

実大鉄骨柱梁接合部部分架構の弾塑性挙動

寺田岳彦

(技術研究所)

矢部喜堂

(技術研究所)

真瀬伸治

(技術研究所)

§ 1. はじめに

1995年1月17日に起きた兵庫県南部地震では、多数の鉄骨造建物の梁端接合部に破断が生じた(例えば1)~3)。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防ぐためにも重要なことである。

兵庫県南部地震以後、この地震における鉄骨造建物の被害原因を明らかにするために、複数の機関で実験的および解析的な研究が精力的に進められ、その成果も徐々に発表されている(例えば4)~6)。

本報ではまず、兵庫県南部地震の被害原因の解明を主目的に行われた実大の柱梁接合部部分架構を用いた振動台実験⁷⁾の結果を紹介する。次に、振動台実験の結果と振動台実験に用いた試験体と同一形状・同一材料の試験体に対して行った静的な載荷実験の結果とを比較し、動的荷重および静的荷重下における柱梁接合部部分架構の弾塑性挙動を比較する。

なお、本報で紹介する振動台実験は、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に関する研究」の一環として行われたものの一部である。当該研究は「鋼構造建築物の終局耐震性研究委員会(委員長:秋山宏東京大学教授)」が組織されて実施されたものであり、その構成メンバーは以下の通りである。

東京大学秋山研究室

科学技術庁防災科学技術研究所、

清水建設(株)、住友金属工業(株)、大成建設(株)、

東急建設(株)、(株)日建設計、

日本ドライブイット(株)、(株)フジタ、

三菱建設(株)

§ 2. 振動台実験概要⁷⁾

本実験は、実大の柱梁接合部部分架構に対し実際に兵庫県南部地震において記録された地震動を用いた振動台実験を行うことにより、兵庫県南部地震で生じた梁端接合部の破壊の再現を行い、その発生原

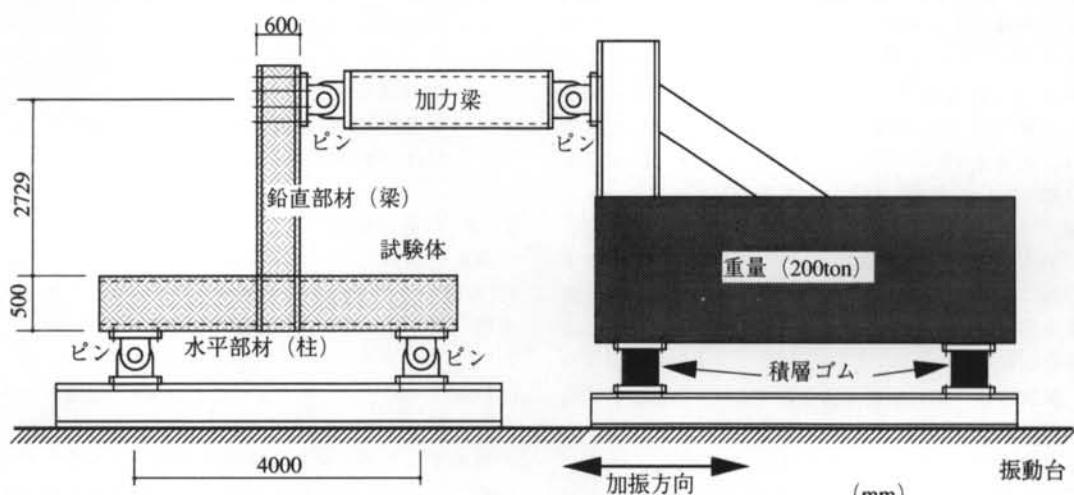


図-1 試験装置および試験体

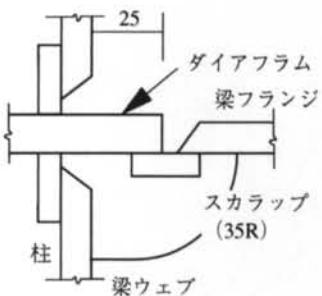


図-2 梁端接合部スカラップ詳細

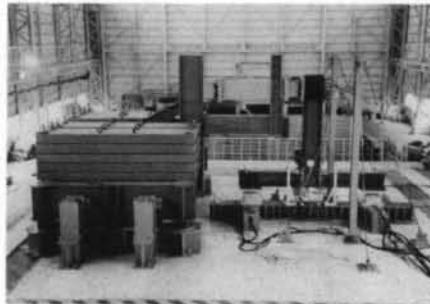


写真-1 振動台上への設置状況

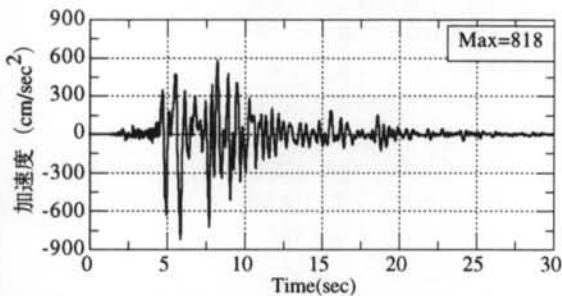


図-3 入力地震動の加速度時刻歴波形

因の解明に資することを主目的としている。本章では、この振動台実験の概要を紹介する。

2.1 実験計画

2.1.1 試験体

表-1に本報で紹介する振動台実験に用いた試験体の一覧を、図-1に試験装置および試験体の概要を、写真-1に振動台上への設置状況を示す。試験体は、いずれも冷間成形の角形鋼管柱にH形鋼の梁が取りつく接合部を含む部分架構であり、柱を水平に、梁を鉛直に設置している。兵庫県南部地震では、梁端接合部の破壊の多くが角形鋼管柱-H鋼梁接合部において発生したことが報告されている³⁾。本実験では、このような接合部に着目し試験体を設定している。なおこの実験では、本報で紹介する試験体の他に柱にH形鋼を用いた試験体、鉛直部材に角形鋼管を用いた試験体等が用いられているが、本報では言及しない。

試験体のパラメータは水平部材(柱)の板厚および鉛直部材(梁)の寸法である。鋼管柱の板厚を変化させることで梁ウェブの応力の伝達効率を変化させていく。各試験体とも接合部の補剛形式は通しダイアフラム形式であり、ダイアフラムの板厚は梁フランジ

試験体	水平部材(柱)	鉛直部材(梁)
No.1	□-500×16	
No.2	□-500×22	H-600×300×12×25
No.5	□-500×32	
No.7		H-600×300×16×32

表-1 試験体一覧

- ・加振方向 : 水平1軸
- ・振動台寸法 : 15.0 m × 14.5 m
- ・最大搭載重量 : 500ton
- ・最大振幅 : ±220 mm
- ・最大速度 : 100 cm/sec

表-2 振動台の主要性能

厚および柱の板厚に応じて変化させている。図-2に梁端のスカラップの詳細を示す。

全ての試験体とともに梁にはS M 4 9 0 A、柱にはSTKR490を用いた。試験体の製作は工場内において行い、梁端接合部の溶接方法は炭酸ガスシールドアーク半自動溶接、溶接姿勢は全て下向きである。また、溶接の始終端には鋼製のエンドタブを用いている。

2.1.2 振動台概要

振動台実験には、科学技術庁防災科学技術研究所(茨城県つくば市)にある電気油圧サーボ式大型振動台を用いている。振動台の主要性能を表-2に示す。

2.1.3 加振方法

試験は、図-1に示すように200tonの重量を免震構造物用の積層ゴム(アイソレイター)に載せ、振動台が振動することで生じる慣性力を加力梁を介して振動台上に固定した試験体の梁先端に加えるものである。なお、積層ゴムの水平剛性は2.01tf/cmである。

200tonの重量と積層ゴムのみの系の固有周期は2secである。

振動台への入力地震動は、パルス加振以外は兵庫県南部地震で記録された神戸海洋気象台南北方向の記録を用いている。ただし、試験体や加振ステップに応じて入力レベルを調節した。図-3に入力地震動の原波の加速度時刻歴を示す。

加振は、以下に示すStepで行っている。

Step1：パルス加振

パルス波を入力し振動系を自由加振させることにより、初期状態での固有周期、減衰を把握する。

Step2：弾性加振

各部材が塑性化しない程度の地震動を入力し、彈性領域での挙動を把握する。目標最大速度：10cm/sec。

Step3：弾塑性加振

試験体が全塑性状態に達する程度の地震動を入力する。目標最大速度：20cm/sec。

Step4：終局加振

試験体を破壊に至らしめるのに十分な強度レベルの地震波を入力する。ただし、1回の加振で試験体が破壊しない場合には、複数回の加振を行い試験体を破壊させる。目標最大速度：100cm/sec。

2.1.4 測定計画

測定項目は、振動台上および重量に生じる加速度、試験体の梁に作用するせん断力、試験体の各部の変形およびひずみなどである。試験体の梁に作用するせん断力は、図-1に示す試験装置の加力梁にひずみゲージを貼付し、加力梁の軸ひずみを測定することで試験体に作用する梁せん断力に換算した。収録は各センサーからのアナログ信号を動ひずみアンプおよびA/Dコンバーターを介してデータ収録用のワークステーションに取り込んだ。

2.2 使用素材の機械的性質

表-3に各試験体に使用した素材の機械的性質を示す。なお、試験体No.1, 2および6に使用した梁材のシャルピー吸収エネルギーは188J(試験温度：0°C)であった。

2.3 振動台実験結果

本節では、前節で述べた振動台実験の結果の概要を紹介する。

2.3.1 固有周期および減衰

各試験体のパルス加振の結果から求めた全体系の

試験片	σ_y (tf/cm ²)	σ_B (tf/cm ²)	使用部材	鋼種
PL25	3.30	5.15	No.1,2,6梁	SM490A
PL32	3.16	5.09	No.7梁	SM490A
PL16	5.01	5.69	No.1柱	STKR490
PL22	4.98	5.59	No.2柱	STKR490
PL32	4.05	5.51	No.6,7柱	STKR490

表-3 使用素材の機械的性質

試験体	固有周期 T_1 (sec)	減衰定数 h (%)	k_s (tf/cm)
No.1	0.66	1.7	16.5
No.2	0.64	2.0	17.7
No.6	0.61	2.3	19.6
No.7	0.54	2.1	25.6

k_s ：試験体の水平剛性

表-4 各試験体の固有周期、減衰定数および水平剛性

固有周期 T_1 および減衰定数 h を表-4に示す。なお、 T_1 および h には積層ゴムの剛性および減衰の影響も含まれている。

固有周期 T_1 は0.54から0.66sec、減衰定数 h は1.7から2.2%の範囲にあることが分かる。 T_1 から全体系の剛性を計算し、積層ゴムの水平剛性を考慮して求めた試験体のみの水平剛性 k_s を表-4に示す。

試験体によって差があるが、 k_s は16.5～25.6tf/cmの範囲にあり、試験体の水平剛性は積層ゴムの水平剛性($=2.01\text{tf}/\text{cm}$)を大きく上回っていることが分かる。すなわち、全体系の剛性に対しては試験体の水平剛性が大きく寄与していると言える。

2.3.2 梁せん断力-変形関係および破壊形式

図-4に各試験体の終局加振時の梁せん断力-変形関係を示す。なお、複数回の終局加振を行った試験体については、その最終加振時のせん断力-変形関係を示す。以下に各試験体の破壊状況を述べる。なお、図-4には、各試験体の破壊した点を示す。

1) 試験体No.1

終局加振(最大速度：100cm/sec)1回目で破壊した。梁の片側フランジおよびウェブの約半分が母材破断した。フランジの破面に占める脆性破面率は約55%であり、シェブロンパターンが観察され、脆性破壊の特徴が表われた。き裂の起点はスカラップ底である。

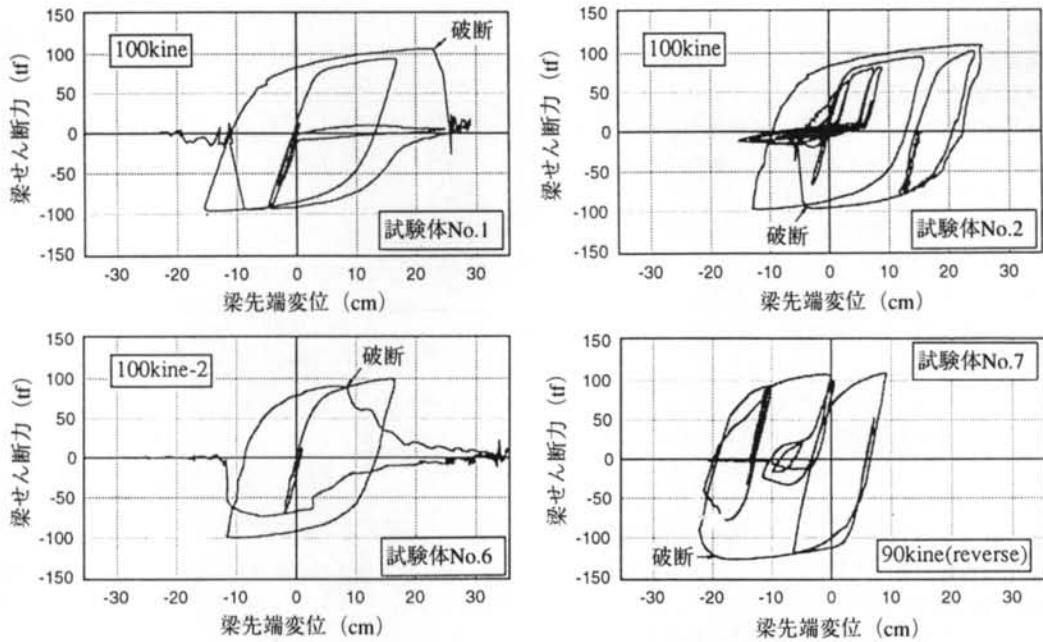


図-4 各試験体の終局加振時の梁せん断力-変形関係

2) 試験体No.2

終局加振(最大速度: 100cm/sec)1回目で破壊した。梁の片側フランジおよびウェブの約半分が破断した。フランジの破面の一部に脆性破面が観察され、脆性破面率は約12%であった。き裂の起点は、試験体No.1と同様にスカラップ底であった。

3) 試験体No.6

終局加振(最大速度: 100cm/sec)2回目で破壊した。梁の片側フランジおよびウェブが破断した。破面は全て延性破面であった。き裂の起点はスカラップ底および梁フランジ両端の溶接止端部であった。

4) 試験体No.7

終局加振(最大速度100cm/sec)1回目に振動台の制御系に異常が発生し振動台が緊急停止した。この時点で試験体の梁先端に15cm程度の残留変位が発生したため、残留変位を除去する目的で最大速度を40cm/secに設定した逆位相の加振を行った。その後、最大速度を90cm/secに設定した終局加振を行い、試験体を破壊に至らしめた。破壊形式は、片側フランジおよびウェブの延性破断であり、き裂の起点は、スカラップ底および梁フランジ両端の溶接止端部であった。

試験体No.1, 2および6は、同一寸法の梁を用い梁端にはいずれも従来型のスカラップが設けられている。これらの試験体は柱の板厚が異なるため梁ウェブの応力の伝達効率のみが異なっている。すなわち、柱の板厚が最も薄い試験体No.1が最も伝達効率が低く、柱が最も厚い試験体No.6が最も伝達効率が高くなっている。前述した破壊形式においては、試験体No.1が脆的に破壊し、試験体No.6は延性破壊を示していた。この結果から、本実験の範囲内では、梁ウェブの応力の伝達効率が低いほど、破壊形式は延性的から脆性になる傾向にあることが伺える。

2.3.3 降伏荷重および最大耐力

実験結果から求めた各試験体の降伏荷重および最大耐力を表-5に示す。降伏荷重は荷重-変形関係にGeneral Yield Point法を適用して求めた。

No.1, 2および6は、梁の寸法が等しく柱の板厚のみが異なっている試験体である。表-5では、降伏荷重および最大耐力ともに試験体No.1が最も低く、柱の板厚が厚くなるにつれ荷重が高くなる傾向にある。柱の板厚の違いによる梁ウェブの応力の伝達効率の違いによって耐力に差が表われている可能性が考

えられる。ただし、本実験の範囲内では、最も柱の板厚の小さい試験体No.1の降伏荷重および最大耐力に対し、最も柱の板厚の厚い試験体No.6の降伏荷重および最大耐力は高々6%程度の上昇となっている。

また、試験体No.1は脆的な破壊を示した。これに対し試験体No.6は、フランジ破面の100%が延性破面であった。前述したように両者の最大耐力の違いは約6%であり、破壊形式の違いによる最大耐力の変動は小さいと言える。このことにより、本実験では、梁端の破壊形式が延性破壊であっても梁端の応力度はほぼ材料の引張応力度に達していたものと考えられる。

2.3.4 累積塑性ひずみエネルギーおよび累積塑性変形倍率

各試験体の破壊までの累積塑性ひずみエネルギー W_p および累積塑性変形倍率 η を求め表-5に示す。なお、 W_p と η の関係は、下式の通りである。

$$\eta = \frac{W_p}{Q_y \cdot \delta_y} \quad (1)$$

ここに、 Q_y ：降伏荷重の実験値(表-5参照),

δ_y ： Q_y に相当する弾性変形

W_p および η とともにスケルトン部とハウシンガー部に分け、さらに正側と負側に分けて示す。

表-5から、スケルトン部の $s\eta$ に関しては各試験体ごとの差は小さいことが分かる。試験体No.1, 2および6による梁ウェーブの伝達効率の違いの影響は見られない。また、試験体No.1は脆的な破壊を示しているが、表-5に示すスケルトン部の $s\eta$ は延性破壊である試験体とはほぼ同じ値であり、破壊形式の違い

が $s\eta$ に及ぼす影響は認められない。

ただし、ハウシンガー部のエネルギー吸収も含めた合計の η に関しては、柱の板厚のみが異なる試験体No.1, 2および6では、柱の板厚を厚くして梁ウェーブの伝達効率を高くするほど合計の η が大きくなっていることが分かる。

§3. 静的載荷実験

本章では振動台実験に用いた試験体と同一形状・寸法の試験体に対して静的な載荷実験を行い、動的および静的荷重下における挙動の違いを把握する。

3.1 静的載荷実験概要

静的載荷は、振動台実験で用いた試験体No.7と同一形状・同一寸法の試験体2体に対し行った。パラメータは載荷履歴である。表-6に静的載荷実験の試験体を示す。なお、試験体No.7S-1の載荷履歴は、試験体No.7の一連の加振において、梁端が塑性領域に入ったサイクルの全ての変位履歴を忠実に再現した。また、試験体No.7S-2の載荷履歴は図-5に示す通りであり、初めに1サイクルの弾性範囲内の正負の繰り返しの後に $\pm 2\delta p \rightarrow \pm 4\delta p \rightarrow \pm 6\delta p \rightarrow \pm 8\delta p \rightarrow \pm 10\delta p$ の変位振幅で各2サイクルごとの増減交番載荷を行った。なお、 δp は試験体の全塑性耐力(計算値)に相当する弾性変形であり、 $\delta p=1.83\text{cm}$ (部材角:0.0067rad.)である。

加力は、振動台実験で用いた治具(ピン)を使って試験体を反力床に固定し、油圧ジャッキにより変位制

試験体	Q_y^* (tf)	Q_{max}^* (tf)	累積塑性ひずみエネルギー (tf-cm)				累積塑性変形倍率					
			スケルトン部		ハウシンガーパー		合計	スケルトン部		ハウシンガーパー		合計
			sW_p^+	sW_p^-	bW_p^+	bW_p^-		W_p	$s\eta^+$	$s\eta^-$	$b\eta^+$	
No.1	71.0	106.3	2935	2096	1521	526	7078	18.4	13.1	9.5	3.3	44.3
No.2	74.1	109.4	3243	1857	1827	2810	9737	19.1	10.9	10.7	16.5	57.3
No.6	75.3	112.3	3352	2224	5666	6374	17616	19.7	13.1	33.3	37.4	103.5
No.7	92.5	134.4	3618	3589	3233	5762	16202	17.5	17.3	15.6	27.8	78.2
No.7S-1	87.9	137.6	3650	3514	8211	4659	20034	17.7	17.0	39.7	22.5	96.9
No.7S-2	84.4	135.3	3213	2708	8544	9849	24314	15.5	13.1	41.3	47.6	117.5

) Q_y^ : 降伏荷重 (General Yield Point法による)

Q_{max}^* : 最大耐力

表-5 実験結果一覧

御で梁先端にせん断力を与えた。

なお、静的載荷実験に用いた試験体は、振動台実験に用いた試験体と同一時期に同一工場で製作されたものであり、同じ材料を用いている。

3.2 静的載荷実験結果

3.2.1 梁せん断力-変形関係および破壊形式

図-6に各試験体の梁せん断力-変形関係を示す。なお、振動台実験に用いた試験体No.7の結果も併せて示す。各試験体の破壊性状は以下の通りである。

1) 試験体No.7S-1

振動台実験で梁端の延性破断が生じた時点(負載荷時、変位約-20cm)では梁端には破断は生じなかつた。ただし、スカラップ底には微小な延性き裂が生じていた。荷重方向を反転させて載荷を続け、変位が+20cmを超えた段階で梁フランジに局部座屈が発生しわざかに耐力が低下した。さらに荷重を反転させて負載荷側に加力し、変位+7cmで梁フランジが脆的に破断した。き裂の起点はスカラップ底および梁フランジ端部の溶接止端部であった。フランジ破面に占める脆性破面率は約85%であった。

2) 試験体No.7S-2

第10サイクルの負載荷時-8δpあたりで梁フランジが脆的に破断した。き裂の起点は梁フランジ端部の溶接止端部であり、フランジ破面に占める脆性破面率は約90%であった。

図-7に各試験体のスケルトン曲線を示す。

正載荷時および負載荷時ともに試験体No.7(振動台実験)と静的載荷実験(No.7S-1, No.7S-2)にはほとんど差がないことが分かる。

各試験体の降伏荷重Qyおよび最大耐力Qmaxを実験結果から求め、表-5に示す。Qyは、振動台実験と同様、General Yield Point法によって求めた。

表-5から、静的載荷実験を行った試験体の降伏荷重は振動台実験を行った試験体よりもわざかに低いのに対し、最大耐力は逆に静的載荷実験の試験体がわざかに高くなっている。しかし、降伏荷重および最大耐力ともに試験体ごとの差は小さく、本実験の範囲内では、動的および静的荷重が及ぼす降伏荷重および最大耐力への影響は明確には表われてはいない。

3.2.2 累積塑性ひずみエネルギーおよび累積塑性変形倍率

振動台実験と同様に各試験体の破壊までの累積塑性ひずみエネルギーWpおよび累積塑性変形倍率γを

試験体	載荷パターン
No.7S-1	振動実験と同じ変位履歴
No.7S-2	漸増交番載荷(図-5参照)

表-6 静的載荷実験試験体一覧

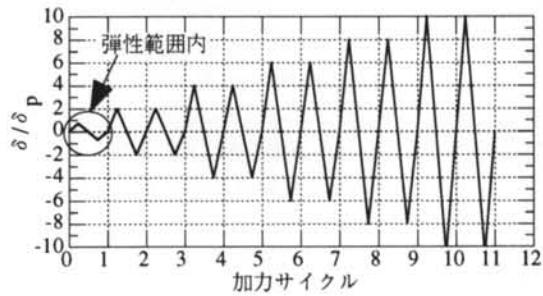


図-5 試験体No.7S-2 加力パターン

求め表-5に示す。Wpとγの関係は(1)式に示す通りである。

振動台実験を行った試験体No.7と振動台実験で得られた変位履歴を強制変位として作用させた試験体No.7S-1では、スケルトン部のγはほとんど変わらない。載荷履歴を同一とした場合には、破壊するまでのスケルトン部のエネルギー吸収能力には、動的および静的荷重下での違いはないと考えられる。ただし、ハウシング部でのBγは、振動台実験よりも静的載荷実験のほうが大きくなっている。これは、静的載荷実験では、振動台実験で破壊が生じた段階でも破壊が生じず、加力を続けたためであると考えられる。

これに対し、漸増載荷を行った試験体No.7S-2のスケルトン部でのγは他の2体に比べ小さく、かつ、ハウシング部でのBγは他の2体よりも大きくなっている。その結果、この試験体の合計のγが最も大きくなっている。すなわち、本実験の範囲内では、漸増載荷の場合は地震応答時よりもスケルトン部でのエネルギー吸収が低下し、逆にハウシング部でのエネルギー吸収が多くなっていると言える。

これらの結果から、試験体の破壊までのエネルギー吸収能力に対しては、静的載荷および動的載荷の影響は少なく、むしろ載荷履歴の違いが大きいと考えられる。動的および静的な荷重が破壊までのエネルギー吸収能力に及ぼす影響が小さいことは、柱梁接合部の動的荷重下における力学性状を検証した実験⁸⁾の結果と一致するものである。

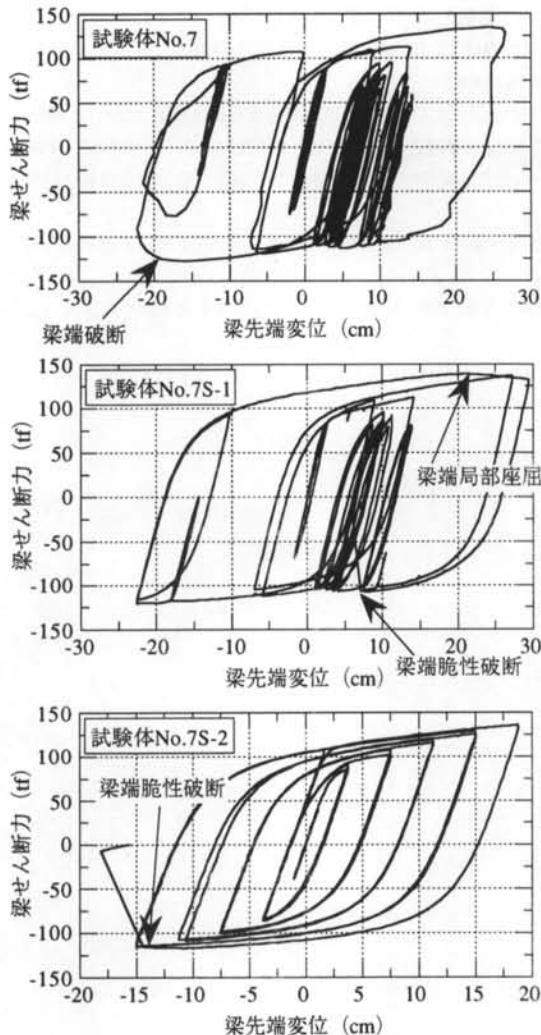


図-6 梁せん断力-変形関係の比較

§4. まとめ

本報ではまず、兵庫県南部地震において見られた鉄骨造建物の梁端接合部の破壊の再現を主目的に行われた実大の柱梁接合部部分架構を用いた大型振動台による振動台実験の概要を紹介した。その結果は、以下のようにまとめられる。

- 1) 兵庫県南部地震で見られた鉄骨造梁端接合部の脆性破壊の再現が可能であった。
- 2) 梁ウェブの応力の伝達効率が低いほど、破壊形式は延性的から脆性的になった。

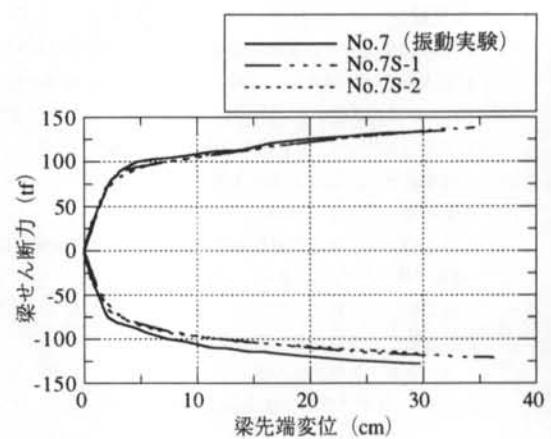


図-7 スケルトン曲線の比較

3) 梁ウェブの応力の伝達効率は、破壊までのスケルトン部の累積塑性変形倍率 γ に対して影響を及ぼさない。しかし、ハウシング部の γ に対しては影響を及ぼし、梁ウェブの応力の伝達効率が高いほどハウシング部の γ は大きく、さらに合計の γ も大きくなつた。

本論文ではさらに振動台実験で用いた試験体と同一形状・寸法の試験体に対して静的載荷実験を行つた。その結果、以下の結論が得られた。

- 4) 梁端の破壊形式は、振動台実験では延性破壊を示したが、静的載荷実験では脆性破壊を示した。
- 5) 振動台実験と静的載荷実験では、降伏荷重、最大耐力およびスケルトン曲線ともにほとんど差がなかった。
- 6) 変位履歴を同一とした場合には、動的荷重下および静的荷重下では破壊までのスケルトン部の γ には差がなかった。
- 7) 破壊までのエネルギー吸収能力には動的荷重および静的荷重の影響は少なく、むしろ変位履歴の影響が大きかった。

謝辞 本報作成にあたり、振動台実験のデータは「鋼構造建築物の終局耐震性研究委員会(委員長:秋山宏東京大学教授)」に提供して頂きました。

また、静的載荷実験は清水建設(株)と住友金属工業(株)との共同実験として行われたものである。

振動台実験ならびに静的載荷実験の関係各位に深甚なる謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 日本建築学会近畿支部鉄骨構造部会：“1995年兵庫県南部地震鉄骨造建物被害調査報告書”，1995.5
- 2) 清水建設技術研究所：“1995年兵庫県南部地震調査報告書”，1995.2
- 3) 日本鋼構造協会テクニカルレポート：“鋼構造の柱梁接合部の設計・施工－兵庫県南部地震の被害を踏えて－”，1996.12
- 4) 日本溶接協会：“建築鉄骨の地震被害と鋼材セミナー（第12回溶接構造用鋼材に関する研究発表会）テキスト”，1997.6
- 5) 日本建築学会近畿支部鉄骨構造部会：“通しダイフラム形式で角形鋼管柱に接合されるH形鋼梁の塑性変形能力に関する実大実験 報告書”，1997.7
- 6) 日本建築学会構造委員会 鋼構造運営委員会：“鋼構造柱梁接合部の耐震要求性能と実挙動”，1997年度日本建築学会大会（関東）構造部門 P.D. 資料，1997.9
- 7) 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報告集 第505号，1998.3
- 8) 寺田岳彦，矢部喜堂，真瀬伸治，坂本真一，宇野寿郎：“動的荷重下における鉄骨柱梁接合部の力学的挙動に関する実験的研究”，日本建築学会構造系論文報告集 第492号，1997.2