

木造住宅を対象とした免震システムの開発：基礎実験に基づく応答計算手法の検証

島津，由貴
九州大学大学院人間環境学府：修士課程

佐藤，利昭
九州大学人間環境学研究院：准教授

新熊，将史
株式会社MASA LABO

<https://hdl.handle.net/2324/7174511>

出版情報：AIJ Journal of Technology and Design. 28 (68), pp.191-196, 2022-02-20. 日本建築学会
バージョン：
権利関係：© 2022, Architectural Institute of Japan



木造住宅を対象とした免震システムの開発

— 基礎実験に基づく応答計算手法の検証 —

DEVELOPMENT OF NEW ISOLATION SYSTEM FOR WOODEN HOUSE

— Verification of seismic response analysis method based on basis experiments —

島津由貴 — * 1 佐藤利昭 — * 2
新熊将史 — * 3

Yoshitaka SHIMAZU — * 1 Toshiaki SATO — * 2
Kazuo NIIKUMA — * 3

キーワード：

免震構造, 基礎免震, 木造軸組構法, 柱勝ち

Keywords:

Seismic isolation structure, Base isolation system, Wooden post and beam construction, Structure having continued column

In recent years, wooden houses may be required higher seismic performance than before. Installing isolation system can be considered as one of the solution, whereas its cost prevents the promotion. This study presents a new isolation system without steel framed foundation by using continued columns and steels shaped like a dish; formed in a recess shape at the center which generates the force putting the structure back to there. This paper describes findings from both numerical simulation and basic experiments, and the behavior of new system can be explained.

1. はじめに

木造住宅の耐震安全性への関心は、1995年兵庫県南部地震を契機に急速に高まり、制振技術に代表される新たな技術開発が活発化し、現在では市場に多くの製品が流通している。2016年熊本地震において、益城町では2000年以降に建設された住宅の約5%が全壊相当の被害を受けたが¹⁾、入力レベルを勘案すれば、木造住宅の耐震性能は既に一定以上の水準にあると言えそうである。一方、より高い性能への需要に対応するのは必然で、その手立ての1つとして免震構造の適用が考えられるが、殊に戸建て住宅に対する普及が十分とは言えないのが現状であると考えている。

その主たる要因は導入コストの問題で、所有者が主に個人となる戸建て住宅では、数百万円となる費用の上乗せは、免震構造を選択しない十分な理由となる。コストが増加する主な要因として、免震層を構成する部材および工事費等の直接的な費用を除き、技術の向上によって改善が期待される課題は、次の2つと考えられる。1つは地盤条件に起因する問題である。免震構造は、第1種地盤もしくは第2種地盤で液状化のおそれのない敷地にのみ建設可能で²⁾、それは戸建て住宅、正確には第4号建築物でも同様である³⁾。しかしこの条件の確認には、スウェーデン式サウンディング試験等の比較的浅い支持層を探す静的貫入試験によって、敷地内の最低限の箇所を調べるのが一般的な戸建て住宅の地盤調査では事足りず、現実的にはさらなる費用負担が必要となる。これに加え、先行研究で有意な知見は示されているが(例えば4)、当該サイトの表層地盤増幅の評価は、常時微動測定等の利便性の高い方法を併用したとしても簡単ではなく、安全性の確保の観点から不可欠である一方、普及の弊害とも捉えられる。

技術的に改善が可能と思われるもう1つの課題は、免震層と上部構造の接続に関するもので、両者の間に鉄骨架台を設ける方法が広く採用されている。この方法には複数の利点があり、標準的な軸組構法でRC基礎に緊結する土台を、この鉄骨架台と接合することで、従来と同様の木造住宅をそのまま上部構造とすることができる点の他、架台の重量が上部構造に上乗せされることで、免震効果が発揮し易い。しかし、鉄骨架台にはRC基礎と同等以上の性能が求められ、当然下部構造としてRC基礎は必要であることから、単純に鉄骨架台分の費用が上乗せされることになる。

以上の課題を背景に、本報は後者とした免震層との接続に関する点を改善する木造住宅用の免震システムの開発を目的に、検討を進めた結果を報告するものである。新たに開発する免震システムは、石場立ての伝統構法を1つの参考とし、それに復元力を持たせる構成を基本に考案したもので、具体的には土台に対して柱勝ちとした主たる柱の柱脚部に免震金物と称する滑り機構を配し、それを凹型球面で支持するものである。システムの概要を図1に示す。

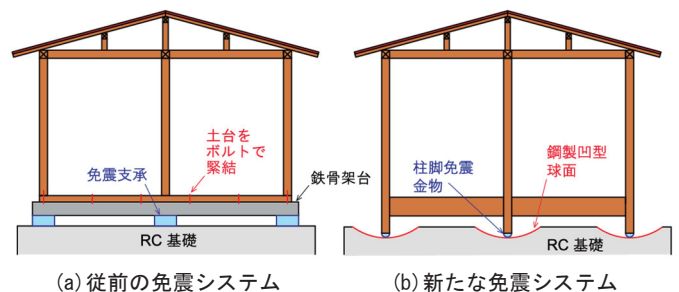


図1 新たな免震システムの概要

¹⁾ 九州大学大学院人間環境学府 修士課程
(〒819-0395 福岡市西区元岡744)

²⁾ 九州大学大学院人間環境学研究院 准教授・博士(工学)

³⁾ ㈱MASA LABO 取締役

¹⁾ Graduate Student, Graduate School of Human-Environmental Studies, Kyushu Univ.

²⁾ Assoc. Prof., Human-Environmental Studies, Kyushu Univ., Dr.Eng.

³⁾ Director, MASA LABO Co., Ltd.

図 1 (b) に示すように、本報で検討する免震システムは、復元力の発生機構となる鋼製の凹型球面を下部構造となる RC 基礎に埋め込むことで、合理的な免震層の構成を実現しようとするものである。同図 (a) に示した従前のシステムに比べ、後述する周期で住宅全体が上下することが予想されるが、それを許容することで大幅なコスト削減が期待される。上部構造を標準的な木造住宅と同一の方法では設計できないこと、ダンパーの取り付け方法など、今後検討すべきことは多いが、本報では期待される免震効果が得られることを確認することに主眼を置き、このシステムの基本となる鋼製凹型球面と柱脚免震金物の効果を実験と解析の両面から調べたものである。以降では、まず復元力の数式表現を整理すると共に、2 通りの応答計算手法をまとめる。続いて、免震効果を調べた振動台実験の結果を示し、その結果より得られた知見を述べる他、応答計算手法の妥当性を検証した結果を示す。

2. 免震システムの応答計算手法の構築

2.1 摩擦を考慮した復元力の数式表現

重力による復元力を期待した免震支承として、凹型球面を用いたシステムは既に製品化されており、多くの導入実績があるのは周知の通りである。したがって、応答計算手法に新規性はないと考えているが、文献調査の範囲では、2 枚の球面で独立したスライダを挟んだ免震装置以外に⁶⁾、数値計算の方法が示された検討結果が確認できなかった。以上を踏まえ、ここでは次節に述べる計算アルゴリズムの基本事項となる、球面との接触に摩擦抵抗が発生する場合の復元力の数式表現を整理する。まず摩擦の影響を考慮した復元力の評価方法を示しておくことにする。図 2 に柱脚免震金物と凹型球面との力の釣り合いを示す。

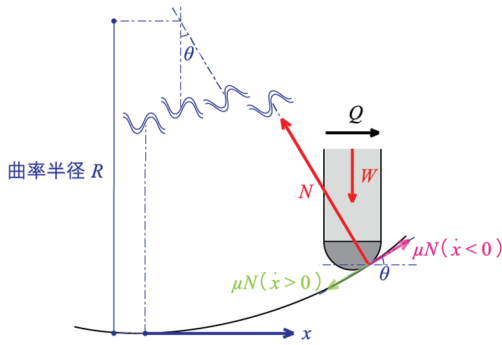


図 2 凹型球面と柱脚免震金物の力の釣り合い

図 2 に示すように、凹型球面の最低面の水平方向の位置を座標原点とする柱脚免震金物の水平変位を x ，凹型球面の曲率半径を R とする。同図の θ は、接触面の法線方向と水平面の成す角で

$$\sin \theta = \frac{x}{R}, \quad \cos \theta = \frac{\sqrt{R^2 - x^2}}{R} \quad (1-1, 2)$$

のように x の従属変数である。同図に示した力は、柱脚部に作用する重量 W と上部構造より伝達されたせん断力 Q の他、球面の垂直抗力 N と摩擦力 μN である。ここで摩擦力は当然、運動と相反する向きに作用するもので、符号関数を導入して鉛直・水平方向の力の釣り合いを整理すると、次式が得られる。

$$N \cos \theta = W + \operatorname{sgn}(\dot{x}) \cdot \mu N \sin \theta \quad (2)$$

$$Q = N \sin \theta + \operatorname{sgn}(\dot{x}) \cdot \mu N \cos \theta \quad (3)$$

式 (2), (3) でドット“ $\cdot$ ”は時間微分を意味し、以降も同様である。最終的には、式 (1) を式 (2), (3) に代入し、上部構造より伝達されるせん断力 Q について整理すると

$$Q = \frac{W(x + \sqrt{R^2 - x^2} \mu \operatorname{sgn}(\dot{x}))}{\sqrt{R^2 - x^2} - \mu \operatorname{sgn}(\dot{x}) \cdot x} \quad (4)$$

となり、このせん断力 Q と釣り合う右边が復元力を意味する。式 (4) から分かるように、復元力の大きさは水平位置 x により決定されるもので、同式の摩擦係数 μ を動摩擦係数 μ_d と読み替え、 $\mu_d = 2.0 \times 10^{-2}$ とした場合の復元力特性を図 3 に示す。なお、重量 W と凹型球面の曲率半径 R は、後述する振動台実験の条件とし、 $W \approx 24 \text{ kN}$, $R = 1000 \text{ mm}$ と設定した。

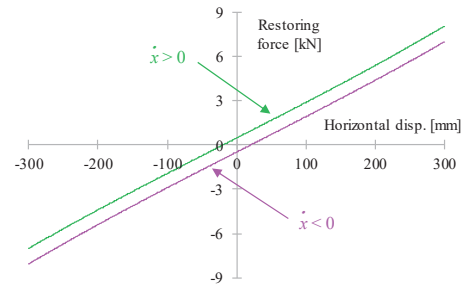


図 3 摩擦を考慮した凹型球面による復元力特性

図 3 に示すように、復元力特性は概ね直線状となり、摩擦係数を考慮することで Bi-linear 型の復元力特性でも表現可能と考えられる。ここで、同図に示す 2 つの特性を線形回帰すると、水平速度 $\dot{x}$ の正負に因らず、傾き $k = 2.47 \times 10^{-2} \text{ kN/mm}$ が得られる。回帰結果が原点を通らないため厳密ではないが、振動台実験に用いた試験体重量 W から周期 T を求めると $T = 1.98 \text{ s}$ となり、これは凹型球面の免震支承で広く利用される振り子の固有円振動数 $\omega =$ 重力加速度 g / 曲率半径 R より求められる固有周期 $T = 2.01 \text{ s}$ とほぼ一致し、以上の記載に大きな誤りはないと判断される。なお、ここでは水平方向を 1 自由度とした数式表現を整理したが、2 自由度の場合でも基本は変わらず、式 (1) の成す角が 2 変数の従属変数となり、式 (4) の復元力も計算に成分を分解することで計算が可能となる。

2.2 静摩擦・動摩擦を考慮した応答計算手法と簡略法

本節では、式 (4) としての復元力特性に加え、静摩擦と動摩擦の別も考慮した応答計算のアルゴリズムを整理する。上部構造を剛体と見做し、対象とする免震層の水平変位 x のみを自由度とした場合、地動加速度を $\ddot{y}$ とすれば運動方程式は、先の式 (4) を参照して

$$m(\ddot{x} + \ddot{y}) - \frac{W(x + \sqrt{R^2 - x^2} \mu \operatorname{sgn}(\dot{x}))}{\sqrt{R^2 - x^2} - \mu \operatorname{sgn}(\dot{x}) \cdot x} = 0 \quad (5)$$

といった単純な 2 階の微分方程式で表され、数値積分により応答が求められる。式 (5) から分かるように、ここでは減衰を考慮しておらず、後述する振動台実験に対する検討でも同様とした。

ここで静摩擦係数 μ_s と動摩擦係数 μ_d を使い分ける方法を考えると、式 (5) が力の釣り合い式となることに代わりはないが、慣性力が静摩擦係数と重量の積 $\mu_s W$ 以下となれば運動が停止するわけで、その結果、相対速度 $\dot{x}$ 、相対加速度 $\ddot{x}$ は 0 となる。これらの制御には適切な条件分岐が必要で、本研究では図 4 に示すアルゴリズムを用いた。その他、数値積分には Runge-Kutta 法を採用し、計算の時間刻み $\Delta t = 1 / 200 \text{ s}$ とした。

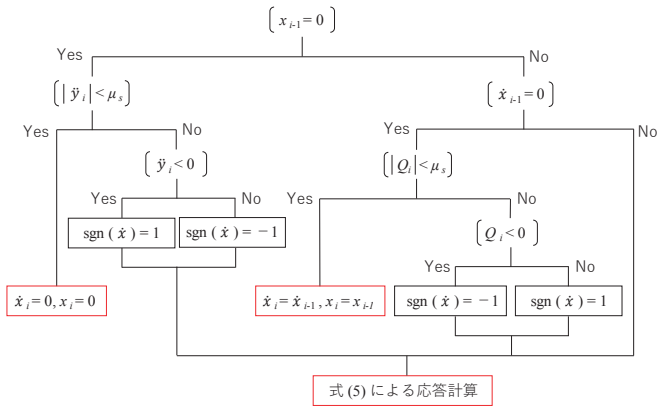


図 4 静摩擦の影響を考慮する計算アルゴリズム

以降に述べる振動台実験の結果に対するシミュレーション解析では、上記の方法を精算法として採用する他、簡略法として単純な Bi-linear 型の復元力特性を採用した結果も併せて示すこととした。簡略法の設定は、次の通りである。まず、後述する静的試験より得られた今回の試験条件下での静摩擦係数 $\mu_s = 4.0 \times 10^{-2}$ を、式 (4) の摩擦係数に μ 代入し、結果として得られる復元力特性を Bi-linear に置換した。具体的には、式 (4) より得られる復元力特性の線形回帰により、2 次剛性 $k_2 = 2.54 \times 10^{-2} \text{ kN/mm}$ と水平変位 $x = 0$ のときの荷重の大きさを定め、さらに計算が不安定とならずに k_2 に対して十分に高い剛性として 1 次剛性 $k_1 = 1500 k_2$ と設定した。原

点を通る傾き k_1 の直線と、先の回帰直線で必要な条件は設定されており、参考までに Bi-linear 型の復元力特性の降伏変位 x_y を示すと $x_y = 0.03 \text{ mm}$ としたことになる。なお、本報のシミュレーション解析では、簡略法の数値計算でも構造減衰は考慮しておらず、数値積分その他の解析条件は精算法と同様である。

3. 振動台実験による免震効果の検証

3.1 上部構造・下部構造の試験体の設計

本研究では、考案した免震システムが期待した復元力を発揮できることを確認するため、振動台実験を実施した。振動台は九州大学が所有するもので、小型のためストローク変位が $\pm 150 \text{ mm}$ に制限されるが、基礎試験としては十分な性能と判断した。試験体は、下部構造を振動台に固定し、柱脚免震金物より上の軸組架構を 1 F 床レベルまでとした要素試験体とすることを基本に設計を進めた。実施した実験のセッティングは、図 5 (a) に示す通りである。

下部構造となる、鋼製凹型球面を埋め込んだ RC 基礎に相当する試験体は、振動台と固定する 2 本の H 形鋼を平行に配し、十字に組んだ溝形鋼 (図 5 (a) の黒い部材) をガイドに、4 枚の凹型球面を均等に並べたものである。下部構造の製作は、試験時と天地を逆転させて行い、図 5 (b) に示す断面図で上端となる面を揃えるため、H 形鋼、溝形鋼、および凹型球面を天地逆転させて水平面に並べ、4 辺のうち H 形鋼がない 2 辺に型枠を設置し、さらに振動台据え付け時の曲げを防止する程度の配筋をして、コンクリートを打設した。コンクリートは天地を逆転させて状態で H 形鋼の上フランジの中間程度までとし、1 週間程度の養生後にセルフレベルを上端面まで打つことで、振動台との設置面を可能な限り平滑にした。

これに相対する上部構造は、1 階床レベルまでの木造軸組の試験体で、上記の凹型球面の最低面の位置と、柱芯が一致するように計画した。図 5 (c) に伏図を、図 5 (d), (e) に各方向の軸組図を示してある。各図に示す通り、150 mm $\times$ 390 mm の土台梁 (スギ集成材) と、150 角の柱 (スギ製材) を柱勝ち収まりで接合するもので、各接合部は M 16 ボルトと短ボゾで構成した。1 階床面は、水平構面の

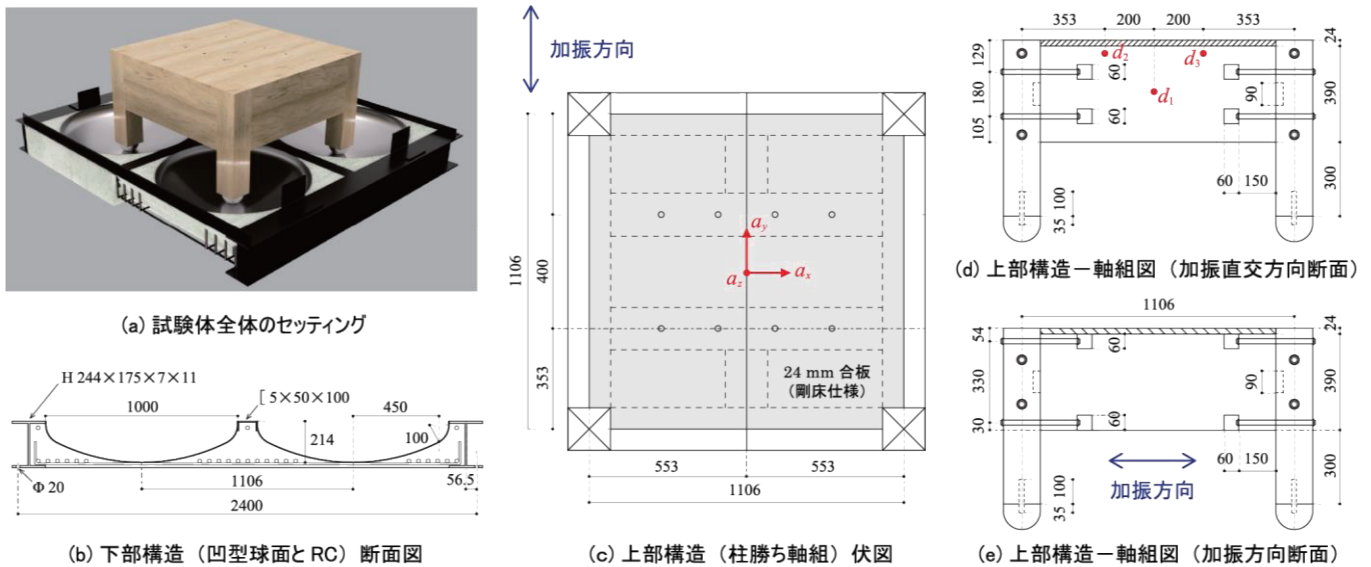


図 5 試験体の全体概要と試験体および計測箇所

応答を無視できる仕様として 24 mm 合板を採用し、その剛性確保と上載荷重となる鋼製の錘を固定するため、土台梁の間に 150 mm 角の小梁を配置した。柱脚部に配する免震金物は、今後改良予定であるが、本試験ではステンレスの円柱の 1 面を半球体状に削り出すことで製作したもので、柱にグルードインロッド形式で埋め込んだ全ネジのボルトに締め付けることで固定した。

ここで試作した免震金物に期待する滑動は、固体間の境界摩擦となるため摩擦係数が大きく、試験目的である復元力の確認が困難であった。これを改善するため、実施した試験では図 6 に示すように、鋼製凹型球面にシャーシグリスを塗布し、さらに柱脚免震金物の下にテフロンシートを挟んだ上で各試験を実施した。

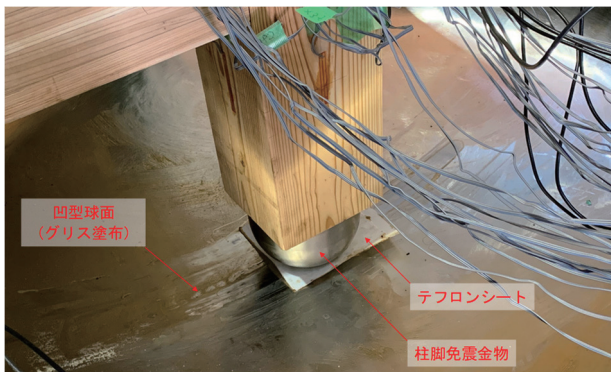


図 6 振動台実験における滑動面の概要

図 6 に示す通り、本試験で採用した改善策はテフロンシートを柱脚免震金物と凹型球面に挟んだだけであるが、シャーシグリスとテフロン間の摩擦が最も小さかったようで、試験前後で柱脚免震金物とテフロンシートの間に変化がなかったことを目視により確認した。この他、上載荷重は 2.0 tonf とし、1 枚 500 kgf の鋼板 4 枚を試験体とボルトで緊結した。結果として、上部構造となる木造軸組全体の重量は、ロードセルで直接計測した結果、約 2.4 tonf となり、後述する加振試験のせん断力の評価や、シミュレーション解析に用いる質量は、この結果に基づくものである。

3.2 計測計画

本報でシミュレーション解析の比較等で用いる計測結果は、加振方向における上部構造の応答加速度、応答変位である。応答加速度の計測箇所は、図 5 (c) に赤字で併記してある a_x, a_y, a_z で、これら 1 階床レベルの試験体中央での記録のうち、加振方向である a_y をそのまま応答値とし、これに質量を乗じることで免震層に生じたせん断力を評価した。応答変位は、図 5 (d) に赤字で併記した d_1, d_2, d_3 の位置にレーザー変位計を取り付け、それと振動台外の不動点との相対変位を計測した。免震層の応答変位は、3 点の計測結果の平均値から振動台の水平変位を差し引き評価したものである。

上記の他、実際の試験では 5 箇所 15 成分の加速度記録、2 箇所の変位計測と共に、軸組接合部のボルトの軸歪みや柱の変動軸力なども測定しているが、本報では結果を示さないため記載を省略する。なお、これら追加の計測点と共に振動台上の加速度および変位記録は制御機器の出力から併せて計測しており、それらすべてのサンプリング周波数は 200 Hz である。

3.3 入力波の設定

本実験は免震システムの基本的な運動の把握が目的であるため、入力波には単純なパルスである Ricker 波を採用した。Ricker 波は、

$$f(t) = A_0 (1 - 2\pi^2 f^2 t^2) e^{-\pi^2 f^2 t^2} \quad (6)$$

で与えられ、時刻 t を変数に振幅 A_0 、振動数 f を定めることで波形が決定できる。2.1 節で述べた通り、本試験で採用した凹型球面の曲率半径から定まる周期は約 2.0 s である。これを踏まえ、入力波には式 (6) の振動数 $f = 0.5$ Hz とした場合と、その 2 倍の $f = 1.0$ Hz とした場合の 2 種類を用意することとした。具体的には、振動台の限界性能を踏まえ、最大速度 $A_0 = 45$ kine とした速度波形を式 (6) より求め、その 1 階微分である加速度時刻歴を入力波とした。入力波の概要として各振動数の Ricker 波の時刻歴と擬似速度応答スペクトル ($h = 5\%$) を図 7 に示す。

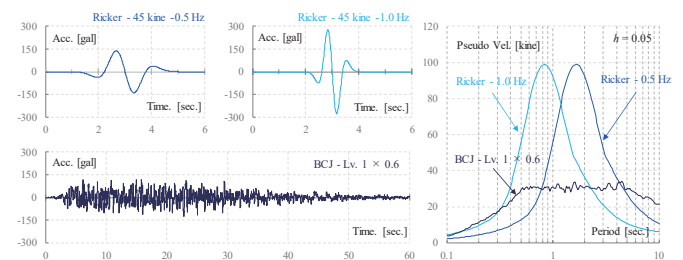


図 7 入力波の概要（左：時刻歴，右：擬似速度応答スペクトル）

図 7 には、日本建築センター波 BCJ -Lv.1 を振動台の限界性能にあわせて 0.6 倍した加速度時刻歴と擬似速度応答スペクトルも併記してある。同図の結果より、1 階微分により僅かに短周期側にピークが移動するが、想定される免震周期と概ね対応する Ricker 波が作成できたことが確認できる。またその大きさは 100 kine 近い応答レベルであり、検証実験として適当な設定と判断される。なお、本実験では一連の加振スケジュールの一部として、図 7 に併記した日本建築センター波による加振も実施しているが、同図から予想される通り、応答が小さく、結果としてノイズレベルが高い試験結果が得られたため、本報では示さないこととした。

4. 試験結果とシミュレーション解析

4.1 静的試験による静摩擦係数の把握

Ricker 波による加振試験より前に、今回の試験条件下における静摩擦係数 μ_s を得ることを目的に、静的試験を実施した。この試験は、凹型球面の中心と上部構造の各柱芯が一致するようにセッティングした状態で、上部構造にチェーンブロックによって水平力を与え、上部構造が動き出す瞬間の水平荷重を計測したものである。試験の結果、上部構造の移動に必要な水平荷重は約 1.0 kN で、これを重量で除することで静止摩擦係数 $\mu_s = 4.2 \times 10^{-2}$ が得られた。以降に示すシミュレーション解析ではこの静摩擦係数 μ_s を採用し、さらに次節で検討する動摩擦係数 μ_d を別途設定できる精算法によるシミュレーション解析では、動摩擦係数 μ_d が静止摩擦係数 $\mu_s = 4.2 \times 10^{-2}$ 以下となることを 1 つの判断根拠として検討を進めた。

4.2 強制変位による自由振動試験

本節では入力の影響を受けない自由振動の状態を取り上げ、動摩擦係数 μ_d の設定を検討する。凹型球面の中心と上部構造の各柱芯が一致した状態を基準位置、すなわち水平変位 $x = 0$ の状態とし、そこから $x = 300 \text{ mm}$ の位置まで上部構造をクレーンで吊り上げた状態で移動させ、両者がタッチする瞬間にクレーンを急降下させて、その後の自由振動を計測したものである。試験結果を精算法による解析結果と共に図 8 に示す。

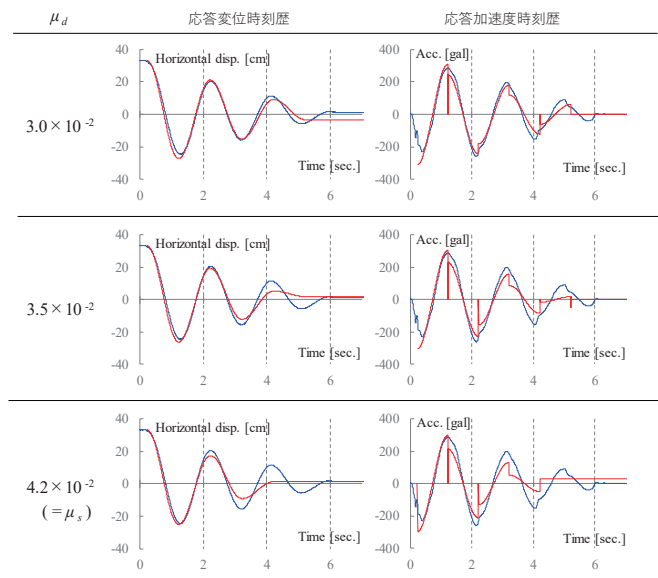


図 8 自由振動試験の結果による動摩擦係数の検討

図 8 では、次に述べる加振試験の解析条件を検討するため、動摩擦係数 μ_d について $\mu_d = 3.0 \times 10^{-2}$, 3.5×10^{-2} および 4.2×10^{-2} ($=$ 静摩擦係数 μ_s) の 3 段階を設定し、それぞれのシミュレーション解析の結果を比較して示してある。同図の結果より、すべての計算結果に共通する特徴として、静摩擦係数を考慮する精算法では、応答加速度が不連続となっていることが分かる。実験ではこのような不連続な結果を得られていないわけだが、その要因には、停止の瞬間にデジタルデータとしてサンプリングされていないことが考えられ、上部構造のみの応答を無視すれば、停止した状態では剛体応答、すなわち入力加速度がそのまま絶対加速度となることは、理論的に誤りではないと考えられる。

この試験の目的であった動摩擦係数による解析結果の差異に着目すると、検討範囲で動摩擦係数 μ_d が最も小さい $\mu_d = 3.0 \times 10^{-2}$ が全体の傾向を最もよく捉えられていると判断される。一方で、応答変位の最大値の追跡精度のみに着目すると、検討範囲で動摩擦係数 μ_d が最も大きい $\mu_d = 4.2 \times 10^{-2}$ が、高い精度を有していることが分かる。未だ試作段階にある免震金物に関して、安定的な摩擦特性を発揮していない可能性など、設定と結果に齟齬が生じる要因はいくつか考えられるが、それは今後の検討課題とし、以降の Ricker 波に対するシミュレーション解析には、以上の解析結果を勘案し、検討の中間である $\mu_d = 3.5 \times 10^{-2}$ を採用することとした。

4.3 パルス波による加振試験

以上に述べた検討結果を踏まえ、2 種類の Ricker 波に対する振動台実験の結果と、精算法と簡略法による解析結果を比較し、応答計算手法の特徴を把握する。まず、実施した試験条件の固有周期と一致する振動数 $f = 0.5 \text{ Hz}$ の Ricker 波による加振試験の結果と 2 種類の計算結果を比較して図 9 に結果をまとめる。

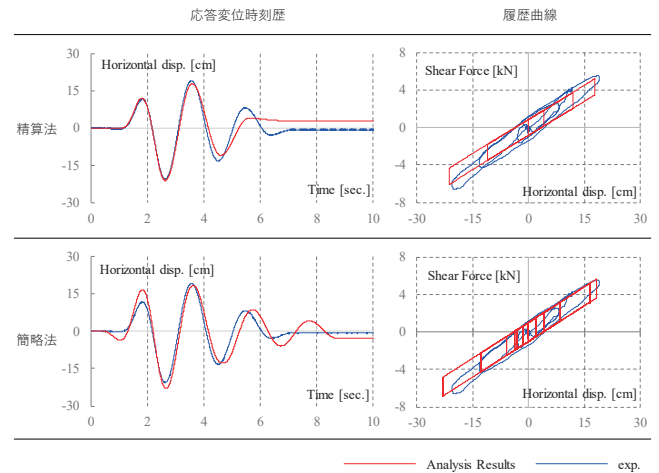


図 9 Ricker 波 ($f = 0.5 \text{ Hz}$) による解析精度の検証

図 9 の結果のうち、まず応答変位の時刻歴に着目すると、いずれの計算手法でも、実験結果と異なる周期で振動しており、特に最大応答以降で大きく乖離していることが読み取れる。この要因は、シミュレーション解析において上部構造を剛体と仮定したためと考えられ、本実験でも軸組架構に応答があったものと推察される。この点は、今後の検討で上部構造を含めたモデルの構築により、改善されようと考えている。全体的には、精算法の解析結果の方が僅かに計算精度は有意であるが、Bi-linear で近似した簡略法でも実験結果を比較的良好に再現しており、最大応答の予測精度も良好と判断される。また、履歴曲線に着目すれば、両者の差異はあまり小さくなく、諸々の解析条件の設定は適当であると判断される。続いて、振動数を 2 倍とした Ricker による結果の比較を図 10 に示す。

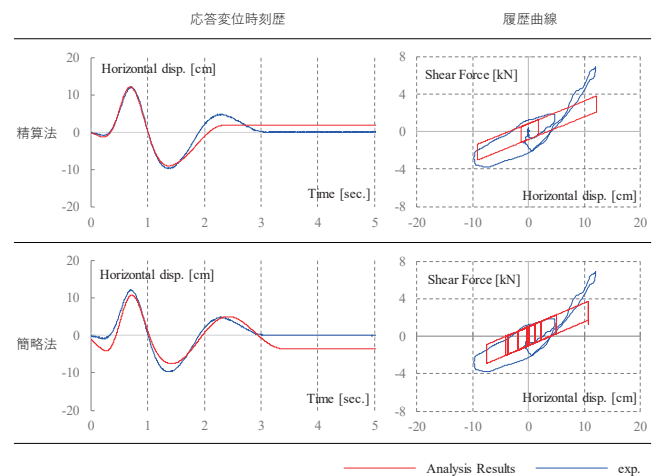


図 10 Ricker 波 ($f = 1.0 \text{ Hz}$) による解析精度の検証

図 10 の結果より、基本的な傾向は図 9 と同様であるが、履歴曲線に着目すると、試験結果のせん断力が高いことが特徴として挙げられ、これには 2 つの要因が考えられる。1 つは試験条件に起因するもので、試験の滑動面、すなわちグリスとテフロンによる潤滑効果が一定でないことが要因の 1 つとして推察される。これは、今後進める免震金物の改良によって性能を安定化させる計画である。もう 1 つは解析条件を要因とするもので、先にも述べた通り、本報で実施した応答計算では上部構造を剛体と仮定している点で、それらの応答を考慮すれば当然ながら柔性による加速度増幅が生じるため、試験結果のせん断力が大きく計算されることになる。この点についても、上部構造を含めたモデルを構築すればよく、上部構造の計画方法の検討と並行して、応答計算手法も改善していく計画である。

5. まとめ

本報では、新たに考案した木造住宅を対象とする免震システムについて、その基礎となる免震効果の確認を目的に、実験と解析の両面からその性質を調べた。得られた知見は次の通りである。

- ・ 静摩擦係数と動摩擦係数の影響を考慮した応答計算手法を構築し、その妥当性を振動台実験との比較により検証した。
- ・ 復元力特性を Bi-linear で近似した簡略的なモデルでも、最大応答変位の推定精度は必要十分と判断された。
- ・ 期待した免震効果が確認されたため、今後、免震金物の改良と上部構造を含む応答計算手法の構築を進めると共に、考慮できていない性質である、速度や面圧に対する依存性をはじめ、繰り返し応答による凹型球面の性質変化等の検証が必要である。

参考文献

- 1) 日本建築学会：2016 年熊本地震災害調査報告, 2018. 6
- 2) 日本建築学会：免震構造設計指針, 2013. 11
- 3) 日本建築センター：免震建築物の技術基準解説及び計算例とその解説—平成 16 年改正告示の追加分—戸建て免震住宅を中心として, 2005. 10
- 4) Hanai, T., Fukuwa, N. and Minagawa, T. : Simplified Evaluation method of seismic response for base-isolated houses using ground period, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.67, No.555, pp.93-99, 2002. 5
花井勉, 福和伸夫, 皆川隆之: 地盤周期に着目した戸建て免震住宅の簡易応答評価法, 日本建築学会構造系論文集, Vol.67, No.555, pp.93-99, 2002. 5
- 5) Sakai, Y., Tsuno, S., Kudo, K. and Kabeyasawa, T. : Simplified method to evaluate ground surface amplification assuming the input motions on the engineering bedrock in the revised enforcement order of the building standard law, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction AIJ), Vol.68, No.565, pp.73-78, 2003. 3
境有紀, 津野靖士, 工藤一嘉, 壁谷澤寿海: 改正建築基準法の解放工学的基盤波を想定した表層地盤増幅特性の簡便評価法, 日本建築学会構造系論文集, Vol.68, No.565, pp.73-78, 2003. 3
- 6) Takeuchi, T., Yoshida, M., Uchida, M., Nishi, O. and Matsui, R. : Application of seismic isolation bearings for rack warehouse to prevent goods falling, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction AIJ), Vol.81, No.721, pp.629-637, 2016. 3
竹内徹, 吉田道保, 内田正颯, 西雄士, 松井良太: 積載物の落下防止を目的とした立体倉庫への免震支承の適用, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, No.721, pp.629-637, 2016. 3

[2021 年 6 月 3 日原稿受理 2021 年 8 月 19 日採用決定]