

# 立体自動倉庫用の制震構法の開発

## 積荷自体を大重量の TMD として利用する BCP 対策技術

矢口 友貴・栗野 治彦

2011年の東北地方太平洋沖地震では、立体自動倉庫内のラックから積荷が落下し、倉庫機能の復旧に多大な時間を要する事例が多発した。一方、積荷をラック架構に固定すると、地震時にはより大きな地震力がラック主フレームに作用して甚大な損傷が生じることが懸念されるため、事業継続性（BCP）の向上を目的とした応答低減技術が求められている。このようなニーズに対応するため様々な取り組みがなされているが、倉庫の運用面や地震時における効果面での課題から、いずれも広く普及するには至っていない。本稿では、自動ラック倉庫内に収容される積荷自体を TMD（Tuned Mass Damper）の錘として利用することによりこれらの課題を解決した、新しい立体自動ラック倉庫用の制震構法の開発について紹介する。  
キーワード：自動ラック倉庫，制震，TMD，積荷，BCP

### 1. はじめに

立体自動ラック倉庫は、自動搬送機（スタッカークレーン）を備え、クレーン通路を挟んで配置された高層のラックに荷を立体保管する自動倉庫である。図-1に架構イメージを示す。架構短辺方向は組立材とした片持柱構造であり、架構長辺方向は荷室の背面に配置された鉛直ブレースで地震力に抵抗する。自動ラック倉庫は、ラック架構に直接外装材が取り付けられ建屋を兼ねる「ビル式」と、建屋内にラックが独立に設置される「ユニット式」とに大別される。架構全体に対して積荷重量の占める割合が支配的であることが特

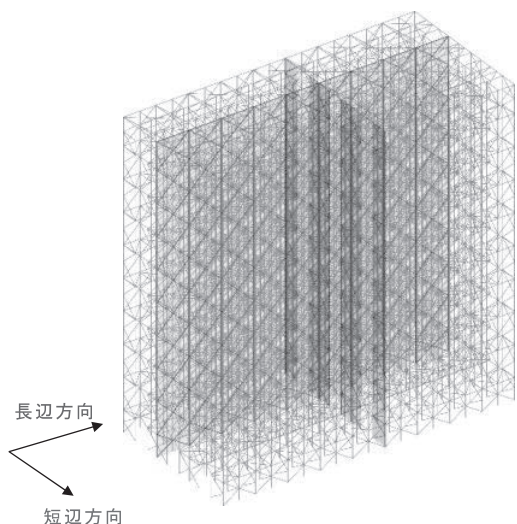


図-1 立体自動倉庫の架構イメージ

徴であり、積荷重量の割合が相対的に小さいビル式でも50%を上回る。また積荷は、腕木と呼ばれる部材上に収容されるが、固定機構を有さないため大地震時には荷が滑動し、非線形性の強い挙動を示すことも大きな特徴である。

2011年の東北地方太平洋沖地震では、特に高さ20～30mという比較的高層のラックで、地震に伴って積荷が大きく滑動してクレーン通路に落下した。このため、長期間に渡り倉庫の運行が停止しその後の生産や物流機能に多大な影響を及ぼすこととなった。しかしこれを防ぐため積荷をラック架構に固定すると、地震時にラック架構に設計荷重を上回る力が作用し、特に塔状比の大きいラック短辺方向で下層部の柱や柱脚などが損傷し、却って復旧に多大な時間とコストを要することが懸念される。

これを受けて筆者らは、2013年に自動ラック用制震構法として、屋根裏の空間を利用してオイルダンパを配置する構法を開発した<sup>1)</sup>。構法の概要を図-2に示す。これはラック架構短辺方向を対象に、上部が大きくしなるように変形する性状に着目したもので、効率的にエネルギー吸収が図れることから中小地震から大地震まで安定した応答低減効果が期待できる構法である。複数の既存倉庫の改修工事へ適用された実績を有する一方で、屋根裏に余剰空間が無い場合には適用できない点が課題であった。

そこで、既往構法の空間的な制約を受けるデメリットを解消しつつ、大地震時まで安定した効果を発揮す



図-2 屋根裏空間を利用した制震構法

るメリットを維持した新しい制震構法を開発した。本稿では構法の概要と装置の開発、応答低減効果の確認のために実施した振動台実験について報告する。

## 2. 開発構法の狙い

古くから知られる制震技術に TMD (Tuned Mass Damper) がある。図-3 は TMD の原理を模式的に示したものである。錘の周期を本体架構に同調させておくと、共振現象が生じ、錘は本体架構より 1/4 サイクル (位相 90 度) 遅れて揺れるため、反力は建物の速度に対する抵抗力 (減衰力) として作用するというものである。図-3 中には示していないが、錘の運動エネルギーに変換された建物振動エネルギーは、TMD に付属するオイルダンパにより熱として消散される。なお、TMD の効果は本体架構に対する錘質量の割合、すなわち「質量比」で限界付けられる。

この原理を用いて、ラックの荷室最上段を使用して小型の TMD を設置する試みが報告されている<sup>例えは2)</sup>。荷室空間を利用するため、対象を選ばない点でメリットがあるが、大地震まで対応するには以下に示す点が課題である。一点目は倉庫本体の機能である荷の収容量が減少する点である。腕木部材の設計荷重の制限により一つの荷室に設置できる TMD の錘重量には限界

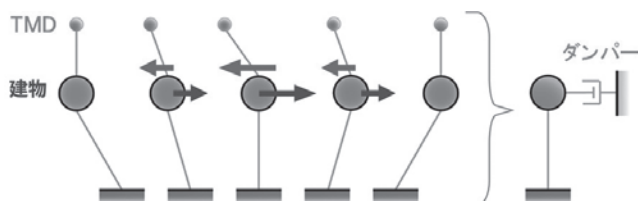
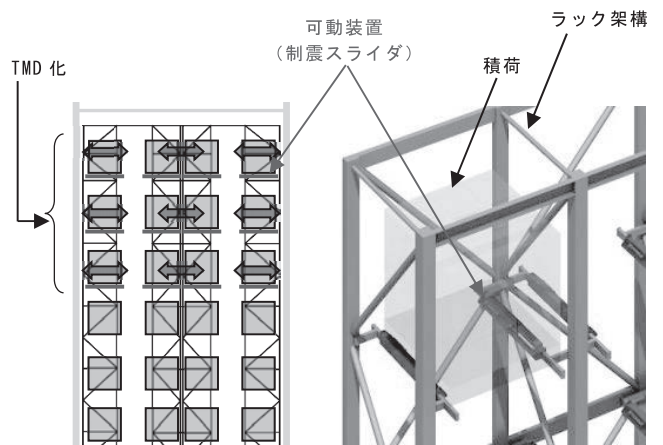


図-3 TMD の原理

があり、十分な効果を得ようとする、多くの荷室を占有する必要があるためである。二点目は同調ずれによる応答低減効果の低下である。TMD は錘を本体架構に同調させる必要があるが、先に述べた通り地震時の強い非線形的な挙動を示す自動ラック倉庫では、大地震時には十分な効果が得られないことが想定される。三点目は錘の可動量 (ストローク) の問題である。荷室という限られた空間を利用して TMD を設置するため、ストロークを当該範囲内に抑える必要があるが、大地震時にはその範囲を超過する懸念がある。

ところで筆者らは既往の研究で、質量比を大きくした大重量 TMD を有する系の応答性状を詳細に分析し<sup>3)</sup>、主に次の二点の特長が得られることを指摘した。一点目は同調ずれに対して安定した応答低減効果が得られること、二点目はストロークが小さく抑えられることである。これらの性状に着目し、積荷自体を TMD の錘として利用することで、荷の収容率に影響を与えることなく大重量の TMD を構成することが本開発構法の狙いである。図-4 に開発構法のコンセプトを示す。ラック上段の荷室の腕木に、剛性及び減衰要素を含み円滑に摺動する可動装置を配置することで、パレットに積載されて収容される積荷を、地震時に TMD として挙動させるものである。先に述べた通り、ラック架構は積荷重量の占める割合が支配的な架構であり、上から 1/3 ~ 1/2 の範囲の積荷を TMD 化すれば、十分に大きな質量比を確保することが可能である。地震時において積荷の滑動に伴い生じるラック架構の非線形的な挙動により生じる同調ずれはもちろん、倉庫の運用上不可避な荷重の偏在やバラつきに対応し、限られた荷室空間内における必要な変位量を小さく設定することが可能となる。

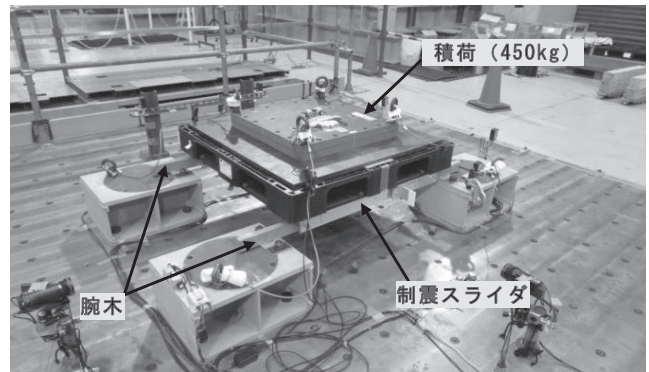


(a) 動作概念 (b) 可動装置の設置イメージ

図-4 開発構法のコンセプト

### 3. 可動装置「制震スライダ」の開発

本構法を実現するための可動装置は、スタッカークレーンの運行などの倉庫機能を阻害しないよう、極力小型化する必要があることから、腕木材に被せるように配置する二本のスライダ型で構成した（以下「制震スライダ」）。開発した制震スライダ実機の構成を図一5に、外観を写真一1に示す。折り曲げ加工した鋼板を摺動材を挟んで上下に重ね、両者をコイルばね及びオイルダンパで接続したシンプルな構成である。下部鋼板は腕木材にボルトで固定し（固定側）、積荷と接する面に滑り止めを施した上部鋼板は地震時には積荷と共に可動する（可動側）。スタッカークレーンの運行に影響を与えないよう腕木上端から制震スライダ上端までの設置高さは50mm以下、質量は腕木部材の設計に影響を与えないよう平均的な積荷質量の1%程度である5kg以下を開発目標とした。固定機構はボルトの出し入れによりあらゆる腕木サイズに対応可能な取り付けであり、万一のオイルダンパの油漏れに備えて鋼板を折り返して構成したオイルパンは、上部鋼板のストッパの役割も兼ねている。制震スライダの具体的な仕様を図一5に示す。平均的な積荷400～500kgを仮定して事前のシミュレーション解析結果に基づき設定したものであり、対象とする高さ20～



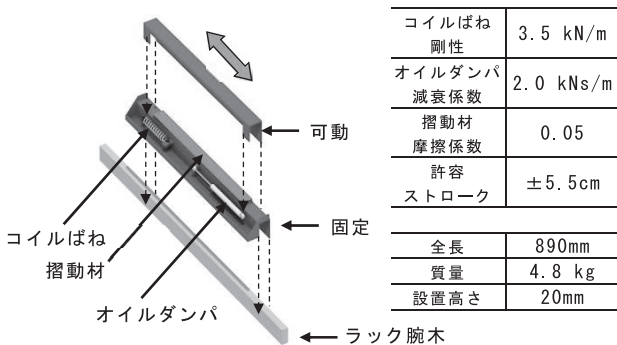
写真一2 制震スライダの予備試験状況

30m級のラックを包絡する汎用的な仕様設定となっている。

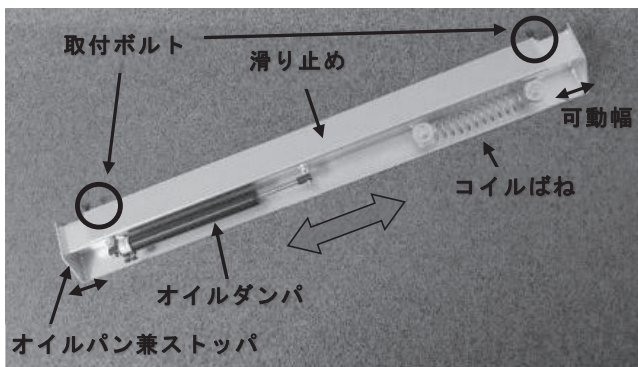
制震スライダの取り付けや地震時の挙動を確認することを目的として実施した予備試験の状況を写真一2に示す。ラックの腕木材を模擬した角パイプ材に制震スライダを設置しており、積荷はパレットに合計450kgの鋼板を積層して縫い付けることで表現した。30m級ラックの解析モデルで評価した上段部の腕木位置における告示L2波相当の地震応答波を入力した結果、下部鋼板は取付ボルトで確実に固定され、上部鋼板は円滑に挙動することを確認した。

### 4. 実大試験体による振動台実験

開発構法の効果検証を目的とし、実大の試験体を用いた振動台実験を実施した。振動台上へ設置する試験体の重量及び高さの制限から、上層3段分のみを実大のラック架構とし、天然ゴム系積層ゴムと鉄骨部材からなる架台（以下、調整フレーム）を組み合わせた試験体とした（図一6、写真一3）。調整フレームを二段組の構成とすることで、1次固有周期や制震効果の評価に直結する錘位置における1次の有効質量を対応させることはもちろん、上段部における刺激関数や2次モードの振動成分を表現することができ、より実状に近い自動ラックの高層部の挙動を再現できる計画とした。なお、スライダ直交方向入力の影響を確認するため、相対的に周期が短いラック長辺方向の挙動は、調整フレーム下段を拘束することで表現した。試験体のラック架構部の積荷の状態としては、荷がない状態のもの（①積荷なし）、従来通り積荷が単に置かれているもの（②積荷従来）、積荷が腕木に固定されているもの（③積荷固定）、開発した制震スライダ上に積荷を設置したもの（④制震スライダ）の4ケースを想定し、積荷はパレット上に鋼板を積層してラック架構に配置した。



図一5 制震スライダの構成および仕様



写真一1 制震スライダの外観

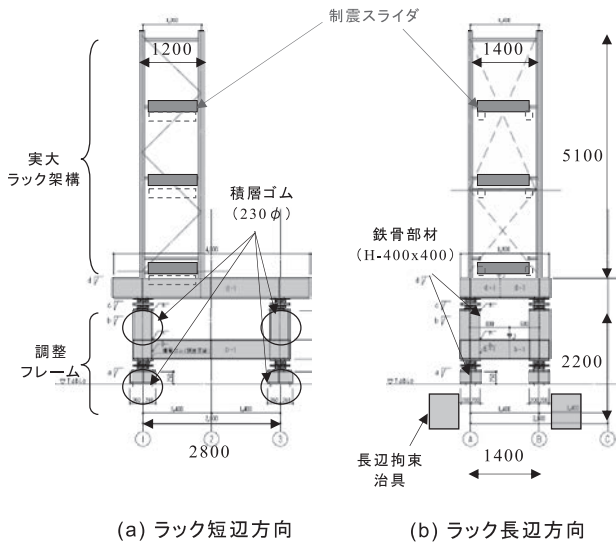


図-6 試験体の概要

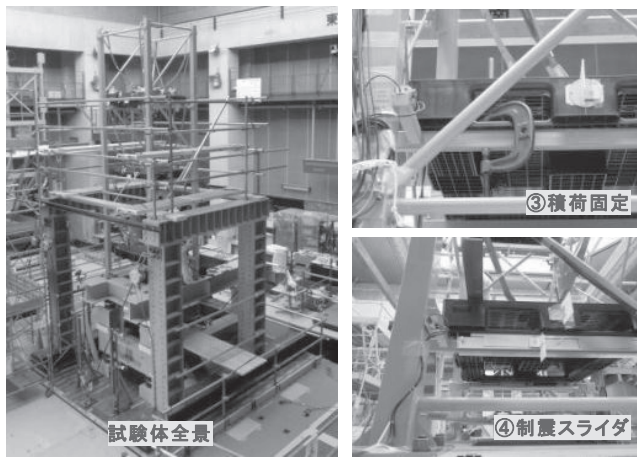


写真-3 試験体の外観

振動数を変化させた正弦波加振を行い、共振曲線を取得した。入力加速度を50 galとし、入力に対するラック架構頂部の加速度応答倍率を整理し、積荷の状態を変化させて3ケース（①積荷なし，③積荷固定，④制震スライダ）の結果を図-7にそれぞれ示す。①，③のケースと④のケースを比較すると、応答倍率が大幅に低減されており、大重量TMDの効果により約10%という大きな減衰が付加されていることが確認できる。

地震波加振では、水平2方向+上下方向の入力に対する効果、及び解析モデルの検証を意図し、東北地方太平洋沖地震の記録のうちラック架構の周期帯である1秒近傍で大きな成分が観測されたK-NET 江戸崎（茨城県、図-8）を採用した。主要動部分60秒を抜き出し、ラック短辺方向にEW成分を、長辺方向にNS成分をそれぞれ入力した。図-9はラック架構を表す調整フレーム上段の変位波形を、②と④のケースを比較して示したものである。②積荷従来

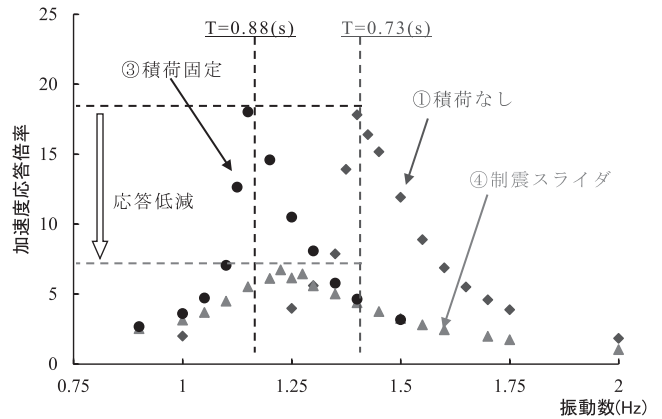


図-7 試験体の加速度応答倍率

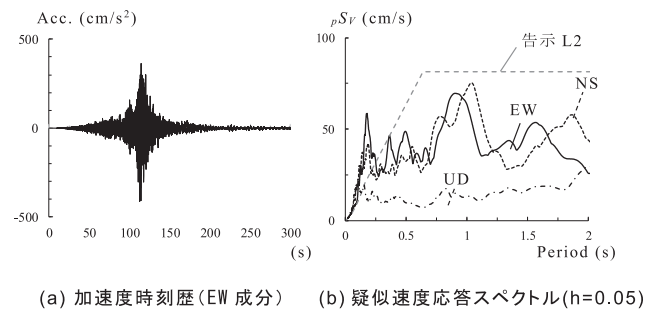


図-8 採用地震波

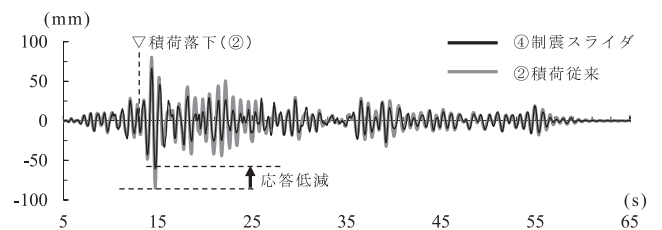


図-9 ラック架構部を表す調整フレームの変位時刻歴

は、加振前半で積荷の落下が発生した一方で、④制震スライダのケースでは加振時間中にわたり積荷は落下することなく安定して挙動した。応答レベルとしても、④は積荷の落下が発生した②を下回っており、本構法による地震時における応答低減効果が確認された。

### 5. 効果と特長

以下に本開発構法の効果と特長をまとめる。

- ①ラックの上から1/3～1/2の範囲に制震スライダを設定し、積荷をTMDの錘として利用
- ②荷の収容率に一切影響を与えることなく、震度6クラスの大地震に対し、積荷の落下とラック架構の損傷の双方を抑制
- ③ラック架構本体に対して積荷（TMD）の重量比が

格段に大きいため、スタックークレーンの運行に影響の無いわずか数 cm の積荷の動きで大きな制震効果を発揮

- ④積荷の配置を制御する既存のプログラムと連動させ、錘として適切な位置に制御することで、積荷の多寡によらず安定した効果を実現
- ⑤ラックメーカーを問わず新築物件・既存改修の双方に適用可能であり、制震スライダは特別な工具等を必要とせず簡易に取付けが可能
- ⑥メンテナンスは目視点検程度と非常に容易

本構法は 2021 年 8 月現在複数の自動ラック倉庫に適用されている。

## 6. おわりに

本稿では、積荷を TMD の錘として利用する新発想の立体自動ラック倉庫用の制震構法の開発について報告した。自動ラック倉庫は、e コマースの拡大および倉庫従事者の省人化対策などにより、需要の増加が見込まれている。今後さらなる適用展開を積極的に推進し、自動ラック倉庫の BCP 対策ニーズに応じていきたい。

## 謝 辞

本開発では防災科学技術研究所の K-NET の観測記録を使用しました。ここに記して謝意を表します。

JICMA

### 《参考文献》

- 1) 花房, 福島, 矢口, 栗野: 立体自動倉庫に対する制震構法, その 1~2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 - II, pp.831 ~ 834, 2013
- 2) 塚田, 長島, 高木, 日比野, 青野, 出雲: 自動倉庫ラック制震装置の開発, その 1, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 - II, pp.1019 ~ 1020, 2013
- 3) 矢口友貴, 栗野治彦: 動吸振器効果を狙った大重量副振動系を有する制震架構の地震入力に対する汎用的な応答評価手法に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, 86 巻 779 号, P.33-42, 2021.1
- 4) 鹿島建設㈱: 自動ラック倉庫の制震構法「Container Damper System (CDS)」を開発~積荷自体を TMD の錘として利用する新発想の制震構法~, プレスリリース 2019.3
- 5) 鹿島建設㈱: 自動ラック倉庫の制震構法「Container Damper System (CDS)」の初適用が決定~積荷自体を制震装置として利用し, 事業継続性を大幅に向上~, プレスリリース 2020.9

### 【筆者紹介】

矢口 友貴 (やぐち ともき)  
鹿島建設㈱  
建築設計本部 構造設計統括グループ  
チーフエンジニア, 修士 (工学)



栗野 治彦 (くりの はるひこ)  
鹿島建設㈱  
建築設計本部 構造設計統括グループ  
統括グループリーダー, 博士 (工学)

