

手術室向け免震床「シミズ安震フロア」の開発

福喜多 輝 北村 佳久 磯田 和彦 杉本 浩一 寺田 岳彦
(技術研究所) (環境・技術ソリューション本部) (技術研究所) (技術研究所) (技術戦略室)

Development of an Isolation Floor for Operating Room

by Akira Fukukita, Yoshihisa Kitamura, Kazuhiko Isoda, Koichi Sugimoto and Takehiko Terada

Abstract

This paper describes about new isolation floor for operating room to be able to restart the surgery soon after earthquake. The isolation floor consists of thin sliding steel plate and the embossed steel plate which are coated hot-dip galvanizing. A constant spring connected to the sliding steel plate works to eliminate the residual displacement after earthquake. From the results of the shaking table test, the proposed isolation floor has a good performance to reduce acceleration to ground motion and the residual displacement is almost zero for various earthquake motions. We also build up the analysis model corresponding to the experimental results.

概要

本論文は、地震直後の手術再開を可能にする手術室向けの免震装置について述べている。免震装置は、薄板のエンボス加工鋼板の上を平板がすべる摩擦タイプで、平板には地震後の残留変位をほとんど生じさせないことを可能にする定荷重ばねを接続している。振動台実験により、入力地震動に対する応答加速度の低減と残留変位をほぼゼロにする免震性能を検証し、それと対応した解析モデルの構築を行った。

1.はじめに

免震床に使用される免震装置には、搭載物の転倒、移動を防止するために地震時の応答加速度を低減するとともに、地震終了後には元の位置に戻り残留変位をなるべく生じさせない復元機能が求められる。既往の研究では、すべりタイプの支承材のみで復元機構のない免震装置が提案されているが¹⁾、残留変位や鉛直軸まわりの回転が生じる可能性があり、地震後に手で原点に戻すなどの対策をとらなければならない。また、コイルばねに予引張力を与える復元機構²⁾もあるが、従来は予引張力を免震装置の摩擦係数以上に設定して、完全に原点位置まで戻すことが一般的であった。これに対し、著者らは、原点位置に完全に復帰せずともなるべく小さな残留変位にするためには、免震装置の摩擦係数に対してある程度の復元力を与えればよいことをシミュレーションにて確認し、それを簡易な模型を用いた振動台実験で検証した³⁾。本論文では、手術室における地震時の挙動を把握するとともに、手術室の床を免震化する場合の効果について、実験および解析の両面から検討した結果について述べる。

2. 免震床の復元力と応答の関係

2.1 復元機構の提案

免震床の復元機構として予引張ばねを使用する場合、予引張力を摩擦抵抗力以上に設定することにより残留変位をなくすることができる。しかし、予引張力を大きくするほど、すべり出しの際の抵抗力を増すことになり、床上の加速度が増加することになる。免震対象物の全質量を m 、免震装置の摩擦係数を μ 、摩擦力を F_0 とすると、残留変位が生じない予引張力 F は式(1)となる。

$$F \geq F_0 = \mu mg \quad (g \text{ は重力加速度}) \quad (1)$$

このときの免震対象物の加速度は、 μg から $(\mu mg + F)/m$ へと $(1 + F/\mu mg)$ 倍に増大する。また、予引張ばねとして線形ばねを使用した場合、図-1 に示すようにばね変位の増加と共に反力が増加するため、結果として免震床上の加速度が増加することになる。

本研究では、免震床の残留変位をなるべく小さくし、かつ上述のような加速度の増加を抑えるために、予引張ばねとして図-1 に示す定荷重ばねを用いた復元機構を提案する。本機構の特徴は、式(1)を満たす予引張力 F を与えるのではなく、 αF_0 (ただし、 $\alpha < 1$)の予引張力を与

えることで、(a)残留変位をほとんど除去できる点、(b)定荷重ばねを使用することで、ばね変位の増加に対してもばねの復元力が一定であるため、免震床上の加速度の増加を抑制できる点、以上の二点である。

2.2 免震床の復元力と応答の関係

2.1節で示した免震床の効果を確認するため、図-2に示す1質点系モデルを用いた地震応答解析を行った。予引張力 F に対する付与する摩擦力 F_0 の比を予引張力比 α として、式(2)のように定める。

$$\alpha = F/F_0 \quad (2)$$

図-2の c は減衰(周期4秒で0.1%相当と仮定)、 k_c は定荷重ばねのばね定数である。予引張力比 α を0~1まで変化させて地震応答解析を行い、質点の応答加速度、残留変位を求めた。地震波には表-1に示す3波を用いた。

表1のEl Centro波、Hachinohe波について、予引張力比 α に対する残留変位、応答加速度の最大値の関係を図-3に示す。El Centro波の場合は予引張力比 α が0.1程度までは残留変位が大きく低減し、0.6で残留変位をほぼゼロにすることができている。応答加速度の最大値は、予引張ばねがない場合($\alpha = 0$)に比べて $\alpha = 0.1$ で約10%、 $\alpha = 0.6$ で約60%増加しているが、従来の摩擦力を打ち消す予引張力($\alpha = 1$)を与えた場合には約100%の増加になるため、これに比べると加速度の増加を抑制できている。また、Hachinohe波の場合は、 $\alpha = 0.3$ で残留変位はほぼゼロとなっていること、加速度の増加は、El Centro波と同様の傾向になっていることがわかる。

以上より、予引張力比 α として0.1~0.4程度の復元機構を設けることにより、設けない場合に比べて残留変位を大幅に低減できることがわかる。その際、応答加速度の増加は、従来の摩擦力を打ち消す予引張力($\alpha = 1$)を与える場合に比べて、大幅に抑制できていることがわかる。

3.免震床の構成

免震床は、薄板鋼板を重ね合わせた摩擦タイプで、装置の総厚が約5mmの非常に薄い構成とした。また、復元機構には、変位によらず荷重が一定のばねである定荷重ばねを用いた。これにより、地震後の残留変位はほとんど生じなくなるとともに、2章に示したように復元機構の設置に伴う免震床上の応答加速度の増加をコイルばねなどの線形ばねに比べて抑制することが可能となる。以下に、免震装置の構成品であるすべり鋼板と定荷重ばねについて説明する。

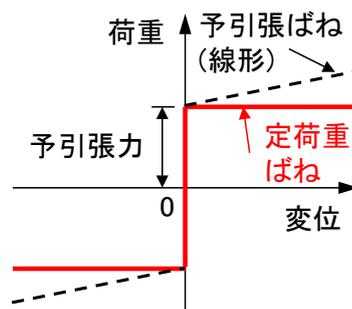


図-1 荷重-変位関係

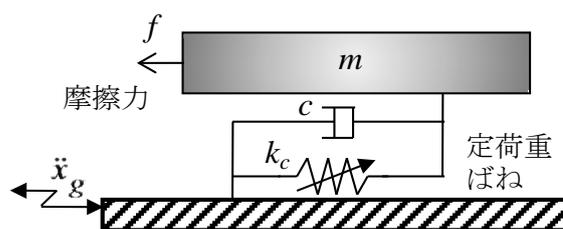
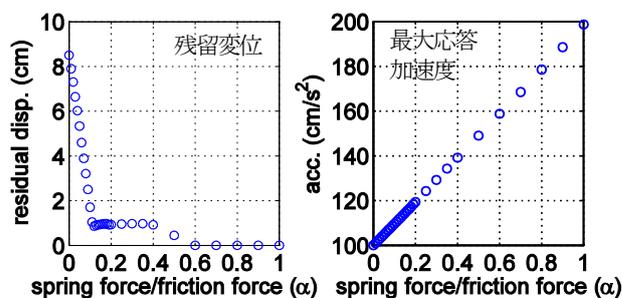


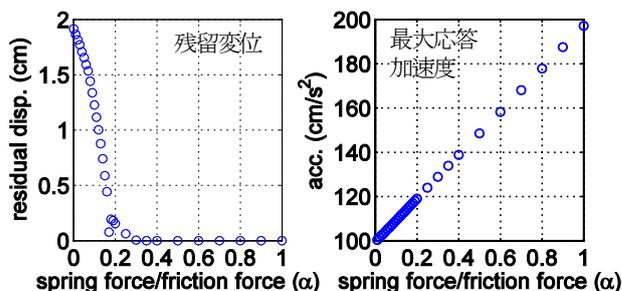
図-2 1質点系モデル

表-1 計算に用いた地震波

地震波	最大値
El Centro NS レベル2	50 cm/s
Hachinohe NS レベル2	50 cm/s
JMA Kobe 原波	818 cm/s ²



(a) El Centro 50cm/s



(b) Hachinohe 50cm/s

図-3 予引張力比と最大応答の関係

3.1 溶融亜鉛めっき鋼板

免震床の重要な構成品の1つであるすべり板には、特殊な潤滑剤で表面処理を施した溶融亜鉛めっき鋼板(以下、鋼板)を用いた。鋼板1枚の厚さは1.6mmである。この鋼板にエンボス加工を施した鋼板(以下、フロアプレート)を建物床の上に設置し、2枚の平板の鋼板を接着剤で貼り合わせた鋼板(以下、免震プレート)をフロアプレートの上に重ねて滑らすことで、免震装置として機能する。免震床の構成を図-4に示す。

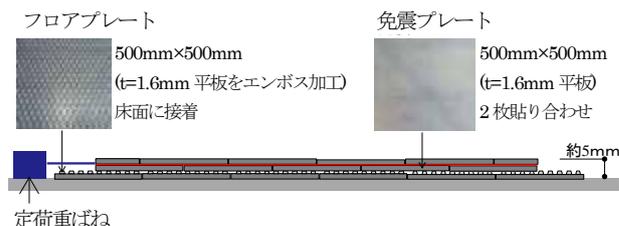


図-4 免震床の構成

3.2 定荷重ばね

地震後の免震床に残留変位が生じることを防ぐため、図-4に示すように、建物床に配置した定荷重ばねを免震プレートに接続した。この定荷重ばねにより、特性の異なる種々の地震波に対して、加速度の増加を抑制しながら残留変位ほぼゼロを実現した(4章で詳述)。

3.3 鋼板の性能

鋼板の摩擦特性を把握するため、鋼板のみを用いて単体実験を行った。手術室での使用状況を考慮して、積載物の質量の違いによる面圧の変化、および免震プレートの速度の変化に対する摩擦係数 μ を測定した。摩擦係数は、鉛直荷重に対する水平荷重の比率として求めた。鉛直荷重を受圧面積で除した面圧 σ と摩擦係数 μ との関係を図-5(図中の●)に示す。実験結果より、摩擦係数は、面圧が小さくなるにつれて増加する傾向にあることがわかる。ここで、摩擦係数 μ と面圧 σ (MPa)の関係を示す設計式を実験結果を回帰する曲線から式(3)のように定めた。

$$\mu(\sigma) = \begin{cases} 0.1292 \times \sigma^{-0.4} & (\sigma > 0.38) \\ 0.19 & (\sigma \leq 0.38) \end{cases} \quad (3)$$

図-5に式(3)の設計式による摩擦係数と面圧の関係を実線で示す。実験で求めた摩擦係数は、設計式(3)に対して±15%の範囲内(図-5の破線)に概ね分布していることがわかる。これにより、積載荷重などの使用条件が定まれば、免震装置の摩擦係数を式(3)で設定して応答予測を行うことができる。次に、面圧 σ が0.75MPaの時の摩擦係数と免震プレートの速度との関係を図-6に示すが、この結果から、一定面圧下における摩擦係数の速度依存性は低いことがわかる。

4. 振動台実験

4.1 試験体

地震時の免震床の効果を検証するため、写真-1に示す

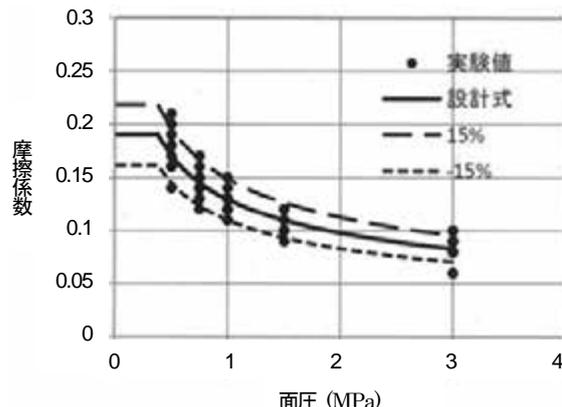


図-5 摩擦係数の面圧依存性

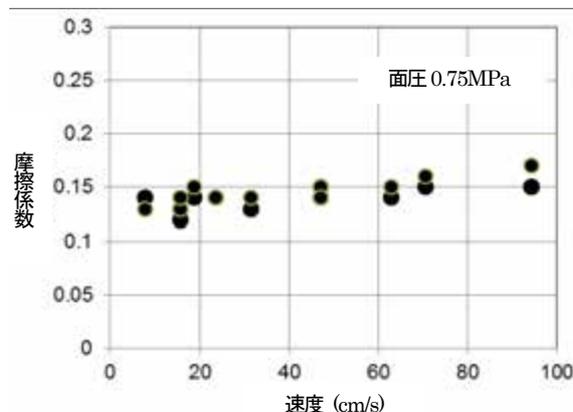


図-6 摩擦係数の速度依存性

試験体を製作した。振動台上にフロアプレートを敷きつめ、その上に平板の鋼板を2枚貼り合わせた免震プレートを載せ、免震床の1辺あたり2台の定荷重ばね($F_s = 78.4N/1$ 台)を免震プレートに取り付けて、免震床試験体を構成した。フロアプレート、免震プレートは施工性を考慮して1枚あたりの大きさは500mm×500mmである。また、免震プレートは接着剤強度を保つため、千鳥配置に重ね合わせて貼り付けている。免震床上には、手術室内の地震時の挙動がわかるように手術台を載せた。センサーは、免震床と手術台の動きを測定するため、加速度

計と変位計を図-7のように配置し、免震床の性能を検証した。試験体の質量は、手術台 m_1 が278kg、免震プレート m_2 が151kgで、合計 $M = 429\text{kg}$ である。また、免震

プレートの大きさは $2\text{m} \times 2\text{m}$ 、フロアプレートの大きさは $3\text{m} \times 3\text{m}$ であり、免震クリアランスとして 500mm を確保している。



写真-1 免震床試験体

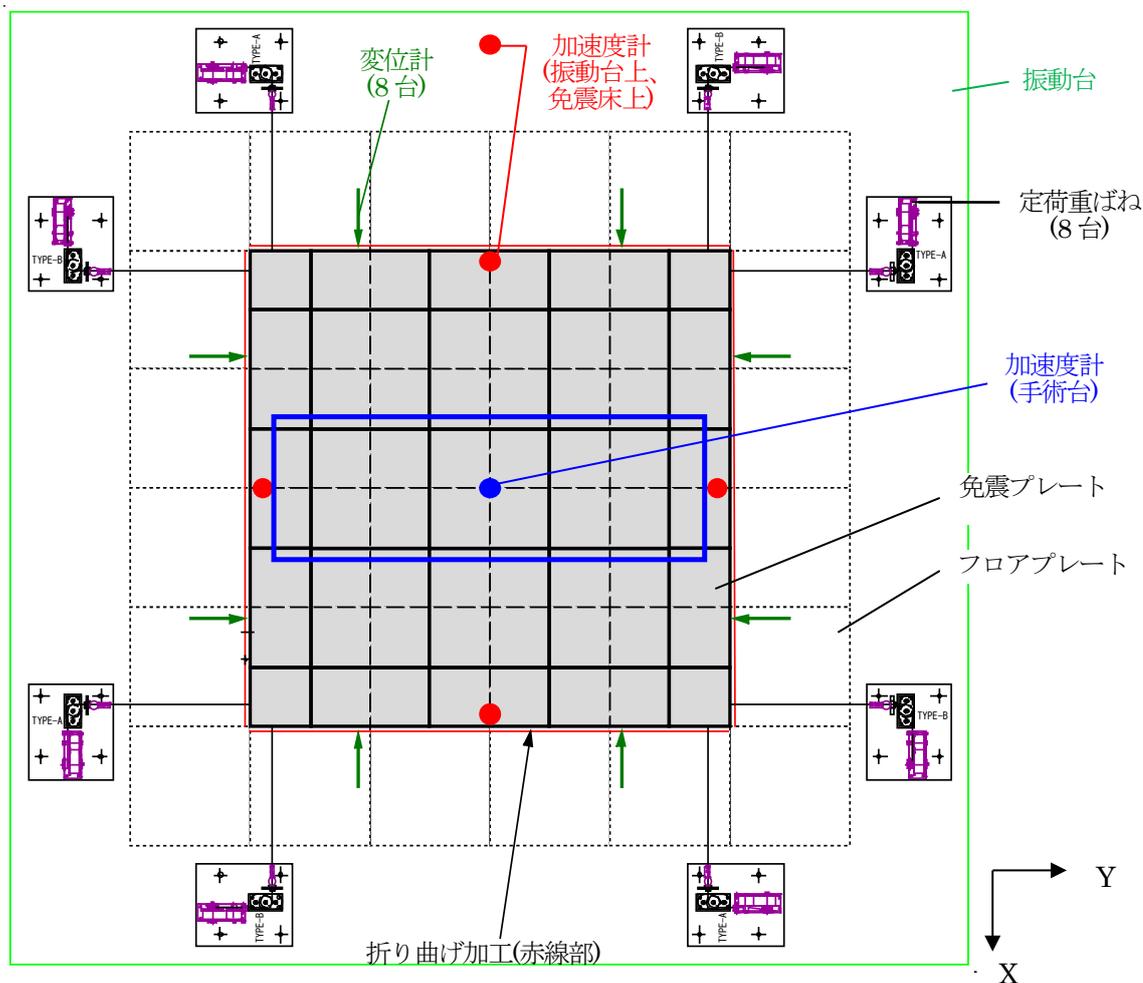


図-7 免震床試験体と計測位置

表-2 実験に用いた地震波

No.	地震波	最大値(cm/s ²)			加振方向
		X	Y	Z	
1	El Centro NS レベル2	511	341	308	XYZ同時加振
2	JMA Kobe 原波	818	617	333	
3	耐震建物A応答波(El Centro NS入力)	890	688	1208	
4	kik-net 芳賀(2011年東北地方太平洋沖地震)	1197	799	808	
5	告示波(神戸位相)	459	424	249	
6	告示波(関東位相)	441	346	207	
7	耐震建物B応答波(地震波1)	1000	1000	—	XまたはYの 一方向加振
8	耐震建物B応答波(地震波2)	1005	1005	—	
9	耐震建物B応答波(地震波3)	771	771	—	

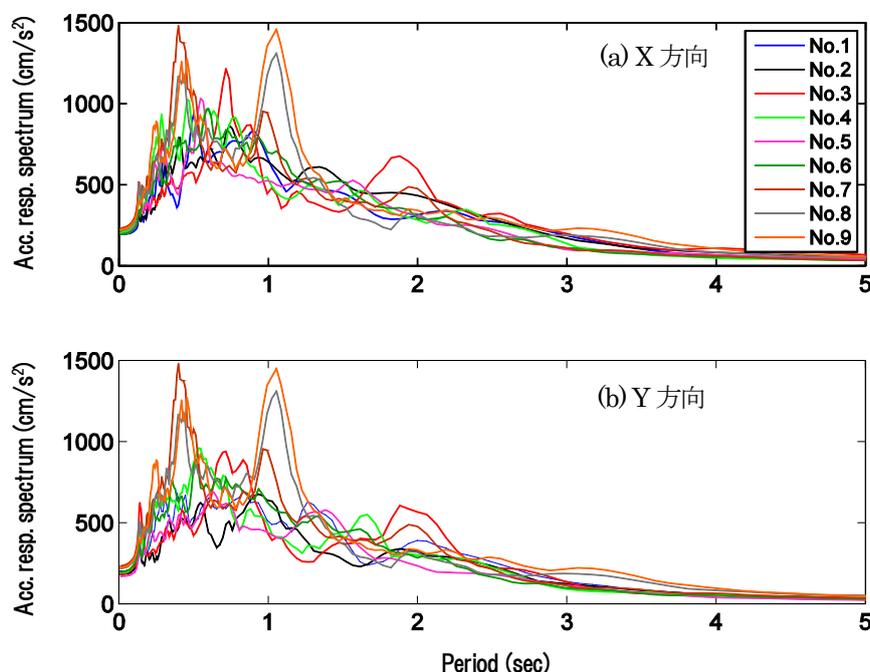


図-8 加速度応答スペクトル($h=0.05$)

4.2 加振波

免震床の応答特性を把握するため、周期特性、最大加速度の異なる地震波を用いて振動台実験を行った。実験に用いた地震波を加速度の最大値とともに表-2に示す。また、減衰5%の加速度応答スペクトルを図-8に示す。

4.3 実験結果

実験では、表-2に示す地震波を振動台に入力し、図-7に示した加速度計、変位計を用いて測定を行った。図-9に振動台および免震床上の最大加速度を示す。実験より、表-2のどの地震波に対しても、免震床上の最大加速度は概ね200cm/s²程度となり、手術室内に置いてある手術台、

検査機器が転倒しないレベルを実現していることがわかる。また、残留変位の大きさは地震波によって異なるが、最大でも1.5mm程度となり、実用上問題のない大きさであった。図-10には、表-2のNo.3、No.4の地震波の場合の振動台加速度および免震床上加速度の時刻歴波形を示す。図より、主要動部分の免震床上加速度は振動台加速度に比べて大きく低減しており、免震効果が表れていることがわかる。以上より、本論文で提案した免震床は、手術中に地震が発生しても、手術台や検査機器の転倒を防ぎ、さらに手術室全体の床が元の位置に戻ることから、地震直後から手術の再開が可能な免震性能を有していることが示された。

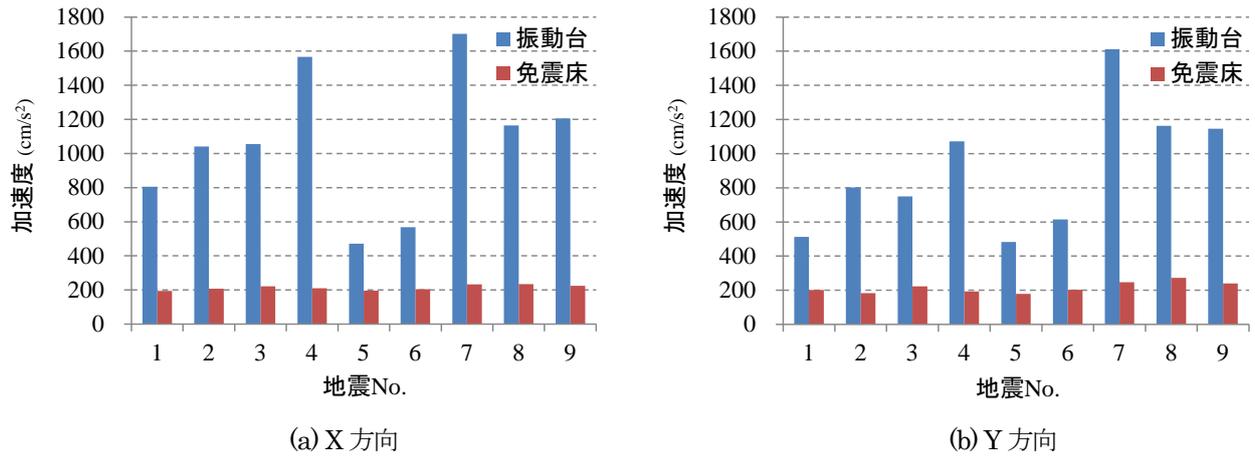
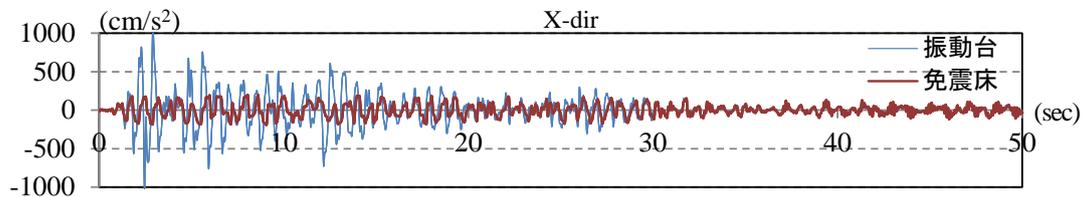
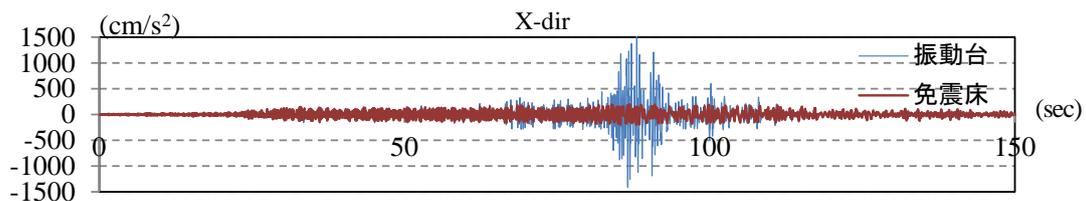


図-9 振動台と免震床上の最大加速度



(a) 耐震建物 A 応答波(地震 : No.3、上段 : X 方向、下段 : Y 方向)



(b) kik-net 芳賀 [2011年東北地方太平洋沖地震] (地震 : No.4、上段 : X 方向、下段 : Y 方向)

図-10 振動台と免震床の加速度の比較

5.解析モデル

5.1 解析モデルのパラメータ

可動部の質量は、免震プレートと積載荷重の合計を1質点に集約した。

免震プレートを摩擦要素を表す完全弾塑性モデル、定荷重ばねは履歴ループを描かないバイリニア型の非線形ばねとし、それらを質点と並列に結合した解析モデルとした。摩擦係数は3.2節で示した各種の依存性を考慮し、式(3)を用いて次のように求めた。手術台の質量 m_1 は278kgであることから、面圧 σ_1 は0.278MPaとなり、式(3)を用いると摩擦係数 μ_1 は $\mu_1 = 0.19$ となる。一方、無積載部分、すなわち免震プレートの自重($m_2 = 151$ kg)のみが作用している部分の免震プレートの摩擦係数 μ_2 は別途実施した実測より、 $\mu_2 = 0.115$ であった。これらより、摩擦力 F_r は、手術台が載っている積載部とそれ以外の無積載部の合計として、式(4)で求めた。

$$F_r = (\mu_1 m_1 + \mu_2 m_2)g \quad (4)$$

式(4)より、摩擦力は $F_r = 687.8$ Nとなる。以上から、可動部質量(手術台と免震プレートの合計、 $M = m_1 + m_2$)が $M = 429$ kgであることから、平均的な摩擦係数 μ_a を式(5)より求めた。

$$\mu_a = F_r / M g \quad (5)$$

式(5)より、平均的な摩擦係数 μ_a は $\mu_a = 0.164$ となる。また、平均的な摩擦係数 μ_a より、実験における予引張力比 α (復元力/摩擦力)は、式(2)より、 $\alpha = F_s / F_r = 0.23$ となっている。

<参考文献>

- 1) 佐藤孝典, 鈴木利哉, 寺井雅和: “高面圧多点滑り支承材の開発(その1)(その2)”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 2011, pp.531-534.
- 2) 石井元悦, 尾木靖夫, 片山大助, 原田秀秋, 平井潤: “環境改善・防災に役立つ免震・制振装置”, 三菱重工技報, Vol.39, No.6, 2002, pp.328-331.
- 3) 福喜多輝, 磯田和彦, 坂本眞一: “復元機構を持つすべり支承を用いた簡易型免震床の性能”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 2012, pp.297-298.

5.2 解析と実験の比較

5.1節で求めた平均的な摩擦係数 μ_a を用いて、表-2に示す地震波による免震床の時刻歴応答解析を行い、実験結果と比較した。図-11に最大加速度、最大変位の比較図を示す。また、JMA Kobe波(表-2 No.2)、および耐震建物A応答波(表-2 No.3)の場合の免震床の加速度、および変位の時刻歴波形について、実験と解析を比較して図-12に示す。図-11、図-12より、解析に比べて実験の方が若干大きくなる場合が多いが、最大応答値、時刻歴波形とも、加速度、変位を概ね表現できていることがわかる。今後、免震床を設計する際の予測解析には十分使用できる解析モデルとなっている。

6.まとめ

エンボス板の上に平板を置いてすべらす非常に簡易な摩擦タイプで、装置の総厚が約5mmの超薄型の免震床を提案した。平板に定荷重ばねを取り付けた復元機構を備えることで、地震後の残留変位をほとんど生じない免震床を実現したため、地震直後から手術を再開することが可能となる。周期特性、振幅レベルの異なる様々な地震波に対して、免震床上の最大加速度は概ね200cm/s²となり、手術室内の手術台、医療機器が転倒しない性能を有していることが実験的に検証された。また、解析モデルは、実験結果をよく表現できており、設計、予測解析に十分に適用できることがわかった。

謝辞

溶融亜鉛めっき鋼板の諸物性については、新日鉄住金殿からデータの提供を受けた。ここに記して御礼申し上げます。

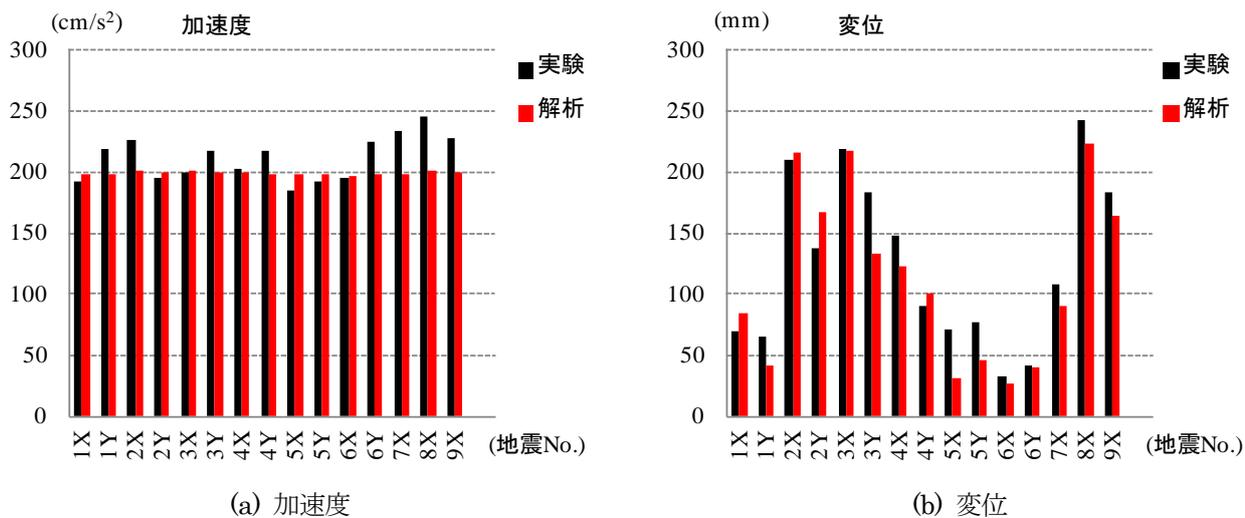


図-11 免震床の最大応答値の比較

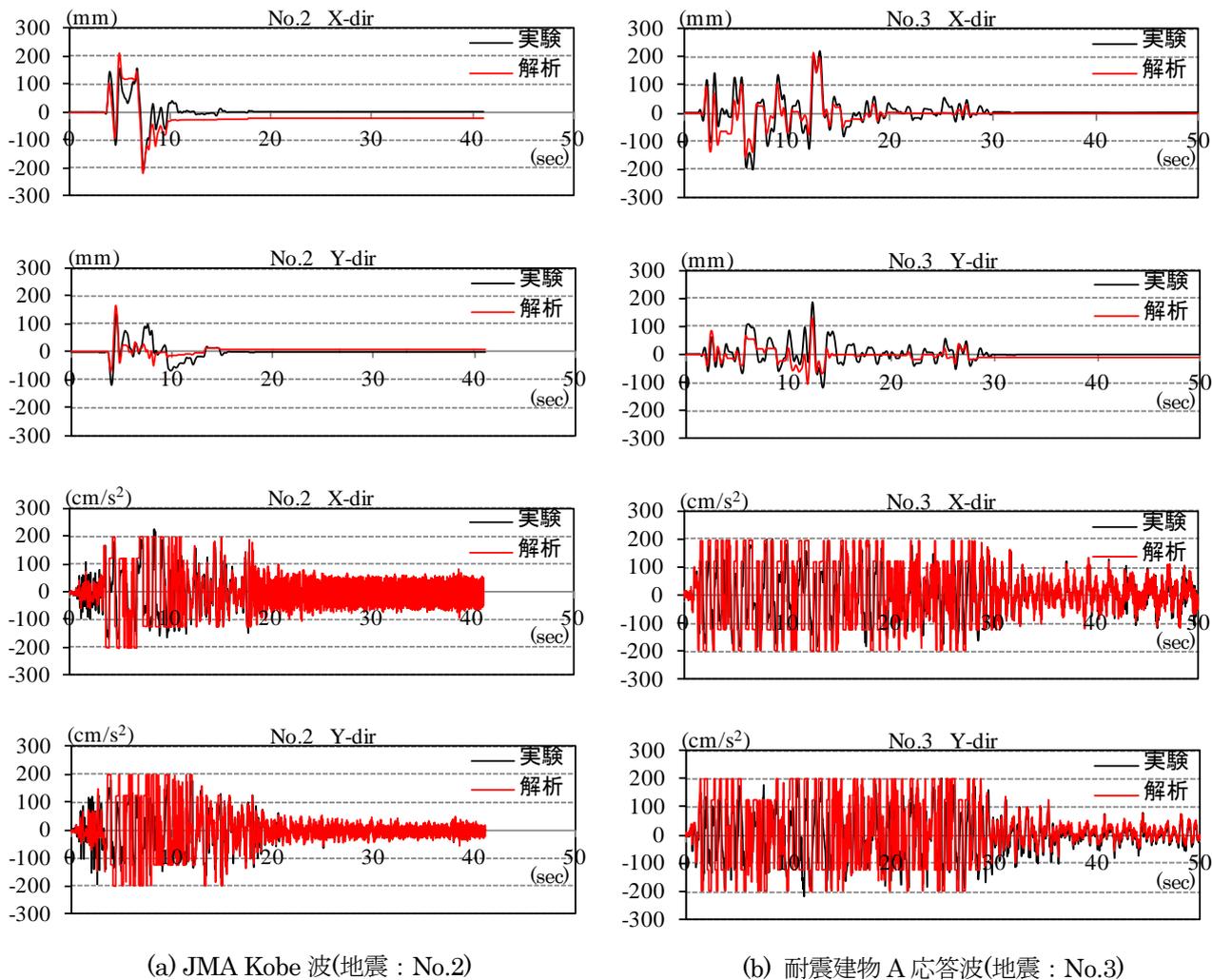


図-12 免震床の応答波形の比較