

慣性加力装置を用いた構造要素の実大振動台実験方法

EXPERIMENTAL METHOD OF THE FULL SCALE SHAKING TABLE TEST USING
THE INERTIAL LOADING EQUIPMENT秋山 宏*¹, 山田 哲*², 箕輪親宏*³, 寺本隆幸*⁴, 大竹章夫*⁵, 矢部喜堂*⁶*Hiroshi AKIYAMA, Satoshi YAMADA, Chikahiro MINOWA,
Takayuki TERAMOTO, Fumio OTAKE and Yoshitaka YABE*

In this paper, a new experimental method of the full scale shaking table test is proposed and verified. The main feature of this method is characterized by the use of the inertial loading equipment. Thus, inertia force generated in the loading mass supported by isolators is applied to the specimen. The shaking table is one of the biggest shaking tables in the world, and it is possible to apply 100kine velocity to 200ton of the weight. So, using this experimental method, a full scale and real time dynamic shaking of structural elements up to their collapse state is possible to carry out.

Keywords : *shaking table test, experimental method, full scale test, energy*
振動台実験, 実験方法, 実大実験, エネルギー

1. 序

1995年1月15日に発生した兵庫県南部地震では、激震地を中心とした広範な地域で甚大な被害が発生し、数多くの人命や財産が奪われた。鋼構造物においても厚肉柱材の脆性破壊や、柱梁接合部近傍における破壊など、予想外の損傷が数多く見られた。これらの被害の原因を究明することは、同様の被害を未然に食い止めるための最も有効かつ重要な研究課題である。

本研究では、実大の構造要素に対して、強震観測記録を用い、実時間軸に即した動的載荷試験を行うことにより、兵庫県南部地震で発生した様々な破壊現象を再現し、その原因を解明することを主目的としている。また、構造設計の新しい考え方である、重力は剛性の小さな主架構で支え、地震による入力エネルギーを剛性の大きなダンパーで吸収する「柔剛混合構造」についても、エネルギー吸収要素であるダンパーを組み込んだ実大の部分架構に対して、実時間軸に即した動的載荷試験を行うことにより、強震下におけるエネルギー吸収要素の有効性を検証することももう一つの目的としている。

本論文では、実大の構造要素に対する振動台実験の方法について論じるとともに、本実験法による一連の実大動的載荷試験の最初のシリーズである、H形断面柱-H形断面梁接合部の実験結果を用いて、提案した実験方法の有効性を検証する。

2. 実験方法の概念

強震下における構造要素の破壊過程や、構要素の破壊に起因する構造物の動的崩壊挙動を検証するには、実大の架構に対する振動台実験を行い、強震下における挙動を再現することが最も望ましい。しかしながら、実存する大型振動台は総重量の小さな低層構造物をようやく加振できる程度であり、中層以上の構造物を加振するには、倒壊に対する安全装置を含めて強大な実験装置を用意しなくてはならない。一方、試験体として縮小架構を用いた場合には、破壊現象の重要な支配要因である寸法効果を反映できないばかりでなく、溶接施工条件やディテールが実構造物に即したものでなくなることや、相似則を満足するために入力波を時間軸に対して縮小して用いることになり、歪み速度を再現することができなくなるといった問題が生じる。

本実験方法は、骨組の中から部分架構を取り出し、これを試験体として用いて、実大の構造部材・接合部に対する動的破壊現象を再現するものである。実験装置の略図および概念を図-2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。実験装置の重量のほとんどは重錘と加振フレームの重量であることから、実験装置は最も基本的な振動系である「1質点系」とみなすことができる。この種の装置の発想

*¹ 東京大学工学部建築学科 教授・工博*² 東京大学工学部建築学科 助手・博士(工学)*³ 科学技術庁防災科学技術研究所 流動研究官・工修*⁴ 東京理科大学工学部建築学科 教授・工博*⁵ 住友金属建設技術部 工博*⁶ 清水建設技術研究所 工博Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Univ. of Tokyo, Dr. Eng.
Research Assoc., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

Cooperative Research Officer, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevision, M. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Science Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

Sumitomo Metal Industries, Ltd. Structural Engineering Dept., Dr. Eng.

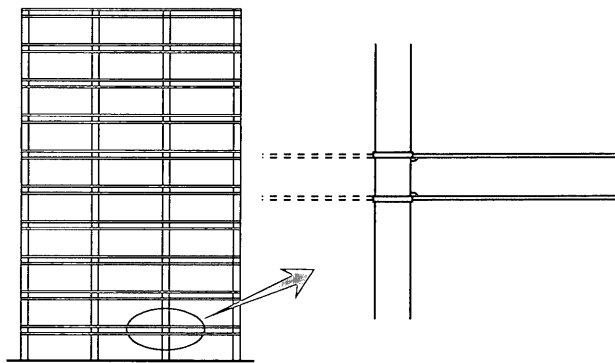
Institute of Technology, Simizu Corporation, Dr. Eng.

は既に存在するが¹⁾、大規模な重錘を用いた点が新しいと言える。また、鉛直加重を支える積層ゴムの水平方向の剛性は試験体に比べて小さくまた弾性挙動することから、積層ゴムを「柔要素」、試験体部を「剛要素」とする「柔剛混合構造」であることも本実験装置の特徴である。

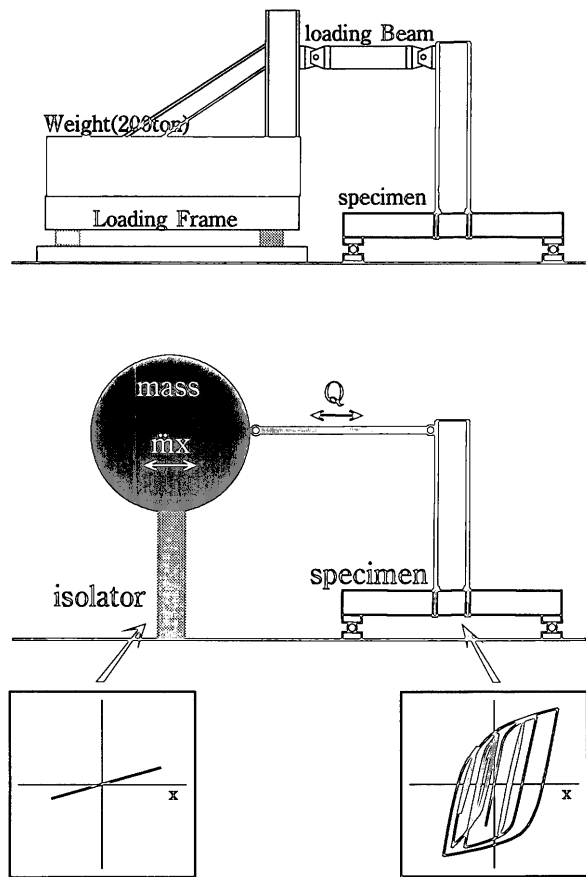
3. 振動台の性能と実験装置

3.1 振動台の加振能力

本研究では、科学技術庁防災科学技術研究所（茨城県つくば市）



図一 部分架構の取り出し



図二 実験装置の略図および概念

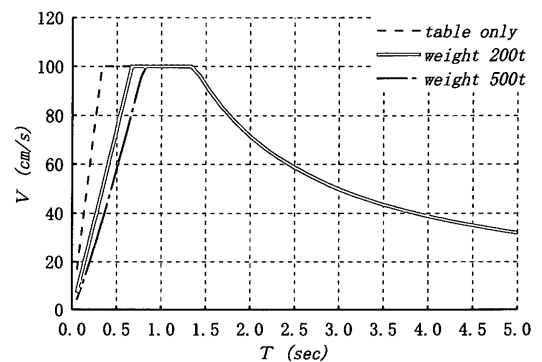
に設置されている電気油圧サーボ式大型振動台を用いた。この振動台の加振台の大きさは15m×14.5m、最大搭載重量は500ton、最大振幅は±220mmであり、最大速度100kinの加振が可能である。無負荷時と200ton積載時および500ton積載時における振動台の限界性能を図一3に示す。

3.2 実験装置

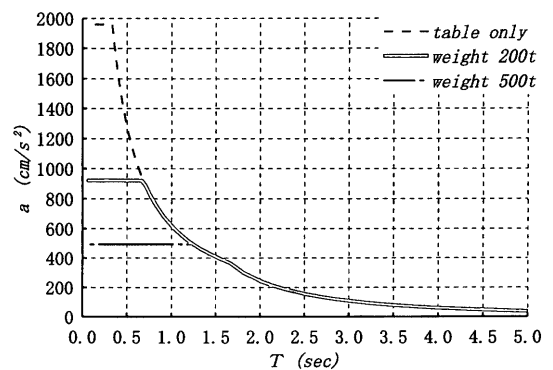
3.2.1 重錘の重量と加振性能

慣性力の発生源となる重錘の重量は、厚肉材で製作された部材や、強度の強い材料で製作された部材の破壊実験を行うためには、より大きいことが望ましい。また、強震下における破壊現象の再現という観点から、1G程度の最大加速度が入力できなくてはならない。さらに、試験体を破壊させるのに十分なエネルギーを入力するためには、振動台の最大速度はできるだけ大きくなければならない。図一3に示される振動台の限界性能から、振動台の性能を最大限に引き出す実験装置の重量は200ton程度、固有周期は0.6秒程度であることがわかる。そこで、実験装置の重量の大部分を占める重錘の重量は200tonと決め、1枚あたりの重量が約10tonの鋼スラブを20枚用いることにした。

実験装置の加振性能であるが、振動台からの入力エネルギーは、全周波数領域において式(1)で定義される速度換算値 V_e^2 で入力波の最大速度の2倍から3倍の応答が得られるものと仮定し、積載荷重200tonに対する実験装置への入力エネルギースペクトルを仮定



(1) 最大速度



(2) 最大加速度

図三 振動台の限界性能

した。仮定した入力エネルギースペクトルを図-4に示す。図-4から、固有周期が0.6秒から1.2秒の範囲では、速度換算値にして200(cm/s)から300(cm/s)程度のエネルギーが供給できると予測できる。

$$V_E = \sqrt{2E/M} \quad (1)$$

ここで、 E ：振動系への総エネルギー入力

M ：振動系の総質量

3.2.2 加振フレーム

実験装置を積載した振動台の最大加振能力が加速度で1Gであることは、アイソレーターの負担せん断力を無視すれば、最大200tonの慣性力を加力梁を通じて試験体頂部に加えることが可能であることを意味する。重錘を支え、発生した慣性力を加力梁に伝える加振フレームは、実験計画上の最大外力である200tonの慣性力を試験体頂部に加える場合においても全体を弾性範囲に留まらせるだけでなく、入力エネルギーのロスの原因となる加振フレーム自体の変形も抑えなくてはならない。加振フレームの設計においては、加力点位置を加振フレーム底からの高さが3mの位置としたときに、水平荷重200tonに対する加力点位置の水平変位が、4mm程度となるように部材断面を決めた。その結果、加振フレームの重量は約20tonとなり、実験装置の総重量のほとんどを占める重錘と加振フレームの合計重量は約220tonとなった。

また、鋼スラブによる重錘と加振フレームの接続には張力を導入したPC鋼棒を用い、加振時は一体の質点として挙動するようにしている。

3.2.3 加力梁

慣性力を加振フレームから試験体に伝える加力梁は、両端にピンを配して軸力のみを伝えるようになっている。加力梁には全周に歪みゲージが貼られており、試験体頂部に作用するせん断力を計測するロードセルとしても機能する。

3.2.4 平行移動装置

本研究で用いる振動台は1次元の起振装置であるので、本実験装置を構成する加振フレームや加力梁も、加振面内のみで挙動するように平行移動装置を設けている。

まず加振フレームには、図-5(1)に模式的に示すように両脇の4点にローラーによる振れ止めを設置し、回転と加振方向と直交方向への移動を拘束して加振方向のみに移動するようにしている。また、図-5(2)に示すように、加振フレームから出したL字形のアームを用いて、試験体頂部が加振方向と直交方向に変位することを防いでいる。さらに、加力梁両端のピンと試験体の設置に用いるピンはいずれも回転方向のみに動く単純なものであり、試験体の加力面外への変形を拘束する効果がある。

3.2.5 アイソレーター

重錘を載せた加振フレームを支えるアイソレーターは、重錘と加振フレームの重量を支えるだけでなく、試験体に変形すれば加振フレームも水平移動するので、試験体を破壊させるのに十分な水平移動量を確保しなくてはならない。アイソレーターは加振フレームの4隅に配置することにし、設計荷重50tonで実験時の固有周期が2秒となる建屋免震用積層ゴムを用いた。このアイソレーターの弾性剛性は0.50 (t/cm) であり、許容変位は25cmである。

3.2.6 ストッパー

破壊実験において試験体が破断すると、試験体の弾性歪エネルギーが瞬時に解放される。試験体から解放され弾性歪エネルギーと破断時における加振装置の運動エネルギーが、アイソレーターの許容変位の範囲内での弾性歪エネルギーで吸収できない場合、実験装置が壊れる可能性が生じる。そこで、加振フレームと基礎梁の間に、アイソレーターの許容変位を越える水平変位が生じたときに衝突するストッパーを設けた。ストッパーの衝突面には鉛板が取り付けられており、衝突時における衝撃を吸収するようになっている。

3.2.7 計測装置

実験装置の各点には、作動トランス型変位計・レーザー変位計・ワイヤー式変位計・加速度計・歪ゲージ・温度ゲージ等の各種センサーを取り付け、時々刻々変化する試験体の変形状態や、実験装置の各部分の位置等を計測する。また、振動台に取り付けられているセンサーからも、振動台の加振方向・直交方向・上下方向・回転方

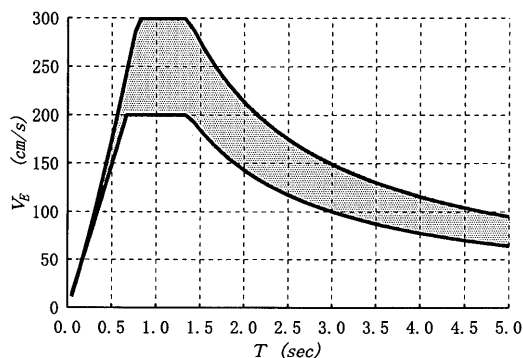


図-4 仮定した入力エネルギースペクトル

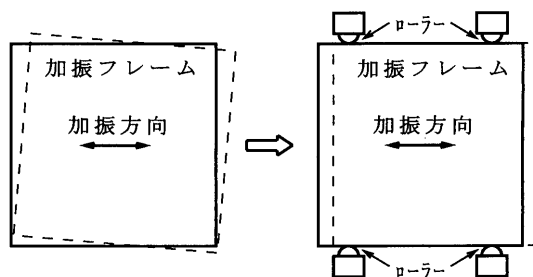


図-5(1) 加振フレームの回転と面外挙動を抑える平行移動装置

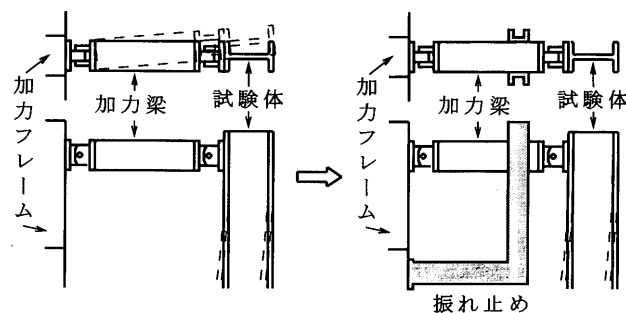


図-5(2) 試験体頂部の面外変形を抑える平行移動装置

向の変位・速度・加速度に関する情報が得られるようになっている。これらのデータは、動歪計によって1000分の1秒刻みで計測され、制御用ワークステーションのハードディスクに記録される。

3.3 振動系としての実験装置

本実験装置は、重錘と加振フレームを「質点」、アイソレーターを「柔要素」、試験体を剛要素とする「柔剛混合構造」であり、1質点の振動系にモデル化できる。そしてその運動方程式は、次式で与えられる。

$$m\ddot{x} + (C_f + C_s)\dot{x} + (k_f + k_s)x = -m\ddot{z} \quad (2)$$

ここで、 m ：重錘と加振フレームの総質量

k_f ：アイソレーター（柔要素）の剛性

k_s ：試験体（剛要素）の剛性

C_f ：柔要素の減衰で、アイソレーター・加振フレーム・加力梁およびこれらの接続部分の摩擦などによって生じる。

C_s ：剛要素の減衰で、試験体および加力梁を接続するピンの摩擦などによって生じる。

x ：重錘の振動台に対する相対変位

\dot{x} ：重錘の振動台に対する相対速度

\ddot{x} ：重錘の振動台に対する相対加速度

\ddot{z} ：振動台の絶対加速度

式(2)の両辺に微小時間あたりの変位増分 $dx = \dot{x}dt$ を乗じ、継続時間にわたって積分することにより、振動台から実験装置への総エネルギー入力 E が得られる。

$$\int [m\dot{x} + (C_f + C_s)x + (k_f + k_s)x] \dot{x}dt = - \int m\ddot{z} \dot{x}dt = E \quad (3)$$

式(3)を変形すると、実験装置による消費エネルギー E_D が求められる。

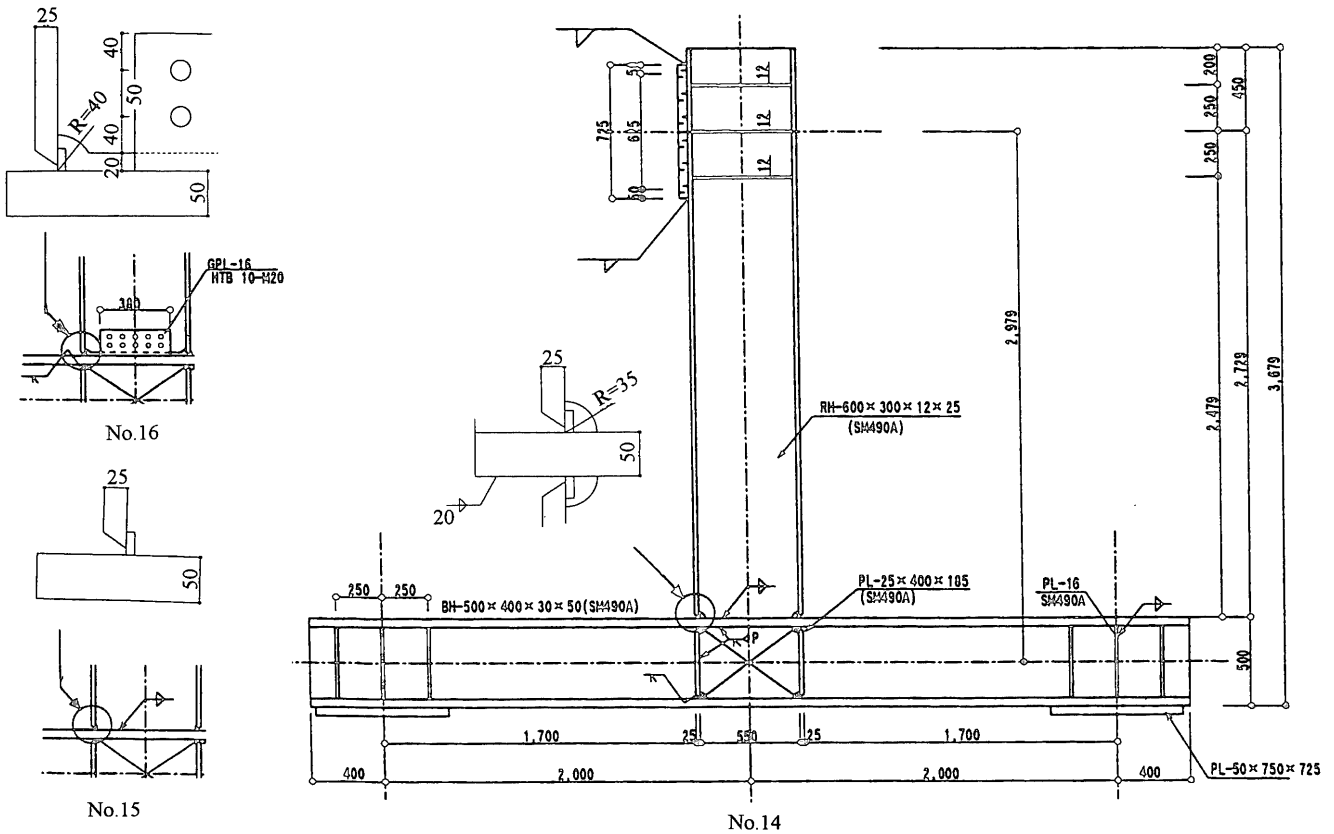
$$\int [(C_f + C_s)\dot{x} + (k_f + k_s)x] \dot{x}dt = - \int m(\ddot{z} + \ddot{x}) \dot{x}dt = E_D \quad (4)$$

式(2)~(4)を構成する各項目を計測し、それぞれ比較することにより、計測記録の妥当性が検証できる。

4. H型断面柱—H型断面梁接合部の実大動的載荷試験

4.1 試験体

試験体形状を図一6に示す。試験体は全部で3体あり、接合部のディテールがパラメーターとなっている。即ち、No. 14試験体は標準的なスカラップを有する溶接接合、No. 15はノンスカラップ方式の溶接接合、No. 16はウェブをボルト接合とした現場溶接タイプの接合となっている。使用鋼材および部材断面は3体共通で、梁に対応している垂直材はRH-600×300×12×25(SM490A)であり、柱に対応している水平材はBH-500×400×30×50(SM490A)である。水平材は垂直材に対して十分に強く、パネル部には補強プレートが



図一6 試験体形状ならびに接合部詳細

溶接されているので、塑性化するのには垂直材のみである。垂直材の素材試験結果を図-7に示す。

4.2 計測点

試験体に関する主要計測点を図-8に示す。試験体頂部における

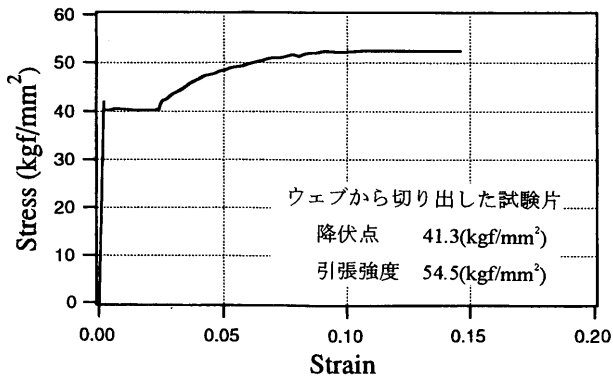
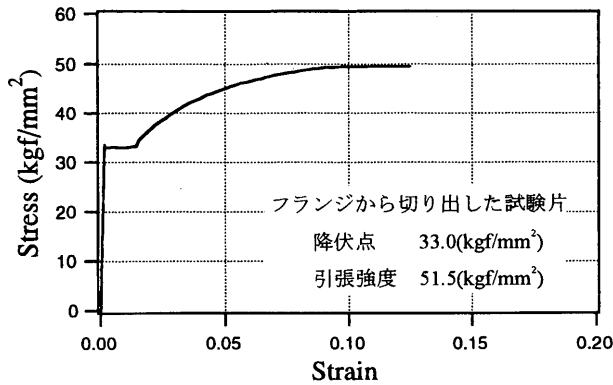


図-7 素材試験結果

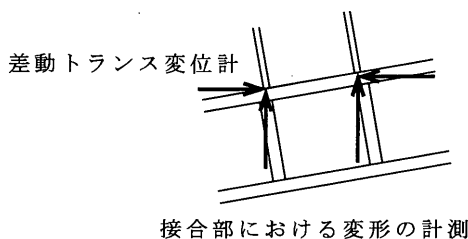
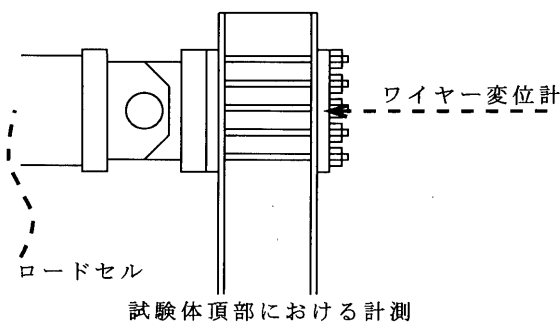


図-8 試験体の主要計測点

変位の計測には、ストロークの大きなワイヤー変位計を用い、材端接合部における水平変位および回転角の計測には、作動トランス変位計を用いた。試験体頂部の水平変位と材端接合部における水平変位および回転角から、垂直材の部材角が算定される。また、試験体に作用する外力については、せん断力については加力梁に貼付した歪みゲージから計測される。なお、サンプリング間隔を1000分の1秒として計測したデータは、ノイズを落とすために5ステップごとの平均値をとり、200分の1秒刻みのデータとして収録した。

4.3 加振手順

入力波には兵庫県南部地震気象庁神戸海洋気象台記録NS成分を用い、加速度倍率を乗じて入力レベルを変化させ、以下の手順で加振を行った。

① パルス加振

パルス波を入力し、試験体を含む実験装置全体を自由振動させ、固有周期、減衰を調べると同時に、各計測器具の動作確認を行う。

② 弾性加振

試験体が塑性化しない程度の入力を行い、弾性範囲での挙動を調べる。この実験シリーズでは入力波の最大速度が10kineとなるように加速度倍率を乗じた波を入力した。

③ 塑性加振

試験体が全塑性状態に達する程度の入力を行う。この実験シリーズでは最大速度が20kineとなるように加速度倍率を乗じた波を入力した。

④ 終局加振

目標とする試験体の終局状態（接合部破断など）を実現するために十分な強さの波を入力する。もし、1回の加振で終局状態に達しない場合には、再度加振を行う。但し、変形量が大きくなり加振装置がストッパーにあたった場合には、その時点で実験を終了する。この実験シリーズでは最大速度が100kineとなるように加速度倍率を乗じた波を入力した。

4.4 実験結果

各試験体の終局加振時における荷重-変形関係を図-9に、各加振で得られた荷重-変形関係をつなぎ合わせてから取り出した骨格曲線を図-10に示す。図中、縦軸は試験体頂部に作用したせん断力であり、横軸は梁に対応する垂直材の部材角である。なお、パルス加振で得られた実験装置の固有周期は、No. 14で0.60秒、No. 15で0.61秒、No. 16で0.60秒といずれも振動台の性能が最大限に発揮される0.6秒程度の固有周期であった。また、減衰はいずれの場合も2%程度と、さほど大きな値ではなかった。

各試験体の終局状態であるが、標準的なスカラップを有するNo. 14では、接合部溶接止端部に延性亀裂の発生が認められたものの、破断には至らず、フランジの局部座屈によって最大耐力が決まり耐力の劣化が生じた。そこで、スカラップを有するNo. 14よりも破断に対して有利なノンスカラップ方式の試験体であるNo. 15でも、同じ結果が得られることが予想できるので、図-11に示すように材端部に座屈止めのリブを溶接して実験を行った。No. 15では、局部座屈は発生しなかったものの、試験体頂部におけるピンとの接合部が面外方向に回転し、横座屈が発生した。これは、試験体とピンとの接

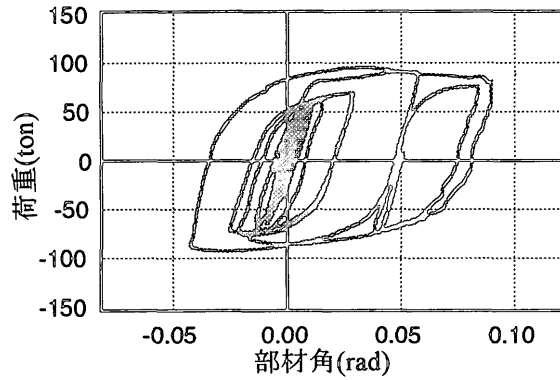


図-9(1) 終局加振時における荷重-変形関係 (No. 14)

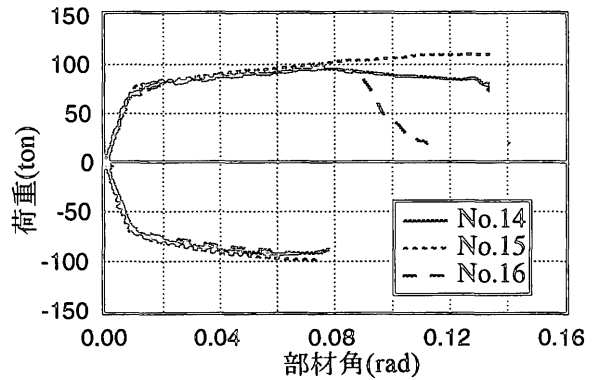


図-10 骨格曲線の比較

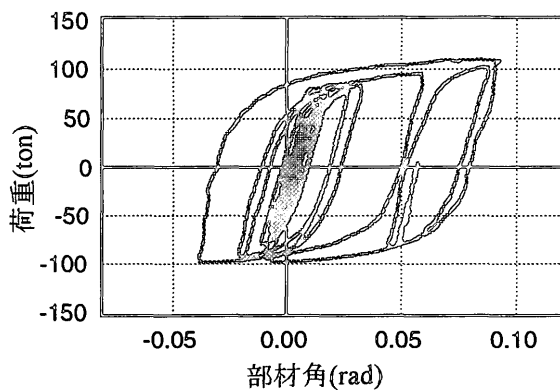


図-9(2) 終局加振時における荷重-変形関係 (No. 15)

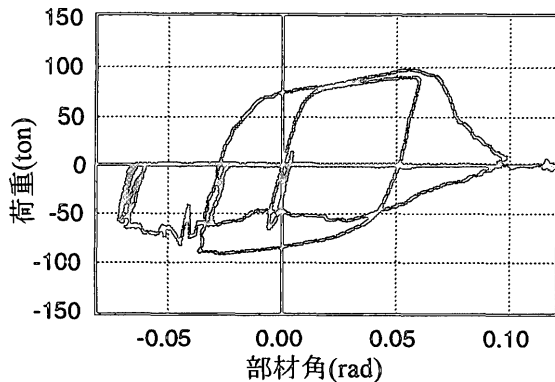
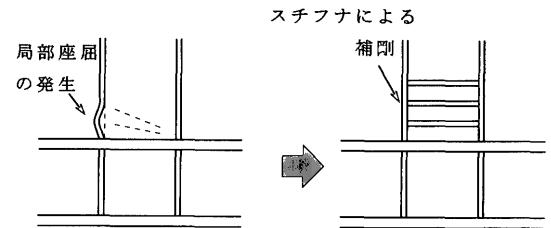
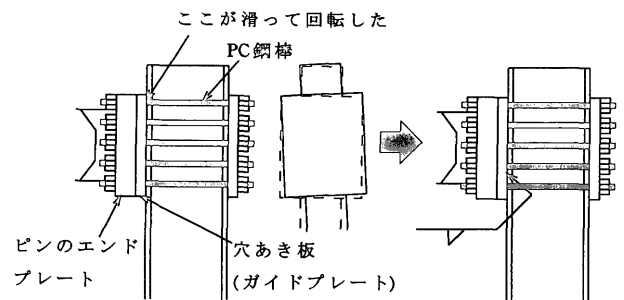


図-9(3) 終局加振時における荷重-変形関係 (No. 16)



(1) 局部座屈の発生とその対策



(2) 横座屈の発生とその対策

図-11 座屈発生防止装置

合を PC 鋼棒による摩擦接合としたが、十分な摩擦抵抗が得られなかったためである。No. 15以降の試験体では、横座屈の防止のために、図-11に示すように試験体と接合用の穴あき板 (ガイドプレート) を溶接して実験を行うようにした。また、No. 15では終局加振終了時まで耐力の劣化は見られなかったが、ピンを痛める可能性があるため実験を終了した。そして、ウェブをボルト接合とした No. 16では、座屈補剛は行わなかったものの、片側のフランジおよびボ

ルトが破断した。フランジの破面は全面延性破面であった。破面から、スカラップ底付近および溶接止端部から延性亀裂が発生し、亀裂が母材中を進展しながら破面を形成したと考察した。

また、局部座屈により終局状態が決まった No. 14の骨格曲線と、フランジの破断によって終局状態が決まった No. 16の骨格曲線を比較すると、No. 16では最大耐力以降のエネルギー吸収はほとんど無いのに対して、No. 14では最大耐力以降耐力の劣化は見られるが、復元力喪失に至るまでにかかなりのエネルギー吸収が期待できることがわかる。

4.5 実験方法の検証

4.5.1 地震動の再現性

No. 14試験体の終局加振時 (最大速度100kine, 最大加速度930gal) において、加振制御系へ制御コマンドとして入力した入力波と、実

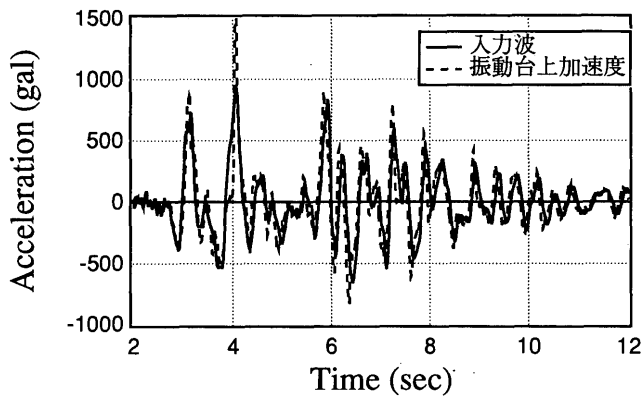


図-12 入力波と台上加速度の比較

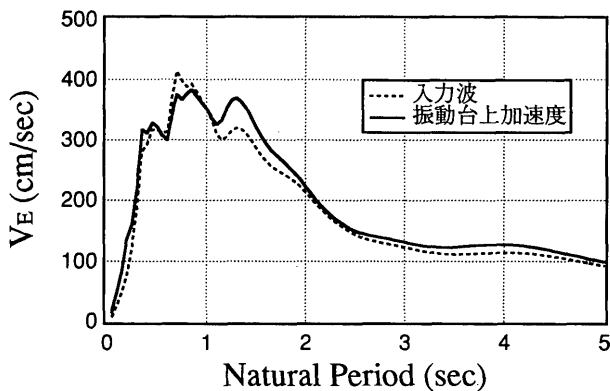


図-13 入力波と台上加速度のエネルギースペクトルの比較

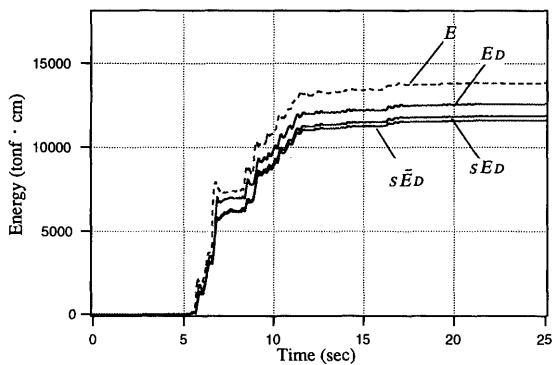


図-14 エネルギーの時刻歴 (No. 14)

際に振動台の上で計測された台上波の時刻歴を比較して図-12に示す。さらに、これらの波のエネルギースペクトル(減衰10%)を図-13に示す。これらの図から、振動台の性能限界である最大速度100 kine, 最大加速度930galの加振を行った場合においても、入力地震波が振動台上で忠実に再現され、計画どおりのエネルギーが実験装置に投入されていることがわかる。

4.5.2 振動系としての実験装置の検証

No. 14の終局加振における振動台による入力エネルギー E と、実

験装置による消費エネルギー E_D を比較し、振動系としての実験装置の検証を行う。振動台による入力エネルギーの算定には式(3)、実験装置による消費エネルギーの算定には式(4)を用いた。両者の時刻歴を図-14に示す。振動台による入力エネルギーと実験装置による消費エネルギーの差は小さく、振動台によって投入されたエネルギーが実験装置に有効に作用していることがわかる。なお、式(3)、(4)を構成する各項には以下の値を代入した。

E および E_D の算定に用いた値

$m=0.225(t \cdot \text{sec}^2/\text{cm})$: 重錘と加振フレームの総質量

\ddot{z} : 振動台上に設置した加速度計による計測値

$\ddot{z} + \ddot{x}$: 加振フレーム上に設置した加速度計による計測値

\dot{x} : 単位時間あたりの加振フレームの水平変位の増分で試験体頂部における変位の計測値から求めた

また同図中には、試験体による履歴吸収エネルギー sE_D と、実験計画上唯一の塑性化部位である垂直材の履歴吸収エネルギー $s\bar{E}_D$ も描かれている。 sE_D , $s\bar{E}_D$ とともに E_D と良い対応を示しており、加振フレーム近傍でのエネルギーロスがほとんど無いこと、試験体におけるエネルギー吸収はほとんど垂直材によって成されたことがわかる。即ち、加振能力を最大限に発揮した振動台による投入エネルギーが、試験体に効率よく投入されていることが図-14から明かとなった。

5. 結論

本論文では、実大の構造要素に対する新しい振動台実験方法について論じた。本実験方法の特長は、世界有数の大型振動台の上にアイソレーターで支持した重錘を設置し、加振することによって重錘に生じた慣性力をもって、実大の構造要素に対して破壊実験を含む動的載荷実験を行うことである。実験装置の重量・剛性は、振動台の性能を最大限に発揮できるように設定されている。

さらに本論文では、提案した実験法を用いて行ったH形断面柱-H形断面梁接合部シリーズの実験結果を用い、本実験法が加振装置の性能を最大限に発揮するものであることを検証した。本論文で報告したH形断面柱-H形断面梁接合部シリーズについては、実験法の確立段階で行った実験であり、当初の目的であった接合部における破壊現象の解明という点では不十分なものであるが、実大部材を用いた破壊実験方法を確立する上で有効なものであった。

本実験法を用いた実大動的載荷試験は、H形断面柱-H形断面梁接合部シリーズの他にも、箱形断面柱-H形断面梁接合部シリーズ・柱脚シリーズ・ダンパーシリーズ等があり、H形断面柱-H形断面梁接合部シリーズで得られた経験を生かし有意義な成果を得ている。一連の実験で得られた研究成果については、次報以降で逐次発表する。

参考文献

- 1) Hagiwara, Y., Akiyama, H., Kokubo, K. and Sawada, Y. : Post-Buckling Behavior During Earthquakes and Seismic Margin of FBR Main Vessels, Int. J. Pres. & Piping 45, pp.259-271, 1991
- 2) 秋山 宏 : 建築物の耐震極限設計第2版, pp.166-167, 東京大学出版会, 1987年

謝辞

本研究は、科学技術庁官民特定共同研究「阪神淡路大震災被害に基づく鋼構造建築物の終局耐震性能に関する研究」により行ったものである。研究推進は下記の委員会組織により行った。

「鋼構造終局耐震性研究推進委員会」

委員：東京大学(秋山 宏(委員長), 桑村 仁, 山田 哲, 高橋 誠), 科学技術庁防災科学技術研究所(小川信行, 箕輪親宏), 科学技術庁金属材料研究所(松岡三郎, 竹内悦男), 東京理科大学(寺本隆幸), 住友金属(加藤征宏, 大竹章夫, 福田浩司), 清水建設(矢部喜堂,

真瀬伸治, 寺田岳彦), 大成建設(小倉桂治, 泉 満, 辻田 修, 成原弘之), 東急建設(木村克次, 公塚正行, 末岡利之, 小駒 勲, 千葉隆史), 三菱建設(田中宏志, 時本和則, 藤原秀雄), 日建設計(北村春幸, 向野聡彦), フジタ(三山剛史), 日本ドライバイト(矢幡秀介, 村谷昌男)

また、本論文で用いた実験結果の整理および図表の作成にあたり、東京大学大学院生松本由香君の協力を得た。

(1997年7月10日原稿受理, 1997年10月7日採用決定)