

立体骨組振動実験に対する応答初期の詳細応力解析

三村耕司¹・楳田努²・薩川恵一³・山田哲⁴・小川 信行⁵・谷村眞治⁶

¹工博 大阪府立大学大学院助教授 工学研究科 (〒599-8531 大阪府堺市学園町1-1)

²博士(工学) 大阪府立大学大学院助手 工学研究科 (〒599-8531 大阪府堺市学園町1-1)

³博士(工学) 東京理科大学助手 理工学部建築学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

⁴博士(工学) 東京工業大学助教授 建築物理研究センター (〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259)

⁵工博 防災科学技術研究所 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

⁶工博 愛知工科大学教授 工学部 (〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗50-2)

On the design of large-scale structures, it is difficult to arrange dampers equally in the basic plan. The eccentricities of originally flat planes of structure due to an earthquake may cause the functional deterioration of the upper parts on those planes, and it is important to examine the effect of those eccentricities on the function of structure. In this study, a relatively large-scale steel-framed specimen with brace-type dampers for full-scale shaking table test was modeled numerically, and the dynamic behavior of that specimen was analyzed by using FEM code LS-DYNA. Through the investigation of the numerical model with eccentricity, the effect of the configuration of dampers was discussed.

Key Words : *Shaking table test, Eccentricity, Damper, Finite element method*

1. 緒言

1995年1月17日に発生した阪神・淡路大震災を契機として、地震の形態、規模によっては、これまで安全だと考えられていた土木、建築構造物にも被害が及ぶことが明らかになった¹⁾²⁾。そこで、地震による構造物の破壊過程を解明するため、防災科学技術研究所は、実大の大型構造物の三次元加振が可能な、三次元大型震動台E-Defenceを建設中であり、これにより既存構造物に対する耐震補強手法の検討も実大規模で可能となる。その一環として、多層骨組構造にブレース型履歴ダンパーを組み込む手法が考えられており、その前段階として、その一層部分に相当する立体骨組試験体の振動台実験が行われている。

この耐震設計法では、既存構造物に後施工でダンパーを設置する場合、構造物によっては、平面計画的にダンパーを均等配置できず、平面が偏心による面外変位を生じて上部構造自体の性能に影響を及ぼすおそれがある。したがって、構造物の性能劣化を防ぐためには、平面の偏心をどの程度許容できるのかを検討する必要がある。振動台実験では、立体骨組試験体に組込んだブレース型履歴ダンパーを平面内に偏心配置させることにより、その偏心の地震応答性状に対する影響を調べている³⁾⁴⁾⁵⁾。

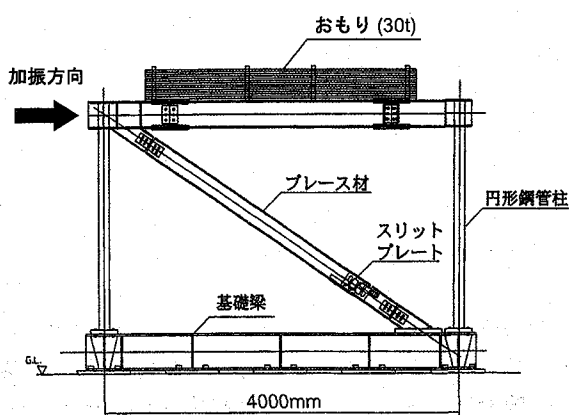
本研究では、この実験を有限要素法による数値解析により検証するとともに、その有効性について検討した。とくに阪神・淡路大震災では、地震速度時刻歴の始めに最大値となる大きなピークが生じており、初期の揺れの影響が注目される¹⁾²⁾。そこで、その初期の動的挙動を陽解法に基づく増分計算により注意深く調べた。また、実験ではブレース型履歴ダンパーを何種類か用いており、その組合せも何通りか検討されている。ここでは、その中から偏心の影響が比較し易いと考えられる代表的な組合せを2つ選んで計算した。

2. 立体骨組振動台実験の概略³⁾⁴⁾⁵⁾

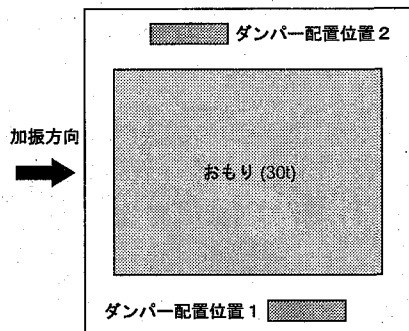
1章で述べたように、多層骨組構造の一層部分とみなせる立体骨組試験体にブレース型履歴ダンパーを組み込み、振動台実験が行われている。その立体骨組振動台実験の概略を図-1(a), (b), (c)に示す。入力は、代表的な実測地震加速度時刻歴を積分して得られる速度時刻歴に倍率をかけて調整したものを、図-1(a)に示したように、試験体下端の基礎梁を固定した振動台に与えている。代表的な実測地震波形としては、例えば、阪神・淡路大震災時に神戸海洋気象台

で記録されたNS方向成分のものが挙げられる。加振方向と平行な構面に、ダンパーとなるスリットプレートを設置したブレースが組込まれ、対向する構面とは回転対称になっている。図-1(b)に、その配置の様子を平面的模式図で示した。ダンパー配置位置1と2に配置するダンパーの特性を変えることにより偏心を与えている。ダンパーの形状・寸法に関する基本的諸元は図-1(c)に示したが、パラメータの詳細および組合せについては、本研究で用いたものについてのみ後述する。また、加振方向と垂直な構面には、偏心による変形が生じるよう、ブレースは組込まれていない。

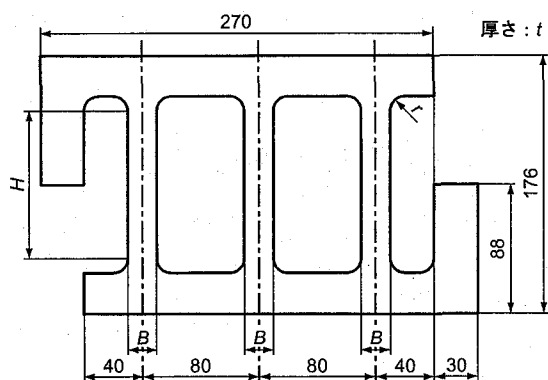
なお、これらの実験内容および結果の詳細について



(a) 試験体立面図



(b) ダンパー配置位置（平面的模式図）



(c) ダンパー（スリットプレート，単位：mm）

図-1 立体骨組振動台実験の概略^{3) 4) 5)}

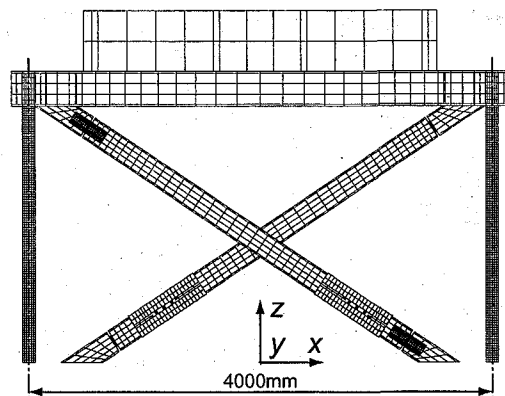
ては、本シンポジウムにて別途発表される予定である。

3. 立体骨組振動台実験に対する数値解析

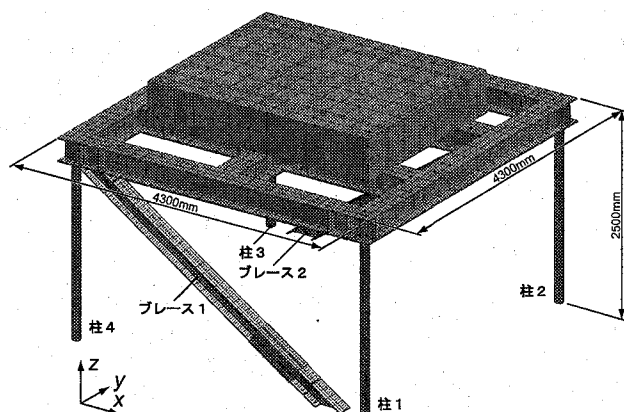
多くの地震解析では、構造物が非常に大きく要素分割も細かくできないため、振動の低周波数成分に重きの置かれた計算がなされる。この実験に対して同様な解析が別途なされており⁵⁾、固有値解析を含めた検討がなされている。

一方、本研究で扱う立体骨組試験体規模の構造物であれば、ある程度細かい要素分割も現実的レベルで可能であり、比較的小さな部材の高周波数の振動も考慮できる。ここでは、汎用有限要素法コードLS-DYNA⁶⁾を用いて、Updated-Lagrange法による陽解法、ならびに中心差分による時間積分に基づく増分計算を行い、高い時間分解能で時刻歴応答を調べた。時間増分は、Courant条件を満足するよう、最小要素幅を一次元弾性応力波が伝ばする時間の0.9倍として、約0.4μsとなった。

1章で述べたように、初期の揺れに対する動的挙動を詳しく調べる目的で、解析対象時間を1秒間としたが、それでも計算にはPersonal Workstation 600au (HP, メモリ2GB) で約1ヶ月かかる。



(a) 立面図



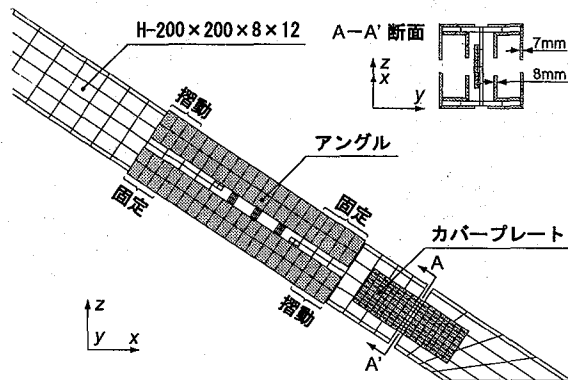
(b) 陰影付き鳥瞰図

図-2 有限要素モデル

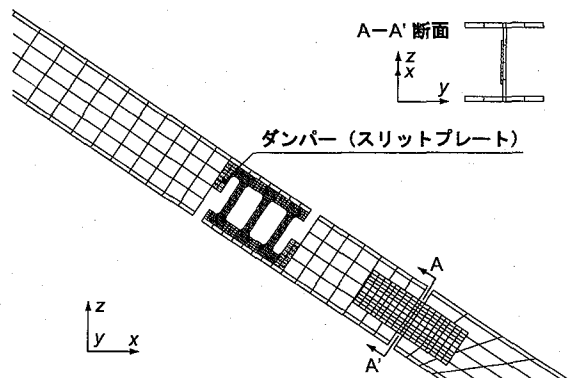
(1) 有限要素モデル

図-2 (a), (b) に示すように、基礎梁および接合部の板を除いた立体骨組試験体の有限要素モデルを作成した。加振方向は x 方向に相当する。大部分は6面体8節点要素で作成したが、4本の円形鋼管柱(外径114.3mm, 肉厚6mm)は三次元的に複雑な挙動を示すことが予想されるので、シェル要素で細かく分割した。要素数をできるだけ少なくするため、固着条件を多用して接合面における整合性を排した結果、モデル全体の要素数は14603(シェル要素数: 7424)、節点数は24900となった。柱以外の部材は、おもりを積載する梁部分が、H型鋼(H-300×300×10×15)と板厚9mmの鋼板のスチフナから構成され、ブレースが図-1 (c) に示したダンパーとH型鋼(H-200×200×8×12)および継手用の板厚4.5mmの鋼板などから構成される。梁部分にも継手があるが、設置の便宜上のものであるのでモデル化していない。

偏心の影響を調べる上で、ダンパーを配置したブレースのモデル化が重要となる。図-3 (a), (b) にダンパー付近の詳細を示す。図-3 (a) からわかるように、ダンパーの変形をブレースの軸方向のみに拘束するため、アングルをダンパー越しに差し渡ししており、各アングルをどちらかのH型鋼に固定して、摺動する仕組みになっている。各ブレースのアングルは、H型鋼に沿うように内側と外側から計8本あてられており、実際にはH型鋼との摺動側の間にテフロンシー



(a) アングルおよびカバープレートあり



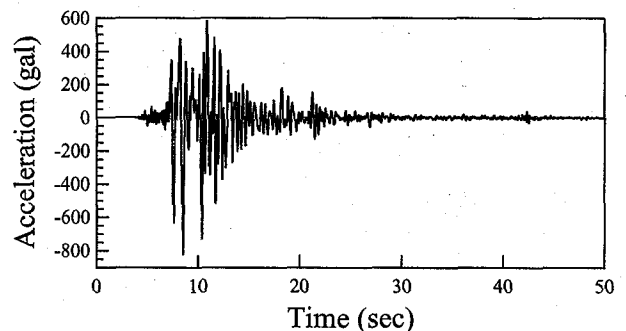
(b) アングルおよびカバープレートなし

図-3 ダンパー付近の詳細

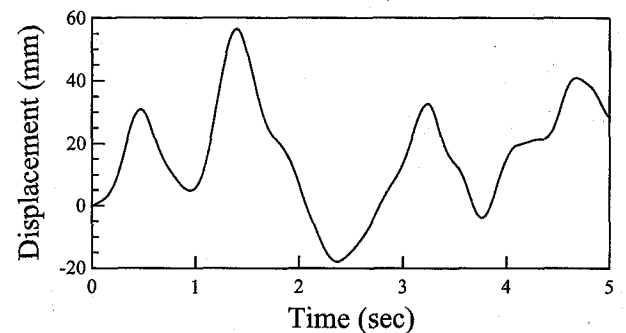
トを挟むことで摩擦を極力低減している。モデル化にさいしては、H型鋼とアングルの間に固着、摺動および接触条件を適用し、摩擦係数は0とした。図-3 (b) は、アングルと継手用鋼板の上にあてられたカバープレート(厚さ9mm)を取外した様子であり、ダンパー(断面図には非表示)は大きな変形を生じるため、細かく要素分割している。カバープレートは鋼板とH型鋼のウェブ部をボルト接合するためのもので、二つのH型鋼を繋ぐのは鋼板(断面: 4.5mm×110mm)のみである。モデル化にさいして、カバープレートと鋼板は一つのソリッドとして作成し、鋼板とH型鋼は固着させた。陽解法による計算では、これらの部分の座屈挙動が摺動、接触条件および初期不整により非常に敏感に影響を受けるため、適正な挙動を得るまで注意深い検討が必要とされた。

(2) 境界および荷重条件

部材間の固着および接触条件については1節ですでに述べた。振動台との間の境界条件については、図-2 (a), (b) に示した柱とブレース(ガセットプレート)下端の y , z 方向の並進および x , y , z 軸方向と平行な軸周りの回転運動を拘束した。荷重条件としては、同下端に図-4 (b) に示す変位時刻歴を x 方向へ入力した。この変位時刻歴は、図-4 (a) に示す阪神・淡路大震災時に神戸海洋気象台で計測されたNS方向加速度時刻歴をもとに、積分して得られる速度時刻歴の最大値92.18kineが20kineに等しくなるよう倍率をかけて、立上り時刻7.12秒を解析上の時刻0秒にして得られたものである。また、自重については、動的緩和により適用すると、このモデルでは収束に膨大な



(a) 神戸海洋気象台記録波形 (NS 方向)



(b) 入力変位時刻歴

図-4 入力波形

時間を要し、一方、この程度の規模では影響があまり大きくないことから、無視することにした。

(3) ダンパーの種類と組合せ

ここでは、図-1(c)では記号で表記されていた残りの各寸法と降伏応力、およびそれらの組合せについて述べる。

振動台実験では数種類の特性の異なるダンパーを用いているが、本研究では、それらの中から組合せると最も偏心が大きくなる二種類を選んでモデル化した。それらの残りの各寸法と降伏応力 σ_y を表-1に示す。この二つのタイプのダンパーを、図-1(b)のダンパー配置位置1と2に、①-①および①-②の組合せで配置して解析した。

(4) 材料特性

ここでは、ダンパーの降伏応力以外の材料特性について述べる。全部材は鋼材であり、密度 $\rho=7890\text{kg/m}^3$ 、縦弾性係数 $E=200.3\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.28$ とした。非弾性特性については、ダンパー以外はSS400相当とし、ダンパーは表-1の σ_y に対して弾/完全塑性体としてモデル化した。図-5にそれらの応力-ひずみ関係を示す。実際にはダンパーの材料は硬化するが、本研究では定性的な評価を目的とし、これを無視した。

(5) 解析結果

解析はダンパーの組合せ①-①および①-②の両方について行ったが、組合せ①-①の結果については発表当日に示すこととし、ここでは偏心の影響の大きい組合せ①-②についてのみ述べる。計算結果の例として、柱下端付近に生じる軸ひずみの時刻歴、ブレース下方のプレートにおける軸ひずみ時刻歴を示す。まず、それらを出した要素の位置等を、図-

表-1 ダンパーの各寸法と降伏応力

タイプ	B (mm)	t (mm)	H (mm)	r (mm)	σ_y (MPa)
①	2.0	1.2	10.0	1.0	444
②	2.0	0.9	10.0	1.0	283

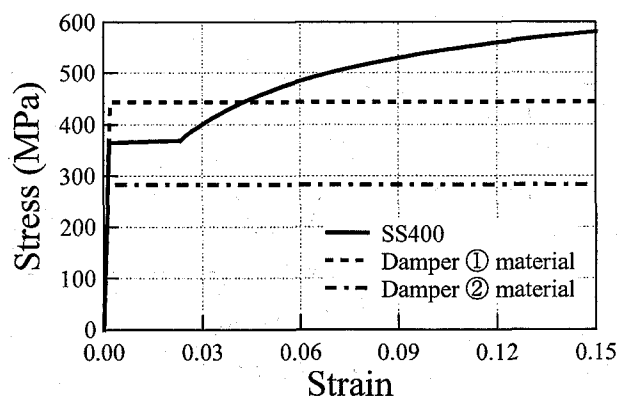


図-5 解析に用いた応力-ひずみ関係

6(a), (b), (c)に示す。

図-7(a)には、図-6(a)に示した柱1の下端付近の4要素で出力した軸ひずみを、曲げの中立面に対して外側要素と内側要素でそれぞれ平均した時刻歴を示し、さらにすべて平均して曲げの影響を取り除いた軸ひずみ時刻歴も示した。図-7(b)は柱3の同様な結果である。それぞれに対応する実験結果も示してある。図から、各柱には曲げが生じており、また、その影響を取り除いた軸ひずみは、示した範囲ではほぼ零であることがわかる。実験結果と比較すると、定性的な一致は見られるものの、とくに材料の降伏後のひずみレベルは一致していない。これは実際の材料が硬化するためである。さらに、解析時間で約0.65秒以降は結果が大きく異なっている。これは以降の計算が不安定になっているためで、解析は1秒間を対象としたが、計算が妥当だと考えられる範囲で結果を示した。

図-8(a), (b)に図-6(b)に示したブレース下方のプレートにおける軸ひずみ時刻歴の例を示す。やはり時刻約0.65秒までは定性的な一致が見られ、とくにブレース1下方の方はよく一致している。これは、ブレース1のダンパーはほとんど塑性変形していない

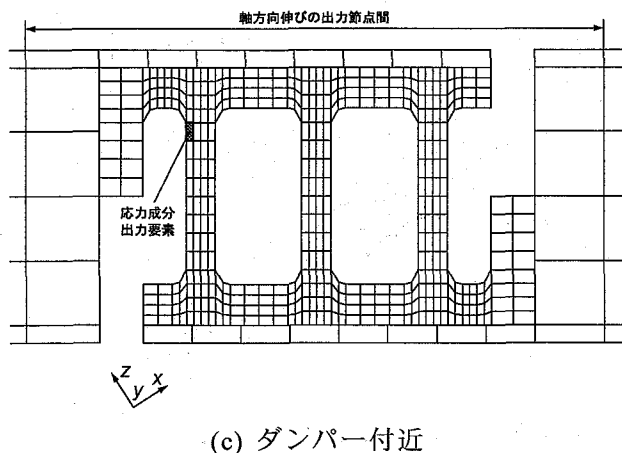
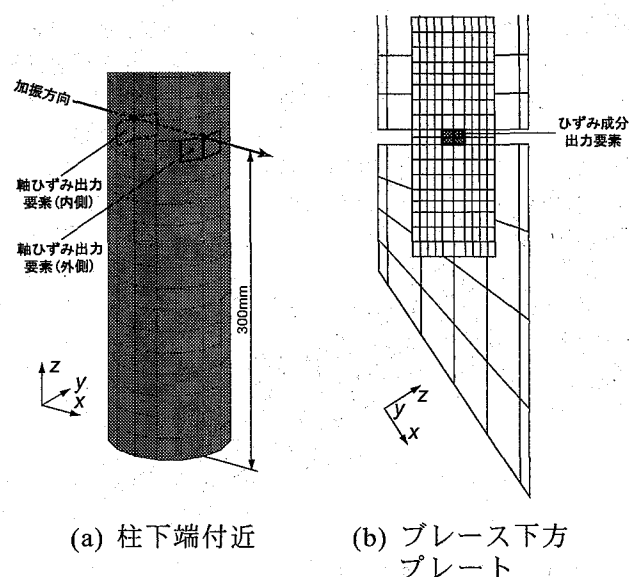


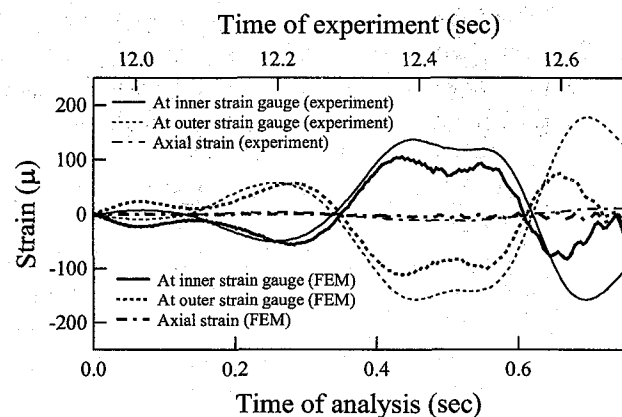
図-6 出力位置(柱1およびブレース1の例)

ため、ダンパーが塑性化しているブレース 2 と比べて、材料モデルの違いがあまり影響していないと考えられる。

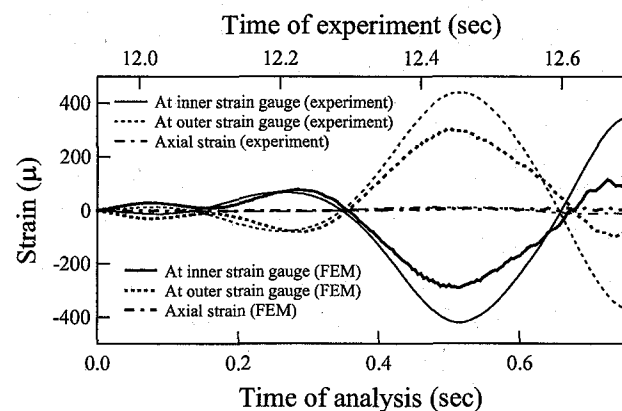
図-9 に、図-6 (b) のプレート出力から荷重、図-6 (c) の軸方向伸びから変位を評価して、各ブレースの軸方向荷重-変位関係を示した。ブレース 1 はほとんど弾性域で変形しているのに対して、ブレース 2 はヒステリシスループを描き、塑性変形が生じていることがわかる。

図-10 に時刻約 0.42 秒におけるダンパー②における応力分布および変形の様子を示す。このとき相当応力は極大値をとり、ダンパーは塑性化して変形が大きくなっている。また、その変形は面内にとどまっており、アングルによる摺動機構は適切に働いている。図-11 に、図-10 で相当応力が最大となっていた、図-6 に示したダンパー②の位置における各種応力の時刻歴を示す。 σ_{11} はブレース 2 の軸方向応力、 σ_{22} , σ_{33} は横方向応力である。弾/完全塑性体でモデル化しているので、相当応力は $\sigma_y = 283\text{MPa}$ に達すると頭打ちになるが、各垂直応力成分はその値以上に達して、複雑な多軸状態を呈していることがわかる。

試験体全体の変形の様子を図-12 に示す。全体的に曲げとねじれの組み合わせた変形が生じ、その運動および弾性ひずみエネルギーの一部をダンパーにより吸収する様子が再現されている。



(a) 柱 1



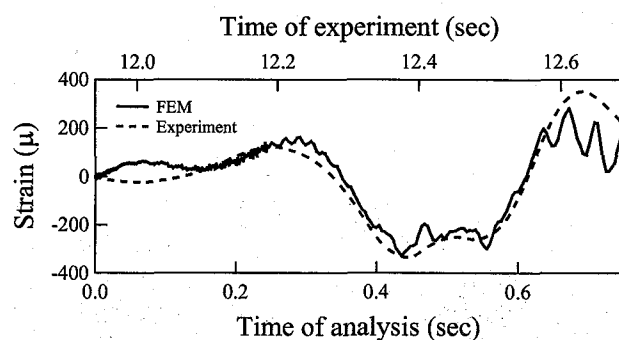
(b) 柱 3

図-7 柱下端付近に生じる軸ひずみ時刻歴

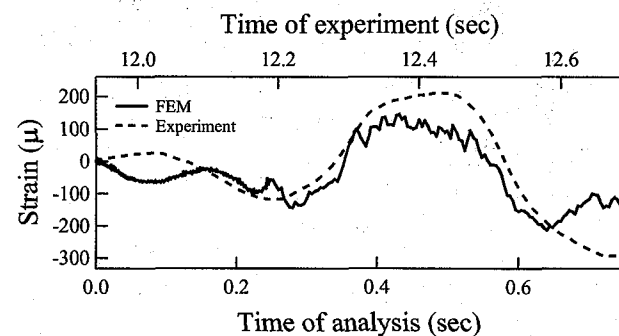
図-13 には、偏心により上部構造の平面が x 軸と平行な方向周りにどの程度回転するかを示した。詳細は省くが、 x 方向と垂直な構面の梁部分において、対称な位置にある 2 点間の傾き角を回転角として評価した。本研究で扱った応答初期では、ほとんど回転は生じていなかった。

5. 結言

多層骨組構造にブレース型履歴ダンパーを組み込む耐震設計法が提案されており、その検証の前段階として、多層骨組構造の一層部分に相当する立体骨組試験体の振動台実験が実施されている。この手法の課題として、ダンパーの不均衡配置により平面が偏心を起こす可能性があり、その検討が目的である。

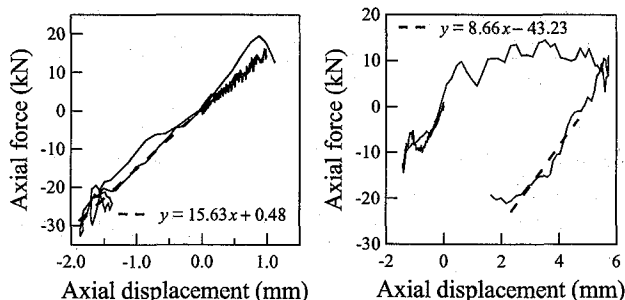


(a) ブレース 1 下方



(b) ブレース 2 下方

図-8 プレートにおける軸ひずみ時刻歴



(a) ブレース 1

(b) ブレース 2

図-9 ブレースの軸方向荷重-変位関係

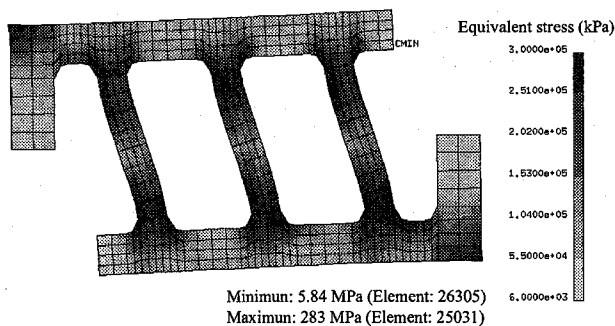


図-10 約0.42秒におけるダンパー②の応力分布および変形図(変位倍率10)

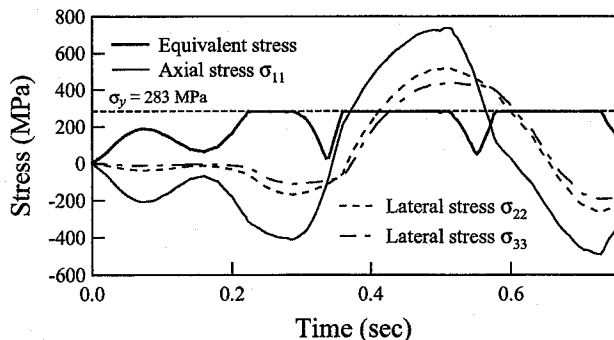


図-11 ダンパー②の代表点における応力時刻歴

本研究では、ばね質点系のような簡略化したモデルによる数値解析ではなく、できるだけ忠実に有限要素として三次元モデル化して、陽解法に基づく直接数値積分により解析することを試みた。残念ながら、この手法では単純化したモデルによる計算に比べ、要する時間が非常に大きくなる。また、予定上、実験実施とあまり間を置けなかったこともあり、計算条件に実験データを十分反映することができず、定性的な評価にとどまった。

ダンパー①-②の組合せで行った解析により得られた立体骨組試験体の動的挙動において、時刻約0.65秒までは妥当な計算が行われていると考えられる。ブレース型履歴ダンパーについては、実験と同様に摺動する様子が再現された。偏心による平面の変形も再現されたが、扱った応答初期ではほとんど回転は生じなかった。詳細については、ダンパー①-①の組合せの解析結果と合わせて発表当日に示す予定である。

今回の解析結果から、この程度の構造物に対して数秒間であれば、有限要素法による忠実なモデル化が十分現実的レベルであることがわかった。

謝辞: 本研究の一部は平成15年度科学技術振興調整費(総合研究「構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上の研究」)の第3分科会の分担課

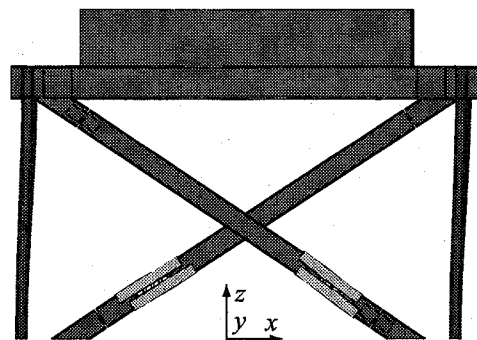


図-12 約0.42秒における変形図(変位倍率25)

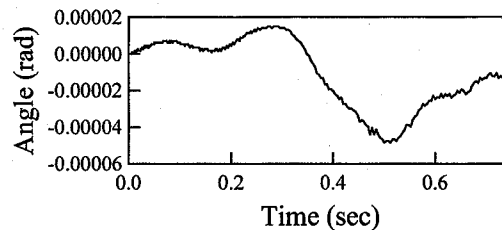


図-13 上部構造の回転角の時刻歴

題の1つ)による支援を受けたことを付記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) Tanimura, S., Mimura, K., Nonaka, T., and Zhu, W., Dynamic Failure of Structures Due to the Great Hanshin-Awaji Earthquake, *Int. J. of Impact Eng.*, **24**, pp.583-596, 2000.
- 2) 日本建築学会: 阪神・淡路大震災調査報告 建築編-3 鉄骨造建築物 シェル・空間構造 容器構造, pp.142-161, 1997.
- 3) 山田哲, 薩川恵一, 和田智子, 竹内悦男, 小川信行, 北村春幸, 和田章, 秋山宏: ダンパーの耐力ならびに剛性偏心をパラメーターとした1層立体骨組の振動台実験 その1 実験概要, 本シンポジウムにて発表予定.
- 4) 山田哲, 薩川恵一, 和田智子, 竹内悦男, 小川信行, 北村春幸, 和田章, 秋山宏: ダンパーの耐力ならびに剛性偏心をパラメーターとした1層立体骨組の振動台実験 その2 実験結果, 本シンポジウムにて発表予定.
- 5) 薩川恵一, 和田智子, 山田哲, 前澤将男, 磯貝大介, 北村春幸, 和田章: ダンパーの耐力ならびに剛性偏心をパラメーターとした1層立体骨組の振動台実験 その3 解析的検討, 本シンポジウムにて発表予定.
- 6) Livermore Software Technology Corporation (日本総合研究所訳): *LS-DYNA Version 950 USER'S MANUAL*, 2000.