応じて加力ビームに回転角を与える実験、の2種類を実施した。

4.3 実験結果

4.3.1 性能確認実験

積層ゴムの水平剛性は 78.4kN/m (設計値 75kN/m)、鉛直剛性は $1.73 \times 10^6\text{kN/m}$ (同 $1.84 \times 10^6\text{kN/m}$)であり、設計

値を満足することを確認した。

4.3.2 回転性能確認実験

積層ゴムフランジの回転角とモーメントの関係を図-8に示す。面圧1MPaでは順S字型の形状を示すが、面圧が14.7MPa、19.6MPaでは紡錘型となっている。図-8には式(7)⁵⁾による計算値を併記した。

$$KR = E_{rb} \cdot I / T_r \quad (7)$$

ただし、

E_{rb} : 圧縮時曲げに関する見かけの縦弾性係数

I : 断面2次モーメント

T_r : ゴム層厚

面圧が14.7MPa、19.6MPaにおける等価回転剛性は、理論式と概ね良く合っていることがわかる。

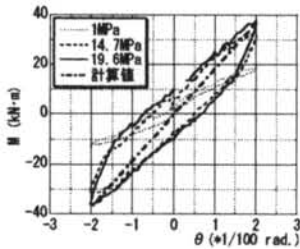


図-8 回転角—モーメントの関係 (回転性能確認実験)

4.3.3 回転を伴う水平変形性能確認実験

面圧14.7MPaにおける積層ゴムの下側フランジとセットベースとの間に、テープの付いたプレート($\theta=1/50$ 、 $1/100$)を挿入して固定し、せん断変形させた場合の荷重-変形関係を図-9に示す。 θ が大きくなるに従い水平剛性が若干下がり、 $\theta=1/50$ では $\theta=0$ と比べて約94%となり、水平変形が大きくなるに従いハードニングの傾向が顕著になっている。

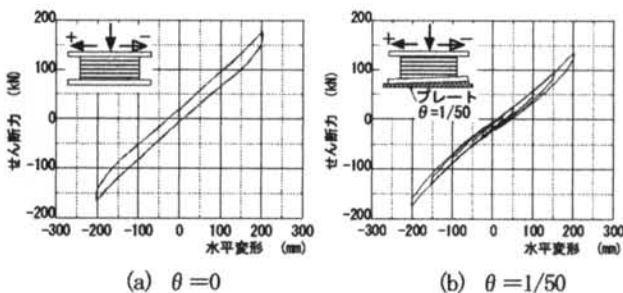


図-9 フランジに一定の回転角 θ を与えた場合の荷重—変形関係

積層ゴムのせん断変形とフランジの回転角を、図-10

に示す関係で加力した時の荷重変形関係を図-11に示す。 $\theta=1/100$ と $\theta=1/50$ では顕著な差はなく、図-9と比べてもほぼ同じ剛性となっている。

これらの結果から、積層ゴムに水平変形とともに回転が加わった場合、若干剛性は低下するものの、概ね線形を保っていることがわかる。

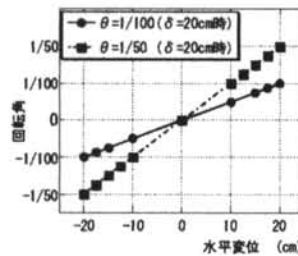


図-10 水平変形—回転角の関係

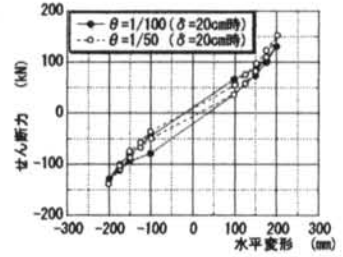


図-11 回転角—モーメントの関係

§ 5. 縮尺1/16 模型試験体による振動台実験^{3),4)}

5.1 実験の目的

§ 5. では、SFS21の振動性状および免震効果を把握する目的で実施した、想定建物の模型試験体による振動台実験について述べる。

著者らは、§ 5. での実験に先立ち、免震機構部をローラー受プレートで製作した縮尺1/25試験体(写真-1)の振動台実験により、以下に示すSFS21の基本的な免震性能を予め検証している^{1),2)}。

- 1次から3次のモードが、図-3で示した3種のモード(振子スウェイ、振子回転、コアロッキング)にそれぞれ対応すること。
- 振子上部の最大加速度が、コア頂部の1/6~1/10程度となり、免震効果が十分発揮されること。
- ダンパーの設置により、振子部の変位応答が2、3割程度低減すること。

これらの結果を踏まえ、以下①~③の3項目を目的として、免震用の積層ゴムを搭載した縮尺1/16試験体(写真-2、図-12)を製作して振動台実験を実施した。

- ① 球面状に傾斜配置した積層ゴムが、任意方向へスムーズに動作することを確認する。
- ② 積層ゴム取り付け時の施工精度が、応答性状にどのような影響を与えるかを検証する。
- ③ 実験結果を§ 6. で述べる解析結果と照合し、実現象を解析で正しく評価できることを確認する。

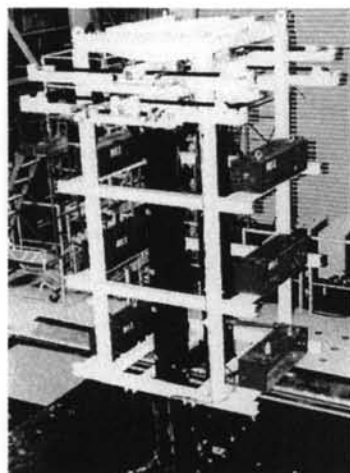


写真-1 縮尺1/25 試験体

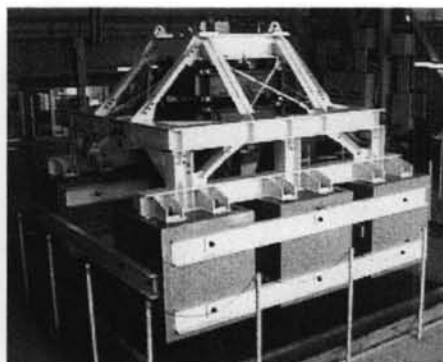


写真-2 縮尺1/16 試験体

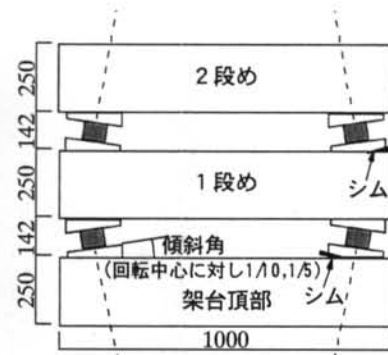


図-13 免震機構部詳細図

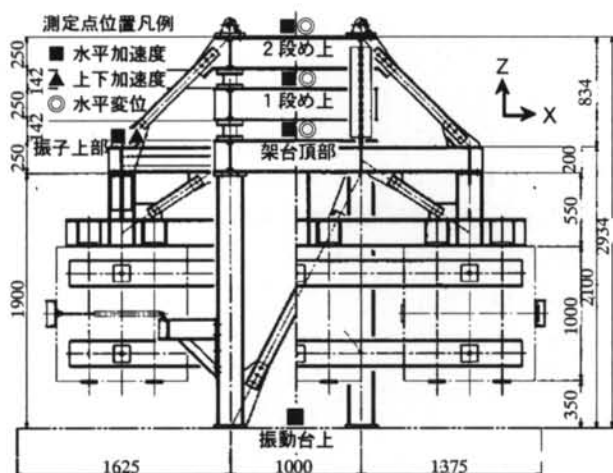


図-12 試験体立面図および測定点位置

§ 5. では、主に上記①と②の観点から、実験結果とその考察について述べる。

5.2 実験概要

5.2.1 試験体および測定点位置

試験体は、想定建物のコア壁より上部を取り出し、相似比1/16に縮小した模型である。免震機構部は、図-13に示すように、免震用積層ゴム8個を上下2段に各4個、球面状に傾斜配置している。試験体各部の質量は、架台(コア)部が約0.8ton、免震機構部が約0.5ton、振子部が約17.1tonで、使用した積層ゴムの水平剛性は110~125N/mmである。

測定点の位置を図-12に示す。水平方向加速度は全点で、水平方向変位は架台頂部と免震機構部1、2段め上で、上下方向加速度は振子頂部で測定した。

5.2.2 加振ケース

様々な入力特性を想定するため、地震動には、①平成12年建設省告示第1461号「ごく稀に生ずる地震動」(以下

「告示波」と記す)、② 想定関東地震模擬波(以下「関東波」と記す)、③ 1995年兵庫県南部地震神戸海洋気象台波(以下「神戸波」と記す)、④ 1999年台湾集集地震波(以下「台湾波」と記す)、⑤ 1985年メキシコ地震波(以下「メキシコ波」と記す)の5種類の波形を選択した。これらを、実大解析モデルの基礎部に100Galで標準化して入力し、コア頂部で得られる応答加速度波形を入力地震動とした。

入力方向は、① 水平1方向(X)、② 水平2方向(X+Y)、③ 水平1方向+ロッキング($X+\theta$)の3通りを設定した。水平2方向の加振では、告示波はX、Y方向に同一の波形を、他は各方向に対応する波形(EW、NS成分)を入力した。時間軸は、相似則に基づき1/4とした。また、積層ゴムの変形制限や振動台の加振限界を鑑み、波形ごとに振幅を調整した。

5.2.3 試験体パラメータ

まず、免震機構部の積層ゴム傾斜角(以下「傾斜角」と記す。図-13参照)について、傾斜角1/10試験体と同1/5試験体の2種類を用意した。

また、積層ゴム取り付け時の施工精度を検証するため、図-13に示すように、アルミ製シムを積層ゴム取り付け治具下部に挿入し、人為的に施工誤差を与えた試験体(傾斜角1/5試験体、告示波入力時)も設定した。実際の建設工事に対応できる施工誤差は概ね1/200であるため、今回はそれより誤差が大きい場合を想定し、施工誤差が1/100相当となるよう、挿入部シム厚を2mmとした。シム挿入パターンは、① 上側(免震機構部2段め下)と下側(同1段め下)各2カ所、② 上側2カ所、③ 下側2カ所の3通りを設定した。

5.3 実験結果と考察

5.3.1 試験体の振動特性

1次、2次モードの固有振動数 f 、周期 T 、減衰定数 h (1次のみ)を表-1に示す。1次、2次モードは、図

試験体 傾斜角	方 向	1次モード			2次モード	
		f_1 (Hz)	T_1 (s)	h_1 (%)	f_2 (Hz)	T_2 (s)
1/10	X	0.62	1.61	7.5	3.6	0.28
	Y	0.63	1.59	7.1	3.1	0.32
1/5	X	0.59	1.69	8.6	2.2	0.45
	Y	0.60	1.67	8.6	1.9	0.53

(註) f , T はsweep加振、 h_1 は自由振動試験による値を示す。

表-1 試験体の振動特性

-3で示した振子スウェイモード、振子回転モードにそれぞれ対応している。

全体的に、2次モードにおいて傾斜角による違いが大きい。図-6にあるように、傾斜角の大きい方が長周期化することを確認した。

5.3.2 各測定点での最大応答分布

X方向加振時における、各測定点での最大応答分布(加速度、変位)を図-14、図-15に示す。図-14において、架台頂部に対する免震機構部2段め上の加速度比を読み取ると、入力によらず概ね1/6~1/10となっており、免震効果が十分に発揮されていることが確認できる。

5.3.3 入力方向による応答性状の違い

まず、(水平)2方向入力の有無による応答性状の違いをみるため、水平1方向(X)入力と水平2方向(X+Y)入

力のケースについて、免震機構部2段め上でのX方向最大応答(加速度、変位)を図-16に示す。いずれの地震波に対しても、2方向入力による影響は少ない。

次に、ロッキング入力の有無による違いをみるため、水平1方向(X)入力と水平1方向+ロッキング($X+\theta$)入力のケースについて、振子上部での最大加速度応答(水平、上下)を図-17に示す。これをみると、上下応答については、ロッキング入力を伴う方が、水平入力の場合に比べて1~4割ほど大きく、ロッキング入力による影響が認められる。一方、水平応答については、両者の違いは顕著でない。

5.3.4 試験体パラメータによる応答性状の違い

まず、傾斜角による応答性状の違いをみるため、X方向加振時における免震機構部2段め上での最大応答(加速度、変位)を、傾斜角1/10試験体と傾斜角1/5試験体との比較として図-18に示す。加速度、変位とも、傾斜角1/5試験体の方が同1/10試験体に比べ、概ね1~3割小さい。

次に、シム挿入の有無による違いをみるため、告示波X方向加振時における各測定点での最大応答分布(加速度、変位)を、シム挿入ケース間の比較として図-19に示す。いずれの挿入ケースとも違いはほとんど認められず、施工誤差が応答に与える影響はほとんどないと言える。

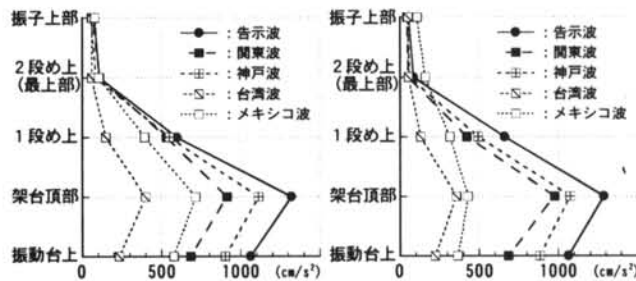


図-14 各測定点でのX方向最大加速度分布
(左: 傾斜角1/10試験体、右: 同1/5試験体)

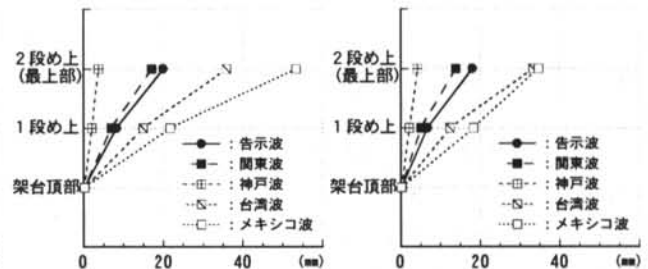


図-15 各測定点でのX方向最大変位分布
(左: 傾斜角1/10試験体、右: 同1/5試験体)

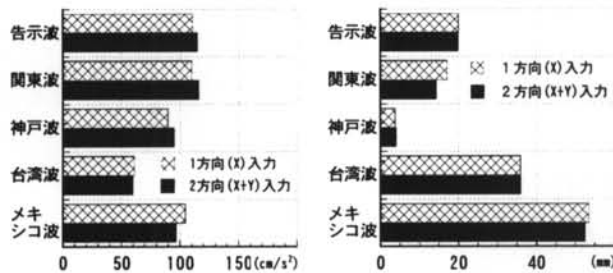


図-16 2方向入力の有無による2段め上(最上部)でのX方向最大応答の比較
(左: 加速度、右: 変位)

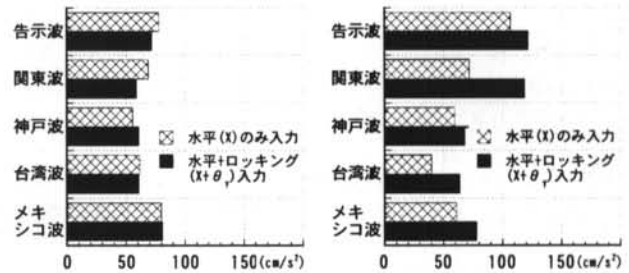


図-17 ロッキング入力の有無による振子上部での最大加速度の比較
(左: 水平[X]方向、右: 上下[Z]方向)

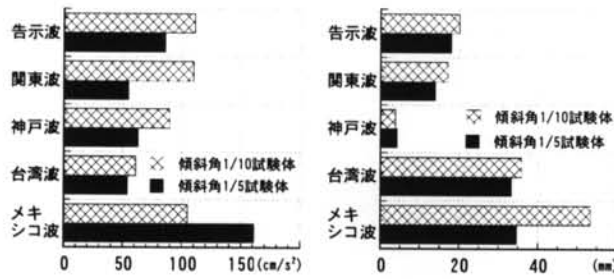


図-18 傾斜角による免震機構部2段め上(最上部)でのX方向最大応答の比較(左:加速度、右:変位)

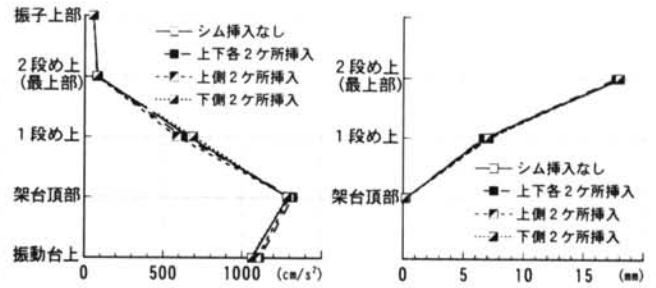


図-19 シム挿入ケースによるX方向最大加速度分布の比較(左:加速度、右:変位)

§ 6. シミュレーション解析による検証^{3),4)}

6.1 解析モデル

§ 6. では、§ 5. で述べた振動台実験のシミュレーション解析を行い、実験結果と比較することにより、解析モデルの妥当性について検証する。

解析モデルは、梁要素、トラス要素、およびばね要素から構成される3次元フレームモデルとした。振動台実験の試験体において、積層ゴムを除く部分は梁要素とトラス要素でモデル化し、積層ゴムおよび重力による復元力効果をばね要素で表現した。モデル化の概念を図-20に示す。積層ゴムは、所定の傾斜角を有し、互いに直交する2本せん断ばねと軸ばねの3成分のばねとしてモデル化した。

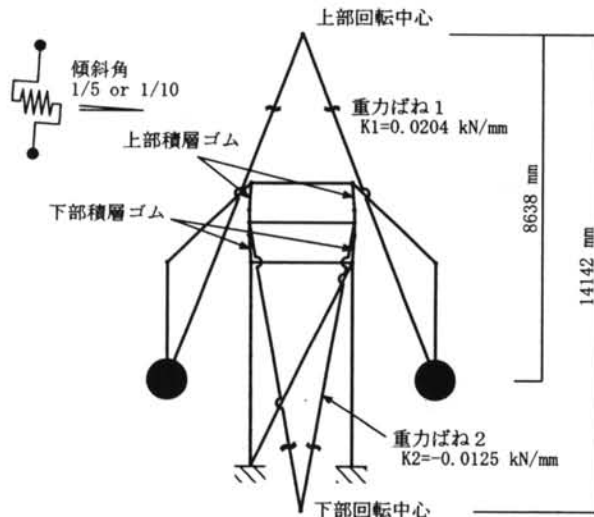


図-20 シミュレーション解析モデルの概念

さらに、重力による復元力を表現するばね(以下、重力ばねと記す)を、仮想回転中心と積層ゴム上端あるいは下端との間に取り付けた。重力ばね剛性は式(8)で評価した。

$$K = mg/L \quad (8)$$

ただし、

m : 錘の質量(18.0 t)

g : 重力加速度(9.8m/s²)

L : 振子長さ

式(8)の L の値は、図-20に示す重力ばね1に対して $L=8.638\text{m}$ 、重力ばね2に対して $L=-14.142\text{m}$ とした。算出された各重力ばねの剛性を図-20に示す。

以上の方針に従って作成した立体フレームモデルを図-21に示す。減衰定数は、積層ゴムおよび重力ばね以外については、並進モードの1次固有周期(表-1では2次モードに対応)に対し $\delta=0.1\%$ の剛性比例型減衰とした。また、積層ゴムのばねについては、§ 4. で述べた積層ゴムの要素実験結果に基づき、以下に示す剛性、減衰定数を設定した。

- 鉛直方向: 剛性182kN/mm、減衰なし
- 水平方向: 剛性126N/mm、減衰定数6.4%

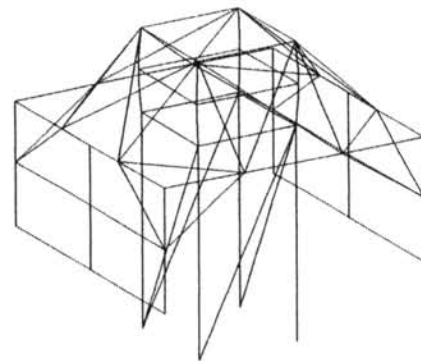


図-21 シミュレーション解析モデル

6.2 固有値解析結果

解析モデルの固有値解析結果(解析値)を、X方向について表-2に示す。また、傾斜角1/10モデルの固有振動モード形を図-22に示す。

モード次数 →		1次 (ねじれ)	2次 (振子スウェイ)	3次 (振子回転)
傾斜角 1/10	解析値	2.56	1.80	0.32
	実験値	—	1.61	0.28
	解析/実験	—	1.12	1.14
傾斜角 1/5	解析値	2.56	1.96	0.49
	実験値	—	1.69	0.45
	解析/実験	—	1.16	1.09

表-2 解析モデルの固有周期(解析値)と
振動台実験試験体の振動特性(実験値)との比較

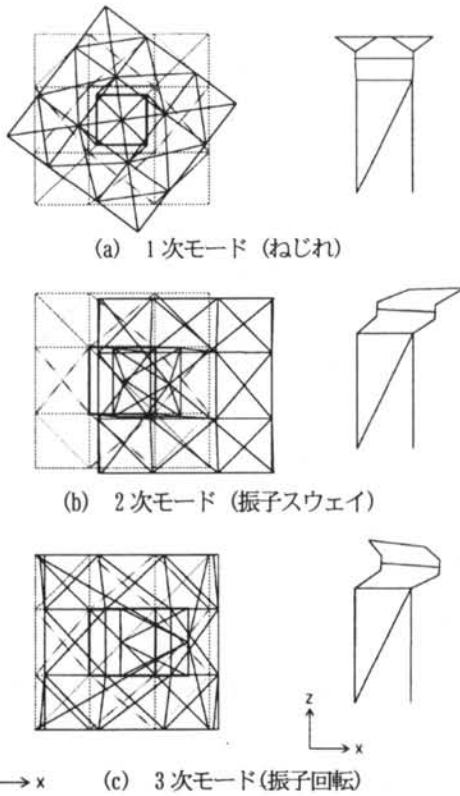


図-22 傾斜角 1/10 モデルの固有振動モード形

傾斜角1/10モデル、同1/5モデルとも、解析では、1次モードとして免震構造部全体のねじれモードが得られた。2次、3次は、上下積層ゴムの変形がそれぞれ同位相、逆位相となる並進モードであるが、図-22の最上部(免震機構部2段め上)での動きから、図-3で示した振子スウェイモード、振子回転モードにそれぞれ対応することがわかる。なお、以上述べたモード性状は、Y方向についてもX方向と同様である。

表-2には、固有値解析結果(解析値)を振動台実験で用いた試験体の振動特性(実験値)と比較するため、振子スウェイモード、振子回転モードについて、実験値および実験値に対する解析値の比(解析/実験)を、対応するモ

入力地震動 →		告示波	関東波	神戸波	台湾波	メキシコ波
傾斜角 1/10	解析値	87	60	67	50	43
	実験値	99	75	85	53	53
	解析/実験	0.88	0.80	0.79	0.94	0.81
傾斜角 1/5	解析値	66	45	54	33	20
	実験値	65	50	58	40	35
	解析/実験	1.02	0.90	0.93	0.83	0.57

(単位: cm/s²)

表-3 最上部における最大応答加速度

入力地震動 →		告示波	関東波	神戸波	台湾波	メキシコ波
傾斜角 1/10	解析値	18	16	3.2	38	43
	実験値	20	17	3.8	36	53
	解析/実験	0.90	0.94	0.84	1.06	0.81
傾斜角 1/5	解析値	19	18	5.8	33	20
	実験値	18	14	4.3	33	35
	解析/実験	1.06	1.29	1.35	1.0	0.57

(単位: mm)

表-4 最上部における最大応答変位

ード次数の欄に併記した。これら2つのモードに関しては、解析値と実験値とは良く対応しているが、全体的に解析値が1割前後大きい。

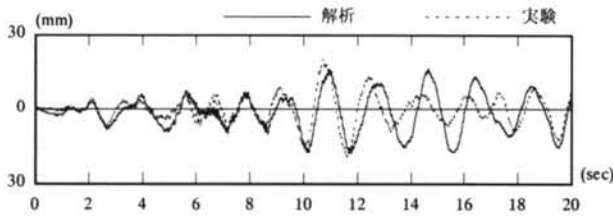
6.3 地震応答解析結果

振動台実験で用いた5種類の波形を対象に、実験時に振動台上で得られたX、Y、Z方向の3成分の加速度波形を入力してシミュレーション解析を行った。数値積分はNewmark-β法(β=1/4)、時間刻みは0.0025秒とした。

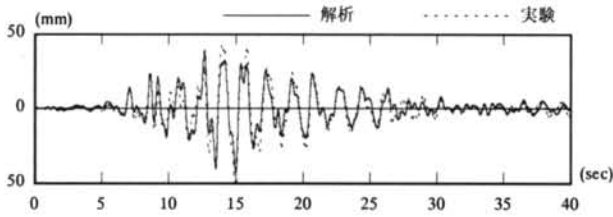
最上部(免震機構部2段め上)における最大応答加速度および最大応答変位を表-3、表-4にそれぞれ示す。表中には、表-3と同様に、実験値および実験値に対する解析値の比(解析/実験)を併記した。応答加速度、応答変位とも、傾斜角1/5のメキシコ波入力の場合を除き、解析値は実験値と概ね対応しているが、全体的に、解析値は実験値を下回る傾向がみられる。

傾斜角1/10モデルの最上部における、告示波ならびにメキシコ波入力の場合の変位応答波形を図-23に示す。波形の周期より、両ケースとも表-2の2次モードが卓越していることが伺える。

そこで、告示波入力の場合の応答スペクトルを図-24に示す。これを見ると、2次モードに対応するピークでは、解析結果と実験結果がほぼ一致しているのに対し、



(a) 告示波入力



(b) メキシコ波入力

図-23 傾斜角1/10モデルの最上部における変位応答波形

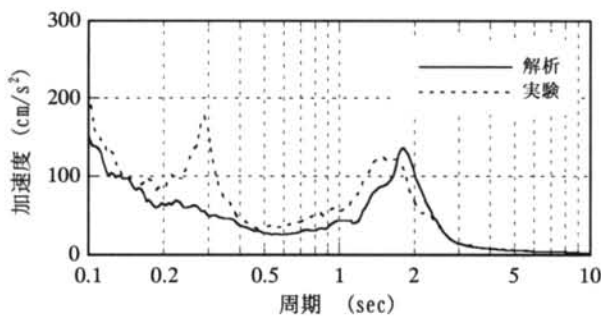


図-24 傾斜角1/10モデルの告示波入力における加速度応答スペクトル

3次モードに対応するピークでは、解析結果は実験結果ほど励起されていない。表-3の最大応答値において、解析値が実験値を下回るケースが多いのは、3次モードの励起状態の違いに起因すると考えられる。

以上、振動台実験のシミュレーション解析結果と実験

結果との比較について述べた。両者は、高次振動モードでの励起状態に差異がみられるものの、全体的には、解析結果は実験結果を良好に表現していると思われる。

§ 7. おわりに

以上、やじろべえ型免震構造(SFS21)の概要を述べるとともに、質点モデルの振動性状、免震用積層ゴムの要素実験、模型試験体による振動台実験、実験結果のシミュレーション解析など、さまざまな角度から検討を加えた結果を述べた。

SFS21は、10秒以上の長周期化を可能にする全く新しい免震システムであるが、本研究を通じて、SFS21の振動性状を理論的に把握することができた。また、要素実験や振動台実験を通じて、SFS21が想定通りに動作し優れた免震効果を示すこと、かつその挙動を精度よく再現できることを確認した。

今後は、風に対する居住性能の向上など設計技術の確立、および技術営業ツールの整備を進め、SFS21の普及展開を図っていきたい。

謝辞

本研究の実施に際し御指導、御助言を頂いた、高橋 航一氏(第一工房)、和田 章氏(東京工業大学)、竹内 徹氏(新日本製鐵)、彦根 茂氏(オープ・アラップ・アンド・パートナーズ・ジャパン社)に対し、深く感謝の意を表する。

なお本論文は、SFS21開発プロジェクトメンバーの中村 豊氏(技術研究所)、菊地 優氏(同、現北海道大学)、東 清仁氏(技術戦略室)、佐藤 起司氏(設計本部)ほかの方々の協同作業による成果であることを付記する。

<参考文献>

- 1) 高橋 航一, 磯田 和彦, 東 清仁, 佐武 直紀ほか: “やじろべえ型免震構造(SFS21)の研究(その1~その4)”, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), B-2, pp. 599~606, 2000.
- 2) 佐武 直紀, 中村 豊, 渡辺 弘之, 真瀬 伸治, 和田 章, 高橋 航一: “やじろべえ型免震構造(SFS21)の提案および応答性状の検証”, 第2回日本制震(振)シンポジウム, 2000.
- 3) 猿田 正明, 佐武 直紀, 佐藤 起司ほか: “やじろべえ型免震構造(SFS21)の研究(その5~その7)”, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), B-2, pp. 585~690, 2002.
- 4) 堀 富博, 真瀬 伸治, 磯田 和彦, 猿田 正明, 北村 佳久, 佐武 直紀, 菊地 優: “やじろべえ型免震構造(SFS21)の開発”, 日本建築学会技術報告集, 第16号, 2003(投稿中).
- 5) 日本建築学会: “免震構造設計指針(2001改訂版)”, 2001.