

自動倉庫ラックのパレット免震装置に関する研究

Study on Seismic Isolation System for Storage Rack Pallets

小山慶樹* 舟木秀尊* 舟山勇司**

要 旨

東北地方太平洋沖地震や熊本地震において、立体自動倉庫のラックから積荷が落下して損傷する事例が生じた。さらに、落下した積荷が自動搬送機の走路を妨げ搬送機能が損なわれ、復旧に多大な時間と労力を要した。そのため、積荷の破損防止や事業継続の観点から、積荷の荷崩れ防止対策を行う必要性が高まっている。そこで、新設・既設ラックのどちらにも適用可能で、個々のパレットに対応した免震装置を設ける「パレット免震」システムを開発した。開発した免震装置は対策がないものに比べ、積荷下のパレットに生じる最大応答加速度を約 1/2 に低減することで荷崩れを防止し、地震終了後は元の位置に復帰することを確認した。また、奥村組技術研究所内の倉庫棟にラックを設け、開発した免震装置等の荷崩れ防止対策を適用した。

キーワード：立体自動倉庫、ラック、免震装置、傾斜すべり支承、地震応答解析、振動台実験

1. まえがき

東北地方太平洋沖地震や熊本地震などの巨大地震により、立体自動倉庫ラック（以下、ラック）の積荷が落下して破損する事例が生じた。さらに、落下した積荷が自動搬送機の走路を妨げ搬送機能が損なわれるなど、復旧に多大な時間と労力を要した。そのため、積荷の破損防止や事業継続の観点から、ラック内の積荷に対して荷崩れ防止対策を講じる必要性が高まっている。荷崩れ防止対策には、ラック全体を TMD（チューンド・マス・ダンパー）による制振構造にする方法^{例えぼ 1)}や免震構造にする方法^{例えぼ 2)}等がある。しかし、ラックの収容力を損なう可能性や、既存のラックに適用することが困難な場合もある。

著者らは、既にラック全体を対象とした制震システム³⁾を開発しているが、さらに今回は個々のパレットに対応した「パレット免震」システムを開発した。開発したパレット免震システムは、新設・既設ラックのどちらにも適用可能で、薄型の免震装置を用いることでラックの収容力を損なわないように配慮している。開発した免震装置の荷崩れ防止効果を振動台実験、およびシミュレーションにより確認した。

2. 免震装置の概要

2.1 免震装置の機構

図-1 に示すように、開発した免震装置は個々のパレットを対象とした免震システムである。ラックのフレームである腕木の上に、免震装置を容易に取り付けることができるため、新設・既設ラックのどちらにも適用可能である。

免震装置の機構を図-2 に示す。免震装置は、V 字に傾斜したすべり材と支持材から構成され、積荷を出し入れする方向に可動する。図-2 (b) に示すように、地震が発生すると、免震装置が滑動することでパレットの応答加速度が低減され、積荷の荷滑りや荷崩れを防止する

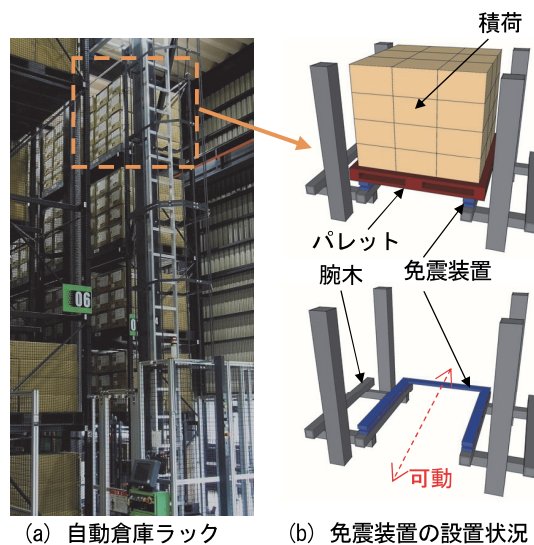


図-1 免震装置の設置イメージ

*技術研究所建築研究グループ **西日本支社建築設計部

ことが可能となる。

また、地震終了後はすべり材の傾斜による復元力によって、元の位置に復帰する機構となっている。免震装置の復元力特性の概要を図-3に示す。

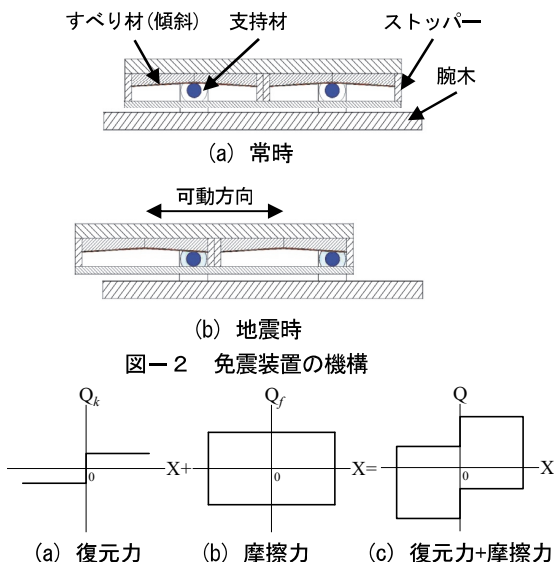


図-2 免震装置の機構

図-3 傾斜軸に沿った免震装置の復元力特性の概要

2.2 免震装置の力学特性

免震装置が滑動している場合の傾斜軸に沿った運動方程式は、図-4より次式で表される。

$$m(\ddot{x} + \ddot{x}_o) \cos \theta + Q_k + Q_f = 0 \quad (1)$$

ここで、 m : 質量

Q_k : 復元力(= $\text{sgn}(x) m(\ddot{z} + \ddot{z}_o + g) \sin \theta$)

Q_f : 摩擦力(= $\text{sgn}(\dot{x}) \mu m \times \{(\ddot{z} + \ddot{z}_o + g) \cos \theta + \text{sgn}(x)(\ddot{x} + \ddot{x}_o) \sin \theta\}$)

\ddot{x}_o : 腕木の絶対加速度(水平方向)

\ddot{z}_o : 腕木の絶対加速度(鉛直方向)

x : 免震装置の相対変位(水平方向)

\ddot{x} : 免震装置の相対加速度(水平方向)

\ddot{z} : 免震装置の相対加速度(鉛直方向)

$$(\ddot{z} = \ddot{x} \tan \theta)$$

g : 重力加速度

μ : すべり材の摩擦係数

θ : すべり材の傾斜角

免震装置が静止する判定は(2)式により行い、静止している場合は(3)式となる。

$$|m\ddot{x}_o \cos \theta + Q_k| < |Q_f| \quad (2)$$

$$\ddot{x} = 0, \dot{x} = 0, x = \text{const} \quad (3)$$

ここで、図-3(a)より、傾斜による復元力は免震装置の水平変位の符号が切替わるところで不連続となるため、解析では便宜的に水平変位が $|r \sin \theta|$ (ここで、 r : 支持材の半径)以下となる微小変位区間においては、半径 r の円弧レール上を動くものと仮定した。

また、すべり材の傾斜による復元力から割線剛性を求めた等価周期 T_e は次式で表せる。

$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{x}{g \cdot \sin \theta}} \quad (4)$$

(4)式より、免震装置の等価周期は質量によらず、免震装置の相対変位とすべり材の傾斜角に依存し、一定の周期特性を持たない。図-5に免震装置の周期特性を示す。

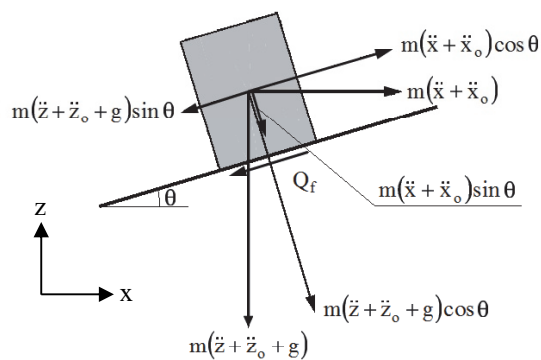


図-4 1質点系モデル図

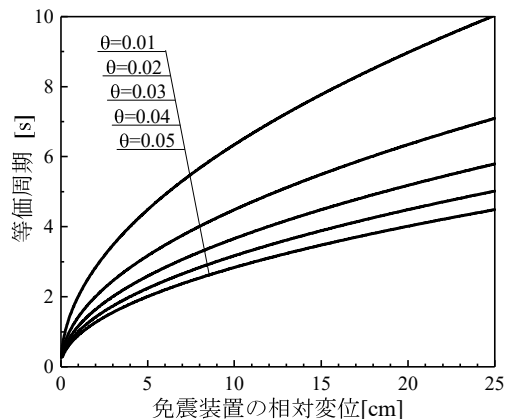


図-5 免震装置の周期特性

2.3 傾斜角と摩擦係数の検討

段ボールを多段に積んだ積荷の荷滑りは、ばらつきがあるものの概ねパレットの最大応答加速度が 200cm/s^2 程度で生じることが報告されている⁴⁾。そこで、積荷が荷崩れや荷滑りを起こさないように免震装置の最大応答加速度を 200cm/s^2 以下、かつ一般的なパレットサイズである $1\text{m} \times 1\text{m}$ に免震装置が納まるように、最大水平変位は 25cm 以下を目標性能とし、免震装置に採用するすべり材の傾斜角と摩擦係数をシミュレーションにより検討する。解析モデルは、積荷-パレット間、パレット-免震装置間では滑動が生じないものとした1質点系モデルとし、質点の質量を 700kg とした。解析パラメータは、免震装置の高さが大きくならないように、すべり材の傾斜角を $0.02 \sim 0.05\text{rad}$ とし、摩擦係数を $0.03 \sim 0.10$ とした。検討に用いた入力地震動は、表-1に示す、近年に起きた直下型・海溝型地震として観測された3波を採用した。解析結果の一例として、すべり材の傾斜角と

摩擦係数を因子とした免震装置の最大応答値を図-6に示す。図より、すべり材の傾斜角を 0.05rad 以下、摩擦係数を 0.07 以上とすることで、目標性能が得られることを確認した。

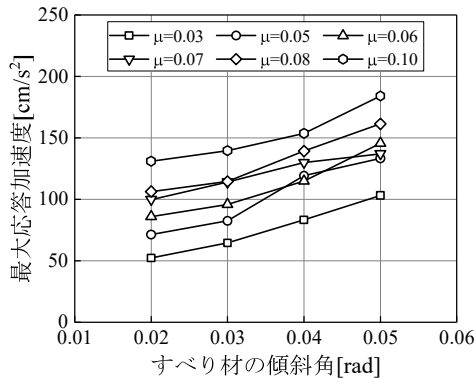
3. 縮小試験体の静的加力実験

支持材とすべり材間の摩擦係数を確認するため、水平ストロークを±10cm とした 0.4m×0.4m のパレットに対応した小型の免震装置を作成し、パレットを模擬した穴付きの板材上部に 10、20、30、40、50kg の錘を載せて静的加力実験を行った。

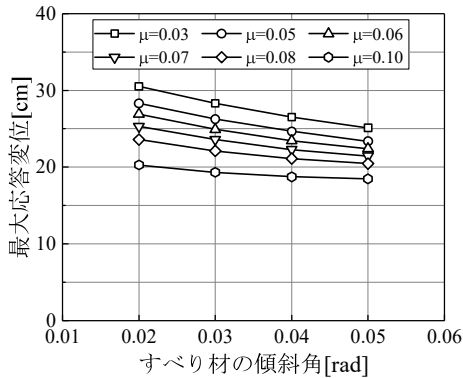
ここで、支持材は SUS 材を用い、すべり材には高荷重条件下において耐摩耗性を発揮するバックメタル付四ふっ化エチレン樹脂複層軸受材を採用した。また、すべり材の傾斜角は、免震装置に生じる水平方向の相対変位が過大とならないように 0.03rad とした。静的加力実験の状況を写真-1 に示す。加力装置により、免震装置を

表-1 入力地震動一覧

地震名	発生日	観測点	最大加速度 (方向)
兵庫県南部地震 (M7.3)	1995/01/17	神戸海洋気象台 (気象庁)	818cm/s ² (NS)
新潟県中越地震 (M6.8)	2004/10/23	新潟県小千谷市城内 (K-NET)	898cm/s ² (EW)
東北地方太平洋沖地震 (M9.0)	2011/03/11	福島県白河市 (K-NET)	1295cm/s ² (NS)



(a) 最大応答加速度(白河波)



(b) 最大応答変位(小千谷波)

図-6 免震装置の最大応答値

±9.5cm の範囲で水平方向に押し引きして、加力装置に付けたロードセルから水平荷重を計測した。

静的加力実験より得られた免震装置の荷重-変位関係を図-7に示す。また、すべり材の面圧と摩擦係数の関係を図-8に示す。すべり材の摩擦係数は、静的加力実験より得られた水平荷重から、すべり材の傾斜による復元力を差し引いた摩擦力から求め、面圧はヘルツの弾性接触理論⁹⁾より算定した。図より、すべり材の面圧が大きくなるほど摩擦係数が小さくなるが、摩擦係数は目標としていた 0.07 程度であることを確認した。

4. 振動台実験

4.1 振動台実験の概要

免震装置の振動特性やシミュレーションの妥当性を確認するために、振動台実験を行った。図-9に振動台実験で使用した免震装置の形状を示す。免震装置は高さ 5.3cm、すべり材の傾斜角を 0.03rad、支持材の半径を

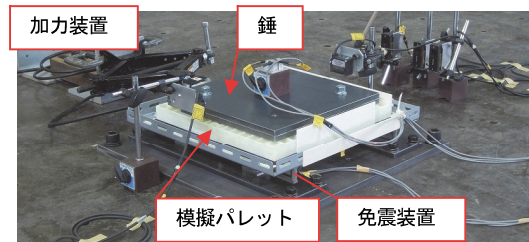


写真-1 静的加力実験の状況

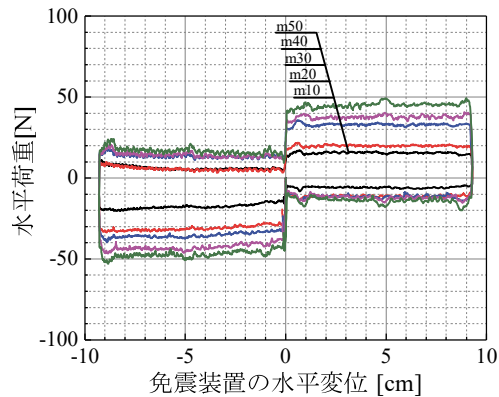


図-7 免震装置の荷重-変位関係

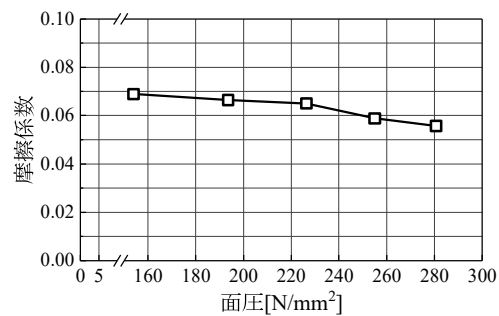


図-8 すべり材の面圧と摩擦係数の関係

2.0cm、水平ストロークを±20cmとした。なお、支持材およびすべり材は縮小試験体と同じ材料を用いた。免震装置の有無（以下、免震・非免震）の試験体を振動台上に設置し、1.3m×1.2mのプラスチック製パレットに積荷を載せ同時加振した。積荷の質量をパラメータとして約220、660、1,100kgの鉄板製の錘、および段ボール積荷を再現するために、約550kgの書籍を入れた段ボール製のキャビネットの計4ケースとした。振動台実験の状況を写真-2、加振終了後の状況を写真-3に示す。免震装置の可動方向をX方向として、入力地震動はランダム波(0.2~50Hz)、および正弦波(1.0Hz)の加振に加え、気象庁および防災科学技術研究所の強震観測より得られた観測波(2011年東北地方太平洋沖地震の白河市、1995年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台)と1940年エルセントロ地震、1968年十勝沖地震の観測波を用いた。加振レベルは、最大加速度を100cm/s²から段階的に大きくし、原波、またはレベル2相当の地震動として最大速度50cm/sまでとした。

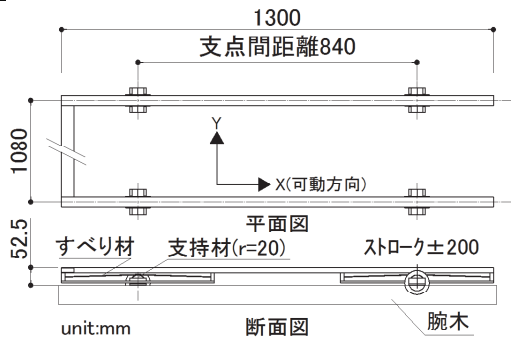


図-9 免震装置の形状

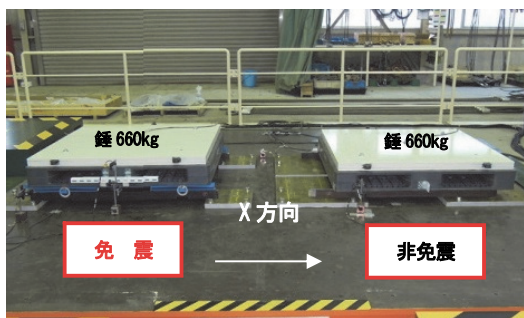


写真-2 振動台実験状況(積荷:錘)

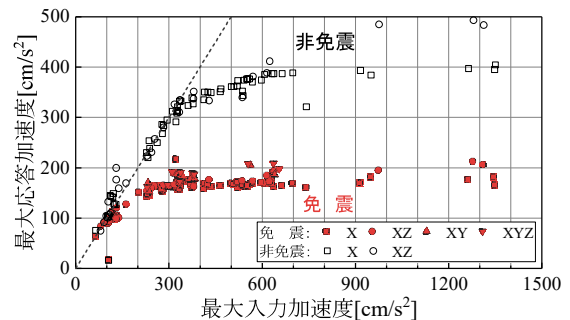


写真-3 振動台実験状況(加振終了後)

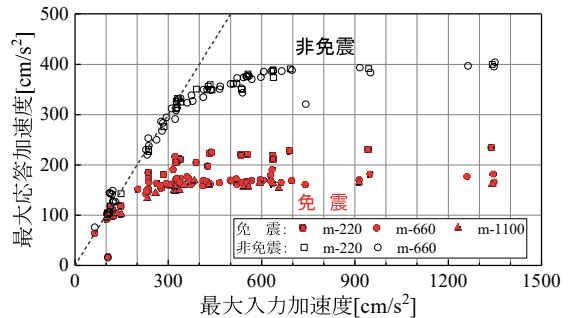
4.2. 振動台実験結果

図-10に最大入力加速度とパレットの最大応答加速度の関係を示す。図-10(a)に積荷の質量を660kg、一軸(X)、二軸(XY、XZ)、三軸(XYZ)加振した場合、図-10(b)に積荷の質量を220、660、1,100kg、X方向加振とした場合をそれぞれ示す。図より、鉛直動による影響で最大応答加速度にばらつきがあるものの、非免震パレットの最大応答加速度は300cm/s²程度からパレット-腕木間で滑動が生じ、400cm/s²程度で頭打ちとなることから、パレット-腕木間の摩擦係数は概ね0.3~0.4であることが分かる。

また、免震パレットの最大応答加速度は200cm/s²程度で頭打ちとなり、非免震に比べ最大応答加速度が約1/2に低減しており、一軸加振や三軸加振によらず、免震装置上のパレットは安定した応答低減効果が得られることが確認できた。図-10(b)より、質量が220kgの場合は、免震パレットの最大応答加速度が250cm/s²程度と他の質量の場合に比べて大きくなっており、すべり材



(a) 加振方向の影響(m=660kg)



(b) 質量の影響(X方向加振)

図-10 最大入力加速度と最大応答加速度の関係

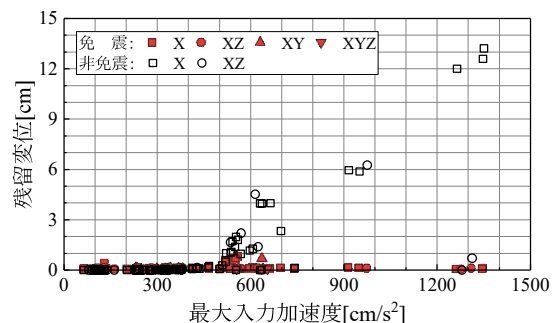


図-11 最大入力加速度とパレットの残留変位の関係

の面圧依存性に起因した摩擦係数の増加が確認できるが、660kg、1,100kg の場合の最大応答加速度は概ね 200cm/s² 程度で頭打ちとなることが分かる。

図-11 に最大入力加速度とパレットの残留変位（加振終了後の水平変位）の関係を示す。非免震パレットの残留変位は最大入力加速度が 400cm/s² 以上から徐々に増大しているのに対し、免震パレットの残留変位はすべり材の傾斜による復元力の影響で、免震装置が元の位置に戻るため、概ねゼロとなっていることが分かる。

4.3. 振動台実験結果とシミュレーションの比較

免震パレットの振動台実験結果とシミュレーション結果の比較を図-12 に示す。シミュレーションに用いた数値積分法は、Newmark の β 法 ($\beta=1/6$) とした。解析条件は、すべり材の傾斜角を 0.03rad とし、摩擦係数は免震装置の可動方向と直交方向の振動により、すべり材取付け治具と支持材取付け治具間の摩擦による影響を考慮して、0.070 から 0.074 に割増して検討した。

なお、免震装置に用いたすべり材には面圧依存性があるが、ラックに収容する積荷の質量が変動することから、ここでは一律の値とした簡易な応答評価を行った。

図-12 (a)~(b)は正弦波 (1.0Hz)、X 方向加振、最大入力加速度 400cm/s² の場合を示し、図-12 (c)~(d) は白河波、X 方向加振、最大入力加速度 650cm/s²、図-12 (e) は白河波、XYZ 方向加振、最大入力加速度 650cm/s² とした場合の主要動部分を拡大して示す。図より、2.2 で述べた解析手法は簡易な摩擦系剛体モデルであるため、実験に見られる取付け治具等の部分振動による高次振動やすべり材の微細な不陸による影響、積荷の振動による影響までは評価できていないが、加速度の主応答や変位応答は良く再現できており、免震パレットの評価手法として妥当であると判断した。

また、入力地震動の種類・強度が異なる場合や一軸加振、三軸加振においても、シミュレーション結果は応答加速度の主応答、応答変位とも振動台実験結果とよい対

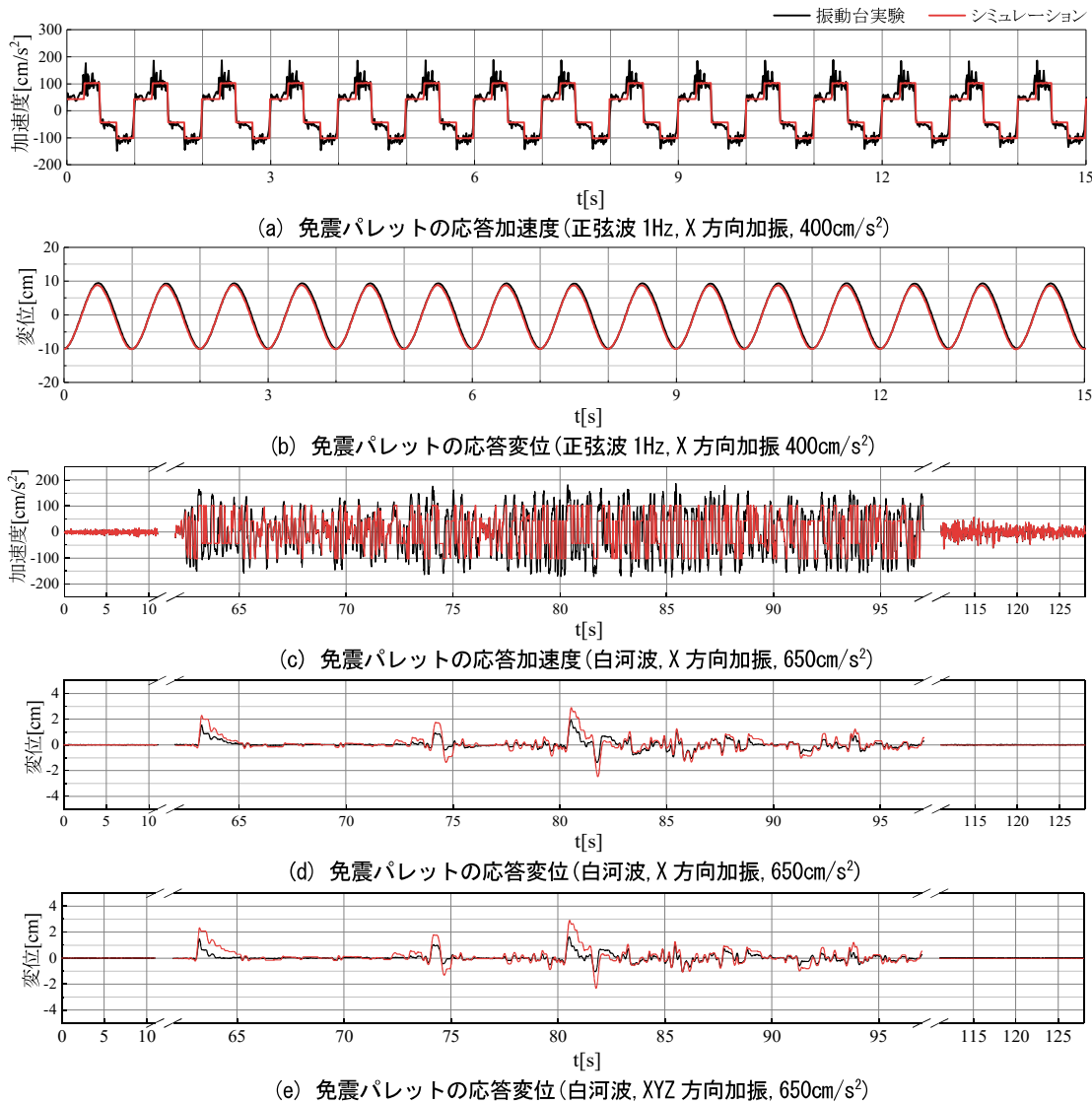


図-12 振動台実験結果とシミュレーション結果の比較 (m=660kg)

応を示し、2.2 で述べた解析手法の妥当性を確認することができた。

5. まとめ

自動倉庫ラックの個々のパレットを対象とした免震装置を考案し、静的加力実験・振動台実験を行い、以下の知見を得た。

- i. 免震装置の上に設置したパレットの最大応答加速度は、積荷の質量が小さくなるとすべり材の面圧依存性による影響によって僅かに大きくなるものの、概ね 200 cm/s^2 となり、非免震パレットの最大応答加速度に比べ、約 1/2 に低減することで積荷の荷崩れを防止することができた
- ii. すべり材の傾斜角を 0.03rad とした場合、傾斜による復元力により、加振終了後に生じる残留変位は概ねゼロとなり、元の位置に復帰することを確認した
- iii. 免震装置の水平ストロークを $\pm 20\text{cm}$ 、すべり材の傾斜角を 0.03rad とした場合、免震装置の高さは約 5.3cm となり、薄型の免震装置が開発できた
- iv. 入力地震動の種類や強度、一軸加振や三軸加振によらず、シミュレーション結果は振動台実験結果とよい対応を示し、シミュレーションにより免震装置の加速度の主応答や変位応答を評価できることを確認した

6. あとがき

2017年1月、技術研究所内に倉庫棟を新築し、自動ラックが設置された。自動ラックは7列設置されており、

開発技術の実証と見学者向けの展示を目的として、そのうち2列(1対)にラック制振³⁾を、2つの棚に本報で紹介したパレット免震装置を設けた。写真-4(a)~(d)に倉庫棟の外観、自動ラック全景、ラック制振、およびパレット免震装置の設置状況を示す。今後は、ラック制振、パレット免震装置の荷崩れ防止の効果を確認するために、地震観測を行う予定である。

なお、パレット免震装置はオイレス工業と共同開発した技術(特許出願中)である。また、防災科学技術研究所 K-NET および気象庁の強震記録を使用した。ここに記して感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 木原幸紀他、「既存の立体自動倉庫を対象としたTMDを用いた制振改修構法(その1、その2)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅲ、pp.873-876、2012.9
- 2) 竹内 徹他、「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、第721号、pp.629-637、2016.3
- 3) 舟木秀尊他、「自動倉庫ラックの制振構造に関する研究(その1、その2)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp.275-278、2016.8
- 4) 安川真知子他、「自動ラック倉庫における多段積荷のすべり落下挙動に関する一考察」、日本建築学会構造系論文集、第82巻、第732号、pp.183-192、2017.2
- 5) 日本道路協会、「道路橋支承便覧」、丸善、p.44、1973



(a) 外観



(b) 自動ラック全景



(c) ラック制振の脚部



(d) パレット免震装置

写真-4 倉庫棟に設けた開発技術