

振動台試験で得られた実大柱梁接合試験体の破面解析

竹内悦男¹・蛭川 寿²・松岡三郎³・山田 哲⁴・松本由香⁵・小川信行⁶

¹博(工学) 物質・材料研究機構 材料研究所(〒305-0047 つくば市千現1-2-1)

²物質・材料研究機構 材料研究所(〒305-0047 つくば市千現1-2-1)

³工博 物質・材料研究機構 材料研究所(〒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) 横浜国大工学研究院建築学(〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常磐台79-5)

⁶工博 防災科学技術研究所 総合防災研究部門(〒305-0006 つくば市天王台3-1)

Full scale shaking table tests of beam-to-column welded connections were conducted under loading simulated Hanshin-Awaji earthquake. In parallel to this, Charpy impact tests were also carried out. Ductile fracture surfaces specified by dimples were formed ahead of brittle fracture surfaces in large scale specimens. Similar phenomena were observed in small specimens of Charpy impact tests. The relationship between energy per area and initial ductile crack depth was independent of the material, temperature and specimens without the upper shelf region. Based on the results, We proposed that when the initial 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, fractography, ductile fracture, brittle fracture

1. 緒言

1995年1月17日に発生した阪神・淡路大震災で鋼構造物に脆性破壊が生じたことから¹⁾, 鋼構造物の延性・脆性破壊挙動を解明することが一つの課題となっている。著者らはこれまで, SM490A 鋼を用い, シャルピー衝撃試験と破壊靱性試験並びに得られた試験片の破面観察を行い, 延性・脆性挙動を明らかにするとともに構造物の破壊靱性評価において, 破壊起点に形成される初期延性き裂深さが重要なパラメータになる可能性を示した^{2),3)}。

本研究では, 鋼構造骨組の部分骨組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模擬した振動試験^{4)~6)}並びに実大試験体母材のシャルピー衝撃試験を実施し, 得られた破壊部分を走査型電子顕微鏡(SEM)等を用いて解析する。さらに延性き裂深さをパラメータにした実大試験体の靱性評価法を前報の結果^{7)~9)}を加えて検討する。

表-1 試験体寸法と試験条件

本研究				
試験体	垂直材寸法 (mm)	水平材寸法 (mm)	試験温度 (°C)	最大速度 (kine)
No. 1	H500x300x16x25	Box500x500x22	60	100
No. 2	H500x300x16x25	Box500x500x22	60	60
No. 3	H500x300x16x25	Box500x500x22	60	30+45+45
No. 4	H500x300x16x25	Box500x500x22	RT	60
前報				
No. 1	H600x300x12x25	Box500x500x16	RT	100
No. 5	H600x300x12x25	Box500x500x22	RT	100
No. 10	Box500x500x22	H700x300x16x36	RT	100
No. 29	H600x300x16x25	Box500x500x22	-30	100

2. 試験方法

(1) 振動試験

振動試験には, 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。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成分を模擬した。

表-1に示すように, 試験温度は本供試材のエネル

表-2 振動試験結果

本試験					
試験体	Wps+ (kJ)	Wps- (kJ)	Wp (kJ)	A ₀ (mm ²)	a _{IP} (mm)
No. 1	73.2	116.2	184.8	0.025	-
No. 2	106.7	51.4	158.1	0.025	25
No. 3	90.4	46.6	137.0	0.025	-
No. 4	53.6	52.6	106.2	0.025	0.9
前報					
No. 1	292.7	205.4	498.1	0.022	-
No. 5	302.7	228.0	530.7	0.022	25
No. 10	195.0	161.7	356.7	0.042	1.2
No. 29	44.2	3.0	47.2	0.025	1.0

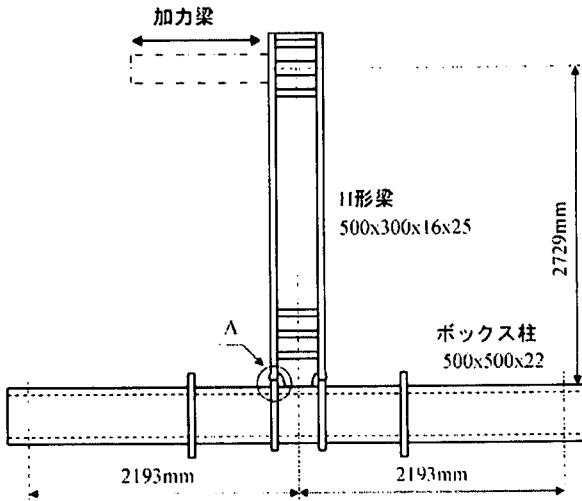


図-1 試験体形状

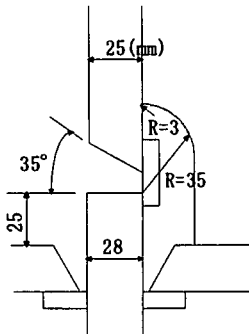


図-2 接合部詳細

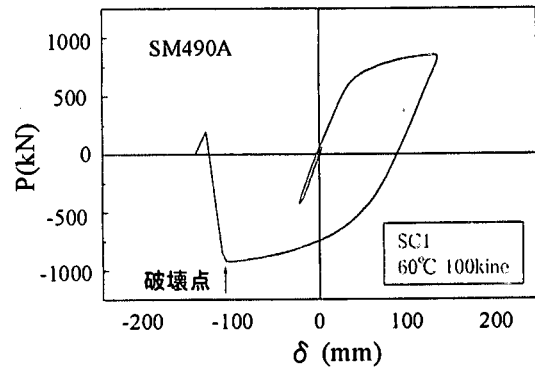
ギ一遷移温度である 60 °C を基本とし、これに室温を加えた。最大速度は 60kine (cm/s) を中心に、試験体 No.1 では 100kine、No.3 では 30+45+45kine とした。その他の振動試験の詳細は文献 [4] に示す。

図-1 に示すように、試験体は鋼構造骨組の柱梁接合を想定した SM490A 鋼製の T 形で、実大の中層骨組に相当する。水平材の両端をピン支持し、垂直材の上端を水平方向に加力した。試験体寸法を表-1 に示す。試験体は 4 体で、寸法は全て共通である。表には前報で破面解析を行った 4 体の試験体寸法も加えて示している。

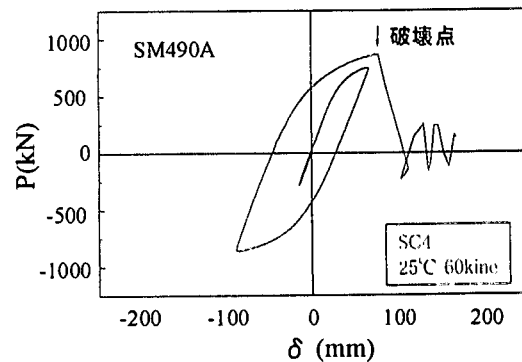
図-2 に本試験に用いた 4 試験体の柱梁接合部 (図 1 の A 部) の詳細を示す。4 体ともスカラップを設けている。

(2) シャルピー衝撃試験

シャルピー衝撃試験は容量 500J の計装シャルピー衝撃試験機を用いて行った。試験片は試験体の残



(a) 試験体 No.1



(b) 試験体 No.4

図-3 振動台試験で得られた荷重一変位関係

材から採取し、JIS4 号試験片 (先端半径 R = 0.25 mm, V ノッチ) とした。

(3) 破面観察

破面観察は表-1 の 4 つの試験体並びにシャルピー衝撃試験片について行った。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。

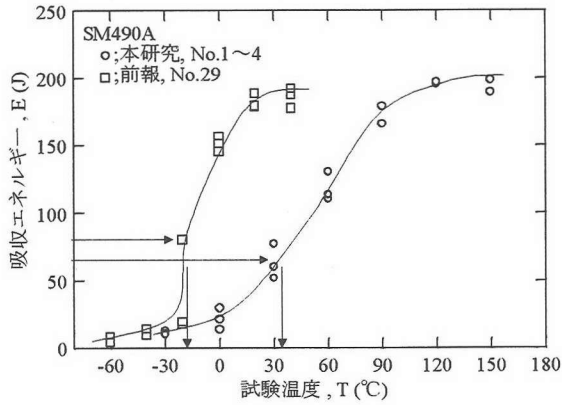


図-4 シャルピー衝撃試験で得られた吸収エネルギーと試験温度の関係

3. 実験結果

(1) 振動試験結果

図-3 に 2 例の振動試験で得られた荷重 P と変位 δ の関係を示す。 δ は試験体加力点の水平変位である。 繰返し荷重を受ける図-3 の関係において、荷重の正側と負側のそれぞれについて新たな荷重の上昇部分をつなぎ合わせると骨格曲線が得られる^{5),6)}。

表-2 に骨格曲線で吸収したエネルギーを前報の結果を加えて示す。 $Wps+$ は正側、 $Wps-$ は負側、 Wp は両者の合計である。

当然、骨格曲線で吸収したエネルギーは 60 °C 試験の No.1 ~ 3 に比べ、室温試験の No.4 では低下する。 前報の結果も同様である。

(2) シャルピー衝撃試験結果

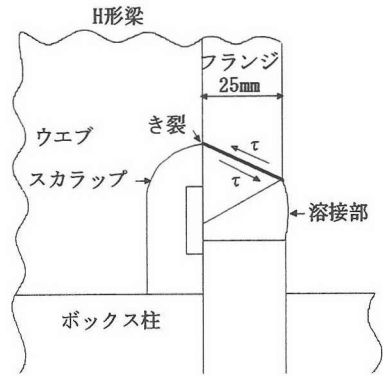
図-4 に実大試験体母材のシャルピー衝撃試験結果を示す。 エネルギー遷移温度は本試験材で約 60 °C、前報の試験体 No.29 で約 -15 °C となっている。

(3) 破面解析

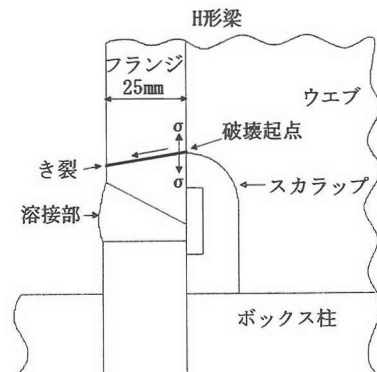
a) 実大試験体

図-5 に破壊起点近傍の縦断面のき裂経路を、異なる破壊様相を呈した 2 体を代表して示す。 図は最初に破壊した片側フランジのみを示している。 図中の破壊起点部と応力は後述する図-10 の破壊機構図から推定した。

いずれの試験体においても、破壊はスカラップ底あるいは溶接止端の応力集中部から起こっている。 図(a)に示すように、60 °C 試験の No.1 ~ 3 ではほぼスカラップ底と溶接止端部の間で斜め破断をしている。 一方、図(b)に示すように、室温試験の No.4 で

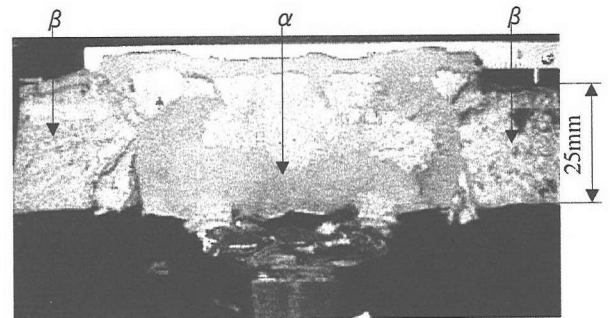


(a) 試験体 No.1



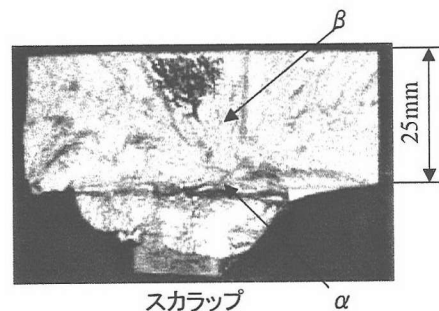
(b) 試験体 No.4

図-5 試験体の破壊過程



スカラップ

(a) 試験体 No.1



スカラップ

(b) 試験体 No.4

図-6 破壊起点近傍のマクロ観察結果

はスカラップ底と母材部間で板厚方向に比較的的水平

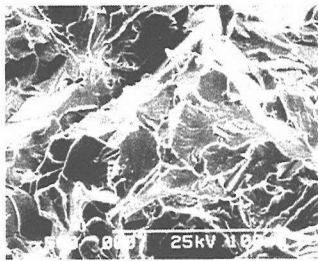


図-7 ミクロ観察結果(へき開)

な破壊となっている。

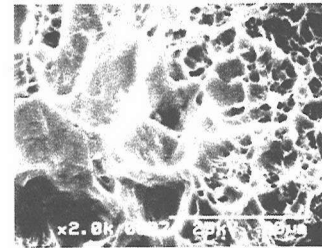
図-6 に破壊起点近傍の破面のマクロ観察結果を示す。No.2 には全面に、No.1 と No.3 には図(a)に示すように部分的に延性破壊時に見られる無特徴で平坦な破面(図中 α 部)が形成されている。しかし、No.4 には図(b)に示すようにほぼ全面に脆性破面を特徴付ける山形模様(図中 β 部)が観察される。

図-7 に山形模様部分を SEM 観察して得られた微視的破面様相を No.4 を例に示す。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る。川状模様の流れ方向から脆性き裂の進展方向が判明する。

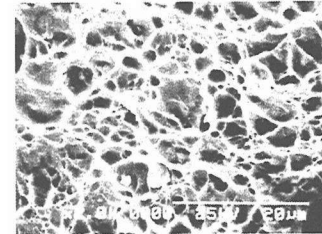
図-8 にマクロ破面で観察された無特徴で平坦な部分を SEM 観察した結果を示す。No.1 ~ 3 では図(a)に示す伸長ディンプル、No.4 では図(b)に示す等軸ディンプルが主に観察された。伸長、等軸ともにディンプルは延性破壊時に形成される微視的破面である。図-9 に示すディンプル形成モデル¹⁰⁾ から応力の種類と作用方向がわかる。

図-10 に上述の微視的破面様相を基に作成した破壊機構図を示す。本図を基に試験体の破壊様相をまとめると次のようになる。

- (1) 最大速度 60kine, 試験温度 60 °C で試験した試験体 No.2 は全体が延性破面であった。
- (2) 100kine, 60 °C の No.1 と 30kine+45kine+ 45kine, 60 °C の No.3 の破面には図-10(a)に示すように、伸長ディンプル領域とへき開破面領域が存在する。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。図-9 のモデルを基にするとせん断応力が作用したと推定できる。ただし、き裂の進展方向は不明である。川状模様の特徴からき裂は中央近傍から左右の板幅方向に進展している。この様相から得られるき裂進展方向は図-6 のマクロ破面の山形模様から得られる進展方向と一致する。
- (3) 60kine, 室温の No.4 では図-10(b)に示すようにへき開破面が主体である。川状模様から、き裂はスカルップ底を起点とし、板厚と板幅方向に放射状に進展している。



(a) 試験体 No.1



(b) 試験体 No.4

図-8 ミクロ観察結果 (ディンプル)

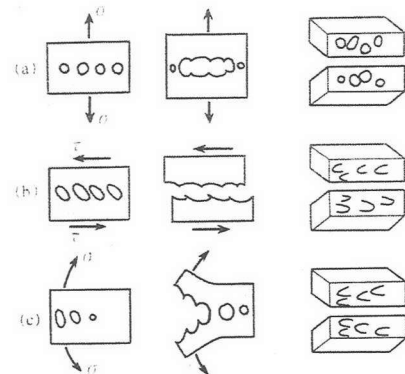
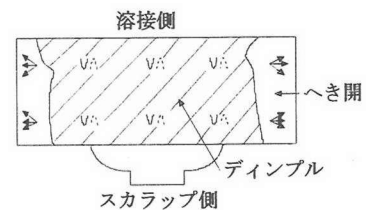
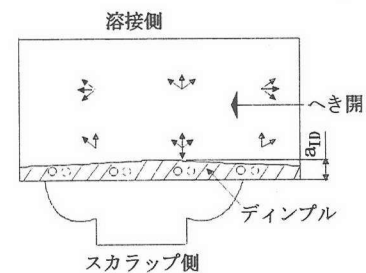


図-9 デンプル形成モデル



(a) 試験体 No.1



(b) 試験体 No.4

図-10 破壊機構図

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。

表-2 には骨格曲線で吸収したエネルギーに加え、初期延性き裂深さ a_{ID} を示す。 a_{ID} は板幅中央の値を代表して用いた。 板厚方向に貫通する大きな延性き裂領域が存在した No.1 と No.3 では a_{ID} が決定できなかった。

骨格曲線で吸収したエネルギーは全面延性破壊した No.2 並びに脆性破壊が生じても部分的であった No.1 と No.3 に比べ、脆性破壊が主体となった No.4 では低下する。 これに対応して a も小さくなっている。 官民特定研究の結果も同様の傾向を示す。

b) シャルピー衝撃試験片

図-11 にシャルピー衝撃試験片の破壊機構図を室温と遷移温度付近の 60℃ で得られた例を示す。 この場合、伸長ディンプル方向は上下破面で同一に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・伝ぱし、へき開割れすなわち脆性き裂に移行したことがわかる。 また、初期延性き裂深さ a_{ID} は 60℃ に比べ、室温では小さくなる。

このような延性き裂の発生・成長、ぜい性き裂への移行という過程、さらに a_{ID} の温度依存性の傾向は実大試験体の傾向と同様となった。

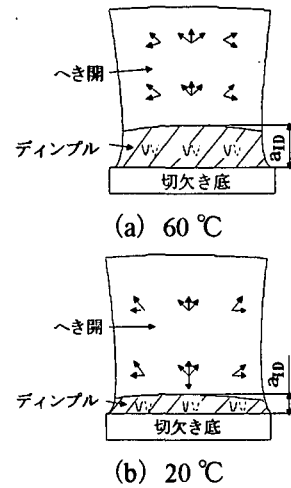


図-11 シャルピー衝撃試験の破壊機構図

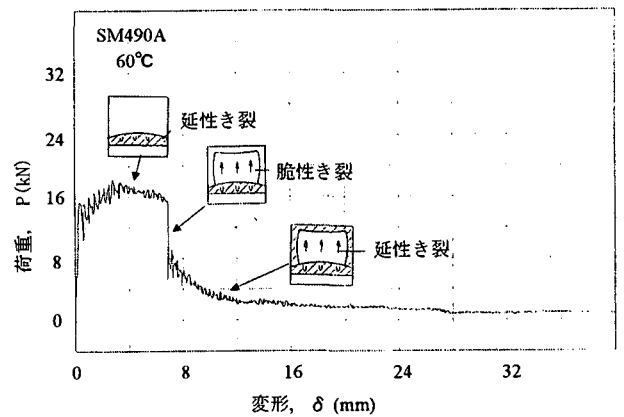


図-12 シャルピー衝撃試験における荷重一変位曲線

4. 実大試験体の靱性評価

図-12 にシャルピー衝撃試験で得られた荷重一変位曲線を 60℃ 試験の場合を例に示す。 図には荷重一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進展様相を併せて示している¹⁰⁾。 それによると、荷重が垂直に低下する部分までは切欠き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脆性き裂が発生・進展し、その後は脆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一変位曲線の下側の面積となるが、その多くを切欠き底の延性き裂進展部分のエネルギーが占めている。 このことは、エネルギーが延性き裂と密接に関連することを示唆する。

これまで、構造物の溶接による材質変化、応力集中、寸法効果を考慮し、材質、試験片の切欠き底半径と板厚をパラメータにしたシャルピー衝撃試験と破壊靱性試験を行い、エネルギーと初期延性き裂深さ a_{ID} の関係を調べてきた³⁾。

図-13 は単位面積当たりの吸収エネルギーすなわち、シャルピー衝撃値及び J 積分と a_{ID} の関係を示し

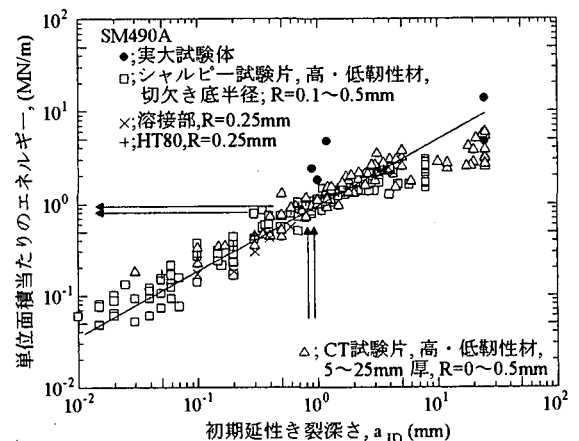


図-13 単位面積当たりのエネルギーと初期延性き裂深さの関係

ている。 シャルピー衝撃値は吸収エネルギーを原断面積で割って求めた。 J 積分は(1)式から求めた。

$$J = A / (B \cdot b_0) \cdot f(a_0/W) \quad (1)$$

ここで、 A は CT 試験片を用いた破壊靱性試験で得られた荷重-変位曲線下の面積、 B は試験片板厚、 b_0 は試験片初期リガメント幅、 $f(a_0/W)$ は試験片形状に関連する係数、 a_0 は試験片切欠き長さあるいは初期き裂長さ、 W は板幅である。

図-13 の関係は上部棚近傍を除くと材料、試験温度、試験片形状に関わらず一本の曲線で表される。このことは、エネルギー吸収能力すなわち靱性は初期延性き裂深さと密接に関連することを裏付けている。

振動試験で得られた単位面積当たりのエネルギーと a_0 の関係を図-13 中に●印で示す。単位面積当たりのエネルギーは表-2 に示す骨格曲線で得られたエネルギー $Wps+$ を単純に両フランジの断面積とウェブの断面積の合計で割って求めた。

振動試験の結果は小型試験片で得られた結果のやや上側になる。実大試験体のエネルギー評価は今後さらに詳細に検討する必要がある。

一方、小型試験片で得られた基準曲線を用いて実大試験体のエネルギーを評価すると以下のようなになる。なお、前報の No.10 試験体は冷間プレス成形梁で、角部と平板部でシャルピー吸収エネルギーが異なったため、評価外とする。

表-2 から、脆性破壊主体の試験体においては、初期延性き裂深さは本研究 No.4 で $a_0=0.9\text{mm}$ 、前報 No.29 で $a_0=1.0\text{mm}$ となる。図-13 の関係から、この a_0 に対応する単位面積当たりのエネルギーは 0.8MJ/m と 1MJ/m が見積もられ、シャルピー試験片の原断面積を乗じた吸収エネルギーは 64J と 80J となる。この値を図-4 に矢印で示すが、両者とも遷移温度以下になっている。すなわち、基準曲線から予測された実大試験体の吸収エネルギーは、実大試験体において脆性破壊が起こり得たことを示唆するものである。

従って、初期延性き裂深さを仲立ちにすると、実大の柱梁接合部等の靱性をシャルピー吸収エネルギーに置き換えて評価できる可能性が考えられる。

4. 結言

鋼構造物の延性・脆性破壊挙動を解明することを目的として、鋼構造骨組の部分架構を想定した柱梁接合部から構成される実大試験体を用い、阪神・淡路大震災の地震波を模擬した振動台試験並びにシャルピー衝撃試験を実施し、得られた破壊部分を SEM 等を用いて解析し、さらに実大試験体の靱性評価法を検討した。得られた主な結果は以下のようにまと

められる。

- (1) 柱梁接合部から構成される実大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らかになった。
- (2) 実大試験体とシャルピー衝撃試験片の破面形態は類似しており、両者とも脆性き裂領域の前に延性き裂領域が必ず存在することがわかった。
- (3) 初期延性き裂深さを仲立ちにすると、実大の柱梁接合部等の靱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。

参考文献

- 1) 例えば、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) 竹内悦男，蛭川寿，松岡三郎，山田 哲，松本由香，秋山宏：実大振動台実験による柱梁溶接接合部のフラクトグラフィ，日本建築学会構造系論文集 第 533 号，p.29，2000.
- 3) 中島快雄，竹内悦男，松岡三郎：溶接構造用 SM490A 鋼の靱性に及ぼす材料と切欠き底半径の影響，日本機械学会講演論文集 No.01-1，p.419，2001.
- 4) 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
- 5) 山田 哲，松本由香，山口路夫，松岡三郎，小川信行，秋山宏：実大振動台実験による建築鋼構造の脆性破壊過程解明と破壊防止策の検証 その 1. 実験計画，本シンポジウムにて発表予定.
- 6) 松本由香，岡田健，山田 哲，竹内悦男，小川信行，秋山宏：実大振動台実験による建築鋼構造の脆性破壊過程解明と破壊防止策の検証 その 2. 破壊シリーズの実験結果，本シンポジウムにて発表予定.
- 7) 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
- 8) 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，pp.105-112，1999.8
- 9) 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
- 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.