

# 鋼材ダンパー、粘弾性ダンパーを用いた実大5層建物の実験に基づく 架構の構造特性とダンパーの制振効果に関する考察

東京工業大学 馬場勇輝

## 1. はじめに

近年、多くの建物に制振装置が適用されているが、実建物の制振効果は、常時微動や起振機加振など小振幅の範囲でしか評価されていない。本研究では、4種ダンパーをそれぞれ設置した実大5層建物(図1)に、微小加振から1995年兵庫県南部地震JR鷹取駅観測波(以下、鷹取波)を入力した大加振を実施した場合までの制振性能を包括的に評価する。また、実大建物という現実的な境界条件下でのダンパーの挙動や床スラブの合成効果について検討を行い、これらの動的特性を把握した。さらに、線材解析モデルを用いた実験の再現も試みた。本論では主に、鋼材ダンパー、粘弾性ダンパーを設置した試験体の結果について述べる。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

試験体は、短辺(X)方向2スパン10m、長辺(Y)方向2スパン12m、基準階階高3mの5層鉄骨ラーメン構造に1層から4層までブレース型ダンパーを設置したものである(図1)。柱は $\square$ -350 $\times$ 350 $\times$ (12~22)の角形鋼管(BCR295)、大梁はH-またはBH-400 $\times$ 200 $\times$ (9~12) $\times$ (12~22)のH形鋼とし、制振試験体では、鷹取波原波の入力に対して層間変形角1/100rad.以下となるようダンパーを設計した(図2)。ダンパーは鋼材、粘性、オイル、粘弾性の4種を順次入替え実験を行い、

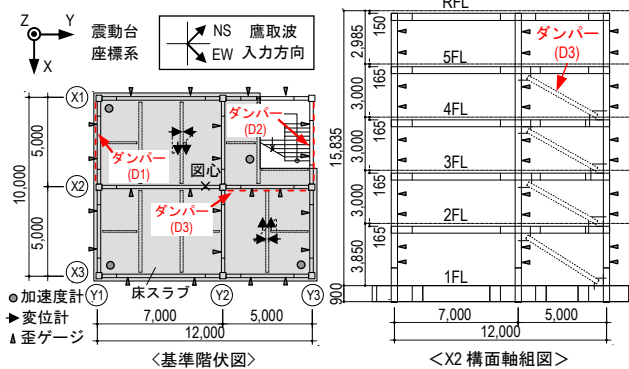


図1 試験体図面

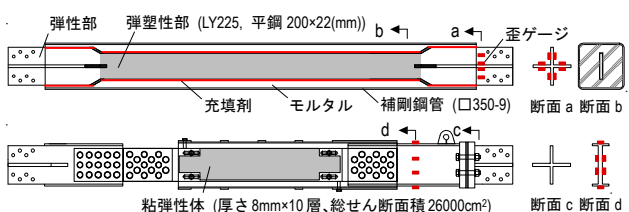


図2 2階D3ダンパー側面図(上段:鋼材、下段:粘弾性)

最後には、ダンパーを取り外した非制振の状態で大加振を行った。

### 2.2 計測

全ての柱梁、ダンパーの歪から内力を評価した。床面に設けた加速度計よりX, Y, Z方向の加速度を、計測架台上に設けた変位計よりX, Y方向の層間変位を計測した。加速度・層間変形は、複数箇所の計測値から算出した図心位置の値を用いる(図1)。

### 2.3 加振計画

鷹取波は原波に対する加速度倍率(%)を掛けて3方向入力する。X, Y方向に同程度の層間変形を生じさせるため、X, -Y軸をそれぞれ反時計回りに135度回転させた方向にNS, EW成分を入力した(図1)。加振目標は50%, 100%鷹取波とし、低い加振レベルの入力から始め、加振レベルを徐々に大きくしながら適宜補正を行い、入力波の再現性を高める手法を用いた。なお、非制振試験体は安全性の観点から70%鷹取波までとした。鷹取波前後には、X, Y各1方向の正弦加速度3サイクル入力のステップ波加振、およびX, Y各方向および3方向入力のホワイトノイズ加振(以下、WN加振)を行った。粘弾性ダンパーは、実験結果を一律に扱えるよう、粘弾性体の温度を22°Cに管理しながら加振を行った。

## 3. 実験結果

### 3.1 試験体、ダンパーの実験結果

各試験体50%, 100%鷹取波における層間変形角、絶対加速度、層せん断力の最大応答分布を図3に示す。層間変形角は層間変位を意匠階高で除して求めた。層せん断力は各層の加速度に質量を乗じ、最上階から当該階までの和を取り求めた。比較のため、非制振試験体50%鷹取波での応答およびそれらを2倍した値を併記した。制振試験体では、X, Y方向ともに層間変形角は100%鷹取波でも約1/140~1/110rad.と、非制振試験体での応答の約5~7割に抑えられ、想定した制振性能を満足した。なお、図心に対する各構面の最大応答の差は最大で約10%であった。頂部絶対加速度・ベースシアについては、鋼材ダンパー付試験体50%鷹取波では、ダンパーの塑性化の程度が小さく低減効果は得られなかったが(図3(c))、同試験体100%鷹取波では5~7割程度に抑えられ、粘弾性

ダンパー付試験体では小振幅の加振から加速度低減効果が確認できた。

15, 50, 100% 鷹取波における各試験体2階 D3 ダンパーの荷重変形関係を図4に示す。鋼材ダンパーは15% 鷹取波では弾性挙動であり、50%, 100% 鷹取波ではダンパーが降伏し、その最大耐力は理論降伏耐力の約1.3~1.5倍を示した。これらのダンパーは、震動台実験の後に1軸静的載荷実験を行っており(図4の破線)、この実験での最大耐力がほぼ理論降伏耐力と等しかったことから、鋼材ダンパーは速度依存性を有するといえる。これは、鋼材の速度依存性および鋼材に貼付された充填剤(図2)によるもので、これらを考慮したモデル化手法が提案されている<sup>1)</sup>。さらに、震動台実験後に行った1軸動的載荷実験の結果(図4の実線)も併記し、得られた履歴曲線は震動台実験での結果と概ね一致した。粘弾性ダンパーは線形的な挙動を示し、各加振で相似形の履歴を描く。また、粘弾性ダンパーにおいても1軸動的載荷実験を行い、得られた履歴曲線は震動台実験とよく一致することを確認した(図4)。

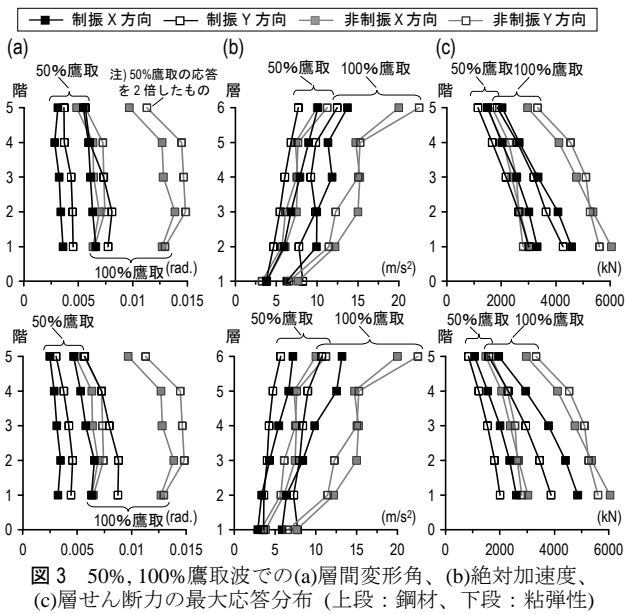


図3 50%, 100% 鷹取波での(a)層間変形角、(b)絶対加速度、(c)層せん断力の最大応答分布(上段: 鋼材、下段: 粘弾性)

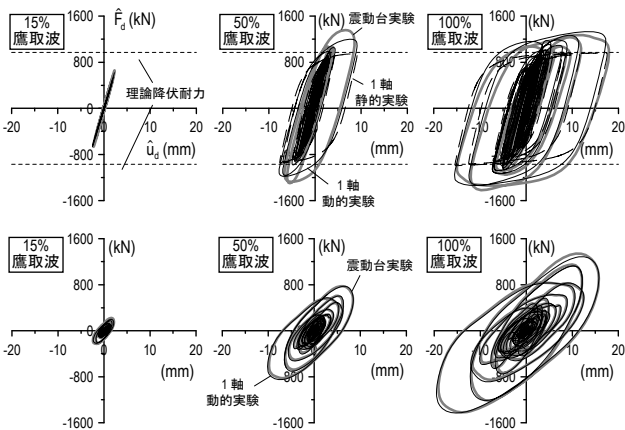


図4 15%, 50%, 100% 鷹取波での2階 D3 ダンパー荷重変形関係(上段: 鋼材ダンパー、下段: 粘弾性ダンパー)

各鷹取波加振での最大層間変形角とダンパー、架構およびシステムの負担せん断力(順に  $Q_d$ ,  $Q_f$ ,  $Q_s$ )の最大値との関係を1層 Y 方向について示す(図5)。 $Q_d$ はダンパー力水平方向成分の総和、 $Q_f$ は柱せん断力の総和、 $Q_s$ は  $Q_d$ と  $Q_f$ の和により求めた。これより、各加振レベルにおいて、システムに対するダンパーの負担せん断力の割合が把握でき、鋼材ダンパー付試験体の場合、ダンパー弾性の15% 鷹取波では、システムの約半分のせん断力をダンパーが負担するが、塑性化するとダンパー力が頭打ちになるため、この比は加振レベルとともに低下し、100% 鷹取波では約0.25となった。粘弾性ダンパー付試験体では加振レベルによらず約0.25ではほぼ線形挙動を示した。なお、図より、制振試験体では100% 鷹取波加振時でも鉄骨架構が概ね弾性挙動であることが分かる。

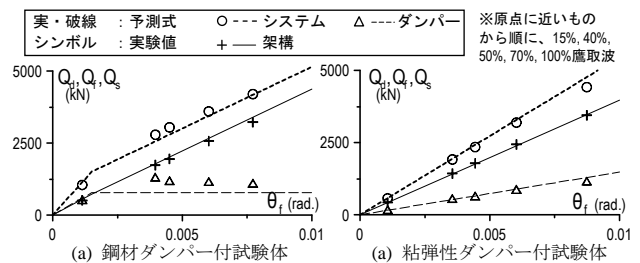


図5 各鷹取波でのダンパー、架構およびシステムの負担せん断力(順に、 $Q_d$ ,  $Q_f$ ,  $Q_s$ )と層間変形角  $\theta_f$  の最大値(1階 Y 方向)

### 3.2 各試験体の固有周期・減衰定数

文献2の手法より得た各試験体 X 方向の固有周期と減衰定数の各加振での推移を図6に示す。1次固有周期は、鋼材ダンパー付試験体の初期 WN 加振で X, Y 方向でそれぞれ 0.45s, 0.48s であった。その後、加振を経験するごとに長周期化し、初期の WN 加振に対し、100% 鷹取波では約 15%, その後の WN 加振では約 8% 伸長した。この変化は他の試験体と比べて最も大きく、非構造材の損傷や、後述する床スラブの合成効果の低下に起因するものと考えられる。粘弾性ダンパー付試験体では、1次固有周期は X, Y 方向でそれぞれ 0.59s, 0.62s で、全ての加振でほぼ一定であった。

減衰定数については、鋼材ダンパー付試験体では、1次はダンパー弾性の加振では約 1~2% であったが、塑性化すると加振レベルに応じて最大で約 10% まで

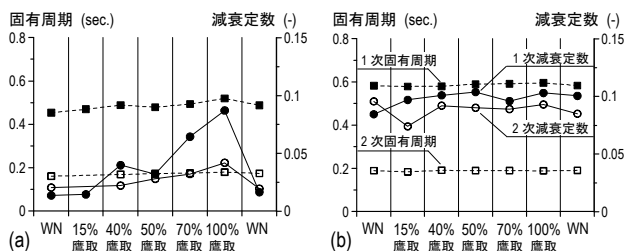


図6 各加振での固有周期と減衰定数((a)鋼材、(b)粘弾性、X 方向)

上昇した。2次については、1次ほど顕著な上昇は見られず、高次モードの減衰性能はあまり期待できない。粘弾性ダンパーでは、1, 2次ともに加振レベルによらず8~10%の値を示し、高次モードに対しても高い減衰性能が期待できる。

#### 4. ダンパーに生じる曲げと接合部の安全性の検討

図2のダンパーについて、震動台実験と1軸載荷試験の比較から、境界条件の影響を詳細に検討した。一例として、両実験100%鷹取波における粘弾性ダンパーの各歪の時刻歴を図7に示す。1軸載荷試験(図7(b))では全ての歪がほぼ均一だったが、震動台実験(図7(a))では両フランジ間で歪の振幅と位相に差が生じていた。この歪を平均歪(軸歪)から引いて、それを変換して得た曲げモーメント $M_d$ は主架構の変形と概ね同位相であり、実建物に設置されたダンパーは主架構の変形によって曲げを受けることが分かった(図8)。鋼材ダンパーでは面外曲げにも同様の傾向が確認され、面外層間変形角と同位相であった(図8(c))。

これらの曲げが接合部に与える影響を検討するため、図2の断面a, cの十字接合部について、粘弾性ダンパーは軸力と面内曲げ、鋼材ダンパーは軸力と面内・面外曲げの相関を考慮した降伏局面を作成し、塑性化判定を行った。全ての接合部は100%鷹取波でも

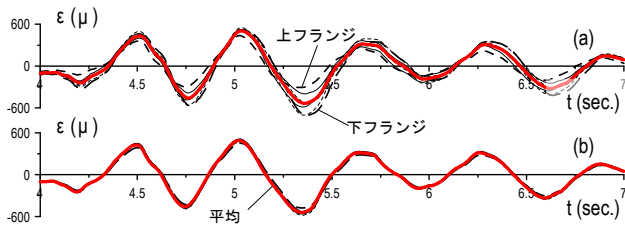


図7 粘弾性ダンパー実験における歪時刻歴の比較  
(a): 震動台実験 (b): 東工大実験、100%鷹取波、2階D3ダンパー

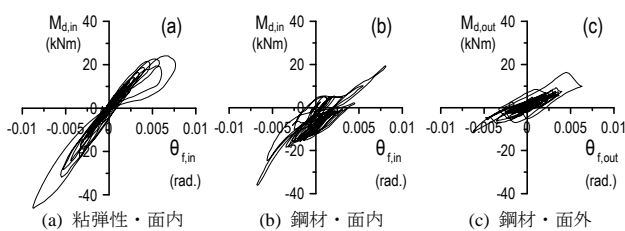


図8 ダンパーの曲げモーメントと層間変形角の関係  
(100%鷹取波、2階D3ダンパー)

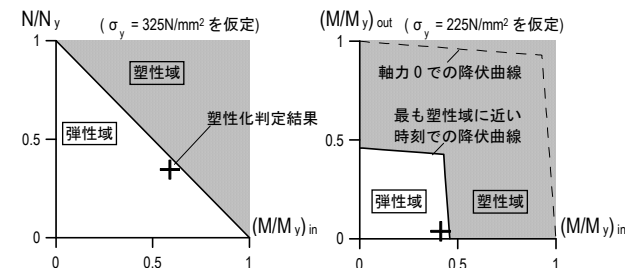


図9 十字接合部塑性化判定 (100%鷹取波、2階D3ダンパー)

弾性を保ったが、無視し得ない影響があった(図9)。

震動台実験と1軸載荷試験のダンパー履歴曲線の比較(図4)より、これらの曲げがダンパーの性能に与える影響はなかったといえるが、接合部の剛性や耐力については検討の余地がある。

#### 5. 試験体架構の構造特性

図10に加振の経過と架構剛性 $K_f$ の推移を示す。 $K_f$ は $Q_f$ と層間変位の関係から最小二乗法で求めた。いずれの層も鋼材ダンパー付試験体100%鷹取波までで初期の約75%まで顕著に低下する。以降ダンパーを取り替えた加振では、剛性の低下は小さかった。

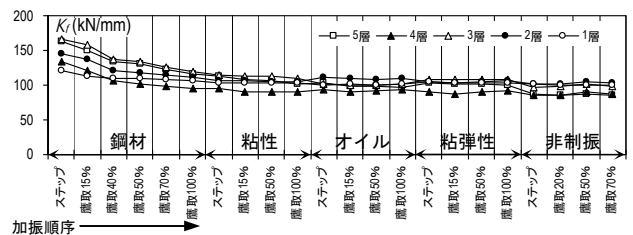


図10 架構剛性の変化(Y方向)

初期の架構剛性の低下の原因を探るべく、図11に示す合成梁中立軸位置 $z_{na}$ の推移を検討する。 $z_{na}$ は、平面保持を仮定し梁軸力を0として各歪の最小二乗法より算出した。なお、下フランジ引張の曲げを正とする。

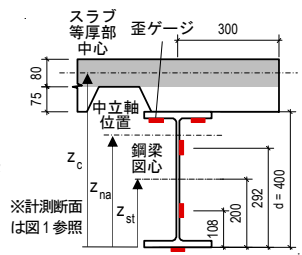


図11 歪ゲージ添付位置

「スラブ無し」、「スラブ片側」、「スラブ両側」の梁について、最大正負曲げモーメントでの $z_{na}$ を加振の経過とともに図9(b)に示す。スラブなしの場合、全加振で $z_{na}$ は鋼梁図心 $z_{st}$ 付近にあり、計測や計算が妥当と言える。一方、スラブを持つ梁では、スラブが顕著な損傷を受ける前の加振では、 $z_{na}$ が上フランジ付近にあるが、鋼材ダンパー付試験体40%鷹取波以降低下する。以降ダンパーを変え加振した場合、正曲げ時には加振レベルに応じて $z_{na}$ が再上昇するが、負曲げ時にこの現象は見られない。正負曲げ時での $z_{na}$ の差は最大で梁せい約1/8だが、負曲げ時でもかなりの合成効果が確認できる。スラブが層全体に一体で打設されていることで、負曲げ時も何らかの拘束効果が働くものと考えられる。さらに、得られた $z_{na}$ から文献3より等価な有効幅を逆算し、設計値と比較した(図12(c))。ここで、等厚部80mm、ヤング係数比は材料試験より $n=7$ を用いた。初期の小加振では設計値と同等以上の有効幅のスラブが効果を発揮するが、大加振後の小加振では柱幅ほどとなる。

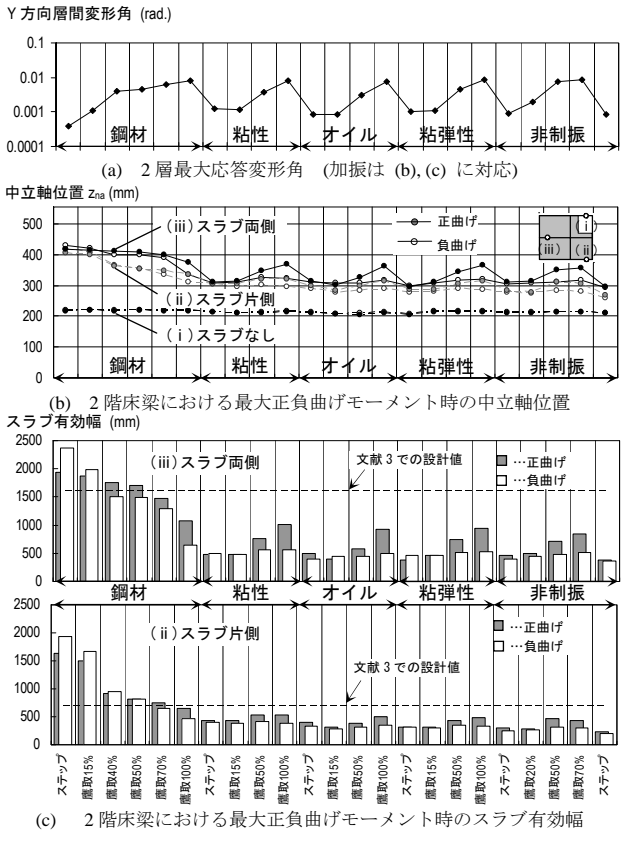


図12 加振の経過による中立軸位置およびスラブ有効幅の変化

6. 簡易解析モデルを用いた解析による実験の再現

文献4を参考に、線材要素から成る3次元骨組モデルを用いて振動解析を行い、実験結果との比較を行う。梁部材には、実験より得たスラブ有効幅(5章)が各スパン内で一定と考え、それぞれの断面で等価な断面二次モーメントに置換し、正負曲げの平均値として入力した。以下、粘弾性ダンパー付試験体100%鷹取波から梁剛性を得たモデルの結果を示す。梁の合成効果による耐力上昇は設計値<sup>3)</sup>の正負曲げでの平均値を用いる。剛性に関してはスラブの寄与が梁全体に影響するのに対して、耐力は端部の状態で決定されることから、上記の設定手法を採用した。モデルの1次固有周期はX, Y方向でそれぞれ0.68s, 0.71s, スラブの有効幅を設計値<sup>3)</sup>とした場合、0.70s, 0.73sであった。なお、減衰は1次、2次それぞれのX, Y方向固有周期の平均値に対し、レイリー型で2%とした。

図13には層間変形角、絶対加速度、層せん断力の最大値の各層での分布について、実験と解析の結果を比較するが、解析は実験をよく再現した。ダンパーの挙動も実験とよく対応した(図14)。

さらに、粘弾性ダンパー付試験体について、X方向ベースシア最大時におけるY3構面曲げ

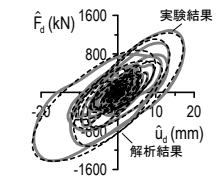


図14 1階D3ダンパーの荷重変形関係(粘弾性100%鷹取)

モーメント図と、X方向ダンパー力最大時におけるY3構面軸力図について、解析の線材要素から得た値と実験から得た内力の比較を図15に示す。両者は非常によく一致し、実験で得られた内力を解析で忠実に再現できることを示した。

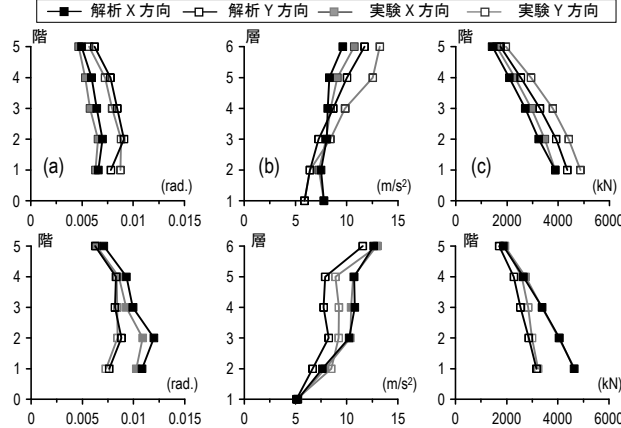


図13 (a)層間変形角、(b)絶対加速度、(c)層せん断力の最大値の各層分布の比較(上段:粘弾性100%鷹取、下段:非制振70%鷹取)

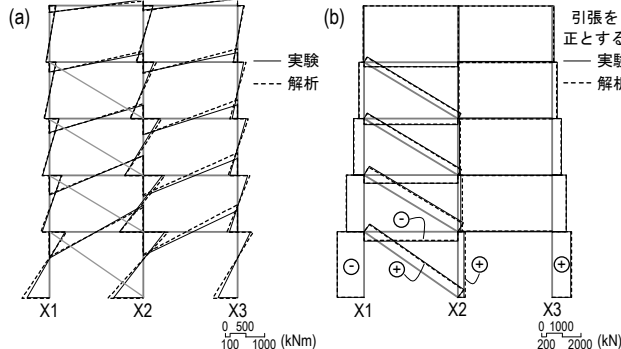


図15 (a) X方向ベースシア最大時曲げモーメント図、および(b) X方向ダンパー力最大時の軸力図(粘弾性ダンパー付試験体 Y3 構面、100%鷹取)

7. まとめ

鋼材ダンパー、粘弾性ダンパーを設置した実大5層建物の震動台実験の結果を示した。ダンパーは想定した性能を発揮し、制振試験体は目標性能を満足した。また、実大建物におけるダンパーに生じる曲げや、床スラブの合成効果を定量的に評価した。さらに、最大応答値・内力ともに実験を忠実に再現できる線材骨組モデルを作成した。

<参考文献>

- 1) 笠井和彦, 西澤恵二: 鋼材ダンパーの実験結果と速度依存性を考慮した動的解析法 (E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その59), 日本建築学会学術講演梗概集, C-1分冊, pp.807-808, 2010.7
- 2) 村田真一郎, 笠井和彦, 加藤史人, 伊藤浩資, 引野剛: 震動台のロッキングを考慮した建物の周期・減衰の推定手法 (E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その60), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1分冊, pp.809-810, 2010.9
- 3) 日本建築学会: 各種合成構造設計指針・同解説, 1985
- 4) 空處慎史, 笠井和彦, 元結正次郎, 金子健作, 朝日智生, 東優, 石井正人: 制振建物の簡易解析に用いる線材要素モデル化の検討 (E-ディフェンス鋼構造建物実験研究 その20), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1分冊, pp.1093-1094, 2007.8