

慣性加力装置を用いた鋼構造部分架構の 動的破壊実験

秋山 宏¹, 山田 哲², 松本由香³, 小川信行⁴

1 工博 日本大学教授 総合科学研究所 (〒101-8308 千代田区神田駿河台 1-8-14)

2 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)

3 博士(工学) 横浜国立大学助手 工学部建設学科 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

4 工博 科学技術庁 防災科学技術研究所 (〒305-0006 つくば市天王台 3-1)

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 using the internal loading equipment. Thus, inertia force generated in the loading mass supported by isolators is applied to the specimen. The shaking table used in our research 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, full scale and real time dynamic experiment of structural elements is able to carry out.

Key Words: shaking table test, experimental method, full scale test

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。

本論文では、兵庫県南部地震で発生した様々な破壊現象を再現してその原因を解明するための、実大の構造要素に対する新しい振動台実験方法を示す。さらに、提案した実験方法によって行われた一連の実験結果を概説するとともに、今後の展望について述べる。

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製作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、相似則を満足するために入力波を時間軸に対して拡大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。

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1質点振動系とみなすことができる。

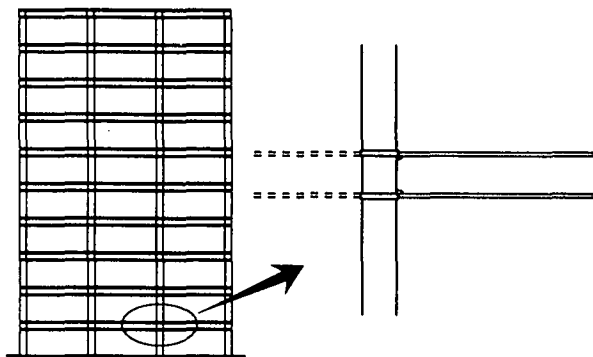
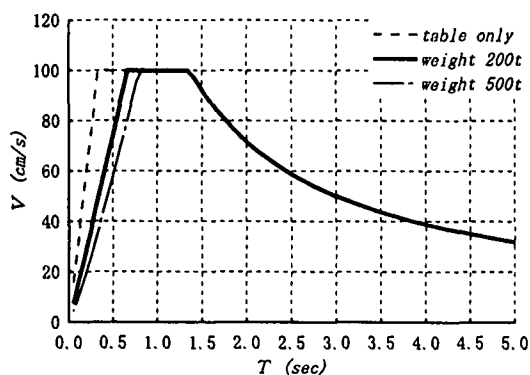
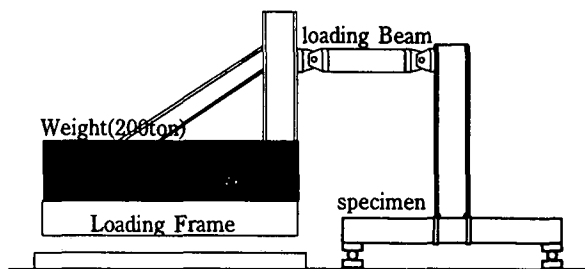


図-1 部分架構の取り出し



(1) 最大速度



(2) 最大加速度

図-3 振動台の限界性能

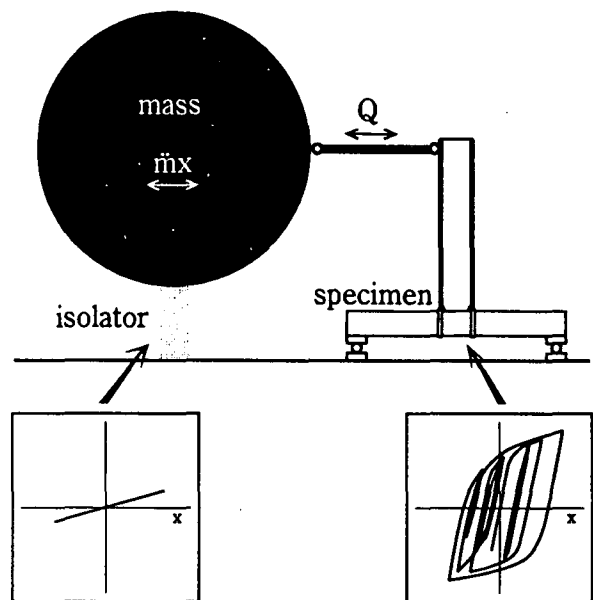


図-2 実験装置の略図および概念

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)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-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-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。

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、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、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ぶれ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、試験体の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、建屋免震用積層ゴム製品カタログより設計荷重 50ton で、設計荷重積載時の固有周期が 2 秒となるものを選択した。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。

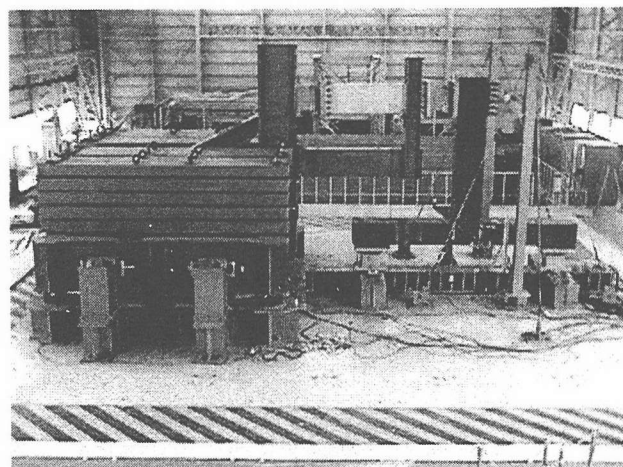


写真-1 実験装置

4. これまでに得られた主な研究成果

4.1 接合部ディテールをパラメーターとした箱形断面柱-H形断面梁接合部の破壊実験

梁ウェブのモーメント負担、スカラップ形状、及び梁の板厚をパラメータとした箱形断面柱-H形断面梁接合部試験体の動的破壊実験を行った。試験体概形を図-4に、接合部のディテールを図-5に示す。試験体(梁)に使用した鋼材は、十分にじん性の高いもの(シャルピー値が0℃で200J以上、遷移温度が-50℃程度)である。このシリーズの実験では、以下の結論を得た。

(1)試験体の破壊状況は、全断面が延性破面になったものと、一部に脆性破面が認められたものがあった。しかし、いずれの試験体も十分な強度と変形能力を発揮した後に破壊しており、その部材性能は母材金属の延性的な破壊条件に支配されたと考えられる。

(2)荷重速度は試験体頂部で約160kineであり、梁端部における最大歪速度は50～90%/secであった。この条件下においても、試験体は高い耐力と変形能力を示した後に破壊しており、実大部材を高速荷重したことによる変形能力の低減効果は現れなかったと予想される。

(3)材料の靱性が高い場合は形状不連続に対する感受性が低く、従来型スカラップと改良型スカラップの相違が部材の耐震性能に及ぼす影響は小さい。また、材料の靱性が高い場合はフランジ板厚が厚い場合でも延性破壊し、履歴吸収エネルギーの低減には至らない。

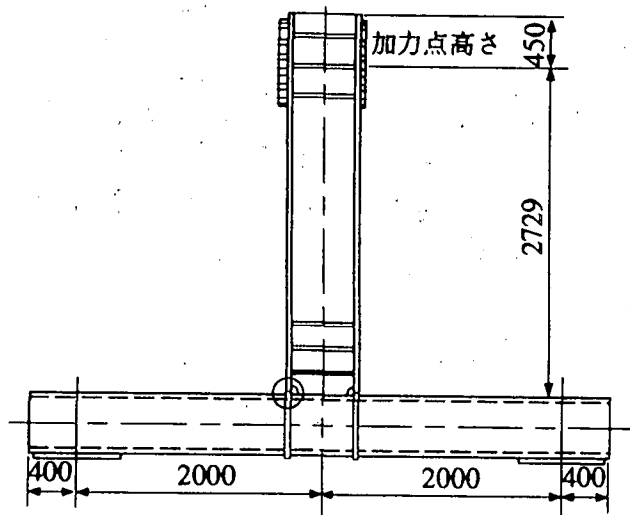


図-4 試験体概形

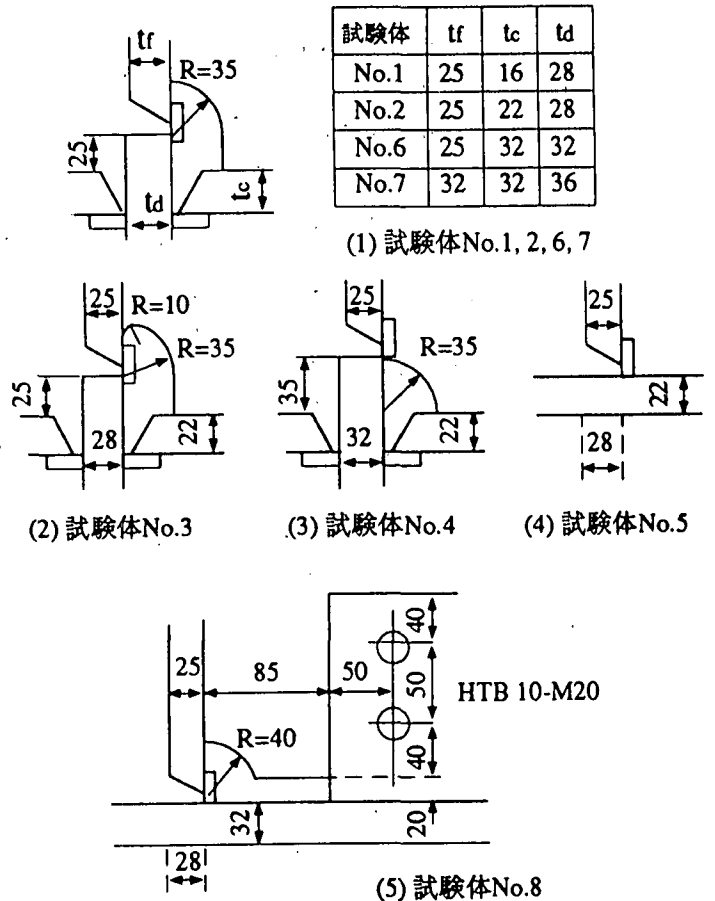


図-5 接合部詳細

4.2 実験温度(材質)をパラメーターとした箱形断面柱-H形断面梁接合部の破壊実験

鋼材が十分な靱性を有すれば、接合部のディテールによらず高い塑性変形能力を有することが明らかになったことから、材質をパラメーターとした箱形断面柱-H形断面梁接合部の動的破壊実験を行った。試験体は接合部ディテールをパラメーターとしたシリーズで用いたものとほぼ同じ形状で、従来型の接合部(スカラップ有り)を有する。実験では、図-6に示すように冷却箱の中に試験体を設置し液体窒素で冷却することで、実験温度をシャルピー試験で得られた遷移温度を中心とする範囲で変化させて、材質の変化に対応させた。使用鋼材(梁)は、特別に遷移温度が高くなるように作った鋼材(SM490相当)である。使用鋼材のシャルピー試験結果を図-7に示す。実験温度(材質)をパラメーターとしたシリーズの実験では、以下の結論を得た。

(1)試験温度が-20℃以上(シャルピー値70J以上、脆性破面率75%以下)の場合は、高い変形能力と耐力上昇を示した後に、フランジ全面に延性破面が形成された。これに対し、試験温度が-30℃以下の場合には脆性破壊が生じた。この場合、最大耐力は理論値を下回り、変形能力は急激に低下した。

(2)梁端部における歪速度は 65%/sec に達した。このとき、加振開始時にある程度の塑性変形能力を有する試験体においては、塑性化に伴う温度上昇により塑性変形能力が高められたと考えられる。-30℃以下の実験では、顕著な温度上昇が生じる前に破壊したため、-20℃以上で行った実験との間に大きな違いが見られた。

(3)破壊性状および部材性能の遷移が生じた温度条件と、既往の柱梁接合部の破壊実験結果の傾向との対応は良好である。

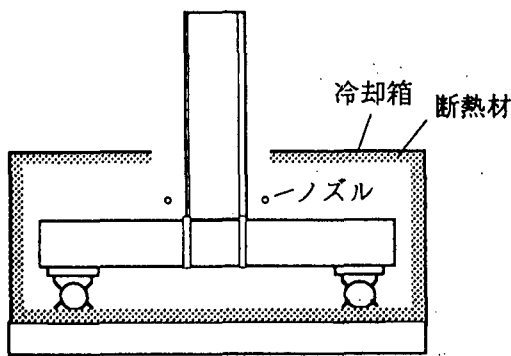


図-6 冷却箱セット

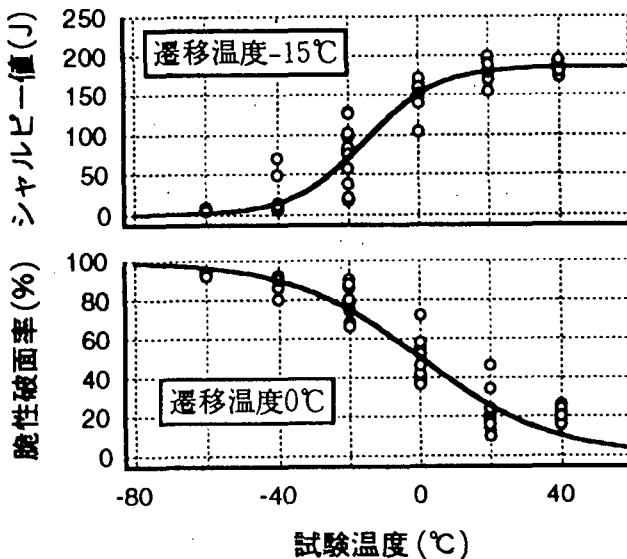


図-7 フランジ母材のシャルピー試験結果

4.3 冷間成形角形鋼管柱の動的破壊挙動

鋼構造建築物の柱部材として多用されている冷間成形角形鋼管部材について、幅 500mm 板厚 22mm (幅厚比 22.7) という大型の断面を有する試験体に対して動的破壊実験を行った。試験体は、同一の形状を有する冷間ロール成形部材と冷間プレス成形部材

の2体である。

実験では、冷間ロール成形部材を用いた試験体は局部座屈により終局挙動が支配され、冷間プレス成形部材を用いた試験体は材端溶接部角部から発生した脆性破壊により終局挙動が支配された。製造方法の異なる試験体で異なる終局挙動を示した理由としては、全断面に塑性加工の影響を受ける冷間ロール成形部材では、平板部に塑性加工の影響を受けない冷間プレス成形部材に比べ局部座屈に対する変形能力が小さかったこと、冷間プレス成形部材では、非常に靱性の高い鋼材を用いているにもかかわらず局部的に塑性加工の影響を受ける角部において本来鋼材が有していた靱性をほとんど失い著しく脆化していたことが挙げられる。この実験では実験装置が1質点系であったために、多層骨組の柱材の場合に問題となる劣化部材への損傷集中現象が発生せず、限定された変位振幅で何度も加振できたことや、試験体に圧縮軸力が作用していないので、局部座屈によって終局挙動が支配される場合において最大耐力以降の耐力劣化が緩やかであることもあり、局部座屈により最大耐力が支配された冷間ロール成形部材の方が、脆性破壊が先行した冷間プレス成形部材に比べて、復元力喪失までのエネルギー吸収能力はかなり高いものとなった。

5. 今後の展望

これまでに行ってきた一連の実験結果から、鋼材の靱性能と部材レベルにおける変形能力の関係を結びつける研究成果が得られた。しかしながら、部材レベルにおける破壊起点は複雑な応力状態下にあることから、応力状態が明解な要素レベルにおける実験を行い、破壊条件を明確にする必要がある。また、最終的には研究成果を骨組レベルでの耐震性評価に結びつける必要もある。そこで、中・低層の鋼構造建築をターゲットに、梁端などの応力集中箇所が発生する破壊現象を、①材料レベルでの靱性能評価・要素レベルでの破壊性能評価・②骨組レベルでの耐震性能評価をリンクさせた形で研究を進める。

6. 結び

兵庫県南部地震において、建築構造物が曝された負荷状態を忠実に再現し、構造要素の動的破壊性能を解明することを目指し、実大の構造要素に対する

新しい振動台実験方法を開発した。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。

また本稿では、開発した実験法によって行われた一連の実験で得られた研究成果について概説するとともに、今後の展望を示した。なお、これまでに行われた一連の研究で得られた研究成果の詳細については、日本建築学会構造系論文集において発表しているの、それらの文献^{1)~5)}を参照していただきたい。

参考文献

- 1)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 [505] 139-146 (1998)
- 2)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 [512] 165-172 (1998)
- 3)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 [514] 195-192 (1998)
- 4)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 [521] 133-140 (1999)
- 5)秋山 宏, 山田 哲, 松本由香, 松岡三郎, 大竹章夫, 杉本浩一: 実大柱梁接合部の試験温度による延性破壊-脆性破壊遷移; 日本建築学会構造系論文集 [522] 105-122 (1999)