

実建造物の地震時挙動を再現する実大振動台実験手法の提案

制振ダンパーを組み込んだ鋼構造骨組の耐震性 その1

A SHAKING TABLE TEST PROCEDURE SIMULATING EARTHQUAKE RESPONSES
OF ACTUAL STRUCTURES

Seismic performance of moment resisting steel frame with damper Part 1

山口路夫*1, 山田 哲*2, 前田泰史*3, 荻原みき*4, 竹内 徹*3
成川匡文*4, 中島正愛*5, 和田 章*6*Michio YAMAGUCHI, Satoshi YAMADA, Yasushi MAEDA, Miki OGIHARA,
Toru TAKEUCHI, Masafumi NARIKAWA, Masayoshi NAKASHIMA and Akira WADA*

In this paper, an experimental method of shaking table test on partial moment resisting steel frames is discussed. This experiment system consists of a Mass, a Spring, a Loading Beam, a Specimen and a Shaking table. The natural period of this system is set at about 0.7-0.8 second which value is nearly the same as middle rise steel buildings. Features of this method show in the follows. This method has a system of proper estimation for the response of partial frame against Real Time Speed Earthquake. This method approximately reproduces an earthquake resisting behavior of the partial frame. It is possible to effectively utilize the performance of small and medium size shaking table.

Keyword: shaking table test, experimental method, steel structure, damper

振動台実験 実験方法 鋼構造 ダンパー

1 序

1994年,1995年に起こった、ノースリッジ地震、兵庫県南部地震の被害を受けて、構造物を鉛直荷重を支持する主体構造と動的外乱に抵抗するエネルギー吸収機構に分離し、主体構造を弾性範囲にとどめる「損傷制御構造」¹⁾が注目されている。損傷制御構造では、大地震後もエネルギー吸収部材のみの点検、場合によっては補修により継続的な使用が可能となる。そのため、損傷制御構造やその他の制振機構の高層建築物への適用は盛んになり、大空間建築から低層建築まで広い範囲への応用が期待されている。

損傷制御構造やその他の制振構造において用いられるエネルギー吸収機構として、多種多様な制振部材^{2)~5)}などの研究が行われている。これらの部材レベルの研究では、恣意的な変位履歴を用いた部材実験が行われたり、構造物を解析モデルとして数値解析を行った結果として得られる制振部材の変位履歴を用いた実験が行われる。恣意的な変位履歴を用いた場合のみならず、数値解析の結果である制振部材の変位履歴を用いた場合にも、それを得るまでの過程において多くの仮定が設定されているため、建物の地震時の挙動を反映し、制振部材の地震時挙動を適切に評価する点においては疑問が残る。さらに、制振部材を組み込んだ骨組を対象とした実験研究^{6) 7)}などは少なく、その動的荷重下での力学特性は十分に解明されているとは言えない。制振部材を組み込んだ骨組に限らず、建築構造物の地震時挙動を正しく評価するには骨組レベルの

動的実験を行うことが最も望ましい。しかしながら、建築物はスケールの大きさから、そのものに地震動を作用させ、その挙動を確認する実験を行うことは非常に困難である。そのため、建築物全体の地震時挙動は構成要素や部材を用いて実験を行い、その実験結果を数理モデル化し、数値解析を用いることにより全体挙動を把握しているのが現状である。

そこで本研究では、実構造物をモデル化する事により、地震時の建物全体の挙動を適切に反映できる実験システムを提案し、構築する。提案する実験システムを用いることにより、実時間に則した地震動を振動台に入力し、実構造物が実際の地震時にとりうる挙動を近似的に再現する事ができる。

次報以降では、本報で論じる実験方法により行った実験結果を用いて、従来型の純ラーメン骨組と損傷制御設計法に基づいて設計された骨組(以下、損傷制御骨組と記す)の耐震性能を比較する。また、損傷制御骨組については、組み込まれた座屈拘束ブレースが破断に至るまで繰り返し振動台加振を行い、骨組に組み込まれランダムな履歴を受けた座屈拘束ブレースの破断に至るまでの累積吸収エネルギー量、累積損傷度を、部材実験との比較を用いて、定量的に評価する。

2 既往の振動台実験方法と提案する実験方法の比較

部分架構や縮小試験体を用いて振動台実験を行う場合、図1に示すように、入力地震動の時間軸を短くし入力を行うことがよく行われる。このような手法を用いたものには文献8)~10)などがあり、1/λ縮小試験体を

*1 東京工業大学大学院
博士後期課程(日本学術振興会特別研究員)
*2 東京工業大学建築物理研究センター 助教授・博士(工学)
*3 新日本製鐵建築事業部
*4 東京電力電力技術研究所
*5 京大防災研究所 教授・Ph.D.
*6 東京工業大学建築物理研究センター 教授・工博

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology (JSPS Research Fellow)

Assoc. Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
Building Construction Division, Nippon Steel Corporation
Tokyo Electric Power Company, Power Engineering R&D Center
Prof., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Ph. D.
Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

用いて、時間軸の相似比を $1/\sqrt{\lambda}$ とし、振動台実験を行っている。これは試験体の軸応力度を実際の建屋と一致させることを主目的としていることによるが、試験体に実構造物の地震時挙動と同等な歪み速度を再現することは出来ない。

部分骨組試験体を対象に、実時間に則した地震動を用いて実構造物の地震時挙動と同等な歪み速度を再現する実験方法について、以下の3つの事柄 (i ~ iii) を主題として、比較検討を行う。対象とする実験方法は、今まで最も多く行われている実大の試験体に錘を載せる実験方法 (以下、実験方法Aと記す)、秋山の実験方法 (以下、実験方法Bと記す) および、本研究で提案する実験方法 (以下、実験方法Cと記す) とする。

(i) 実験装置

実験遂行上考えられる、試験体の入れ換えなどの作業形態、安全性の検討。

(ii) 固有周期の再現性

実地震波を実時間に則して入力し、実構造物と対応した挙動を確認するためには地震波のスペクトルと実験システムの固有周期(T)との相関性が重要となる。実験システムの違いによる実構造物と対応した固有周期の設定方法と、試験体の塑性化による固有周期への影響の検討。

(iii) 振動台への負荷

実験システムの違いによる、振動台への負荷についての検討。

(実験方法A) : 実大の試験体に錘を載せる実験方法について、文献(11)を例とし、概要を示す。文献(11)では、図2に示す実験システムを用い、パネルゾーンが梁及び柱に先行して塑性化する鉄骨構造に関して、振動台実験を行っている。実験システムは主として試験体と試験体上に配置された錘によって構成される。そのため、図4(a)に示す1質点系振動モデルとして表現することができ、最もシンプルな実験システムとなる。この実験方法は錘を試験体上へ配置するため、実構造物と同様に、柱材に作用する軸方向力や、P-δ効果などを再現することが出来るなどの利点を持つ。

(i) 試験体上に錘が配置されるため、試験体の配置、入れ換えなどに錘の移動などの重作業が多くなる。振動台加振中は、試験体の損傷状態によっては錘の自重を支えることが出来なくなり、実験システムごと壊れる可能性がある。そのため、大がかりな転倒防止装置が必要となる。

(ii) 実験システムの剛性Kは試験体の剛性 K_s と等しく、実験システムの固有周期(T)は式4として表現できる。実構造物と対応する固有周期を得るためには錘の質量Mを調節することとなる。固有周期Tに対して質量Mの増減は1/2乗で効いてくるため、大きなMが必要となる。しかし、質量Mの大きさは振動台の性能により制限される。また、振動台加振中における見かけの固有周期は、試験体の塑性化が多層骨組を想定した場合の全層同時崩壊を表現している。

(iii) 錘は振動台に配置された試験体上に配置される。振動台は錘の重量の影響を受けるため、加振性能の低減を考慮した条件設定が必要になる。

(実験方法B) : 秋山^{(12)~(15)}は図3に示す実験システムを用いて実大の構造部材・接合部に対する動的破壊現象を再現している。実験システムは振動台、実大の部分骨組試験体、錘、及び試験体に並列に付加したアイソレーターによって構成され、1質点系振動モデルとして表現すると図4(b)となる。試験体に並列に配置されたアイソレーターの剛性(K_i)は試験体と同一層の試験体以外の部分の剛性を表現しているといえる。建物の全体挙動との対応を考えた場合、設定したある層の中の部分骨組の挙動を適切に再現していることとなる。実験方法として、P-δ効果の再現は困難で

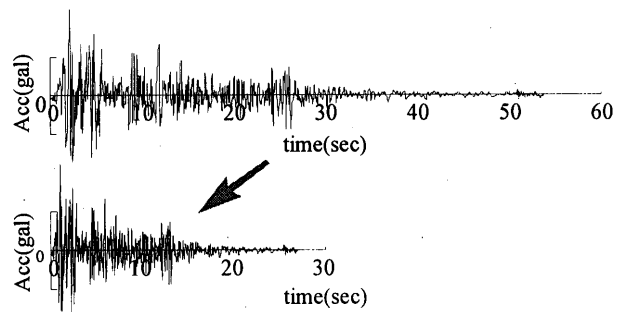


図1 時間軸の縮小 (例1/2としたとき)

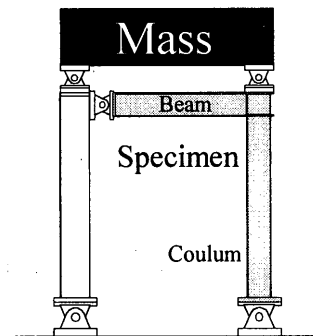


図2 実験方法Aの概要

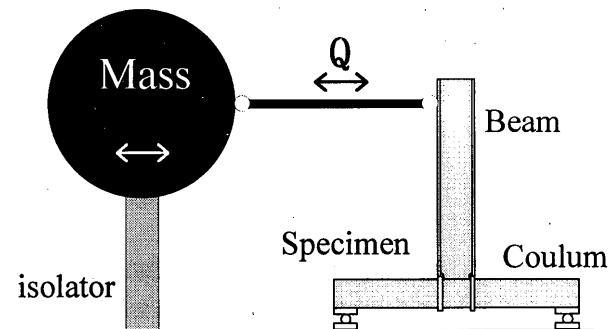
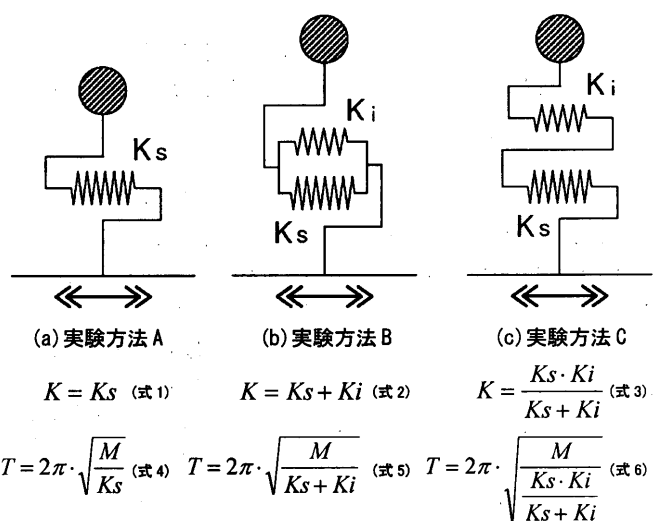


図3 実験方法Bの概要



T: 実験システムの固有周期
M: 錘の質量
K: 実験システムの剛性
 K_s : 試験体の剛性
 K_i : 試験体以外の部分の剛性

図4 振動実験モデルの比較

あるが、柱材に作用する軸方向力は、文献16) で用いた方法により可能となる。

(i) 試験体と錘は加力梁によってのみ接続されている。そのため、試験体の取り替えは容易に行うことができる。また、加振中に試験体が破断した場合においても、錘の重力はアイソレーターによって支持されているため安全である。しかし、錘も振動台上に配置されるため、試験体と錘を配置するための大きな振動台上のスペースが必要となる。

(ii) 実験システムの剛性 K は並列に配置されたアイソレーターにより K_s+K_i となり、実験システムの固有周期は式5として表現できる。固有周期は適切な質量 M を設定することにより、中層の実構造物と対応する固有周期を得ることができる。加振中の試験体の塑性化による見かけの固有周期の増大は、並列に配置されたアイソレーターの剛性(K_i)の影響により若干緩和される。

(iii) 錘及び試験体を振動台上に並べて配置するため、振動台上の重量のバランスが悪くなる。また、振動台は実験方法Aと同様に重量の影響を受けるため、それを踏まえた条件設定が必要となる。

(実験方法C): 本研究で提案する実験方法を図5に示す。提案する実験方法は、実構造物の地震時挙動を再現することを目的として、構造物を実験システムへとモデル化している。この実験システムは制振部材を有する中層鋼構造建物を想定し、それを集約したもので、図中○で示す部分骨組試験体①、上部構造の重量をモデル化した錘②、上部構造の柔性をモデル化した直列に配置したバネ③(以下、柔性モデルバネと記す)及び振動台④によって構成される。試験体に対して試験体上層部の柔性を表現する柔性モデルバネを直列に配置したことにより、1質点系振動モデルとして表すと図4(c)となる。試験体と直列に配置された柔性モデルバネは、試験体の上層部の柔性を表現しているため、建物の全体挙動との対応を考えた場合、試験体部の挙動は構造物の全体挙動の中にある特定の層の挙動を近似的に表現していると言える。錘を図5中に示すように、振動台から離れた場所で振り子として吊り下げている。これにより二つの利点を得ている。一つ目は、錘を振動台上以外の場所へ配置することにより、振動台上を有効に活用できることである。二つ目は、振動台が錘の重力

を支持する必要がなくなり、振動台の加振性能を有効に活用できる実験システムとなることである。振り子自体も振動系であるため、錘には水平方向の復元力が生じるが、振り子の腕の長さを可能な限り大きくとることによりその影響を低減する事ができる。錘を振動台上以外へ配置する仕組みはBachmannら¹⁷⁾の研究などにより既に報告されているものであるが、本研究では錘を吊り下げることにより、錘の移動時に発生する摩擦などの抵抗力を低減している。実験方法Bと同様に、 $P-\delta$ 効果の再現は困難であるが、柱材に作用する軸方向力については再現可能である。

(i) 実験方法Bと同様に試験体と錘とは加力梁によってのみ接続されている。そのため、試験体の取り替えは容易に行うことができる。また、振動台上に錘が配置されないことから、中小規模の振動台上を有効に活用できる。また、加振中に試験体が破断に至った場合においても錘は振り子として吊り下げられているため安全である。

(ii) 実験システムの剛性は試験体に対して直列配置の柔性モデルバネにより式3となるため、実験システムの固有周期は式6として表現できる。従って、柔性モデルバネの剛性を変化させることにより、実験システムの固有周期を容易に設定することができる。錘と試験体の間にバネを入れるアイデアは、実験方法Bへの適用として既に行われている¹⁸⁾が、より単純な振動系となっている点が本方法の特徴である。加振中における試験体の塑性化による見かけの固有周期の増大は、直列に配置された柔性モデルバネの剛性(K_i)の影響により緩和され、実構造物が損傷集中を起こした状態を表現している。

(iii) 錘を振動台上に配置せず、錘の重力の支持を振動台に頼らないため、振動台の加振性能を有効に活用できる実験システムである。

以上の3種類の固有周期を調節した振動台実験方法は振動台加振時において、試験体各部位に実構造物の実地震時と同等なひずみ速度を得ることが出来るため、純ラーメン骨組以外にも、既往の研究において歪み速度依存性が報告^{18) 19)}されている極低降伏点鋼等を用いたダンパーや、振動数に依存する粘性系、粘弾性系ダンパーを用いた損傷制御骨組に対しても加振を行い、適切に応答を評価することができるものである。

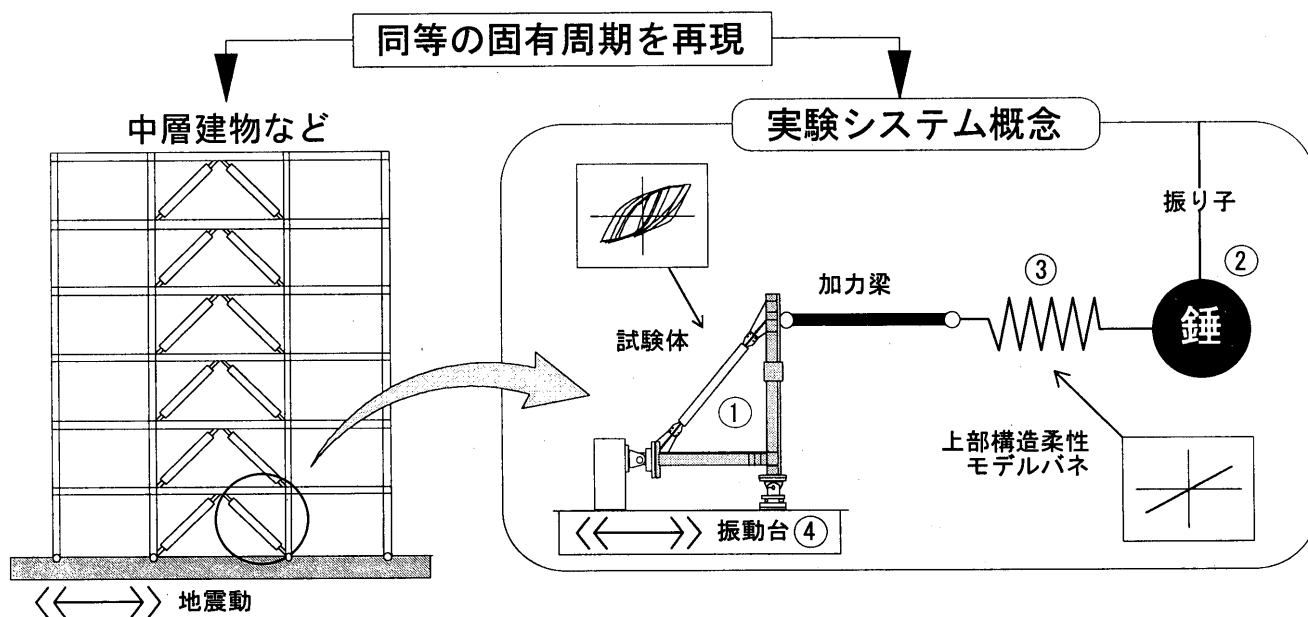


図5 実験方法C(提案する実験方法)の概要

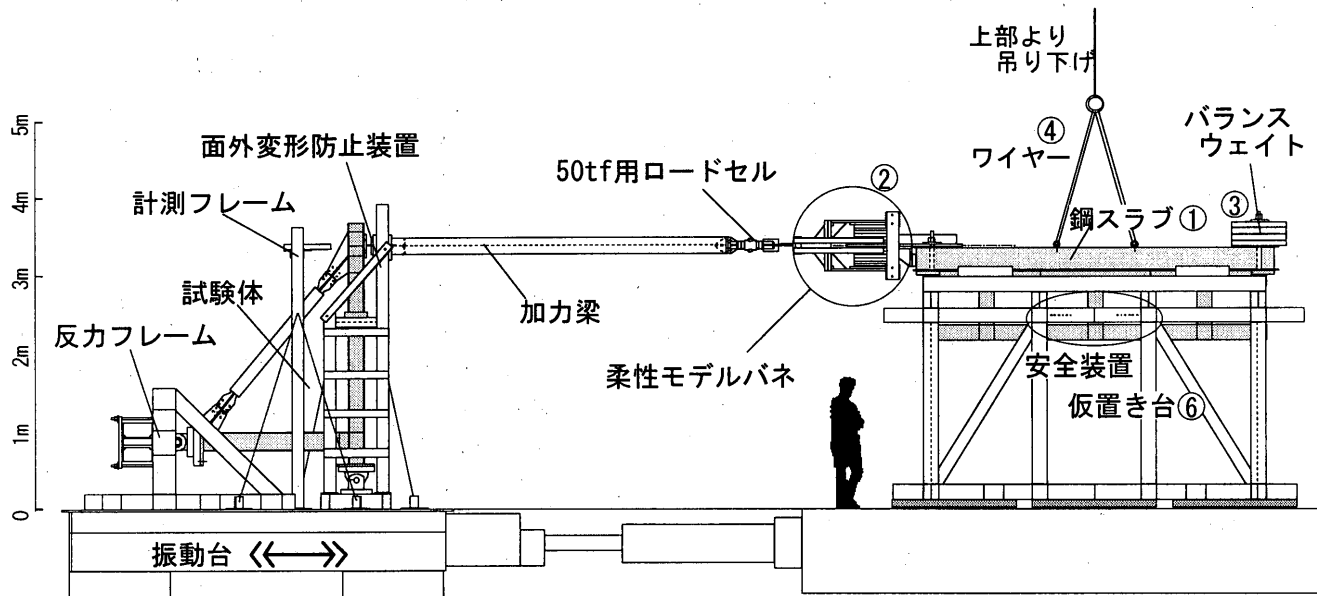


図6 実験システム全体

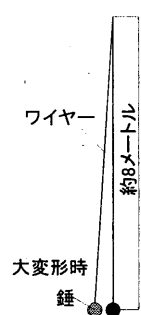


図7 振り子の影響

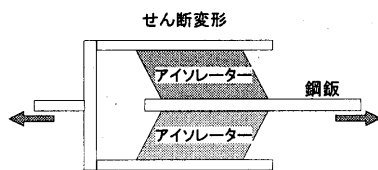


図8 柔性モデルバネ

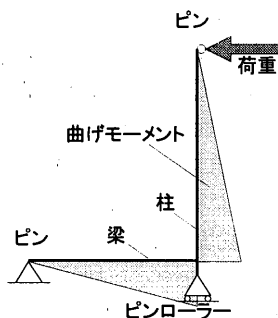


図9 支持条件と曲げモーメント分布

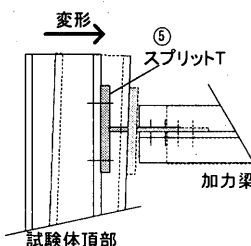


図10 試験体-加力梁接合部

3 提案する実験システムの具体的構成

本実験システムの具体的構成を図6に示す。錘は約10tfの鋼スラブ①を主要素とし、左側に柔性モデルバネ②、右側にバランスを補正するためのバランスウェイト③などで構成され、合計重量を約16tfとした。構成要素はそれぞれPC鋼棒にプレテンションを与えて接合し、一つの剛体としている。また、錘は十分な安全率を有するワイヤーロープ④を用いて建屋の走行型クレーンを用いて、吊り下げた。これにより前述の振動台を有効に活用する利点を得ている。振り子としての腕の長さは、図7に示すように可能な限り長くともとし、今回の実験では約8mとする。そのため、錘のみの振り子としての自由振動試験では固有周期が5.9秒となる。振り子によって生じる水平方向の復元力を剛性と変位で表現すると、その剛性は実験システム全体に対し2%以下であることを確認した。また、この錘は振動台加振時に水平方向の慣性力を生み出す重要な役割を果たす。慣性力は加力梁により試験体へと伝達される。

柔性モデルバネは図8に示すように、一枚の鋼板の上下にアイソレーターを2個並列に配置している。それらがせん断変形することによりバネとしての剛性を発揮する。アイソレーターは1個につき0.52tf/cmのせん断剛性を有するため、柔性モデルバネとしては1.04tf/cmの剛性を持つ。また、アイソレーターの弾性変形量は±25cmであるため、本実験で想定する変形領域(最大±15cm程度)において、アイソレーターは、線形挙動を示す。

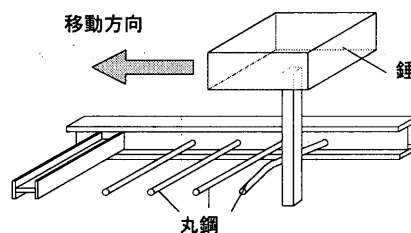


図11 安全装置概念

試験体は骨組の対称性を考慮して、梁の反曲点位置で取り出した1/2スパンの部分骨組モデル(図5の○部分)であり、上下180度回転し、振動台上へ配置する。試験体の支持は図9に示すように梁の反曲点に相当する部分をピン支持、試験体と加力梁の接合部をピン接合、柱梁接合部近傍をピン・ローラー支持することにより、地震時と同様な応力分布を再現する。試験体と加力梁接合部は図10に示すようにスプリットT⑤を用いて、加力梁(H-294x200x8x12)のウェブ材に接合する。垂直方向の面内剛性は、他の部分の剛性に対して小さいため、ピン接合として扱う。また、錘の予想外の変位を丸鋼の塑性変形によってエネルギー吸収させる安全装置(図11参照)を用意して、加振時の安全性を確保した。安全装置の一部は図6⑥に示すように、非加振時に錘を仮置きする台として用い、作業効率を高めている。

4 試験体

4-1 試験体形状

試験体は、中層鋼構造建物を想定した純ラーメン構造と制振部材に座屈拘束ブレースを用いた損傷制御構造の2種類の部分骨組とする。純ラーメン骨組試験体を図12に、損傷制御骨組試験体を図13に示す。試験体サイズは両骨組共通で仕ロパネル中央から柱材(鉛直材) $L_c=2500\text{mm}$ 、梁材(水平材) $L_b=2000\text{mm}$ と設定した。階高4mの鋼構造物を想定した場合、試験体は約5/8スケールとなるが、寸法効果が問題となる柱梁接合部の破壊に寄与する主要因(板厚、ディテール、溶接など)についての影響は無視できると考える。また、固有周期を実構造物と対応させることで応力、歪みの時間軸の相似則を満足させている。断面形状は、両骨組の柱材、梁材ともにH型断面とした。断面寸法を表1に示す。

表1 試験体断面寸法

	純ラーメン骨組	損傷制御骨組
梁材(水平材)	BH-340x200x 6x 9	BH-240x170x 6x 9
柱材(鉛直材)	BH-280x280x12x22	BH-220x220x12x19
芯材	-	25x16

両骨組ともに仕ロパネルをダブルプレートにより補強し、柱梁接合部近傍の梁材には局部座屈を防ぐため3枚のスチフナを等間隔で配置する。また、柱材については仕ロパネル中央から1500mmの位置に面外変形を拘束するためのプレートを取り付ける。柱梁接合部は、両骨組ともにノンスラップとし、フランジ溶接部の詳細を図12、図13中に示す。

制振部材は図14に示す座屈拘束ブレースを用いた。この制振部材は軸

方向力を伝達する鋼板(以下 芯材)を鋼管とモルタルを用い拘束する事により、座屈を起こさないようにしたもので引張、圧縮ともに安定した復元力特性を示す。また、鋼管とモルタルに軸力を伝えないことと、ポアソン比による影響を排除するために芯材とモルタルの間には特殊な緩衝材を用いている。芯材の断面寸法は、16x25mmの矩形断面とする。そのため、平板断面(-タイプ)の座屈拘束ブレース⁶⁾を参考に、継手部分から2段階で断面に絞りを入れている。

4-2 試験体性能

前提条件として、試験体は振動台の加振性能を考慮し、水平荷重の最大値を15tfと設定し設計している。

試験体に使用した鋼材の機械的性質を表2に応力-歪み関係を図15に示す。材料試験にはJIS1A号試験片を用いる。梁材には降伏点の管理されたSN400Aを用い、座屈拘束ブレースの芯材には降伏歪み度が小さく小振幅から履歴減衰を期待できる極低降伏点鋼(BT-LYP100)を用いる。

図16に両骨組試験体の静的解析によって求めたせん断力-層間変形(角)関係を示す。この解析では材料の降伏応力度はF値を1.2倍とし、解析を行っている。試験体設計時の留意点を下に記す。

1. 両骨組の保有水平耐力を約9tfと揃える。
2. 損傷制御骨組の主体構造と制振部材の耐力分担率(主体構造塑性化時)は1:1程度とする。
3. 損傷制御骨組の主体構造は梁せい、柱せいを小さくし、弾性変形範囲を大きくする。

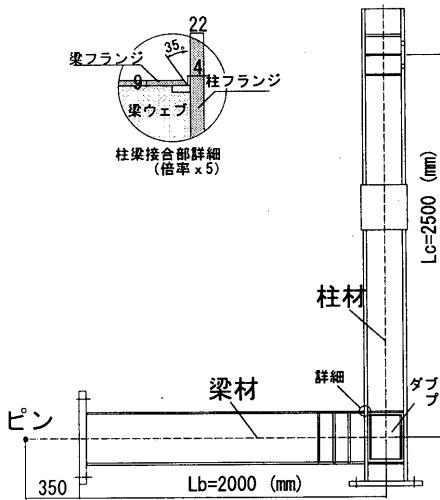


図12 試験体(純ラーメン骨組)

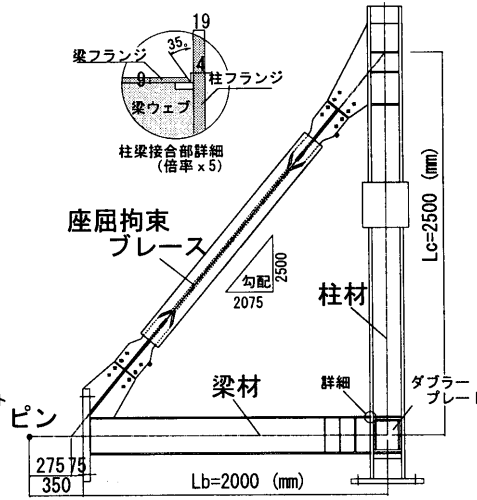


図13 試験体(損傷制御骨組)

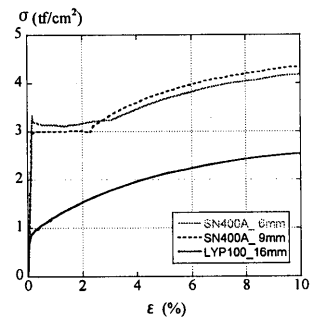


図15 応力-歪み関係



図14 座屈拘束ブレース

表2 鋼材の機械的性質

材質	降伏点 (tf/cm ²)	引張強さ (tf/cm ²)	破断伸び (%)
SN400A (t=6)	3.17	4.44	31.7
SN400A (t=9)	2.98	4.60	30.8
LYP100 (t=16)	*0.98	2.63	59.6

*0.2% オフセット耐力

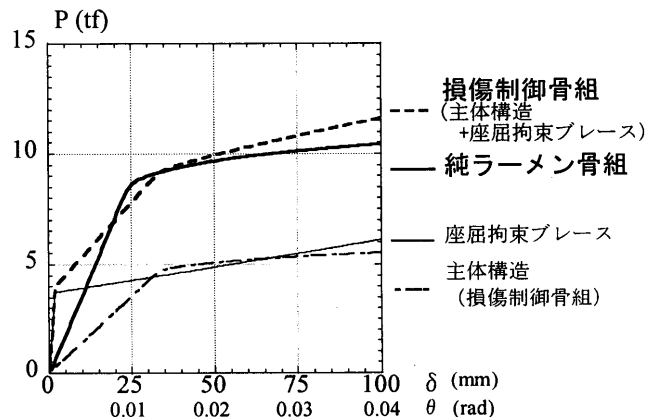


図16 試験体のせん断力-層間変形(角)関係

5 入力

5-1 振動台

振動台は京都大学防災研究所所有の強震応答実験装置を使用する。本振動台は6自由度振動台であるが、他の自由度を固定し水平方向の1自由度振動台として加振を行う。振動台の加振性能について、図17に振動台上加速度と加振周期成分の関係を示し、図18に振動台上速度と加振周期関係を示す。図中の灰色部分は、今回設定した実験システムの固有周期周辺である。提案する実験方法においては、約16tfある錘を吊り下げることにより振動台への搭載重量を軽減できるため、図17、18中で実線で示す、15tf搭載時と同等もしくはそれ以上の加振性能が期待できる。一方、従来の実験方法を用いた場合には、試験体、治具、錘などが振動台上に配置されるため、搭載重量は20tfを超える。そのため搭載重量に応じた加振性能の低減を考慮する必要がある。15tf搭載時の加振性能は、加速度について、実験システムの固有周期の範囲で1Gまで加振可能であり、速度についても、実験システムの固有周期の範囲で80kine以上の加振が可能であることが確認できる。また、振動台の許容変形量は±30cmである。

5-2 入力地震動

入力地震動については、表3に示す著名な3種類の強震記録波形を用い、加速度、速度、変位に関する振動台の持つ能力を考慮して若干の補正を加え、振動台入力用加速度記録波形（以下、入力波）とした。最大速度を50kineに基準化したEl Centroを例に、補正方法とその影響を示す。補正の前後におけるの強震記録波形の加速度（図19）、平均加

表3 入力地震動

年	地震	観測地	成分	以下記述
1940	インベリアルバレイ地震	El_Centro記録	NS成分	El_Centro
1968	十勝沖地震	八戸記録	EW成分	Hachinohe
1995	兵庫県南部地震	神戸海洋気象台記録	NS成分	Kobe

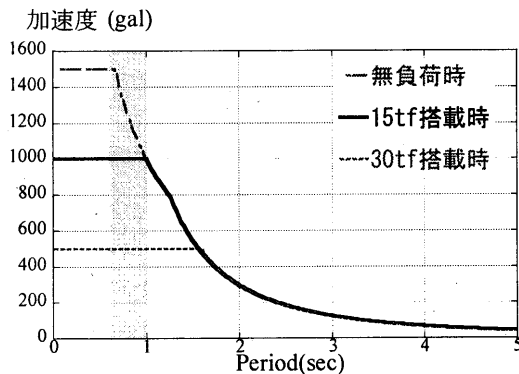


図17 振動台性能曲線（加速度 - 周期関係）

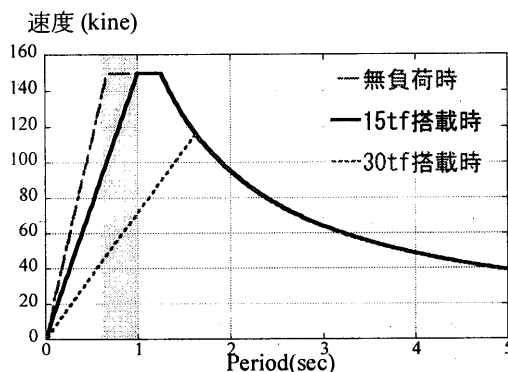


図18 振動台性能曲線（速度 - 周期関係）

速度法を用いて数値積分した速度（図20）、変位（図21）を時刻歴で示す。補正前の変位は、ドリフトし振動台の許容変形量を大きく超える。また、速度は継続時間終了後も残留速度を有している。そのため、10秒以上の長周期成分の除去と、継続時間終了後に残留速度がなくなるなどの条件を基にした基線補正²⁰⁾を行った。結果を同図中に示す。変位の発散は見られず、変位は振動台の許容変位内に収まっている。この処理により変位については大きな改善が見られるものの、図19に示すように、時刻歴の加速度については、ほとんど変化は見られない。補正による入力エネルギーへの影響を式7に示す減衰10%1質点弾性系への総入力エネルギー量の速度換算値²¹⁾（以下 V_E ）を用いて評価する。

$$V_E = \sqrt{\frac{2E}{M}} \dots (式7)$$

V_E : 総入力エネルギー量の速度換算値
 E : 総入力エネルギー量
 M : 質量

図22によると補正後の V_E は全周期の範囲で5%程度大きな値を示している。これは、補正後の入力波が速度、変位ともに基線（ゼロ線）を中心とした振動に近づき、最大速度で規準化するために原波の加速度記録に乗じる係数が大きくなるためである。

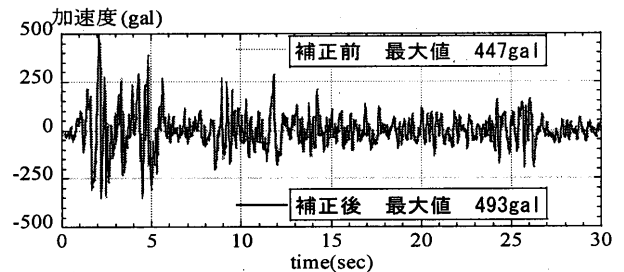


図19 入力波の補正による影響（時刻歴 - 加速度関係）

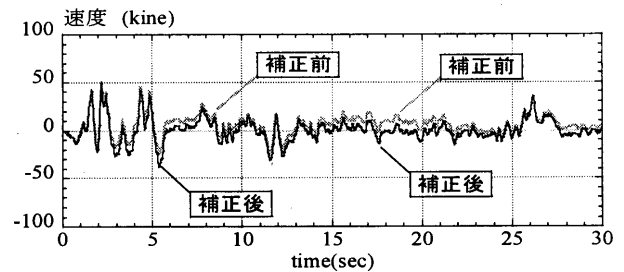


図20 入力波の補正による影響（時刻歴 - 速度関係）

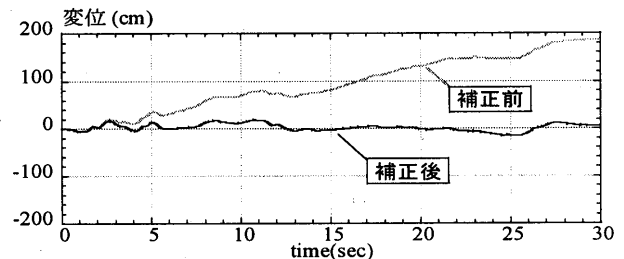


図21 入力波の補正による影響（時刻歴 - 変位関係）

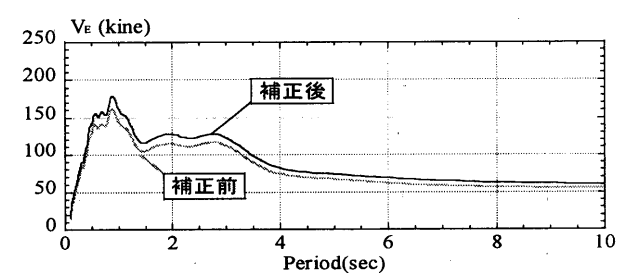


図22 入力波の補正による影響（h=10% V_E スペクトル）

6 実験システムの検証

6-1 固有周期、減衰

本論文で提案した実験システムの成立性を確認するため、パルス加振結果を用い、検討を行う。図23、図24に純ラーメン骨組と損傷制御骨組を試験体として用いた場合のパルス加振結果（時刻歴-変形関係）をそれぞれ示し、同図中に加振結果から算出した実験システムとしての固有周期と減衰を示す。両骨組ともに、加振結果は滑らかな曲線となり、減衰は約2%と既往の大型振動台実験結果^{12)~15)}および一般的な実構造物の減衰と同程度であることから、試験体の耐震性能を評価しうる実験システムを構築できたものと判断した。実験システムの固有周期は、0.82秒、0.70秒であり、中層建物などに対応し今回想定した固有周期(0.7~0.8秒程度)を得ることが出来た。

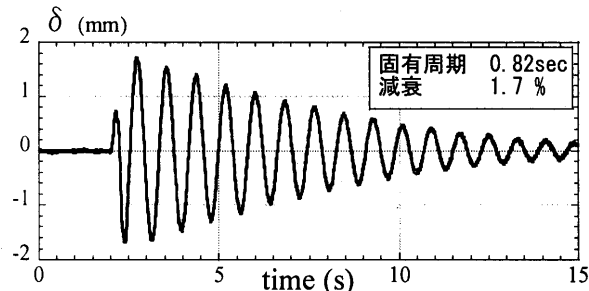


図23 パルス加振結果（純ラーメン骨組）

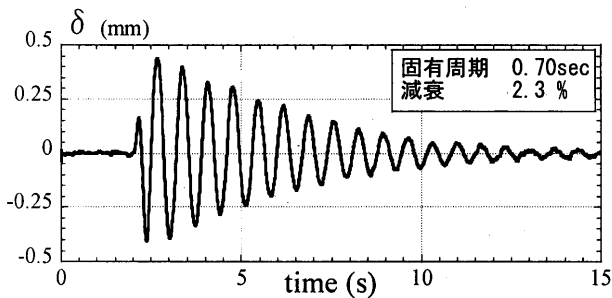


図24 パルス加振結果（損傷制御骨組）

6-2 試験体と錘の応答（変位に関して）

純ラーメン骨組を用いたEl Centro（最大加速度765gal、最大速度51.0kine）入力時の実験結果を用い試験体頂部と錘の応答変位を図25に示す。変位はともに振動台からの相対変位を用いて示す。2種類の変位履歴はともに実験システムの固有周期を反映し振動を続けていることがわかる。これは、図26に示すような概念的なものであるが、想定する建物の試験体上部の柔性をモデル化したバネと、重量をモデル化した錘によって、実験システムは実構造物を1質点系モデルとして地震時挙動を近似的に再現していることがわかる。また、試験体の最大変位に着目すると最大値は8.8cmを記録している。このとき錘は24.9cmの変位を記録し、試験体の2.5倍以上の変位を示している。加振終了時には、試験体の塑性化によって約2.3cmの残留変位が生じていることと対応し、錘にも同等な残留変位（約2.5cm）が生じている。このことから、実験システムの錘の変位が想定する建物の上部構造の挙動を近似的に再現しているといえる。

6-3 振動台加振性能と加振結果

振動台の加振性能曲線と、実際に行った加振での振動台の最大加速度と最大速度（ともに絶対値）の対応を見る。各最大値は純ラーメン骨組を用いた10回の加振及び、損傷制御骨組での28回の加振結果を用いた。加速度は振動台中央での計測値とし、速度は加速度

を平均加速度法を用いて数値積分した値を用いる。図27に加速度に関して、図28に速度に関して、振動台性能曲線と最大値の対応関係を示す。加振結果の横軸には、両骨組を用いた場合の弾性固有周期を用いてプロットしている。今回の実験では設定した入力レベ

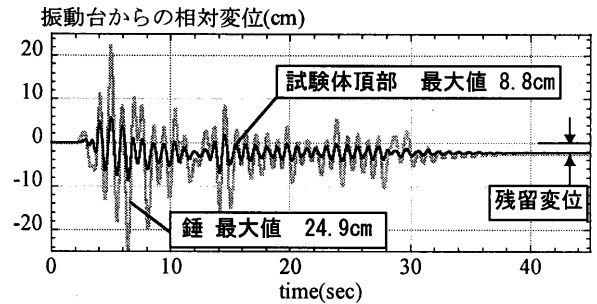


図25 時刻歴試験体、錘変位波形（相対変位）

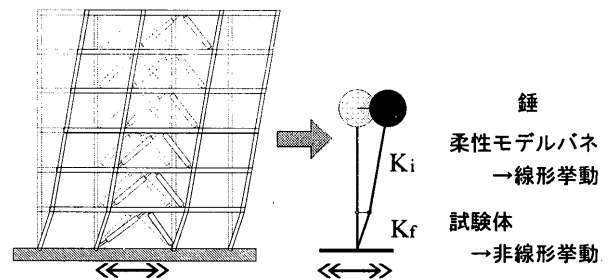


図26 加振中の実験システム（概念）

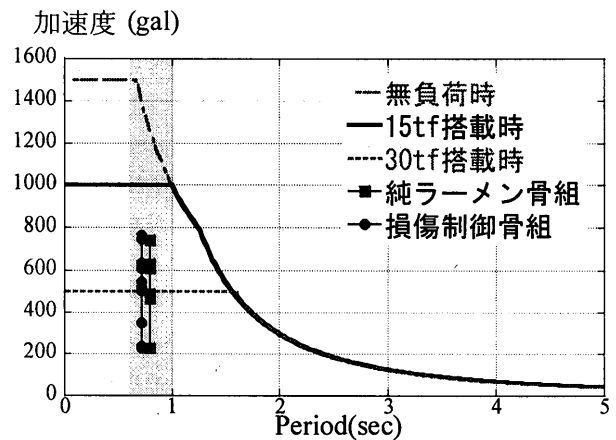


図27 振動台性能曲線（加速度）と実験結果

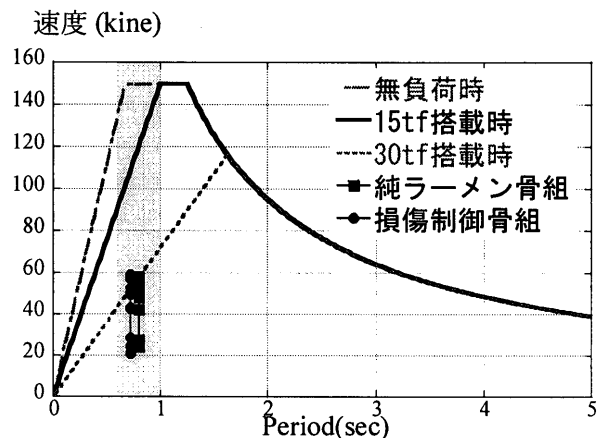


図28 振動台性能曲線（速度）と実験結果

ルが最大速度で50.0kine程度であったことから、加速度の最大値で760gal、速度の最大値で59kine程度の値となり、15tf搭載時の限界性能から見て十分余裕のある範囲で行われた。最大加速度については、錘、試験体、周辺治具からなる全実験システムを振動台上へ載せた場合の限界性能と対応していると考えられる入力合計20回程で行われているが、振動台の安全装置が作動し振動台が止まることは一度もなく、少なくとも実験システムの総重量に対する振動台の限界性能までは安定した加振が行える実験方法であることが検証できた。

7 結

本論文では実構造物の部分骨組の地震時挙動を近似的に再現する事を目的として、既往の振動台実験方法と提案する実験方法の特徴を整理し比較検討を行った。また、2種類の部分骨組試験体を例として、提案する実験方法を構築し、振動台加振を行った。

本論文は以下のようにまとめられる。

本論文では、部分骨組を試験体として、実時間に即した地震動を入力した2種類の既往の振動台実験手法と提案する振動台実験手法を対象として各実験方法の特徴を以下の三点に注目して整理し、比較検討を行った。また各項に、提案する実験方法の特徴を示す。

(i) 実験遂行上の試験体の入れ替えなどの作業形態、および安全性

本実験方法は、錘の移動などの重作業を軽減できる。

(ii) 実験システムの固有周期の調整

試験体に直列に配置したバネの剛性を調節することにより実験システムの固有周期を設定することが出来る。

(iii) 振動台への負荷

本実験方法において、振動台は錘の重量を支持する必要がなく、振動台の加振性能を有効に活用できる。

また、提案する実験方法のその他の特徴を以下に示す。

(a) 実験システムの錘を振動台上に配置せず、振り子としてつり下げることにより振動台上の面積を有効に使うことができるものとなる。また、振動台の加振性能を有効に活用できる。

(b) 固有周期を実構造物と対応させ、部分骨組試験体以外の上層部の柔性をモデル化したバネを有する実験システムを加振することによって、実構造物の部分骨組の地震時挙動を近似的に再現することができ、速度依存性が報告されている極低降伏点鋼を用いたダンパーや速度依存性を持つ粘性ダンパー、粘弾性ダンパーを骨組に組み込み適切に評価することができる。

本研究ではパルス加振、及び振動台加振結果を用いて、以下の事柄を示している。

(a) 想定する中層鋼構造建物と同等の固有周期(0.7~0.8秒)を有する実験システムを構築した。

(b) 振動台加振時に試験体及び錘は固有周期に沿った振動を示し、錘は構造物を等価1質点系として表現した場合の等価高さの変位を近似的に再現している。

参考文献

- 1) 和田 章、岩田 衛、清水敬三、安部重孝、川合廣樹：建築物の損傷制御設計、丸善、1998。
- 2) 佐伯 英一郎、前田泰史、中村秀司、緑川光正、和田 章：実大アンボンドブレースに関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、No.476、pp.149-158、1996年10月。
- 3) 真鍋典生、下川引海、神谷 誠、森野捷輔、川口 淳：角形鋼管で補剛された平鋼ブレースの弾塑性性状に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1分冊、pp.783-784、1996年。
- 4) 小野聡子、中平和人、辻岡静雄、井上一朗：アルミ溶射摩擦ダンパーの静的および動的履歴特性に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.41B、pp.1-8、1995年。
- 5) P.W.Clark, I.D.Aiken, F.F.Tajirian, K.Kasai, E.Ko, I.Kimira: Design Procedures For Buildings Incorporating Hysteretic Damping Devices, International Post-SMIRT Conference Seminar on Seismic Isolation, Korea, 1999.
- 6) 藤波健剛、岩岡信一、龍神弘明、森下真行、斉藤芳人、玉井宏朗、近藤一夫、花井正実：普通鋼K型制振ブレース付架橋の弾塑性性状(その1~2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1分冊、pp.831-834、1998年。
- 7) 杉原広史、山口路夫、小波佐和子、黄 一華、竹内 徹、前田泰史、成川匡文、西村功、森 秀樹、岩田 衛、萩原みき、和田 章：履歴ダンパーを組み込んだ鋼構造骨組の耐震性能に関する研究(その1~3)、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1分冊、pp.827-832、1999年。
- 8) 酒井 章、栗原一郎、白石一郎、中村義郎：地震動を受ける原子炉建屋耐震壁の挙動に関する研究(その1) RC造立体耐震壁の静的及び仮動的実験、日本建築学会構造系論文集、No.433、pp.19-28、1992年3月。
- 9) 酒井 章、前川利雄、和田 章：地震動を受ける原子炉建屋耐震壁の挙動に関する研究(その2) RC造立体耐震壁のマクロモデルによる耐震性評価、日本建築学会構造系論文集、No.447、pp.97-106、1993年5月。
- 10) 酒井 章、前川利雄、金森誠治、和田 章：地震動を受ける原子炉建屋耐震壁の挙動に関する研究(その3) RC造立体耐震壁の振動台実験、日本建築学会構造系論文集、No.453、pp.159-169、1992年11月。
- 11) 長谷川 隆：接合部パネルが塑性化する鉄骨構造骨組の地震応答性状に関する振動台実験、日本建築学会構造系論文集、No.528、pp.143-149、2000年2月。
- 12) 秋山 宏、山田 哲、箕輪親宏、寺本隆幸、大竹章夫、矢部喜堂：慣性加力装置を用いた構造要素の実大振動台実験方法、日本建築学会構造系論文集、No.505、pp.139-146、1998年3月。
- 13) 秋山 宏、山田 哲、松本由香、松岡三郎、小倉桂治、北村春幸：実大振動台実験による柱梁接合部の破壊性状に関する研究、日本建築学会構造系論文集No.512、pp.165-172、1998年10月。
- 14) 秋山 宏、山田 哲、高橋 誠、桂 大輔、木村克次、矢幡秀介：露出型柱脚の実大振動台実験、日本建築学会構造系論文集、No.514、pp.185-192、1998年12月。
- 15) 秋山 宏、山田 哲、松本由香、田中宏志、三山剛史、寺田岳彦：冷間成形角形鋼管柱の実大振動台実験、日本建築学会構造系論文集、No.521、pp.139-140、1999年7月。
- 16) Namihiko Inoue, Eiichi Inai, Akira Wada, Hiroshi Kuramoto, Isao Fujimoto, Masanori Iiba: A Shaking Table Test of Reinforced Concrete Frames Designed Under Old Seismic Regulations in Japan, Proceedings of 12WCEE, Twelfth World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand, 2000.
- 17) Hugo Bachmann, Thomas Wenk, Pierino Lestuzzi: Dynamic Tests of RC Structural Walls on the ETH Earthquake Simulator, IBK Report No.240, April 1999.
- 18) 佐伯 英一郎、杉沢 充、山口種美、望月晴雄、和田 章：低降伏点鋼の低サイクル疲労特性に関する研究、日本建築学会構造系論文集、No.472、pp.139-147、1996年6月。
- 19) 佐伯 英一郎、杉沢 充、山口種美、望月晴雄、和田 章：低降伏点鋼のヒステリシス及びヒステリシスエネルギー特性に関する研究、日本建築学会構造系論文集、No.473、pp.159-168、1995年7月。
- 20) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門、鹿島出版会、1994。
- 21) 秋山 宏：建築物の耐震極限設計、東京大学出版会、1980。

謝辞

本研究において高周波熱練株式会社からPC鋼棒をご提供いただきました。また、本研究の一部は京都大学防災研究所、共同研究「大型鉄骨建屋の合理的耐震性能に関する研究」として援助を受けている。付記して感謝の意を表します。最後に、京都大学防災研究所技官・市川信夫氏をはじめご協力いただいた関係各位に謝意を表します。

(2000年6月10日原稿受理、2000年10月23日採用決定)