立体自動倉庫ラックに適用する 積載物の落下防止を目的とした 免震装置の開発

DEVELOPMENT OF SEISMIC ISOLATION SYSTEM FOR AUTOMATIC WAREHOUSE TO PREVENT GOODS FALLING

舟木秀尊 — * 1 小山慶樹 — * 1
舟山勇司 — * 1 澤田 毅 — * 2
隈澤文俊 — * 3

Hidetaka FUNAKI — * 1 Yoshiki KOYAMA — * 1
Yuji FUNAYAMA — * 1 Takeshi SAWADA — * 2
Fumitoshi KUMAZAWA — * 3

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

Keywords:

Automatic warehouse, Seismic isolation system, Inclined rail bearing, Seismic response analysis, Shaking table test

The 2011 off the pacific coast of Tohoku earthquake and the 2016 Kumamoto earthquake shook many automated storage and retrieval systems and caused palletized goods to fall down from the storage racks. The authors have developed a seismic isolation system in the direction of rack opening for automatic warehouse to prevent goods falling. In this study, shaking table tests were conducted to evaluate a seismic isolation system using inclined rail bearings. As a result, it has been demonstrated that the newly developed seismic isolation system is effective in preventing stored goods from falling down from rack shelves.

1. はじめに

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。更に、落下した積荷が自動搬送機の走路を妨げて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対策を講じる必要性が高まっている。荷崩れ対策としては、ラック全体をTMD(チューンド・マス・ダンパー)によって制振構造にする方法^{例1)}やラック全体を免震構造にする方法^{例2)}等の対策がある。しかし、ラックの最上段にTMDを設置する方法はラックの収容力を損なう可能性があり、ラック全体を免震構造とする方法では既存のラックに適用する際に免震装置の後付けが困難な場合がある。

そこで、著者ら¹⁾はラック全体を対象とした制振システム³⁾を既に開発しているが、個々のパレットを対象とした免震装置を新たに開発した。この免震装置は、新設・既設ラックのどちらにも適用可能で、かつラックの収容力を損なわないように配慮した薄型の免震装置である。本報告では、免震装置の基本特性や積荷の荷崩れ・落下防止の効果を振動台実験や地震応答解析により確認した。

2. 免震装置の概要

2.1 免震装置の機構

免震装置の設置イメージを図1に示す。免震装置は、個々のパレットを対象とした荷崩れ対策であり、ラックの柱に設けられた腕木に容易に取り付けられる。新設・既設ラックのいずれにも適用でき、パレットで積荷を収納するラックを対象としている。

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で構成され、積荷を出し入れする方向に可動する。可動方向以外については、ラックの柱やラチスが存在しており、これらが積荷の落下を防止する。地震が発生すると、すべり材が傾斜に沿って滑らかに水平移動し、その動きで生じる摩擦抵抗が減衰を發揮する。これにより、パレットの応答加速度を低減し、積荷の荷崩れ・

図1 免震装置の設置イメージ

図2 免震装置の機構

本稿は日本建築学会大会学術講演会⁶⁾において発表した内容を加筆・修正したものである。

¹⁾ (株)奥村組
(〒300-2612 茨城県つくば市大砂387)

²⁾ オイレス工業(株)

³⁾ 芝浦工業大学 教授・博士(工学)

¹⁾ Okumura Corporation

²⁾ Oiles Corporation

³⁾ Prof., Shibaura Institute of Technology, Dr. Eng.

落下を防止する。地震後、パレットを載せた免震装置は、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。

免震装置の復元力特性を図3に示す。また、1質点系モデルの概念を図4に示す。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次式で表される。

$$m(\ddot{x} + \ddot{x}_0)\cos\theta + Q_k + Q_f = 0 \quad (1)$$

ここで、 m :質量

$$Q_k: \text{復元力} \left(= \frac{|x|}{x} m(\ddot{z} + \ddot{z}_0 + g)\sin\theta \right)$$

$$Q_f: \text{摩擦力} \left(= \frac{|x|}{x} \mu m \left\{ (\ddot{z} + \ddot{z}_0 + g)\cos\theta + \frac{|x|}{x} (\ddot{x} + \ddot{x}_0)\sin\theta \right\} \right)$$

$\ddot{x}_0$: 腕木の絶対加速度 (水平方向)

$\ddot{z}_0$: 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

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

$$|m\ddot{x}_0 \cos\theta + Q_k| < |Q_f| \quad (2)$$

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

図3 傾斜軸に沿った免震装置の復元力特性

図4 1質点系モデル

図5 免震装置の周期特性

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場所で不連続となる。そのため、地震応答解析では、便宜的に免震装置の水平変位が $|r\sin\theta|$ (ここで、 r : 支持材の半径) 以下の微小変位区間において、半径 r の円弧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て評価した等価周期 T_e は、次式により表せる。

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

(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、一定の周期を持たない。図5に免震装置の周期特性を示す。

2.2 傾斜角と摩擦係数の検討

積荷の荷崩れや荷すべりは、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、荷崩れや荷すべりを起こさせないために、免震装置の最大応答加速度は 200cm/s^2 以下、かつ汎用的なパレットサイズである平面 $100\text{cm} \times 100\text{cm}$ に免震装置を納めるため、最大応答変位は 25cm 以下とすることを目標性能とした。

実機の免震装置に採用するすべり材の傾斜角と摩擦係数を把握するために、地震応答解析による検討を行った。解析モデルは、積荷とパレット間、パレットと免震装置間ではすべり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、免震装置の高さを抑制しながら目標性能を満足するために、すべり材の傾斜角を $2/100 \sim 5/100$ とし、すべり材の摩擦係数を $0.03 \sim 0.10$ とした。入力地震動は、気象庁および防災科学技術研究所の強震観測により得られた表1に示す3波とした。

すべり材の傾斜角と摩擦係数をパラメータとした地震応答解析の結果を図6に示す。免震装置の最大応答値に着目すると、すべり材の傾斜角と摩擦係数が小さいほど応答加速度は減少し、すべり材の傾斜角と摩擦係数が大きいほど応答変位は減少する。解析の結果、免震装置のすべり材の傾斜角を $5/100$ 以下、摩擦係数を 0.07 以上とすることで、目標とする性能が得られることを確認した。

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 ($M_j 7.3$)	1995/01/17	神戸海洋気象台 (気象庁)	818cm/s^2 (NS)
新潟県中越地震 ($M_j 6.8$)	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 ($M_w 9.0$)	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

3. 静的加力実験による基本特性の把握

免震装置が滑動する際のすべり材と支持材間の摩擦係数を確認するため、水平ストロークを $\pm 10\text{cm}$ とした平面 $40\text{cm} \times 40\text{cm}$ サイズの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 10kg , 20kg , 30kg , 40kg , 50kg の錘を載せて、積載物をパラメータとした静的加力実験を行った。

ここで、免震装置の支持材には 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に優れたバックメタル付き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 $3/100$ とした。静的加力実験の状況を写真 1 に示す。実験では、加力装置を用いて免震装置を $\pm 9.5\text{cm}$ の範囲で水平方向に押し引きし、加力装置のロードセルにより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、静的加力実験に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より求め、面圧はヘルツの弾性接触理論⁵⁾に基づき算定した。実験の結果、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傾向を示しているが、摩擦係数は概ね目標としていた 0.07 程度であることを確認した。

写真 1 静的加力実験の状況

図 7 荷重－変位関係

図 8 すべり材の面圧と摩擦係数の関係

4. 免震装置の性能確認

4.1 実験概要

免震装置の単体性能と地震応答解析の妥当性を確認するために振動台実験を行った。実験に用いた免震装置を図 9 に示す。免震装置のすべり材の傾斜角は $3/100$ 、支持材の半径は 2cm 、水平ストロークは $\pm 20\text{cm}$ である。実験では、ラックの腕木を模した鋼製の治具を振動台に固定し、その上に免震装置のあり・なし（以下、非免震）のパレット（平面 $130\text{cm} \times 120\text{cm}$ サイズ）を並べて設置した。パレットの積荷は、 220kg , 660kg , 1100kg の錘を載せた場合と、書籍を入れたキャビネットを多段に載せた場合（計 550kg 程度）の計 4 ケースとした。振動台実験の状況を写真 2 に示す。入力地震動は、ランダム波 ($0.2 \sim 50\text{Hz}$) および正弦波 (1.0Hz) の加振に加えて、気象庁、および防災科学技術研究所の強震観測に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 年インペリアルバレー地震、1968 年十勝沖地震の観測波を用いた。免震装置の可動する間口方向（X 軸）の 1 方向を基本とし、直交方向（Y 軸）や鉛直方向（Z 軸）を加えた実験も行った。加振レベルは、最大加速度を 100cm/s^2 から段階的に大きくし、原波（白河波 1295cm/s^2 ）、もしくは原波を再現できない地震波は振動台で加振できる最大レベル（神戸波 500cm/s^2 、エルセントロ波 550cm/s^2 、八戸波 330cm/s^2 ）を上限とした。

図 9 免震装置

(a) パレットに錘を載せた実験

(b) パレットにキャビネットを載せた実験

写真 2 振動台実験状況（加振終了時）

4.2 振動台実験結果

免震装置の可動方向（X 方向）に着目した最大入力加速度とパレットの最大応答加速度の関係を図 10 に示す。積荷の質量を 660kg とし、一軸（X）・二軸（XZ, XY）・三軸（XYZ）に加振した場合を図 10(a) に、X 方向の一軸加振において積荷の質量を 220kg, 660kg, 1100kg とした場合を図 10(b) に示す。非免震パレットは、応答加速度が 300 cm/s^2 程度になるとパレットと腕木間で滑動が生じ、応答加速度は 400 cm/s^2 程度で頭打ちとなる。これより、パレットと腕木間の摩擦係数は 0.3~0.4 と推察される。一方、免震装置上のパレットの応答加速度は 200 cm/s^2 程度で頭打ちとなり、非免震と比べて約 1/2 に低減されている。また、二軸・三軸に加振した場合も可動方向の応答低減効果は安定している。その際、可動方向以外の応答加速度は入力加速度に対して僅かに大きくなった。図 10(b) より、錘の質量が 220kg の応答加速度は、他の質量に比べて僅かに大きい。これは、すべり材の面圧依存性に起因する摩擦係数の増加が影響している。

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残留変位の関係

図 12 免震と非免震のパレット応答変位 (白河波, X 方向加振, 1295 cm/s^2 , m=660kg)

しかし、質量の変化が応答加速度に及ぼす影響は小さく、免震装置がラックの間口方向の荷崩れ・落下防止に有効であることを確認した。最大入力加速度とパレット残留変位の関係を図 11 に、免震パレットと非免震パレットの応答変位の比較を図 12 に示す。非免震パレットの残留変位 (δ_r) は、入力加速度が 400 cm/s^2 以上になると徐々に大きくなる。一方、免震装置上のパレットは、免震装置と一体で滑動し、加振後には元の位置に戻り、残留変位は概ねゼロとなった。

4.3 実験と地震応答解析の比較

免震パレットの実験 (m=660kg) と地震応答解析の比較を図 13 に示す。解析に用いた数値積分法は、線形加速度法とした。解析では、免震装置のすべり材の傾斜角を 3/100 とし、摩擦係数は免震装置の可動方向と直交方向の振動等による摩擦の影響を考慮して 0.074 とした。実験と地震応答解析を比較して、正弦波 (1.0Hz, X 方向, 最大入力加速度 400 cm/s^2) の結果を図 12 (a)~(b) に、白河波 (X 方向, XYZ 方向, X 方向の最大入力加速度 650 cm/s^2) の結果を図 12 (c)~(e) に示す。地震応答解析は、入力地震動によらず一軸加振や三軸加振において振動台実験の結果を良く再現している。今回の解析手法は、簡易な摩擦系剛体モデルであるため、実験に見られる免震装置の部分振動等による高次振動やすべり材の微細な不陸による影響までは評価できないが、加速度の主応答や変位応答を概ね再現しており、免震装置の評価手法として妥当であることを確認した。

図 13 振動台実験とシミュレーションの比較 (m=660kg)

5. ラックに設置された免震装置の性能確認

5.1 実験概要

ラックに設置された免震装置の作動性と応答低減効果を確認するために振動台実験を行った。実験状況を写真3に示す。実験では、3.で述べた免震装置を用いた。また、ラックに設置した免震装置の位置と計測点を図14に、部材リストを表2に示す。実験に用いたラックは、一般的なラックに使用されている材料を用いて製作されており、高さ10段、奥行き方向4連のラックが荷物の搬入スペースを挟んで一対の構造となっている。免震装置はラック10段目の1箇所を設置し、積荷として100 kgの錘を載せた。また、免震装置を設置していない他の収納棚は空荷とした。計測項目は、振動台と免震装置に載せた錘ならびにラック10段目のフレーム（ラックの腕木）の応答加速度、および免震装置の応答変位とした。

5.2 加振ケース

入力地震動は、4.で述べた観測波から3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、1940年インペリアルバレー地震）を採用した。加振方向は、免震装置の可動方向を基本とし、一軸加振（X）および二軸加振（XZ）とした。地震波の入力レベルは、加速度を 100cm/s^2 から段階的に大きくし、ラックのフレームが弾性範囲に収まるレベルを上限とした。

5.3 免震装置とフレームの応答

ラック10段目のフレームと免震装置に載せた錘の最大応答加速度の比較を図15に示す。また、免震装置とフレームの時刻歴応答波形を図16に示す。フレームの応答加速度は、振動台の入力加速度に対して2倍程度に増幅している。それに対し、免震装置に載せた錘の最大応答加速度は、4.2で述べた単体性能と比べると、免震装置を設置するフレームの応答等の影響により増加しているが、ラック10段目のフレームの最大応答加速度に対して最大で1/5程度に低減している。また、加振終了後に、免震装置は元の位置に復帰している。以上により、ラックに設置された免震装置は、残留変位もなくスムーズに滑動し、積荷の応答加速度を低減できることを確認した。

振動台加振軸[X・Y・Z]

写真3 実験状況

表2 部材リスト

部材	サイズ (mm)	材質
柱	□-50×50×2.3	STKR400
腕木	L-30×30×3	SS400
トップビーム	C-75×45×15×2.3	SSC400
ラチス	φ-27.2×2.3	STKR400
軸ブレース	M10	SS400

図14 免震装置の位置と計測点

図15 免震装置とフレームの最大応答加速度

(a) ラック10段目に設置した免震装置の応答加速度

(b) ラック10段目に設置した免震装置の応答変位

(c) ラック10段目のフレームの応答加速度

(d) 振動台入力加速度

図16 免震装置に載せた錘とフレームの時刻歴応答波形（白河波、X方向、NS成分、 650cm/s^2 加振）

5.4 免震装置を設置したラックの地震応答解析

実験のラックを対象として、免震装置の配置をパラメータとした地震応答解析を行った。解析モデルを図 17 に、諸元を表 3 に示す。すべての収納棚に、40cm 四方のパレットの積載物 (100 kg) がある状態を対象とした。柱脚を固定したラックの立体モデルの頂部に強制変位を与えて水平剛性を求めた後、ラック自身と積載物の質量を足し合わせて腕木の位置に集中させた等価せん断ばねモデルを作成した。免震装置のある棚は、免震装置の上にパレットを載せた状態とし、すべり材の傾斜角を 3/100、摩擦係数を 0.074 とした。免震装置のない棚は、パレットと腕木の接触面での摩擦係数を 0.4 とし、パレットと腕木の相対変位がパレットサイズの 50%(20cm)に達した時点で、パレットは落下して解析モデル上の質量がなくなるものとした。入力地震動は、実験に用いた観測波 (一軸) とした。

一例として、パレットの応答が最大となる神戸波 (NS, 700cm/s²) を入力した解析結果について、最大応答変位と残留変位の分布を図 18 に示す。免震装置のない棚は、CASE1 において 9~10 段目のパレットが落下した。免震装置のある棚は、CASE4 において最大応答変位が 20cm を超える場合があった。また、免震装置のある棚のパレットの残留変位は概ねゼロとなった。免震装置の適用にあたっては、最大応答変位に対応する免震装置のストロークが必要となる。

図 17 解析モデル

表 3 解析モデルの諸元 (ラック片側あたり)

質点	高さ [cm]	質量 [kg]	等価剛性 [kN/cm]
11	624.0	47.0	23.8
10	544.0	435.1	31.8
9	482.5	430.3	39.5
8	431.0	428.3	41.6
7	379.5	428.3	44.5
6	328.0	443.2	40.8
5	266.0	428.2	57.0
4	214.5	428.3	68.2
3	163.0	428.3	87.3
2	111.5	428.3	127.6
1	60.0	447.0	247.7

図 18 免震装置の配置とパレット応答変位の関係 (神戸波, NS 成分, 700cm/s²)

6. まとめ

立体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、静的加力実験と振動台実験を行い、以下の知見を得た。

- (1) 免震装置の上に設置したパレットは、荷物の質量が小さいとすべり材の面圧依存性の影響を受けて、最大応答加速度が若干大きくなるが概ね 200 cm/s² 程度であり、地震対策をしていないパレットの最大応答加速度に比べて約 1/2 に低減することで、ラックの間口方向に対する荷崩れ・落下を防止した。
- (2) すべり材の傾斜角を 3/100 とした場合、傾斜による復元力によって、加振終了後に生じる免震装置の残留変位は概ねゼロとなり、元の位置に復帰する。
- (3) 汎用的なパレットを対象として、水平ストロークを ±20cm、すべり材の傾斜角を 3/100 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。
- (4) 地震応答解析の結果は、入力地震動の違いや入力レベル、一軸加振や三軸加振によらず、振動台実験の結果と概ね対応しており、解析により免震装置の加速度応答や変位応答を評価できる。
- (5) 免震装置の適用にあたっては、多様となる積荷の条件に加えて、ラックに設置した状態での応答を考慮する必要がある。

7. あとがき

2017 年 3 月に、茨城県つくば市に建設された立体自動倉庫において、パレット用の免震装置を初めて適用した。自動倉庫ラック全景と免震装置の設置状況を写真 4 に示す。今後、地震応答観測データを収集し、免震装置の適用効果を検証する。

写真 4 立体自動倉庫への適用事例

謝辞

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させていただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

1) 木原幸紀, 劉銘崇, 寺田岳彦, 猿田正明, 金子美香:「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, 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, 第 721 号, pp. 629-637, 2016.3

3) 舟木秀尊, 小山慶樹, 舟山勇司:「自動倉庫ラックの制振構造に関する研究(その 1, 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, 高木政美, 北村春幸, 佐藤大樹, 佐藤利昭:「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

6) 舟木秀尊, 小山慶樹, 舟山勇司, 澤田毅:「自動倉庫ラックのパレット免震装置に関する研究(その 1, 2)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp. 841-844, 2017.8

[2017 年 6 月 6 日原稿受理 2017 年 7 月 18 日採用決定]