

構造用鋼の延性/脆性破壊挙動における小型試験片と実大試験体の関係

○竹内悦男¹・松岡三郎²・蛭川 寿³

¹博(工学) 物質・材料研究機構 材料基盤情報S(〒305-0047 つくば市千現1-2-1)

²物質・材料研究機構 材料基盤情報S(〒305-0047 つくば市千現1-2-1)

³工博 物質・材料研究機構 材料基盤情報S(〒305-0047 つくば市千現1-2-1)

Tensile fracture tests with small-scale plate specimens were carried out for SM490A steel using the specimens with notch length range of 2.5mm ~10mm, notch root radius range of 0.25~10mm, and notch angle of 0° or 45°. Fracture surface were observed by SEM. The plot of energy and ductile fracture area for full-scale specimens was higher than that for small-scale specimens in the previous study. This behavior was simulated by the small-scale specimens in this study. This is due to the fact that the energy was mainly consumed by the ductile crack propagation in small-scale specimens, while it was done by the plastic deformation as well as the ductile crack propagation in full-scale specimens.

Key words: Structural Steel, Ductile Fracture, Brittle Fracture, Toughness, Fractography

1. はじめに

阪神・淡路大震災では、中・高層建築物の柱梁あるいは両者の接合部に脆性破壊^{1)・2)}が生じ、これを契機に鋼の靱性が再認識された。著者らは構造物の延性/脆性破壊挙動の解明を目的とし、鋼構造骨組の部分架構を想定したSM490A鋼製実大試験体に阪神・淡路大震災時の地震波を模擬した荷重を与える振動試験^{3)~7)}に参加し、特に破壊部の破面解析^{8)~10)}を分担した。

表-1にこれまでに得られた振動試験結果をまとめて示す。ここで、エネルギーは振動試験で得られた荷重-変位関係を一方向載荷の荷重-変位関係に置換して得られた骨格曲線の下側の面積として求めた破壊側のエネルギーである。

破壊は全て応力集中部であるスカラップ底あるいは溶接止端から起こった。試験温度が高温領域の場合、エネルギーは高く、スカラップ底と溶接止端部の間で斜め方向に延性的破壊をおこした。一方、試験温度がエネルギー遷移温度を下回る条件下では、エネルギーは低くなり、スカラップ底から水平方向に脆性主体の破壊が生じた。

しかし、いずれの試験体においても、へき開様相を特徴とする脆性破面に必ずディンプルの延性破面が先行する様相を呈した。同様な様相は小型のシャルピー衝撃試験片破面ならびに引張破壊試験で得られたCT試験片破面においても観察された。

図-1に振動試験ならびにシャルピー衝撃試験と引張破壊試験で得られたエネルギー Wps 、 E 及び J ・ A を脆性破壊に先行した初期延性き裂面積 A_{D0} に対して対数関係で示す。

図-2は図-1の両軸をそれぞれ試験片の原断面積 A_0 で標準化した単位面積当たりのエネルギー Wps/A_0 、 E/A_0 及び J を初期延性き裂面積率 A_{D0}/A_0 に対して対数関係で示す。 E はシャルピー吸収エネルギー、 J はCT試験片を用いた引張破壊試験の荷重-変位関係から求めた J 積分、 A_0 は原断面積である。図中には傾き1の直線を示す。

白印の小型試験片で得られた E/A_0 および J と A_{D0}/A_0 の対数関係はSM490A鋼母材部と溶接部、HT80鋼の材料、-100~80°C範囲の試験温度、0.1~0.5mm範囲の試験片切欠き半径、5mm~25mm範囲の試験片板厚に関係なく、一本の直線で表すことができる。

一方、黒丸の振動試験結果は前報¹⁾の試験体を含め、小型試験結果より上側になった。この原因は次のように考えられる。シャルピー衝撃試験片とCT試験片の場合、深く、鋭い切欠きを有するため、切欠き先端のひずみ集中は高くなり、延性き裂は荷重-変位関係の弾性領域を越えた早い段階で発生する。靱性に対応する吸収エネルギーは荷重-変位曲線の下側の面積とほぼ対応するが、その多くは切欠底の延性き裂形成エネルギーで占められる。

一方、実大試験体の場合、破壊起点となったスカラップ底の切欠きは小型試験片に比べて鈍い。また、溶接止端部は止端半径が約0.5mmであったが、その部分は微小であり、止端形状はむしろ鈍く、浅い切欠きと考えるほうが自然である。従って、破壊起点のひずみ集中は低くなり、延性き裂発生は遅くなる。骨格曲線から求めたエネルギーは延性き裂形成エネルギーのみならず、延性き裂形成以前の多くの塑性変形エネルギーによっても占めら

表-1 振動試験結果のまとめ

(a) 本研究

試験体	試験温度 (°C)	最大速度 (kine)	効ラップ	破壊起点	伝ば方向	エネルギー W_{ps} (kJ)	破壊様相	延性き裂面積 (mm ²)	遷移温度 (°C)
No. 1	60	100	有	効ラップ底又は溶接止端	斜め	116.2	D+C*	1620	60
No. 2	60	60	有	効ラップ底又は溶接止端	斜め	106.7	D	23000	60
No. 3	60	30+45+45	有	効ラップ底又は溶接止端	斜め	90.4	D+C	1250	60
No. 4	25	60	有	効ラップ	水平	53.6	D+C	370	60

(b) 論文 [3~5]

試験体	試験温度 (°C)	最大速度 (kine)	効ラップ	破壊起点	伝ば方向	エネルギー (kJ)	破壊様相	延性き裂面積 (mm ²)	遷移温度 (°C)
No. 1	25	100	有	効ラップ底又は溶接止端	斜め	292.7	D+C	1100	-40
No. 5	25	100	無	溶接止端	斜め	228.0	D	222000	-40
No. 29	-30	100	有	効ラップ	水平	44.2	D+C	450	-15

*D: ディンプル、C: へき開

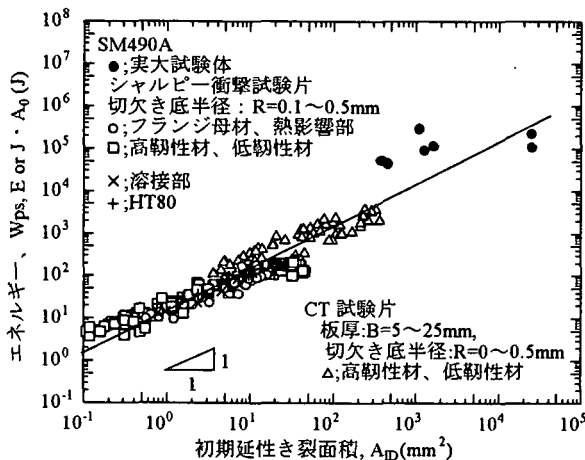


図-1 エネルギーと初期延性き裂面積の関係

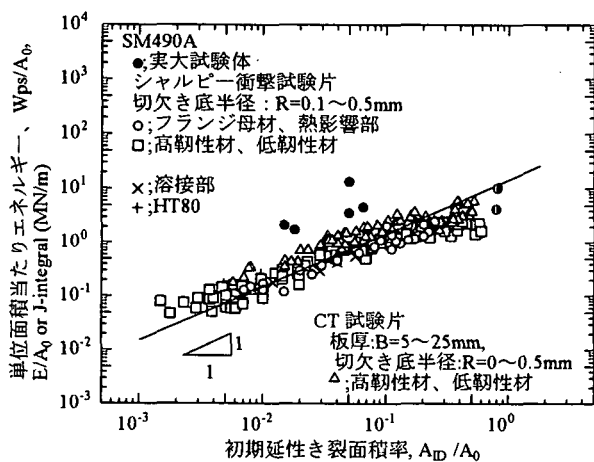


図-2 単位面積当たりのエネルギーと初期延性き裂面積率の関係

れる。このため、図-1と図-2の関係において、実大試験体の結果は小型試験片の結果より上側になったと考えられる。

本研究では、このようなエネルギーと初期延性き裂の関係を小型試験片によって検証するため、SM490A鋼市販材について、切欠き底半径及び切欠き長さをスカラップ底や溶接止端部のレベルに合わせた板試験片を用い、引張破壊試験ならびに破面解析を実施する。さらに、実機では切欠きに対して斜め荷重が作用する場合のあることを想定し、多軸応力が作用する斜め切欠きを導入した板試験片を用い、同様な試験と観察を実施する。

2. 試験方法

(1) 引張破壊試験

供試材は溶接構造用鋼SM490A市販材である。表-2に25°Cで得られた供試材の機械的性質を示す。いずれの特性もJIS規格内となっている。

表-2 機械的性質

材料	試験温度 (°C)	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
SM490A	25	425	569	24

図-3にシャルピー衝撃試験結果を示す。エネルギー遷移温度は約10°Cである。

図-4に試験片形状を示す。試験片は板厚10mm、リガメント幅10mmの両側切欠きを有する板状である。切欠き角度θは0°あるいは45°の2種類である。切欠き長さLは切欠き底半径Rが鋭い0.25mmに固定したもとの、2.5mm、5mm、10mmの3種類に変えた。また、鈍い切欠きを有する場合として、R=2.5mm、5mm、10mmの3種類の半円切欠き試験片を用意した。引張破壊試験は容量100kNの引張試験機を用い、試験速度V = 0.02mm/sec.で行った。試験温度は本供試材のエネルギー遷移温度10°Cを挟む25°Cと0°Cを中心に行った。

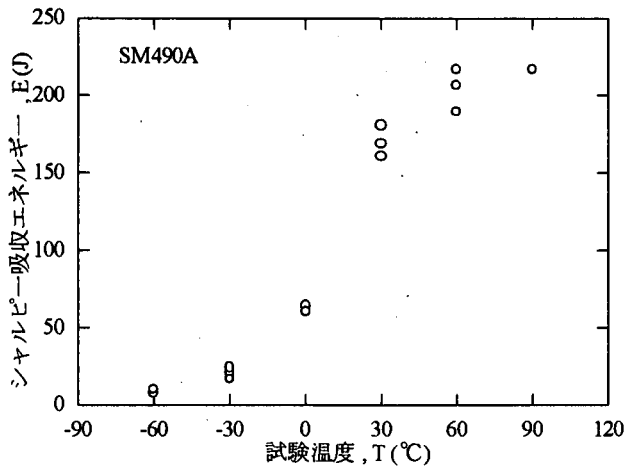


図-3 シャルピー衝撃試験結果

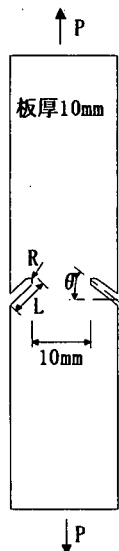


図-4 試験片形状

試験片の伸びは標点距離40mmの位置で測定した。

(2) 破面観察

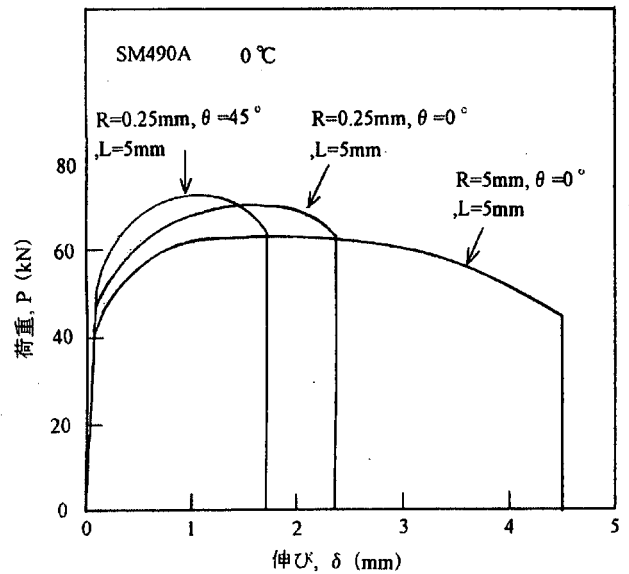
試験後の試験片破面を主に走査型電子顕微鏡SEMを用いて観察した。

3. 実験結果

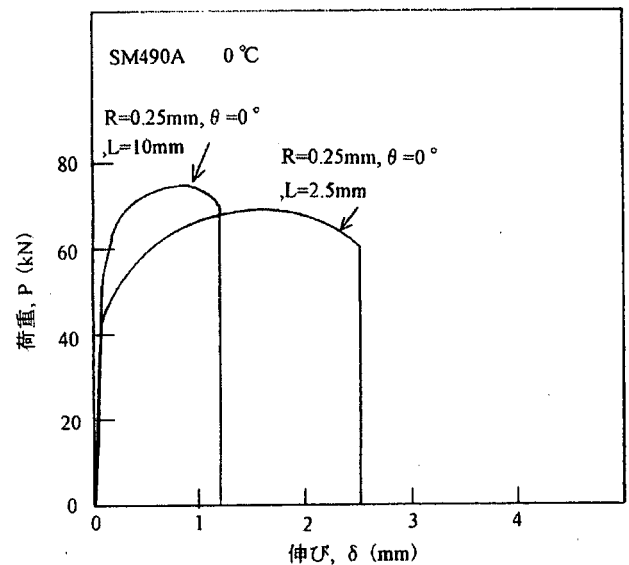
(1) エネルギー特性

図-5に0°Cで得られた荷重Pと標点距離40mmにおける伸びδの関係を示す。図-6にはP-δ曲線下の面積として求めた暫定エネルギーを示している。図-5中の斜線部には白枠を100%とした脆性破面の割合を表している。

図-6を基にエネルギー特性を述べると次のようになる。図(a)に示すように、同一条件で切欠き角度θを変えた場合、エネルギーはθ=0°に比べてθ=45°のほうが低い。また、同一条件で切欠き長さLのみ変化させた場合、エネルギーはLが長いほど低下する。これらの鋭い切欠きに比べ、図(b)に示す切欠きが鈍いR=2.5~10mmではエネルギーは著しく高くなる。



(a) 切欠き長さLの比較



(b) 切欠き角度θと切欠き半径Rの比較

図-5 荷重-変位曲線

(2) 破面様相

a) マクロ破面様相

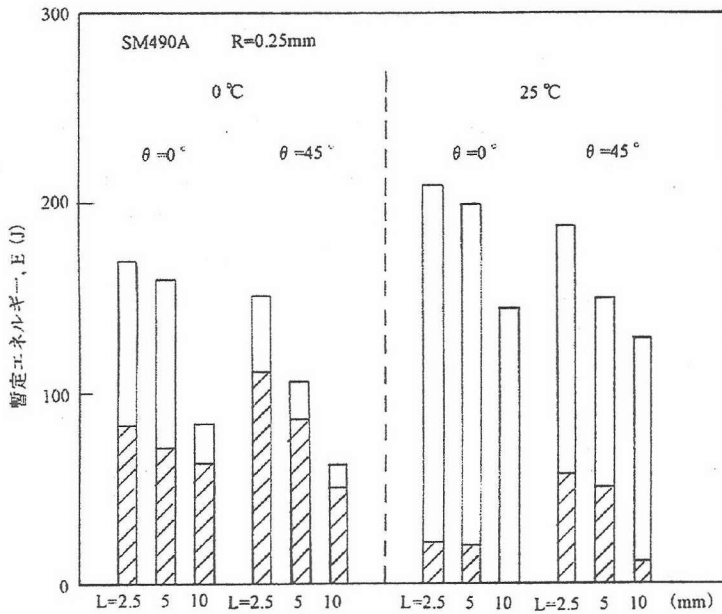
図-7に0°Cで得られたマクロ破面様相例を示す。試験した全ての試験片において、灰色部分の無特徴な延性き裂領域と光沢のある山形模様の脆性き裂領域が観察された。

b) ミクロ破面様相

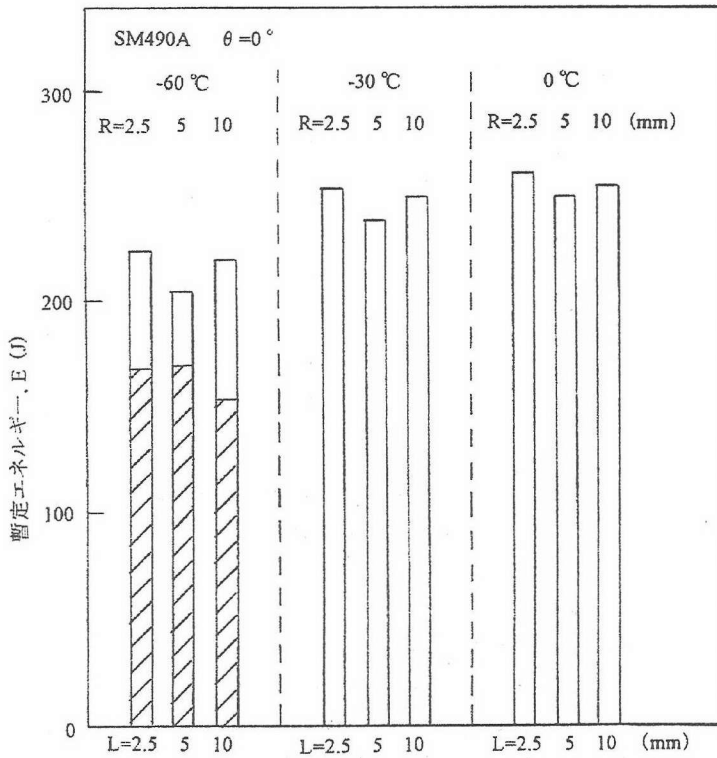
図-7の延性き裂領域と脆性き裂領域をSEM観察して得られたミクロ破面様相を図-8に示す。脆性き裂領域は図(a)に示すへき開様相を呈した。一方、延性き裂領域は図(b)に示す伸長ディンプルと図(c)に示す等軸ディンプル様相を呈した。

図-9に上述のミクロ破面様相を基に作成した破壊機構図を示す。図中に延性き裂領域に実線と点線でディンプル形状を示すが、点線は反対破面のものである。

き裂進展初期の場合、θ=0°では図-7にも示すように、

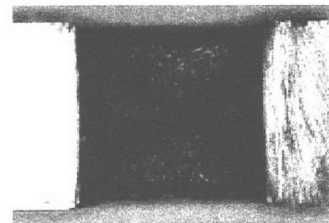


(a) R=0.25mmでθとLを変化

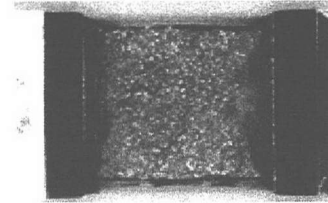


(b) R=2.5~10mmの半円切欠き
図-6 エネルギー特性

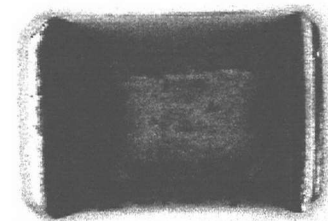
上下破面で方向が同じ伸長ディンプル (引裂応力) が形成された。しかし、 $\theta=45^\circ$ では両破面において方向が異なる伸長ディンプル (せん断応力) が形成された。 $\theta=45^\circ$ の場合、試験片には引張応力とせん断応力が作用するが、確かに破面に両応力が作用した痕跡が認められる。一方、き裂が1mm以上進展すると、 θ に関係なく等軸ディンプル (引張応力) が形成された。



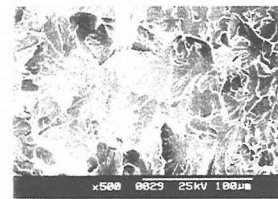
(a) $\theta=0^\circ$, L=5mm, R=0.25mm



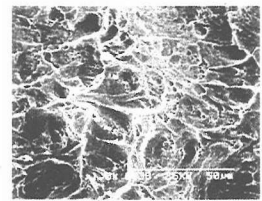
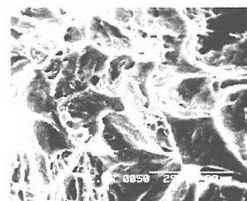
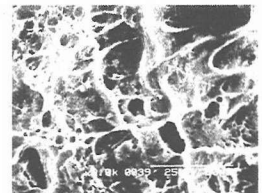
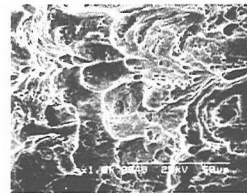
(b) $\theta=45^\circ$, L=5mm, R=0.25mm



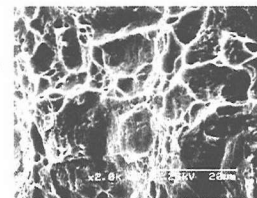
(c) $\theta=0^\circ$, R=5mmの半円切欠き
図-7 マクロ破面様相



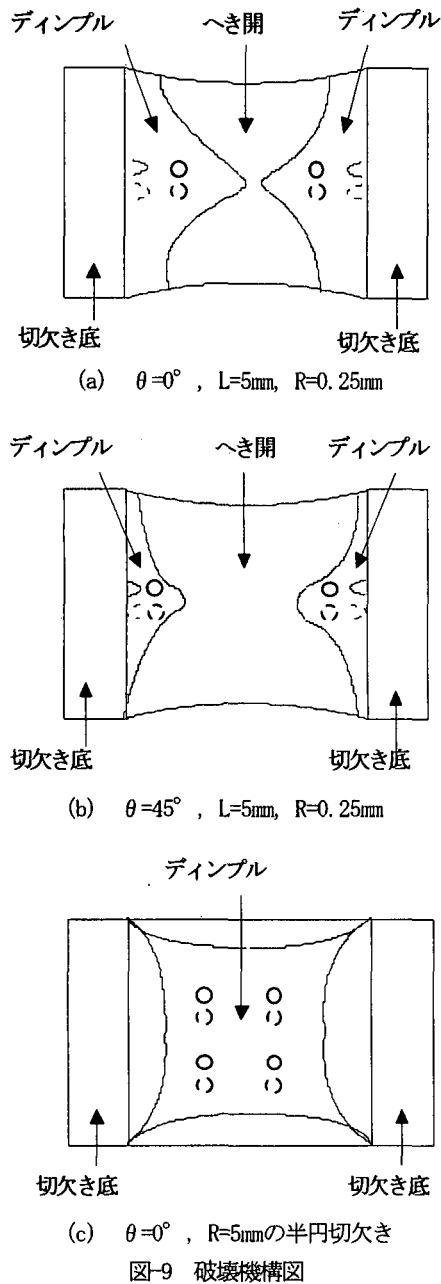
(a) へき開



$\theta=0^\circ$, L=5mm, R=0.25mm $\theta=45^\circ$, L=5mm, R=0.25mm
(b) き裂発生近傍 (伸長ディンプル)



(c) 1mm以上き裂進展部 (等軸ディンプル)
図-8 ミクロ破面様相



また、いずれの試験片破面においてもへき開を特徴とする脆性破壊にディンプルの延性破壊が先行する様相を呈した。この様相は、これまでに得られた実大試験体、シャルピー衝撃試験片、CT試験片の破面様相と同様になった。

4. エネルギーと破面様相の関連

図-6に示したように、同一条件の場合、エネルギーは切欠き角度 $\theta=0^\circ$ に比べ、 $\theta=45^\circ$ のほうが低くなった。また、切欠き長さが増大するほどエネルギーは低下した。このようなエネルギー低下に対応して脆性破面率も高くなる傾向を示した。また、エネルギーは切欠き底半径が $R=0.25\text{mm}$ と鋭い場合に比べ、 $R=2.5\sim 10\text{mm}$ では高くなった。これに対応して、 $R=0.25\text{mm}$ ではシャルピー吸収エネルギー遷移温度の 10°C を下回ると脆性主体の破面となるが、 $R=2.5\sim 10\text{mm}$ では -30°C まで脆性破壊は殆ど起こっていないことが

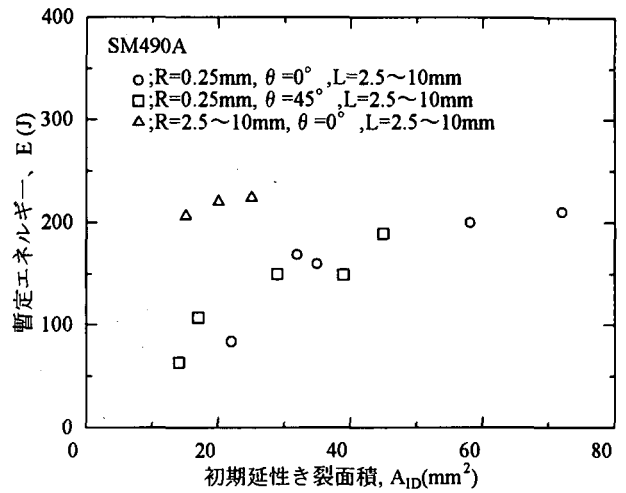


図-10 暫定エネルギーと初期延性き裂面積の関係

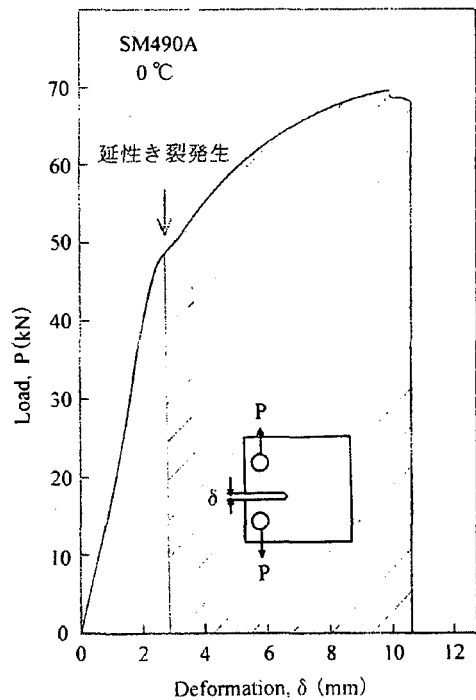


図-11 CT試験片で得られた荷重-変位曲線

わかる。

図-10に暫定エネルギーを脆性破壊に先行した初期延性き裂面積 A_{1D} に対して示す。脆性破面率が5%以下の試験片においては、初期延性き裂と最終の延性き裂との区別ができなかったため、図中には示していない。

暫定エネルギーと A_{1D} の関係は、切欠き底半径が鋭い $R=0.25\text{mm}$ の場合、試験温度、切欠き長さ、切欠き角度に関係なくほぼ一本の直線で表すことができる。

一方、切欠きが鋭い $R=2.5\sim 10\text{mm}$ の場合はこれらの関係より上側になった。この結果は鋭い切欠きを有する小型試験片に比べ、鈍い切欠きを有する実大試験体のエネルギーが高くなった図-1の傾向と一致する。

図-11はCT試験片による引張破壊試験において、延性き裂発生点を調べた結果である。図に示すように、確かに深く、鋭い切欠きを有するCT試験片では、延性き裂は早い段階で発生することが分かる。一方、切欠きの無い丸棒試験片では、延性き裂は破断直前まで発生しないことは良く知られている。

これらの結果は、小型試験片と実大試験体の差が延性き裂形成エネルギーと塑性変形エネルギーの比率の違いに起因するとする考えを支持している。

現在、このような考えの妥当性をさらに検証するために、板試験片において、引張り試験を途中で中断して試験片断面を観察する方法あるいはAE検出法等により、延性き裂発生点を特定する研究を進めている。

5. まとめ

SM490A鋼市販材について、切欠き長さ、切欠き底半径及び切欠き長さをパラメータにした小型板試験片を用い、引張破壊試験ならびに破面解析を実施することにより、これまで得られた構造用鋼の延性/脆性破壊挙動における小型試験片と実大試験体の関係を検証した。

エネルギーと延性き裂の関係において、鋭い切欠きを有する小型試験片では材料、試験温度、試験片形状に関係なく一本の曲線で表すことができた。一方、実大試験体の結果は小型試験片の結果より上側になった。この原因は小型試験片では、エネルギーの多くが切欠底の延性き裂形成エネルギーによって占められるのに対し、実大試験体では、破壊起点の切欠きが鈍いため、エネルギーは延性き裂形成エネルギーのみならず、延性き裂形成以前の多くの塑性変形エネルギーによっても占められるためであったと結論できた。

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：南部地震鉄骨構造建築物被害調査報告書(1995)。

- 2) 例えば、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④(1995)。
- 3) 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(1998), 139.
- 4) 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(1998), 165.
- 5) 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), 105.
- 6) 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, 第3回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, (2002), 119.
- 7) 松本由香, 山田 哲, 岡田 健, 井出匡俊, 竹内 徹, 竹内悦男, 小川信行, 秋山 宏：実大振動台実験における鋼構造柱梁接合部の破壊性状と変形能力評価, 日本建築学会構造系論文集, 第560号(2002), 181.
- 8) 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(2000), 29.
- 9) 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, 日本機会学会講演論文集, No. 01-1(2001), 419.
- 10) 竹内悦男, 松岡三郎, 蛭川寿, 中島快雄：実大振動台試験で破壊した鋼構造柱梁接合部の靱性評価における延性破壊領域の重要性, 日本鉄鋼協会講演論文集, Vol. 15-6(2002), 1221.