

鋼構造物のじん性評価法の新しい試み

竹内悦男¹, 蛭川 寿², 松岡三郎³, 山田 哲⁴, 松本由香⁵, 秋山 宏⁶

¹博(工学) 金材技研構造材料センター(〒305-0047 つくば市千現1-2-1)

²金材技研構造材料センター(〒305-0047 つくば市千現1-2-1)

³工博 金材技研構造材料センター(〒305-0047 つくば市千現1-2-1)

⁴博(工学) 東工大建築物理研究センター(〒226-8503 横浜市長津田町4259)

⁵博(工学) 横浜国大学建設学科建築学(〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常磐台79-5)

⁶工博 日大理工学研究科不動産科学(〒101-8308 千代田区神田駿河台1-8)

Charpy impact tests were carried out. In parallel to this, full scale shaking table tests of beam-to-column welded connections were also conducted under loading simulated Hanshin-Awaji earthquake. Fracture surface of Charpy impact specimens and large beam-to-column welded connections were observed by a scanning electron microscope (SEM). The relationship between Charpy absorbed energy and ductile crack depth from notch root for Charpy impact specimens was independent of the material and temperature without the upper shelf region. Based on the results, We proposed that when the ductile crack depth of large specimen was the same that of Charpy impact specimen, the toughness of large specimens was evaluated as the Charpy absorbed energy.

Key words: Hanshin-awaji earthquake, full scale shaking table test, beam-to-column connections, fractography, ductile fracture, brittle fracture

1. 緒言

1995年1月17日に発生した阪神・淡路大震災では、鋼構造物に多数の被害が発生した^{1)~4)}。代表的な被害の一つは中・高層建築物の柱梁あるいは両者の接合部のぜい性破壊であり、もう一つは高速道路橋脚の座屈である。これらの被害を究明するためには、鋼の延性・ぜい性破壊挙動を解明することが重要である。

本研究では、鋼構造物の延性・ぜい性破壊挙動を解明することを目的として、シャルピー衝撃試験、並びに鋼構造骨組の部分架構を想定した実大の柱梁接合から成る試験体を用い、阪神・淡路大震災の観測記録を参考にして、実時間軸に即した大型振動台試験を実施し^{5)~9)}、シャルピー試験片破面、並びに大型振動台試験で破壊した試験体の内から、異なる破壊様相を示した試験体を選び、その破断部分を走査型電子顕微鏡(SEM)等を用いて解析した結果を報告するとともに、破面情報をパラメータにした破壊じん性評価に対するシャルピー試験片と大型試験体間の関連づけを検討する。

2. 試験方法

(1) シャルピー衝撃試験

シャルピー衝撃試験は母材部と溶接部について、JIS4号試験片(先端半径 $r=0.25\text{mm}$, Vノッチ)を用いて行った。図1に試験片の採取位置を示す。比較のため、本供試材のSM490A鋼より降伏応力で約2倍高い、高張力鋼HT80(化学成分: 0.2C-0.24Si-1.4Mn-0.8Ni-0.3Cr, 降伏応力: 710MPa, 引張応力: 808MPa)の母材についても、シャルピー試験を行った。

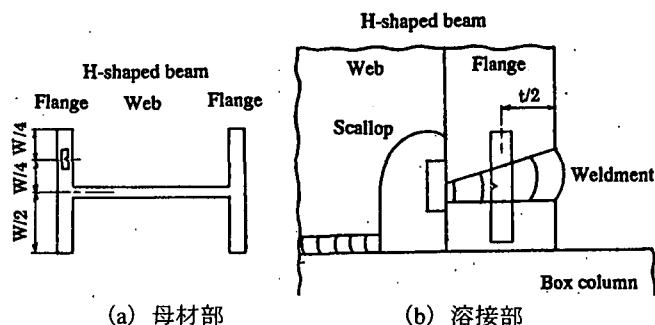


図1. シャルピー試験片採取位置

(2) 振動台試験

振動台試験には、科学技術庁防災科学技術研究所（茨城県つくば市）に設置されている電気油圧サーボ式大型振動台を用いた。本装置では振動台の上に200tonの重錘と試験体を掲載し、重錘により生じた慣性力を加力梁を介して試験体に与えている。試験体の破壊を目的とする終局加振時の入力波は阪神淡路大震災神戸海洋気象台記録 NS 成分を用い、最大速度が100kine(100cm/sec.)となるように加速度倍率を乗じた。その他の振動試験の詳細は文献[5]に示す。

図2に示すように、試験体は鋼構造骨組の部分架構を想定した実大の柱梁接合から成る T 形で、水平材の両端をピン支持し、垂直材の上端を加力した⁵⁾。表1には、柱梁接合部の破面解析に用いた6試験体の垂直材と水平材の寸法と試験温度を示す。試験体は垂直材に梁を想定した H 型钢，水平材に柱を想定した冷間プレス角形鋼管を標準としている。一方、No.10 と No.12 は逆に垂直材に柱を想定した冷間プレス角形鋼管，水平材に梁を想定した H 型钢を用いている。

図3に6試験体の柱梁接合部(図2中 A 部)の詳細を示す。No.5 と No.31 はノンスラップ，他の4体はスラップを設けてある。接合はCO₂半自動溶接で行い、その条件を表2に示す。供試材は H 型钢，冷間プレス角形鋼管ともに SM490A 鋼である。表3にフランジ母材と柱梁接合溶接部の機械的性質を示す。降伏応力は溶接部のほうが母材に比べて約50%高くなっていた。

(3) 破面観察

破面観察はシャルピー衝撃試験片並びに表1の6試験体について行った。巨視的観察には目視と光学実体顕微鏡，微視的観察には SEM を用いた。低温試験における破面には結露のため錆が付着しており，そのままでは観察できなかつたので，錆取り処理(10%硫酸+0.5%ネオレスチン+水の溶液を80℃で3分間保持)を施した。この処理は錆のみを除去し，母材部は保存される。

3. 実験結果

(1) シャルピー衝撃試験結果

図4と5に SM490A 鋼のフランジ母材と柱梁溶接接合部のシャルピー衝撃試験結果を示す。図中の斜線部は4章で述べる大型試験体の吸収エネルギーの推定範囲である。母材ではエネルギー遷移温度と破面率遷移温度は前者が約-45℃，後者が約-40℃であった。一方溶接部では両者とも約-20℃であった。図6は比較のために用いた HT80 鋼母材の結果

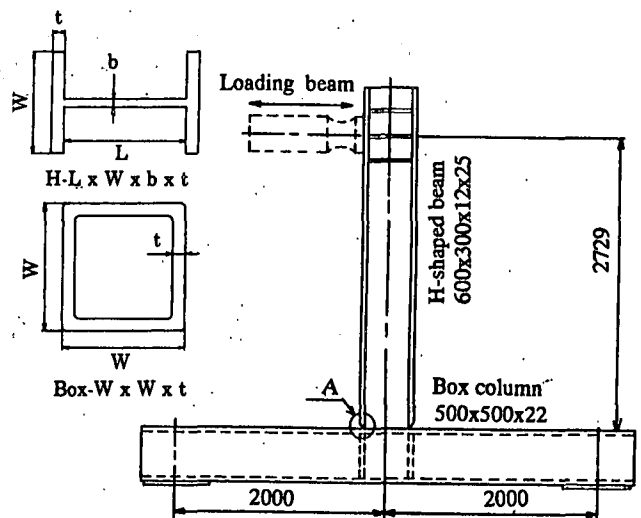


図2. 試験体形状

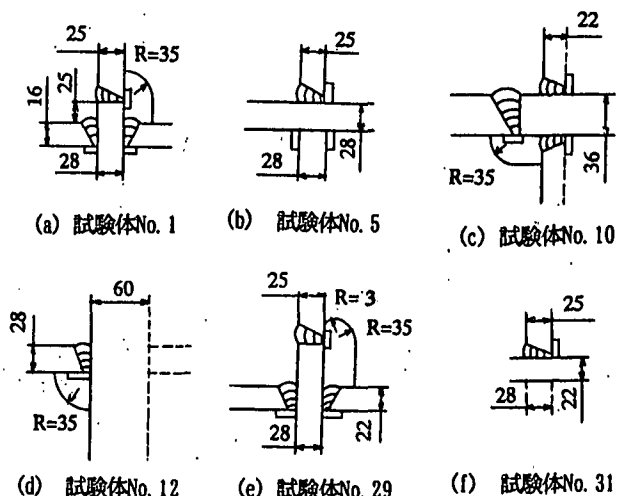


図3. 接合部詳細

表1. 試験体寸法と試験温度

Specimen	Size (mm)		Test temperature
	Vertical	Horizontal	
No.1 No.5 No.10 No.12	H-600x300x12x25 H-600x300x12x25 Box-500x500x22 Box-500x500x60	Box-500x500x16 Box-500x500x22 H-700x300x16x36 H-600x200x12x25	RT
No.29 No.31	H-600x300x16x25 H-600x300x16x25	Box-500x500x22 Box-500x500x28	-30℃

表2. 溶接条件

Welding wire	Welding current (A)	Arc Voltage (V)	Heat input (kJ/cm)	Interpass temperature (℃)
Z3312 YGW11	300	36	5~24	60~140

であり、エネルギー遷移温度と破面率遷移温度は両者約0℃であった。

(2) 振動台試験結果

図7に2例の垂直材端部におけるモーメント M と部材角 θ (δ/L) の関係を示す。図中の黒三角印は破壊が生じた点を示す。ここで、 δ は試験体頂部の変位、 L は水平材上面から試験体頂部までの長さである。図(a)が室温試験の No.10、図(b)が-30℃試験

の No.29 の結果である。モーメントと部材角の関係において、モーメントの正側と負側のそれぞれについて新たなモーメントの上昇部分をつなぎ合わせると骨格曲線が求まる。表4に骨格曲線における累積塑性変形倍率^{6) 7)} $\eta+$ と $\eta-$ を示す。 $\eta+$ は正加振方向、 $\eta-$ は負加振方向の値である。

試験体 No.1, No.5, No.29, No.31 では、垂直材が H 型鋼、水平材が角形鋼管で、それらの寸法は

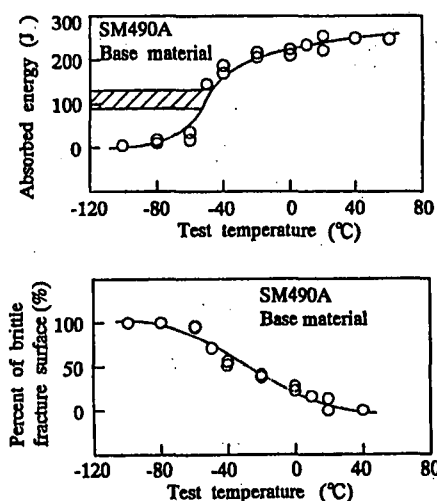


図4. 母材のシャルピー衝撃試験結果

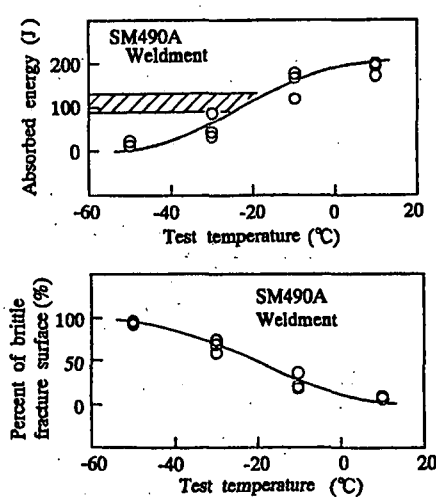


図5. 溶接部のシャルピー衝撃試験結果

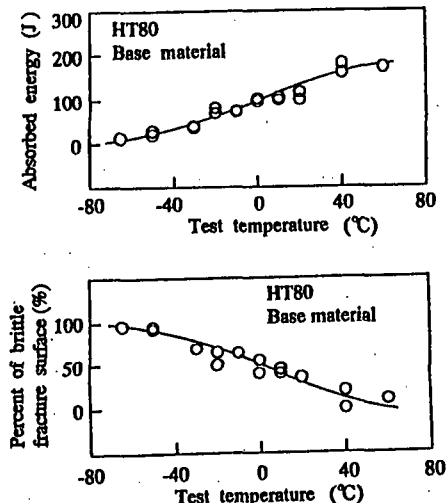
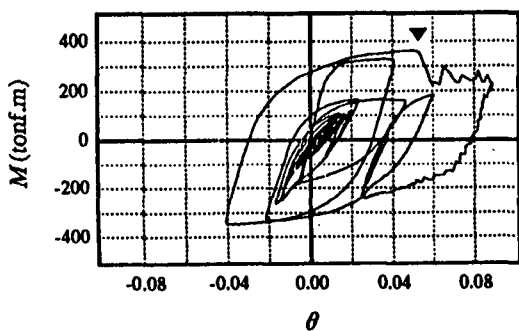
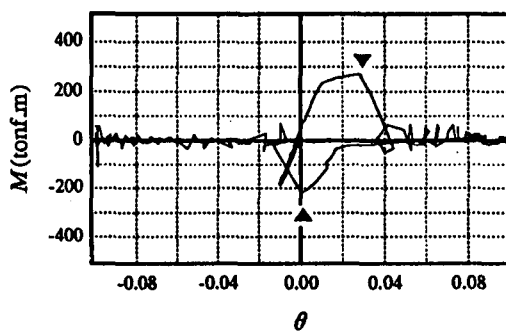


図6. HT80 鋼母材のシャルピー衝撃試験結果



(a) 室温



(b) -30℃

図7. 梁端モーメントと部材角の関係

表3. 供試材の機械的性質

Material	Specimen		Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
SM490A	No. 1, 5, 12	Base	323	505	43
	No. 29, 31	Base	366	533	53
		Weldment	535	596	33
	No. 10	Base	357	527	30

表4. 振動台試験結果

Specimen	Test temperature	$\eta+$	$\eta-$	B (%)	a. (mm)
No.1	RT	15.1	11.5	0	-
No.5		15.4	12.5	0	-
No.10		8.3	5.5	83	1.2
No.12		-	-	74	1.8
No.29	-30℃	2.7	0.2	91	1.0
No.31		0.8	0.2	90	1.8

ほぼ等しいが、累積塑性変形倍率は室温試験の No.1 と 5 のほうが、 -30°C 試験の No.29 と 31 に比べてはるかに大きくなった。これらの試験体に比べ、No.10 と 12 は垂直材が角形鋼管、水平材が H 型鋼で逆になっている。No.10 の累積塑性変形倍率は同じ室温試験でありながら No.1 と 5 に比べて小さくなった。試験体 No.12 では、破壊は垂直材でなく水平材で生じ、 η を求めることができなかった。

(3) 破面解析

a) シャルピー衝撃試験片

図 8 に微視的破面様相を基に作成したシャルピー衝撃試験片の破壊機構図を遷移温度付近の -40°C で得られた場合を例に示す。破面様相は切り欠き底から延性き裂が発生・伝ばし、ぜい性き裂に転化している。

図 9 に示すように、ぜい性き裂領域は川状模様のへき開割れであり、この流れ方向からき裂の進展方向が判明する。一方、図 10 に示すように、延性き裂領域は伸長ディンプル様相を呈し、一部等軸ディンプル様相を呈した。図 8 の伸長ディンプル形状は実線と点線で表しているが、点線は反対破面のものである。伸長、等軸ともにディンプルは延性破壊時に形成される微視的破面である。ディンプル形成モデル¹⁰⁾から応力の種類と作用方向がわかる。等軸ディンプルでは引張応力となり、伸長ディンプルでは両破面のディンプル方向が反対になるとせん断応力、同一になると引裂き応力となる。引裂きの場合にはき裂進展方向が判明する。

図 8 の場合、伸長ディンプルの方向は上下破面で同一となっていることから、引裂き応力により切欠き底から延性き裂が発生・進展し、へき開割れすなわちぜい性き裂に移行したことがわかる。

図 11 にシャルピー衝撃試験で得られた吸収エネルギーを切欠き底の延性き裂深さ a に対してプロットした結果を示す。 a は試験片板幅方向の中央の値で代表した。吸収エネルギーと延性き裂深さの関係は上部柵付近の衝撃値を示すデータを除き、SM490A 鋼の母材と溶接部、HT80 鋼の母材並びに試験温度に関係なく、一本の曲線で表された。

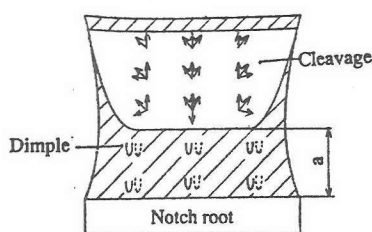


図 8. シャルピー試験片の破壊機構図

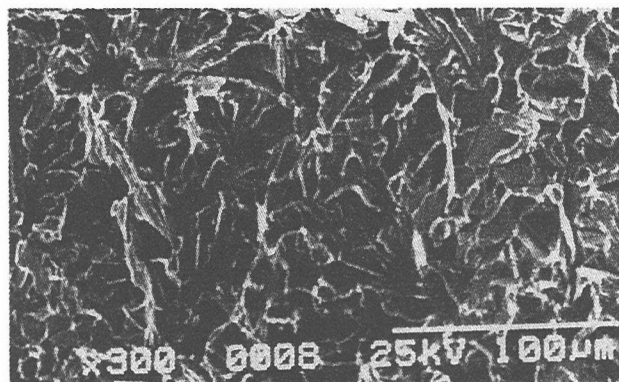
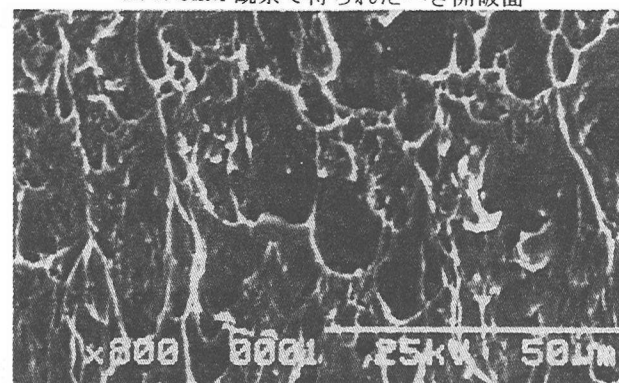
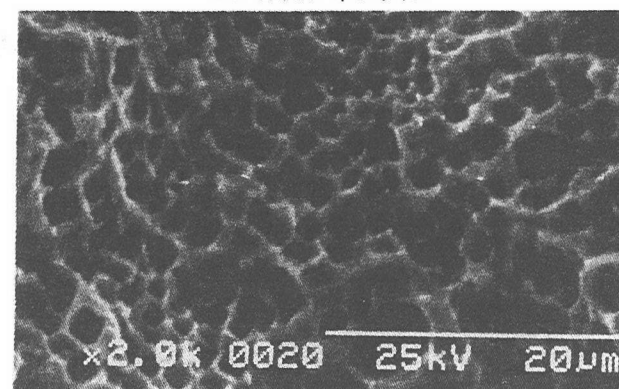


図 9. SEM 観察で得られたへき開破面



(a) 伸長ディンプル



(b) 等軸ディンプル

図 10. SEM 観察で得られたディンプル破面

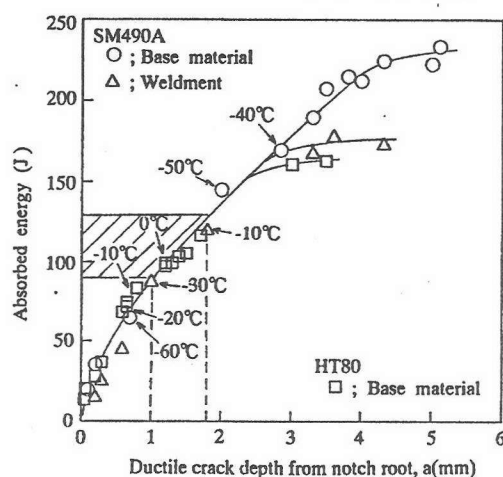


図 11. シャルピー吸収エネルギーと切欠き底の延性き裂深さの関係

b) 大型試験体

図 12 に試験体の破壊経路を No.10 の試験体を例に示す。図中に示した破壊起点部と応力の種類は図 14 に示す破壊機構図から推定した。

破壊起点は多くの場合、溶接止端部であった。また、き裂進展は多くの場合、板厚方向に対して 20 度以内の平坦な破壊であったが、室温試験の H 形鋼でノンスカリップの場合には板厚方向に対して 45 度方向の斜め破断であった。

図 13 に破壊起点近傍のマクロ破面観察結果の例を示す。図に示すように、室温試験の角形鋼管並びに -30℃ 試験では、ほぼ全面にぜい性破壊を特徴付ける山形模様が観察された。一方、室温試験の H 形鋼でスカリップありでは中央部に、ノンスカリップでは全面に延性破壊時に見られる無特徴で平坦な様相が形成されていた。このようなマクロ破面で観察された山形模様部分には川状模様を伴うへき開破面が観察され、無特徴で平坦な部分には伸長ディンプルと等軸ディンプルが観察された。この様相は図 9 と 10 に示すシャルピー試験片で得られた破面様相と類似している。

図 14 に大型試験体の破壊機構図例を示す。図に示すように、室温試験の角形鋼管並びに -30℃ 試験では、へき開破面領域が主体であった。また、破壊開始時の応力は引張り形になる傾向を示した。一方、室温試験の H 形鋼ではスカリップの有無に関わらず伸長ディンプル領域が主体であり、また破壊開始時の応力の種類はせん断形であった。しかし、いずれの試験体においても、へき開破面が形成される前に、ディンプルすなわち延性き裂領域が存在することがわかった。

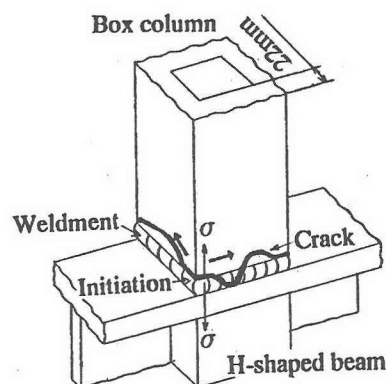


図 12. 試験体の破壊経路

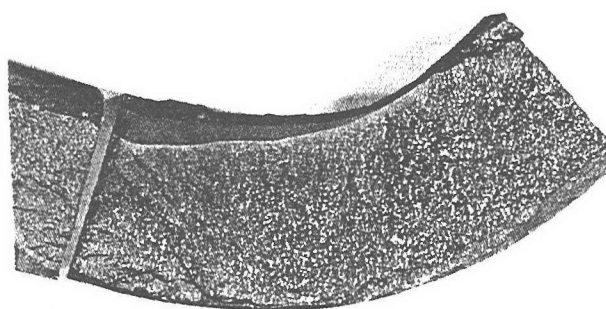


図 13. 破壊起点近傍のマクロ観察結果

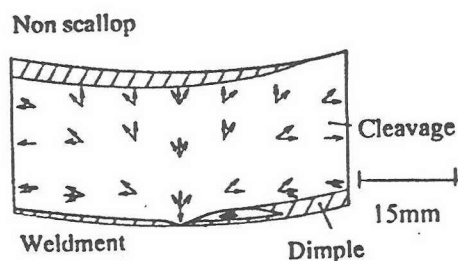


図 14. 破壊起点近傍の破壊機構図

4. じん性におけるシャルピー試験片と大型試験体との関係

図 15 にシャルピー衝撃試験で得られた荷重-変位曲線を -50℃ 試験で母材の場合を例に示す。図には荷重-変位曲線のそれぞれの過程で、今までに知られているき裂伝ば様相¹¹⁾を併せて示している。それによると、荷重が垂直に低下する部分までは切欠底に延性き裂が発生・進展する。荷重が垂直低下する部分でぜい性き裂が発生・進展し、その後はぜい性き裂周辺で延性き裂が発生・進展すると報告されている。

シャルピー吸収エネルギーは荷重-変位曲線の下側の面積となるが、その多くを切欠底の延性き裂進展部分のエネルギーが占めている。この結果、図 11 において上部棚を除く領域のシャルピー吸収エネルギーと切欠底延性き裂深さの関係が一本の曲線で表

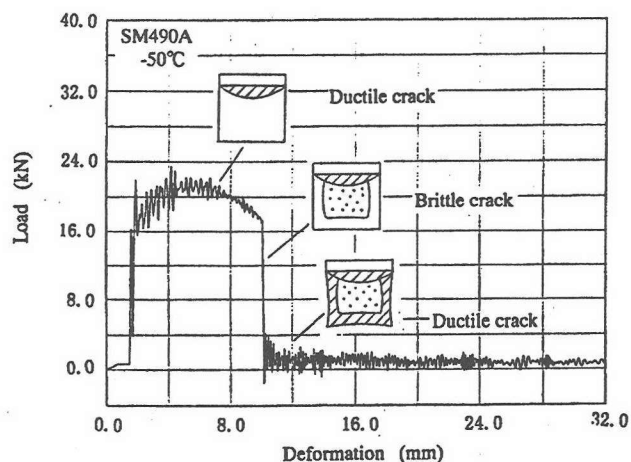


図 15. 遷移温度近傍のシャルピー衝撃試験における荷重-変位曲線

されたと考えられる。

図 14 に示すように、振動台試験で柱梁接合部の溶接止端部から破壊が生じた場合にも、ぜい性き裂に先立ち延性き裂が進展する。ぜい性破壊主体の試験体においては、延性き裂長さは $a=1.0 \sim 1.8\text{mm}$ となる。図 11 の関係から、この延性き裂深さに対応しては吸収エネルギー $90 \sim 130\text{J}$ が見積もられる。この値の範囲を図 4 と 5 に斜線で示すが、シャルピー衝撃試験で得られた遷移エネルギー (SM490A 鋼母材 125J , 溶接部 100J) にほぼ等しくなっている。従って、予測された大型試験体の吸収エネルギー値は、大型試験体においてぜい性破壊が起こり得たことを示唆するものである。

以上のように、ぜい性破壊前に形成される延性破壊領域の深さは、実大の柱梁接合部等の延性・ぜい性遷移域におけるじん性評価において、重要なパラメータに成り得る可能性がある。鋼自身のじん性は主にシャルピー衝撃試験で評価されていることを考えると、延性き裂領域に注目したじん性評価法を検討していくことは重要である。現在、SM490A 鋼の高じん性材と低じん性材を用い、シャルピー衝撃試験を実施している。さらに、力学条件が厳密に規定されている CT 試験片を用いた破壊じん性試験を行うとともに、これらの破面解析を行い、力学特性と破面情報との結び付けを行っている。

4. 結論

シャルピー衝撃試験並びに鋼構造骨組の部分架構を想定した実大の柱梁接合から成る大型試験体を用い、阪神・淡路大震災の観測記録を参考にして、実時間軸に即した大型振動台試験を実施するとともに、両試験で得られた破面を SEM 等を用いて解析し、実大の柱梁接合から成る大型試験体の破壊機構図が得られ、柱梁接合部の破壊起点と破壊経路が明確になるとともに、シャルピー衝撃試験では、切欠き底に形成された延性き裂深さは吸収エネルギーと良い相関があり、重要なパラメータであることが明らかになり、延性き裂深さを仲立ちにすると、実大の柱梁接合部等のじん性をシャルピー吸収エネルギーに置換えて評価できる可能性が明らかになった。

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」の一貫として行った。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

術庁金属材料技術研究所(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、間瀬伸治、寺田岳彦、熊谷仁志)、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、伊藤秀勝、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、佐々木聡)、日本ドライビット(矢幡秀介、村谷昌夫、木村公人)、新日本製鉄(岩田 衛、竹内 徹、長谷川久巳)、大林組(高橋泰彦、杉本浩一)

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構造建築物被害調査報告書，1995.5
- 2) 東京大学工学部建築学科桑村研究室：1995 年兵庫県南部地震被害調査報告一構造物の被害書，1995.5
- 3) 神戸大学工学部建築学科土木系教室兵庫県南部地震学術調査団：兵庫県南部地震緊急被害調査報告書，1995.
- 4) 地震予知総合研究振興会：材料・構造物の衝撃的破壊現象とその防止に関する調査報告書，1997.3
- 5) 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，第 505 号，pp.139-146，1998.3
- 6) 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，第 512 号，pp.165-172，1998.10
- 7) 秋山 宏，山田 哲，松本由香，松岡三郎，大竹章夫，杉本浩一：試験温度による実大柱梁接合部の脆性破壊-延性破壊遷移，日本建築学会構造系論文集，第 522 号，1999.8
- 8) 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，第 521 号，pp.133 ~ 140，1999.7
- 9) 鋼構造建築物終局耐震性研究委員会：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(中間報告)，1997.11
- 10) Beachem, CD., Ed by Liebowitz, H., :Fracture I, Academic Press, Microscopic fracture processes, pp.243-439.1968.4
- 11) 須藤 一：材料試験法，内田老鶴圃，1987.11