

# 実大振動試験体の動的挙動解析

三村耕司<sup>1</sup>・楳田努<sup>2</sup>・田中慎哉<sup>3</sup>・山田哲<sup>4</sup>・松本由香<sup>5</sup>・谷村眞治<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 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)

<sup>2</sup>工博 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)

<sup>3</sup>大阪府立大学大学院学生 工学研究科 (〒599-8531 大阪府堺市学園町1-1)

<sup>4</sup>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)

<sup>5</sup>博士(工学) 横浜国立大学助手 建築学コース (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

<sup>6</sup>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)

The great Hanshin-Awaji earthquake has brought a large number of structural failures, and some of them are considerably different from the failures in the past earthquakes. In this study, to clarify the fracture process in large members such as the steel box column and H-steel beam subjected to severe land movements caused by strong near-source earthquake, dynamic behavior of full-scale shaking table specimen was analyzed. In the analysis, specimen was modeled in detail in order to compare analytical results with the experimental results. Through the comparisons, an effective earthquake-proof construction was discussed.

*Key Words* : Shaking table test, Near-source earthquake, Dynamic failure, Finite element method

## 1. 緒言

直下型地震特有の地震動初期の激しい上下・水平方向揺れにより、大型構造物の一部にその過渡応答期に、き裂や部分的破壊が生じ、その後の引き続く揺れにより、大きな破壊や破損が生じた可能性が報告されている。

その特異な地震被害例としては高層建築物の鋼製箱型断面柱(ユニバーサルボックス)のぜい性破断<sup>2)</sup>、ニールセン橋の固定支承の破壊<sup>2)</sup>、鉄筋コンクリート製T型長柱の水平破断、鋼製門型橋脚の提灯型座屈、その他が挙げられている。

しかし、現状では地震動による構成部材の破壊条件が解明されていないため、破壊に対する設計規範が確立されていない。例えば、地震のような動的負荷条件下では、ひずみ速度依存性の影響も検討しておくべきだと考えられる<sup>3),4)</sup>。一方、破壊の発生しやすい応力集中箇所における塑性化を避けるために、新しい構造形式を開発することも考えられる。

本報告では、鋼構造建築物が破壊に対してどの程度の抵抗能力を有しているのか、破壊抑止のためにはどのような手法が有効であるかを解明するために行われた、鋼構造物骨組の実大振動台実験に関して、その有限要素モデルを作成して三次元

挙動を解析し、実験との比較を行うとともに、解析の妥当性について検討し、応力集中が起こりやすい梁と柱の接合部付近などの応力分布に関して検討を行った。また、これらの結果に基づいて、接合部付近の応力集中を低減する目的で、構造骨組の性能はそのまま、制振部材を追加することにより、既存建物の架構内に制振部材を設置した場合の耐震効果についても有限要素モデルを作成し、その有効性に関して検討を行った。

## 2. 実大振動台実験の概略

山田<sup>4)</sup>は、鋼構造建築物の梁端接合部における破壊現象を解明し、設計時に接合部に期待できる変形能力を評価するために、実大振動台実験を行った。実験では実構造物の骨組の部分架構に注目して、これを試験体として製作し、実大の構造部材・接合部に対する動的破壊現象を再現している。実験装置の概略および概念を図-1(a), (b)に示す。実験装置は振動台からの入力によって慣性力を生み出す重錘と重錘を支える加振フレーム、重錘および加振フレームに作用する重力を支える積層ゴム、試験体、そして加振フレームから水平力を試験体に伝える加力梁から構成される。また、加振に用いられる入力波は、短時間に大きな入力エネルギー

ギーがもたらされる直下型の地震波として、阪神・淡路大震災時の神戸海洋気象台で記録された加速度から得られた速度に倍率を掛けて入力レベルを調整したものを用いた。なお、実大振動台実験の結果<sup>5)</sup>からは、試験温度が高い場合、試験体は延性的破壊が生じるが、試験温度がエネルギー遷移温度を下回る場合、スカラップ底より生じた微小なき裂を起点としてぜい性破壊したという結果が得られている。

### 3. 実大振動試験体の解析モデル

#### (1) 有限要素モデル

解析に用いた試験体の概略を図-2、破断箇所であるスカラップ付近の概略を図-3、また有限要素モデルを図-4に示す。有限要素モデルは6面体8節点要素であり、モデル全体の節点数は19973、要素

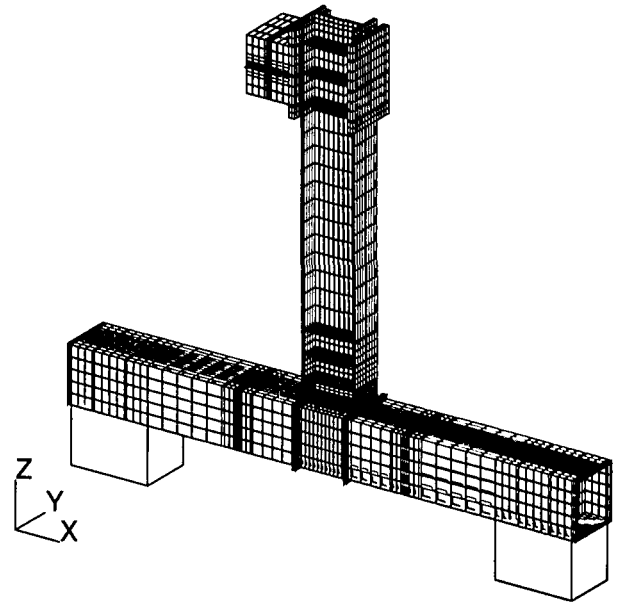


図-4 有限要素モデル

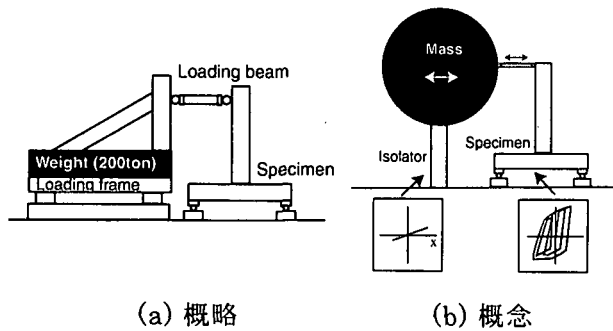


図-1 実大振動台実験<sup>5)</sup>

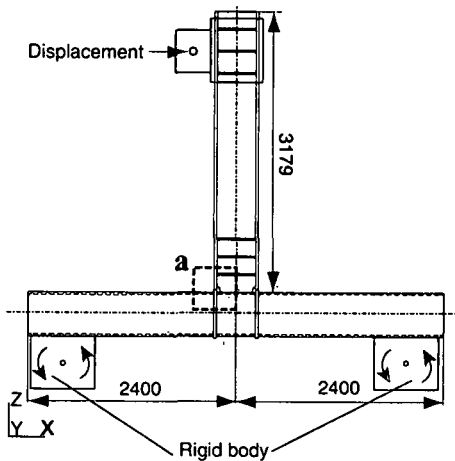


図-2 解析モデルの概略

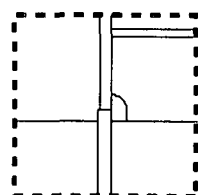


図-3 スカラップ付近(図-2のa部)の概略

数は13388である。試験体は、柱に相当する箱形柱と梁に相当する溶接組立H形鋼からなるT形部分架構である。柱材断面はUB-500×500×22、梁材断面はH-500×300×16×25である。試験体の柱材-梁材の接合はスカラップを用いた接合であり、梁材と柱材の接合部付近には200mmの間隔でスチフナが設けられている。

#### (2) 境界条件

本解析では、試験体下部を図-2で示すように剛体の上に固着し、その剛体の中心の回転はY軸回りのみ許容した。また、剛体の中心のX軸、Z軸回りの回転とX、Y、Zすべての方向の並進運動は拘束した。加力点は図-5に示すように加振梁の一部を弾塑性体直方体でモデル化し、その回転中心にモデル化した弾性ピンを、Y軸回りの回転を許容すると同時に、そのピンに図-6に示すような実験で計測された加力点位置における変位時間履歴を入力した。なお、この変位時間履歴は図-7に示す実大振動台実験において計測された試験体頂部での変位の一部であり、本解析では、実験において試験体

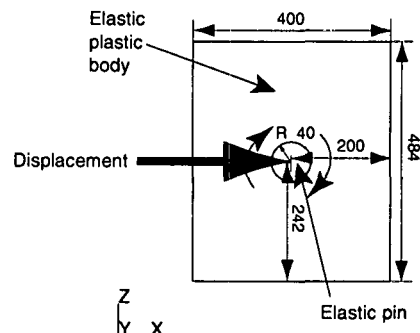


図-5 加力点の概略図

が破断した時刻付近の1.8秒間の波形を入力した。ピンと直方体との境界は接触境界(摩擦なし)として取扱った。なお図-6中に示した $t_F$ は実験において図-3に示すスカラップ周辺において破壊が生じた時刻を示したものである。また、試験体の重力については-Z方向に加速度を入力した。

### (3) 材料特性

材料特性は全部材とも密度 $\rho = 7890\text{kg/m}^3$ 、ポア

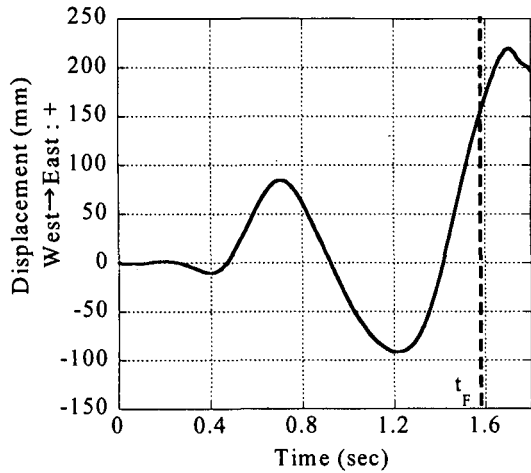


図-6 入力した変位時間履歴

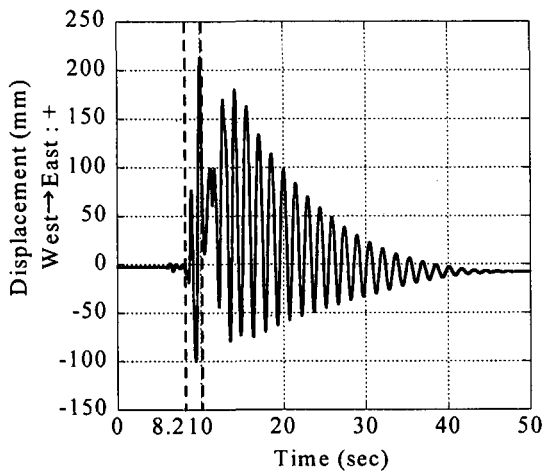


図-7 実験において計測された変位時間履歴

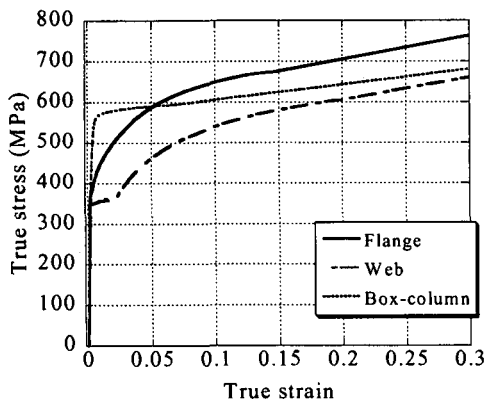
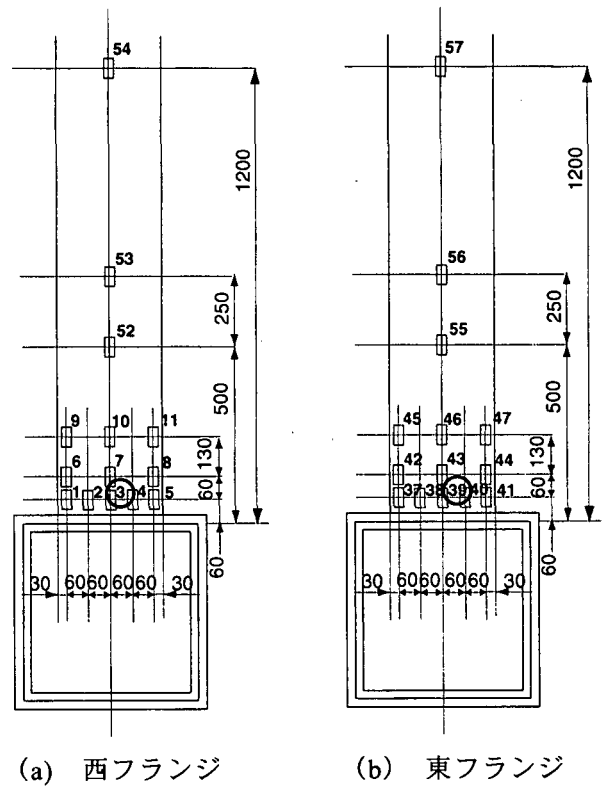


図-8 解析で用いた材料の真応力-真ひずみ関係

ソン比 $\nu = 0.28$ とした。さらに真応力-真ひずみ関係については、箱形柱はSTKR490相当、梁はSM490A相当のものをを用いた。用いた材料の真応力-真ひずみ関係を図-8に示す。

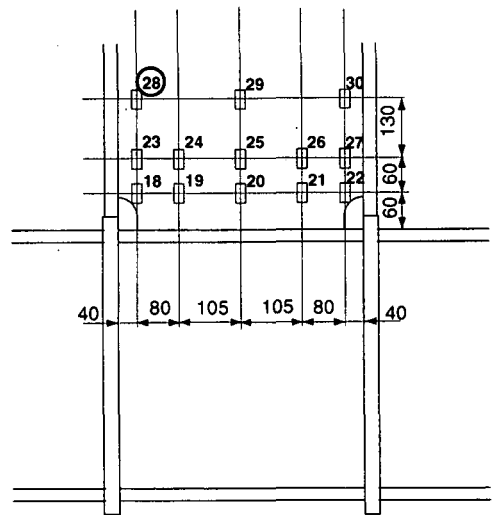
### (4) 解析結果

図-9に、実験でひずみ-時間履歴計測に用いられたひずみゲージ位置を示す。図-9で示したひずみゲージ位置のうち破断箇所である接合部付近のNo.3位置、また、東フランジ部のNo.39位置、ウェブ部のNo.28位置において実験で計測されたひずみ-時間履歴と今回の計算で得られたひずみ-時間履歴計測との比較を図-10に示す。



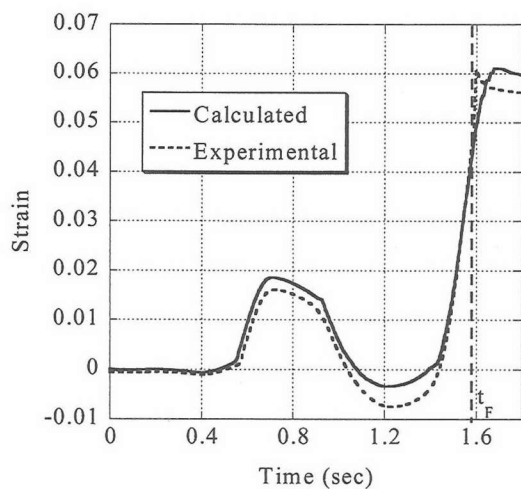
(a) 西フランジ

(b) 東フランジ

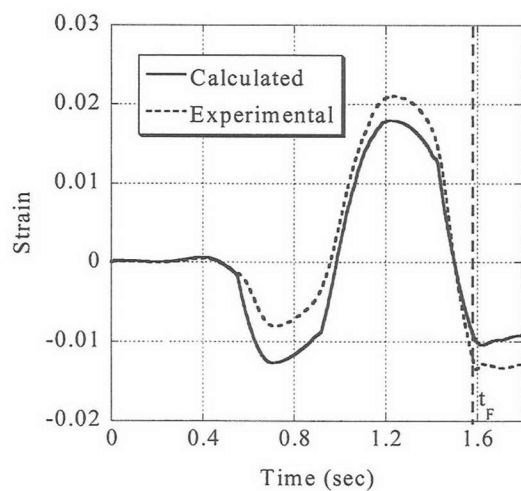


(c) ウェブ

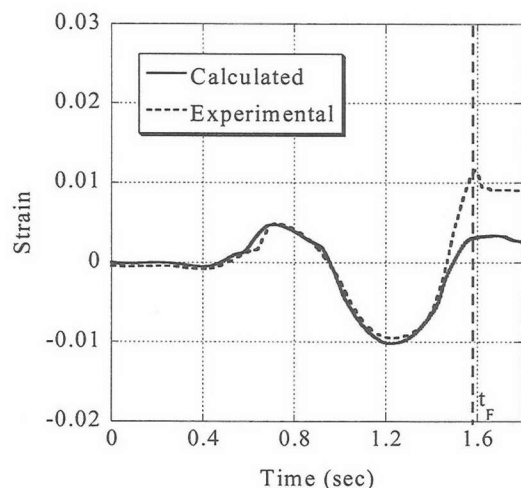
図-9 ひずみゲージ位置



(a) No.3 位置



(b) No.39 位置



(c) No.28 位置

図-10 ひずみ-時間履歴の比較

図より実験で計測されたひずみ-時間履歴と今回の計算で得られたひずみ-時間履歴はよく一致していることから、計算結果は妥当なものであると考えられる。また時刻 $t_F$ において逆T字接合部付近のひずみゲージ位置でひずみが著しく大きくなっているが、このときの実大振動台実験での破断箇所である逆T字接合部付近の応力分布は図-11に示すように、破断箇所に相当する部分で最大720MPaもの高い応力が生じており、これは破断が生じるに十分高い応力値であると考えられる。

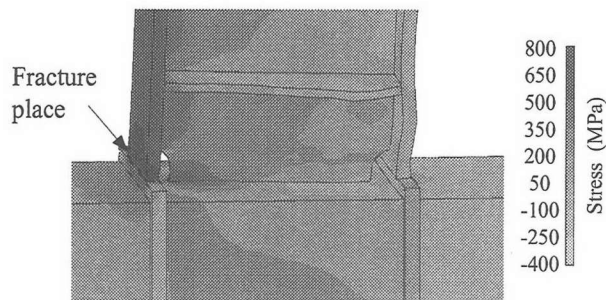


図-11 スカラップ付近の応力分布の例 (1.58sec)

#### 4. 制振部材を設置した試験体の解析

##### (1) 解析モデル

今回の実大振動試験体の解析結果から、逆T字接合部付近において応力集中が起こっており、また、松本らによる実大振動台実験<sup>6)</sup>においても、逆T字接合部付近において破壊が生じた結果が得られている。

次に実大振動台実験においては、応力集中が起きやすく破壊が発生しやすい梁端接合部の応力レベルを弾性範囲に留めるために、地震による入力エネルギーを吸収させるダンパー（座屈拘束ブレース）を設置し、実験が行われた<sup>7)</sup>。その実験では、通常設計で想定する入力よりも過大な入力による振動台加振を与えて、座屈拘束ブレースが有効に機能する結果が得られている。そこで、本解析では、接合部付近の応力集中を低減する目的で、制振部材として、その実大振動台実験で設置した制振部材と同じ曲げ剛性をもつ箱形柱の部材を考え、その制振部材に用いる材料特性には制振用低降伏点鋼LYP100を用いて、制振部材の有効性について検討した。

図-12に本解析で用いた制振部材を設置した試験体の解析モデルの概略を示す。また、その有限要素モデルを図-13に示す。この用いた解析モデルは6面体8接点要素とし、モデル全体の接点数は21405、要素数は14038である。

また設置した制振部材の箱形柱部分概略を図-14に示す。

## (2) 材料特性

制振部材の箱形柱部分の材料にはLYP100相当のものを用いた。このLYP100は制振システムで既

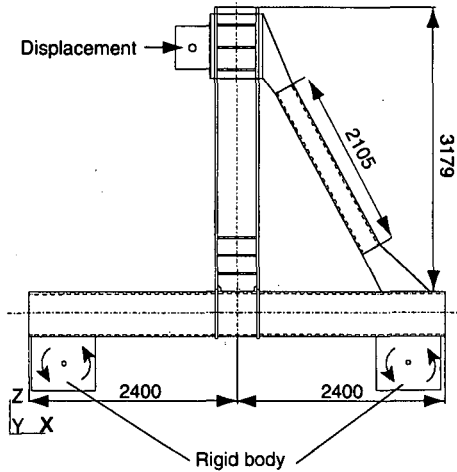


図-12 解析モデルの概略

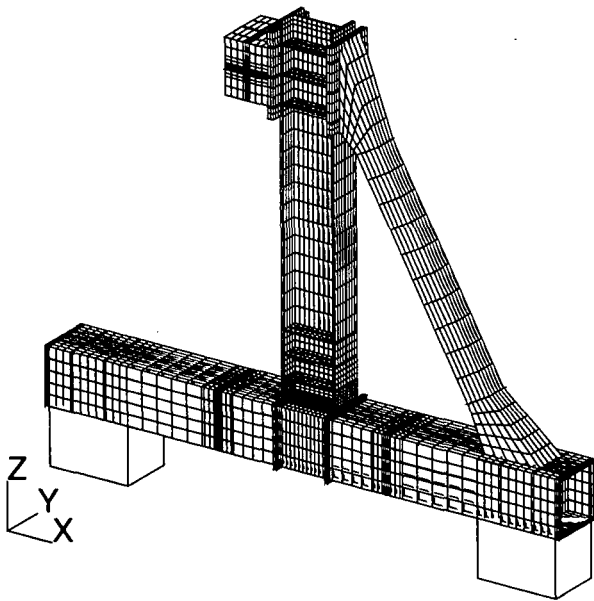


図-13 有限要素モデル

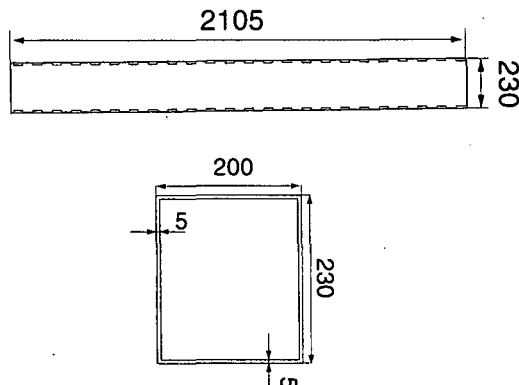


図-14 解析に用いた制振部材の概略

存建物の架構内に振動のエネルギーを吸収するために設置される制振部材(LYPダンパー)に用いられる低降伏点鋼である。本解析で用いたLYP100の真応力-真ひずみ関係<sup>8)</sup>を図-15に示す。

また、制振部材以外の梁や箱形柱などの各部材の材料には3章で用いたものと同様なものを用い、全部材とも密度 $\rho=7890\text{kg/m}^3$ 、ポアソン比 $\nu=0.28$ とした。

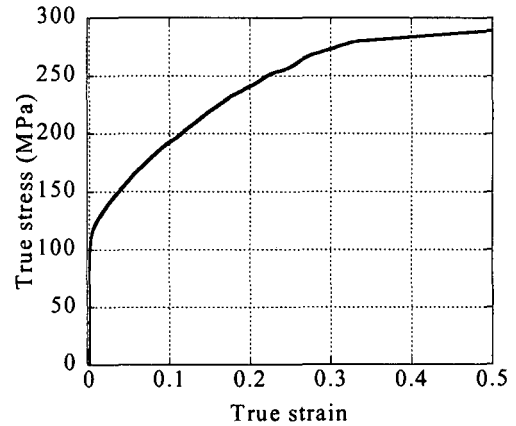


図-15 LYP100の真応力-真ひずみ関係

## (3) 境界条件

試験体下端の拘束条件や試験体頂部に入力する変位時間履歴などの境界条件は3章と同様なものを用いた。制振部材は上端部は梁部分に下端部は箱形柱に接合しているものとした。

## (4) 解析結果

低降伏点鋼(LYP100相当)を材料とする制振部材を設置した場合と設置していない場合とで、制振部材がせん断力を負担することによる主体構造の負担せん断力の減少に注目して検討した。また、制振部材によるエネルギー吸収量について検討し、構造骨組の性能はそのまま、制振部材を設置した場合の耐震効果について検討を行った。結果については、発表当日に詳細を示す。

## 5. 結言

(1) 鋼構造建築物が破壊に対してどの程度の抵抗能力を有しているのか、破壊抑止のためにはどのような手法が有効であるのかを解明するために行われた、鋼構造物骨組の実大振動台実験に関して、試験体および加振・支持部の有限要素モデルを作成して、実験で計測された試験体頂部変位を入力して三次元挙動を解析した。得られたひずみ-時間履歴を実験で計測されたひずみ-時間履歴と比較し、解析の妥当性について検討した。その結果、応力集中が起りやすい梁と柱の接合部付近の応力分布に関して、実大振動台実験で破壊が生じた逆T字接合部付近では

最大720MPaもの高い応力が生じており、これは破断が生じるに十分高い応力値であると考える。

(2) 主体構造の負担するせん断力を低減する目的で低降伏点鋼 (LYP100 相当) を材料とする制振部材を追加した解析モデルを作成し、制振部材が設置されている場合と設置されていない場合での主体構造の負担するせん断力の軽減効果を検討した。また、制振部材によるエネルギー吸収量を評価して、既存建物の架構内に制振部材を設置した場合の耐震効果について検討を行った。

**謝辞:** 本研究の一部は平成14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分科会の分担課題の1つ)による支援を受けたことを付記し、謝意を表す。

## 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) 谷村真治, 三村耕司, 山田哲: 鋼構造材の動的強度(高靱性材, 低靱性材および溶接部材), 第2回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp135-140, 2001.
- 4) 谷村真治, 三村耕司, 榎田努, 山田哲: 鋼構造材の動的強度(代表的な構造材および溶接部材), 第3回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp113-118, 2002.
- 5) 山田哲, 松本由香, 山口路夫, 松岡三郎, 小川信行, 秋山宏: 実大振動台実験による建築鋼構造の脆性破壊過程解明と破壊抑止策の検証 その1. 実験計画, 第3回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp.119-124, 2002.
- 6) 松本由香, 岡田健, 山田哲, 竹内悦男, 小川信行, 秋山宏: 実大振動台実験による建築鋼構造の脆性破壊過程解明と破壊抑止策の検証 その2. 破壊シリーズの実験結果, 第3回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp.125-130, 2002.
- 7) 山口路夫, 山田哲, 松本由香, 小川信行, 秋山宏: 実大振動台実験による建築鋼構造の脆性破壊過程解明と破壊抑止策の検証その3. 損傷制御シリーズの実験結果, 第3回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp131-136, 2002.
- 8) 三村耕司, 榎田努, 松田陽三, 山田哲, 谷村真治: 座屈拘束ブレース用心材 LYP100/225 材の負荷履歴及びびびり速度依存性に関する検討, 本シンポジウムにて発表予定.