

# 立体自動倉庫に適用する制震技術の開発

## Passively-Controlled Rack for Automatic Warehouse

舟木秀尊\* 舟山勇司\*\* 小山慶樹\*

### 要旨

東北地方太平洋沖地震において、立体自動倉庫のラックから荷物が落下する事例が発生した。ラックから荷物が落下すると、荷物が損傷するだけでなく、自動搬送機の走行を妨害し、物流の停滞を招く恐れがある。ラックの地震対策としては、ブレース等を設置して耐震補強する方法やラックの頂部に動吸振器を設置する事例等がある。しかし、動吸振器を設置する地震対策では、荷物の数や配置によってラックの固有周期が変動すると、制震効果が十分に得られない可能性がある。そこで、本研究では、ラックの荷物の状態が変化しても制震効果への影響を少なくできる地震対策として、一对のラックの片側柱脚に転がり支承と粘性ダンパーを取り付けた制震ラックを開発した。

キーワード：立体自動倉庫、制震ラック、転がり支承、粘性ダンパー、振動台実験、地震応答解析

### 1. まえがき

東北地方太平洋沖地震において、地震動を受けた立体自動倉庫のラックから荷物が落下する事例が発生した。ラックから荷物が落下すると、荷物が損傷するだけでなく、自動搬送機の走行を妨害し、物流の停滞を招く恐れがある。ラックの地震対策としては、ラックの頂部に動吸振器を設置する事例<sup>1)</sup>等が報告されているが、荷物の数や配置によってラックの固有周期が変動すると、制震効果が十分に得られない可能性がある。そこで、荷物の状態によって制震効果が左右されないように、ラックの長周期化と減衰の付加を同時に実現する制震技術を開発した。

### 2. 制震ラックの概要

一般的なラック構造を図-1に示す。一对のラックは、自動搬送機の通路を挟んで、荷物の出し入れを行う方向に向かい合っている。製品を置いたパレットは、ラックの柱に設けられた腕木に載せられており、地震によりラックが揺れると滑動して落下することがある。

制震ラックの概念図を図-2に示す。一般的なラックは耐震構造になっており、床に固定されている。それに対し、制震ラックには、頂部で一体化した一对のラックの片方の柱脚に転がり支承とダンパーが取り付けられている。向かい合うラックは、片方の柱脚をローラー支持にすると固有周期が長くなり、地震動との共振を免れることが期待できる。また、あわせてダンパーの変形を増

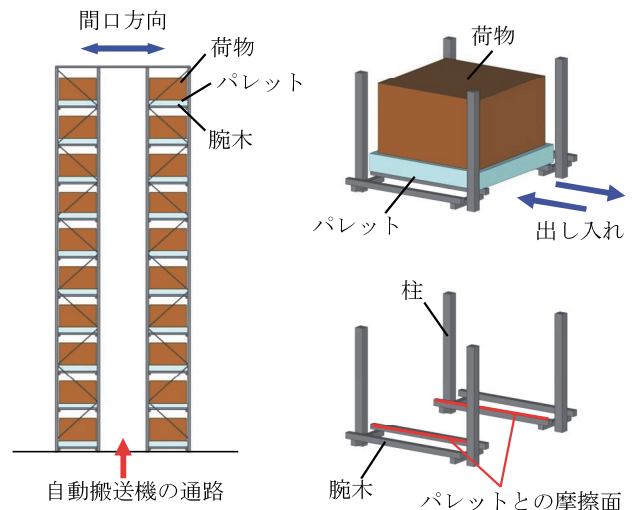


図-1 一般的なラック構造

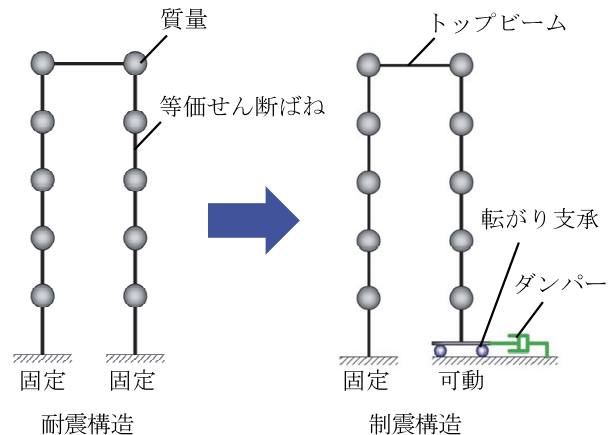


図-2 制震ラックの概念図

\*技術研究所 \*\*西日本支社建築設計部

大きさせることで、大きな減衰効果を発揮する。すなわち、地震が発生すると、転がり支承が取り付けられた柱脚が滑らかに水平移動し、その動きに応じてダンパーが減衰を発揮する仕組みである。地震後、可動側ラックの柱脚は、ラック自身の水平剛性を復元力として元の位置に戻る。実機の制震ユニットの外観を写真-1に示す。

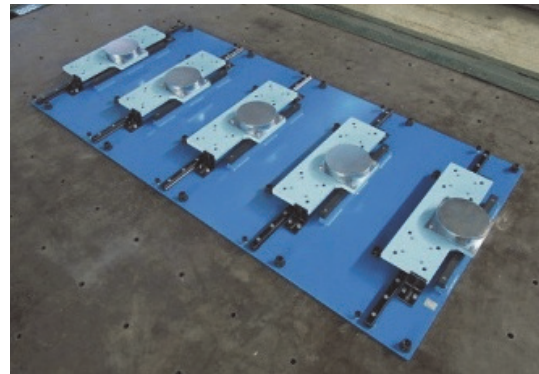


写真-1 制震ユニットの外観

### 3. 地震応答解析

#### 3.1 解析モデル

荷物の落下を表現するため、荷物の積まれたパレットと腕木の間に摩擦力が作用するモデルで地震応答解析を行った。初めに、実在するラックを対象として代表的な3構面を取り出し、立体モデルを作成した。次に、柱脚を固定したラックの頂部に強制変形を与えて水平剛性を求めた後、設計で適用されている等価せん断ばねモデルを作成した。解析モデルの諸元を表-1に、解析モデルの概要を図-3に示す。パレットは腕木に載せられており、接触面でのすべりを考慮するため、静止摩擦係数を $\mu = 0.3$ 、動摩擦係数を $\mu = 0.2$ とした<sup>2)</sup>。また、パレットと腕木との相対変位がパレットサイズの50% (50cm)に達した場合、荷物の積まれたパレットは落下して解析モデル上の荷物とパレットの質量がなくなるものとした。さらに、トップビームには、部材の軸剛性を表すばねを設定した。

表-1 解析モデルの諸元 (片側ラックあたり)

質点	高さ H (m)	質量 $m_f$ (kg)	等価剛性 $K_f$ (kN/cm)	パレットと荷物の質量 $m_p$ (kg)
14	19.01	87.6	20.8	0.0
13	17.59	211.2	24.6	1050.0
12	16.32	120.9	27.8	1050.0
11	15.20	146.5	24.8	1050.0
10	13.91	133.8	25.0	1050.0
9	12.46	219.1	23.8	1050.0
8	11.01	246.7	18.3	1050.0
7	9.49	221.8	24.9	1050.0
6	8.04	248.8	35.8	1050.0
5	6.52	221.8	41.0	1050.0
4	5.07	248.8	49.8	1050.0
3	3.55	203.5	73.3	1050.0
2	2.10	235.6	126.9	1050.0
1	0.58	104.7	239.3	1050.0

#### 3.2 入力地震動

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 (K-NET) により得られた表-2に示す3波とした。解析に用いる入力波は、それぞれの地震で得られた水平方向の最大加速度が大きい方向の成分とした。入力加速度レベルは2段階とし、原波とその1/5とした。

#### 3.3 解析結果

地震応答解析から得られた最大応答値の一覧を表-3に示す。制震ラックでは、原波の加速度を1/5にした入力波においてパレットと腕木のずれは極めて小さく、原波を入力した場合でも落下することはなかった。一方、非制震ラックでは、原波の加速度を1/5にした入力波においてパレットと腕木のずれは最大で8.9cm発生し、原波を入力した場合には50cmに達して落下するものがあった。この結果から、制震ラックは積荷の落下を防止できることを確認した。

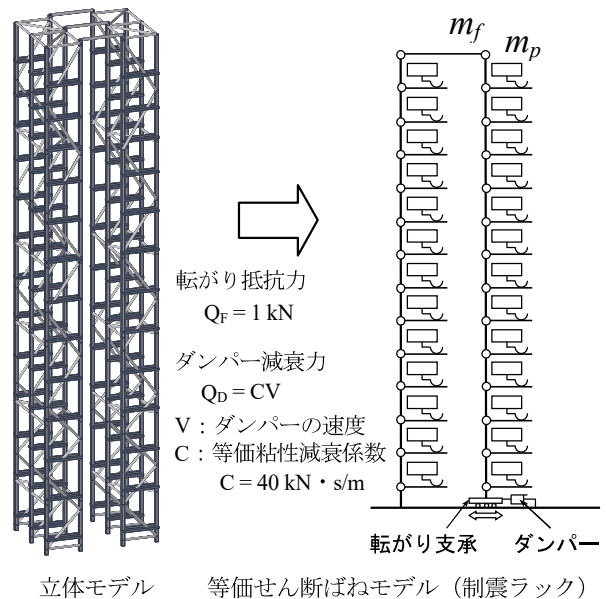


図-3 解析モデルの概要

表-2 入力地震動

地震波	観測点	計測震度 (震度)	最大加速度 (方向)
1995年1月17日 兵庫県南部地震	神戸海洋気象台	6.4 (6強)	818 cm/s <sup>2</sup> (NS)
2004年10月23日 新潟県中越地震	小千谷市城内	6.3 (6強)	898 cm/s <sup>2</sup> (EW)
2011年3月11日 東北地方太平洋沖地震	K-NET 白河	6.1 (6強)	1295 cm/s <sup>2</sup> (NS)

表-3 最大応答値の一覧

	原波の1/5		原波	
	制震	非制震	制震	非制震
パレットずれ量	0.3 cm	8.9 cm	44.4 cm	落下
柱の最大せん断力	17.8 kN	26.9 kN	47.2 kN	51.6 kN
制震ユニット変位	5.0 cm	—	16.3 cm	—
制震ユニット速度	25.8 cm/s	—	77.7 cm/s	—
制震ユニット抵抗力	10.3 kN	—	31.1 kN	—

#### 4. 振動台実験

##### 4.1 制震ラックモデル

制震ラックの性能を確認するため、振動台実験を行った。振動台実験の状況を写真-2に示す。また、ラックの形状と計測点を図-4に、部材リストを表-4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。ラックは、計80個の荷物を収納できる腕木を有しており、積載物として100kg/個の鉄板を固定した。

実験では、制震ユニットを組み込んだ制震ラックと、転がり支承を治具で固定した非制震ラックの2種類の実験が行えるラックを製作した。制震ユニットには、5基の転がり支承と粘性ダンパーが取り付けられている。転がり支承の摩擦係数は、納品時の検査から0.006である。粘性ダンパーは、転がり支承の直線的な動きを回転運動に変換し、減衰力を発揮する。粘性ダンパーの減衰特性(1基あたり)を図-5に示す。なお、ダンパーなしの制震ラックの実験も行うため、個々の粘性ダンパーは脱着式とした。計測項目は、振動台と一対のラック(1、6、10段目)の応答加速度、および制震ユニットの応答変位とした。

##### 4.2 加振ケース

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観測波を採用した。加振ケース

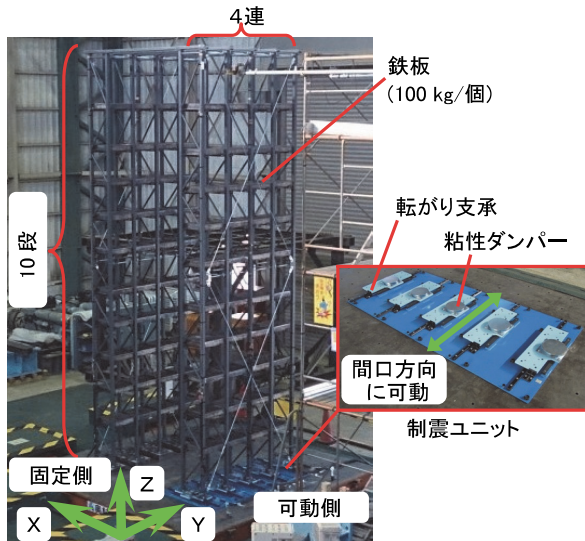


写真-2 振動台実験の状況

写真-2 振動台実験の状況

表-4 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

を表-5に示す。ラックの制震されている間口方向(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。地震波の入力レベルは、加速度を100cm/s<sup>2</sup>から段階的に大きくし、非制震ラックではラックが弾性範囲に収まるレベルまで、制震ラックでは原波(白河波1295cm/s<sup>2</sup>)、もしくは原波を再現できない地震波に対しては振動台で加振できる最大レベル(神戸波500cm/s<sup>2</sup>、エルセントロ波550cm/s<sup>2</sup>)を上限とした。また、ラックの振動特性を確認するためにランダム波(0.02秒~5.00秒)の実験を行った。

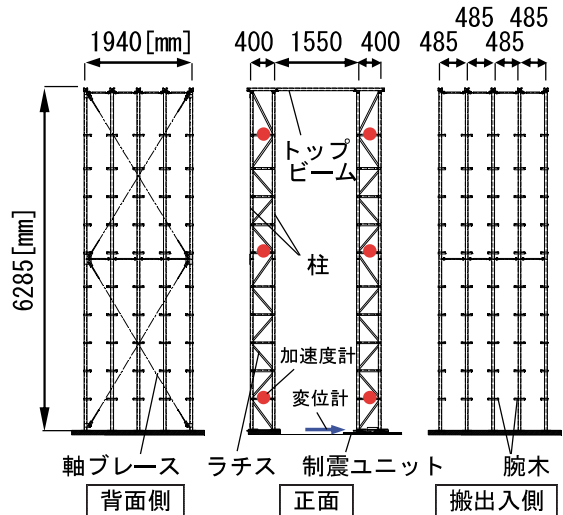


図-4 ラックの形状と計測点

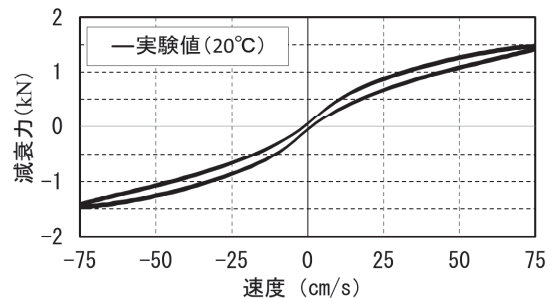


図-5 粘性ダンパーの減衰特性(1基あたり)

表-5 加振ケース

入力波	加振方向【振動台軸】	最大加速度【振動台軸】(cm/s <sup>2</sup> )
ランダム波(0.2 Hz~50 Hz)	【X】、【Y】、【Z】	200【X】、【Y】、【Z】
1995年1月17日 兵庫県南部地震 (神戸海洋気象台)	NS【X】	100,200,300,400,500【X】
	NS-EW【XY】	200【X】・151【Y】
	NS-UD【XZ】	200【X】・81【Z】
	NS-EW-UD【XYZ】	200【X】・151【Y】・81【Z】
1940年5月18日 インペリアルバレー地震 (エルセントロ)	NS【X】	100,200,342,550【X】
	NS-UD【XZ】	550【X】・331【Z】
2011年3月11日 東北地方太平洋沖地震 (K-NET 白河)	NS【X】	200,400,800,1295【X】
	NS-EW【XY】	400【X】・293【Y】
	NS-UD【XZ】	400【X】・136【Z】
	NS-EW-UD【XYZ】	400【X】・293【Y】・136【Z】

※ 下線部は制震ラックのみ実施した加振ケース



### 4.3 振動特性

制震ラックと非制震ラックの振動特性について、ランダム波 200cm/s<sup>2</sup> 加振時の振動台入力に対するラック最上段（10 段目）のフーリエスペクトル比を図-6に示す。一對のラックの1次固有周期は、柱脚の固定された非制震ラックでは 0.39 秒であるのに対して、片方の柱脚が水平移動する制震ラック（ダンパーなし）では 0.94 秒となった。また、制震ユニットに粘性ダンパーを取り付けると、制震ラック（ダンパーあり）の1次モードは非制震ラックの卓越周期と一致し、各振動モードの応答は減衰効果により低減された。

### 4.4 制震ラックと非制震ラックの応答比較

入力加速度を段階的に大きくした実験において、ラック最上段における最大応答加速度を図-7に示す。非制震ラックの入力加速度は、ラックが塑性域に達しないように 400 cm/s<sup>2</sup> を上限とした。実験値を比較すると、制震ラックの応答加速度は、地震波や加振レベルによらず、非制震ラックと比べて約 1/2 程度に低減されている。また、非制震ラックの応答加速度は、制震ラックに比べてばらつく傾向があった。これは、非制震ラックの減衰が小さく、地震波の特性が応答に表れやすいためである。一方、制震ラックは地震波の特性によって応答がばらつかず、制震効果が安定している。次に、神戸海洋気象台の観測波（NS 成分、200cm/s<sup>2</sup>）を入力した実験について、制震ラックと非制震ラックを重ね合わせた時刻歴応答波形を図-8に示す。制震ラックの6 段目、10 段目の応答加速度には、それぞれ制震効果が表れており、非制震ラックに比べて最大で約 1/4 程度にまで低減されている。また、制震ユニットの応答変位に着目すると、ラックが振動しても、ラック自身の水平剛性を復元力として、加振後は元の位置に戻っている。この際の収納棚に載せた荷物の落下状況を写真-3に示す。制震ラックが荷物の落下防止に有効であることを確認した。

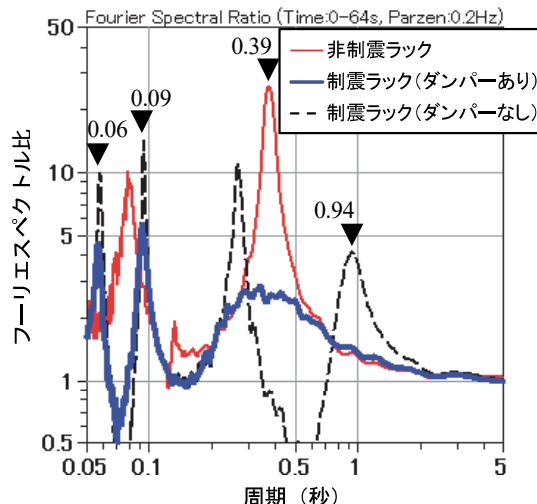


図-6 フーリエスペクトル比（ランダム波 200cm/s<sup>2</sup>）

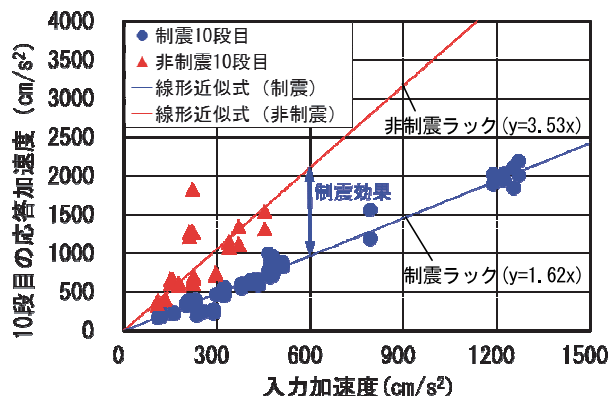
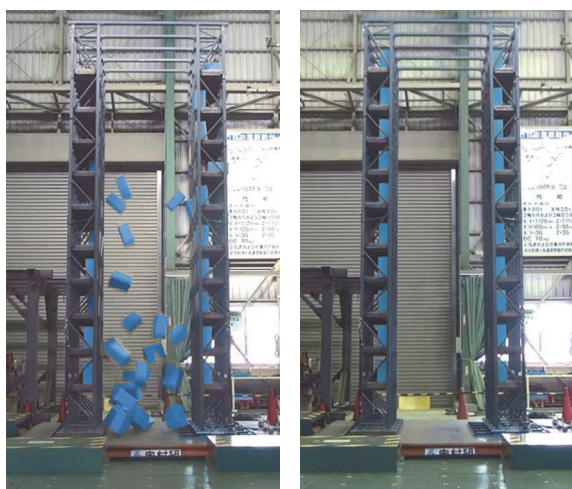


図-7 制震ラックと非制震ラックの最大応答加速度



a) 制震対策なし      b) 制震対策あり

写真-3 収納棚に載せた荷物の落下状況（神戸海洋気象台、NS 成分、200cm/s<sup>2</sup>加振）

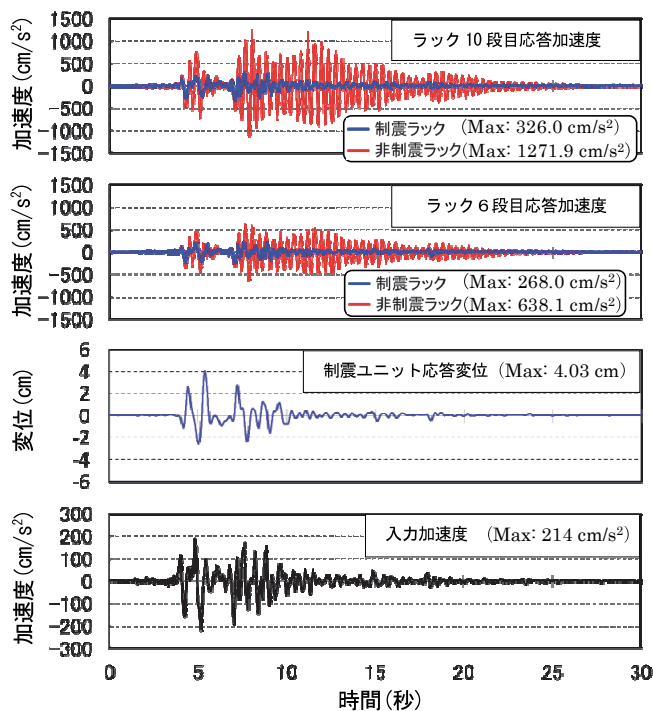


図-8 制震ラック・非制震ラックの時刻歴応答波形（神戸海洋気象台、NS 成分、200cm/s<sup>2</sup>加振）

4.5 2方向、および3方向加振の影響

制震されている方向 (X 軸) の1方向加振に対して、直交方向や鉛直方向を同時に入力する2方向加振 (XY 軸)、および3方向加振 (XYZ 軸) が、制震されている間口方向の応答に与える影響を把握するための実験を行った。制震ラックについて、加振方向の違いによる間口方向の応答を比較したものを図-9に示す。非制震ラックにおいて入力加速度レベルが最も大きい東北地方太平洋沖地震の白河波をNS成分400cm/s<sup>2</sup>の最大加速度に合わせて基準化した入力波 (EW成分293cm/s<sup>2</sup>、UD成分136cm/s<sup>2</sup>) である。加振方向の違いによる間口方向の制震効果への影響はほとんど見られず、いずれも非制震ラックに比べて応答を低減している。また、他の地震波においても同様の結果であった。これは、転がり支承には直交や上下からの負荷を受けても摩擦抵抗が極めて小さい直動システムが採用されているため、2方向や3方向の加振でラックが振られても、1方向加振の時と同様に制震効果が発揮されたからである。

4.6 積載物の配置パターンの影響


立体自動倉庫のラックに収容される積載物は、時々刻々と搬出入を繰り返すことから、ラックの振動特性は常に変化することが予想される。実験に用いたラックの積載物の配置パターンと固有周期の関係を表-6に示す。片側ローラー支承はダンパーなしの制震ラックであり、

柱脚固定は非制震ラックをモデル化したものである。各モデルの1次から3次までの固有周期 (T1、T2、T3) は、柱脚固定よりも片側ローラー支承が長くなるが、その変化は一定でない。CASE2の配置は、可動側の積載量に着目したモデルである。可動側に積載物のないCASE2の1次固有周期は、柱脚固定の0.31秒に対して片側ローラー支承が0.45秒であり、積載物がすべてに配置されたCASE1に比べて固有周期の変化は小さい。固有周期をより長くして地震動との共振を免れるためには、CASE2は不利なケースである。CASE3は荷棚の上半分に積載物があり、制震ラックとしての1次固有周期がCASE1とCASE2の間にある配置パターンである。

次に、制震ラック (ダンパーあり) について、積載物の配置が制震効果に及ぼす影響を確認する実験を行った。積載物の配置は、腕木に設置する鉄板を①全ての棚に設置 (CASE1)、②固定側にのみ設置 (CASE2)、③上半分に設置 (CASE3) とした。入力波は、各観測波 (神戸海洋気象台、エルセントロ、白河) の1方向加振とし、加速度は非制震ラックの実験で最大加速度が最も大きくなる入力加速度レベルとした。積載物の配置パターンと応答低減率を図-10に示す。制震ラック最上段の応答加速度は、積載物の配置によってラックの振動特性が変化しても、地震動と共振させずに減衰を付加した効果によって入力波によらず1/2程度に低減された。

表-6 積載物の配置パターンと固有周期

Mass Model		固有周期 (秒)		
		CASE1	CASE2	CASE3
片側ローラー支承	T1	0.95	0.45	0.70
	T2	0.30	0.21	0.24
	T3	0.19	0.13	0.13
柱脚固定	T1	0.38	0.31	0.36
	T2	0.23	0.14	0.21
	T3	0.14	0.09	0.11

※  は、収納棚に積載していることを示す

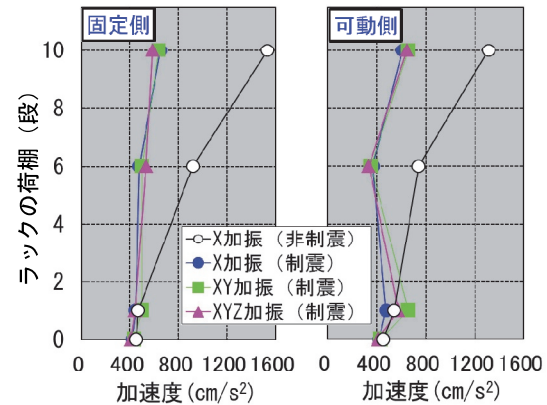
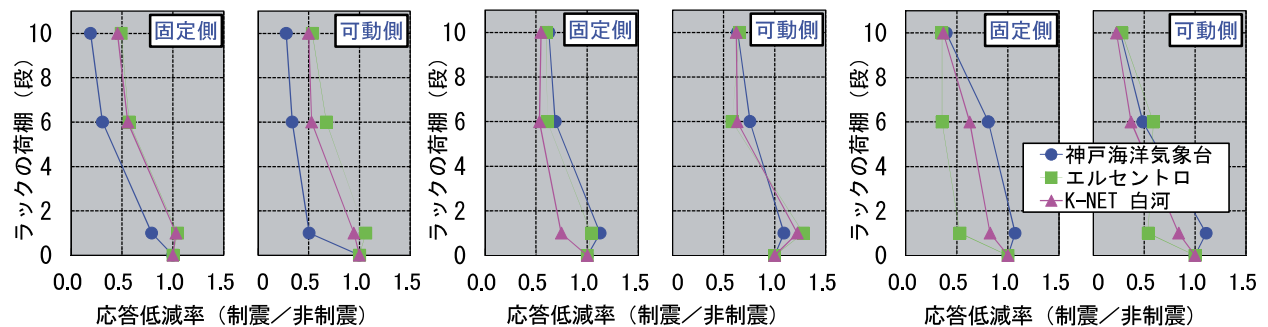


図-9 加振方向の違いによる間口方向の応答比較 (K-NET 白河、NS 400cm/s<sup>2</sup>、EW 293cm/s<sup>2</sup>、UD 136cm/s<sup>2</sup>)



a) 積載物を全てに設置 -CASE1-      b) 積載物を固定側に設置 -CASE2-      c) 積載物を上半分に設置 -CASE3-

図-10 積載物の配置パターンと応答低減率

### 5. シミュレーション

制震ラックの振動台実験を対象としてシミュレーションを行った。解析モデルを図-11に、解析モデルの諸元を表-7に示す。これは、すべての収納棚に積載物を設置している実験ケースを対象とした。柱脚を固定した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22質点の等価せん断ばねモデルを作成した。なお、一対のラックの片側柱脚に配置する粘性ダンパーの減衰力は、単体試験を踏まえて図-12に示すように速度依存型モデルとした。また、転がり支承の転がり抵抗は、直交や上下からの負荷による影響は無視できるものと考え、ラック片側の全質量と転がり支承の摩擦係数0.006から0.25kNと仮定した。地震応答解析と実験データを比較したものを図-13に示す。エルセントロ波(NS成分、550cm/s<sup>2</sup>)を入力波とするシミュレーションの結果は、実験結果のラック10段目と6段目の応答加速度および制震ユニットの応答変位を概ね再現している。

### 6. まとめ

ラックの間口方向を対象とした制震ラックについて、振動台実験と地震応答解析を行い、立体自動倉庫に適用できることを実証した。主な結果を以下に示す。

- i. 一対のラックの片側柱脚に転がり支承と粘性ダンパーを取り付けた制震ラックは、一般的な耐震構造のラックと比較して、地震による荷物の落下を低減できる
- ii. 収容棚の積載物の配置を3段階に変化させた実験から、制震ラックは振動特性の変化によらず、ラック最上段の応答加速度を1/2程度に低減できる
- iii. シミュレーションの結果は、振動台実験の結果とよく一致しており、解析モデルの妥当性を確認すると共に、ラックの仕様に応じた制震ラックの設計が可能となった

### 7. あとがき

物流施設や工場におけるラックの高さや積載物は一律ではなく、地震対策の提案にあたっては、それぞれに適した設計が求められる。また、新設ラックだけでなく既存ラックへの適用も考えると、あと施工に適した装置が望まれる。なお、一対のラックの片側脚部に設置する装置は、転がり支承と粘性ダンパー以外の組み合わせも可能である。今後は、合理的かつ効果的な地震対策を提案するために、本技術に適用する制震装置のバリエーシ

表-7 解析モデルの諸元  
(ラック片側あたり)

質点	高さ	質量	等価剛性
	[cm]	[kg]	[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

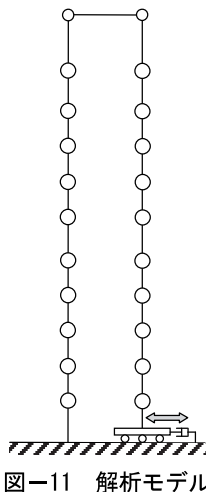
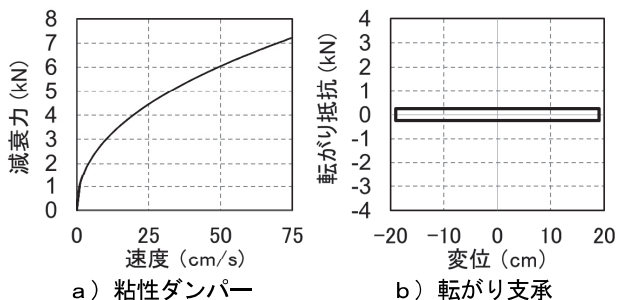


図-11 解析モデル



a) 粘性ダンパー b) 転がり支承

図-12 制震ユニットのモデル化

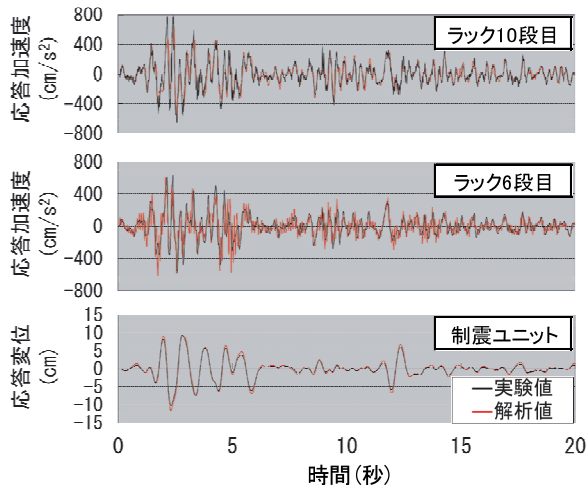


図-13 解析値と実験値の比較

ンを増やすことや、免震という選択肢についても検討していきたい。

また、本研究では、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いた。ここに記して感謝の意を表す。

#### 【参考文献】

- 1) 塚田 乙、出雲洋治、高木政美、青野翔ほか、「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、pp.1019-1026、2013.8
- 2) 小川信行、「可動載荷質量を有する骨組の地震応答」、日本建築学会構造系論文集、第370号、pp.28-39、1986.12