

ラックと建屋をダンパーで連結した立体自動倉庫の制振技術

吉田 治 後 閑 章 吉 松 本 研 一
(本社設計本部) (本社設計本部)

富 橋 直 哉 鈴 木 基 倫 佐 野 剛 志
(広島支店建築設計部) (名古屋支店構造設計部)

Vibration Control Method for Automated Storage and Retrieval Systems using Damper Connection between Racks and their Outer Building

Osamu Yoshida Shokichi Gokan Kenichi Matsumoto
Naoya Tomihashi Motomicih Suzuki Takeshi Sano

Abstract

To mitigate the damage to automated storage and retrieval systems caused by seismic motion, a vibration control method using damper connections between racks and their outer building was developed. A 1/2 scaled model of the system was installed on a shaking table and its vibration control performance was evaluated. As a result, it was found that the damping ratio of the rack has been increased to about 20%, and the maximum acceleration response of the top of the rack due to seismic motion reduced to less than 1/3 of that of the original uncontrolled rack. This result agreed with the analytical result.

概 要

立体自動倉庫の地震対策技術として、積荷を収納するラックと外周建屋をダンパーで連結して応答低減を図る連結制振技術を開発した。三次元振動台上に実物の1/2スケールのラックと建屋からなる縮小試験体を設置して加振実験を行い、連結制振技術の制振効果を検証した。その結果、非制振では1%未満と非常に小さかったラックの減衰は、連結制振技術の適用により20%程度に大きく上昇し、振動台に地震波を入力した時のラック最上段の最大応答加速度は最大で非制振の1/3以下に低減されることが確認された。この結果は解析による検証結果と概ね一致した。

1. はじめに

近年では、物流施設の効率化のために、積荷を収納するラックが高層化し、ラック間にスタッカークレーンを配置して、自動で積荷の出入庫管理を行う大型の立体自動倉庫が増えてきている。

2011年3月11日に発生した東日本大震災では、東北地方から関東地方にかけて広範囲にわたって震度5弱以上が生じた。これに伴い、立体自動倉庫では、ラックの構造体自体には大きな被害が生じなくても、大きな揺れによってラックから積荷が落下するなどして、復旧までに多大な時間を要する結果となり、その間、物流機能が停止して社会的に大きな影響を及ぼした。

一般的に、積荷が落下するラックの応答加速度などの条件は、積荷の種類及び積み付けパターン、加振振動数によって異なる。従って、実施設計においては、積荷の情報と解析や実測により求めたラックの固有振動数より、積荷の落下を防止するためのラックの応答に対するクライテリアを設定することとなる。場合によっては、実際の積荷を振動台によって加振してクライテリアを設定することも考えられる。このようにして、どの程度の地震に対してどの程度までラックの応答を低減させる必要が

あるかを見極めた上で最適な対策技術を選択する。

外周建屋とは独立したユニット式のラックの場合、このような問題に対処するための地震対策技術としては、Fig. 1に示すように、ラック頂部にTMD (Tuned Mass Damper ; 同調質量ダンパー) と呼ばれる制振装置を設置する、外周建屋とラック頂部を制振装置 (ダンパー) で連結する、ラック基礎部分を免震化する、さらに免震化したラックをアクティブ制御装置で制御するといった技術が考えられる。

この中から、コスト、工期ともある程度に抑えることができ、地震時に積荷が落下する被害も最小限に抑えられる有効な地震対策として、著者らはユニット式のラックと建屋をダンパーで連結する連結制振技術を開発した。

この制振手法の設計目標は、震度5強程度以下の比較的発生確率の高い地震に対して、積荷の落下を最小限に留めることである。また、この連結制振では、ラックだけでなく建屋の揺れも低減でき、既存建物にも適用可能である。

本報では、まず、開発した連結制振技術の概要を述べる。次に、連結制振技術の制振効果を検証するために行った実物の1/2スケールの縮小試験体の加振実験結果について述べ、解析によってその結果を検証する。

	従来 (耐震構造案)	TMD案	連結制振案	ラック免震案	スーパーアクティブ制振 「ラビュタ2D」
イメージ図					
	従来の倉庫	ラック頂部にTMDを設置	建屋とラックを制振デバイスにより連結	ラック範囲のみを免震化	ラック免震にアクティブ制御装置を設置
コスト	← 低 ————— 高 →				
工期	← 短 ————— 長 →				
地震時の被害 (保管物の滑落)	← 大 ————— 小 →				
	被害が大きい	被害を抑えられる	被害を最小限に抑えられる	ほぼ被害なし	荷ずれも抑えられる

Fig. 1 立体自動倉庫の地震対策技術
Vibration Control Methods for Automated Storage and Retrieval Systems

2. 連結制振技術の概要

Fig. 2に立体自動倉庫の連結制振の概要図を示す。この図に示す通り、ユニット式ラックと建屋を制振装置（ダンパー）で連結した構造となっている。

これは、一般的に、質量が小さくて剛性の高い構造体と質量が大きくて剛性の低い構造体をダンパーで連結すると非常に大きな制振効果（減衰）が得られるという理論に基づくものである¹⁾。近年では、この連結制振技術は、超高層集合住宅にも用いられている²⁾。

立体自動倉庫の場合、ラックは建屋と比較すると剛性が低い構造体である。また、ラックには積荷が積載されるので、主に架構のみの建屋と比較して質量が大きくなる。従って、質量が大きくて剛性の低いラックと質量が小さくて剛性の高い建屋をダンパーで連結することにより、大きな制振効果が期待できる。この概念図をFig. 3に示す。

東日本大震災では、積荷を出し入れする間口方向にラックが大きく揺れ、ラック間の開口部に積荷が落下したケースが多く見られたため、連結制振の制振対象の方向としては、ラック間口方向のみとしている。

3. 縮小試験体による加振実験

3.1 試験体

Fig. 4, Fig. 5, Photo 1に試験体の断面図、ラック最上部平面図、写真をそれぞれ示す。ラックは実物の1/2スケールとし、高さ10段8,700mm、幅662.5mm、奥行6連4,095mm、4列、合計240パレットの試験体とした。ラックの間口方向の各構面は鉄骨溶接によるラチス構造とし、

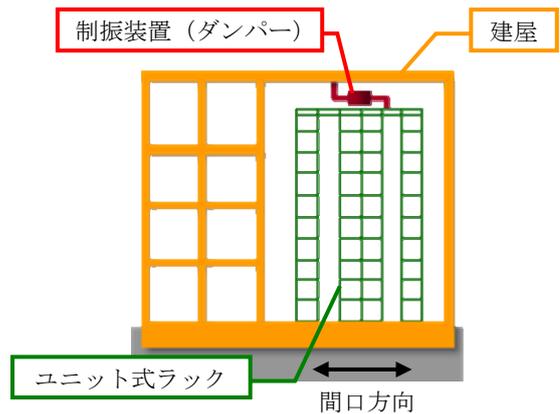


Fig. 2 立体自動倉庫の連結制振
Vibration Control Method Using Damper Connection

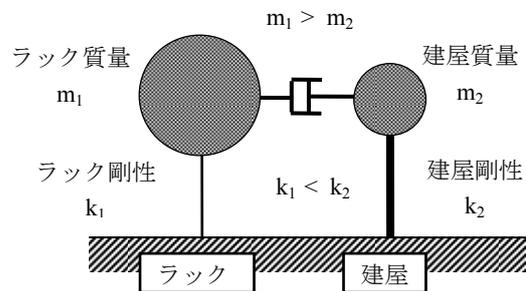


Fig. 3 連結制振の概念図
Outline of Damper Connection System

間口と直交する桁行方向は水平梁と水平ブレースをボルト接合にて構面同士を一体化させることによりラックを構築した。ラック背面には、ターンバックルを用いたブ

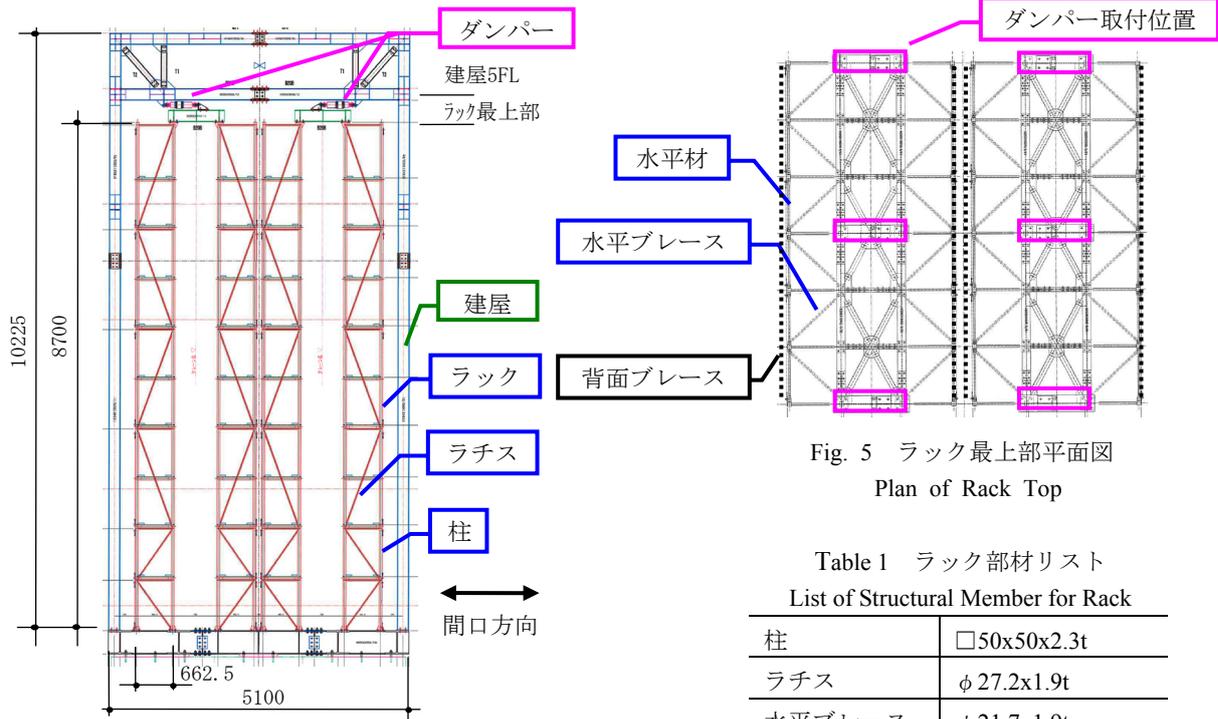


Fig. 4 試験体断面図
Section of Test Structure

Fig. 5 ラック最上部平面図
Plan of Rack Top

Table 1 ラック部材リスト
List of Structural Member for Rack

柱	□50x50x2.3t
ラチス	φ 27.2x1.9t
水平ブレース	φ 21.7x1.9t
水平材	φ 21.7x1.9t
背面ブレース	M10



a) 試験体全景 (正面)



b) 試験体全景 (側面)



c) パレット・重錘



d) オイルダンパー

Photo 1 試験体写真
Photos of Test Structure

レースにより桁行方向の剛性を確保している。ラック最上段は、ラック2列をダンパーフレームにより一体化し、建屋5FLレベルとダンパーで連結できる構造とした。ラックの部材リストをTable 1に示す。

建屋は、高さ10,225mm、平面5,100mm×5,995mm、実物の1/2スケールの鉄骨ブレース構造の試験体とした。建屋5FLレベルはラック最上段をダンパーで連結できる構造とした。

ラックに積載されるパレット (20kg) 及び積荷 (30kg) は鉄板及び鉛の重錘で代用し、ボルトでラックに固定した。

ラックと建屋を連結するダンパーとしては、鉄道車両用のオイルダンパーを用いた。ダンパーフレームで連結された一対のラックに3台、合計6台のオイルダンパーを設置した。オイルダンパーの減衰係数は39.2kNs/mでゴムブッシュによる取付部の剛性が支配的なダンパー剛性は17.2kN/mである。また、可動ストロークは±63mmであり、ラックの間口方向を制振対象とした。使用したオイルダンパーの諸元をTable 2に示す。

3.2 計測方法

計測項目は、振動台加速度、建屋5FL加速度、ラック中段 (5段目) 加速度、ラック上段 (最上段; 10段目) 加速度、ダンパー変位 (建屋5FL-ラック最上部ダンパーフレーム間の相対変位) について計測を行った。

3.3 実験方法

加振実験は、まず微小振幅でのランダム波加振により、振動台の入力加速度に対する試験体の伝達関数を取得し、固有振動数 (固有周期) 及び減衰を調査した。

次に、地震波入力に対する試験体の応答性状を把握するために、地震波加振を行った。地震波としては、1940年インペリアルバレー地震におけるエルセントロ記録地震波のNS成分 (以下、エルセントロ波)、平成23年 (2011年) 東北地方太平洋沖地震におけるK-NET仙台記録地震波のうち80秒~140秒のNS成分 (以下、K-NET仙台)、同地震での関東某所での再現波のNS成分 (以下、再現波) を用いた。連結制振では、震度5強程度以下の比較的発生確率の高い地震に対して、積荷の落下を防ぐことを設計目標としているため、各地震波はそれぞれ最大速度25cm/sに基準化して入力した。各地震波の加速度応答スペクトルをFig. 6に示す。

3.4 実験結果

3.4.1 固有振動数及び減衰 ランダム波加振により取得した振動台入力加速度に対するラック最上段及び建屋の応答加速度の伝達関数をFig. 7に示す。また、得られた伝達関数に対して、ERA (Eigen System Realization Algorithm) 法³⁾を適用して、試験体の固有振動数 (固有周期)、減衰、モードを同定した。同定結果から、固有振動数 (固有周期) 及び減衰についてまとめた表をTable 3に示す。

これより、ダンパーで連結しない非制振では、建屋の固有振動数はラックの固有振動数の2.5倍程度であった。

Fig. 7の伝達関数より、連結制振では、ラック、建屋とも1次固有振動数での増幅がほとんど見られなくなっていることがわかる。また、Table 3の同定結果からも、非制振ではラックの1次の減衰は1%未満、建屋の減衰は1%程度で非常に小さいが、ラックと建屋をダンパーで連結

Table 2 オイルダンパー諸元
Specifications of Oil Damper

取付長	470 mm
ストローク	126 mm (±63 mm)
減衰特性	C=39.2kN s/m
ダンパー剛性	K=17.2kN/m
最大速度	0.3m/s
台数	6 台

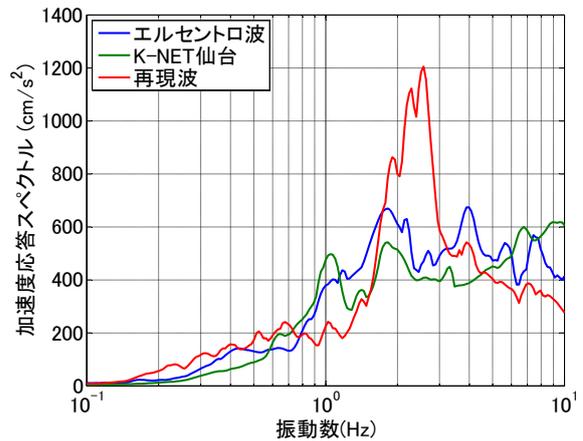


Fig. 6 入力地震波の加速度応答スペクトル (h=0.05)
Response Spectra of Input Seismic Motion

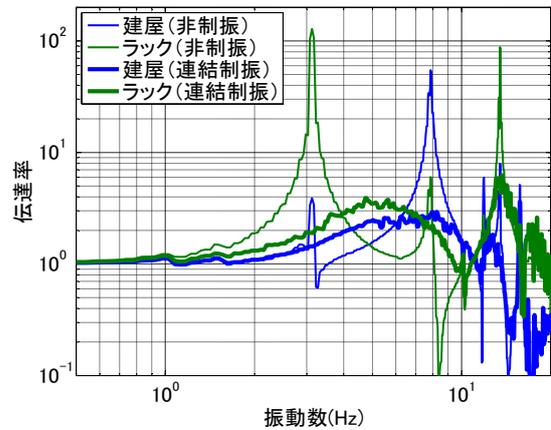


Fig. 7 地動入力に対する伝達関数
Transfer Functions to Input Ground Motion

Table 3 固有振動数・減衰同定結果
Identified Natural Frequency and Damping

		固有振動数 (固有周期)	減衰
建屋	非制振	7.84Hz (0.127s)	0.93%
	連結制振	7.65Hz (0.131s)	19.5%
ラック 1次	非制振	3.14Hz (0.318s)	0.66%
	連結制振	5.26Hz (0.190s)	19.3%
ラック 2次	非制振	13.5Hz (0.074s)	0.14%
	連結制振	13.7Hz (0.073s)	4.0%

することにより、ラック1次、建屋の減衰とも、20%程度に上昇することが確認された。

3.4.2 地震入力に対する応答 エルセントロ波、K-NET仙台及び再現波の入力に対する、ラック及び建屋の最大応答加速度を非制振と連結制振で比較した図をFig. 8に示す。

この結果より、連結制振することによりラック最上段の最大応答加速度は非制振と比較して、エルセントロ波では1/3以下、再現波では1/2以下に低減された。建屋の最大応答加速度も1/2程度に低減されている。K-NET仙台では応答低減が若干悪いもののラック最上段では20%程度低減された。また、連結制振時のダンパー変位は5~6mm程度であった。

4. 解析による検証

4.1 解析モデル

解析モデルは質点モデルとした。ラックは10段のパレット及び重錘を10質点とし、最上部のダンパーとの取合い部分の1質点とあわせて11質点とした。剛性は、ラック柱材の曲げ剛性とラチス材のせん断剛性を考慮した曲げせん断モデルとした。このモデル化によるラックの固有振動数は、1次3.23Hz、2次15.7Hzで実験結果とよく一致している。

建屋はブレースのせん断剛性を考慮した1質点のせん断モデルとした。ただし、このモデル化では建屋の固有振動数は12.7Hzとなり、実測結果と大幅に異なったため、建屋の剛性は実験による建屋の固有振動数7.65Hzと一致するように調整して用いた。この原因としては、ブレースの取合い部で局所的に剛性が低下していたか、圧縮側で剛性に寄与していなかった可能性が考えられる。

減衰はモード減衰として、減衰定数の値は実験結果を用いた。ラックと建屋を連結するオイルダンパーは、Table 2に示す減衰係数とダンパー剛性を持つMaxwell型モデルとした。解析モデルをFig. 9に示し、その諸元をTable 4に示す。

4.2 地震入力に対する応答

Fig. 10に地震入力に対するラックの最大応答加速度の解析結果を実験結果と比較した図を示す。これより、非制振の解析結果は、K-NET仙台では実験結果と若干差異が見られるものの、それ以外ではラック最上段の最大応答加速度は実験結果と概ね一致している。また、連結制振の解析結果は、各地震波とも実験結果とよく一致していることがわかる。非制振で実験結果と解析結果に若干差異が見られるのは、非制振ではラックの減衰が1%未満と非常に小さいため、実験と解析でのわずかな固有振動数の違いで応答の違いが大きくなるためである。今後、解析モデルの精査が必要である。

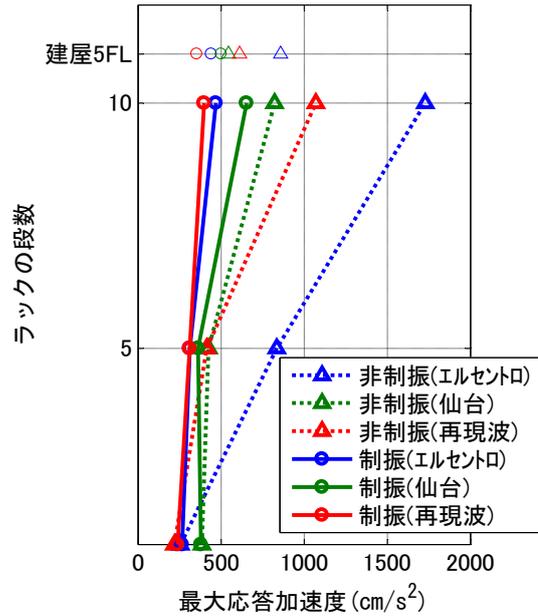


Fig. 8 地震時応答結果
Results of Earthquake Response Test

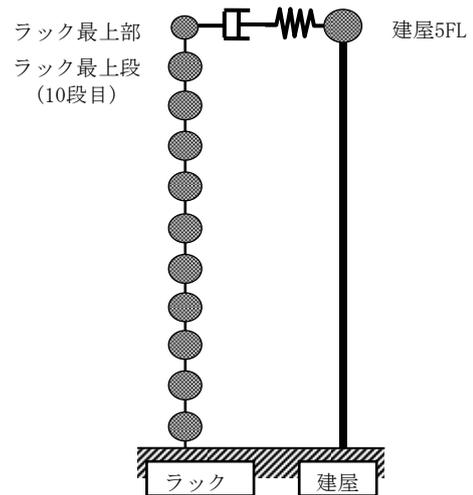


Fig. 9 解析モデル
Analytical Model

Table 4 解析モデル諸元
Specifications of Analytical Model

段	高さ m	質量 t	曲げ剛性 10 ⁵ kN m/rad	せん断剛性 kN/mm
ラック				
R	8.84	0.98	4.65	164
10	7.93	1.19	5.14	164
9	7.11	1.62	4.76	164
8	6.23	1.59	5.14	164
7	5.41	1.62	4.76	164
6	4.52	1.59	5.14	164
5	3.70	1.62	4.76	164
4	2.82	1.59	5.14	164
3	3.84	1.62	4.76	541
2	2.00	1.62	4.76	541
1	0.23	1.31	18.7	541
建屋				
R	8.84	6.43	—	15.6

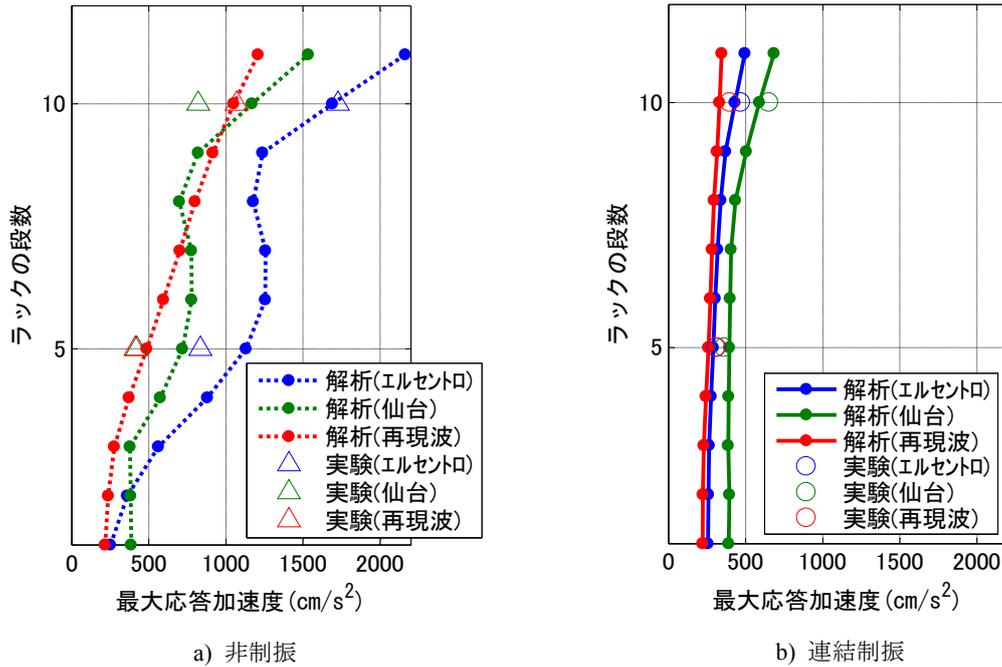


Fig. 10 解析結果
Analytical Results

5. まとめ

立体自動倉庫の連結制振技術の制振効果を検証するために、三次元振動台上に実物の1/2スケールのラックと建屋からなる試験体を設置して加振実験を行った。

その結果、非制振では1%未満と非常に小さかったラックの減衰は、連結制振技術の適用により20%程度に上昇した。振動台に地震波を入力した時のラック最上段の最大応答加速度については、連結制振技術の適用により最大で1/3以下に低減されることが確認された。さらに、連結制振では、建屋の減衰も20%程度にまで上昇し、地震時の最大応答加速度も非制振の1/2程度まで低減されることが確認された。

これらの結果は、解析によって概ね再現できることがわかった。しかしながら、実験結果と解析結果には若干差異が見られる部分もあり、今後、解析モデルの精査が必要である。特に非制振では、ラックの減衰が非常に小さいため、固有周期の若干の違いで応答が大きく変わる可能性があり、実施設計の上では、解析結果にばらつき

が生じることを留意して評価する必要がある。

謝辞

本報では、防災科技研のK-NETの観測記録データを使用させて頂きました。関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 蔭山満, 他: 複合構造物の最適制振に関する研究 (その1~その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集B, pp.725~730, (1993)
- 2) 西村勝尚, 他: 連結制振構造を適用した超高層RC 造建物の応答性状 (その1~5), 日本建築学会大会学術講演梗概集C-2, pp.859~868, (2008)
- 3) Juang J.N., Pappa R.S.: An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction, Journal of Guidance Control and Dynamics, Vol. 8, pp.620~627, (1985)