

パレット自動倉庫の地震時製品落下率評価

糸井 達哉*¹・長島 一郎*¹・島田 博志*²・福本 陽介*²・炭田 光郎*³・欄木 龍大*¹

Keywords : automated storage, shaking table test, dynamic response analysis, seismic vulnerability

パレット自動倉庫, 振動台実験, 時刻歴応答解析, 地震時落下率

1. はじめに

物流倉庫や生産工場のパレット自動倉庫では、巨大地震発生時には製品の滑動によりラックの応答が低減されることが知られているが¹⁾、一方で製品の滑動が大きい場合には落下被害が生じる。1995 年兵庫県南部地震時には倉庫被害全体の 3 分の 1 程度が保管製品の被害であり²⁾、その割合が高いことから、建物・設備のみでなく製品落下被害も含めた地震リスク評価を行う必要がある。しかし、落下まで含めた製品挙動を地震応答解析で評価することはあまり行われていない。

本論文では、パレット自動倉庫の地震リスク評価の観点から、時刻歴応答解析の最大応答値に基づき製品落下率を簡易評価する手法を提案する。倉庫ラックの時刻歴応答解析モデルの作成においては、製品滑動部分の評価が最も不確実な要素である。しかし、これまで倉庫ラックの耐震性を検討するための振動台実験³⁾や解析モデルの作成のための摩擦係数の測定⁴⁾も行われているが、棚の滑動まで考慮したモデルによる検討はほとんど行われていない。

本研究では、製品の各要素間の摩擦特性を実験的に評価することにより、パレットおよび棚の滑動を考慮した詳細な倉庫ラックの解析モデルを作成する。作成したモデルは振動台実験によりモデル化の検証を行う。

ラックの応答特性や落下被害は最大加速度等の地震動強さだけでなく周波数特性や継続時間にも大きな影響を受ける¹⁾。そこで地震時の製品落下の危険性を判断する際には、特定の地震動に対する応答解析結果のみでは不十分である。そこで複数の観測地震動に対する地震応答解析を行い、地震動強さと落下率の平均的関係性を評価する。特に、パレットを腕木上で滑動させる場合と腕木に固定して滑動させない場合の 2 つの場合について、製品落下状況およびラック応答の違いに着目した考察を行う。

2. 要素実験

2.1 要素実験概要

要素実験は、静加力実験と振動台実験を行った。図-1に示す 2 段積みの製品パレットを想定する。パレットは樹脂製で、寸法は 1.1m×1.1m であり、腕木 (C 形鋼・錆止め塗装) の上に設置される。解析モデルではこの製品を図-2 のような各段を 1 つの質点に置換したせん断質点系でモデル化する。

2.2 静加力実験

静加力試験では、静的な漸増加力を行い、棚ーパレット間の動摩擦係数の測定を行った。例と

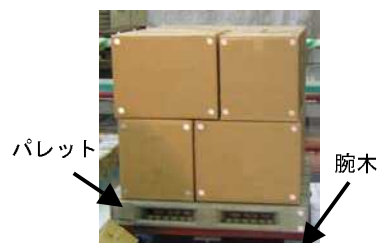


図-1 製品パレット
Fig. 1 Object merchandise

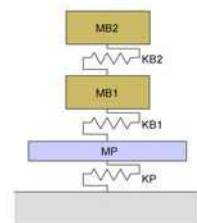


図-2 要素解析モデル
Fig. 2 Element model for dynamic analysis



図-3 摩擦係数測定状況の例 (パレットー腕木間)
Fig. 3 Experimental setting for friction measurement

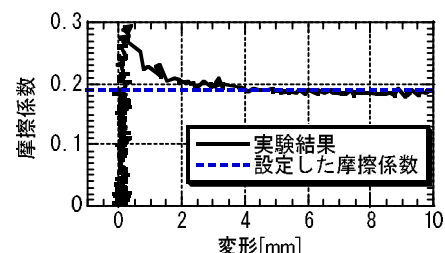


図-4 パレットー腕木間の変形と摩擦係数の関係
Fig. 4 Friction - displacement relation (Pallet and arm)

* 1 技術センター建築技術研究所防災研究室

* 2 設計本部構造グループ

* 3 エンジニアリング本部生産・物流施設グループ - 2

してパレットー腕木間の測定状況例を図- 3に示す。ロードセル（共和電業製LT200-KF）で荷重計測を行い、レーザー変位計（キーエンス製LK-500）で変位計測を行った。図- 4にパレットー腕木間の摩擦係数と変形の関係を示す。動摩擦係数は 0.19 となった。また、梱一梱間および梱一パレット間の摩擦係数についても同様の実験により評価し、それぞれ 0.24、0.33 となった。ただし、面圧の差による摩擦力の違いや、他の梱やパレットへの適用性については別途検討する必要がある。

2.3 振動台実験

振動台実験では地震波加振を行い地震時挙動の把握を行った。実験は大成建設所有の三軸振動台（寸法 4m×4m、最大加速度 1G）で行った。実験では、パレットを腕木に固定するケース（以下、パレット固定）と固定しないケース（以下、パレット非固定）の 2 ケースについて行った。加振は水平一軸加振とし、兵庫県南部地震の神戸海洋気象台 NS 波（JMA 神戸）による高さ 15m の 10 層自動倉庫ラックの予備解析時の最上段での応答波とした。ラックの詳細については 4 章で用いるものと同じである。振幅は振動台の加振限界から 60% に調整した。加振波計測は歪型加速度計（共和電業製 AS-2GB）による振動台上の加速度計測ならびにモーションキャプチャカメラ（ディテクト製 DIPP-Motion XD）による立面各要素の変位計測を行った。サンプリングはそれぞれ 100Hz、20Hz とした。

3. 要素解析モデルの作成とモデル検証

梱の幅高さ比と摩擦係数より梱はロッキングよりも滑りが卓越すると推測される⁵⁾。そこで、要素解析モデルは前述のようにせん断質点系のモデルとした。また、同じ段にある複数の梱の挙動には多少のばらつきがあると考えられるが、解析モデルではその影響は考慮していない。各スプリング要素の非線形特性は、摩擦係数をもとに設定したバイリニア特性とした。また、梱一梱間、梱一パレット間のスプリング要素の初期剛性は振動台でのホワイトノイズ加振による伝達関数より設定した。減衰定数は、パレットー腕木間固定時に 2% の剛性比例とした。

作成した解析モデルを用いて振動台実験時の振動台上での加速度記録を入力波とした時刻歴応答解析を行い、設定した解析モデルの検証を行った。図- 5にはパレット非固定時について加振後の製品の状況を示す。梱一梱間の滑動はほとんどなくパレットー腕木間で滑動が生じた。図- 6にはこの時の実験結果と解析結果との比較を示す。両者は良く対応している。

図- 7にはパレット固定時の加振後の製品の状況

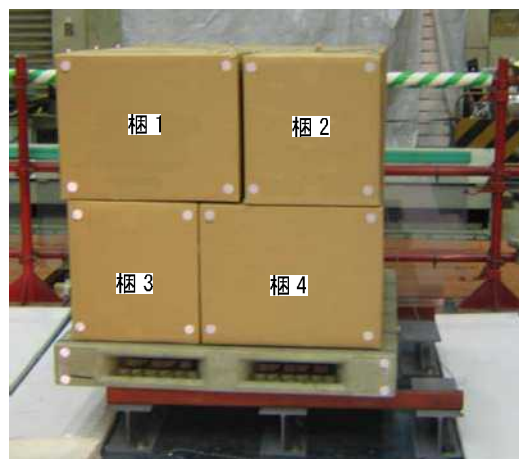


図- 5 振動台加振後の状況（パレット非固定・JMA 神戸）
Fig. 5 Condition of merchandise after experiment
(Pallet unfixed to arm, JMA Kobe)

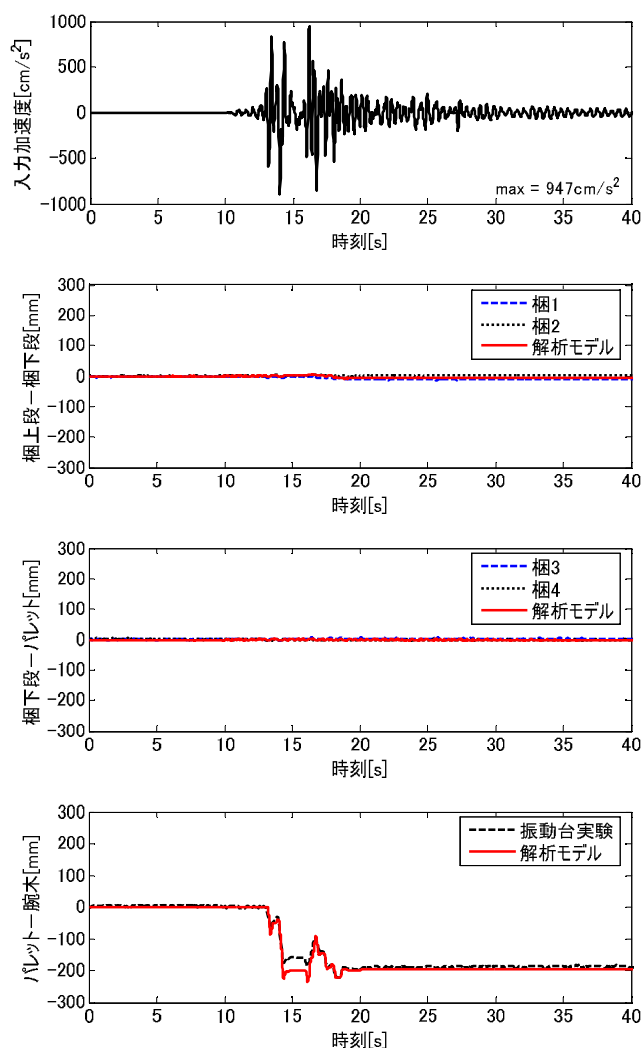


図- 6 振動台実験による解析モデルの検証
（パレット非固定・JMA 神戸）

Fig. 6 Verification of analytical model via experiment
(Pallet unfixed to arm, JMA Kobe)



図-7 振動台加振後の状況（パレット固定・JMA 神戸）
Fig. 7 Condition of merchandise after experiment
(Pallet fixed to arm, JMA Kobe)

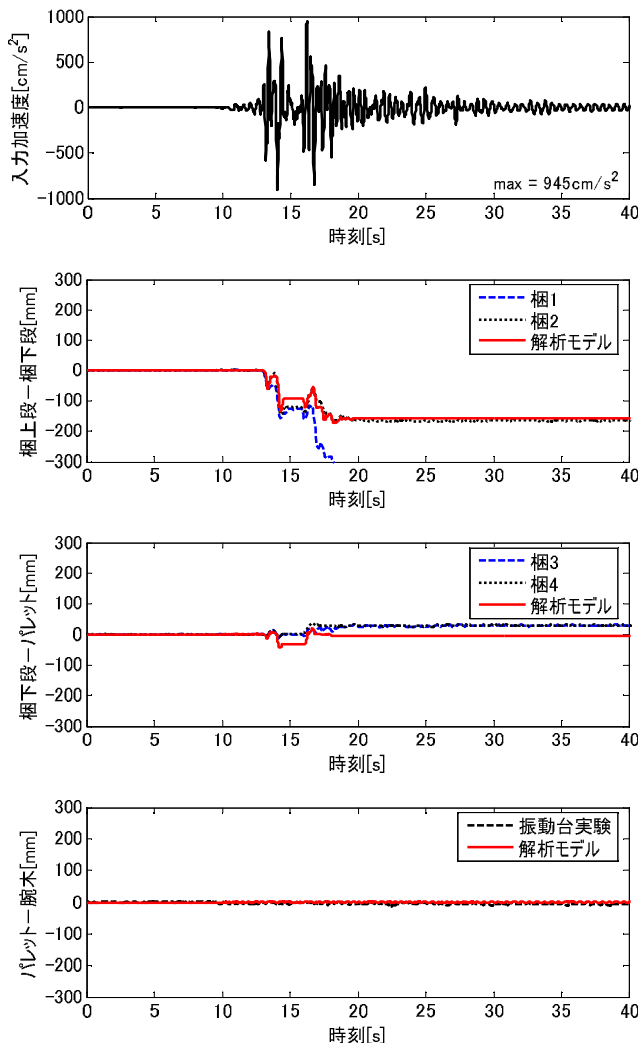


図-8 振動台実験による解析モデルの検証
（パレット固定・JMA 神戸）
Fig. 8 Verification of analytical model via experiment
(Pallet fixed to arm, JMA Kobe)

を示す。上段左側の梱（梱 1）は加振中に落下した。図- 8にはこの時の実験結果と解析結果との比較を示す。この場合には梱一梱間で滑動が発生し、梱 1は落下した。実験では同じ段にある梱の挙動にばらつきが見られるが、ばらつきはそれほど大きくない。実験結果と解析結果は良く対応している。

同様に複数の地震動に対する振動台実験およびその再現解析を行い、モデル化の妥当性を検証した。また、上下動については、応答にほとんど影響しないことを別途振動台実験により確かめた。

4. 応答解析結果に基づく製品落下率評価

4.1 解析方法

振動台実験と同様の高さ 15mの 10 層倉庫ラックを想定する。図- 9に倉庫ラックの模式図を示す。また、以下では梁間方向について応答解析を行う。ラックは図- 10に示すような 10 質点のせん断質点系でモデル化し、各層に 3 章で作成した要素モデルを付加した。ラックの非線形特性も考慮し、減衰定数は 2%の剛性比例とした。以下では、パレット非固定時の解析に加えて、パレット固定時、パレットおよび梱を全て固定（全固定）の解析モデルを用いた時刻歴応答解析を行い、それらの違いを考察する。

落下被害は前述のように地震動特性とラックの振動特性との関係により大きくばらつく。そのため様々な製品の落下率を相対的に比較する際や落下防止対策の効果を検証する際には、複数の地震動による応答解析結果より平均的な落下率の評価を行う必要があると考えられる。解析に使用した地震動は

表- 1に示す地震でのK-NETの地震動のうち 300cm/s²以上の最大加速度が観測された地点での最大加速度が大きい方の成分に、兵庫県南部地震の神戸海洋気象台NS、新潟県中越地震のJMA小千谷EWを加えた 50 波を用いた。原波ではほとんどの地震動で製品落下が発生しなかったため、振幅値を 2 倍にした。ラックは建物の最下層に設置されると仮定し、建屋の影響は考慮しなかった。地震動には 0.1Hz～30Hzのバンドパスフィルタ処理を行った。選択した地震動の最大加速度と計測震度の関係を図- 11に示す。また、表- 1に示した地震時のK-NETの地震動記録より最小二乗法により計測震度 I と最大加速度 PGA について(1)式の関係性を求めた。

$$I = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (PGA_i - \bar{PGA})^2} = 0.29 \quad (1)$$

ここに σ は標準偏差である。(1)式は既往研究^{例えば6)}とも概ね対応している。以下ではこの関係を用いて最大加速度 PGA から計測震度 I への換算を行う。

パレットー腕木間の最大変形がパレット長の半分

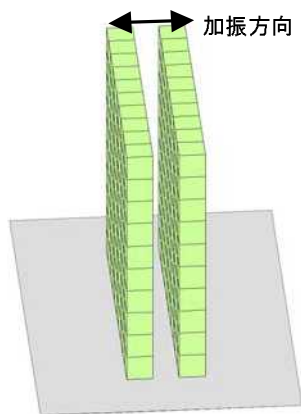


図-9 自動倉庫ラックの模式図と加振方向

Fig. 9 Schematic sketch of automated storage rack and oscillation direction

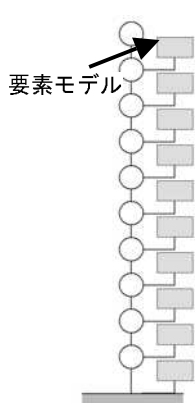


図-10 倉庫ラックの解析モデル

Fig. 10 Dynamic response analysis model for storage rack

表-1 時刻歴応答解析に用いた地震

Table 1 Earthquake used for response analysis

地震名	発生年月日	マグニチュード
鳥取県西部地震	2001.10.26	7.3
宮城県沖の地震	2003.5.26	7.1
十勝沖地震	2003.9.26	8.0
新潟県中越地震	2004.10.23	6.8

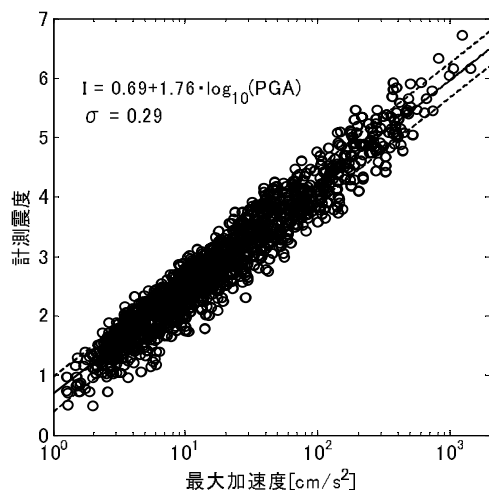


図-11 地震動の最大加速度と計測震度の関係
Fig. 11 Relation between PGA and seismic intensity

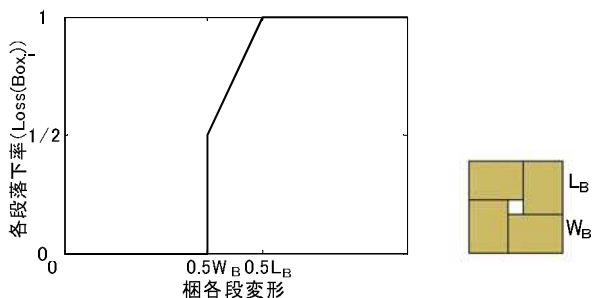


図-12 棚の落下率の評価方法

Fig. 12 Estimation method of fall ratio of box

以上の時にパレットが落下するとした。また、棚は図-12に示すように短辺長さ W_B の半分を超えたときに落下率を 0.5、長辺長さ L_B の半分を超えたときに 1.0 となると仮定し、その間は線形補間した。また、下段の棚が落下する際には、上段の棚も同時に落下し、上段の棚が落下する際には上段の棚のみ落下するとした。以上の仮定に基づいて各層の落下率を(2)式で評価する。

$$\text{Loss} = \frac{1}{2} \left(\text{Loss}_{\text{Pallet}} + \text{Loss}_{\text{Box}_i} \right) + \frac{1}{2} \left(\text{Loss}_{\text{Pallet}} + \text{Loss}_{\text{Box}_{i+1}} \right) \quad (2)$$

ここに、 $\text{Loss}()$ 、 Box_i はそれぞれ各要素の落下率、 i 段目の棚を表す。ただし、ここで求める落下率は簡易評価を目的として時刻歴応答の最大応答値に基づいて求めている。棚やパレットの落下による解析途中での落下による積載重量の減少等を考慮した詳細な評価に基づく落下率との対応については今後検討する必要がある。

4.2 解析結果

解析結果の一例としてパレット非固定時について、実験と同様に神戸NS成分を用いた場合について示す。図-13には 10 層目（最上層）の各要素の相対変位およびその時の入力加速度、10 層目の応答加速度を示す。この場合にはパレットー腕木間の最大変形がパレット長の半分以上となっており、パレットが落下したと判断した。

全地震動についてパレット非固定時の 10 層目の製品に関して応答解析結果から落下率を評価し、入力最大加速度に対してプロットした結果を図-14に示す。図中の破線は全地震の平均的な製品落下率を示す曲線であり、最小二乗法で求めた対数正規分布である。変動係数は 120%と地震動特性により大きくばらつく。以上のように求めた全層の製品落下率を図-15(a)に示す。上層の製品ほど落下しやすい。また、下層の製品ではラックの非線形化による応答の低減がないことから入力加速度が大きくなるにつれて上層と同程度もしくはそれ以上の落下率になる。入力加速度が 1000cm/s^2 の時の平均的な落下率は下層から順に 0.07 から 0.11 程度となった。

同様に求めたパレット固定時の製品落下率を図-15(b)に示す。パレットを固定した場合でも上部の棚の滑動により製品落下が発生する。落下率は上層ほど大きく、入力加速度が 1000cm/s^2 の時の平均的な落下率は下層から順に 0.06 から 0.25 程度となった。下層の製品では、パレット非固定時と同様に、入力加速度が大きくなるにつれて上層と同程度の落下率になる。上層では落下率がパレット非固定時の 2 倍程度となった。図-15と(1)式より求めた計測震度（換算値）と落下率との関係を図-16に示す。ただし、(1)式のばらつき σ についてはここでは考慮

していない。最上層（10 層目）では、パレット非固定時には、震度 6 強（計測震度 6.0～6.5）で平均落下率は 0.1～0.3 程度に、震度 7（計測震度 6.5 以上）では 0.3～0.5 程度となるのに対して、パレット固定時には、震度 6 強で 0.3～0.7 程度に、震度 7 では 0.7～0.9 程度となる。

次に、ラック応答のうち最大加速度と層間変形角について全固定時との比較を行う。可動積載物を有する骨組の応答特性は、弾性時にはある程度以上の入力加速度では製品パレットの滑動により応答が

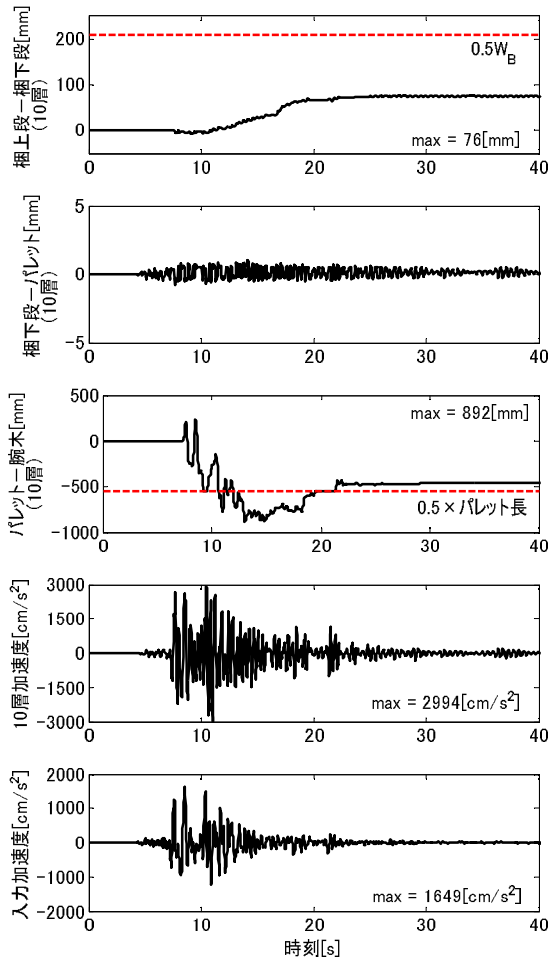


図-13 10 層目のパレットの応答波形（JMA 神戸）
Fig. 13 Time history of response at 10th story pallet (JMA Kobe)

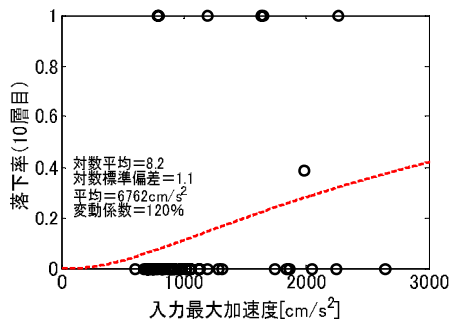
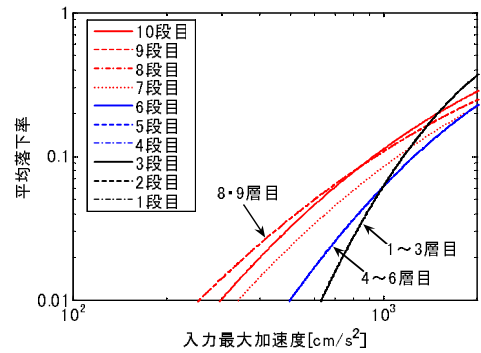
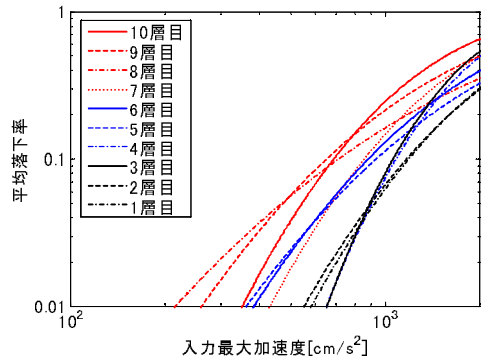


図-14 10 層目の製品パレットの落下率
Fig. 14 Merchandise fall ratio at 10th story (Pallet unfixed to arm)

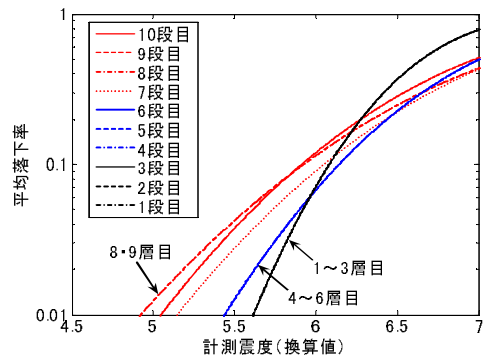


(a) パレット非固定 Pallet unfixed to arm

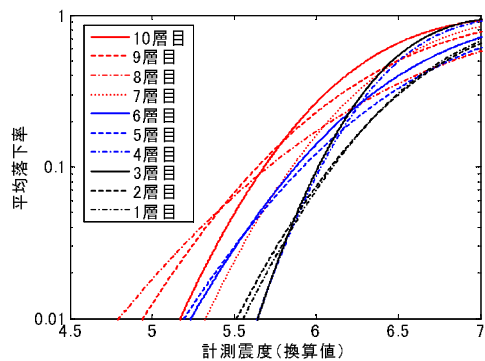


(b) パレット固定 Pallet fixed to arm

図-15 最大加速度と製品落下率の関係
Fig. 15 PGA vs merchandise fall ratio



(a) パレット非固定 Pallet unfixed to arm



(b) パレット固定 Pallet fixed to arm

図-16 計測震度と製品落下率（パレット固定）
Fig. 16 Seismic intensity vs merchandise fall ratio

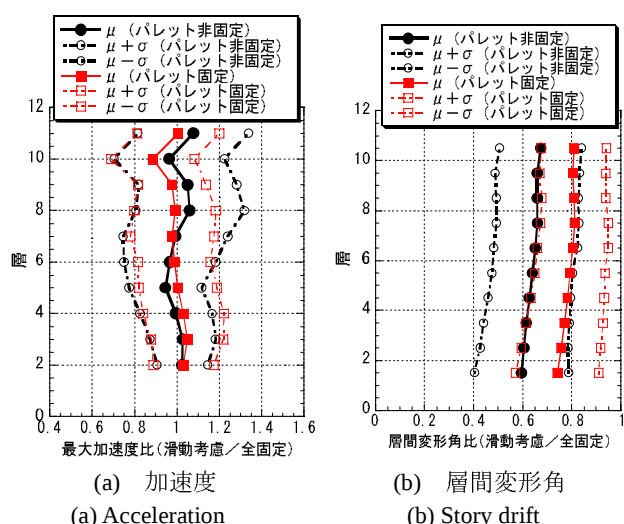


図-17 製品パレットの滑動によるラック応答の変化
Fig. 17 Change in rack response considering merchandise slip

飽和的な傾向になる¹⁾。そこで、ここでは50波のうちラックの非線形性の影響が強く表れていると考えられる最大層間変形角が1/20以上のものを除いた36波についてその応答特性を考察する。図-17には、全固定時との応答値との比について平均値 μ と標準偏差 σ を示す。最大加速度に関しては、パレット固定時、パレット非固定時いずれについてもほとんど増減がない。ただし、地震動特性によって標準偏差で0.2程度のばらつきがみられる。一方、層間変形角については、パレット固定時には平均で0.8倍、パレット非固定時には平均で0.6倍程度に低減され、滑動を考慮することによりラックの応答が低減されることが読み取れる。ただし、標準偏差は同じく0.2程度と大きく、地震動特性によってはパレット非固定時、固定時でそれぞれ最大で1.1倍、1.2倍程度に増加するケースも見られる。

以上より、ラック応答と製品落下率を低減する上でパレット非固定が有効であるとの知見を得た。ただし、梱の落下は寸法等の梱の特性に影響を受けるため、一般的な結論とするには、様々な製品について更に検討する必要がある。

5. まとめ

本論文ではパレット自動倉庫のリスク評価の観点から時刻歴応答解析により製品パレットの落下率を簡易評価する手法を提案した。この手法により従来より高い精度での製品落下率評価が可能となった。解析モデルでは、モデル化において最も不確実性が

ある梱-パレット-腕木間の滑動を実験的に評価することで精度の高いモデル化を行い、実験で求めた摩擦係数から設定したせん断バネでモデル化した要素解析モデルを作成した。要素モデルの挙動は振動台実験による地震波加振の結果と良い対応が得られた。

また、作成した解析モデルを用いた製品落下率の評価を行った。複数の観測地震動を用いた時刻歴応答解析結果をもとにその平均的特性として入力地震動強さとの関係性を評価した。パレットを腕木に固定するケースと固定しないケースについて落下率の比較を行った結果、ラックの加速度応答はほぼ変わらず、層間変形角はパレット固定時、非固定時でそれぞれ0.8倍、0.6倍程度に低減した。また、落下率についてはパレット固定時の方が大きくなった。ラック応答と落下率を低減する上でパレット非固定が有効であるとの知見を得た。ただし、更なる精度の向上には簡易評価手法の精度について検討が必要である。また自動倉庫ラック被害の一般的な傾向についてもあわせて今後の検討が必要である。

謝辞

防災科学技術研究所 K-NET および気象庁で得られた強震記録を使用させていただきました。

参考文献

- 1) 小川信行：可動載荷重量を有する骨組の地震応答，日本建築学会構造系論文報告集，第370号，pp.28-39，1986.
- 2) 斎藤勝彦，久保雅義，石田廣史：阪神・淡路大震災による倉庫内貨物の被災状況，NAVIGATION (Tokyo)，No.128，pp.9-11，1996.
- 3) 滝沢章三，山本昇：ビル式自動倉庫ラックの耐震性，日本建築学会学術講演梗概集（東北），pp.2001-2004，1982.
- 4) 渡辺秀司，朱力，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，日本建築学会学術講演梗概集（北陸），pp.431-432，2002.
- 5) 金子美香，林康裕：地震時の剛体転倒限界と移動量に関する検討，構造工学論文集，Vol.43B，pp.451-458，1997.
- 6) 童華南，山崎文雄：地震動強さ指標と新しい気象庁震度との対応関係，生産研究，48巻11号，pp.547-550，1996.