

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	風応答時の粘弾性ダンパーの特性変化と簡易性能評価実験
Title(English)	Characteristic Change of Viscoelastic Damper under Wind-induced Excitation and Simplified Evaluation Test
著者(和文)	佐藤大樹, 笠井和彦
Authors(English)	Daiki Sato, KAZUHIKO KASAI
出典(和文)	建築物の安全性・信頼性 Vol.8 JCROSSAR2015論文集, Vol. 8, , pp. 580-583
Citation(English)	Proceedings of the Eighth Japan Conference on Structural Safety and Reliability, Vol. 8, , pp. 580-583
発行日 / Pub. date	2015, 10

風応答時の粘弾性ダンパーの特性変化と簡易性能評価実験

佐藤大樹* 笠井和彦*

Characteristic Change of Viscoelastic Damper under Wind-induced Excitation and Simplified Evaluation Test

by

Daiki SATO* and Kazuhiko KASAI*

Viscoelastic damper dissipates energy through shear deformation of the viscoelastic material, and it causes temperature rise resulting softening of the material under long duration sinusoidal and wind-induced excitation. This paper discusses properties of viscoelastic damper during long duration loading. In addition, the two analysis methods and simplified evaluation method using sinusoidal-wave as a substitute to random time history data properties are presented in this paper. Accuracy of these analysis methods and the evaluation method are validated by comparing the long duration loading tests.

Key words: Viscoelastic Damper, Temperature Sensitivity, Frequency Sensitivity, Wind-induced Excitation

1 はじめに

高層建物の居住空間に風によって振動が発生すると、居住者は不快に感じるばかりではなく、生活を営むうえで支障をきたすこともある。そのため、最近建設されている高層建物では、地震時の安全性はもちろんのこと、日常吹くような風に対する居住性を高めるために、ダンパーを設置した制振構造が採用されている。日本では数多くのダンパーが研究・開発されているが、その中でも粘弾性ダンパーは、風や交通振動等によって発生する微小変形から、大地震の非常に大きな変形まで安定したエネルギー吸収性能を発揮することが知られている。

一般に、粘弾性ダンパーは振動数依存性の他に温度依存性も有し、振動時に吸収した振動エネルギーを熱へと変換するため温度が上昇する。そのため地震に比べて卓越振動数が低く、かつ遥かに継続時間の長い風応答の制振に粘弾性ダンパーを用いる場合には、風応答時の振動数^{1),2)}を考慮するだけでなく、長時間の振動に伴う温度上昇によるダンパー特性の変化を把握することが必要である^{3),4)}。粘弾性ダンパーの特性変化を把握し、かつ高精度にその特性を再現できる解析モデルを用いた検

討を行なうことで、制振構造の安全性・信頼性を高めることが可能となる。

本報では、長時間振動時における粘弾性ダンパーの温度上昇に伴う動的特性の変化について述べる。さらに、正弦波を用いることで粘弾性ダンパーの動的特性の変化を簡易に評価できる実験手法を示すとともに解析手法についても述べる。

2 正弦波実験および3次元有限要素解析結果

2.1 試験体および長時間加振実験結果

Fig.1のように、本報ではダンパーは2層のアクリル系粘弾性体を鋼材からなる中板・外板の間に挟んだ両面せん断型の粘弾性ダンパーを用いる (Fig.1)⁵⁾。

比較的高層の建物への適用を考慮して加振周期は3秒とし、中板に振幅6.6mmの正弦変位で3,000秒加振する。Fig.2およびFig.3に、正弦波加振実験より得られた各位置 (Fig.1)での温度時刻歴および粘弾性ダンパーの動的特性を表す貯蔵剛性 K'_d ⁶⁾と損失剛性 K''_d ⁶⁾の時間変化を示す。なお、図には次節で述べる3次元有限要素解析 (3D-FEM)の解析結果も併記している。加振開始直後では、粘弾性体が比較的硬いため一定変位振幅に対するサイクルごとの歪エネルギー、吸収エネルギー、ひいて

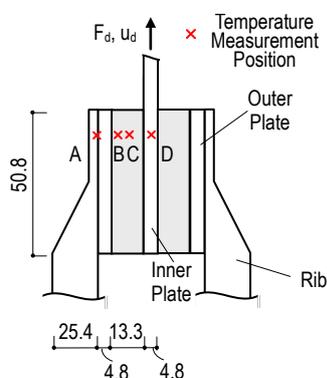


Fig.1 Test specimen & temperature measurement position. (unit: mm)

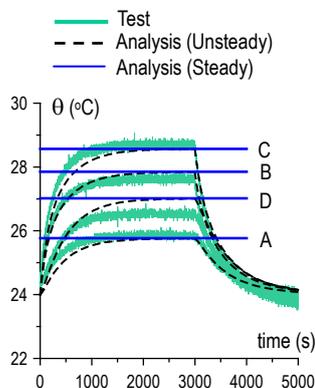


Fig.2 Comparison of temperature with test and 3D-FEM

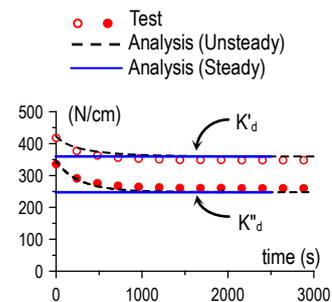


Fig.3 Comparison of K'_d , K''_d with test and 3D-FEM

* 東京工業大学

〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町4259 Tokyo Institute of Tech., 4259, Midori-ku, Yokohama-shi, Kanagawa

は発熱量が多めであり、よって温度が大きく上昇している。一方、1,000 秒以降では温度が上昇しなくなり、ほぼ一定の値となっている。これは、粘弾性体の温度上昇そして軟化により発熱量が減少したことと、空気への熱伝達量が増加したことにより、発熱量と熱伝達量が釣り合ったためである。

Fig.3 より、加振開始直後は K'_d および K''_d が低下するが、1,000 秒以降は殆ど変化せず、ダンパーが一定の性能を保持することが確認できる。これは、上述した温度上昇の傾向 (Fig.2) と整合し、粘弾性体の温度が定常状態の場合に各剛性も一定値となることを示している。すなわち、初期载荷からの本粘弾性体の剛性の低下は温度上昇によるものである。

2.2 3次元有限要素解析結果

実験に用いた粘弾性ダンパーの3次元有限要素モデルを Fig.4 に示す。ダンパーが中板の中心で z 方向に対称であることを利用し、本解析では中板の半分から下側部分のみの解析を行う。非定常熱伝導解析および定常熱伝導解析を用いた本解析方法の詳細については文献 5) を参照されたい。Fig.2 に各計測位置での温度時刻歴を、Fig.3 に貯蔵剛性・損失剛性 K'_d , K''_d の時間変化について解析・実験を併せて示す。Fig.2 の3次元非定常解析より得られた温度時刻歴は、D 点で実験値と多少の違いはあ

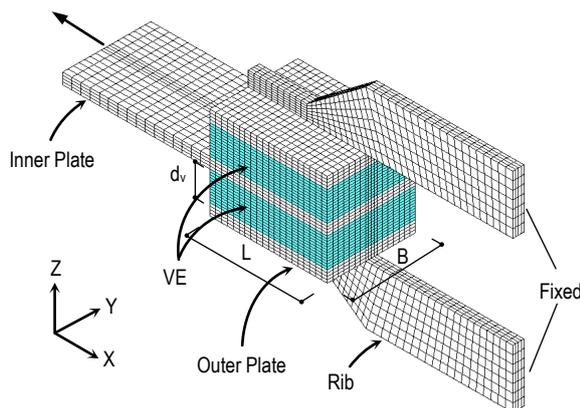


Fig.4 3D-FEM Model

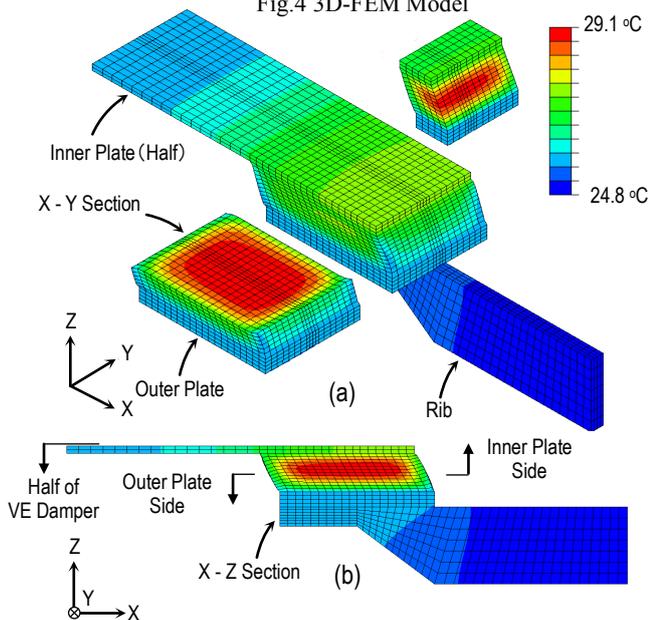


Fig.5. Temperature distribution at 3,000 sec

るものの、加振時・加振終了時ともに実験値と良く一致していることが確認できる。また、Fig.3 のように、解析から得た K'_d および K''_d は、加振開始直後に低下して1,000 秒以降一定になった実験値を再現している。

Fig.4 に解析結果例として、時刻約3,000 秒 (最大変位時) における温度分布を示す。発熱している粘弾性体から離れるほど温度が低い。中板は外板に比べ熱伝達を行う面積が小さいため温度が高い。粘弾性体で発生した熱は、熱伝導係数の大きい中板、外板へと熱伝導するため、粘弾性体内部の中板・外板付近は温度上昇が少なく、かつ厚さ z 方向で温度が最も不均一であることが確認できる。一方、粘弾性体側面から空気への熱伝達が行われるため、粘弾性体側面では温度上昇が少ないが、それを除けば x および y 方向で内部温度がほぼ均一である。

定常解析は非定常解析と同じ有限要素モデルを用い、発生熱量と放熱量が同じになり温度がもはや変化しない定常状態のサイクルを対象とする。つまり、時間依存を省略するため解析は極めて容易である。Fig.2, Fig.3 に定常解析結果も併記している。温度分布、 K'_d および K''_d ともに実験値や非定常解析が示した定常値と一致している。定常解析は非定常解析に比べ格段に計算時間が短いため、ダンパー形状の動的特性への影響などパラメトリックな検討⁵⁾を容易に行うことができる。

3 風応答時実験および簡易評価法

3.1 長時間風応答実験

本報では、高さ 200 m、幅・奥行きが等しく 50 m の建物を想定し、再現期間 500 年、粗度区分を III としてパワースペクトル密度 (PSD) をもとに、風方向および風直角方向の定常ランダム時刻歴波形を作成した^{7),8)}。

Fig.6, 7 に風方向入力 (A-3L) および風直角方向入力 (C-3L) での実験より得られた温度時刻歴 K'_d ⁷⁾ と貯蔵剛性と粘性係数 C_d ⁷⁾ の時間変化をそれぞれ示す。図には次節で述べる正弦波置換実験での結果も併記している。

Fig.6 より、温度上昇の変化を見ると、いずれの加振においても、加振直後は粘弾性体のエネルギー吸収による発熱によってダンパー内部の温度が急激に上昇するが、ある時刻から熱伝導・伝達の効果により温度上昇が鈍くなり、温度がほぼ一定値に漸近する傾向が確認できる。Fig.7 より、加振開始からダンパー特性が大きく低下せず、ある時刻から K'_d , C_d が一定値に収束していることが確認できる。これは、Fig.6 で述べたように、ランダム波による加振において温度が上昇し続けることなく一定値に漸近したためである。このような特性は、鋼材ダンパーなどの金属の疲労のように剛性や耐力が低下し続けるものとは異なり、継続時間の長い風制振への粘弾性ダンパーの有用性を示すものである。

3.2 正弦波置換実験

長時応答解析法によりランダム波形での時刻歴解析を行うことで、ダンパー履歴を得ることが出来るが、その結果は、あるランダム波が特定の建物に作用した場合

の特解であり、そこから長時間ランダム振動時のダンパー特性を包括的に把握することは難しい。また、ダンパー変形のランダム時刻歴波形を用いるため、風力の時刻歴波形を作成し、さらに時刻応答解析を行う必要があり非常に煩雑である。粘弾性ダンパーの動的特性を評価するためには、これまで一般的に行われてきた一定振幅・振動数による実験方法が有用であり、振幅・振動数を決定するために正弦波置換法を用いる。

粘弾性ダンパーは振動数依存性を有するため、置換正弦波の置換振動数 f_r は、ランダム波と置換正弦波で繰返し回数が等しくなるように決定する (式(1a))⁷⁾。また、置換振幅 A_r は、ランダム波と置換正弦波でダンパー変形の σ_u が等しくなるように決定する (式(1b))⁷⁾。

$$f_r = N_0^+ / t_a, \quad A_r = \sqrt{2} \sigma_u \quad (1a, b)$$

Fig.6 に置換正弦波による実験により得られた温度時刻歴をランダム波実験の結果に重ねて示す。Fig.6 より、置換正弦波加振での温度時刻歴は、置換正弦波とランダム波実験の結果で良い対応を示していることが確認できる。Fig.7 にランダム波と置換正弦波による実験により得られた、貯蔵剛性 K'_d と粘性係数 C_d の時間変化を重ねて示す。様々な振動数成分を有するランダム波とは異なり、正弦波は1つの振動数成分しか有していないものの、正弦波置換法によって決定した振幅と振動数を用いることで、置換正弦波より得られた K'_d 、 C_d はランダム波の結果と良く一致していることが分かる⁹⁾。

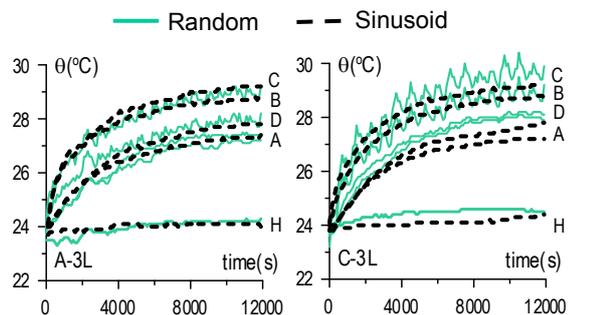


Fig.6 Random VS. sinusoidal tests of temperature

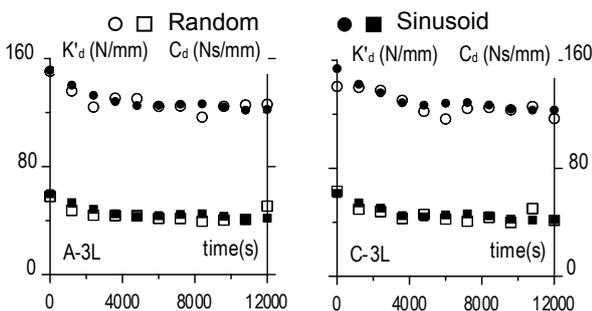


Fig.7 Random VS. sinusoidal tests of K'_d & C_d

4 時刻歴解析結果

4.1 長時応答解析法

2.2 節の3次元熱伝導解析 (Fig.5) より、粘弾性内部の温度は、xy (せん断面) 方向には一様で、z (厚さ) 方向のみに著しく変化することが分かった。また、局所的なせん断・曲げ歪によるダンパー全体の温度分布や剛性への影響は小さいことを確認した。以上より、熱伝導を厚さ方向1次元問題として考え、粘弾性体の剛性や歪

の値も、厚さ方向のみに変化すると理想化した解析手法を長時応答解析法と呼ぶ。本手法は、振動数依存性を有する粘弾性ダンパーの動的特性を精度良く再現できる分数微分構成則に、粘弾性体・鋼板における熱伝導・伝達を考慮した熱伝導解析を組み込むことで、長時間振動時における粘弾性体内部の温度分布や応力・歪の変化も高精度に再現できる時刻歴解析手法である。長時応答解析法は、Fig.8 に示すように、粘弾性ダンパーを厚さ方向に要素分割した任意の位置 j での温度 θ_j 、歪 γ_j を時刻歴で求めることができる。詳細は文献5)を参照されたい。

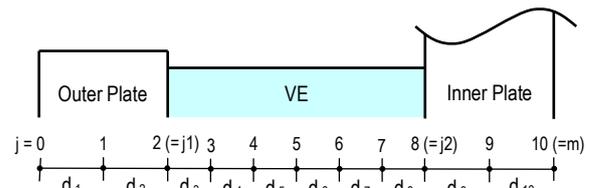


Fig.8 Example of element division for damper

4.2 正弦波実験との比較

Fig.9 に風方向 (A-3L) および風直交方向 (C-3L) における置換正弦波解析と実験結果の温度時刻歴をそれぞれ重ねて示す。解析がダンパー内部温度の変化を精度良く再現していることが確認できる。

次に、置換正弦波を用いた解析と実験のダンパー特性について検討を行う。Fig.10 に風方向 (A-3L) および風直交方向 (C-3L) における置換正弦波での解析と実験から得られた貯蔵剛性 K'_d と粘性係数 C_d の時間変化をそれぞれ示す。Fig.10 より、解析結果に実験値との多少の誤差はあるものの、解析が実験結果を再現できていることが確認できる⁹⁾。

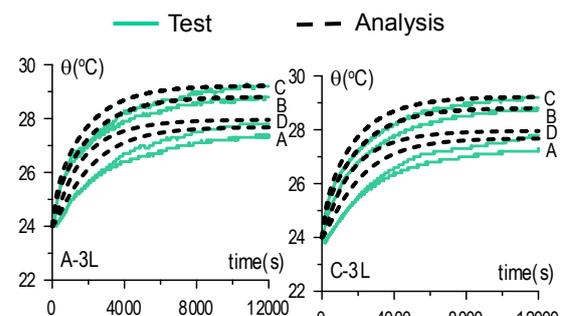


Fig.9 Test VS. analysis of temperature (Sinusoid)

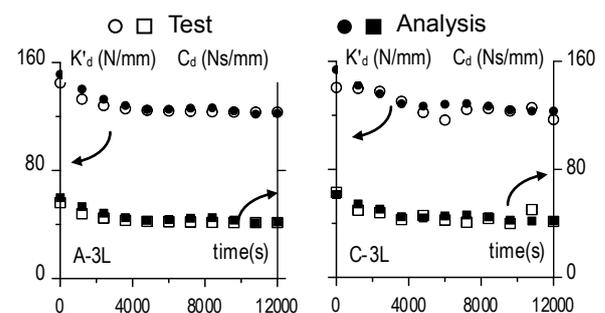


Fig.10 Random VS. sinusoidal tests of K'_d & C_d (Sinusoid)

4.3 風応答波実験との比較

Fig.11 にランダム波での解析と実験結果の温度時刻歴を重ねて示す。A-3L は風方向での結果、C-3L は風直交方向での結果である。Fig.11 より、解析結果においても実験結果と同様に、解析開始直後は粘弾性体のエネルギー吸収による発熱のために温度が上昇するが、ある時点から熱伝導・熱伝達の効果により、温度上昇が鈍くなる傾向が確認できる。さらに、解析結果と実験結果の温度を比較しても、解析結果と実験結果でよい対応を示していることが、前節の正弦波による解析と同様の精度で確認できる。Fig.12 にランダム波による解析と実験における、 K'_d と C_d の時間変化を重ねて示す。図より、解析結果は実験結果と同様に、加振開始から大きく低下することなく一定値に漸近する特性を表現できていることが分かる。さらに、解析から得られた特性値は実験結果を良く再現できていることが確認できる⁹⁾。

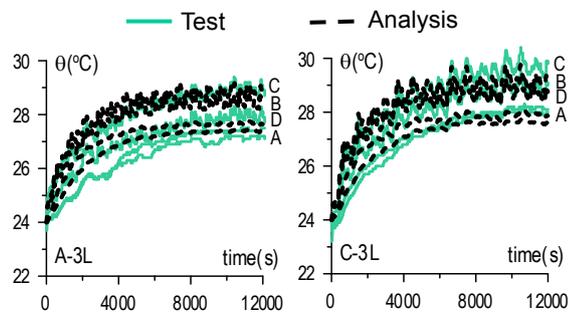


Fig.11 Test VS. analysis of temperature (Random)

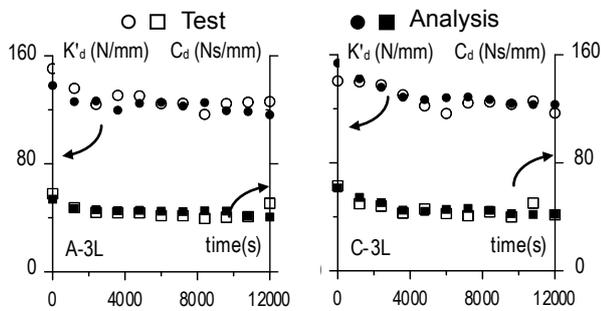


Fig.12 Random VS. sinusoidal tests of K'_d & C_d (Random)

5 おわりに

本報では、長時間振動時における粘弾性ダンパーの温度上昇に伴う動的特性の変化について述べた。さらに、正弦波を用いることで粘弾性ダンパーの動的特性の変化を簡易に評価できる実験手法および解析手法を示した。以下に本報で得られた知見を示す。

1. 加振直後では粘弾性体の温度上昇と剛性低下がおこるが、熱伝導・伝達のため温度上昇が鈍くなり、ダンパーの動的特性も一定値に漸近する。
2. 3次元FEMにより、時間とともに推移するダンパーの温度分布や剛性を精度良く予測できることを

示した。

3. 継続時間の長い風応答のような複雑な外乱に対しても、粘弾性ダンパーの温度と剛性・粘性係数は、正弦波実験と同様に、熱伝導・伝達の効果によって一定値に漸近することを実験的に確認した。
4. 正弦波置換法により得られる置換正弦波とランダム波での加振結果を比較すると、概ね同等の温度・剛性・粘性係数が得られたことから、時々刻々と変化するランダム振動時のダンパー特性を正弦波により評価できることが分かった。
5. 正弦波振動だけでなく、ランダム振動においても、熱伝導と熱伝達の効果を考慮できる時刻歴解析法による解析結果は長時間振動における温度やダンパー特性の変化を再現できることを示した。

正弦波置換法により、長周期地震動を受けるオイルダンパーの温度上昇も評価できることを確認している¹⁰⁾。

参考文献

- 1) 佐藤大樹, 笠井和彦, 田村哲郎: 粘弾性ダンパーの振動数依存性が風応答に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, 第635号, pp.75-82, 2009.1
- 2) 佐藤大樹, 笠井和彦, 田村哲郎: 粘弾性ダンパーを有する制振構造の振動数依存性を考慮した風応答予測法, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻, 第646号, pp.2255-2262, 2009.12
- 3) 佐藤大樹, 笠井和彦, 田村哲郎: 高層建築の制振を対象とした風洞実験装置の開発および風応答に関する基礎的研究 - 粘性・粘弾性ダンパーを有する高層建築物の一様流中における風洞実験 -, 日本建築学会構造系論文集, 第609号, pp.65-73, 2006.11
- 4) 佐藤大樹, 田村哲郎, 笠井和彦: 粘性・粘弾性ダンパーを有する高層建物の風応答特性に関する風洞実験, 日本建築学会構造系論文集, 第617号, pp.95-102, 2007.7
- 5) 笠井和彦, 佐藤大樹, 黄一華: 継続時間が長い外乱での温度上昇と熱伝導・伝達を考慮した粘弾性ダンパーの解析手法, 日本建築学会構造系論文集, 第599号, pp.61-69, 2006.1
- 6) 笠井和彦, 寺本道彦, 大熊潔, 所健: 粘弾性体の温度・振動数・振幅依存性を考慮した構成則, その1, 線形領域における温度・振動数依存のモデル化, 日本建築学会構造系論文集, 第543号, pp.77-86, 2001.5
- 7) 佐藤大樹, 笠井和彦: 長時間ランダム振動時の粘弾性ダンパーの特性および正弦波による評価手法, 構造工学論文集, Vol.53B, pp.67-74, 2007.3
- 8) Daiki Sato, Kazuhiko Kasai and Tetsuro Tamura: Properties of Viscoelastic Damper under Wind Load and Analytical Method Considering Heat Conduction & Transfer, Proceedings of the 12th International Conference on Wind Engineering (ICWE12), pp.1263-1270, 2007.7
- 9) 佐藤大樹, 所健, 笠井和彦, 北村春幸: 風応答振動時における粘弾性ダンパーの特性および正弦波による簡易評価手法, 日本建築学会構造系論文集, 第80巻, 第710号, pp.571-581, 2015.4
- 10) 佐藤大樹, 大内隼人, 長江拓也, 五十幡直文, 北村春幸, 中島正愛: 実大架構内に設置したオイルダンパーの性能評価および長周期地震動による温度上昇, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.529-530, 2010.