

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

APPLICATION OF SEISMIC ISOLATION BEARINGS
FOR RACK WAREHOUSE TO PREVENT GOODS FALLING竹内 徹^{*1}, 吉田道保^{*2}, 内田正颯^{*3}, 西 雄士^{*4}, 松井良太^{*5}

Toru TAKEUCHI, Michiyasu YOSHIDA, Masakaze UCHIDA,

Osamu NISHI and Ryota MATSUI

The seismic response of rack warehouses is known to be reduced by horizontal sliding of the warehouse contents, which act as mass dampers. However, in past earthquakes business continuity has been interrupted due to damage from spilling, toppling or falling contents. In this paper, response control using seismic isolation is investigated. Because the total rack weight is constantly changing and the rack is often loaded at large eccentricities, Spherical Sliding Bearings (SSB) are proposed, which exhibit natural periods independent of the supported weight. Based on numerical and experimental test results undertaken previously, an analytical model is proposed including pressure and velocity dependent friction values. Using the proposed model, the performance of a seismically isolated rack warehouse with variable weight and eccentricity is studied and compared with conventional rubber bearings.

Keywords: Rack warehouse, Seismic Isolation, Spherical Sliding Bearing, Variable Weight, Eccentricity

立体倉庫, 免震構造, 球面すべり支承, 重量変化, 偏心

1. 序

建屋一体型立体倉庫は図1に示すような高層のトラス架構に屋根壁が設置された構造物であり, 崩壊メカニズムが弦材の座屈で決定されるため必ずしも靱性の高い構造物ではない。しかしながら積載物の質量が大きく架構に固定されていないために, 積載物が地震動により滑動すると架構の層せん断力が頭打ちとなり¹⁻⁵⁾, 過去の地震での倒壊被害例は殆ど見られない。その一方で, 積載物が落下することによる地震後の立体倉庫機能の停止が課題となってきた。写真1に2011年東日本大震災による積載物落下被害例を示す。このような落下を防止するためには, 架構の応答低減のみならず, 積載物の支持床からの相対応答変位を低減させることが求められる。

立体倉庫に関する既往の研究として, 小川¹⁾, 高梨²⁾らは積載物の滑動を考慮した運動方程式の提案および振動台実験結果との対応関係を検証している。朱³⁾らは積載物の滑動を滑りせん断ばねに置き換えたモデルを提案し, 松野⁴⁾らは積載物の滑動を考慮した多層構造物の研究を行い, 応答低減率の評価方法を提案している。

一方, 立体倉庫の応答を付加減衰機構や免震支承により低減し, 積載物の落下を防止する試みも数多くなされている。例えば木原⁵⁾ら, 高木⁶⁾らは自動倉庫にTMDを用いる研究を行っている。ただし積載物の滑動は考慮されていない。これに対し松野⁷⁾は積載物の滑動を考慮したTMDおよび粘弾性ダンパーの応答制御効果および

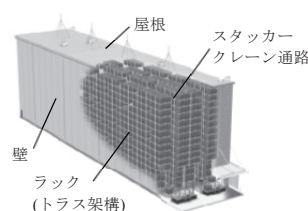


図1 建屋一体型立体倉庫の構成 写真1 積載物落下被害例

積載物落下に対する低減効果を解析的に検証し, 滑動が生じた場合のTMDの応答低減効果にはばらつきが大きいことを示している。免震支承の導入に関しては青野⁸⁾らの研究が見られる。ただし, 積層ゴム支承と付加減衰装置の組合せによる一般的な免震支承においては, 積載物の変動により固有周期の変化や偏心が過大となり, 応答低減効果の減少や振れ振動の卓越が懸念される。これに対し米国においては1990年代初頭より固有周期が建物重量の変化に依存しない球面すべり支承(SSB/ Spherical Sliding BearingまたはFPB/ Friction Pendulum Bearing)が実用化され多くの免震構造に適用されている^{9),10)}。

そこで本研究は一般的な自立型立体倉庫建屋を対象に, SSBを含む各種の免震支承を導入した場合の応答低減効果について検証する。SSBの解析モデルは振動台実験に基づき面圧および速度依存性^{11),12)}を考慮して設定し, 積載物が変動または偏心した場合の立体倉庫架構の応答性状および積載物の落下防止効果について分析を行う。

*1 東京工業大学建築学専攻 教授・博士(工学)

*2 東京工業大学建築学専攻 大学院生(当時)・修士(工学)

*3 東京工業大学建築学専攻 大学院生

*4 (株)ダイフク 修士(工学)

*5 東京工業大学建築学専攻 助教・博士(工学)

Prof. Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

Former Grad. Stud., Tokyo Institute of Technology, M.Eng.

Grad. Stud., Tokyo Institute of Technology

Manager, Daifuku Co., Ltd., M.Eng.

Assist. Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

2. 検討対象モデルの設定

2.1. 上部架構の設定

検討対象とする立体倉庫は図2に示すようにパレット数4096、塔状比1.3の標準的な形状とし、(a)に示すように梁間方向に複層のトラスを有し、桁行方向は(d)、(e)に示すように通路側構面とブレース側構面から構成されブレース側構面には(b)に示す引張ブレースが配置されている。RB～RD通りはRA、RE列同様のトラスラックが背面合わせで構成されている。RA～RE列トラス群は最上層にて繋ぎ梁で連結されている。1次モードの固有周期は梁間方向で0.239s、桁行方向で0.032sである。数値解析上の負荷を低減するため、これを図3に示すような剛性を有する縮約モデルに置換する。梁間方向のトラス柱の梁要素への縮約には式(1)、(2)を用いる¹³⁾。各記号の意味は図4中に示す。

$$\text{等価曲げ剛性: } K_{eq} = d^2 EA_f / 2 \quad (1)$$

$$\text{等価軸剛性: } D_{eq} = 2EA_f + \cos^3 \varphi EA_w / \left(1 + \frac{A_w}{A_n} \sin^3 \varphi - \frac{A_w}{6A_f} \cos^3 \varphi \right) \quad (2)$$

RB～RD列の2列分のトラス置換において、等価伸び剛性は1列毎の伸び剛性の和とし、等価曲げ剛性の算出におけるトラスせいは、2列分のトラスせいをを用いて算出する。式(1)、(2)ではせん断変形が考慮されていないため、断面2次モーメントをRA、RE列に関し0.9倍、RB～RD列に関し0.8倍低減することで剛性・周期を図2の詳細モデルに合わせる。また梁間方向に各ラックを繋ぎ梁で連結した際の剛性に関し、置換モデル繋ぎ梁端部に束材長の剛域を設ける。桁行方向の置換に関しては、隣接する構面の剛性を足し合わせることで置換を行う。桁行方向のブレースは原寸サイズと等価な断面性能を有する断面に置換する。表1に想定モデルと縮約モデルの1次固有周期を比較して示すが、両者はほぼ一致しており、適切な置換が行われている。基礎は700mm厚のRCマットスラブとする。

2.2. 積載パターンの設定

立体倉庫の積載実績として、平均荷重6.85kN/pのパレット4160個が一様に充足されている状態の95%を倉庫の満載状態とし、積載物はラックに固定されているものと仮定する。表2にラック各構面に対する満載状態における積載荷重を示す。数値解析においては節点荷重として積載荷重を与える。この満載状態に加え、偏荷重による構造体のねじりおよび柱脚部の軸力変動を考慮するにあたり、図5に示すように桁行方向R3～R19構面にのみ積載されている1/2偏載状態を考える。なお、高さ方向への偏荷重は考慮しないものとする。満載状態における1次固有周期は梁間方向0.67s、桁行方向0.26sとなり、1次振動モードが卓越する。1/2偏載状態における梁間方向の1次固有周期は0.56sで積載範囲が大きく振れる振動モードとなる。

2.3. 免震層の設計

縮約モデルに対する各種免震装置はRCマットスラブ下に設置する。設置箇所を図6に示す。免震層には積層ゴム支承、弾性滑り支承と弾塑性ダンパー(EP)もしくはオイルダンパー(V)、または球面すべり支承(SSB)の3種類を想定する。以下、各種装置の設計手法を述べる。弾性要素による目標固有周期を満載状態において4.0sとし、レベル2地震動入力に対する免震層の最大変形量300mmを目標とする。EP、Vに対しRA、RE通りに規準面圧10N/mm²タイプ、ゴム径600mmの積層ゴム支承を18台、RC通りに摩擦係数 $\mu=0.01$ の

弾性滑り支承を9台設置する。

EPはせん断力係数 $\alpha_d=0.047$ と設定し、降伏変位 $u_y=7.3\text{mm}$ 、降伏荷重 $Q_y=220\text{kN}$ のダンパーを10台設置する。最大変形量を300mmと仮定すると、弾塑性ダンパーを用いた際の等価減衰は式(3)より約29.3%となる。

$$h_{eq} = 0.8 \times 2(u_m - u_y)Q_d / \pi K_f u_m^2 \quad (3)$$

ただし、 u_m : 限界変形量、 Q_d : 降伏荷重、 K_f : 2次剛性である。

Vは式(3)と同等の等価減衰定数を目標として設計を行い、減衰係数 $C_d=0.45\text{kNs/mm}$ の線形履歴を有するオイルダンパーを梁間、桁行10台ずつ設置する。この時の等価減衰定数は29.3%となる。

SSBは球面半径2500mm、スライダ径200mm、基準摩擦係数

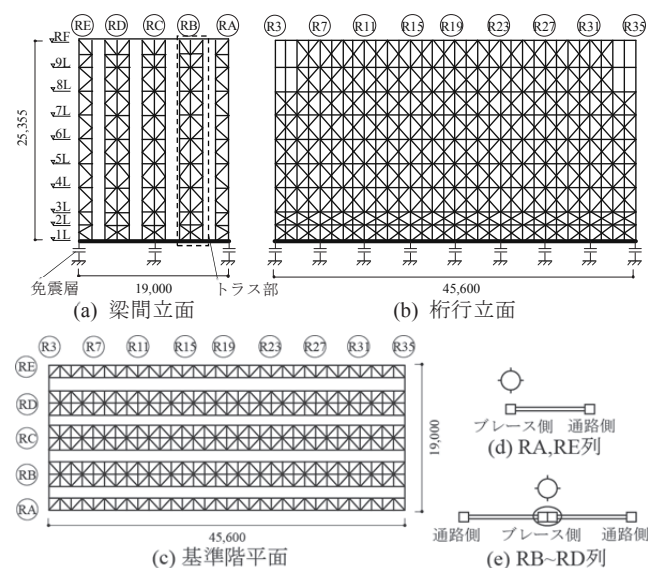


図2 検討対象とする立体倉庫

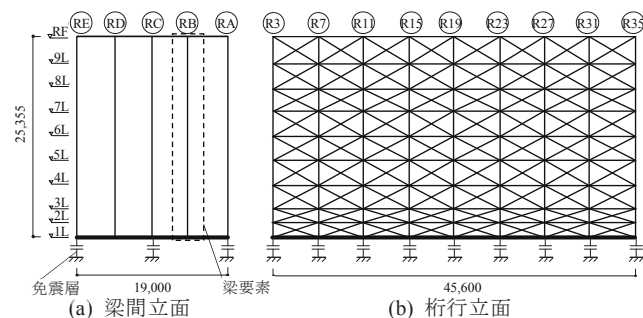


図3 縮約モデル

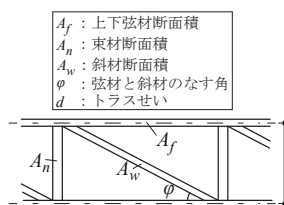


図4 トラス各種諸元

表1 1次固有周期比較

*基礎固定、積載物なし

| | 梁間方向(s) | 桁行方向(s) |
|-------|---------|---------|
| 想定モデル | 0.239 | 0.032 |
| 縮約モデル | 0.238 | 0.036 |

表2 積載荷重(満載状態)

| | RA,RE | RB,RC,RD |
|-------|--------|----------|
| Floor | R3,R35 | R7-R31 |
| 9 | 25.77 | 51.65 |
| 8 | 25.77 | 51.65 |
| 7 | 25.77 | 51.65 |
| 6 | 25.77 | 51.65 |
| 5 | 25.77 | 51.65 |
| 4 | 25.77 | 51.65 |
| 3 | 25.77 | 51.65 |
| 2 | 25.77 | 51.65 |
| 1 | 25.77 | 51.65 |

単位:kN

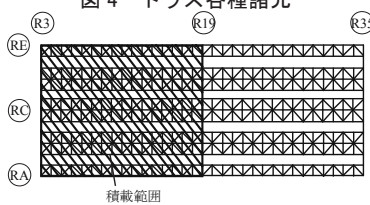


図5 積載物積載範囲

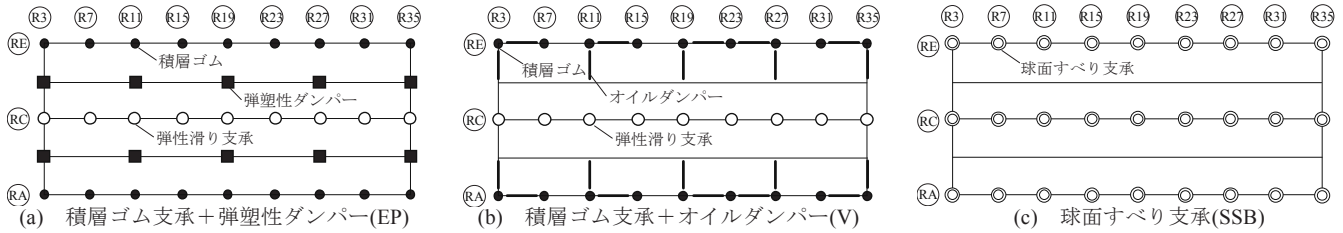


図 6 免震装置挿入箇所

$\mu_0=0.047$ を想定し、27 基設置する。数値解析において、積層ゴム支承および EP は 8 方向 MSS モデル¹⁴⁾、V は 8 方向ダッシュポットモデル、弾性滑り支承および SSB は次章で述べる摩擦振子モデルを用いる。また免震層上 RC マットスラブは剛床とみなし、上部架構は弾性、構造減衰は $h_1=h_2=0.02$ の Rayleigh 減衰とする。

3. 球面すべり支承の数値解析モデルの提案

3.1. 球面すべり支承の力学特性

SSB は図 7 に示す独立したスライダが上下のコンクリート球面間に挟まって配置されたダブル形式¹⁰⁾を想定する。図 8 に SSB の力学モデルを示す。質点の力の釣合は式(4)となり、 $f_t=\mu f_n$ 、 $l \gg x$ から、水平反力 Q は式(5)で評価できる。ただし μ : 摩擦係数である。

$$\begin{pmatrix} Q \\ W \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} f_t \\ f_n \end{pmatrix} = \frac{1}{l} \begin{bmatrix} \sqrt{l^2 - x^2} & x \\ -x & \sqrt{l^2 - x^2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} f_t \\ f_n \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$Q = \mu W \operatorname{sgn}(\dot{x}) + Wx/l \quad (5)$$

式(5)右辺第 1 項は摩擦力による減衰力、第 2 項は振り子運動による復元力を表現している。また固有周期は、振り子の原理より式(6)で表わされる。ダブル形式の場合、 $l=2 \times (\text{曲率半径})$ をとる。

$$T = 2\pi\sqrt{l/g} \quad (6)$$

3.2. 球面すべり支承の数値解析モデル

SSB の数値解析においては鉛直応答も評価するため、水平バネ置換による MSS モデルではなく、図 9 に示すように構造体を定点より吊ることにより振り子運動を、滑り面に対して摩擦要素を挿入することで摩擦力を再現した摩擦振子モデル(FP モデル)を構築する。図 9 の振り子要素に対し、吊材長 5000mm とした系にパルス入力を与えて自由振動させた際の応答を図 10 に示す。固有周期は 4.6s であり、定点より構造体を吊ることにより振り子運動が再現できている。摩擦要素は従来、弾塑性型履歴の MSS モデルで表現されることが多い¹⁵⁾が、菊地ら¹⁶⁾が指摘するように摩擦要素は滑動が生じると全方向の水平剛性が喪失する。そこで文献 16)を参照し、滑り中心点と移動点を設定し、移動点が滑り中心点から半径 α の円(更新円)内に存在する場合は停止状態、円周上または円外に存在する場合は滑動状態であるとして 2 方向応答をモデル化する。半径 α は摩擦要素に接続する吊材の軸力 N 、摩擦要素の周辺取りつき部材のせん断剛性 K_G 、摩擦係数 μ および吊材振れ角 θ より式(7)にて算出する。

$$\alpha = \mu N \cos \theta / K_G \quad (7)$$

滑り中心点の移動則および摩擦要素水平剛性は図 11 および次に記す通りとする。

- 1)停止時は中心点の更新は行わない。
- 2)滑動時は、次ステップの中心点は現中心点と次移動点の線分上に、次移動点から α の距離に更新する。

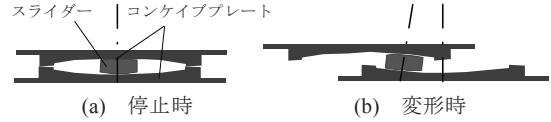


図 7 SSB 概念図

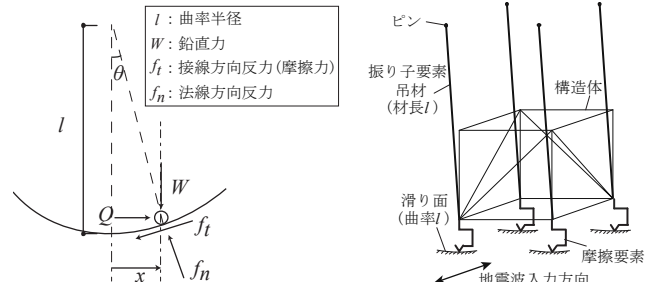


図 8 SSB の力学モデル

図 9 摩擦振子 (FP) モデル

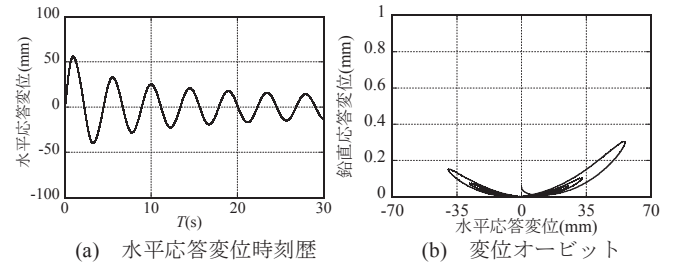


図 10 自由振動解析結果 (振り子要素)

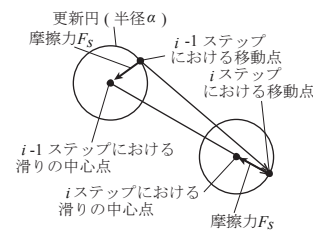


図 11 滑り中心点の移動則¹⁶⁾

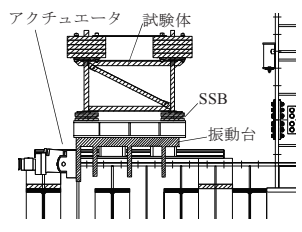


図 12 セットアップ図

3)摩擦要素の水平剛性に関して、滑動時は全方向に $K_G \times 10^{-3}$ 、停止時は K_G とし、曲げモーメントは伝達しないものとする。

摩擦力の働く方向は更新円の中心方向とし、摩擦力 F_s は以下のように算出する。ただし D : 移動点と中心点間の距離である。

$$\text{停止時: } F_s = K_G \cdot D (\leq \mu N \cos \theta) \quad (8)$$

$$\text{滑り時: } F_s = \mu N \cos \theta \quad (9)$$

摩擦係数には面圧および速度依存性が存在することが知られており¹⁷⁾、本 SSB 機構では文献 12), 18)より式(10)に示す実験式が提案されている。式(10)右辺第 2 因子は面圧依存、第 3 因子は速度依存、第 4 因子は温度依存性も含めた低面圧時における補正係数を表わす。

$$\mu_{(\sigma, v)} = \mu_0 \times (1.746\sigma^{-0.141} + 0.02) \times (1 - 0.55e^{-0.019v}) \times e^{(20+v^{0.4})/\sigma^2} \quad (10)$$

ただし σ : 摩擦要素に作用する面圧、 v : 摩擦要素上部の相対速度、 μ_0 : 面圧 60N/mm²、速度 400mm/s 時における基準摩擦係数である。

解析に際しては、ステップ毎に面圧と速度を評価し、式(10)に基づき摩擦係数を変化させる。

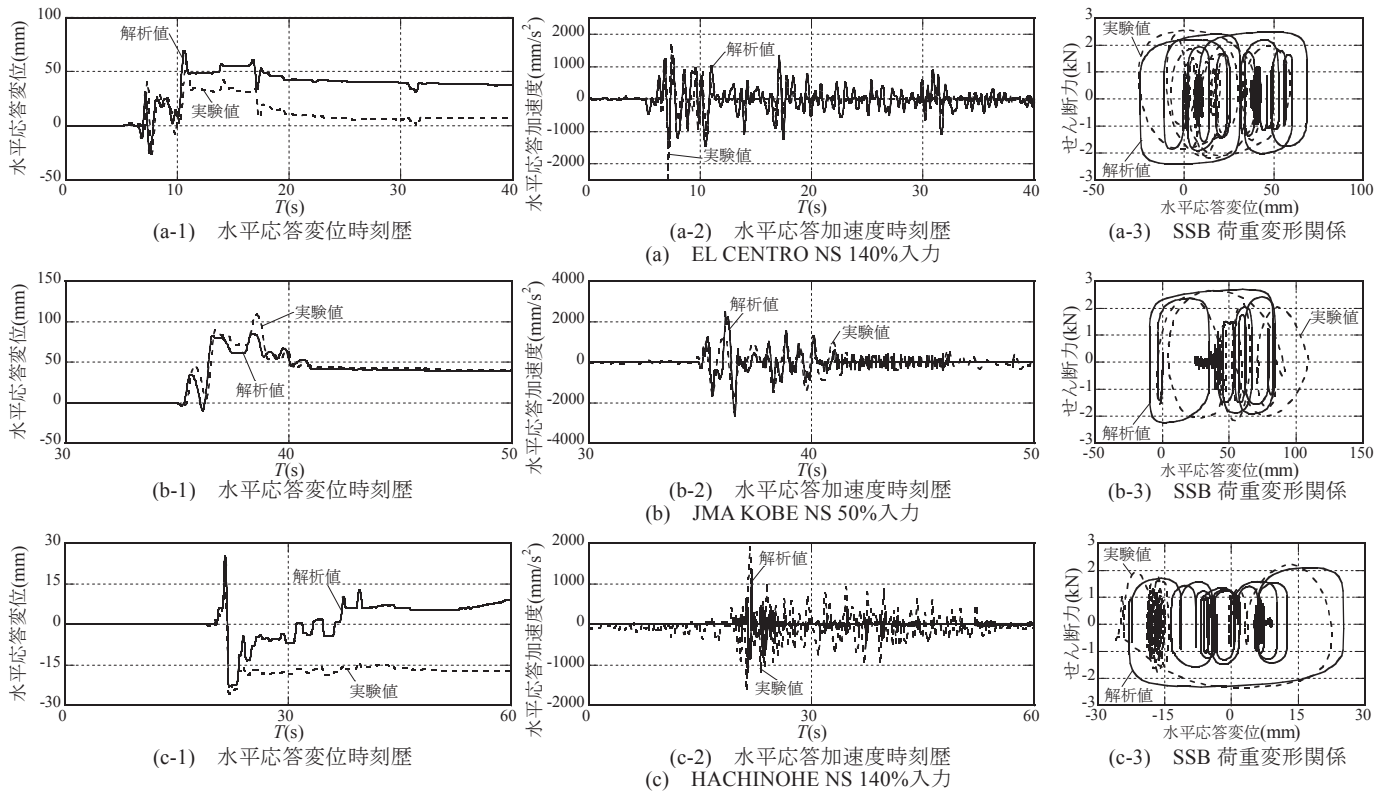


図 13 FP モデルによる実験結果の再現性

3.3. 提案モデルによる縮小架構実験結果の再現性

数値解析モデルの妥当性を確認するために縮小架構を用いた実験と比較する¹²⁾。図 12 にセットアップ図を示す。用いた SSB は縮尺率 1/3 相当であり、球面半径 2500mm、スライダー径 30mm、基準摩擦係数 0.047 である。図 13 に実験と同様の観測波を入力した際の提案モデルによる数値解析結果を実験値と比較して示す。(a), (c) の地震波において最大応答変位後の差異が見られるが、最大値に至るまでの応答変位、応答加速度、せん断力は概ね捉えられており、前節で構築した FP モデルにより SSB の最大応答特性は再現可能と判断する。数値解析は図 9 の摩擦振り子モデル(FP モデル)を用い、鉛直重力加速度および幾何非線形性を考慮して Newmark- β 法を用いた直接積分法による時刻歴応答解析を行う。各時刻歴ステップにおいては内部応力に対する収斂計算を行う。

4. 免震立体倉庫の動的挙動

4.1. 種々の積載状態での各免震支承による応答低減効果

入力地震波には BCJ-L2 波および最大速度を 500mm/s に規準化した観測地震波 3 波を用いる。図 14(a)~(e)に各地震波の等価減衰 29.3% 時の変位応答スペクトルを示す。図 15 に梁間方向に BCJ-L2 波を入力した際の各種応答を示す。なお積載物は立体倉庫に固定されているものとする。(a),(b)の SSB に関しては速度、面圧依存を考慮した場合と、依存性を考慮せず摩擦係数 $\mu=0.047$ で一定とした場合も比較している。図 15 を見ると非免震と比較し EP, V, SSB とともに免震化により最大応答加速度、最大層間変形角、最大層せん断力において 6 割程度の応答低減が得られていることがわかる。最大応答変位量においては各種依存性考慮時の SSB が EP, V モデルおよび依存性非考慮時の SSB と比較して小さくなっている。これは摩擦係数

が面圧や速度変化の影響を受けて $\mu=0.025\sim0.06$ に増減し、基準摩擦係数以上の等価減衰が働いているためと考えられる。各種依存性考慮時の SSB における最大鉛直変位量は 6mm であった。同図(e)に依存性考慮の SSB モデルにおける、RA-R3 点の支承部鉛直反力時刻歴を示す。図より免震支承に浮き上がりは生じないことがわかる。EP, V においても同様に積層ゴムに引抜きは生じないことが確認された。観測 3 波においても応答低減および鉛直反力に関して同様の傾向が見られた。SSB においては面圧、速度依存性非考慮時は考慮時と比較して応答を 1 割程度大きく評価する傾向が見られる。

次に 1/2 偏載状態に関して考察を行う。1/2 偏載状態においては地震動により積載範囲が大きく振れることが予測される。そこで図 16 に示すように i 層 R3-R35 間の梁間方向応答量の差 δ_i を用いてねじり変形角 ψ_i を式(11)により定義する。

$$\psi_i = \delta_i / L \quad (11)$$

図 17 に BCJ-L2 波入力時の 1/2 偏載状態における応答を示す。SSB は面圧、速度依存性を考慮する。図 17(a)の応答加速度は各層の最大値(R3 側)を示す。満載状態と比較し偏載することで非免震時の最大応答加速度は満載時の 1.5 倍程度に上昇する。一方、各免震モデルは偏載時の最大応答加速度の増加が小さく、最大応答変位も図には示していないが満載時と同等となる。同図(b)に最大ねじり変形角を示す。非免震時は上部架構がねじれる挙動をする一方で、免震化によりねじれ応答は抑制される。EP, V においては積載構面が無積載構面と比較して大きく振動する一方で、SSB においては偏載による構面変位の差がなく上部架構は並進するように振動する傾向が見られる。同図(c)に SSB における構造体隅部 2 点における支承部鉛直反力時刻歴を示す。無積載構面の RA-R35 点においても免震支承に浮き上がりは生じないことがわかる。EP, V においても同様であった。

4. 2 方向入力下における FP モデルと MSS モデルの相違

3.2 節の FP モデル構築過程より、FP モデルと MSS モデルを比較すると、特に 2 方向入力下においては応答の相違が現れると考えられる。そこで観測地震波 3 波を用いて、面圧、速度依存性および 2 方向性を考慮して $\mu_0=0.047$ とした FP モデルと、降伏荷重を支承部反力の 4.7% とした MSS モデルの相違を検討する。観測 3 波は、NS 波を桁行方向、EW 波を梁間方向に各方向の速度のベクトル和の最大値が 500mm/s となるよう規準化する。EL CENTRO 波入力時の満載状態における免震層の荷重変形関係を図 18(a), (b) に、変位オービットを(c)に示す。このケースにおいては梁間方向に MSS モデルがやや小さく変位している。図 19 に満載、偏載を合わせた上部架構各層の最大応答加速度、最大応答変位およびねじり角の FP モデルと MSS モデルの比較を示す。今回の検討モデルにおいては応答変位に関し最大±40%程度、応答加速度においては±50%程度のばらつきが見られた。

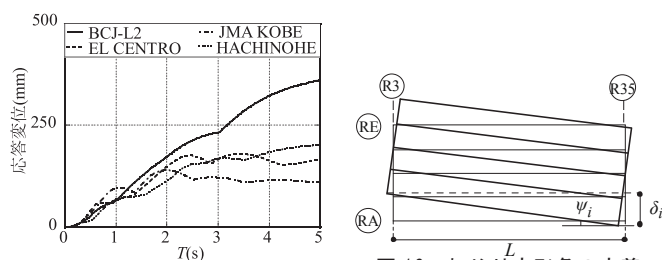


図 14 入力地震動の
変位応答スペクトル ($\zeta=29.3\%$)

図 16 ねじり変形角の定義

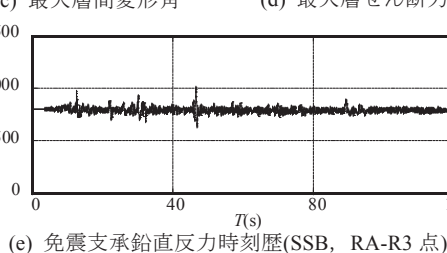
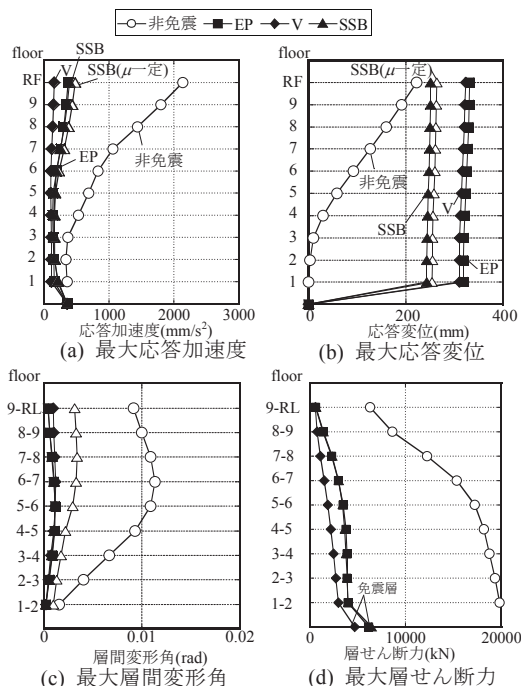


図 15 満載状態における応答 (BCJ-L2 波)

5. 積載物の時刻歴応答解析

最後に積載物の滑動および落下防止に対する免震化の効果を評価する。積載物の滑動を考慮した時刻歴応答解析プログラムを文献 4) に倣い用いる。積載物の運動方程式は以下のようになる。

$$m(\ddot{u} + \ddot{x}) + F = -m\ddot{x}_g \quad (12)$$

$$\text{ただし、停止時: } F = -m(\ddot{x} + \ddot{x}_g)$$

$$\text{滑動時: } F = \text{sgn}(\dot{u})m\mu_d g$$

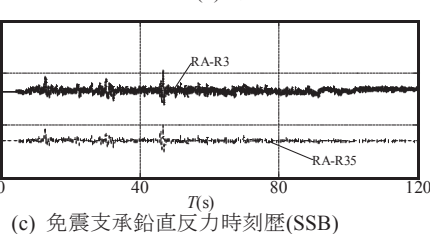
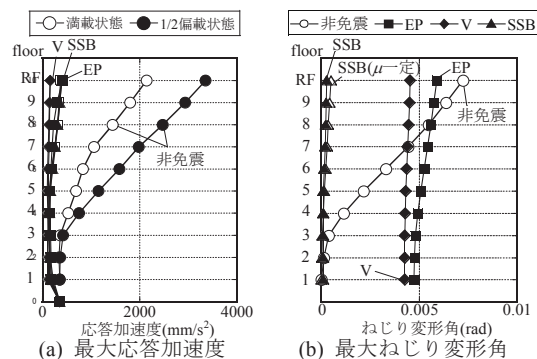


図 17 1/2 偏載状態における応答

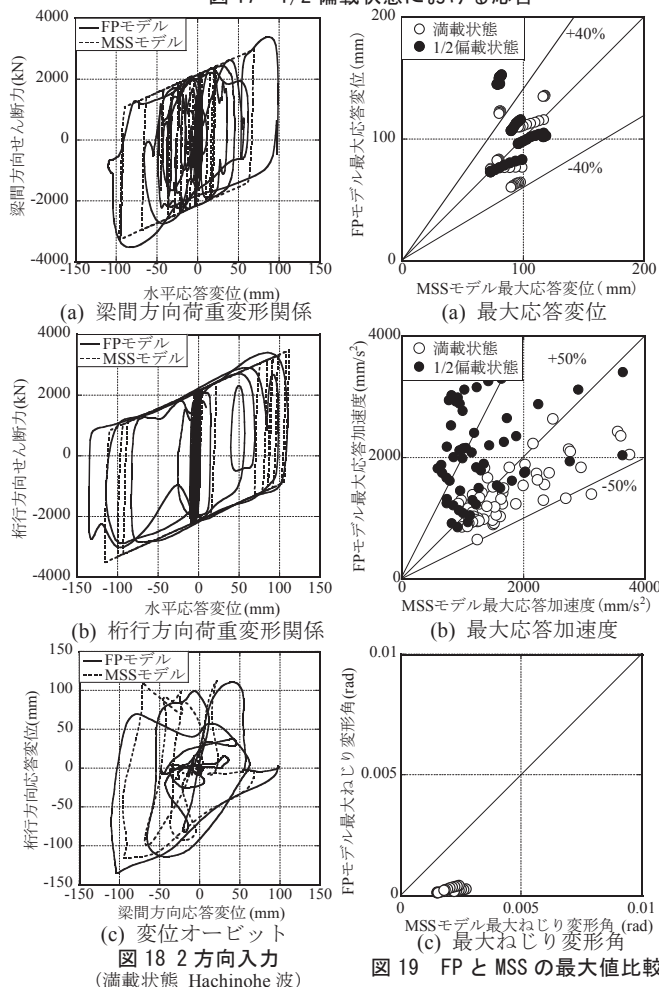


図 19 FP と MSS の最大値比較

また滑動の条件は以下のようになる。

停止→滑動： $|\ddot{x} + \ddot{x}_g| > \mu_s g$

滑動→停止： $u(t+\Delta t)/u(t) \leq 0$ and $|\ddot{x} + \ddot{x}_g| \leq \mu_s g$

ただし、 μ_s ：静止摩擦係数、 μ_d ：動摩擦係数、 \ddot{u} ：積載物の支持床に対する相対加速度、 \ddot{x} ：支持床の地面に対する相対加速度、 \ddot{x}_g ：地動加速度である。積載物が後述する落下条件を満たした場合には、解析モデルより積載物の重量を除去する。

以下、文献4)による積載物の滑動落下の影響を考慮した解析をフィードバック解析、積載物を固定した各層加速度を各支持床に直接与えて積載物の滑動、落下を評価するモデルをフロアレソポンス解析と呼ぶ。フィードバック解析モデルを図20に示す。解析モデルは平面フレームに積載物を固定した状態でAi分布荷重による静的弾性解析を行い、各層の剛性を算出し縮約する。支持床と積載物間の静止および動摩擦係数共に $\mu=0.23$ とする。積載物は段ボールが数段積み重ねられている状態を想定して縦1200mm×横1300mm×高さ1400mmの立方体が一体となって応答すると仮定する。積載物の落下判定は図21に示す回転型⁴⁾とし、パレット端よりせり出した積載物にかかる慣性力のモーメントが、自重によるモーメントを超えたときに回転運動を始め、回転中に重心が支持床の端部を超えたら落下するものとする。落下条件を式(13)により表わす。

$$\theta + \varphi > \pi/2$$

(13)

図22に非免震状態でのBCJ-L2波入力時における各層の積載物最大応答変位量の比較を示す。フィードバック解析に対しフロアレソポンス解析の応答は上層部において1.3倍程度までの過大評価を与える。ここでは、検討対象とする立体倉庫の積載物落下リスクを、

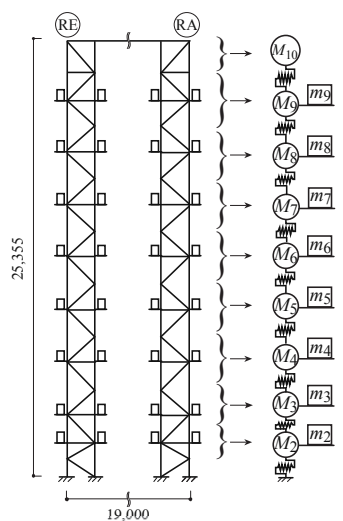


図20 フィードバック解析モデル

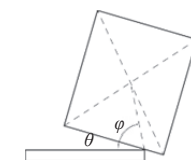


図21 積載物落下条件

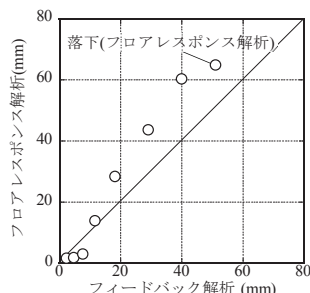
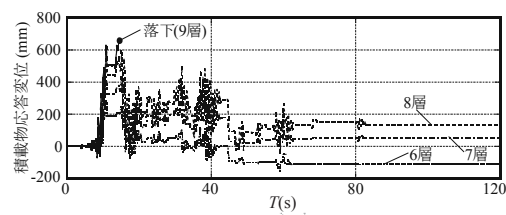
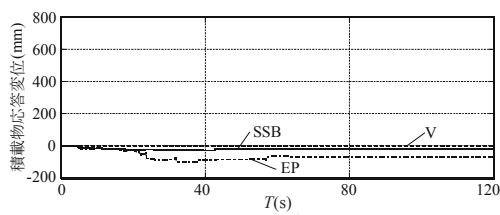


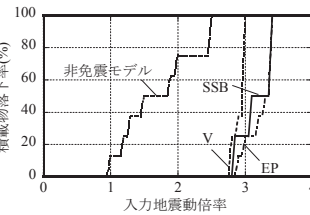
図22 積載物最大応答変位比較



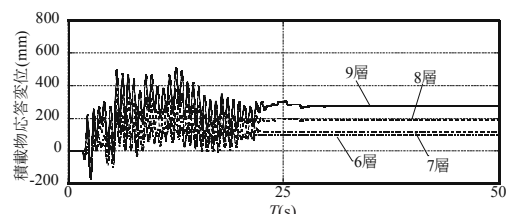
(a-1) 非免震モデル



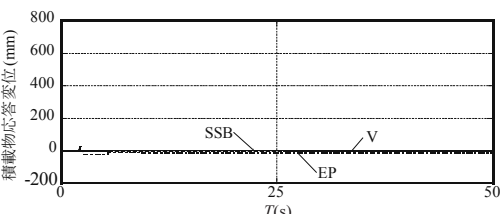
(a) BCJ-L2 波入力



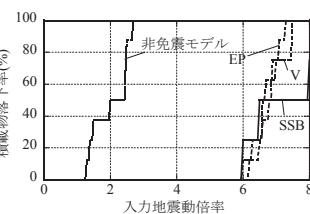
(a) BCJ-L2 波入力



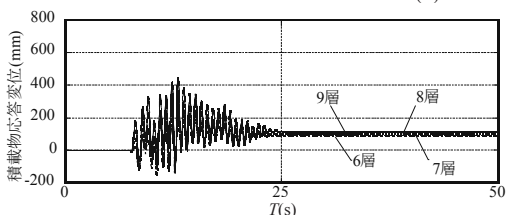
(b-1) 非免震モデル



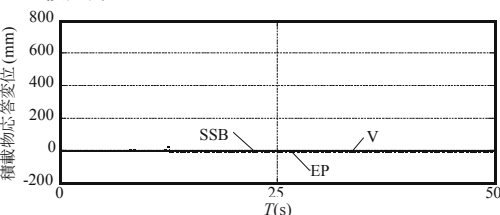
(b) EL CENTRO 波入力



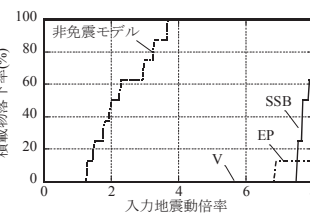
(b) EL CENTRO 波入力



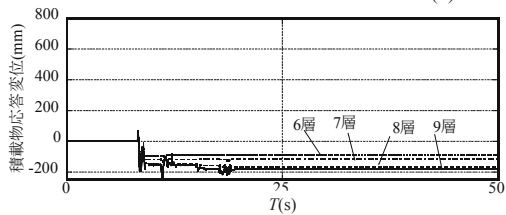
(c-1) 非免震モデル



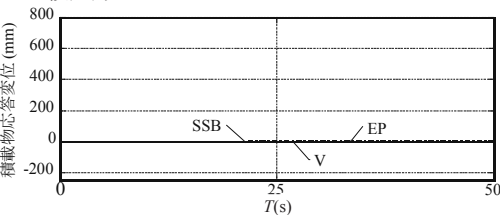
(c) JMA KOBE 波入力



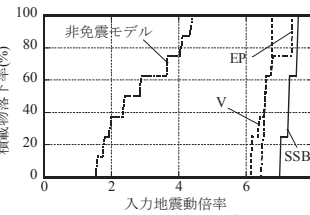
(c) JMA KOBE 波入力



(d-1) 非免震モデル



(d) HACHINOHE 波入力



(d) HACHINOHE 波入力

図23 積載物応答変位時刻歴

図24 積載物落下比率曲線

フロアレスポンス解析を用いて評価する。これにより得られる値は安全側の評価であると判断する。図 23 に各地震波入力時における積載物応答変位時刻歴を示す。非免震モデルにおいては全層にて滑動が生じ、BCJ-L2 波入力時は 9 層において積載物の落下が生じる一方で、免震モデルは 9 層においてもほとんど滑動は生じておらず、免震による滑動落下防止効果は高い。次に入力地震動倍率を増大させた際の各層の積載物の落下率を確認する。4 章で用いた入力を入力地震動倍率 1 倍と定義する。図 24 に各モデルにおいて、入力地震動倍率を横軸、積載物落下率を縦軸に表わした積載物落下比率曲線を示す。積載物落下率は、積載物が 1 つも落下していない状態を 0%、すべて落下した状態を 100%とする。非免震時においては入力倍率 1 程度より落下が生じ始め、倍率 3 程度で全積載物が落下する一方、免震化により落下が生じ始める地震動倍率に関して BCJ-L2 波では倍率 3、EL CENTRO 波、HACHINOHE 波では倍率 6 と、非免震時の 3 倍程度の余裕率が得られることがわかる。BCJ-L2 波入力時には早期の落下が見られる。図 25(a) に 9 層における入力倍率 3 での BCJ-L2 波および EL CENTRO 波の入力加速度時刻歴の一部を示すが、BCJ-L2 波において 5.0~6.0s の間加速度の振動中心がずれていることがわかる。この振動中心のずれにより、同図(b)の積載物応答速度時刻歴に示すように積載物の 1 方向への運動が進展し、同図(c)に示すように大きな応答変位が生じると考えられる。また、JMA KOBE 波に見られるパルス波型の地震動に対しては 1 回の入力では 7 倍程度の入力まで落下は生じていない。このように、積載物の落下性状に関しては入力地震波の位相が大きな影響を与える。その一方、全体を通じて積載物落下曲線に関し免震装置の違いによる有意な差はあまり見られなかった。

6. 結

振動台実験に基づき、各種依存性を考慮した球面すべり支承の数値解析モデルを構築し、アスペクト比 1.3 程度の立体倉庫を基礎免震化することによる応答低減および積載物の落下防止効果を検証した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 球面すべり支承の数値解析モデル化にあたり、振り子要素と摩擦要素を分離することにより鉛直変位を伴う応答特性を再現した。摩擦係数に関しては、面圧および速度依存性を考慮することにより振動台実験による最大応答を概ね再現できることを確認した。
- 2) 立体倉庫の基礎免震化により応答加速度、層せん断力において 6 割程度の低減が得られる。積載物が偏載している場合、満載時と比較して非免震時の最大応答加速度は上昇する傾向があるが、免震化後は満載時と同等の応答に収まる。免震化により上部架構は全体的にねじり応答を生じるが、球面すべり支承を用いた場合はねじり変形は小さい。なお本検討範囲において、極稀地震動レベルの入力では免震支承に浮き上がりは生じなかった。
- 3) 免震化により最大速度 500mm/s 相当の地震波の 3 倍程度までの地震動入力に対する積載物の落下はほぼ防止することができる。ただし、積載物の落下挙動は入力地震波の位相特性に大きく依存し、一定レベル以上の地震動が入力されると、ほとんど全層同時に落下が生じる傾向がある。

なお、上記 2)、3)で得られた結論は今回の解析モデルの範囲においてのみ得られたものである。アスペクト比のさらに大きい架構に

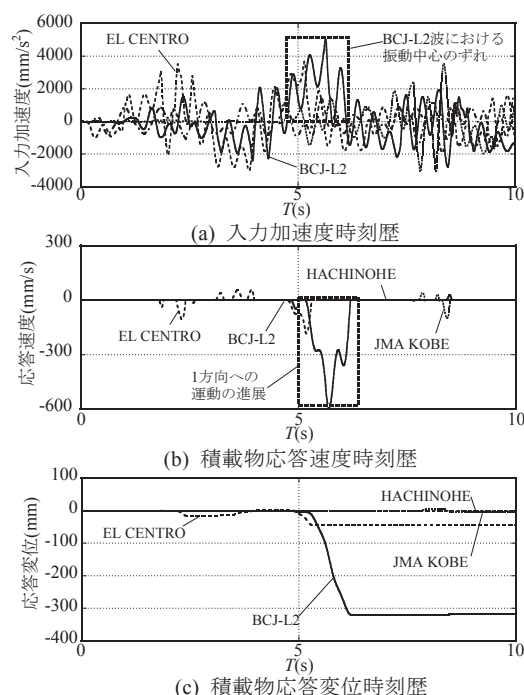


図 25 積載物応答時刻歴(9 層, 入力地震動倍率 3)

関し鉛直応答や浮き上がりが応答特性に与える影響については、今後さらに検討する必要があると考えられる。

謝辞

本研究に際して、新日鉄住金エンジニアリング株式会社：中村秀司氏、長谷川久巳氏、株式会社ダイフク：井上秀氏、東京工業大学大学院生(当時、現金箱構造設計事務所)：潤井駿司君の助力を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 小川行信:可動載荷質量を有する骨組の地震応答について、第二報、日本建築学会大会学術講演梗概集B、構造I、pp295-296、1985.10
- 2) 高小航、高梨晃一:積載物が滑動する建築構造物の地震応答、日本建築学会構造系論文報告集、No409、pp107-113、1990.3
- 3) 朱力、渡辺秀司、鈴木一弁、前田泰史、竹内徹:荷滑りを考慮したトラス柱制振構造の耐震性能、その2 荷滑りを考慮した地震応答解析、日本建築学会大会学術講演梗概集構造系、B-2、構造II、pp433-434、2002.8
- 4) 松野勇輝、竹内徹、渡辺寛、西雄士:積載物の滑動を考慮した多層構造物の地震応答評価、鋼構造年次論文報告集 第19巻、pp813-818、2011.11
- 5) 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、pp943-946、2012.9
- 6) 高木政美、長島一郎、日比野浩、青野翔、出雲洋治、欄木龍大:自動倉庫ラック制振に関する検討 その1、その2、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造II、pp873-876、2012.9
- 7) 松野勇輝、竹内徹、松井良太、西雄士:積載物の滑動および落下を考慮した立体倉庫の地震応答制御、構造工学論文集、Vol.60B、pp317-326、2014.3
- 8) 青野翔、高木政美、出雲洋治、長島一郎、日比野浩、藤井裕之:免震自動倉庫ラックに関する解析的検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 II、pp581-582、2014.9
- 9) A. Mokha, M.C. Constantinou, A.M. Reinhorn, V.A. Zayas: Experimental Study of Friction-Pendulum Isolation System, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 117, No.4, pp1201-1217, 1991.4
- 10) D.M. Fenz, M.C. Constantinou: Behavior of double Concave Friction Pendulum Bearing, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, No.35, pp1403-1424, 2006.6

- 11) M.C. Constantinou, A. Mokha, A. Reinhorn: Teflon Bearings in Base Isolation. II :Modeling, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 116, No.2, pp455-474, 1990.2
- 12) 竹内徹, 中村秀司, 内田正颯, 吉田道保, 松井良太: 偏心および浮き上がりを考慮した球面すべり支承の振動台実験, 日本建築学会構造系論文集, Vol.80, No715, pp1385-1392, 2015.9
- 13) 坂壽二: 二層立体トラス平板の耐力力の連続体解析に関する研究, 大阪市立大学博士論文, 1988.12
- 14) 和田章, 木下雅彦: MSS モデルを用いた柱降伏型の建物の立体振動解析, その 1, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B, 構造 I, pp313-314, 1985.10
- 15) 荒木照夫, 池永雅良, 舟木秀尊, 早川邦夫: 初期剛性を有する球面滑り支承, その 1, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 構造 II, pp553-554, 2003.9
- 16) 菊地優, 石井建, 山本雅史, 嶺脇重雄, 鴨下直登, 仲村崇仁, 河内山修: 弾性すべり支承の水平二方向特性に関する実験的研究, その 3: シミュレーション解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp319-320, 2012.9
- 17) 高橋良和, 日比雅一, 家村浩和: 各種依存性を考慮した滑り形免震支承の数値モデルに関する一考察, 応用力学論文集, Vol.8, pp701-708, 2005.8
- 18) 中村秀司, 西本晃治, 富本淳, 市川康: 高面圧球面すべり支承(SSB)の開発, その 1, その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp481-484, 2014.9

APPLICATION OF SEISMIC ISOLATION BEARINGS FOR RACK WAREHOUSE TO PREVENT GOODS FALLING

*Toru TAKEUCHI^{*1}, Michiyasu YOSHIDA^{*2}, Masakaze UCHIDA^{*3},
Osamu NISHI^{*4} and Ryota MATSUI^{*5}*

^{*1} Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

^{*2} Former Grad. Stud., Tokyo Institute of Technology, M.Eng.

^{*3} Grad. Stud., Tokyo Institute of Technology

^{*4} Manager, Daifuku Co., Ltd., M.Eng.

^{*5} Assist. Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

1. Introduction

The seismic response of rack warehouses is known to be reduced by horizontal sliding of the warehouse contents, which act as mass dampers. However, in past earthquakes business continuity has been interrupted due to damage from spilling, toppling or falling contents. In this paper, response control using seismic isolation is investigated. Because the total rack weight is constantly changing and the rack is often loaded at large eccentricities, Spherical Sliding Bearings (SSB) are proposed, which exhibit natural periods independent of the supported weight. Based on numerical and experimental test results undertaken previously, an analytical model is proposed including pressure and velocity dependent friction values. Using the proposed model, the performance of a seismically isolated rack warehouse with variable weight and eccentricity is studied and compared with conventional rubber bearings.

2. Analytical Models

The modeled rack warehouse is 25m high, 19m wide and 45.6m long which can store 4096 pallets. To reduce the calculation time, an equivalent simplified model is constructed with natural periods of 0.24 sec. in transverse direction and 0.03 sec. in longitudinal direction. Three types of base isolation bearings composed of rubber bearings with elasto-plastic and viscous dampers, together with SSB are installed under the concrete slabs supporting the rack, targeting a natural period of 4.0 sec. and 30 % damping.

3. Proposal of SBB analysis model.

For expressing vertical movement and vertical pressure transition, a pendulum model taking pressure and velocity dependency into account is proposed. As compared to the conventional multi shear spring (MSS) model, the proposed multi-directional friction model (FP model) more accurately models the effective sliding stiffness. The reason for this is that while the MSS model accurately represents the multi directional stiffness, each spring slips independently, producing a higher post-slip effective stiffness as the movement changes direction. The response using the proposed model was compared with the shaking table test results, and its validity confirmed.

4. Dynamic response characteristics of base-isolated rack warehouse

Using the proposed SSB model, response characteristics of seismically isolated rack warehouses with each isolation system subjected to various content distributions are investigated. Introduction of SSB drastically reduces the torsional response, even under eccentric loading distributions. The difference between the results of conventional MSS model and the proposed FP model were found to be around 40% in response displacements.

5. Spilling risk analysis of slipping goods

Finally, spilling risk analysis of the slipping goods is carried out. A feedback model including the spillage and mass changing caused by spilling is carried out. Then a floor response model in which floor-by-floor acceleration responses are input into a separate model of the goods to check if slippage or spilling occurs is constructed and its validity is confirmed against feedback model. Using this procedure, time history analysis was carried out for each seismically isolated rack warehouse model. It was found that spillage does not occur until around three times the 500 year earthquake for the seismically isolated configurations. However, it was noted that once the goods spill at one floor commences, relatively small increases in the earthquake intensity cause the goods at the other floors to follow.

6. Conclusions

Results are summarized in the conclusions as follows.

- 1) The proposed analytical SSB model explains the shaking table test results well and is considered to be valid.
- 2) Introducing seismic-isolation bearings under the rack warehouse drastically reduce the spilling risk of warehouse contents. SSB effectively reduces the torsional response, even under eccentric loadings.
- 3) Introduction of seismic isolation into the rack warehouse generally prevents goods falling until three times the 500 year return period earthquake in Japan.