

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	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
Title(English)	A STUDY ON SLIP AND FALL OF STACKED CARGOES IN AUTOMATED WAREHOUSE
著者(和文)	安川真知子, 高木政美, 北村春幸, 佐藤大樹, 佐藤利昭
Authors(English)	Haruyuki Kitamura, Daiki Sato, Toshiaki Sato
出典(和文)	日本建築学会構造系論文集, Vol. 82, No. 732, pp. 183-192
Citation(English)	Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 82, No. 732, pp. 183-192
発行日 / Pub. date	2017, 2
Rights	日本建築学会
Relation	is version of: https://www.jstage.jst.go.jp/article/aijs/82/732/82_183/_article/-char/ja/
Note	本文データは学協会の許諾に基づきJ-STAGEから複製したものである

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

A STUDY ON SLIP AND FALL OF STACKED CARGOES
IN AUTOMATED WAREHOUSE安川 真知子^{*1}, 高木 政美^{*2}, 北村 春幸^{*3}, 佐藤 大樹^{*4}, 佐藤 利昭^{*5}*Machiko YASUKAWA, Masayoshi TAKAKI, Haruyuki KITAMURA,
Daiki SATO and Toshiaki SATO*

An automated warehouse is a system which automatically controls the storing and shipping of a large number of cargoes in small floor spaces. In the 2011 Tohoku earthquake, many automated warehouses shut down because of the fall of stacked cargoes, and the recovery needs a long time. The importance of the seismic countermeasure preventing the fall of cargoes is noticed from the business continuity planning. The authors developed two countermeasures: one is the vibration control system and the other is the base isolation system. For developing these countermeasures, it is important to clarify the falling behaviors of cargoes. Shaking table tests were conducted for evaluating them. This paper describes the experimental results focusing on the dynamic characteristics of cargoes.

Keywords : Automated warehouse, Fall of cargoes, Slip of cargoes, Dynamic characteristic, Coefficient of friction

自動ラック倉庫, 積荷落下, 荷すべり, 振動特性, 摩擦係数

1. はじめに

1990年代, 物流センターが隆盛期を迎えると, より高機能かつ自動化されたシステムが求められるようになり, 自動ラック倉庫が普及した。特に地価が高く, また全国の物流配送拠点となる大都市圏やその郊外に多く建設されるようになった。

自動ラック倉庫とは, 図1に示すように, 少ない床面積で多くの積荷をラック内に保管し, 入出庫を自動で行うシステムの総称である。自動ラック倉庫にはラックが建屋の構造体を兼用する建屋一体タイプと, 建屋内に建屋と分離したラックが構築されるユニットタイプの二種類がある。自動ラック倉庫の積荷は自動搬送設備による搬送を簡便にするため, プラスチック製パレットの上に, 図2に示すような積み方で, 段ボール等をパレットの幅に対して1.0~1.5倍の高さまで多段積みされる。積荷が積載されたパレットはラック内の柱に取り付けられた鋼製の腕木の上に配置される。しかし阪神淡路大震災, 東日本大震災において, 写真1に示すように積荷落下による内容物の破損, 落下した積荷による自動化システム機器の破壊, 積荷の荷姿異常などの被害が報告されている。これらの被害により, 倉庫の機能が停止し, 復旧が長期化することで物流が滞り, 生活支援物資の供給がままならなくなった事態を受け, 事業継続計画(BCP)の観点から自動ラック倉庫の地震対策が急務となっている。

落下対策としては, 自動ラック倉庫の架構の応答低減によって積荷に作用する地震力を抑え, 荷すべりを低減することが考えられる。具体的な対策技術として, 自動ラック倉庫の柱にダンパー継手を用いる方法¹⁾, 制振対策としてTMDやMDを用いる方法^{例えば2~5)}, 免震化する方法^{例えば6~8)}等が提案されてきている。一方, これらの地震対策技術を評価するために, パレットを含めた積荷のすべり及び落下挙動を把握する必要がある。

物体の移動, 転倒に関する研究は古くからなされており, 剛体の転倒限界を表す式⁹⁾の提案や, 金子^{10~12)}らによる家具の地震時挙動に関する一連の研究がなされている。これらの研究の対象物は家具であり, 対象物を剛体と仮定しシミュレーション結果を元に, 家具の転倒率やすべり量を評価する方法を提案している。積荷部分の



写真1 地震時の積荷落下状況

^{*1} 大成建設㈱技術センター 修士(工学)
^{*2} 大成建設㈱技術センター 博士(工学)
^{*3} 東京理科大学理工学研究科建築学専攻 教授・博士(工学)
^{*4} 東京工業大学未来産業技術研究所 准教授・博士(工学)
^{*5} 九州大学大学院人間環境学研究院 准教授・博士(工学)

Technology Center, Taisei Corporation, M.Eng.
 Technology Center, Taisei Corporation, Dr.Eng.
 Prof. Dept. of Architecture, Tokyo University of Science, Dr.Eng.
 Assoc. Prof., FIRST, Tokyo Institute of Tech., Dr.Eng.
 Assoc. Prof., Faculty of Human-Environmental Studies, Kyushu University, Dr.Eng.

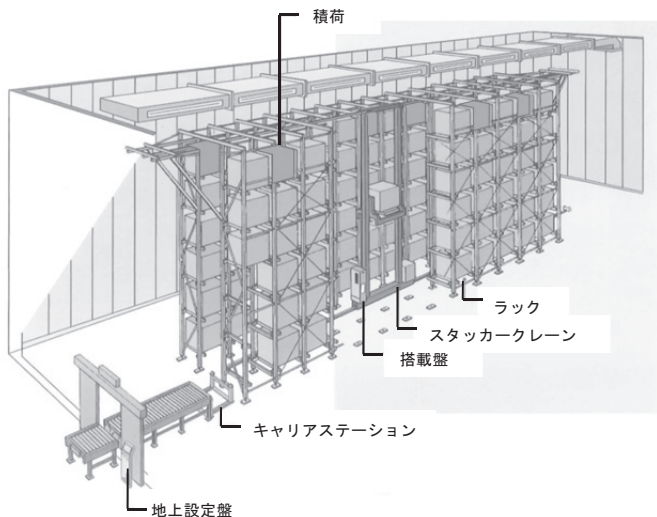


図 1 自動ラック倉庫概観

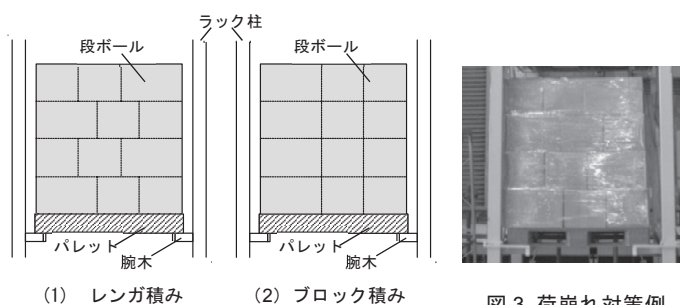


図 2 段ボールの積み方

図 3 荷崩れ対策例
(シュリンク巻き)

挙動に着目した既往の研究として、渡辺¹³⁾は流通業界に汎用的に使用される樹脂パレットを用いて、パレット上に複数の積荷を配置した荷物のすべり実験を行い、主に摩擦係数に関するすべり基本特性について報告している。これに対し、青山¹⁴⁾はパレット上にクレート（ビールケース）を積み上げた場合の実験を行い、モデル化を行ってその妥当性を示している。積荷の荷すべりに着目した研究として、小川¹⁵⁾により可動積載質量を有する一層及び多層骨組みの地震応答に関する研究がなされており、積荷が滑動するスリップモデルの提案及び振動台による実験結果の対応を示している。高¹⁶⁾は小川の研究に加えて、積載物がストッパーに衝突した場合の運動方程式と振動台による実験結果の対応を示している。松野¹⁷⁾は高の研究に加えて、積荷の滑動を考慮した場合の地震応答の低減効果を確認し、多層モデルの最大総せん断力の低減量評価式を提案している。積載物の荷すべり及び落下に着目した研究として、松野⁵⁾、竹内⁷⁾は積載物落下のメカニズムを分析し、荷すべりを考慮したモデル化とその落下条件を提案しており、実験との良好な対応を確認している。

積荷は、図 2 に示す通り、一般的にパレットの上に段ボールを多段積みして構成されるため、積荷自体が振動する。これに対し既往の研究では、家具や 1～2 段積みの段ボール及びパレットの上に段ボールを 2 段積みした場合の挙動に着目しており、積荷を剛体と捉えている。本論文では、段ボールを 4～6 段積みした積荷の実験により、実情を反映した高さ幅比の積荷の振動に着目する。

次に、積荷には阪神淡路大震災以降、荷崩れ防止の目的で、図 3

に示すようなシュリンク巻き等の荷崩れ対策を施すことが奨励されている。シュリンクはパレットと多段積み段ボールを包むように巻かれているため、パレットと段ボールは一体となっている。そのため、積荷はパレットと腕木が接触する部分ですべる。これに対し既往の研究の多くは段ボール下面のすべりに着目している。そのため本論文では、最近一般的になったパレット上に段ボールを積みシュリンクを巻いた荷姿の積荷を再現した実験を行い、パレットと腕木間のすべり挙動に着目する。

プラスチック製パレットと鋼製の腕木は弾性接触となるため、摩擦係数は複雑に変化すると指摘されている¹⁸⁾。これに対し既往の研究では、静的載荷実験等により求まる一定の摩擦係数を用いている。本論文では振動台実験における加速度値から求まる慣性力が摩擦力と等しいとして摩擦係数を求めることにより、その変化に着目する。

これらを踏まえ実験データに基づいて積荷の落下挙動を評価できる手法を確立し、その手法を用いて自動ラック倉庫の立体的挙動や、落下対策を施した場合の挙動、それに伴う積荷の落下率を精度よく評価することを、研究の最終目標とする。その第 1 段階として、本論文では自動ラック倉庫における積荷の落下挙動を実験から精査し、評価法確立のための基礎データを得ることを目的とする。具体的には、積荷の振動特性を決定づける等価振動数及び減衰定数を把握する。また積荷の応答による慣性力から動的に導き出される摩擦係数の変化ならびに荷すべり性状を把握する。

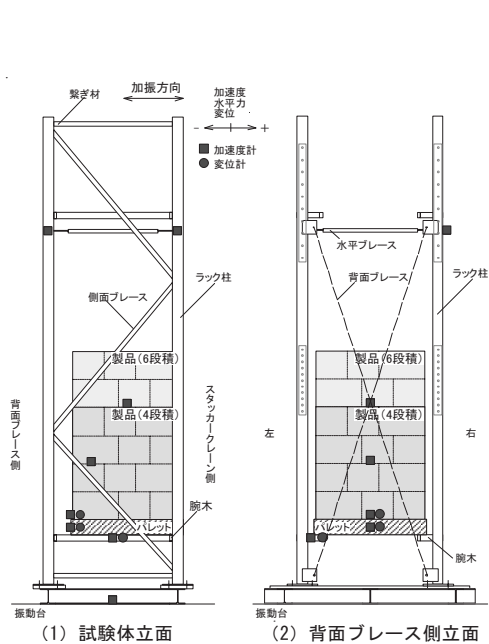
2. 積荷落下実験

自動ラック倉庫内の積荷の落下挙動を再現するために、自動ラック倉庫頂部の構造体を模した試験体を用いて積荷落下実験を行った。

2.1 実験概要

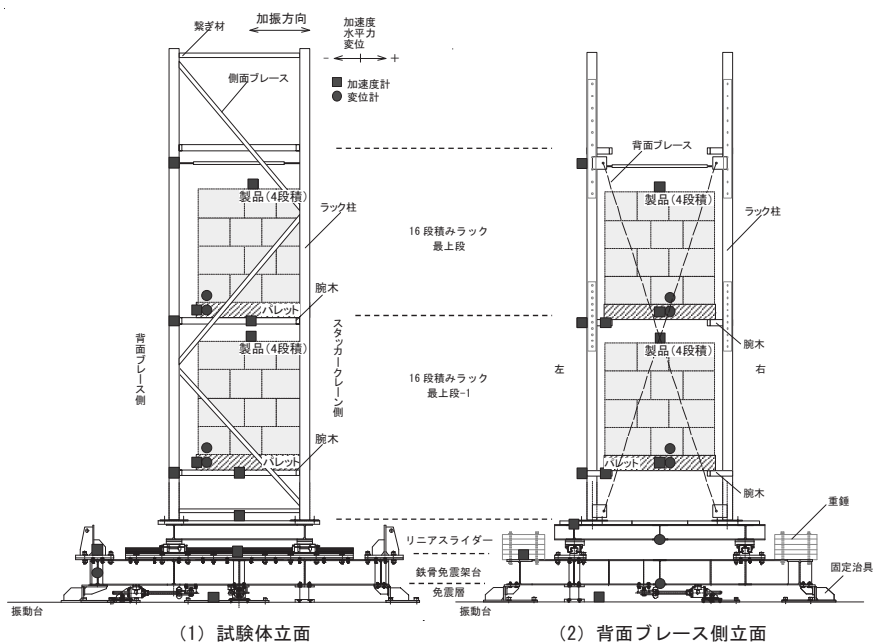
積荷の落下実験は 2 種類行い、それぞれ実験 1、実験 2 とした。実験 1 では積荷の動特性と荷すべり挙動の把握を、実験 2 では積荷が落下に至るまでの挙動を把握することを目的としている。

実験 1 について、図 4 に試験体ならびに計測点配置を示す。試験体は 3 軸振動台上に自動ラック倉庫上部を模擬したラックを構築し、積荷を設置した。積荷は D310×W450×H276 (mm) の段ボールを用いた。段ボール中の重量物としてコピー用紙を用い、コピー用紙と段ボールの隙間には緩衝材を詰めた。段ボール内は内容物が比較的密に詰められた状態とし、段ボールを積み重ねた状態で潰れが生じないことを確認した。下段ボール質量は 17.8kg、上段段ボール質量は 15.5 kg とし、段ボールを各段に 8 個配置して、積載質量を 533 kg (4 段積み) ～800 kg (6 段積み) とした。この積載質量は医薬及び食品業界で一般的な積載質量 400～800 kg の範囲内となるように設定した。実験パラメーターは表 1 に示す通り、積荷段数 (4 段、5 段、6 段)、図 2 に示す積み方 (レンガ積み、ブロック積み)、図 3 に示すシュリンク巻きの有無と入力地震動である。積荷高さについては、流通業界に汎用的に使用されている樹脂パレットの上に、保管されている標準的な高さ幅比となる段ボール 4 段積みを基本とした。段ボール強度は段ボールの材質や芯の厚さ、吸湿の有無により JIS での規定があり、この強度以上に段ボールを積むことは考えにくい。特に実験での 5 段積みは段ボール強度を多少超える程度、6 段積みは強度以上に積んだ状態であり、限界状態を把握するための参考データとする。なお、加振後の目視確認により、段ボールの



(1) 試験体立面 (2) 背面ブレース側立面

図4 試験体ならびに計測点配置 (実験1)



(1) 試験体立面 (2) 背面ブレース側立面

図5 試験体ならびに計測点配置 (実験2)

表1 パラメーターならびに実験結果

実験 No.	試験 No.	積荷段数 【積荷高さ幅比】	積荷質量 (kg)	積み方	加振波	目標加速度 (cm/s ²)	荷崩れ対策	最大加速度 (gal)		最大 荷すべり 変位(mm)	モード	落下の 有無	
								腕木	パレット				
1	1	6段 【1.64】	800	レンガ積み	1-(1)	100	シュリンク巻き	*	*	0.0	(振動特性把握)		
	2					無し	*	*	0.0				
	3				1-(2)	600	シュリンク巻き	1029.0	1100.4	9.4	荷崩れ		
	4				1-(4)	900	シュリンク巻き	1512.8	1353.7	133.6			
	5					600		859.1	927.5	0.8			
	6				1-(2)	300	無し	577.4	633.6	1.1			
	7				450	810.3		875.3	1.4				
	8				1-(4)	450	無し	593.2	641.2	1.2			
	9			ブロック積み	1-(1)	100	無し	*	*	0.0	(振動特性把握)		
	10		*		*	0.0							
	11	1-(2)	300		無し	588.2	653.1	1.3	一列転倒				
	12					450	729.7	781.7		0.8	落下		
	13	4段 【1.13】	533	レンガ積み	1-(1)	100	シュリンク巻き	*	*	0.0	(振動特性把握)		
	14					無し	*	*	0.0				
	15				1-(2)	600	シュリンク巻き	1200.7	1043.4	127.1	荷すべり		
	16							900	1895.6	1156.5		400.5	
	17				1-(4)	900	シュリンク巻き	1336.0	995.0	193.6			
	18				1-(2)	300	無し	537.5	587.3	0.8			
	19							600	1197.0	1014.7		95.8	
	20							860	1933.2	1217.8		359.5	
	21							1-(3)	900	無し		1137.2	1121.0
	22				1136.9	829.9	317.0						
	23				1-(4)	900	無し	1468.0	1049.7	283.9			
	24							1609.0	1092.2	208.7			
	25			ブロック積み	1-(1)	100	無し	*	*	0.0	(振動特性把握)		
	26				1-(2)	900	シュリンク巻き	1835.4	1474.0	280.5	荷すべり		
	27				1-(2)	600	無し	1222.6	1168.0	7.2	一列転倒		
	28	900	1862.0					1510.4	279.6	落下			
	29	1-(4)	900			1470.5	1488.5	243.9					
	30	5段 【1.39】	666	レンガ積み	1-(1)	100	無し	*	*	0.0	(振動特性把握)		
	31				1-(2)	450	無し	816.0	936.2	0.9	荷崩れ＋ 荷すべり		
	32							600	1024.2	1095.6		3.4	
	33							900	1591.0	1347.2		191.0	落下
	34				1-(2)	300		365.4	364.4	1.8	荷すべり		
	35				1-(2)	800		2667.6	1466.8	147.7			
	36				1-(4)	800		1857.6	1231.5	163.5			
	37				1-(3)	800		1637.9	1122.7	139.0			
	2	38	4段	533	レンガ積み	2-(1)	450	無し	687.0	1447.3	159.5	荷すべり	
39		【1.13】		2-(2)	800		1822.2		1231.3	524.6	荷すべり	落下	
40		5段【1.39】	666	ブロック積み	2-(1)	450			729.2	747.3	0.8	一列転倒	落下

* 振動特性把握のため、ホワイトノイズ加振により周波数分析を実施

潰れが顕著なものは取り換えた。計測は、ラック、パレット、腕木、積荷の加速度、パレットと積荷下部それぞれと腕木間の相対変位を測定した。サンプリング周波数は256Hzとした。加振は、振動性状を把握するための(1)ホワイトノイズ加振と地震時挙動を把握するための地震波加振とし、全37ケースを行った。ラック上部の積荷は大きな応答加速度により落下しやすいことを受けて、入力地震波は、標準的な11段ラックを再現して応答解析を行った際の最上段の応答加速度とした。地震波には、特徴の異なる(2)エルセントロNS成分位相告示波(以下、告示応答波)、(3)兵庫県南部地震神戸海洋気象台観測波NS成分(以下、神戸応答波)、(4)東北地方太平洋沖地震[MYG009]観測波NS成分(以下、3.11 応答波)を用いた。加振方向は図4に示すスタッカークレーン側に対して前後方向のみとした。

実験2について、図5に試験体ならびに計測点配置を示す。3軸振動台上に免震層、鉄骨免震架台及び自動ラック倉庫上部を模擬したラックを設置した。免震層とラックの間には、16段積みラックの固有周期ならびにラックによる加速度の増幅を再現するためのリニアスライダを設置している。本研究では落下現象を把握するために、免震層を固定した試験体の結果を参照する。パレット上に4段レンガ積み及び5段ブロック積みで段ボールを積み、これをラックの腕木上に搭載して振動台実験を実施した。なお段ボールの形状、質量については実験1と同様である。計測は、免震架台上部、ラッ

ク、パレット、腕木、積荷の加速度、パレットと積荷下部それぞれと腕木間の相対変位を測定した。サンプリング周波数は256Hzとした。加振は、地震時挙動を把握するための地震波加振とした。加振ケースは、①4段レンガ積み、エルセントロNS成分位相告示波(以下、告示波)加振、②4段レンガ積み、兵庫県南部地震神戸海洋気象台観測波NS成分(以下、神戸波)加振、③5段ブロック積み、告示波加振の3ケースである。加振方向は図5に示すスタッカークレーン側に対して前後方向のみとした。

表1に実験1及び実験2のパラメーターならびに実験結果を示す。図6に示す基準加速度波形を用い、図6中の最大加速度(○印)部分が目標加速度となるように加振レベルを設定した。なお、ホワイトノイズ波は最大加速度100cm/s²とし、荷すべりが生じない状態での固有振動数を把握するために加振した。

2.2 実験結果概要

実験結果から、落下モードは4種類に大別できる。図7に積荷の初期状態及び落下モード毎の積荷落下直前の最終状態を示す。なお、実験における積荷の初期状態は、図7(1)に示すように、スタッカークレーン側の腕木端部とパレット端部が一致するように調整した。落下モードと落下した6体の試験の試験条件を紹介する。

[荷すべりモード]

主に積荷の高さ幅比が小さい4段積みでシュリンク巻きの有無に係らず生じたモード。図7(2)に示すように、積荷とパレットが一

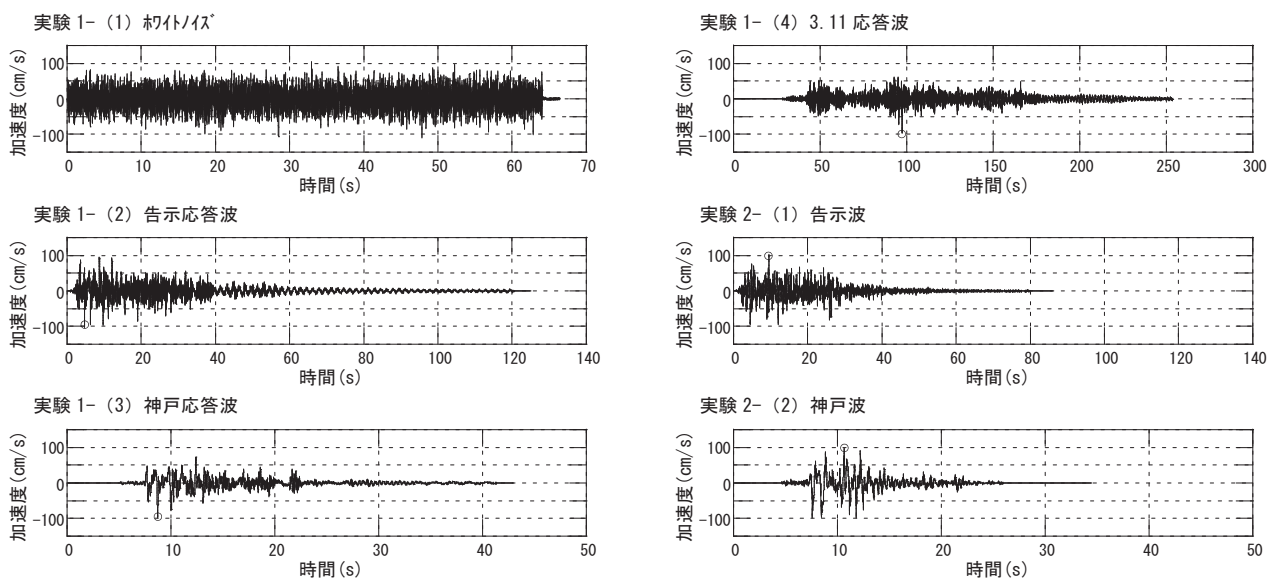


図6 実験で使用了入力地震の基準加速度波形

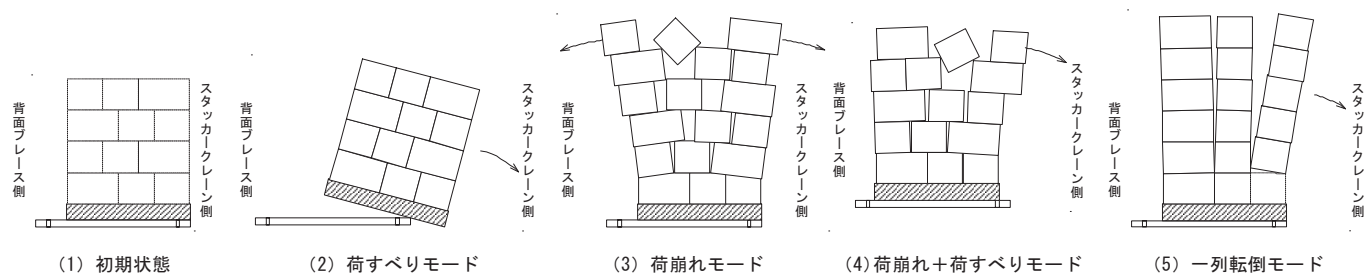


図7 積荷の初期状態及び落下モード毎の積荷の最終状態

体となって滑動し、腕木からはみ出して転倒し、最終的に積荷全体が落下するモード。このモードで落下した試験は、試験 No.39 であった。

〔荷崩れモード〕

主に積荷の高さ幅比が大きいレンガ積み試験体において、図 7 (3) に示すように、積荷の全体曲げ変形により最下層段ボールが潰れ、徐々に段ボール同士の間隔が広がり、上部の段ボールが下部段ボールの隙間に落ち込む等により荷崩れが生じるモード。シュリンクが巻いてある場合は、段ボールが荷崩れすることはない。このモードで落下した試験は、試験 No.5 であった。

〔荷崩れ＋荷すべりモード〕

図 7 (4) に示すように、積荷全体に曲げ変形を生じ、荷崩れと荷すべりが同時に生じるモード。このモードで落下した試験は、5 段積みの試験 No.33 であった。

〔一列転倒モード〕

主に段ボールがブロック積みの場合に生じたモード。図 7 (5) に示すように、段ボールが各列で曲げ変形し、段ボールの長辺、短辺のどちらが曲げモードの支点になるかで周期が異なるため、列毎にぶつかりあう。最終的には上部段ボール一列分が一体となって転倒し落下するモードであった。このモードで落下した試験は、試験 No.12, No.28, No.40 であった。

以上のように、積み方条件によりさまざまなモードが確認できる。しかし 5 段積み、6 段積みでは、前述の通り本実験で使用した段ボール強度が低いため、下部段ボールが試験前から膨らんだり、実験中に潰れ始める現象が見られた。実際の積荷では、段ボールの中に商品が入っているため、段ボールが潰れるほどに上積みすることはない。さらに荷崩れ防止対策の導入が奨励されていることを考慮すると、荷すべりモード以外の落下モードは生じにくい。そこで本研

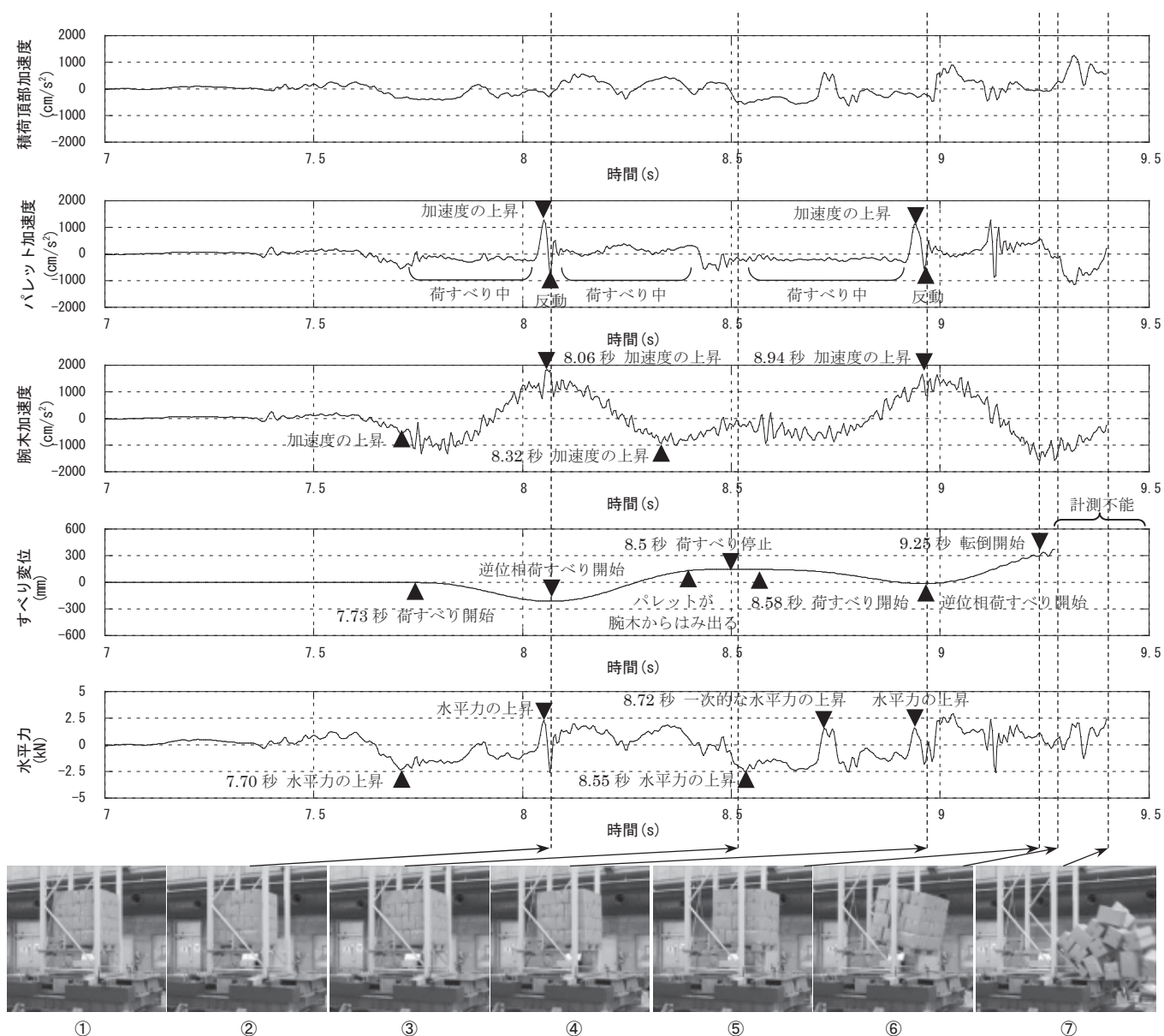


図 8 時刻歴波形及び試験体スナップショット (試験体 No.39)

究では荷すべりモードを対象とした。荷すべりモードとなった4段積み及び5段積みシュリンク巻き及び4段積みシュリンク巻き無しの試験結果である試験 No.15～24, No.34～39 について検討する。

2.3 荷すべりモードの挙動

図8に荷すべりモードで落下した、試験 No.39 における時刻歴波形と試験体スナップショットを示す。時刻歴波形における値の正負は、図6に示す通りスタックークレーン通路側を正とした。図中のすべり変位は、パレットと腕木間の相対変位を示す。水平力は図9に示す通り、積荷及びパレットの加速度から算出した。

実験開始から7秒までは大きな荷すべり変位や段ボールの移動がなかったため7秒以前を割愛している。積荷に対して入力となる腕木の時刻歴加速度波形は全体として、リニアスライダーによる周期調整の影響を受け、0.7秒程度の周期成分が卓越している。またパレットと積荷頂部の加速度の振幅及び位相が異なることから、積荷はパレットと共に滑動しながら変形していることが確認できる。

腕木加速度が -500cm/s^2 を超え、パレットと積荷の加速度から求めた積荷全体に生じる水平力が 2.0kN を超えたのちに、積荷が荷すべりを開始した。荷すべり開始のタイミングは7.73秒であったのに対し、積荷全体に生じた水平力は7.70秒で最大になっており、0.03秒のタイムラグがある。この結果から7.70秒の最大水平力は静摩擦係数に、また7.73秒の荷すべり開始時の水平力は動摩擦係数に対応しており、このタイムラグは静摩擦係数から動摩擦係数にいたる移行区間と考えられる。この時の荷すべりは背面ブレース側に213mmの移動であった。この時の状況をスナップショット②に示す。荷すべり中のパレット加速度は絶対値で 250cm/s^2 以下であった。腕木の加速度が正側に大きく変化し、8.06秒で 1822cm/s^2 となると、この影響によりパレットの加速度が急激に正側に振られた後、一時的に反動で負側に变化するが、再びパレットの加速度が正側に返ることで、積荷全体に生じる水平力が正側に大きくなり、これまでとは逆方向に積荷が滑動する。荷すべり中のパレット加速度は 320cm/s^2 以下であった。8.32秒で腕木の加速度が負側 -1006cm/s^2 と大きくなるが、パレットや積荷の加速度が正側であるため、負側に揺れ戻されるのに時間がかかり、両者とも振動しながら揺れ戻されて積荷全体に生じる水平力が徐々に 0kN になったことで、8.5秒で積荷が停止する。この時の荷すべりはクレーン通路側に360mmの移動であった。最大荷すべり時にはパレットの一部が腕木からはみ出していた(③)。8.55秒付近で水平力が 2.3kN まで上昇するが、このタイミングでは荷すべりは生じず、8.58秒から荷すべりを開始した。このタイムラグも静摩擦係数から動摩擦係数に至る移行区間の影響と考えられる。この時の荷すべりは背面ブレース側に150mmの移動であった。荷すべり中のパレット加速度は絶対値で 250cm/s^2 以下であった。8.72秒付近で、積荷上部加速度が正側 555cm/s^2 に振れることで水平力が一時的にそれまでとは逆の正側となるが、この影響で荷すべりが止まることはなかった。8.94秒で腕木加速度が正側に 1668cm/s^2 に大きく変化すると、8.06秒の際と同じようにパレットの加速度の変化がおこり、積荷がこれまでと逆方向に滑動する(④)。9.25秒付近で、パレットが腕木端部を支点に転倒しはじめ(⑤)、パレットに貼りつけたレーザー式変位計のターゲットがレーザー照射範囲を出たことで変位が計測できなくなった(⑥)。その後、積荷がパレットごと落下した(⑦)。

以上から、荷すべりモードの特徴的な挙動を下記のように把握した。積荷の動特性として、積荷はパレットと共に滑動しながら変形している。すべり特性として、荷すべり開始と積荷全体に生じるせん断力の最大値にタイムラグがある。積荷の落下は、滑動して腕木からはみ出した位置での転倒によって生じる。

2.4 荷すべりモードの落下判定

2.3節で示した荷すべりモードにおける落下判定方法を次のように考える。図10に示す通り、荷すべりモードの挙動を簡便に表現すると、(1)に示す腕木端部とパレット端部が一致している初期状態から、(2)に示すように積荷が腕木上を滑動し、(3)に示す通り移動した場所において、積荷やパレットに生じた水平力により積荷が転倒して落下する。この挙動を考慮した落下判定方法を図11に示す。(1)は腕木端部位置に対する積荷の転倒限界変位を示す図で、積荷の質量、重心高さ、積荷の応答加速度により、転倒の条件となる積荷加速度から求まる転倒限界の位置Aと積荷重心位置G間の変位 L_1 が逆算できる。(2)は荷すべり時の積荷状態を表した図で、荷すべり時の積荷重心位置Gと初期状態のパレット端部位置B間の変位 L_2 が、腕木端部からの荷すべり変位 δ とパレット幅 $D/2$ から求まることを示している。落下条件は荷すべり時の腕木端部と積荷重心間の変位 L_2 が落下限界変位 L_1 を下回った場合に、積荷が落下すると判定する。荷すべりモードで落下した試験 No.39 において落下検証を行う。図12に実験時における L_1 及び L_2 の時刻歴結果を示す。 L_2 は、実験においてパレット移動変位を計測したレーザー式変位計のターゲットが積荷の転倒落下により計測不能となったため、9.2秒付近でデータがなくなっているが、ビデオにてすべり変位が増大していることを確認しており、その挙動は図中点線のように計測されることが考えられる。黒線(L_2)が灰色線(L_1)を下回っていることから、落下したと判定でき、この判定結果と実験結果が一致することが確認できた。なお本論文における落下判定法は、松野⁵⁾によって示されたモーメント型の落下条件が積荷を剛体と捉えているのに対し、積荷の変形による振動を考慮した慣性力を用いている。すべり変位に加え、積荷の動的変形による重心移動を落下判定に考慮することも考えられるが、積荷頂部及び積荷下部の加速度波形から算出した積荷の変形は最大値10mm程度と積荷幅1100mmに比べ非常に小さい値であったため、本実験における落下挙動に対する影響は小さいと判断した。

実験結果から、荷すべりモードでは荷すべり変位と積荷の転倒モーメントにより積荷が落下するか否かが判断できる。荷すべりと転倒モーメントを評価するためには、すべり特性と積荷の動特性の把握が重要であり、3章ではこれらの特性について明らかにする。

3. 荷すべりモードの分析

積荷の振動モードを明らかにしたうえで、積荷落下の要因となる荷すべり特性、積荷の振動特性に分けて分析する。

3.1 振動モード

積荷の振動モードを確認するため、実験で得られた積荷各部の加速度から変位を算出し、同時刻における積荷各部の積荷下部に対する相対変位をプロットした。積荷変形算出の際、積分することにより計測誤差が蓄積され、見かけ上長周期成分が現れてしまう積分誤差の影響を排除するため、ハイパスフィルターをかける。ただし後

述するが、積荷の周期は2Hz以上であることを勘案し、ハイパスフィルターは0.2Hzとした。図13に高次モードの影響が出やすいシュリンク巻き無の例として、試験No.19における結果を示す。結果から、高次モードの影響が出やすいと考えられるシュリンク巻き無であっても、積荷の振動モードは図13に示すような積荷上部にいくほど変位振幅が直線的に大きくなる1次モードが支配的といえる。

3.2 荷すべり特性

3.2.1 摩擦係数

荷すべりに関する主要因として摩擦係数が考えられる。一般に摩擦係数は静的载荷試験より求められる一定値を用いることが多い。しかし摩擦係数がさまざまな要因によりばらつくことが知られてい

る¹⁸⁾。そこで本論文では、荷すべりを評価するために動の実験結果から力の釣合に基づき摩擦係数を求めるを試みる。具体的には積荷がパレットと共にすべりながら応答する際の慣性力から、図14に示す方法で摩擦係数を算出した。またこの方法で求めた摩擦係数を、前述の要因をまとめた指標として有効摩擦係数と定義した。特に静止摩擦係数及び動摩擦係数にわけて確認するが、その理由は2.3節に示したように、水平力上昇と荷すべり開始にタイムラグがあり、これは静摩擦係数から動摩擦係数に移行する区間と考えられるからである。

図15に実験におけるパレット変位と有効摩擦係数ならびにパレットと腕木の相対速度の関係を示す。図15(1)は4段積み

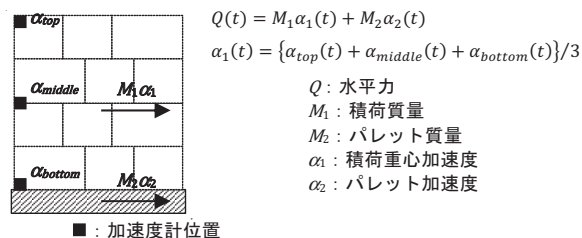


図9 水平力算出方法

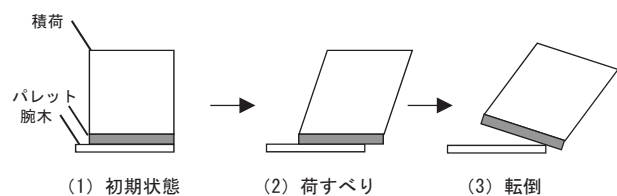


図10 荷すべりモードの挙動

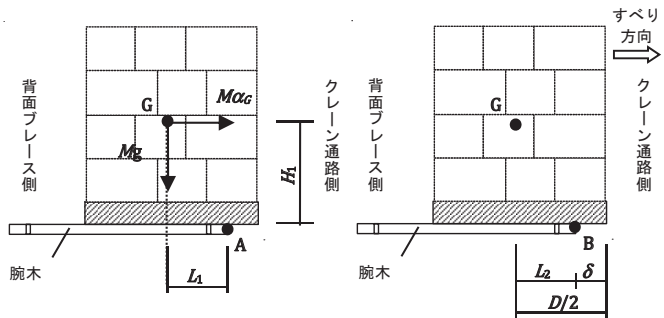


図11 落下判定方法

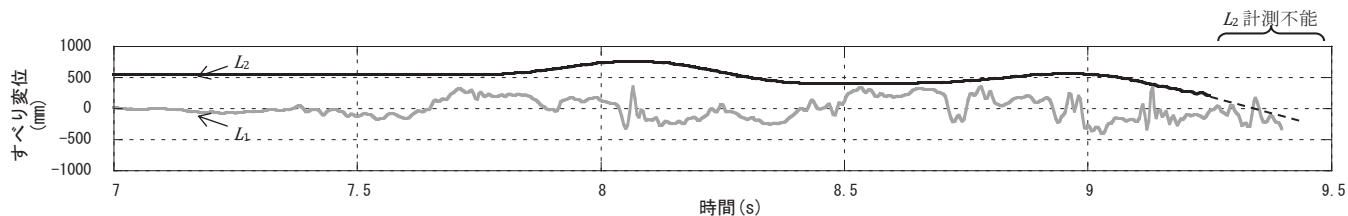


図12 L_1 及び L_2 の時刻歴結果 (試験 No. 39)

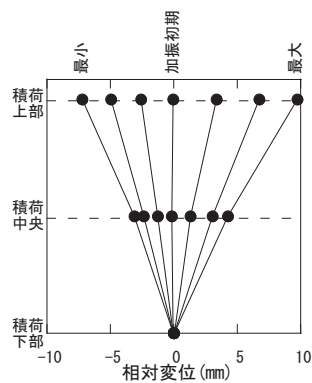


図13 積荷部の変位 (試験 No. 19)

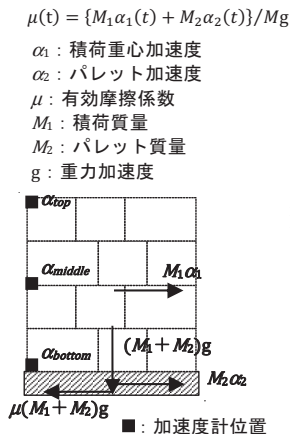
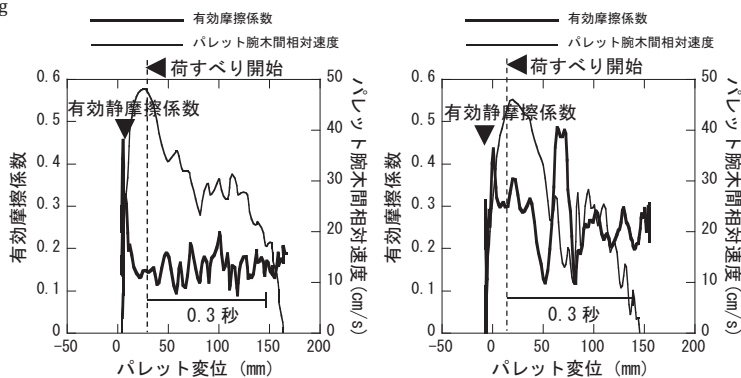


図14 有効摩擦係数算出方法



(1) 4段積み (試験 No. 21)

(2) 5段積み (試験 No. 36)

図15 パレット変位—有効摩擦係数及びパレットと腕木の相対速度

No.21, 図 15 (2) は 5 段積み試験 No.36 の結果である。パレットと腕木の相対速度が大きくなると荷すべりを生じるため、荷すべり開始点は相対速度が極大値となる瞬間とした。相対速度の算出に際しては、3.1 節と同じハイパスフィルターをかけた加速度を用いた。荷すべり開始のタイミング以前の水平力上昇が開始するタイミングから荷すべり開始までの間で、最初に水平力が極大値となる瞬間の値を有効動摩擦係数とした。有効動摩擦係数は変動するため、荷すべり開始から積荷周期である 0.3 秒の区間内の値の平均を平均有効動摩擦係数とする。ただしすべり時間が短い場合は、荷すべり中の平均とする。

図 16 に有効摩擦係数が評価できる十分な荷すべり変位を生じた、試験 No.15~17, No.19~24, No.35~37 より得られた有効静摩擦係数と平均有効動摩擦係数の関係を示す。有効静摩擦係数はシュリンクの有無の影響を受け、概ね 0.4~0.6 の範囲でばらついた。これは、積荷同士の衝突による衝撃加速度により有効摩擦係数を大きめに評価してしまうことが考えられる。実験では同一パレットを使用しているにも係らずばらつきがあることがわかる。これに対し、平均有効動摩擦係数は荷高さが高くなると大きくなる傾向がある。4 段積み（積荷高さ幅比 1.13）の場合は 0.1~0.2 の範囲で、5 段積み（積荷高さ比 1.39）の場合は 0.2~0.4 の範囲でばらついた。通常、摩擦係数は滑動する部分の素材が同じであればほぼ同一の値となると考えられる。しかし、図 15 に示すように、たとえ同じパレットや積荷を使っても、パレットと腕木間の相対速度やパレット下部の温度、積荷の応答性状によって有効摩擦係数（水平力）が変化してしまう。積荷の動特性を考慮した慣性力により荷すべりを評価する

場合には、ある程度のばらつきを考慮した平均有効動摩擦係数を用いて、積荷落下の評価を行なう必要がある。

3.2.2 入力と荷すべり変位

荷すべり変位に影響を及ぼす要因について調べる目的で、入力に対する荷すべり変位の対応を確認する。図 17 腕木最大加速度—最大荷すべり変位関係を、図 18 に腕木最大速度—最大荷すべり変位関係を示す。ここでは試験 No.15~24, No.34~37 の結果を示す。腕木最大加速度及び腕木最大速度共に最大荷すべり量とは相関関係にあるが、特に腕木最大速度との相関がよい。最大荷すべり量を評価する指標は、腕木最大速度が良いと考えられる。

3.3 振動特性

3.3.1 等価振動数及び減衰定数

10 次の ARX モデルを用いたシステム同定¹⁹⁾により各試験体の等価振動数及び減衰定数を算出した。図 19 にパレット最大加速度—等価振動数関係を、図 20 にパレット最大加速度—減衰定数関係を示す。ここでは試験 No.15~24, No.34~37 の結果を示す。4 段積み（積荷高さ幅比 1.13）の場合、入力地震波の加速度 1000cm/s^2 程度までは、加速度に係らず等価振動数は 4~5Hz の範囲となるが、 1000cm/s^2 を超えると等価振動数が低くなることが確認できる。5 段積み（積荷高さ幅比 1.39）の場合、等価振動数は 2~3Hz の範囲となるが、入力加速度が大きくなると等価振動数はやや低下する。入力加速度が大きくなると積荷部の変形が大きくなり下部段ボールが潰れやすくなって、積荷部分が長周期化する影響と考えられる。

減衰定数は入力加速度の増加に伴い大きくなる。この原因として、積荷下部の段ボールが潰れることによるエネルギー吸収が考えられる。

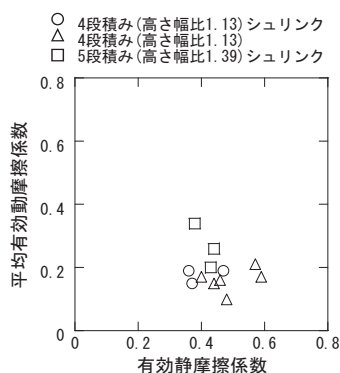


図 16 有効摩擦係数結果

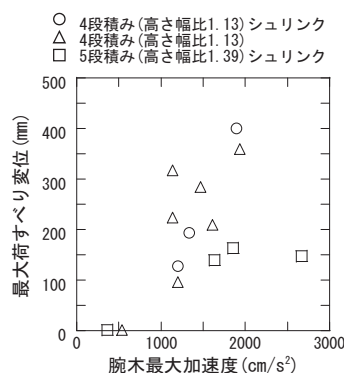


図 17 腕木最大加速度—最大荷すべり変位関係

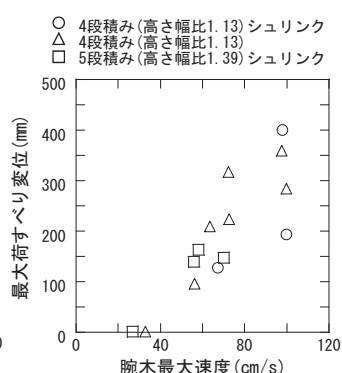


図 18 腕木最大速度—最大荷すべり変位関係

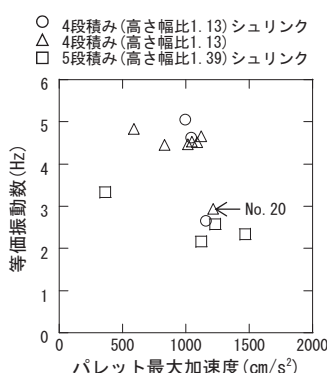


図 19 パレット最大加速度—等価振動数関係

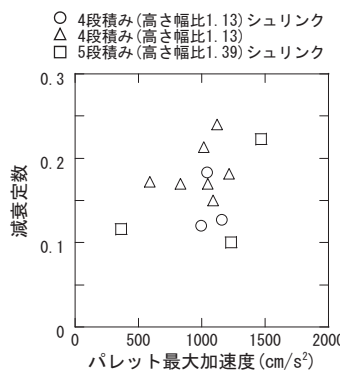


図 20 パレット最大加速度—減衰定数関係

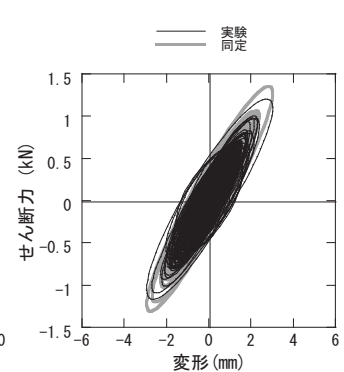
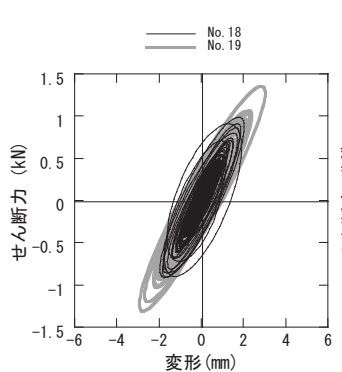
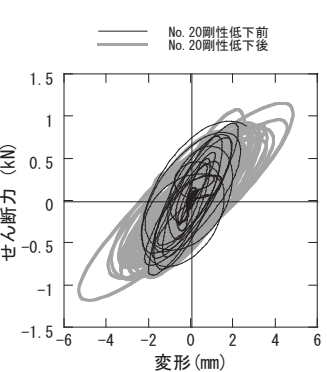


図 21 応答せん断力—積荷部の変形グラフ
(実験及び同定結果比較)



(1) No. 18 及び No. 19 比較



(2) No. 20 剛性低下前後比較

図 22 応答せん断力—積荷部の変形グラフ

3.3.2 応答せん断力ー積荷部の変形関係

図 21 に試験 No.19 における応答せん断力ー積荷部の変形関係と、同定による振動数 4.5Hz および減衰定数 0.21 を用いた一質点系モデルによる時刻歴解析より得た結果を重ね描いて比較する。図から対応は良好であり、同定結果が試験体の性状を評価できていることがわかる。その他の試験ケースにおいても同様の対応が図れていることを確認している。次に、3.3.1 項で示した段ボールの潰れによる振動数の変化を履歴ループから確認するために、応答せん断力ー積荷部の変形関係を調べた。図 22 に 4 段積み（積荷高さ幅比 1.13）、告示波における入力加速度をパラメータとした応答せん断力ー積荷部の変形関係を示す。特に図 22（2）では、図 19 の矢印で示した試験 No.20 において、実験の前半と後半に分けて応答せん断力ー積荷部の変形関係を示す。図 22（1）から、入力加速度が大きくなると剛性（履歴ループの傾き）がわずかであるが小さくなることが確認できる。図 22 から積荷部の変形が概ね 2mm を超えると、剛性（履歴ループの傾き）が低くなることが確認できる。つまり、図 19 における等価振動数の大幅な低下は、図 22（2）に示す剛性低下した後の結果の影響を大きく受けているといえる。

4. まとめ

本論文では、自動ラック倉庫内に保管されている積荷を対象とした落下挙動を実験により把握し、自動ラック倉庫内に保管される積荷の落下挙動を、荷すべりモードに限定して、荷すべりモードにおける荷すべり及び動特性に関する検討を行った。その結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 積荷とパレットの加速度位相が一致していないことから、積荷はパレットと共に滑動しながら変形しており、積荷の動特性を落下判定に考慮する必要がある。
- 2) 積荷各部の同時刻における変形から、本試験範囲内では積荷の振動モードを 1 次モードで評価してよい。
- 3) 積荷の等価振動数は、小さい入力加速度の範囲であれば、ほぼ一定とみなせる。入力加速度が大きくなると等価振動数は低くなり、減衰定数は大きくなる傾向がある。これは入力加速度が大きくなると段ボールが潰れ、積荷部変形が大きくなり、せん断力ー変形関係から求められる剛性が低くなることから説明できる。
- 4) 本論文では、摩擦係数の動的なばらつきを考慮するために、新たに有効静摩擦係数および平均有効動摩擦係数を定義した。有効静摩擦係数は概ね 0.4～0.6 程度のばらつきの範囲内である。平均有効動摩擦係数は 4 段積みの場合 0.1～0.2、5 段積みの場合 0.2～0.4 であり、積荷高さが高くなると大きくなる傾向がある。同じ試験体であっても有効摩擦係数の変動を考慮し、ばらつきをもって評価する必要があると考えられる。
- 5) 荷すべりモードの落下判定法を示し、荷すべり変位と転倒モーメントから実験結果を判定できることを示した。
- 6) 最大荷すべり変位は腕木最大加速度よりも、腕木最大速度との相関が良い。

本論文では、荷すべりモードの落下挙動の主要因となる荷すべり及び積荷の動特性を整理し、有効摩擦係数及び積荷の等価振動数と減衰定数を評価した。今後、積荷落下防止対策技術の有効性を示す解析において、本論文の分析から明らかになった積荷の挙動に基づく積荷の荷すべりモデルを作成する予定である。また、荷すべり量との相関性が明らかになった腕木速度を、落下判定に取り入れることを検討したい。

謝辞

本研究では、K-NET の観測記録を使用しました。

本論文執筆にあたり、東京理科大学松田頼征先生には多大なるご指導を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 谷川充丈, 山田哲, 和田章: 弦材に応力制限機構を有するトラス柱に関する研究, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.225-228, 2001.3
- 2) 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.943-946, 2012.9
- 3) 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, pp.873-876, 2012.9
- 4) 塚田乙, 高木政美, 出雲洋治, 長島一郎, 日比野浩, 廣石恒二: 自動倉庫ラック制震装置の開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.1019-1026, 2013.8
- 5) 松野勇輝, 竹内徹, 松井良太, 西雄士: 積載物の活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, pp.317-326, 2014.3
- 6) 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, pp.581-582, 2014.9
- 7) 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
- 8) 内本英雄, 磯田和彦, 北村佳久, 劉銘崇, 木原幸紀, 福喜多輝: 傾斜すべり支承を利用した免震工法の開発 その 1～その 5, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.471-480, 2014.9
- 9) Ishiyama, Y: Criteria for Overturning of Bodieb by Earthquake Excitations, Transaction of AIJ., No.317, pp.1-14, 1982.7
- 10) 金子美香, 林康裕: 地震時の剛体の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, 1997.3
- 11) 金子美香他: 家具の地震時すべり量の簡易評価, 日本建築学会技術報告集, 第 8 号, pp.73-78, 1999.6
- 12) 金子美香: 地震時における家具の転倒率推定方法, 日本建築学会構造系論文集, 第 551 号, pp.61-68, 2002.1
- 13) 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 その 1・その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.431-434, 2002.8
- 14) 青山博之, 村上雅也, 小谷俊介, 細川洋治, 大網浩一, 市之瀬敏勝, 倉庫積荷の耐震性に関する研究 その 1・その 2, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.69-76, 1980.7
- 15) 小川信行, 可動積載質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, 1986.12
- 16) 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, 第 409 号, pp.107-113, 1990.3
- 17) 松野勇輝, 竹内徹, 渡辺覚, 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, pp.813-818, 2011.11
- 18) 田中久一郎: 摩擦のおはなし, 日本規格協会, 1985.3
- 19) 斎藤知生: モード解析型多入力多出力 ARX モデルを用いた高層建物のシステム同定, 日本建築学会構造系論文集, 第 508 号, pp.47-54, 1998.6

A STUDY ON SLIP AND FALL OF STACKED CARGOES IN AUTOMATED WAREHOUSE

Machiko YASUKAWA ^{*1}, *Masayoshi TAKAKI* ^{*2}, *Haruyuki KITAMURA* ^{*3},
Daiki SATO ^{*4} and *Toshiaki SATO* ^{*5}

^{*1} Technology Center, Taisei Corporation, M.Eng.

^{*2} Technology Center, Taisei Corporation, Dr.Eng.

^{*3} Prof., Dept. of Architecture, Tokyo University of Science, Dr.Eng.

^{*4} Assoc. Prof., FIRST, Tokyo Institute of Tech., Dr.Eng.

^{*5} Assoc. Prof., Faculty of Human-Environmental Studies, Kyushu University, Dr.Eng.

There are few study which focused on the fall of cargoes, while many automated warehouses shut down because of the fall of cargoes in past earthquakes. Here, the authors conducted experiments on them. These experimental studies were to investigate the slip of cargoes and the characteristics of vibration which is the main cause of the fall of cargoes.

First of all, we examined the failures of cargoes on the upper part of the warehouse. As the results of the experiment, movements of cargoes were classified into four failure modes; slip mode, collapse mode, overturn mode, slip-collapse mixed mode. Above all, we focused on the slip mode. The reason is that other modes appeared for five or six layers, while it is impossible to stack these cargoes because of the corrugated carton strength which is provided by JIS and that the cargoes are encouraged to wrap with shrink.

Second, we examined the movement of cargo slipping. It was assumed that the movement of cargoes and palettes were not the same, because of differences between the acceleration phases at top of cargoes and those of palettes. Moreover, coefficients of the friction were classified into static friction and dynamic friction, from the time difference between the rise of horizontal force and start of cargo slipping.

Next, we showed the judgement method of the fall of cargoes (in the slip mode) and verified that the results of experiments can be explained with the displacement of cargoes and overturning moment of cargoes.

Then we investigated the characteristics of the slip and the vibration of cargoes, which is the main causes of cargoes falling, especially for the slip mode. First, we showed that the vibration mode of cargoes assessed primary vibration mode by taking the displacement distribution of cargoes into consideration. For the slipping characteristics, the coefficients of friction were evaluated. The coefficient of static friction varied from 0.4~0.6 although we used the same palette. The coefficient of dynamic friction increases with the height of cargoes. For finding out the main factor that influence the volume of slip of cargoes in characteristics of input wave, we confirmed the relation between cargoes displacement and support beam acceleration as well as that between the cargoes displacement and support beam the velocity. The displacement of cargoes had the better relation with the support beam the velocity than the acceleration. For the vibration characteristics, we confirmed the relation between the maximum acceleration of palettes, the natural frequency and the damping coefficient calculated with system identification.

The slip of cargoes and vibration characteristics which were the main causes of cargoes falling and associated coefficient of friction, natural frequency and damping coefficient, were evaluated experimentally. In the future, we will use the model which instructs the results presented in this paper, and investigate the effectiveness of the countermeasure to avoid the fall of cargoes. Moreover, we will verify the prediction method of cargoes falling using these results.

(2016 年 6 月 10 日原稿受理, 2016 年 10 月 27 日採用決定)