

# 自動倉庫ラックに適用する制振構造の開発

## －制振部材の組合せ、および地震観測結果－

### Development of Passively-Controlled Rack for the Automatic Warehouse

#### - Combination of Damping Devices and Results of Earthquake Observations -

小山慶樹\* 舟木秀尊\* 舟山勇司\*\* 山上 聡\*

#### 要 旨

自動倉庫ラックにおいて、積荷の保全と事業継続の観点から地震対策が重要視されている。既報では、一対のラックの片側柱脚下に転がり支承と粘性ダンパーから構成される制振ユニットを設けた制振構造を開発し、積荷の配置が異なる場合でも高い制振効果が得られることを確認した。本報では、支承材の低廉化に加え、既存ラックの柱脚にも容易に適用可能なすべり支承の開発を行った。開発したすべり支承や転がり支承と減衰材を組合せた振動台実験を行い、既報と同程度の制振効果が得られ、積荷の落下防止に有効であることを確認した。さらに、開発した制振構造を技術研究所内にある自動倉庫ラックに適用し、地震観測を行っている。得られた地震観測記録に基づき、その制振効果を確認した。

キーワード：自動倉庫ラック、制振構造、振動台実験、地震応答解析、地震観測

#### 1. まえがき

近年、消費者のインターネット購入などの増加を受け、大量の配送物を短時間で荷捌きするための物流施設や保管・流通機能を備えた物流施設が増加している。また、限られた敷地を有効活用するために、物流施設内には高いもので30mとなる高層な自動倉庫ラック（以下、ラック）が設けられ、自動搬送機により搬出入管理されている。写真－1に示すようなラックにおいて、東北地方太平洋沖地震や熊本地震などの大きな地震により、ラックから積荷が落下・損傷し、さらには落下した積荷が自動搬送機の走路を妨げ、物流停滞を招く事例が多発した。今後発生が懸念される南海トラフ地震などの大きな地震から積荷の落下を防止することは、積荷自体の保全に加え、事業継続の観点からも重要視されている。

これに対し、著者らは積荷の落下防止策として、一対のラックの片側柱脚下に転がり支承と粘性ダンパーを設けた制振構造を開発し、積荷の配置が異なる場合でも高い制振効果が得られ、積荷の落下防止に有効であることを確認している<sup>1)~3)</sup>。

本報では、支承材の低廉化、および既存ラックの柱脚にも容易に適用可能なすべり支承を開発し、開発したすべり支承や転がり支承と減衰材を組合せた制振構造の振動台実験を行い、その制振効果を確認する。さらに、開発した制振構造を技術研究所内にあるラックに適用し、

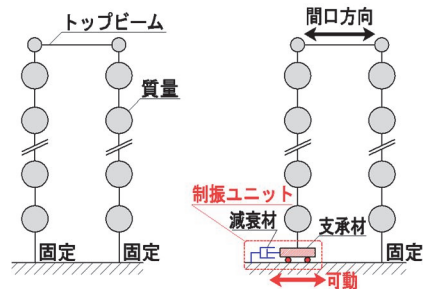
地震観測を行っている。得られた地震観測記録に基づき、その制振効果を確認する。

#### 2. 制振ラックの概要

ラックの構造モデルを図－1に示す。一対のラックは、自動搬送機が走行するスペースを挟んで、荷物の出し入れする方向に向かい合っている。一般的なラックは耐震構造（非制振）であり、柱脚は床に固定されている。



写真－1 自動倉庫ラック



(a) 耐震構造（非制振） (b) 制振構造  
図－1 自動倉庫ラックの構造モデル

\*技術研究所建築研究グループ \*\*西日本支社建築設計部

これに対し、開発した制振構造を適用したラック（以下、制振ラック）は、頂部で連結された一对の片側柱脚下に、積荷を出し入れする間口方向に可動する支承材と減衰材から構成される制振ユニットを設ける。地震が発生すると、可動側ラックの柱脚がスライドし、その水平移動に連動して減衰材が減衰力を発揮してラックフレームの地震応答加速度を低減することで、積荷が落下することを防止する。なお、間口直交方向にはラックフレームのラチス材があるので、積荷は落下し難い。可動側ラックの柱脚は、地震終了後にラックフレーム自身の水平剛性を復元力として元の位置に復帰する。

### 3. 振動台実験

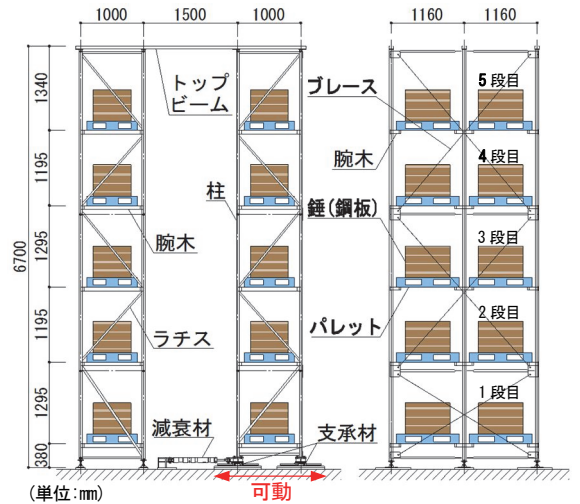
#### 3.1 試験体概要

振動台実験で用いた試験体を図-2に、ラックに用いた主な部材リストを表-1に示す。試験体は荷棚5段、奥行2連から構成され、一般的なラックに使用されている部材を用いた。振動台実験の状況を写真-2に示す。試験体は、計20個の収納棚を有しており、全ての収納棚に735~760kgの錘（鋼板）を載せたパレットを積載した。この試験体は、制振ユニットが機能する制振ラックの実験だけでなく、可動側ラック柱脚の支承材を固定することで非制振ラックの実験も可能となる。

制振ユニットのパラメータを表-2に示す。支承材には、転がり支承（以下、RB）とすべり支承（以下、SB）、減衰材にはオイルダンパー（以下、OD）と増幅機構付きダンパー（以下、RDT）を用い、RB、RB+OD、RB+SB+OD、RB+RDTの4ケースに加え、非制振ラックとして、支承材を治具で固定したケースの計5ケースとした。ここで、RB は一方向のみに可動するリニアガイドで、摩擦係数は概ね0.0065である。また、SB はラックの柱脚に設けるレベル調整材の下に、すべり材、すべり板を設けた簡易な構造であり、摩擦係数は概ね0.05である。SB は、既存のラック柱脚に容易に設けることが可能であるが、間口方向に加え、間口直交方向にも可動するため、間口方向のみに可動するRBと併用した。実験で用いたOD、RDTの基本特性を図-3に示す。

#### 3.2 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3波の観測波（2016年熊本地震の益城町、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）に加え、1940年インペリアル・バレー地震のエル・セントロにおける観測波の4波を採用した。また、観測波のNS、EW成分の加速度が最大となる方向を間口方向（X軸）とした。一軸加振（X軸）を基本とし、転がり支承やすべり支承を用いていることから、間口直交方向の加振や鉛直方向加振の影響を確認するため、二軸加振（XY、XZ軸）、三軸



(a) 間口方向立面図 (b) 間口直交方向立面図  
図-2 試験体（制振ラックの場合）

表-1 主な部材リスト

部位	断面[mm]	材質
柱	□-50×50×2.3	STKR400
ラチス	φ-27.2×2.3	STK400
トップビーム	C-75×45×15×2.3	SSC400
ブレース	M16	SS400
腕木	□-50×30×2.3	STKR400

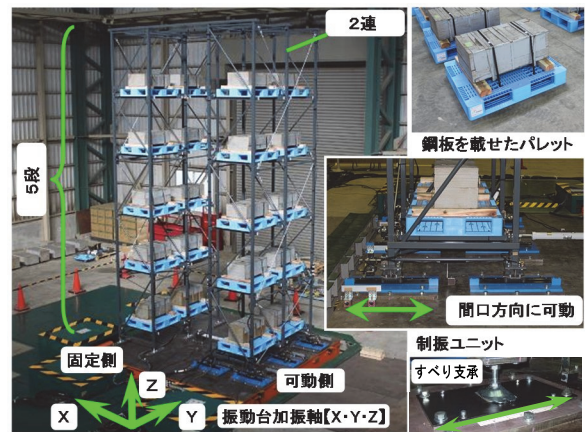
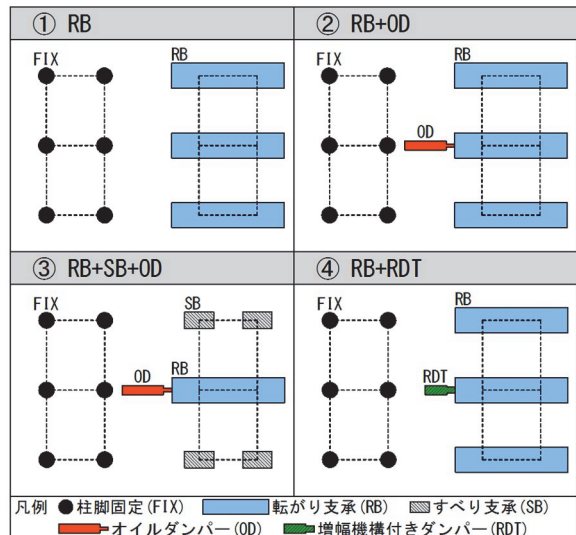


写真-2 振動台実験の状況

表-2 制振ユニットのパラメータ



加振 (XYZ 軸) も併せて行った。地震波の入力レベルは、間口方向の最大加速度を  $100\text{cm/s}^2$  から段階的に大きくし、二軸、三軸加振する場合は観測波の比率に合わせ、ラックフレームが弾性範囲に収まり、かつ振動台で加振できる最大レベルを上限とした。

3.3 振動台実験結果

制振ラックと非制振ラックの振動特性を確認するために、ランダム波 (周期帯 0.02 秒~5.00 秒、最大加速度  $100\text{cm/s}^2$ ) による加振を行った。加振波に対するラック可動側の最上段 (5 段目) における応答加速度のフーリエスペクトル比を図-4 に示す。1 次固有周期は、柱脚が固定された非制振ラックでは 0.40 秒であるのに対し、片方の柱脚が水平移動する制振ラック (RB、ダンパーなし) では 0.87 秒となった。可動側の柱脚に設けた RB が滑らかに水平移動することで、ラック全体の 1 次固有周期は概ね 2.2 倍長くなった。また、減衰材を付加した制振ラック (RB+OD、RB+SB+OD) のフーリエスペクトルを見ると、非制振ラックおよび、RB のみの 1 次固有周期近傍の振幅を低減していることが分かる。

次に、加振波の最大入力加速度とラックの可動側 5 段目フレームの最大応答加速度の関係を図-5 に示す。(a) に制振ラックと非制振ラックの比較を、(b) に一軸、二軸、三軸加振の比較を示す。(a) より、RDT を用いた場合を除き、制振ラックは非制振ラックに比べ、最大応答加速度を概ね 50% に低減し、積荷の荷崩れや落下の防止策として有効であることが確認できた。RDT を用いた場合は、RDT の摺動摩擦力を超える加振ケースが少ないことが影響し、非制振モデルに比べて最大入力加速度が  $100\text{cm/s}^2$  以上の場合で 20% 程度の低減に留まった。(b) より、二軸、三軸加振しても、一軸加振と概ね同程度の最大応答加速度となり、安定して最大応答加速度を低減することが分かる。

また、支承材の違いの影響を比較するため、RB+OD と RB+SB+OD の場合の時刻歴波形を図-6 に示す。(a) より、両モデルとも、制振ユニットの水平変位は加振終了後、概ね元の位置に復帰していることが確認できる。また、RB と SB を併用した場合は、RB 単独の場合より摩擦係数が大きくなるため、水平変位は僅かに小さくなった。また、可動側 5 段目の最大応答加速度が大きくなっているが、非制振ラックの場合と比べ、RB+OD の場合と概ね同程度に最大応答加速度を低減し、積荷の落下防止に有効であることが確認できる。

3.4 地震応答解析方法の妥当性

ラックや制振ユニットの仕様に応じた設計を行うことを目的に、地震応答解析方法の妥当性を確認する。地震応答解析に用いた解析モデルを図-7 に示す。(a) に示すように、柱脚をピン支持とした 3 次元立体モデルを作成し、頂部へ強制外力を与え、腕木レベル間の層間水平変位を求め、負担せん断力を層間水平変位で除して水平

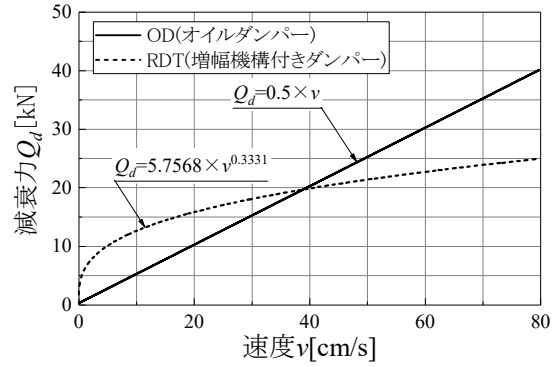


図-3 減衰性能 (振動台実験)

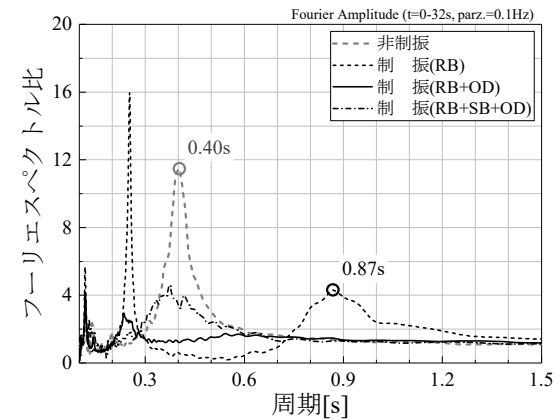
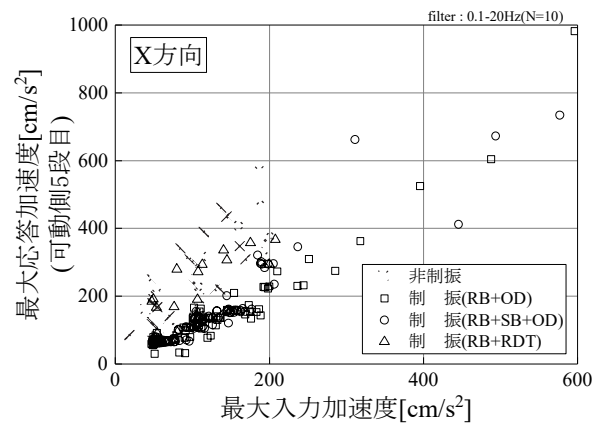
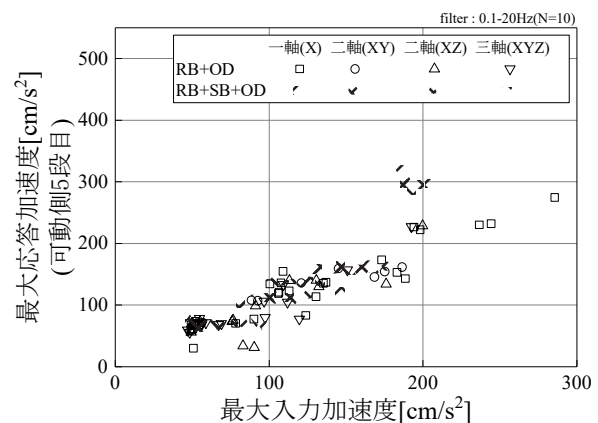


図-4 フーリエスペクトル比 (可動側 5 段目/加振波)



(a) 制振ラックと非制振ラックの比較 (一軸加振)



(b) 一、二、三軸加振の比較

図-5 最大入力加速度と最大応答加速度の関係

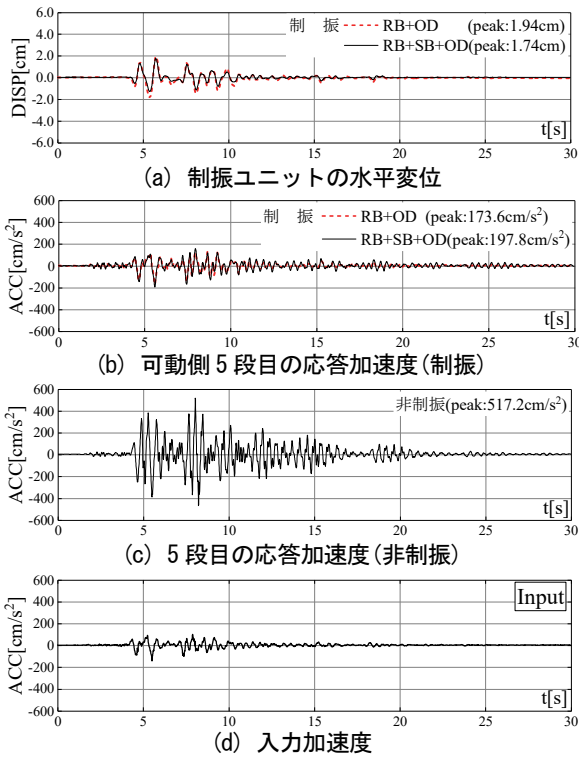


図-6 実験結果の時刻歴波形(神戸波(NS)、150cm/s<sup>2</sup>)

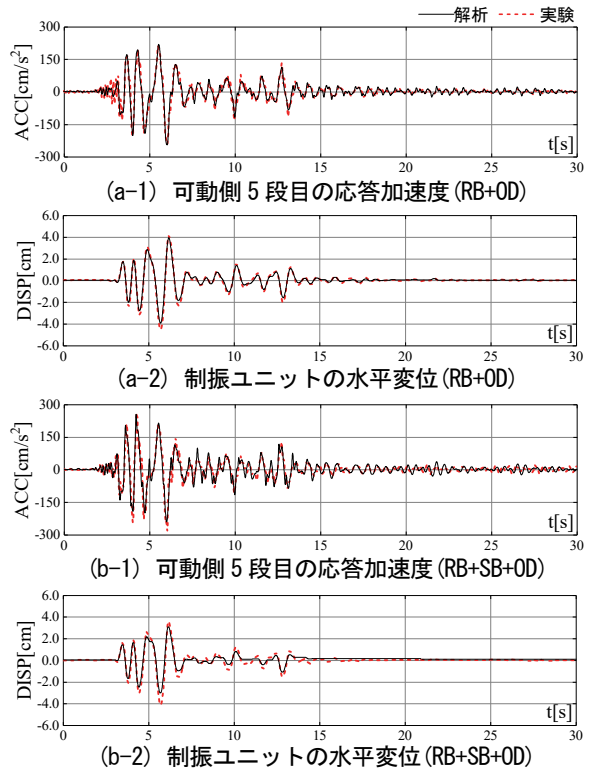


図-8 実験結果と解析結果の比較(益城波(EW)、200cm/s<sup>2</sup>)

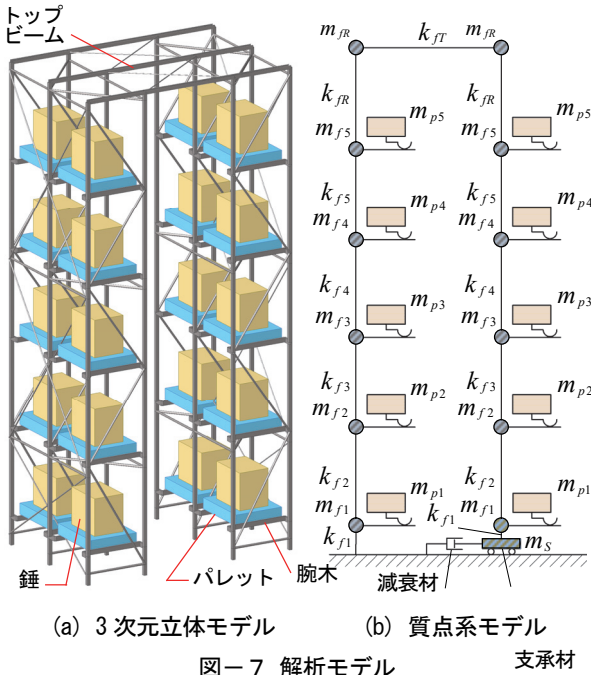


図-7 解析モデル

表-3 質点系モデルの諸元

Layer	高さ $h_i$ [cm]	質量		水平剛性 $k_f$ [kN/cm]
		ラックフレーム $m_f$ [kg]	積荷+パレット $m_p$ [kg]	
T	—	—	—	1696.2
R	670.0	51.0	—	14.6
5	536.0	44.2	1496.4	28.4
4	416.5	61.9	1496.4	21.9
3	287.0	44.0	1506.4	39.2
2	167.5	64.6	1526.4	116.7
1	38.0	59.5	1546.4	39.7
S	0.0	69.0	—	—

剛性を算定した。図-7 (b)に質点系モデルを、表-3に質点系モデルの諸元を示す。なお、顶部に考慮した水平剛性はトップビームの軸剛性とした。ラックフレームの減衰は初期剛性比例型とし、1次固有円振動数に対して等価減衰定数  $h_{eq}$  を1.5%とし、腕木とパレットの摩擦係数  $\mu$  は0.35<sup>4)5)</sup>とした。制振ユニット部の内部粘性減衰はないものとし、支承材の摩擦減衰、および減衰材の粘性減衰のみを考慮した。ここで、RBとSBの摩擦係数  $\mu$  は、0.0065、0.05とした。

振動台実験結果と解析結果の時刻歴波形の比較を図-8に示す。(a)にRB+ODの場合、(b)にRB+SB+ODの場合を示す。支承材の製造ばらつき、面圧、速度、温度、繰返し依存性や減衰材の製造ばらつき、繰返し依存性を考慮した解析は行っていないが、解析結果は実験結果と良い対応を示しており、解析方法は地震時応答を概ね評価できることを確認した。

#### 4. 地震観測

##### 4.1 地震観測の概要

奥村組技術研究所(茨城県つくば市)内にあるラックの一部に、開発した制振ラックを適用した。制振ラックの適用効果を確認するため、2017年4月から地震観測を行っている。

ラック配置図と観測点を図-9に、制振ユニットの配置図を図-10に示す。ラックの総高さは約7.3mあり、自動搬送機1台あたり2列×14~15連×5段の積荷が収容

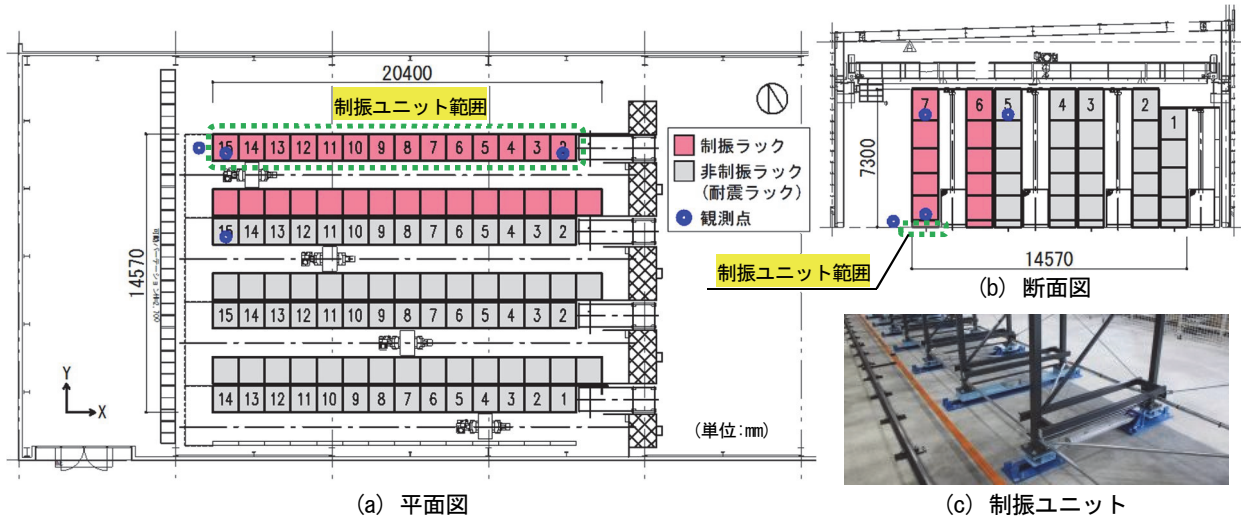


図-9 ラック配置図と観測点

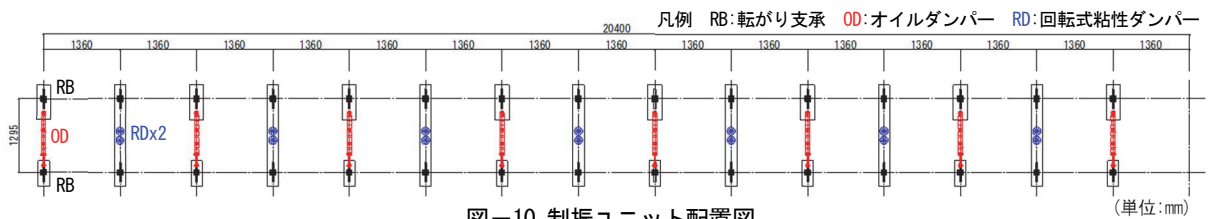


図-10 制振ユニット配置図

できる。観測点は、制振ラックの制振効果や積荷の配置状況の違いによる揺れ振動の影響を確認するため、床面、制振ラックの西側1段目、5段目、東側5段目、耐震ラックの西側5段目の計5カ所とした。ラックの間口方向をY方向とし、個々の観測点において水平2方向、鉛直1方向の加速度を観測した。なお、床面で震度1以上(計測震度0.5以上)の地震を対象に収録し、サンプリング間隔を0.01秒とした。制振ユニットは、RB×30基、OD×8基に加え、回転式粘性ダンパー(以下、RD)×14基を設けている。図-11に制振ユニットで用いたダンパー1基あたりの減衰性能(基準特性)を示す。

4.2 地震観測結果

2018年1月までの10ヵ月間で記録した観測回数は計52回となり、計測震度4の地震を2回観測することができた。なお、ダンパー種別による減衰効果の違いを確認するため、RD、OD両ダンパーを取付けた場合を約4ヵ月間、ODのみを取付けた場合を約1ヵ月間、両ダンパーを取り外した場合を約5ヵ月間観測した。全観測記録を対象とし、床面の最大加速度に対する5段目の最大応答加速度倍率(Y方向)を図-12に示す。非制振ラックの5段目最大応答加速度は、観測波によりばらつきがあるが、平均すると3.2倍程度に増幅していた。これに対し、制振ラックは2.1倍程度となり、非制振ラックに比べ最大応答加速度を65%程度に低減していることが分かる。制振ラックの最大応答加速度倍率の平均値は、RBのみの場合で1.8倍、RB+ODの場合で3.1倍、RB+OD+RDの場合で2.3倍となり、RBのみの場合が最も小さい結果となった。この原因としては、制振ラックが極めて稀に生

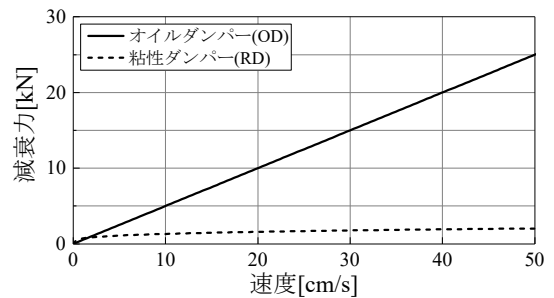


図-11 減衰性能

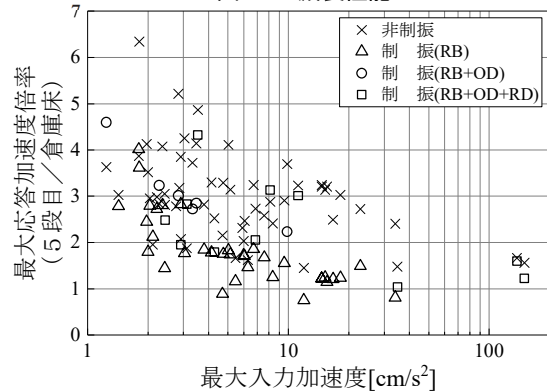


図-12 最大応答加速度倍率(Y方向)

じる地震動に対して、自動搬送機との水平クリアランスを確保するために、制振ユニットの最大水平変位が±10cm以下となるようなダンパー量を設けたため、入力レベルに対してダンパーの減衰力が過度に働いたことなどが挙げられる。

計測震度4を記録した地震における制振ラック(RB+OD+RD)と非制振ラックの間口方向(Y方向)応答の比較を図-13に示す。なお、ラック振動系の主

要動の範囲である、0.1Hz から20Hz に着目するためにバンドパスフィルター処理を施している。図-13(a)、(b)より床面で記録した最大加速度149.8cm/s<sup>2</sup>に対して、非制振ラック 5 段目の最大応答加速度は233.6cm/s<sup>2</sup>、制振ラック 5 段目では 183.6 cm/s<sup>2</sup>となった。非制振ラックと制振ラックでは、積荷の重量や配置条件が異なるが、5 段目の最大応答加速度を比較すると、制振ラックを導入することで、概ね80%に低減していることが分かる。なお、このときのラックの1次固有周期は、倉庫床に対する5段目の応答加速度のフーリエスペクトル比から、非制振ラックで0.16秒程度、制振ラックで0.29秒程度であった。図-13(c)より、制振ラック5段目のフーリエ振幅は、制振ラックの1次固有周期より短周期領域において非制振ラックよりも小さくなり、短周期側の加速度応答に対して加速度応答の低減効果があることが確認できた。引き続き地震観測を行い、制振効果を確認していきたい。

## 5. まとめ

間口方向を対象に制振構造となる制振ラックについて、支承材の低廉化に加え、既存ラックにも容易に適用できるすべり支承を開発した。支承材や減衰材の組合せをパラメータとして、その適用効果を振動台実験により確認し、得られた実験結果と地震応答解析結果を比較した。

また、制振ラックを実適用して地震観測を行い、適用効果を確認した。主な結論を以下に示す。

- i. 振動台実験より、転がり支承と開発した簡易なすべり支承を併用した場合でも、転がり支承のみの場合と同等の制振効果があり、非制振に比べ最上段の最大応答加速度を概ね50%に低減し、積荷の荷崩れや落下の防止策として有効である
- ii. 地震終了後に制振ユニットの水平変位は概ね元の位置に復元し、残留変位が生じ難いことを確認した
- iii. 地震応答解析の結果は振動台実験結果とよい対応を示しており、制振ユニットの支承材、減衰材やラックの仕様に応じた制振ラックの設計に適用できる
- iv. 地震観測記録より、積荷の重量や配置条件が異なるものの、震度4程度の地震において、非制振ラックに比べ制振ラックは、制振ラックの1次固有周期以下の短周期領域で応答加速度を低減した
- v. 震度4以下程度の地震に対して、制振ラックはラック最上段の最大応答加速度を、非制振ラックに比べ概ね65%に低減した

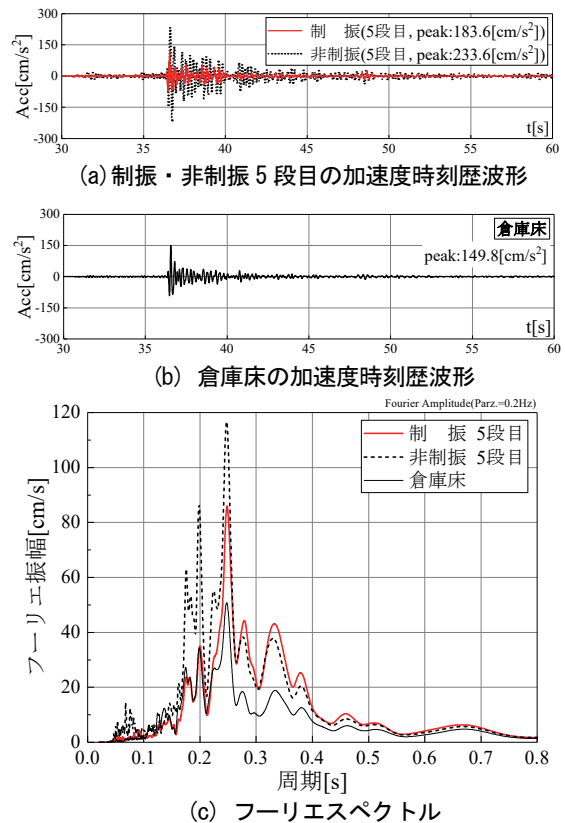


図-13 観測結果の一例 (Y 方向、計測震度 4)

## 【謝辞】

本研究では、防災科学技術研究所が提供する強震観測網 K-NET の地震動データ、および国土交通省(気象庁)が提供する強震観測データを使用させて頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

## 【参考文献】

- 1) 舟木秀尊他、「片側の柱脚が滑動する立体自動倉庫ラックの制振効果に関する研究」、日本建築学会構造工学論文集 Vol.64B, pp.287-294、2018.3
- 2) 舟木秀尊、舟山勇司、小山慶樹、「立体自動倉庫に適用する制振技術の開発」、奥村組技術研究年報、2016.9
- 3) 小山慶樹、舟木秀尊、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)、(その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) 舟木秀尊、小山慶樹、舟山勇司、澤田 毅、隈澤文俊、「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」、日本建築学会技術報告集、pp.47-52、2018.2
- 5) 舟木秀尊他、小山慶樹、舟山 勇、「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)、(その2)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造II、pp.841-844、2017.8