

最大応答量に着目した粘弾性体ダンパーによる制振構法 地震時応答と減衰自由振動における減衰力の不均等分布の効果

塚越 勇*, 小竹 潤一郎**, 近藤 裕嗣**

Proposals of Design Method of the Viscoelastic-material Damper which noticed the Largest Response —Effects of Uneven Distribution of Large Damping Forces on Forced and Free Vibrations

Isamu TSUKAGOSHI*, Junichirou KOTAKE** and Hirotsugu KONDO**

(Received May 27, 1999)

This is a report of verification about the design method of Viscoelastic material damper fixed on the multi-stories building.

Several kinds of steel models of building were provided and they were fixed on the shaking table driven by the earthquakes responses and sine waves.

To compare the experimental results with the dynamical analysis, some assumptions must be introduced. The design method using critical damping ratio and largest relative deformation which is proposed can also be applied to the building of the uneven damping ratio distribution.

Keywords : Damping mechanism , Viscoelastic material,
Multi-stories building, Largest relative deformation,
Damping forces distribution, 1st. Mode of vibration

1. はじめに

建物の層間変形で作動する粘弾性ダンパーにより各層に均等な減衰率を与える方法を前報¹⁾で述べた。これによれば、高減衰力を備えた供試体では地震時の最大応答時における一瞬の釣り合いに配慮すれば、多質点系でも1次振動形と仮定することで実験値と計算値とは良い一致が得られている。しかしながら、不均等な減衰率を備えた建物

についての地震時の応答や減衰自由振動についての研究はほとんど報告されていない。多質点系として扱い得る供試体が不均等減衰率分布を備えた場合の応答特性を調査することは、設計上有意義であるし、前報で示した方法のさらなる検証となりうる。また、この方法の適用可能な範囲を示すと共に、本制振構法の新しい展望が開ける可能性も探りたい。

*建築学科(Department of Architecture)

**建設工学専攻大学院生(Graduate Student, Architecture)

2. 目的

建物の設計は構造的配慮のみでは成立しない。すなわち構造的合理性は人間の生活空間を確保するための手段ではあるが、空間活用の要求に優先していない。さらに、この構造的合理性は経済性との調和も重要である。高減衰力を付加された建物が地震荷重や風荷重に対して構造的に優れ、さらに限定された範囲ではあるが、人間の不快に対する生理反応を減少させることも判明している¹²⁾。また、減衰力の付加部分の最小化は空間活用のみならず経済性とも関連して重要なことである。このような観点により各層で不均等な減衰力分布の効果は調査目的と十分なり得る。

層間変形で作動する粘弾性体ダンパーを設置した層としない層で構成される多層建物型供試体では減衰力の分布は均等でない。このような供試体を8種類用意し地震時応答、共振倍率、減衰自由振動等により、本論では以下のことを調査する。

- ①減衰力の不均等分布が地震時に有効か否かを建物設計用地震応答計算に使用されているプログラム^{*1}出力と実験結果により検証する。
- ②減衰自由振動波形と減衰力分布の関係を調査する。
- ③共振倍率と粘弾性体総付加面積との関係を知ること、不均等分布する減衰力の効果を明らかにする。

3. 前報の概要

前報によれば、設計目標における各層の減衰率を得るために必要となる粘弾性体のせん断面積は次のようにして算出される。

$$C_{eri} = 2 \sqrt{\Sigma m_i \cdot k_i} \quad (\text{Kg} \cdot \text{sec/cm}) \quad \cdots \text{式 1}$$

$$h_i = C_i / C_{eri} \quad \cdots \text{式 2}$$

$$G_i = C_i \cdot V_i \quad (\text{Kg}) \quad \cdots \text{式 3}$$

$$F_{vi} = 6.07 \times e^{-0.1T} \times (\delta_{\max} / d_i)^{0.76} \times f_s^{0.30} \times A_i \quad (\text{Kg}) \quad \cdots \text{式 4}$$

$$F_{ei} = 5.73 \times e^{-0.1T} \times (\delta_{\max} / d_i)^{0.82} \times f_s^{0.38} \times A_i \quad (\text{Kg}) \quad \cdots \text{式 5}$$

$$V_i = 2 \pi f_s \cdot \delta_{\max i} \quad \cdots \text{式 6}$$

$$G_i = C_i \cdot V_i = 2 \pi f_s \cdot \delta_{\max i} \cdot C_{eri} \cdot h_i \quad (\text{Kg}) \quad \cdots \text{式 7}$$

$G_i = F_{vi}$ より A_i が決まる。

記号：

C_{eri} — i 層の限界減衰率— $\text{Kg} \cdot \text{sec/cm}$

Σm_i — i 層の柱が支える質量の総和— $\text{Kg} \cdot \text{sec}^2/\text{cm}$

k_i — i 層の剛性— Kg/cm

h_i — i 層の減衰率

T_i — i 層の粘弾性体の温度— $^{\circ}\text{C}$

$\delta_{\max i}$ — i 層の最大層間変形— cm

d_i — i 層の粘弾性体のせん断厚さ— cm

f_s —供試体の一次固有振動数— Hz

A_i — i 層の粘弾性体せん断面積— cm^2

F_{vi} — i 層の粘性抵抗力— Kg

F_{ei} — i 層の弾性抵抗力— Kg

G_i — h_i を得るために必要な粘弾性体抵抗力— Kg

4. 供試体と実験の概要

供試体は鋼製の10層建物型で、床相当部の重量が全体の90%以上あり、質点系として取り扱える。諸元を表1に、供試体概略図を図1に示す。

層間変形は柱相当材に抵抗線歪みゲージを接着し、この歪みを変形に換算するための補正值から算出している。この補正值の線形性を図2に示す。加速度は偶数層にサーボ型加速度計を設置し計測した。

図3に供試体の減衰率の分布状況を概略図にて示す。供試体⑩は全層 $h = 0\%$ である。これらの供試体は2章の計算方法から各層のダンパー性能が設計されたものであり、このダンパーに装着している粘弾性体せん断面積は A_i は計算を2回反復した結果から算出している。供試体⑦⑧は、全層に10%、30%の減衰率を備えており前報ですでに述べられているが、さらに本報では供試体①から⑥を加えている。

表1 10層供試体諸元 (実測値)

層	重量 (Kg)	剛性 (Kg/cm)	層	重量 (Kg)	剛性 (Kg/cm)
10	150	210	5	190	680
9	180	210	4	190	1520
8	170	220	3	210	1520
7	180	670	2	200	1570
6	180	680	1	210	1580
固有振動数 一次: 1.66 Hz 二次: 3.75 Hz 三次: 6.37 Hz					
剛性 (頂部水平方向) 46.26 kg/cm (計算値47.42 kg/cm)					

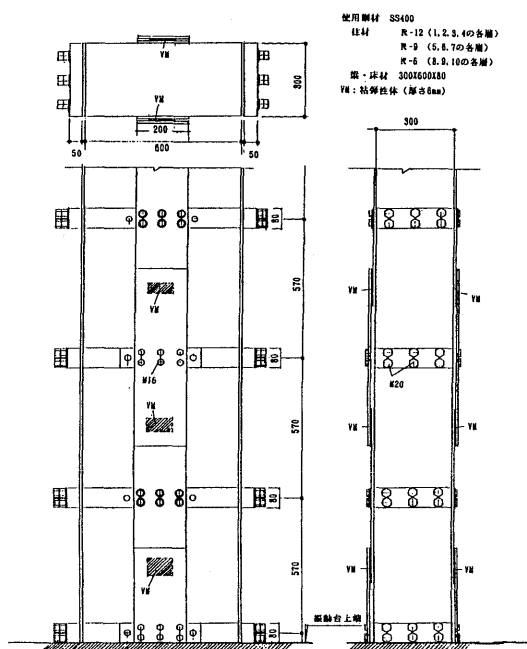


図1 10層供試体概略図

5. 地震時応答（実測値と計算値）

振動台の駆動用地震波は El centro.NS, Taft.EW, 八戸.NSの3種類である。振動台実験結果と応答計算による時刻歴波形（層間変形, 加速度）をEl centro.NSの場合について図4から図21に示す。図22と図23は実験に用いた入力地震波波形である。図24から図39に異なる3種類の地震加速度波形を最大加速度100galとした場合の最大応答量（加速度, 層間変位）を示す。

6. 減衰自由振動波形（実測値）

減衰自由振動波形は各供試体の10層部分に3mmの水平方向変形を与え、これを瞬時に開放することで生じる振動を計測したものである。計測された自由振動波形（各層層間変形）を図40から図48に示す。

7. 共振倍率曲線（実測値）

振動台を正弦波で駆動し、最上層に設置した加速度計の出力と振動台の加振振動数から図49の共振倍率曲線を作成した。図は、縦軸に最大加速度応答量を振動台の最大加速度との比で示した共振倍率であり、横軸は振動台の駆動振動数を示した。また、図中の丸数字は供試体番号である。

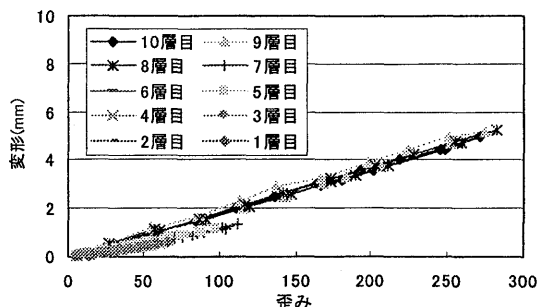
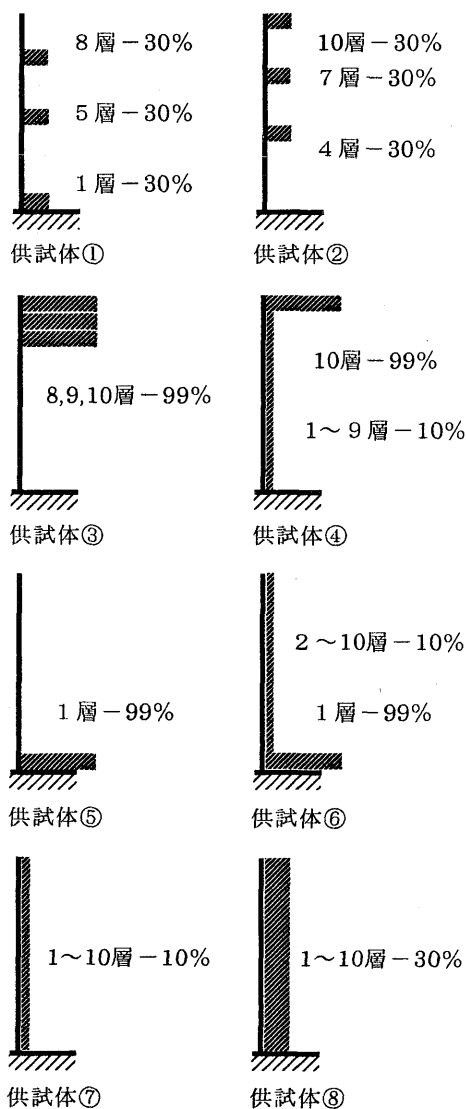


図2 歪ゲージ補正値の線形性



○で囲んだ数字は供試体番号を示し、特記の無い層はダンパーを設置していない。

図3 供試体番号と減衰率分布

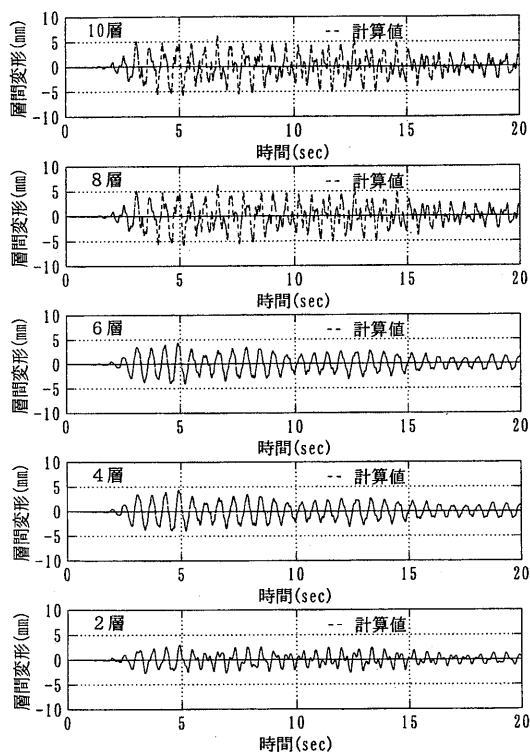


図4 地震応答波形 (供試体①—層間変形)

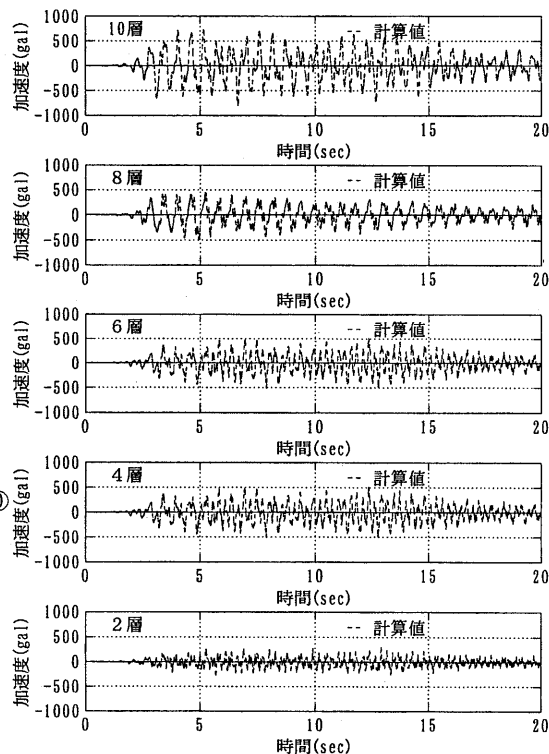


図5 地震応答波形 (供試体①—加速度)

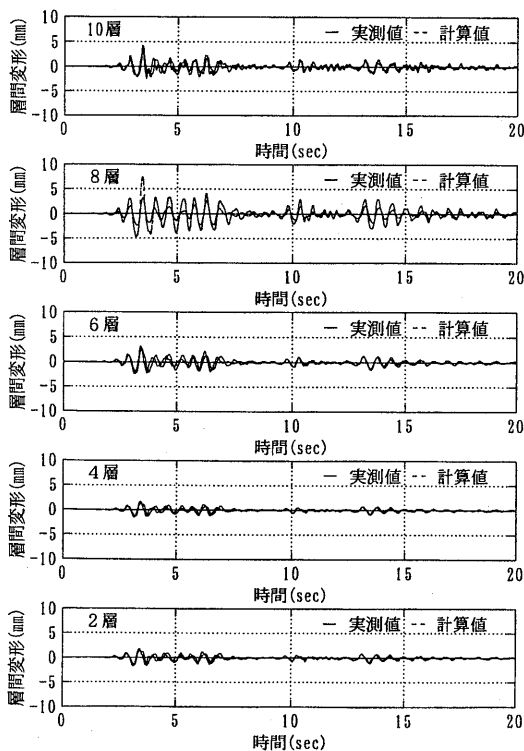


図6 地震応答波形 (供試体①—層間変形)

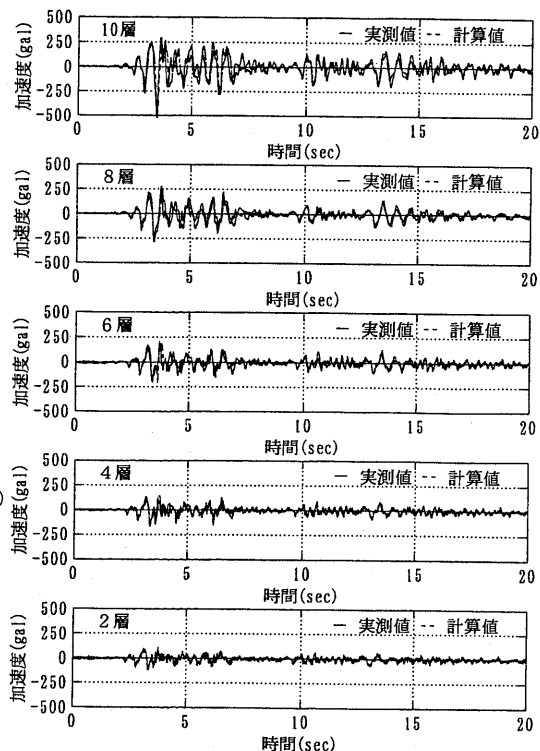


図7 地震応答波形 (供試体①—加速度)

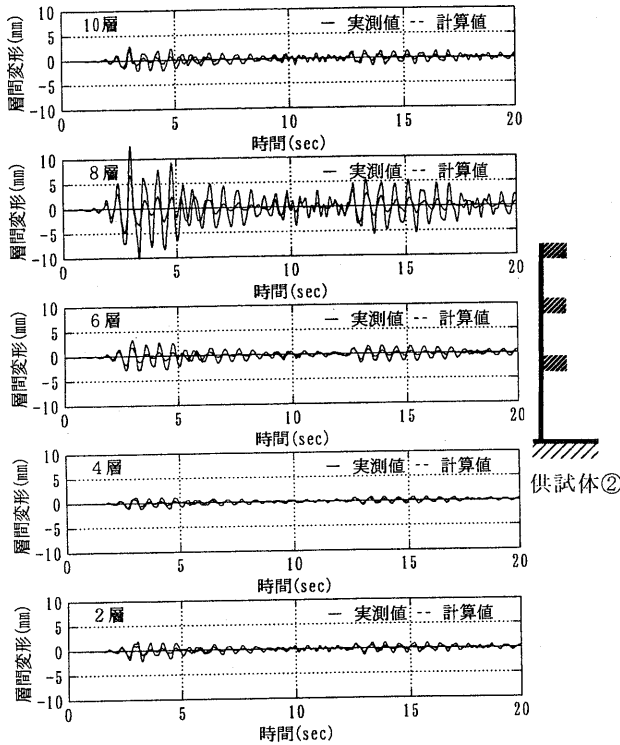


図8 地震応答波形 (供試体②—層間変形)

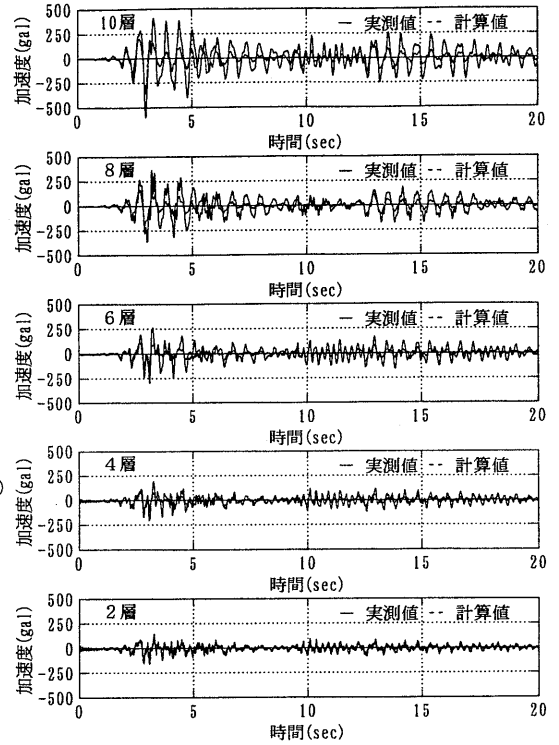


図9 地震応答波形 (供試体②—加速度)

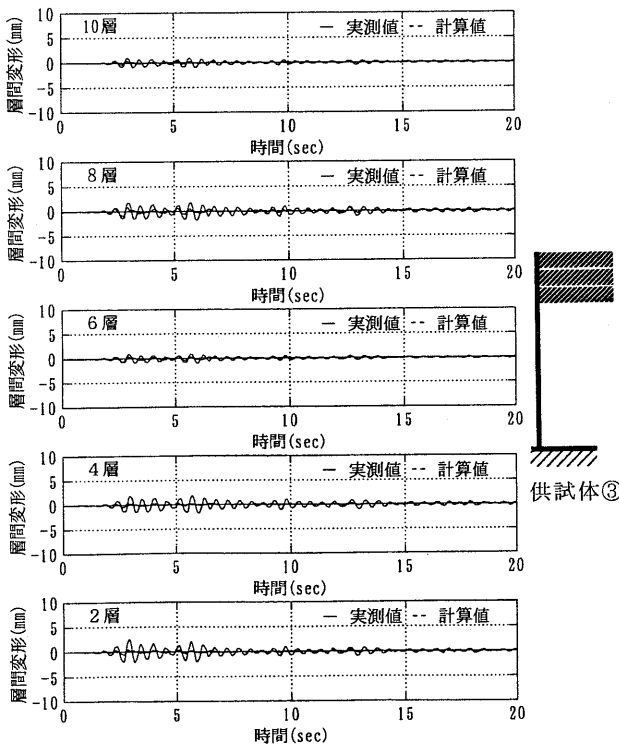


図10 地震応答波形 (供試体③—層間変形)

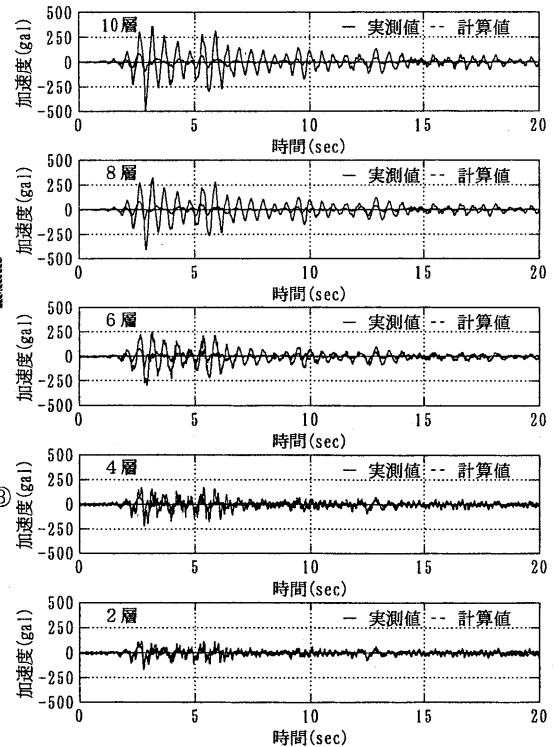


図11 地震応答波形 (供試体③—加速度)

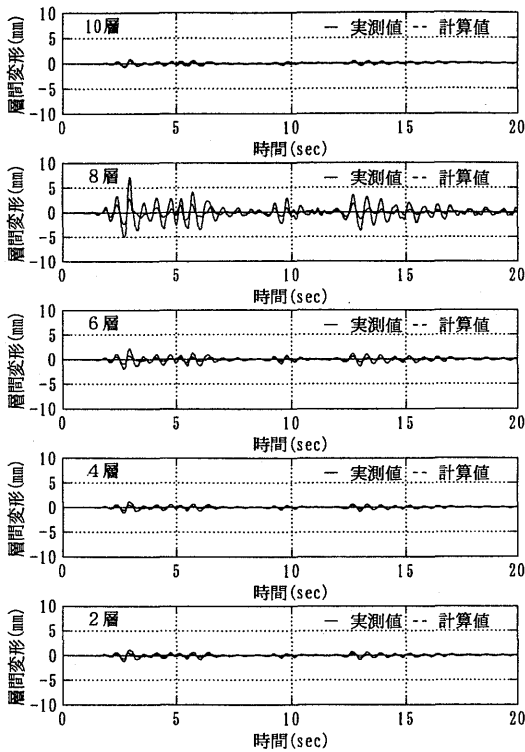


図12 地震応答波形 (供試体④—層間変形)

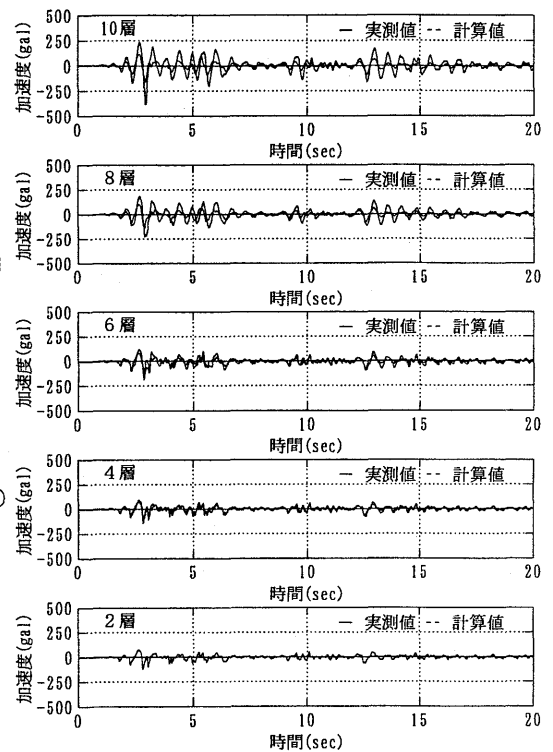


図13 地震応答波形 (供試体④—加速度)

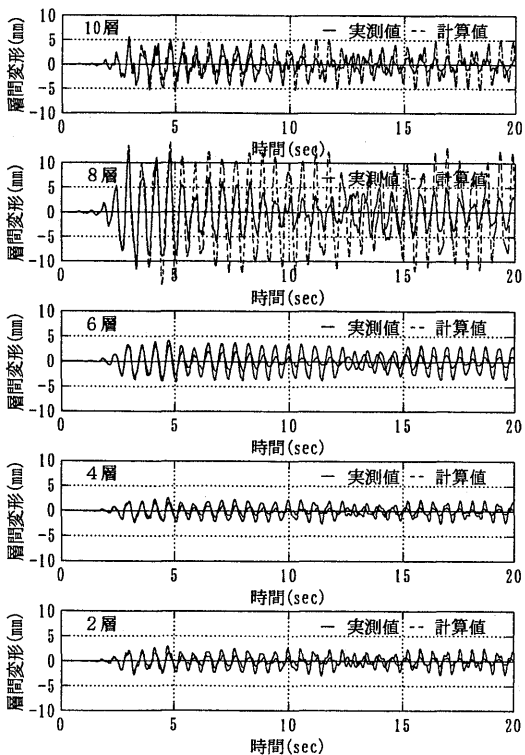


図14 地震応答波形 (供試体⑤—層間変形)

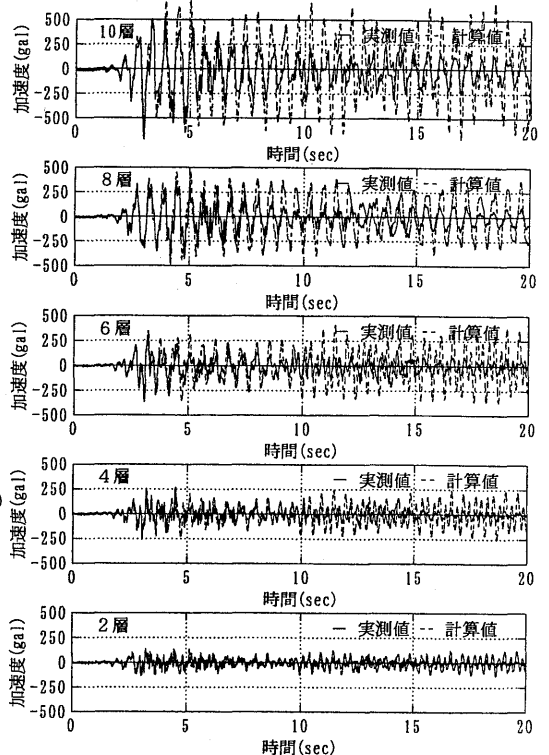


図15 地震応答波形 (供試体⑤—加速度)

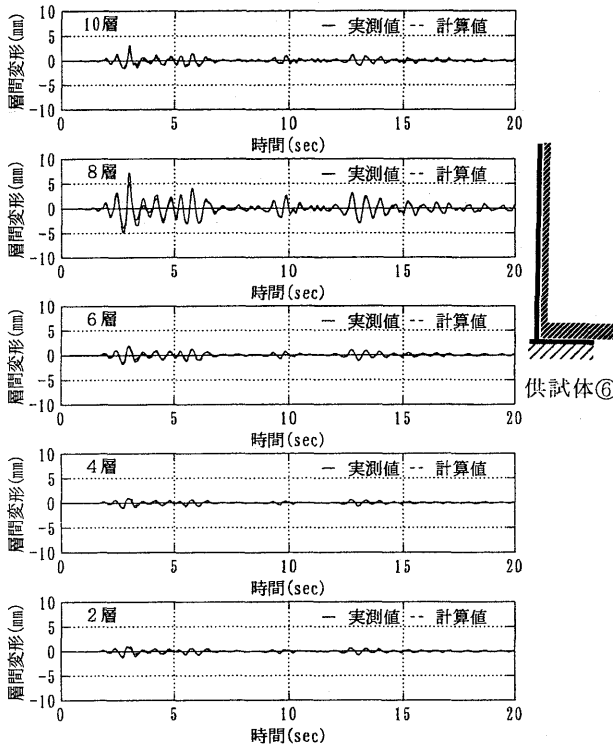


図16 地震応答波形 (供試体⑥—層間変形)

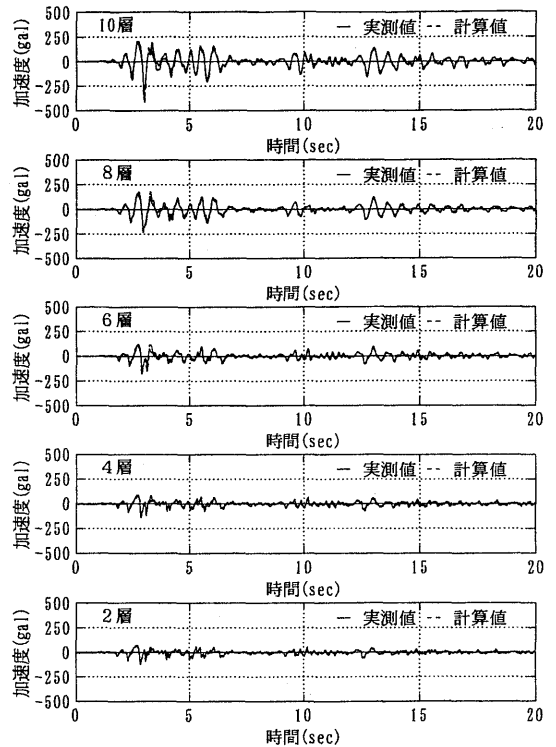


図17 地震応答波形 (供試体⑥—加速度)

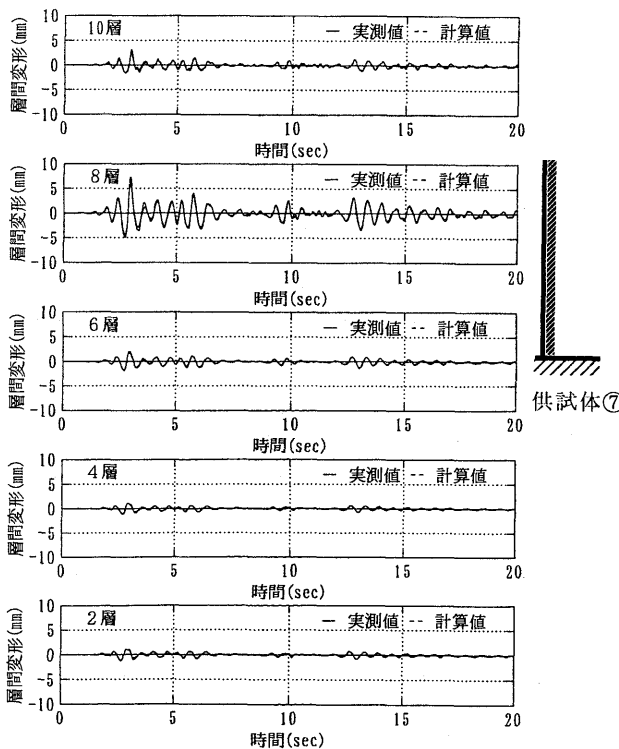


図18 地震応答波形 (供試体⑦—層間変形)

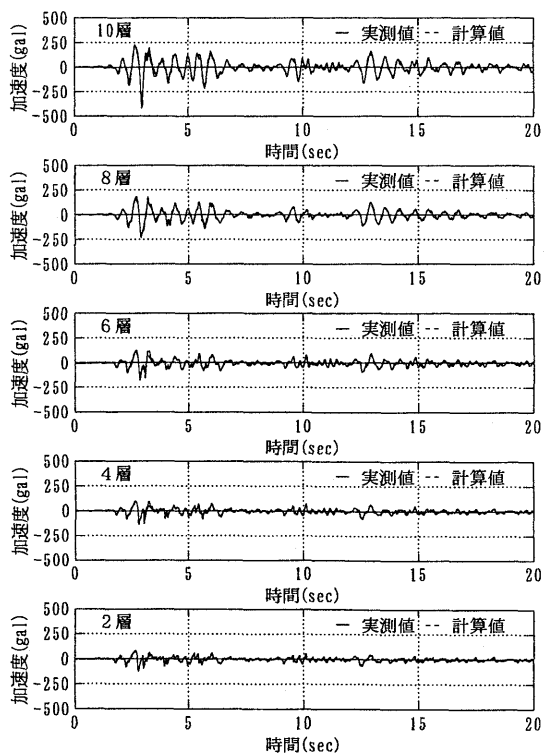


図19 地震応答波形 (供試体⑦—加速度)

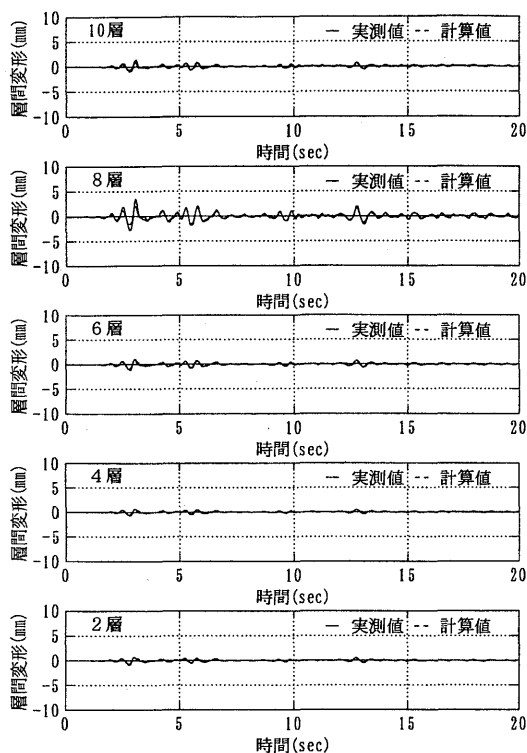


図20 地震応答波形 (供試体⑧—層間変形)

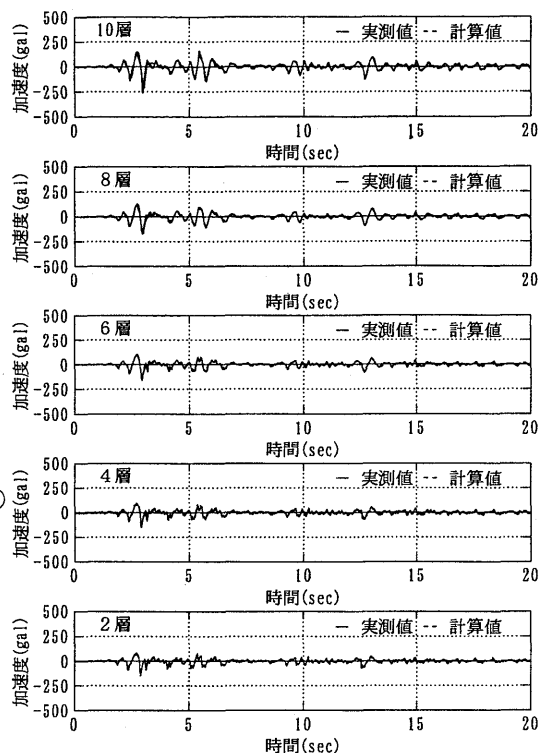


図21 地震応答波形 (供試体⑧—加速度)

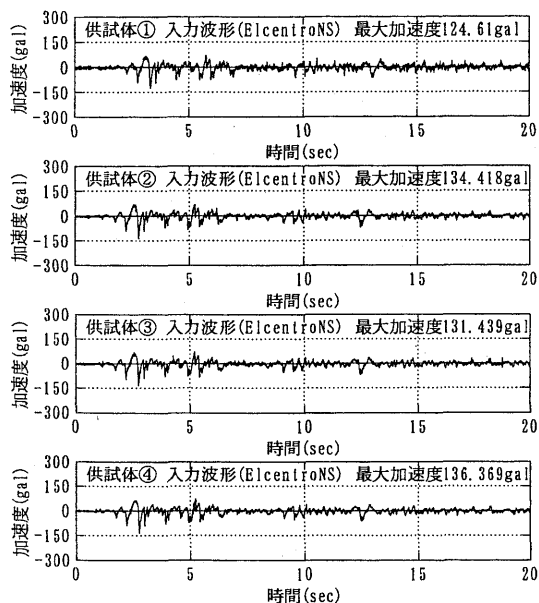


図22 地震入力波形 (El centro.NS)

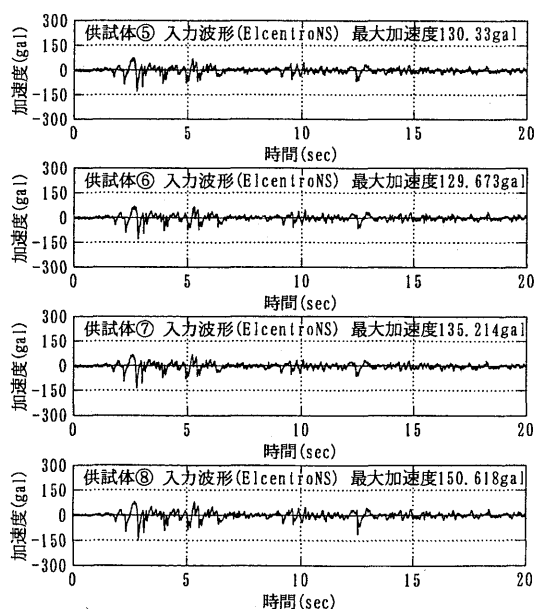


図23 地震入力波形 (El centro.NS)

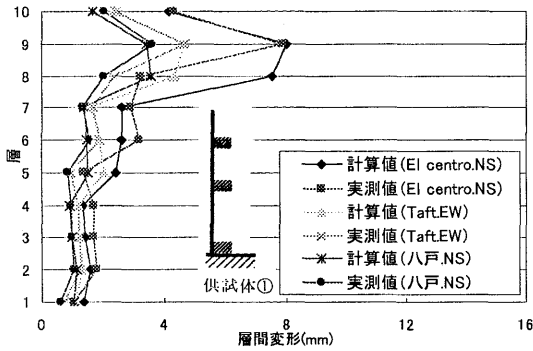


図24 地震時最大層間変形 (供試体①)

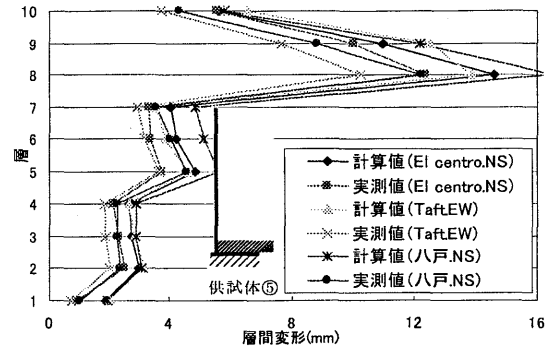


図28 地震時最大層間変形 (供試体⑤)

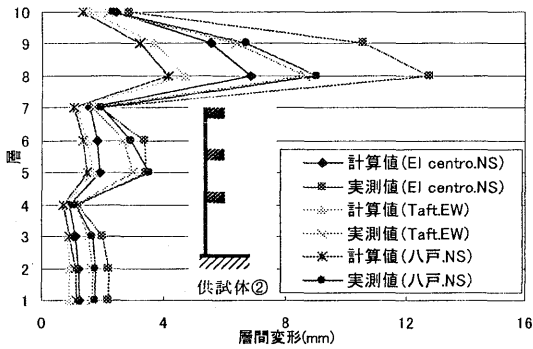


図25 地震時最大層間変形 (供試体②)

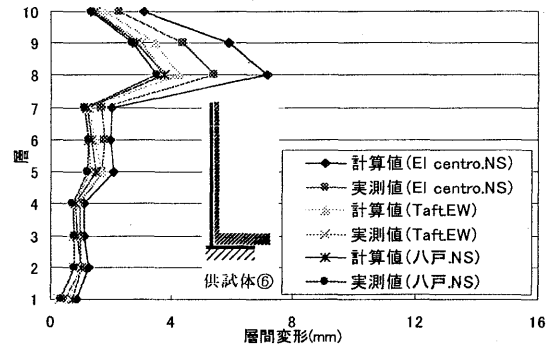


図29 地震時最大層間変形 (供試体⑥)

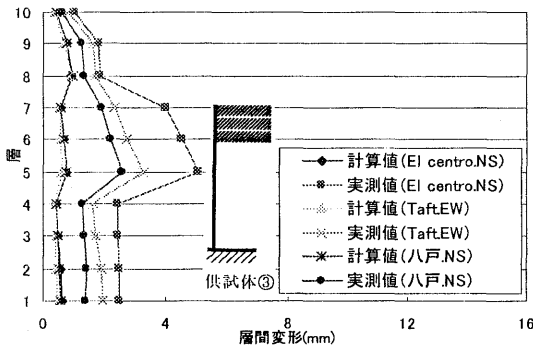


図26 地震時最大層間変形 (供試体③)

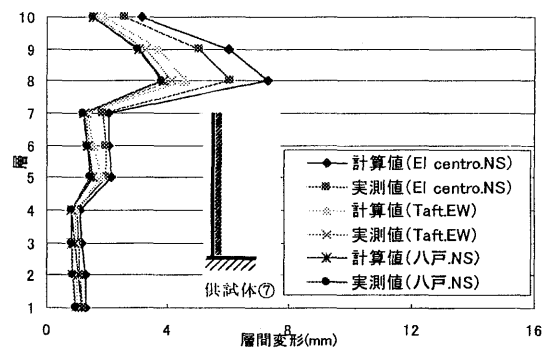


図30 地震時最大層間変形 (供試体⑦)

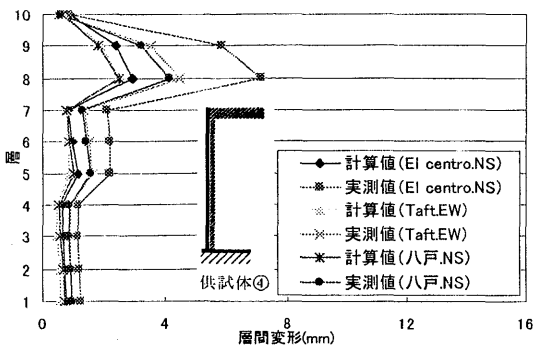


図27 地震時最大層間変形 (供試体④)

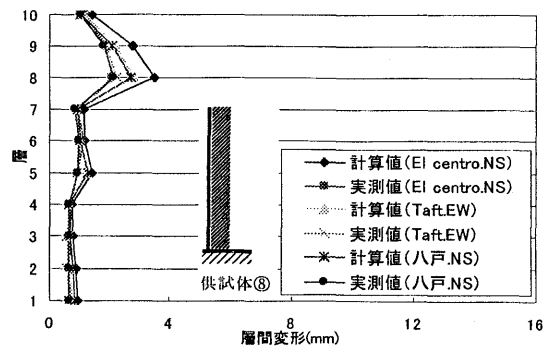


図31 地震時最大層間変形 (供試体⑧)

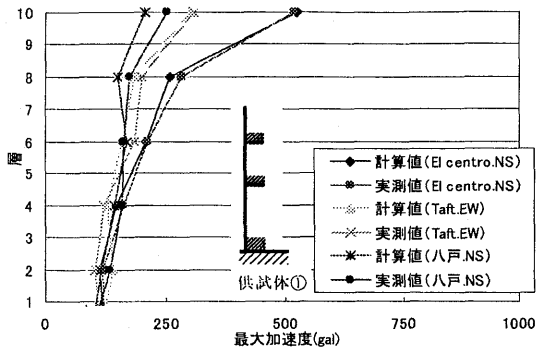


図32 地震時最大加速度 (供試体①)

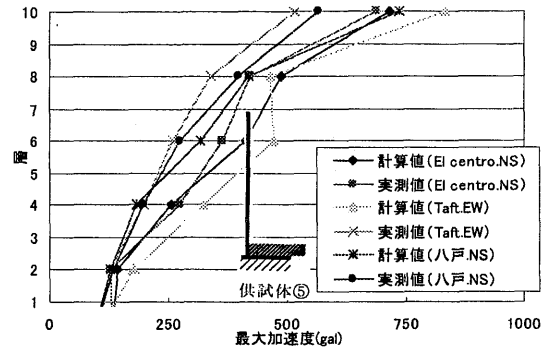


図36 地震時最大加速度 (供試体⑤)

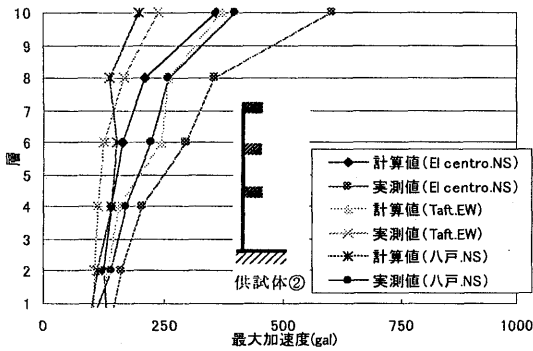


図33 地震時最大加速度 (供試体②)

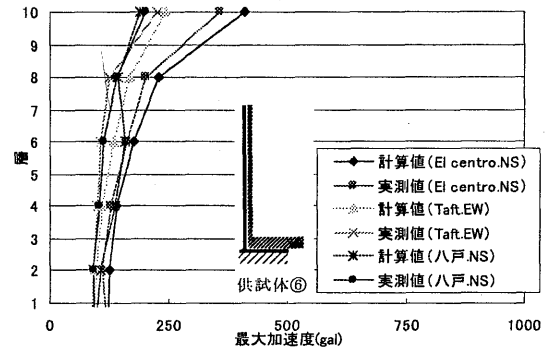


図37 地震時最大加速度 (供試体⑥)

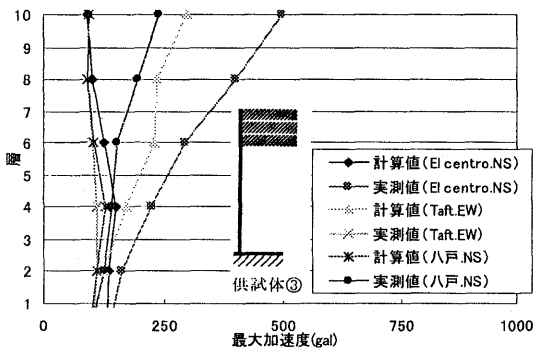


図34 地震時最大加速度 (供試体③)

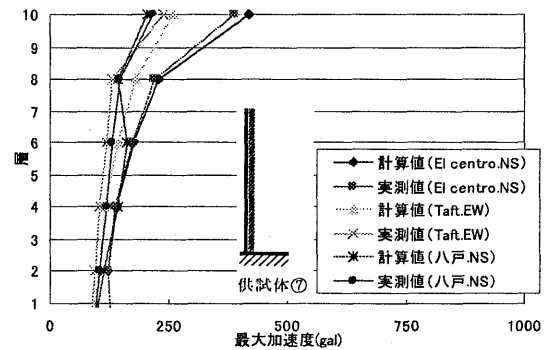


図38 地震時最大加速度 (供試体⑦)

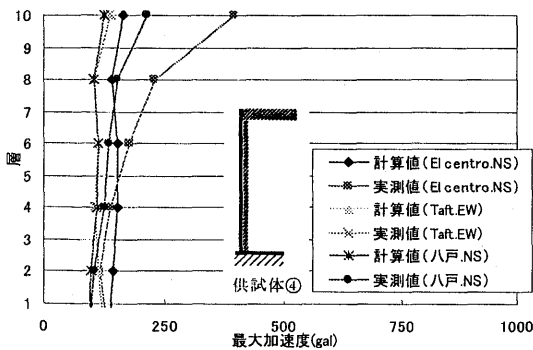


図35 地震時最大加速度 (供試体④)

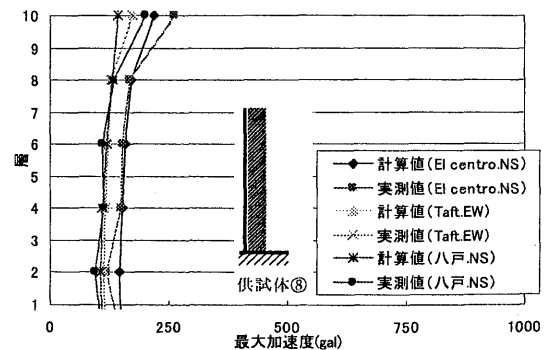


図39 地震時最大加速度 (供試体⑧)

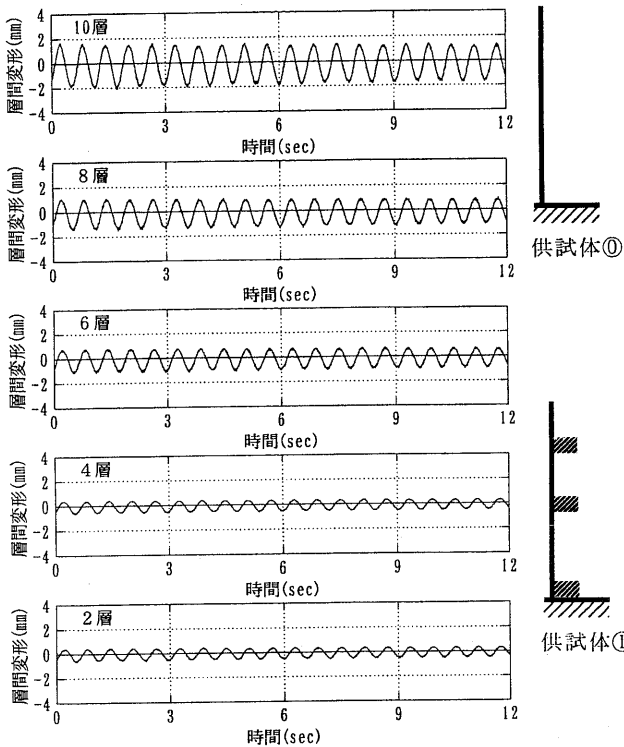


図40 減衰自由振動波形 (供試体①)

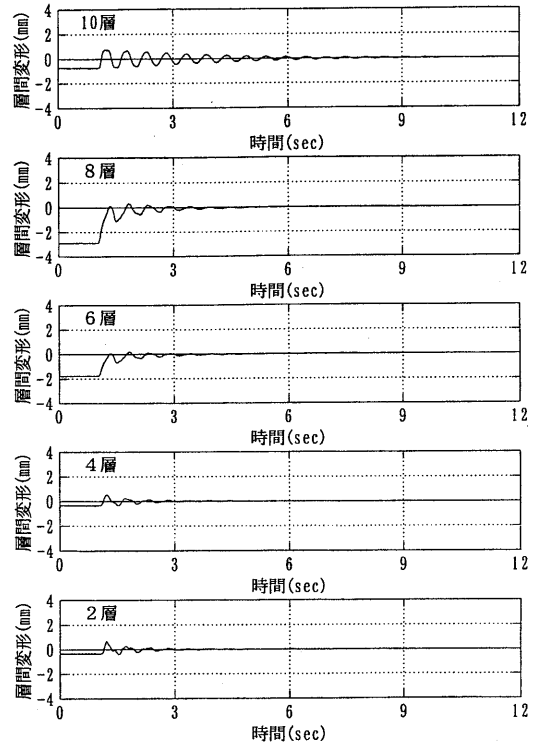


図41 減衰自由振動波形 (供試体①)

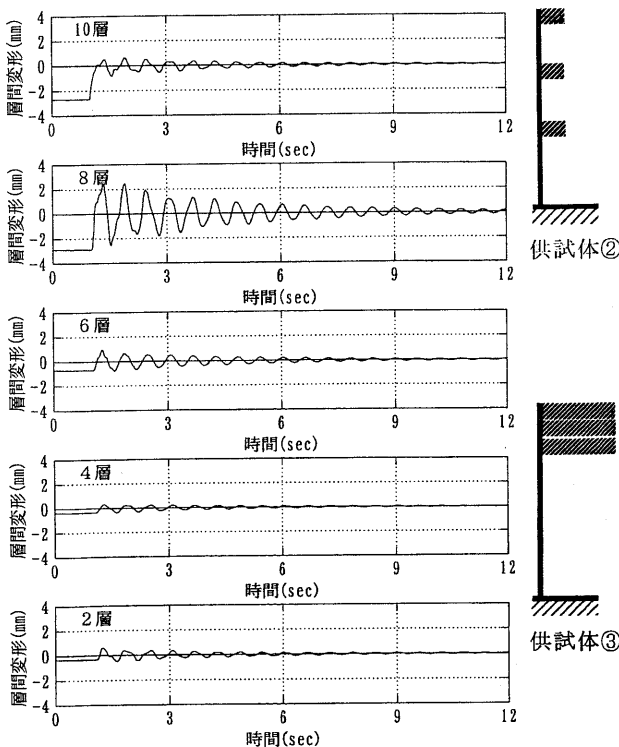


図42 減衰自由振動波形 (供試体②)

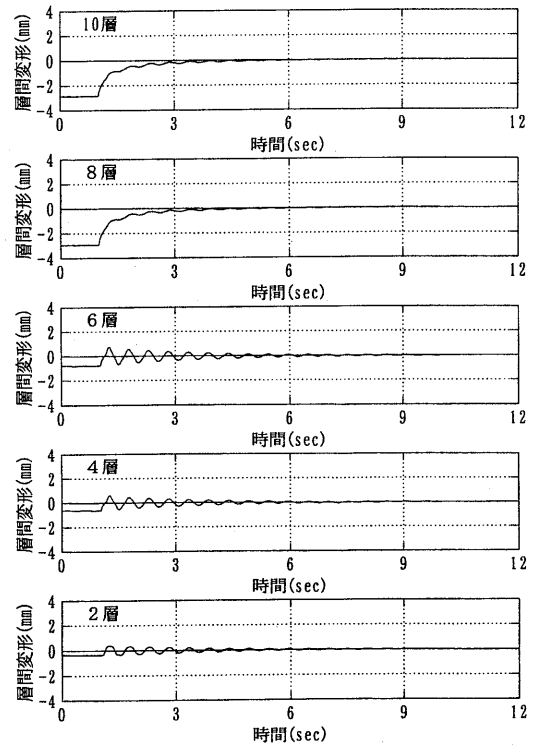


図43 減衰自由振動波形 (供試体③)

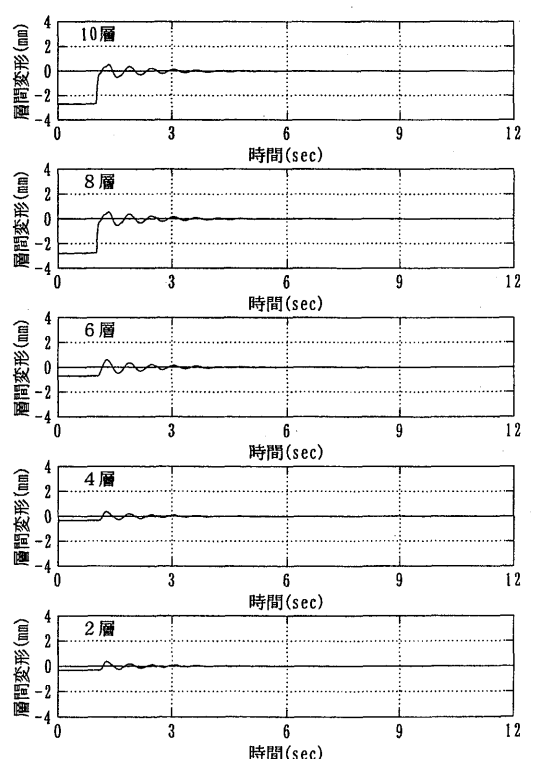
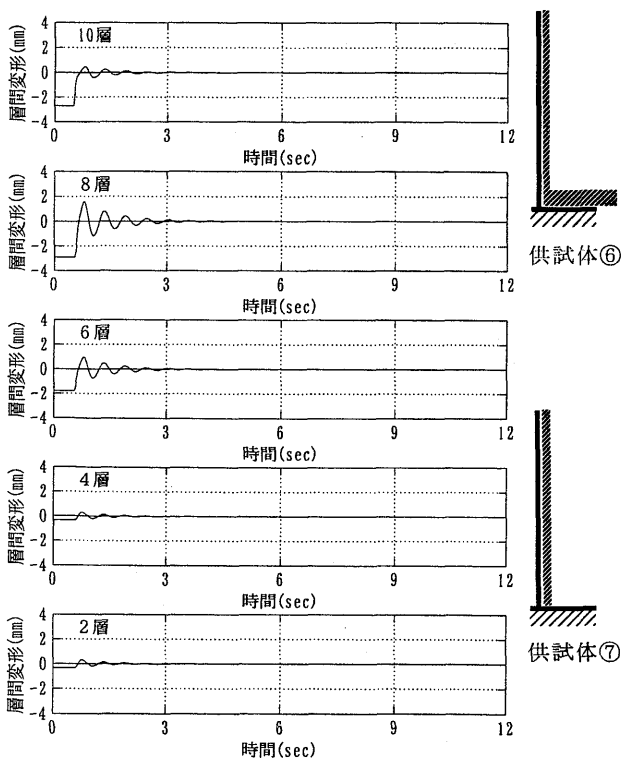
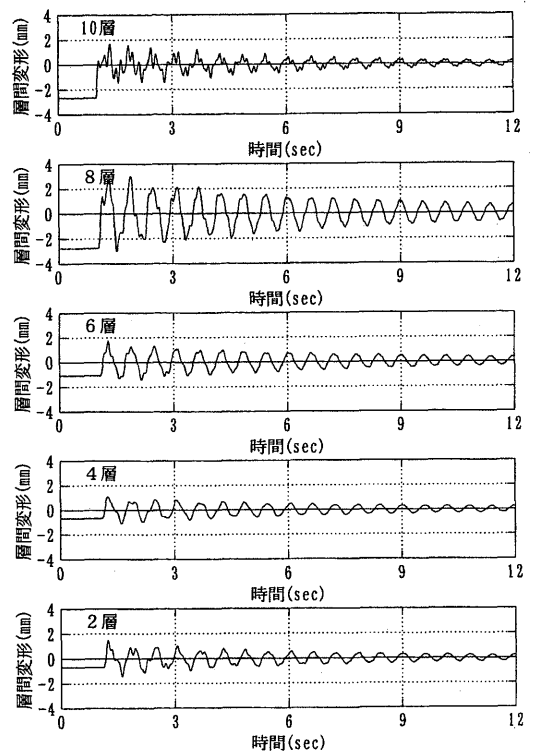
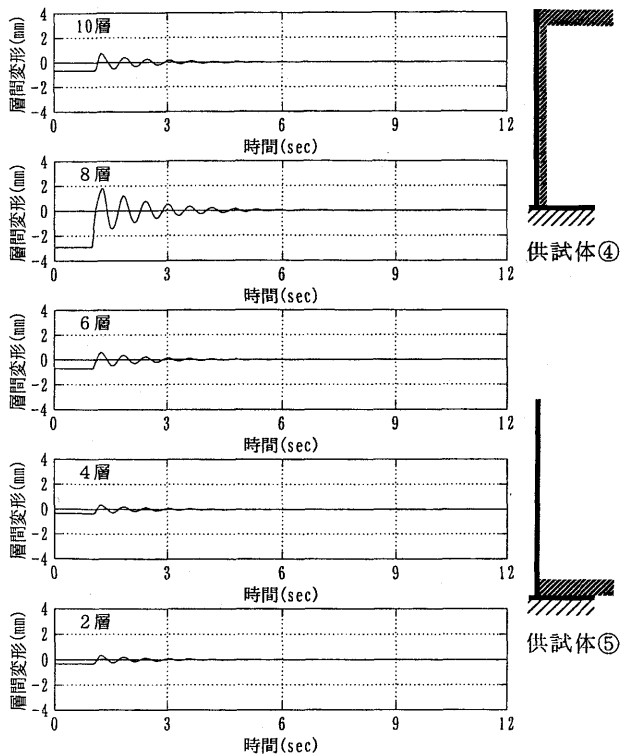


図46 減衰自由振動波形 (供試体⑥)

図47 減衰自由振動波形 (供試体⑦)

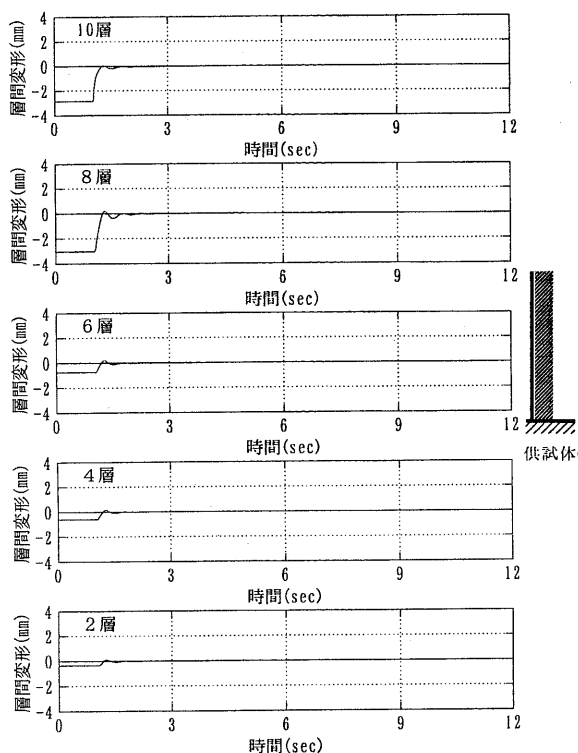


図48 減衰自由振動波形 (供試体⑤)

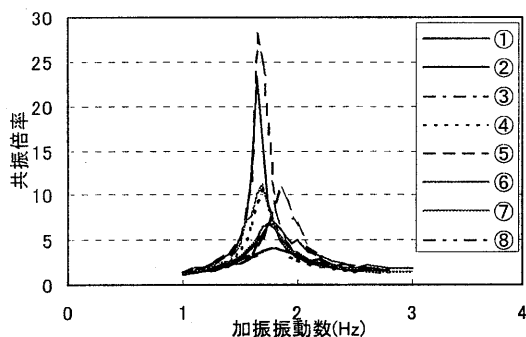


図49 共振倍率曲線

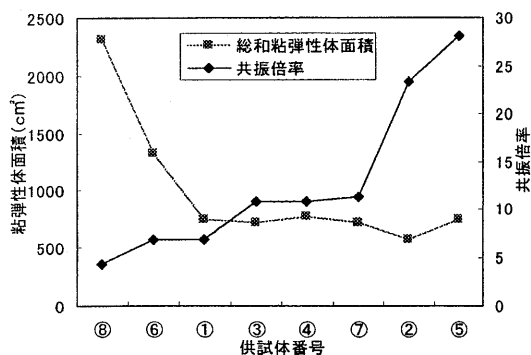


図50 粘弾性体面積の総和と共振倍率

8. 考察

8-1 地震時応答より

実験結果と計算結果は時刻歴応答波形、最大層間変形、各層最大加速度より比較する。応答波形は入力波形がEl centro.NS波のみ、各最大値はEl centro.NS波、Taft.EW波、八戸.NS波について考察している。

供試体⑦⑧は、全層に10%、30%の減衰率を備えており、前報でも述べられているが振動台実験結果と計算値とは良く一致している。

⑥は、⑦の最下層に99%の減衰率を付加したもので、これも実験結果と計算結果は等しいと判断できる。この供試体では最下層の減衰力が上層に与える影響はほとんどない。

⑤は、①の最下層に99%の減衰率を付加したもので、応答波形における最大値近傍では実験と計算値とは一致しているが、時間が経過するに従い計算値>実験値となっている。さらに、実験値では異なる入力地震波形によって応答量の相違はあるものの小さなものである(図28)。従って、⑤のように、最下層に極めて大きな減衰力を備えた場合には地震時において応答量の減少が生じることが判明した。この場合の具体例としては地下階を利用し、ここの減衰力を大きくすることで1階より上層の応答制御機構とする事が出来ることを示している。

④は、⑦の最上層に99%の減衰率を付加したものである。計算値<実験値となっており、最上層に付加された減衰力の効果は計算上では大きく現れているが、実験では顕著に現れていない。

③は、①の8,9,10層に99%の減衰率を付加したものである。この供試体でも④と同じく計算値<実験値である。計算値では上層に設置した減衰力の効果が現れているが、実験結果は全ての入力波について計算値より大きな応答を示している。しかしながら、層間変形応答量で比較すると④,⑥,⑦,⑧に匹敵する応答量の改善が観察される。この供試体では⑤との比較を応答量のみとするなら、⑤よりはるかに小さな応答量であると判断できるので、⑤と同様に減衰層が利用できる可能性を示している。

②は、4,7,10層にそれぞれ30%の減衰率を付加している。この場合4,7,10層の最大層間変形量は計算値=実験値で、他の層では計算値<実験値である。また、最大加速度でも計算値<実験値となっている。従って、特定の層の層間変形を小さくしたい場合には、その層に減衰力を備えれば

目的を達成できることを示唆していると判断できる。これと同様な判断は③でも可能である。

①は、1, 5, 8 層に30%を備えた場合である。これは⑦に匹敵する応答量で実測値=計算値と判断できる。これは実際の建物での利用が可能な分布である。

8-2 減衰自由振動波形について

減衰自由振動波形は建物が風力により励起される振動と類似しており、本論にて使用した8種類の減衰率分布で減衰力の不均等分布効果の全容を把握するのは困難であるが、極めて興味深い性状も観察されたため、波形の目視から考察をする。

a) 最上階あるいはその近傍を過減衰に近い状態にした場合

供試体③④(図43,44)が対象となる。③は供試体①の波形(図40)との比較で明らかであるが、最上階近傍での減衰力は全下層に大きな影響を与えていることは明白である。④と⑦を比較すると両者の波形にほとんど相違はない、この現象は③と①との関係とは大きな違いであり、全体的に大きな減衰力を付加された供試体では一部の減衰力を増大させても、それが全体に及ぼす影響は小さいと推定できる。ただし、最上階の振動状態に限定すれば応答の改善がなされている。

b) 最下層を過減衰に近づけた場合

供試体⑤,⑥(図45,46)が対象である。⑤を①と比較すれば最下層での減衰力の影響が全層に及んでいる。⑥は、⑦との比較から、際立った改善効果は見せないが、全体的に振動時持続時間が短くなっていることが分かる。これは④と⑦との関係に類似している。

c) 中間層に大きな減衰力を付加した場合

供試体①,②(図41,42)が対象になる。①は極めて顕著な効果が観察できる。②では8層において減衰性は小さいがこれはこの層にダンパーが配置されていないためであり、他層では充分ダンパーの効果は認められる。

d) ③と⑤との比較

供試体③と⑤との比較は興味がある。③が優れていることは瞬別できる。本論によれば上層ほど C_{eff} が小さく、これに従って粘弾性体の必要面積も小さくなることから、ダンパー機構も簡易のものとなり得る。減衰自由振動波形の改善には最上層近傍に極めて大きな減衰力を付加することが大きな効果を発揮することの可能性を示唆している。

8-3 共振倍率曲線について

図49の共振倍率曲線から、応答倍率の小さな供試体から順に並べると次のようになる。() にくっているのは () 内ではほぼ同等であることを示す。すなわち $⑧ < (①, ⑥) < (③, ④, ⑦) < ② < ⑤$ の順である。

③にて使用した粘弾性体面積の総和 (ΣA_i) を基準とし、他の供試体の ΣA_i と応答倍率との関係を上述の順序を横軸にて示すと図50となる。 ΣA_i は⑥,⑧では際立って大きい、他の供試体ではほぼ同じであるとして行うことができるほど、各供試体での相違は小さい。これらの結果で最も粘弾性体の特性を効率よく利用しているのが①である。①は⑥に対して約50%、⑧に対して32%程の粘弾性体しか使用していないが、応答倍率では⑥と同等で、⑧に対しては1.2倍程度である。③,④,⑦は応答倍率は同等であり、これは ΣA_i でも同様である。

以上より、応答倍率で判断するなら減衰率の分布には最適形状に近いものの存在が推定される。

9. まとめ

本論では、不均等な減衰力分布を持つ多質点建物型供試体を用いた振動実験から、不均等な減衰力分布における粘弾性体ダンパー設計方法や不均等分布による効果を明らかにした。以下にそのまとめを行う。

1. 地震時応答計算より

- ① 高減衰力が均等分布の場合、極めて著しい改善がなされている。
- ② 最上層近傍に極めて大きな減衰力を付加した場合、全く減衰力を付加されていない場合と比較すれば全層の応答はかなり改善される。これは付加された層の層間変形に対して著しい。
- ③ 最下層に極めて大きな減衰力を付加した場合全層の応答が改善されている。この場合、最大値に関しては実験値=計算値である
- ④ 最上層及び中間層に付加された減衰力の効果は著しい。
- ⑤ 設計目標において層間変形を小さくしたい層にダンパーを設置すれば目標を達成できる。
- ⑥ 減衰層として地階が利用できる可能性を示した。
- ⑦ 不均等分布形状でも極めて有効な分布の存在が示された。

- ⑧前報で提案した1章の式1から式7で示される粘弾性体ダンパーによる減衰力の計算方法は、減衰力の不均等分布の場合でも使用できる。

2. 減衰自由振動より

- ①付加減衰力がどの層に付加されていてもその影響は全層に及ぶ。
 ②最上層近傍にある極めて大きな減衰力は有効に作用している。
 ③最下層と中間層に付加した場合のダンパー効率が高い。

3. 共振倍率より

- ①粘弾性体の有効な配置（最適配置）の存在が示めされた。

参 考 文 献

- 1)塚越 勇 他：粘弾性体ダンパーによる高減衰建物の設計方法の提案—高減衰建物に関する2つの仮説の実験による検証 中部大学工学部紀要、第33巻、pp71-pp78 1997.12
- 2)塚越 勇 他：粘弾性体ダンパーを用いた制振構法に関する研究（その1～12）、日本建築学会大会学術講演梗概集、1992-1997
- 3)塚越 勇他：5層均等剛性供試体による高減衰建物の検証（高減衰建物Ⅰ）、中部大学工学部紀要、第31巻、1995.12
- 4)塚越 勇 他：粘弾性体によるダンパー（抵抗力の評価と建築構造体への利用）、総合工学（中部大学総合工学研究所）、第7巻、pp.113-pp.124、1995.3
- 5)塚越 勇 他：制振構法におけるダンパーの有効配置についての研究、中部大学工学部紀要、第30巻、pp.55-pp.59、1994.12
- 6)塚越 勇 他：粘弾性体ダンパーを用いた制振工法に関する研究（その3：多質点系の減衰とダンパーの性能評価）、大日本土木技術研究所報、No.6、pp.1067-pp.1068、1994.9
- 7)塚越 勇 他：粘弾性体ダンパーを用いた制振工法に関する研究（その2：減衰性能の評価について）、大日本土木技術研究所報、No.5、pp.11-pp.18、1993.10
- 8)塚越 勇 他：粘性体による制震効果、中部大学工学部紀要、第28巻、pp.69-pp.79、1992.12
- 9)跡部 義久 他：粘性体ダンパーを用いた制振構法に関する研究、大日本土木技術研究所報、No.4、pp.21-pp.28、1992.10
- 10)塚越 勇 他：鈍感な建物の地震時における挙動、中部大学工学部紀要、第27巻、pp.93-pp.101、1991.12
- 11)跡部 義久 他：高い減衰性能を有する建物の応答特性、大日本土木技術研究所報、No.3、p.59-pp.66、1991.11
- 12)塚越 勇 他：建築構造物の減衰性能と生体の生理反応（その2：座位立位での振動暴露に対する手掌部発汗）、日本建築学会構造系論文集、No.515、pp53-pp57、1999.1
- 13)小竹 潤一郎他：建築構造物の減衰性能と生体の生理反応（仰臥位での振動暴露に対する手掌部発汗と減衰性能）、日本建築学会構造系論文集、No.497、pp39-pp46、1997.7

***1 使用または参考としたした応答計算プログラム**
 使用または参考にした応答計算プログラムは構造システムのDAP-1、DAP-2とユニオンシステムのSS21/DynamicPRO、NTTデータ通信が備えているプログラムである。