

# シャルピー衝撃試験における切欠き底延性き裂の重要性 -吸収エネルギーに及ぼす材料と切欠半径の影響-

○竹内悦男<sup>1</sup>, 中島快雄<sup>2</sup>, 蛭川 寿<sup>3</sup>, 松岡三郎<sup>4</sup>

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>北海道立工業試験場機械金属部(〒060-0819 札幌市北区北19条西11)

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

<sup>4</sup>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)

This study aims at developing the fracture toughness evaluation method for the structural steel. Charpy impact tests were carried out for two heats of SM490A steel with high and low toughness values, using the specimens with the radius curvature of notch of 0.1, 0.25 (standard) and 0.5 mm. Fracture surfaces were observed by SEM. The ductile fracture region characterized by the dimple was formed at the notch root, before the brittle fracture region characterized by the cleavage was formed. The relationship between Charpy impact energy and depth of ductile fracture region from notch root showed the unique curve, while the relationship between Charpy impact energy and test temperature was dependent on the toughness of steels and the radius curvature of notch. This suggests that the depth of ductile fracture region is the important factor when the fracture toughness is evaluated for the structure steel.

*Key words: Hanshin-Awaji earthquake, structural steel, ductile fracture, brittle fracture, toughness, fractography*

## 1. 緒言

阪神・淡路大震災では、鋼構造物に多数の被害が発生した<sup>1)~4)</sup>。なかでも中・高層建築物の柱梁あるいは両者の接合部にぜい性破壊が生じたことから、多くの技術者や研究者を驚嘆させ、鋼の靱性が再認識された。

前報では、この問題を明らかにする目的で、阪神・淡路大震災の地震波を模擬した荷重のもとで、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、一連の振動台試験が行われた<sup>5)~9)</sup>。また、この試験に用いられた試験体の破断部分を走査型電子顕微鏡 SEM 等を用いて解析した<sup>10)</sup>。スカラップや溶接止端部から脆性破壊が起こったが、へき開破面の前に必ずディンプル破面が形成されていることがわかった。同様な様相は実大試験体から作成した試験片のシャルピー衝撃試験においても観察された。そこで、ディンプルで特徴付けられる切欠き底からの延性き裂深さをパラメータにすると、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を明らかにし

た。

本研究では、構造物における材質の違い、溶接止端部やスカラップの存在等を考慮して、靱性の異なる2種類のSM490A鋼を用い、切欠き底半径をパラメータにしたシャルピー衝撃試験を行うとともに、得られた結果を試験片破面に形成された延性き裂と関連させて解析する。

## 2. 試験方法

供試材は SM490A 鋼の高靱性材と低靱性材の2種類である。表1と2に本供試材の化学成分と機械的性質を示す。両材で、引張特性に大きな違いは見られないが、シャルピー吸収エネルギーは約3倍異なっている。

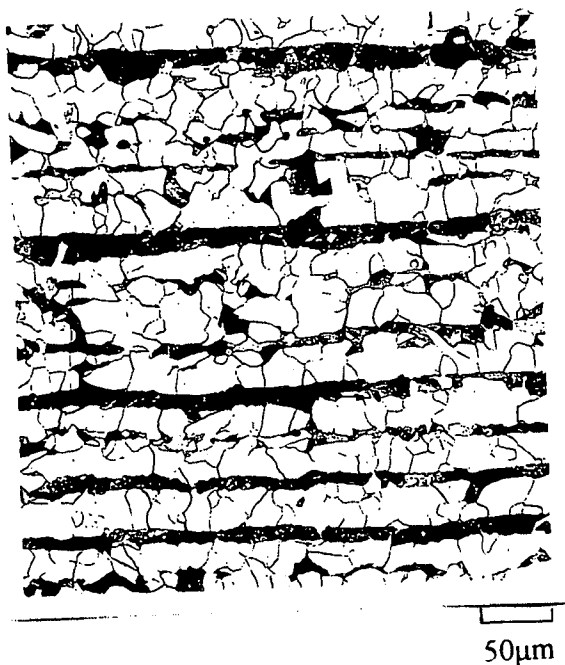
図1に光学顕微鏡による微視組織観察結果を示す。両材ともに組織はフェライト/パーライトである。高靱性材ではフェライトとパーライトは層状で、フェライトは細粒であるのに対し、低靱性材ではフェライトとパーライトはランダムに入り交じってお

表-1 供試材の化学成分 (%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Al
SM490A High toughness	0.17	0.39	1.43	0.020	0.006	0.01	0.03		0.004	
SM490A Low toughness	0.21	0.28	1.19	0.024	0.013		0.21	0.09		0.005

表-2 供試材の機械的性質

Material	0.2% proof stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Charpy absorbed energy (J)/0 °C
SM490A High toughness	351	545	35	172
SM490A Low toughness	321	561	39	60



(a) 高靱性材



(b) 低靱性材

図-1 組織観察結果

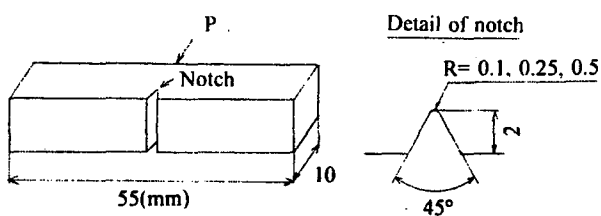


図-2 試験片形状

り、フェライトは少し粗粒である。

シャルピー衝撃試験は容量 500J の計装化シャルピー試験機と図 2 に示す試験片を用いて行った。試験片は JIS4 号(10mm 角, 長さ 55mm, V 切欠き, 切欠き底半径  $R=0.25\text{mm}$ )である。さらに,  $R=0.1\text{mm}$  と  $R=0.5\text{mm}$  の試験片を加えた。

破面観察は主に走査型電子顕微鏡 SEM を用いて

行った。

### 3. 実験結果

#### (1) シャルピー衝撃試験

図3に高靱性材と低靱性材について、切欠き底半径をパラメータにして得たシャルピー吸収エネルギーと試験温度の関係を示す。図中の実線は高靱性材と低靱性材それぞれの上限と下限を示す。当然、吸収エネルギーは高靱性材に比べて低靱性材のほうが低い。両材とも切欠き底半径が鋭くなるほど吸収エネルギーは低くなる傾向を示し、大きくばらついて

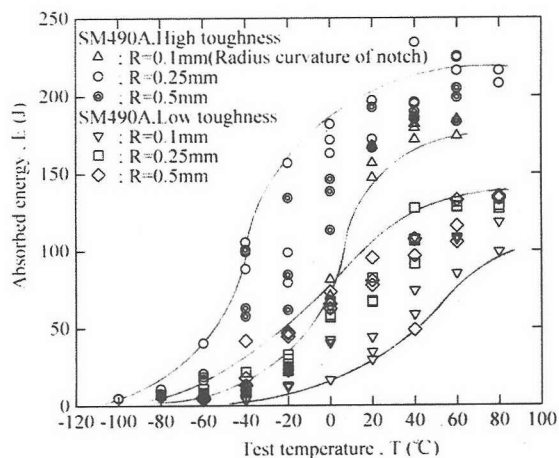


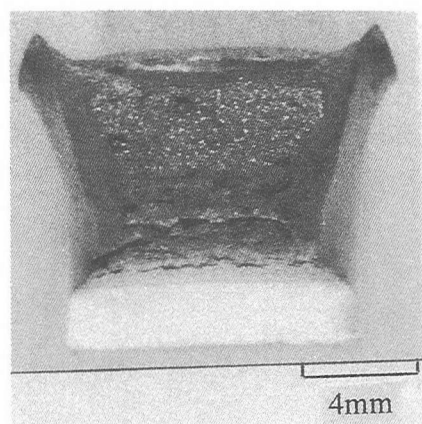
図-3 シャルピー吸収エネルギーと試験温度の関係

#### (2) 破面解析

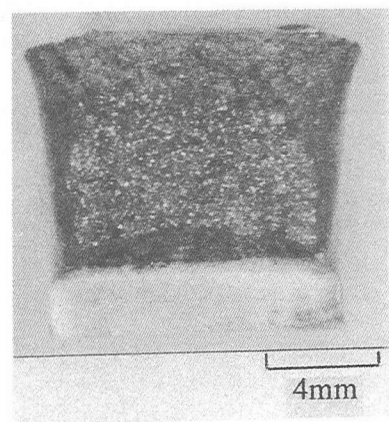
図4に高靱性材と低靱性材の20℃、切欠き底半径 R=0.25mm の条件で得られたシャルピー衝撃試験片の巨視的破面様相を示す。中央の白い部分が脆性き裂領域、その周りの黒い部分が延性き裂領域である。

図5と6に、図4の延性き裂領域と脆性き裂領域をSEMにより観察した結果を示す。全ての条件で、延性き裂領域は図5(a)に示すような伸長ディンプル様相、ならびに図5(b)に示すような伸長ディンプルと等軸ディンプルの混合様相を呈した。また、脆性き裂領域は全て図6に示すような川状模様を伴うへき開様相であった。

図7に微視的破面様相を基に作成した破壊機構図を高靱性材と低靱性材の20℃、切欠き底半径 R=0.25mm で得られた場合を示す。図中の脆性き裂領域には矢印で川状模様の流れ方向を示す。また、斜線のディンプル領域にはディンプル形状を実線と点



(a) 高靱性材



(b) 低靱性材

図-4 マクロ破面様相

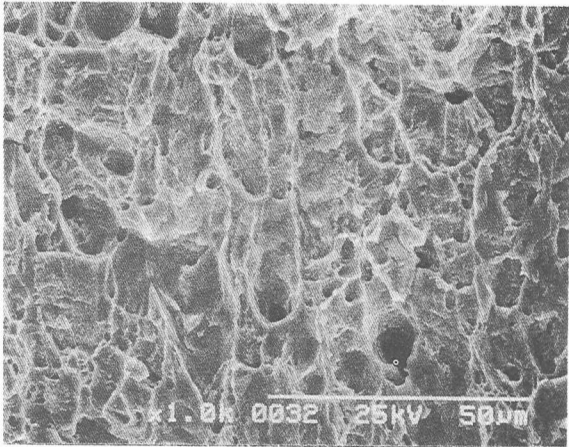
線で示している。点線は反対破面のものである。

高靱性材と低靱性材ならびに切欠き底半径に関わらず、全ての試験片で切欠き底にディンプルから成る延性き裂領域が形成され、それに続いてへき開の脆性き裂領域が形成された。

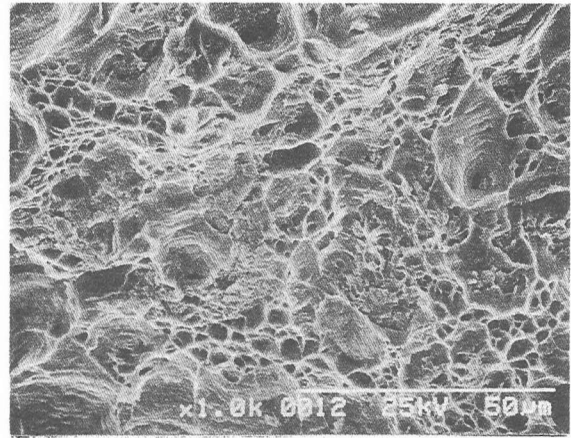
延性き裂領域の面積は、図7(a)の高靱性材より図7(b)の低靱性材のほうが小さくなり、また図には示していないが、両材ともに切欠き底半径が鋭くなるほど小さくなった。それに伴い、ディンプルは伸長形から等軸形に移行し、ディンプル深さは浅くなる傾向を示した。

#### 4 考察

図8は高靱性材の0℃で得られた荷重-変位曲線である。図中に荷重-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<sup>11)</sup>を併せて示す。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

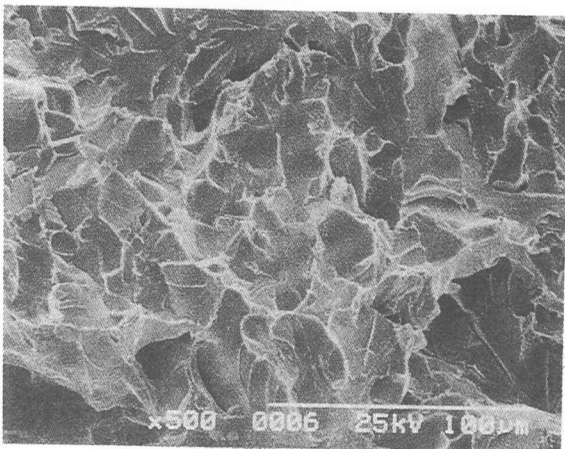


(a) 高靱性材

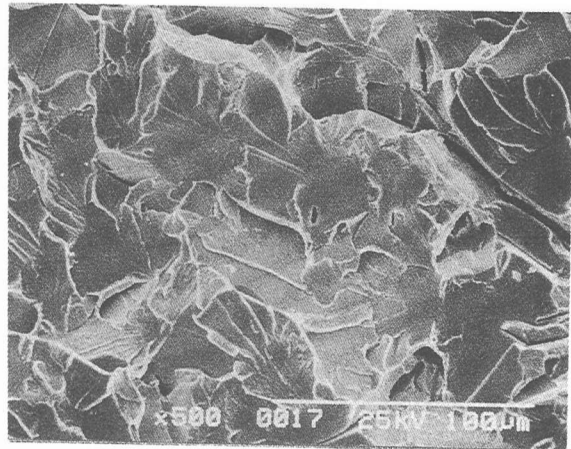


(b) 低靱性材

図-5 SEMによるマイクロ破面観察から得られたディンプル様相

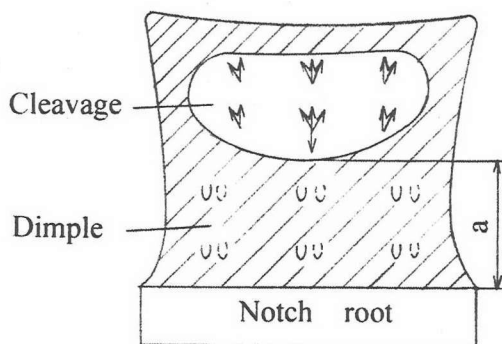


(a) 高靱性材

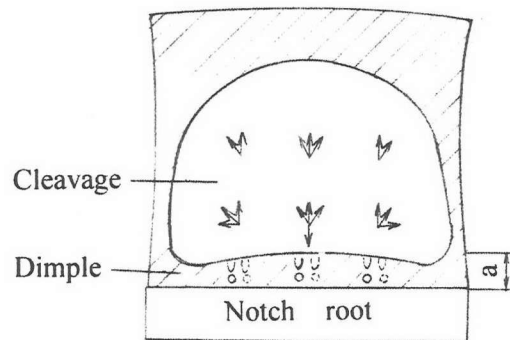


(b) 低靱性材

図-6 SEMによるマイクロ破面観察から得られたへき開様相



(a) 高靱性材



(b) 低靱性材

図-7 微視的破面様相から得られた破壊機構図

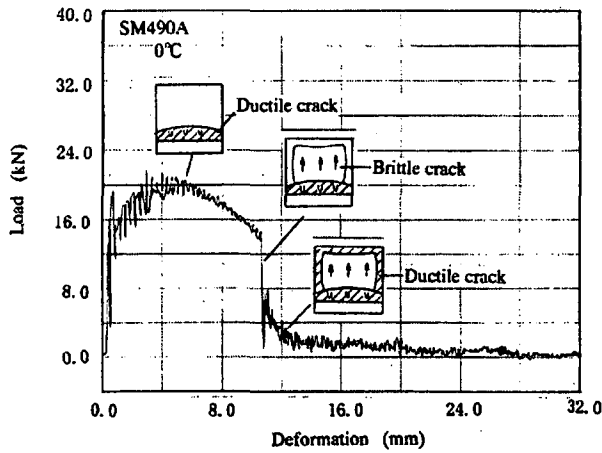


図-8 シャルピー衝撃試験における荷重-変位曲線

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。その結果、シャルピー吸収エネルギーの多くは切欠き底の延性き裂進展部分で占められることになる。このことは吸収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。

図9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からの延性き裂深さ  $a$  に対してプロットした結果を示す。図中には比較材として、前報<sup>10</sup>の実大試験体から採取した SM490A 鋼の溶接材(降伏応力: 535MPa, 引張り応力: 596 MPa, シャルピー吸収エネルギー: 172J/0°C), ならびに SM490A 鋼より降伏応力で約2倍高く、吸収エネルギーで約2倍低い高張力鋼 HT80(化学成分: 0.2C-0.24Si-1.4Mn-0.8Ni-0.3Cr, 降伏応力: 710MPa,

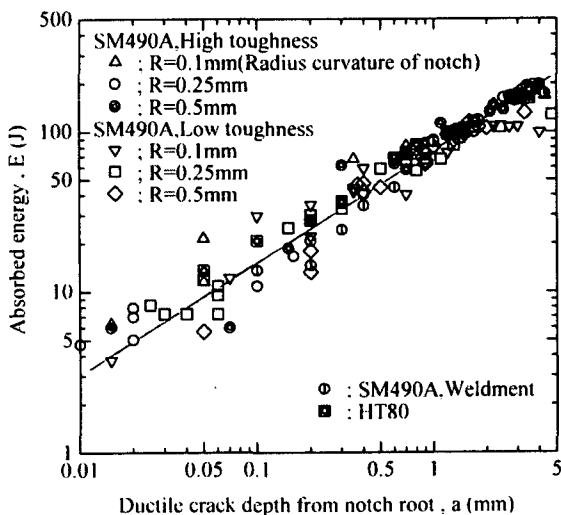


図-9 シャルピー衝撃試験で得られた吸収エネルギーと切欠き底延性き裂深さの関係

引張り応力: 808 MPa, シャルピー吸収エネルギー: 97J/0°C)の結果も示した。ここで、延性き裂深さ  $a$  は図7に示すように、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  $a$  の関係は、吸収エネルギーの上部棚近傍を除くと、鋼種、切欠き底半径に依らず、一本の曲線関係で表すことができる。

この結果は延性き裂深さが鋼構造物の靱性評価に対して重要な因子になる可能性が強くなったことを示している。

## 5. 結論

鋼構造物の靱性評価法の開発を主目的とし、靱性の異なる2種類の SM490A 鋼を用い、切欠き底半径をパラメータにしたシャルピー衝撃試験を行うとともに、得られた結果を破面観察結果と関連させて解析し、以下の結果が得られた。

(1) シャルピー吸収エネルギーは高靱性材に比べて低靱性材のほうが低くなり、また両材とも切欠き底半径が鋭くなるほど吸収エネルギーは低くなる傾向を示し、大きくばらついた。

(2) SEMによる破面観察の結果、材料と切欠き底半径に関わらず、全ての試験片で切欠き底にディンプルの延性き裂領域が形成され、それに続いてへき開の脆性き裂領域が形成されていた。

(3) シャルピー吸収エネルギーと切欠き底の延性き裂深さ  $a$  の関係は、吸収エネルギーの上部棚近傍を除くと、鋼種、切欠き底半径に依らず、一本の曲線で表すことができた。この結果から、延性き裂深さは鋼構造物の靱性評価に対して重要な因子になる可能性が強くなった。

**謝辞:** 本研究は科学技術庁振興調整費による総合研究「構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関する研究」の一環として行われているものであり、関係各位に深く感謝する。

## 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.
- 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-構造物の被害書,

1995.

- 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.
- 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.
- 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.
- 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) 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, pp133-140, 1999.
- 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.
- 10) 竹内悦男, 蛭川 寿, 松岡三郎, 山田 哲, 松本由香, 秋山 宏: 実大振動台試験による柱梁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, pp29-36 2000.
- 11) 須藤 一: 材料試験法, 内田老鶴圃, 1987.