

自動倉庫ラック制振に関する解析的検討

青野 翔^{*1}・高木 政美^{*1}・日比野 浩^{*1}・長島 一郎^{*1}・出雲 洋治^{*2}

Keywords : rack in automated warehouse, vibration control, mass damper, uplift column, visco-elastic damper

自動倉庫ラック，制振，マスダンパー，浮上り許容柱脚，粘弾性ダンパー

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震では、自動倉庫ラックの保管物が落下し、その復旧にかなりの期間を要するなどの被害が発生した。しかし、有効な自動倉庫ラック保管物の落下対策方法がないのが現状である。

そこで著者らは、簡便で安価な落下対策として、制振による対策法の開発を目指して検討を進めている。本報では、マスダンパー制振ならびに柱脚浮上り制振の効果を検討するために実施した地震応答解析の結果について報告する。

2. 自動倉庫概要

対象とした自動倉庫は、図-1、図-2に示すように、多段、多列に配置された複数のラックを平行に並べて配置し、ラック間をスタッカーカークレーンが走行可能に設置されている。スタッカーカークレーンは支柱に沿って昇降する荷台とパレット上の荷を積み降ろしするためのフォークを備えている。ラック柱には腕木取付部を介して腕木を設け、腕木上に荷を積載したパレットを間口方向から積むようになっている（図-3）。妻面、ラック背面にはブレースが配置されており、大地震時に、荷卸しするための間口から荷が落下して被害が発生する。そのため、妻面方向に対策を行うこととする。

3. マスダンパー制振

3.1 制振方法概要

ラック最上段の腕木の上にマスダンパーを設置する。

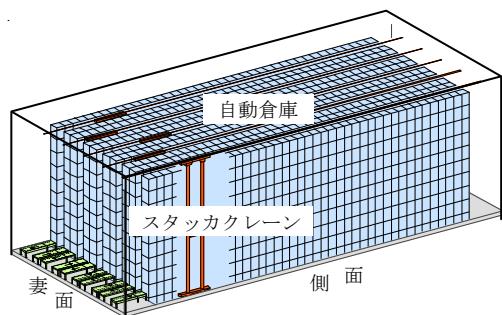


図-1 自動倉庫外観
Fig.1 Overhead view of automated warehouse

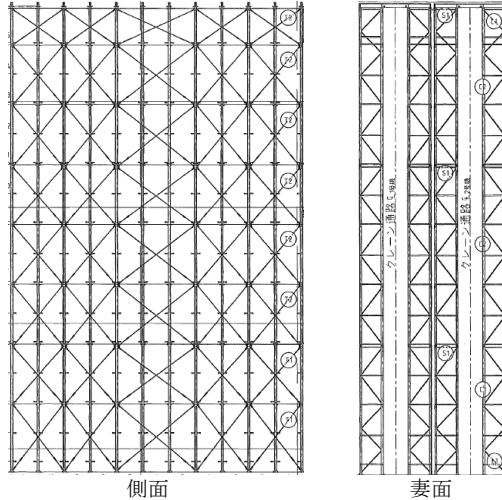


図-2 ラック軸組図
Fig.2 Framing elevation of rack

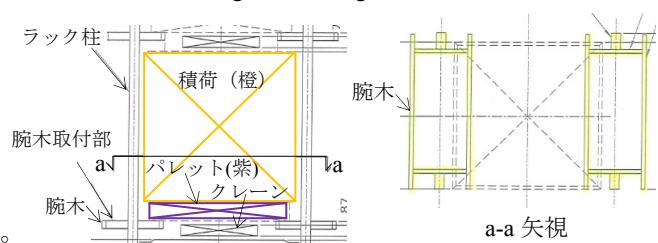


図-3 ラック間口詳細
Fig.3 Details of storage space

*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

マスダンパーの付加質量は図-4に示すように原点復帰用の復元バネと、ダンパーを介してラックに連結される。これによって、ダンパーで地震エネルギーを吸収しラックに高い制振効果を与える。

3.2 効果の検討

制振効果の検討には、1連のラックを取り出し、8質点の曲げせん断モデルに置換した。大地震時には、ラックは非線形領域に入る可能性が高いが、本検討では線形として扱った。マスダンパーは頂部質点に連結し、付加質量とダンパーの減衰係数をパラメータとした。

図-5に解析モデルとマスダンパーの諸元を示す。

検討用地震波としては、既往の地震波の中でマスダンパーなしの状態で最も応答が大きかったエルセントロ NS 波を最大速度 50kine に基準化して用いた。

3.3 検討結果

図-6に加速度周波数応答関数を示す。マスダンパー(以下、MDと記す)により、1次、2次、3次振動数においても応答低減効果がみられ、各次ともほぼ 1/2 以下に低減されている。質量比が大きいほど、低減効果が大きくなる傾向にある。1次振動数(1Hz 付近)に注目すると、質量比 5%，質量比 10%で減衰係数 25, 50, 100N/kine、質量比 15%で減衰係数 50N/kine では MD 無しに比べ約 17%の応答になっている。

次に、地震時の応答低減効果について比較する。表-1にエルセントロ NS 波を最大速度 50kine に基準化して入力した時の応答結果一覧を示し、図-7に MD 質量比と減衰係数に対する加速度低減率および MD の最大ストロークの関係を示す。図-7より次のことが分かる。

- ・ラックの加速度低減率はマス比に依存し、マス比が大きくなると低減効果は大きくなる。ダンパー減衰係数による顕著な依存は認められない。マス比を 10%にすれば 50%以下に低減できる。
- ・MD のストロークは減衰係数を大きくするほど小さくなり、マス比が小さくなると僅かに小さくなる。また減衰係数 25N/kine で、14cm に収まる。

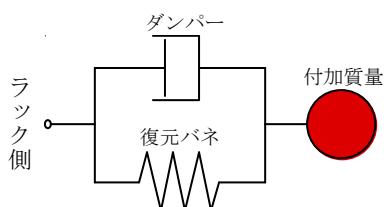


図-4 マスダンパー力学モデル

Fig.4 Dynamic model of mass damper

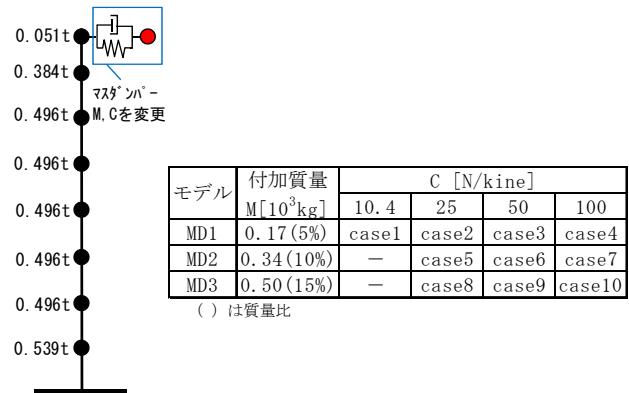


図-5 解析モデルとマスダンパー諸元

Fig.5 Analysis model and parameters of mass damper

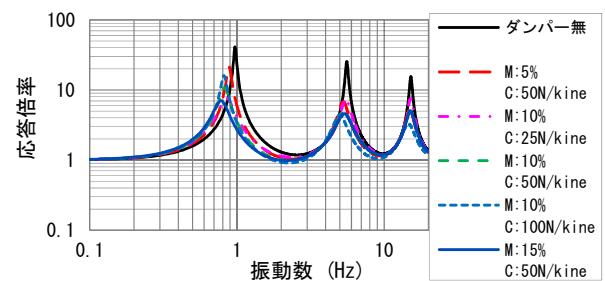


図-6 加速度周波数応答関数

Fig.6 Frequency response function of Acceleration

表-1 最大応答値一覧(MD 制振)

Table 1 List of maximum responses

	加速度 [Gal]		速度 [kine]		変位 [cm]	
	頂部	MD	頂部	MD 相対	頂部	MD 相対
case0 (MD無し)	1966.1	—	270.86	—	-42.12	—
case1 (MD1, M:5%, c=10.4N/kine)	1211.8	689.2	152.15	110.98	25.66	18.30
case2 (MD1, M:5%, c=25N/kine)	61.6%	—	56.2%	—	60.9%	—
case3 (MD1, M:5%, c=50N/kine)	1090	873.5	157.69	58.73	26.70	9.75
case4 (MD1, M:5%, c=100N/kine)	55.4%	—	58.2%	—	63.4%	—
case5 (MD1, M:10%, c=50N/kine)	1055.9	971.2	172.70	32.69	29.17	5.43
case6 (MD2, M:10%, c=25N/kine)	1144.3	1110.3	182.65	18.72	32.23	3.03
case7 (MD2, M:10%, c=50N/kine)	53.7%	—	63.8%	—	69.3%	—
case8 (MD3, M:10%, c=100N/kine)	891.53	499.6	135.04	66.69	20.48	12.90
case9 (MD2, M:10%, c=50N/kine)	45.3%	—	49.9%	—	48.6%	—
case10 (MD3, M:10%, c=100N/kine)	884.16	617.0	131.25	41.34	23.39	7.72
case11 (MD2, M:10%, c=100N/kine)	908.8	759.8	147.45	25.50	27.07	4.59
case12 (MD3, M:15%, c=25N/kine)	46.2%	—	54.4%	—	64.3%	—
case13 (MD3, M:15%, c=50N/kine)	905.9	364.2	127.67	70.99	17.80	13.64
case14 (MD3, M:15%, c=100N/kine)	772.8	462.5	116.73	45.28	18.38	8.45
case15 (MD3, M:15%, c=50N/kine)	39.3%	—	43.1%	—	43.6%	—
case16 (MD3, M:15%, c=100N/kine)	776.6	548.4	110.91	26.93	20.07	4.73
case17 (MD3, M:15%, c=100N/kine)	39.5%	—	40.9%	—	47.7%	—

応答値 下段の%は MD 無しに対する低減率

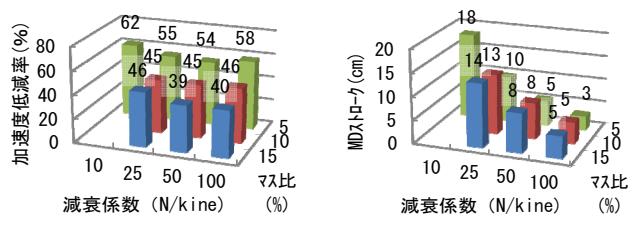


図-7 各応答とマス比、減衰係数との関係

Fig.7 Relation between responses and mass-ratio or C

4. 柱脚浮上り制振

4.1 制振方法概要

前掲の図-2 に示すようなラック構造体は一般的に柱脚をアンカーボルトなどで地面に固定されているが、ここでは柱脚の鉛直方向への浮上りを許し、地震力を受けるとラックにロッキングが生じる機構を考える。これによってラックは見かけ上長周期化し、ラックに加わる地震力を低減することができると考えられるが、柱脚の浮上りを単に自由にしたままで不安定で危険な構造となる。そこで、本対策では柱脚の浮上り部に粘弾性ダンパーを設置し、浮上り変形を粘弾性体に伝えることで地震エネルギーを吸収させるとともに、構造体としての安定性を確保する。

4.2 効果の検討

制振効果の検討には1連のラックを取り出し、幅1.2m×高さ24mの2次元フレームモデルを用いる(図-8)。浮上りを許容するために柱脚部の支持条件を鉛直方向に自由なピン固定とした。柱脚部に取り付ける粘弾性ダンパーのモデルとしては、アクリル系の粘弾性体を使用するものとし、振動数依存性を考慮して0.1Hz～4Hzに対応した6要素モデル¹⁾を使用した(図-9)。なお、温度依存性についてはここでは考慮しない。また、本検討では粘弾性ダンパー量S/d(せん断面積/厚さ)をパラメータとし、適切な配置ダンパー量について簡単な考察を行う。

解析手法としては、柱脚部の接触以外は、すべて線形解析とし、材料非線形、幾何非線形は考慮しなかった。また、ロッキングが生じた際の重力による復元力を考慮するために、すべての質点の鉛直方向に一様に重力加速度を与えるながら水平方向に地震力を与える2次元解析とした。

なお、本解析におけるラックの1次固有周期は柱脚を固定している場合約1秒で、減衰は剛性比例減衰として、1次モードの減衰定数を2%とした。本検討で使用する地震波は、エルセントロ NS 波、タフト EW 波および八戸 NS 波を 50kine 相当に基準化した3波とした。図-10に3波の擬似速度応答スペクトルを示す。

4.3 検討結果

表-2にラック頂部の加速度と変位、および柱脚の浮上り変位量と柱脚の層せん断力の各ケースにおける最大値一覧を示す。また図-11に加速度、変位および層せん断力の最大値の高さ方向の分布を示す。

まず加速度について、表-2、図-11および図-12に示したエルセントロ波を入力した際の加速度波形からわ

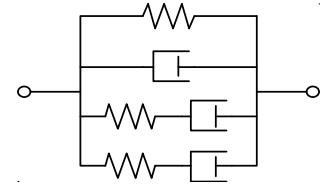
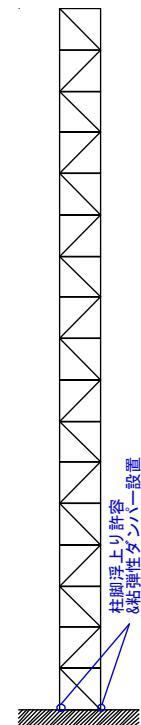


図-9 ダンパー6要素モデル
Fig.9 6 elements model of damper

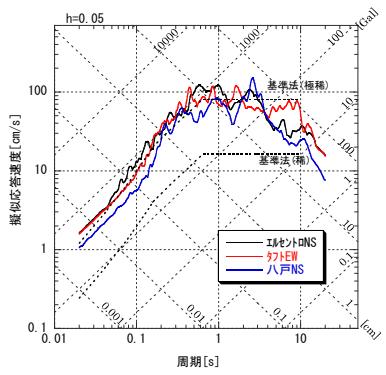


図-10 検討地震波応答スペクトル

図-8 フレームモデル Fig.10 Pseudo-velocity response spectrum
Fig.8 Frame model

表-2 最大応答値一覧 (柱脚浮上り制振)

Table 2 List of maximum responses

地震波	ダンパー量 S/d [m]	柱脚固定		柱脚浮上量 D _{ZB} [cm]	ベーリング S/d × D _{ZB} [cm ²]
		頂部加速度 A _T [Gal]	頂部変位 D _{XT} [cm]		
エルセントロ NS	柱脚固定	1997	41.6	—	22.2
	140	1098	22.1	0.41	10.0
	56	986	19.2	0.54	7.8
	28	990	29.6	1.04	7.2
	14	1165	43.5	1.71	6.7
	0	970	65.5	2.93	9.0
タフト EW	柱脚固定	1255	26.0	—	14.9
	140	932	18.0	0.31	10.0
	56	961	24.3	0.66	10.6
	28	794	24.6	0.88	7.8
	14	826	21.3	0.79	7.4
	0	937	301.7	13.89	12.4
八戸 NS	柱脚固定	1413	34.5	—	17.0
	140	661	19.9	0.37	8.8
	56	613	20.6	0.57	6.9
	28	816	23.2	0.82	8.9
	14	486	45.6	1.86	7.0
	0	626	69.8	3.08	5.0

かるように、柱脚を固定したものに対して、柱脚の浮上りを許容したもの(S/d=0)、及び柱脚に粘弾性ダンパーを入れたもの(S/d=14,28,56m)は、加速度を大幅に低減できている。ダンパーなしのケースでも加速度を低減できているのは、浮上りを許容することでロッキング動が励起され、長周期化することにより免震効果が得られたものと考えられる。

しかし変位については、柱脚の浮上りを許容したダンパーなしのケースでは、タフト波で頂部変位が3mを超えるなど、ロッキングに対する有効な減衰要素がないために変位が増大する傾向があった。これに対して、ダンパーを使用しているケースでは、比較的ダンパー量の少ないS/d=14mで変位がやや大きくなる傾向が見られたが、他のケースでは概ね低減されており、対策なしの頂部変位が最大で42cmほどであるのに対し、ダンパー量の多いS/d=140mでは22cm程度に抑えられた。

また層せん断力について見ると、柱脚の浮上りを許容した場合、固定した場合に比べて大幅に低減できていることがわかる。これは浮上りを許容することで、ラックの振動において、柱にせん断のかからないロッキングモードが支配的になるためであると考えられる。

最後に粘弾性ダンパーのサイズについて検討する。表-2中に示したS/d×D_{ZB}は、粘弾性体の許容せん断歪を100%とし、粘弾性体の厚さをd=D_{ZB}とした場合の必要せん断面積に相当する。例えば、表-2のS/d=28mのケースで、今回使用した3波に対してD_{ZB}は最大1.04cmなので、粘弾性体の厚さをこれと等しいとし、許容せん断歪を100%とすると、必要せん断面積は約2913cm²であり、6面せん断とすると1面当たり約500cm²となる。すなわち厚さ1cmで20cm×25cm程度の粘弾性体を6枚重ねた粘弾性ダンパーを設置すればよい。自動倉庫ラックの柱脚部への具体的な取付ディテールについては、ラックの種類に応じた検討を今後進める予定である。

5. まとめ

マスダンパー制振および柱脚浮上り制振の効果を地震応答解析により検証し、ラックの応答を大幅に低減でき、ダンパーの応答としても実現可能な範囲に収まっていることを確認した。今後は、実際の物件への適用検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 櫛木龍大、辻田修、成原弘之、高山正春、木村雄一、一色裕二：弾塑性・粘弾性複合ダンパーの開発（その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.761-762，2002

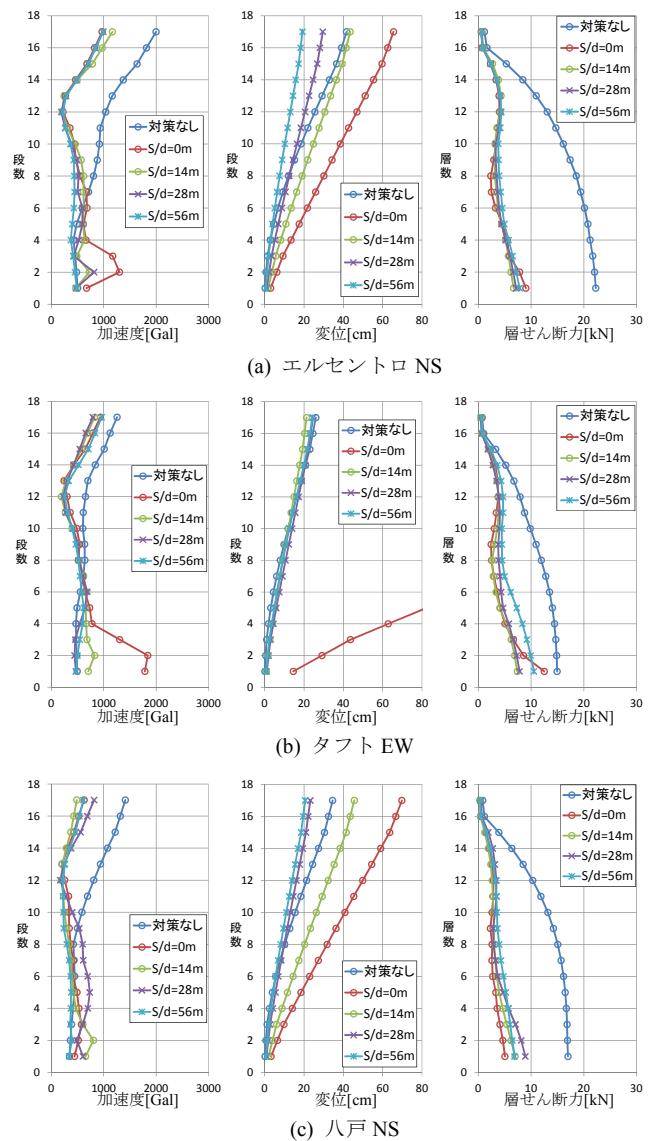


図-11 最大応答値分布

Fig.11 Vertical distribution of maximum responses

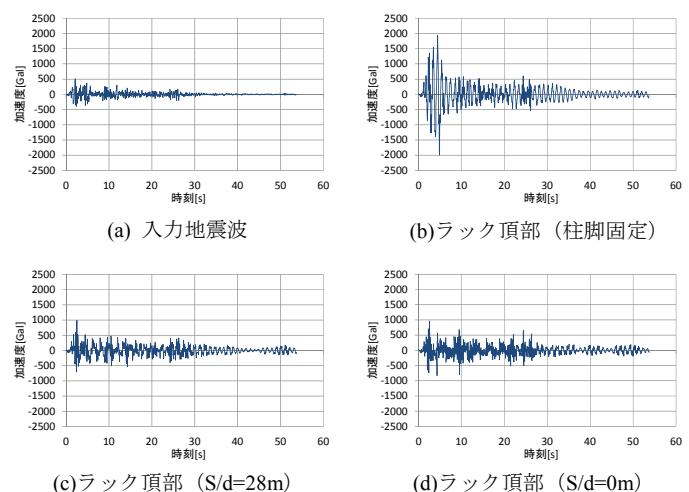


図-12 加速度波形の比較 (エルセントロ NS)

Fig.12 Comparison of acceleration waveforms