

溶接構造用鋼SM490Aの靱性に及ぼすひずみ履歴の影響

○竹内悦男¹・松岡三郎²・蛭川 寿³¹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)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)

This study aims at developing the toughness evaluation for real size components from small-scale specimens introducing micro fractography. Tensile fracture tests and Charpy impact tests were carried out of steel for welded structure SM490A using the specimens with strain history simulated like three dimensional loads. Fracture surface were observed by SEM. The relationship between energy and ductile fracture area for small-scale specimens was showed the unique curve, while the relationship between energy and test temperature was dependent on the strain history. Based on this curve, the toughness for full-scale specimen was discussed.

Key words: Toughness, Strain history, Ductile Fracture, Brittle Fracture, 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が生じ、これを契機に鋼の靱性に対する重要性が再認識されるようになった。著者らはこれまで構造物の延性/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^{1)~4)}に参加し、特にデータ蓄積が進んでいない破壊部のマイクロ破面解析^{5), 6)}を行った。

その結果、マイクロ破面解析から実大試験体の破壊起点、破壊進展経路、破壊応力の種類等が特定できることを示した。さらに、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ディンプル様相を特徴とする延性破面が必ず先行するパターンが存在することを明らかにした。この様相は、シャルピー衝撃試験片等の小型試験片の破面様相と同様であることに着目し、ディンプルで特徴付けられる初期延性き裂をパラメータにすると、実大の柱梁接合部等の靱性を小型試験片によるシャルピー衝撃試験結果と対応付けて検討できる可能性を明らかにした。

一方、構造物に地震動が作用する場合、構造物中には多軸性の荷重が掛かる部位が存在する。このため、靱性に対する多軸性ひずみ履歴の影響を把握することは重要である。

本研究では、靱性に対する多軸性を考慮したひずみ履歴の影響すなわち、部材がある方向に地震動あるいは作成時にひずみを生じた後、引続きその方向と同一あるいは異なる方向に荷重が負荷される場合の影響を小型試験

片によって検証する。試験は予ひずみ導入後、異なる方向に採取した試験片を用い、引張破壊試験とシャルピー衝撃試験を行い、並びにマイクロ破面解析を実施する。

2. 試験方法

供試材は溶接構造用鋼SM490Aである。引張破壊試験は幅50mm、厚さ12.5mm、切欠き長さ22.5mm、切欠き先端半径0.25mmのコンパクトテンションタイプ(CT)試験片を用い、容量100kNの引張試験機にて引張速度を3mm/分にして行った。シャルピー衝撃試験はJIS4号試験片(切欠き先端半径0.25mm)を用い、容量500J試験機にて行った。

図-1に試験片採取方法を示す。冷間圧延により素材(700mmx250mmx25mm)の圧延方向と一致する方向に25%と50%の予ひずみを導入した。その後、き裂進展方向が予ひずみ方向と一致する場合(L方向)、あるいはき裂進展方向が予ひずみ方向に直交する場合(T)の両者について、シャルピー衝撃試験片とCT試験片を採取した。25%予ひずみは鋼構造建築物の柱に多く用いられている冷間成形角形鋼管の成形時に導入される角部のひずみ量と同程度と考えら

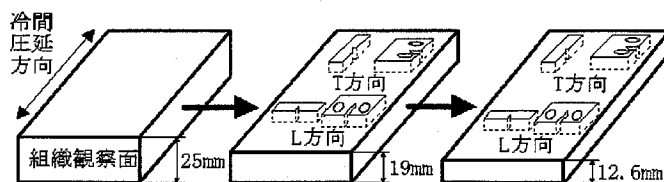
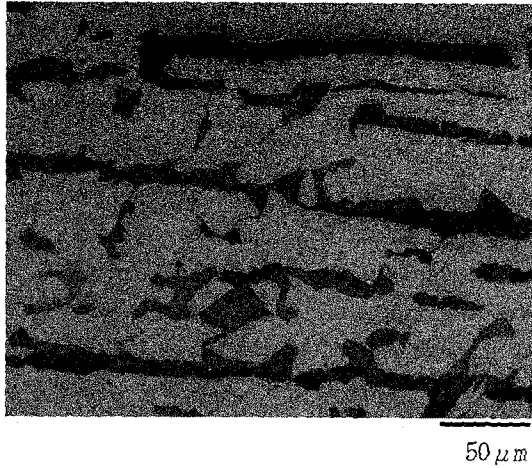


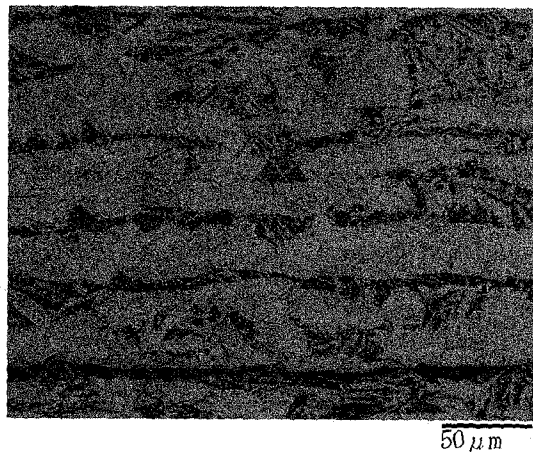
図-1 試験片採取方法

表-1 機械的性質

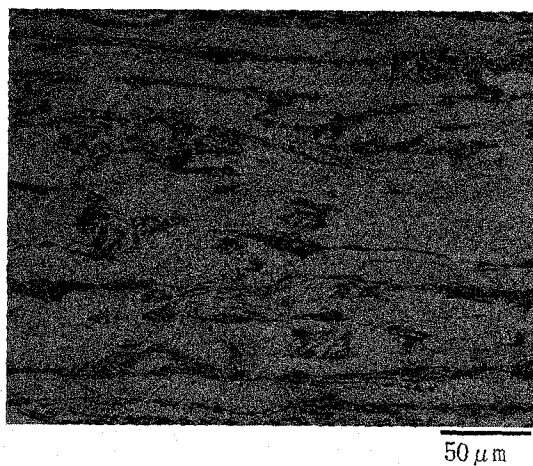
材料	試験温度 (°C)	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)	ビッカース硬さ HV
母材	24	425	569	24	173
25%予ひずみ	24	580	679	12	245
50%予ひずみ	24	713	779	9	267



(a) 母材

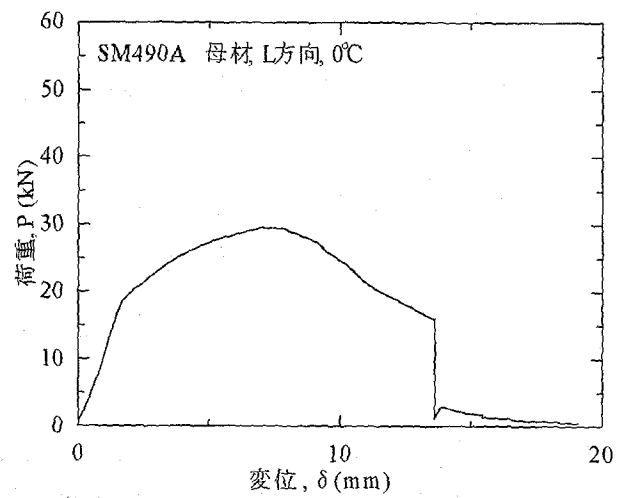


(b) 25%予ひずみ導入材

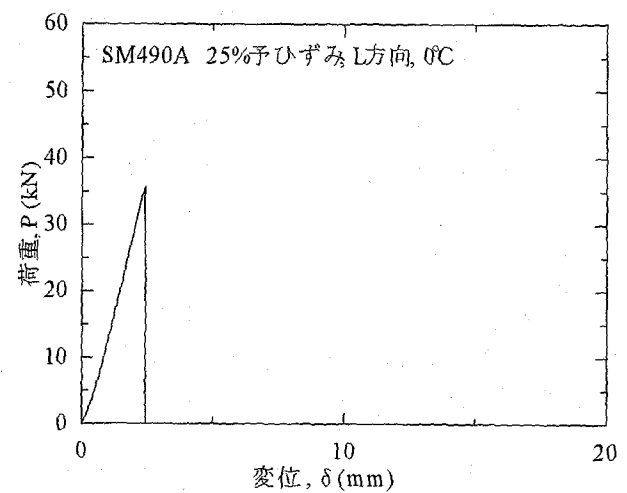


(c) 50%予ひずみ導入材

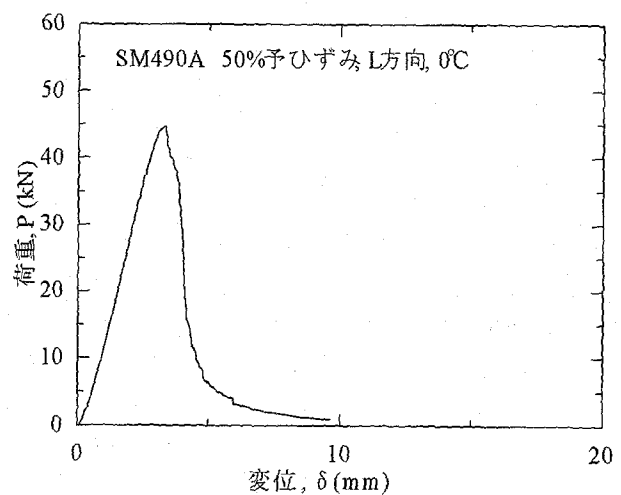
図-2 組織写真



(a) 母材



(b) 25%予ひずみ導入材



(c) 50%予ひずみ導入材

図-3 荷重-変位曲線の例(L方向, 0°C)

れる。表-1に供試材方向の機械的性質を示す。0.2%耐力は母材に比べて25%予ひずみ導入材で約1.4倍、50%予ひずみ導入材で約1.7倍と高くなっている。前報⁴⁾の振動実験で実大試験体に用いた冷間成形角形鋼管柱の角部表面近傍のビッカース硬さは約240で、25%予ひずみ導入材の硬さとほぼ同じ値となっている。図-2にL-T面（図-1の組織観察面）の組織写真を示す。母材、予ひずみ導入材ともにフェライト/パーライト組織である。しかし、予ひずみ導入材では母材に比べて予ひずみが大きくなるほど組織が圧延方向に引延ばされた様相を呈する。

3. 予ひずみの影響

(1) エネルギー特性

図-3にL方向の試験片の引張破壊試験で得られた荷重Pと荷重点変位 δ の関係を示す。表-1に示した降伏強度に対応し、弾性域は母材に比べて予ひずみ材のほうが大きくなっていることが確認できる。

図-4に図-3のP- δ 曲線下の面積として求めたエネルギーと試験温度の関係を全温度について示す。全温度域で予ひずみの影響が顕著に表れている。上部棚のエネルギーは母材に対して25%予ひずみ導入材で約60%、50%予ひずみ導入材では約30%に留まる。また、エネルギー遷移温度は25%予ひずみ導入材で約60°C上昇し、50%予ひずみ導入材では遷移域がほとんど消滅してしまう。

図-5にはT方向の試験片のシャルピー衝撃試験で得られたエネルギーと試験温度の関係を示す。シャルピー衝撃試験の結果も引張破壊試験の結果と同様に予ひずみの影響は顕著となる。

(2) 破面様相

a) マクロ破面様相

図-6に0°Cで得られたマクロ破面様相を示す。黒色の無特徴な部分が延性き裂領域、光沢のある山形模様の部分が脆性き裂領域である。

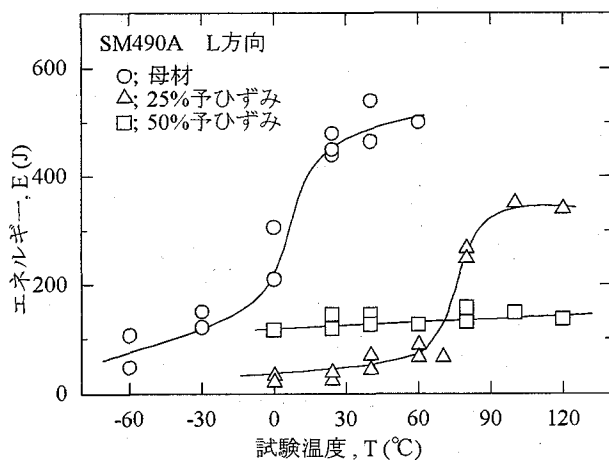


図-4 引張破壊試験で得られたエネルギーと試験温度の関係 (L方向)

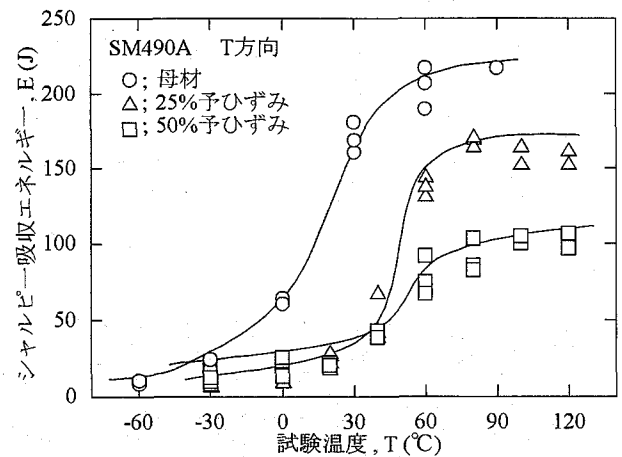


図-5 シャルピー衝撃試験で得られたエネルギーと試験温度の関係 (T方向)

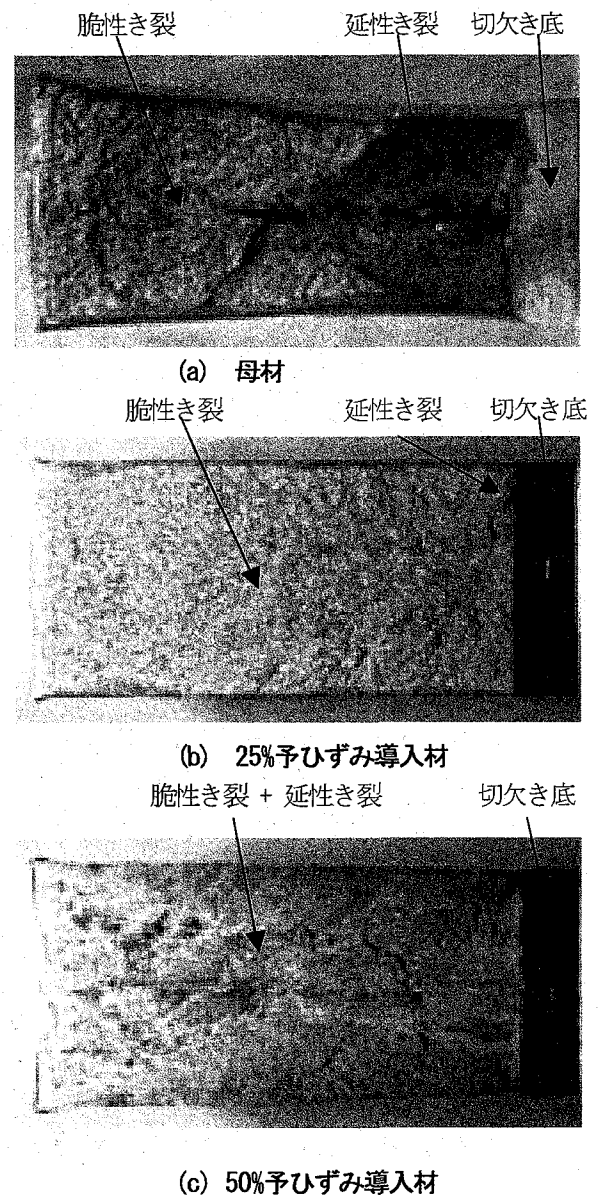
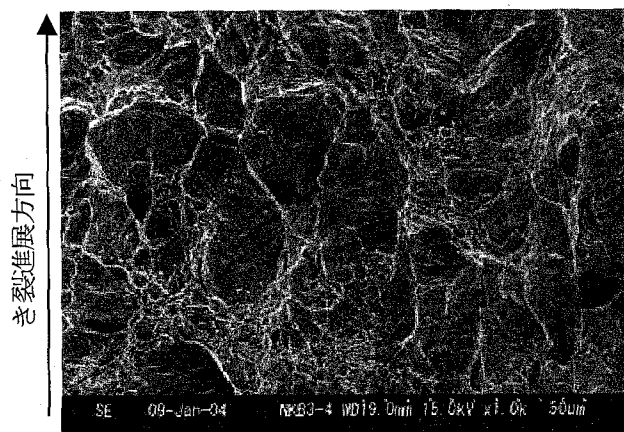


図-6 マクロ破面様相 (L方向, 0°C)

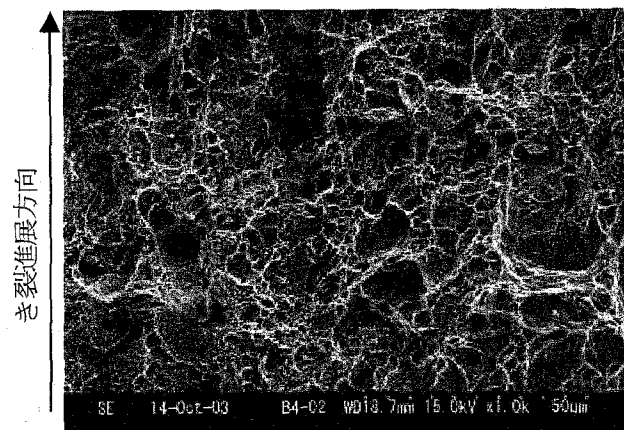
b) ミクロ破面様相

図-7に図-6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示す。延性き裂領域では図(a)に示す伸長ディンプルと図(b)に示す等軸ディンプルが単独あるいは混在する様相を呈し、脆性き裂領域では図(c)に示す川状模様のへき開様相を呈した。

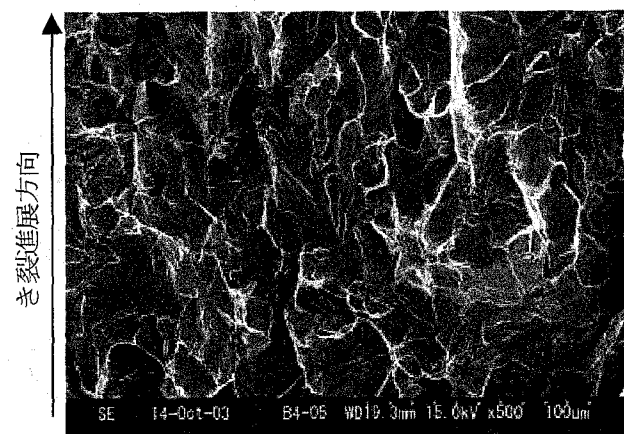
図-8に上述のミクロ破面様相を基に作成した破壊機構



(a) 伸長ディンプル



(b) 等軸ディンプル

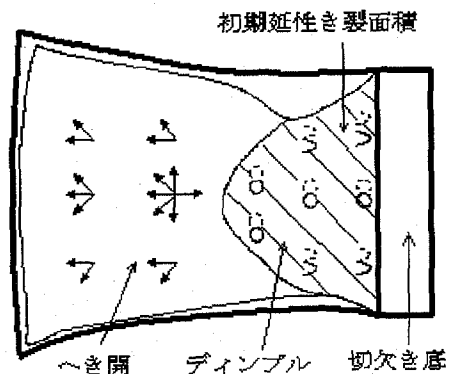


(c) へき開

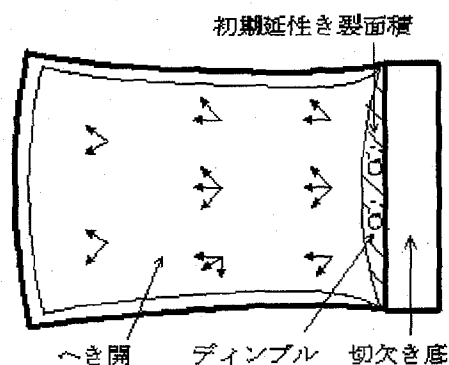
図-7 ミクロ破面様相

図を示す。図中の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。へき開領域には矢印で川状模様の方向を示す。

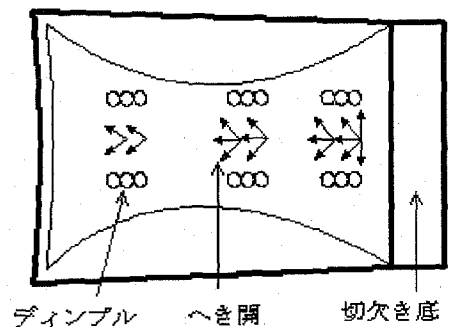
母材の場合、伸長型と等軸型が混在する大きなディンプル領域と川状模様のへき開領域が存在する。ディンプルは両破面共に紙面の左方向を向いた伸長ディンプルあるいは等軸ディンプルが形成されている。川状模様の方向からき裂進展方向が判明する。これまでに知られているディンプル形成機構⁷⁾を基にすると、ディンプル形状から応力の種類が判明する。さらに、両破面が同方向の伸長ディンプルの場合にはき裂進展方向が判明する。母材の場合、均一引張応力あるいは不均一引張(引裂き)応力によって切欠き底から延性き裂が進展した後、脆性き裂に移行して最



(a) 母材



(b) 25%予ひずみ導入材



(c) 50%予ひずみ導入材

図-8 破壊機構図 (L方向, 0°C)

終破壊に至ったことがわかる。

25%予ひずみ導入材の場合、母材と同様にディンプル領域と川状模様のへき開領域が存在する。しかし、ディンプルは等軸型が主体であり、その領域は母材に比べて著しく小さくなる。この場合、均一引張応力によって切欠き底か

ら延性き裂が僅か進展した後、脆性き裂に移行したことがわかる。

これらの材料に対し、50%予ひずみ導入材の様相は大きく異なった。破面全体に等軸ディンプル領域とへき開領域が層状に混在しており、切欠き底から延性き裂と脆性き裂が同時に進行したことがわかる。

以上、マイクロ破面解析により破壊機構図が作成できた。このようなマイクロ破面情報を蓄積することは今後の事故解析に役立つと考えられる。また、材料が少なくとも25%程度までのひずみ履歴を受けても、これまで実大試験体やひずみ履歴の無いシャルピー衝撃試験片で見られた様相、すなわち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と同様になることがわかった。

4. 異方性の影響

図-9に採取方向が異なる試験片の引張破壊試験で得られたエネルギーと試験温度の関係を示す。母材では殆ど異方性の影響は見られない。一方、25%予ひずみ導入材と50%予ひずみ導入材では、L方向のほうがT方向よりややエネルギーが低くなるが、異方性の影響はそれほど顕著でないといえる。破面様相においても異方性の影響は殆ど見られなかった。

5. エネルギーと初期延性き裂との関連

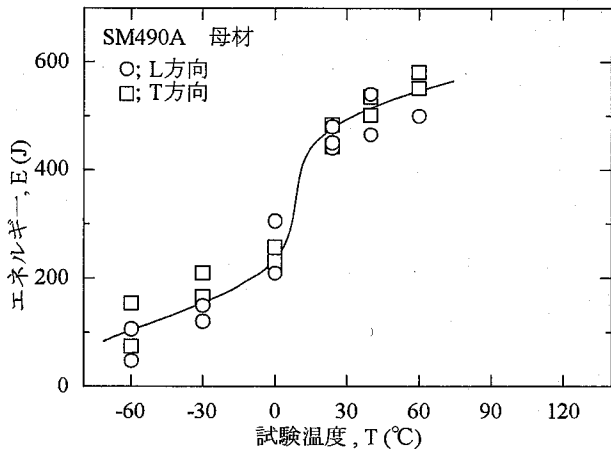
これまでの研究^{5),6)}により、ディンプルで特徴付けられる延性き裂をパラメータにすると、実大の柱梁接合部等の靱性を小型試験片によるシャルピー衝撃試験結果と対応付けて検討できる可能性を明らかにした。以下では、多軸性のひずみ履歴を受けた材料に対する拡張性を検討する。

図-10に荷重-変位曲線下の面積として求めたエネルギーEと脆性破壊に先行した初期延性き裂面積 A_D (図-8の斜線部) との対数関係を示す。ここで、50%予ひずみ導入材では初期延性き裂領域とへき開領域の区別ができなかったため、図中には示していない。図中には勾配1の線を実線で示す。

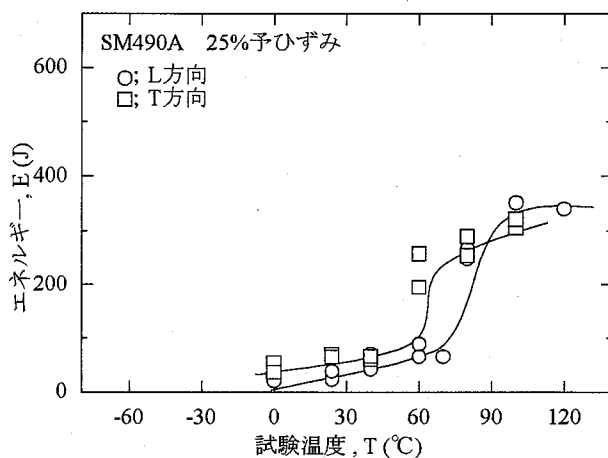
Eと A_D の関係は、予ひずみの大きさや試験片採取方向すなわち、ひずみ履歴に関係なくほぼ一本の直線で表すことができる。図中にはこれまで試験片形状や材質を変えて得たシャルピー衝撃試験結果と引張破壊試験結果の範囲を破線で示すが、本研究結果はその範囲内になっている。

一方、図中には大型振動試験において、冷間成形形鋼管柱の溶接角部から脆性破壊した実大試験体No. 10⁴⁾の関係を黒丸で示す。エネルギーは図-11に示す骨格曲線下の面積の内、破壊側(正側)の値を用いた。

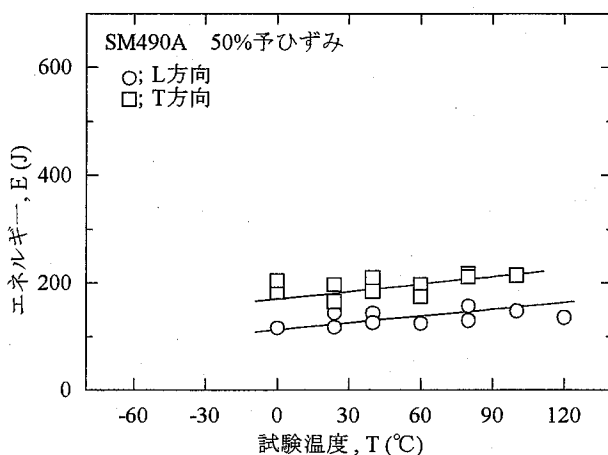
実大試験体では小型試験片に比べてエネルギーが約一桁高くなっているが、この原因は次のように推察される。シャルピー衝撃試験片とCT試験片の場合、深く鋭い切欠きを有するため、切欠き先端のひずみ集中が高く、延性き裂は荷重-変位関係の弾性領域を越えた早い段階で発



(a) 母材



(b) 25%予ひずみ導入材



(b) 50%予ひずみ導入材

図-9 引張破壊試験で得られたエネルギーと試験温度の関係における異方性の影響

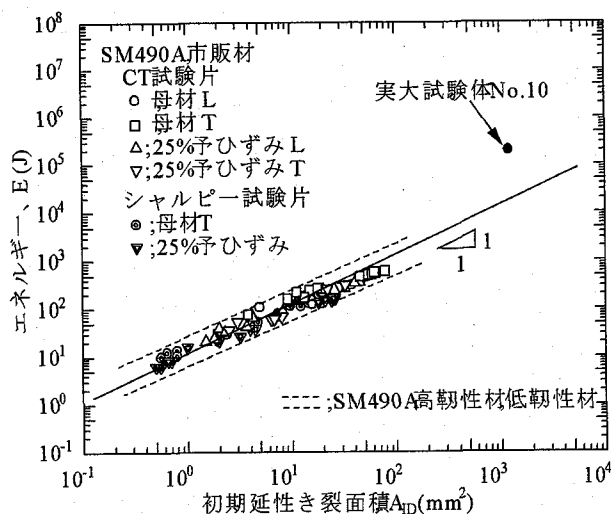


図-10 エネルギーと初期延性き裂面積の関係

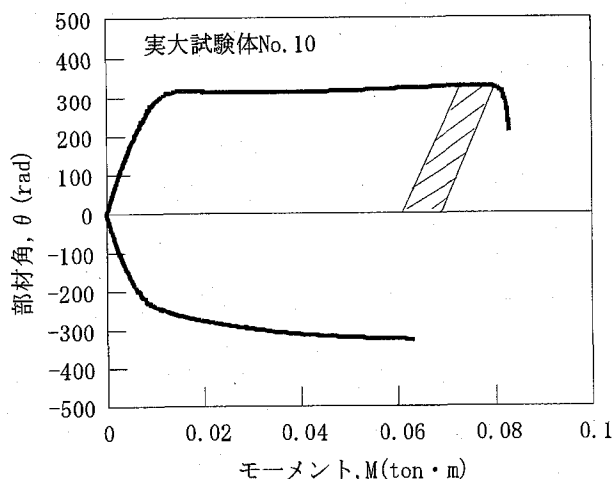


図-11 骨格曲線 [文献4]

生ずる。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、破壊起点となった溶接止端部の切欠きは上述の小型試験片に比べて鈍いため、破壊起点のひずみ集中が低く、延性き裂発生は遅くなる。図-11にモデル的に示すように、斜線部の延性き裂形成エネルギーは小さく、多くはそれ以前の塑性変形エネルギーで占められることになる。このため、図-10で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。

CT試験片を用いた引張破壊試験において、試験を中断してき裂発生状況を観察した結果によると、確かに本研究と同様な鋭い切欠きを有する試験片では、弾性域を逸脱した初期の段階で延性き裂が発生し、切欠き先端半径が2mm程度の鈍い切欠きを有する試験片では、延性き裂は破断直前まで発生しなかった。この結果は上述の考えを裏付けている。

このように、実大試験体では脆性破壊を導いたエネルギーは全エネルギーに対して極めて小さくなることが推測でき、構造物の靱性評価の際には、このようにエネルギーを分離して考える必要があることを示唆している。

6. 結言

靱性に対する多軸性ひずみ履歴の影響を小型試験片によって検証するため、採取方向が異なる予ひずみ導入試験片を用い、引張破壊試験とシャルピー衝撃試験ならびに破壊した試験片のマイクロ破面解析を実施した。得られた主な結果は次のようにまとめられる。

- (1) 靱性に及ぼす予ひずみの影響は顕著となった。上部棚のエネルギーは母材に対して、25%予ひずみ導入材で約60%、50%予ひずみ導入材で約30%に留まった。遷移温度は25%予ひずみ材で母材より約60℃上昇し、50%予ひずみ材では殆ど遷移域が消滅した。
- (2) ミクロ破面解析により破壊機構図が作成できた。この結果、材料が少なくとも25%程度までのひずみ履歴を受けても、これまで実大試験体やシャルピー衝撃試験片で見られた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パターンと同様になることがわかった。
- (3) 靱性に及ぼす異方性の影響は小さかった。
- (4) エネルギーと初期延性き裂の関係はひずみ履歴に関係なくほぼ一本の直線で表すことができた。この関係を基に、実大試験体では脆性破壊を導いたエネルギーは全エネルギーに対して極めて小さくなることが推測できた。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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, (1999), 133.
- 5) 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.
- 6) 竹内悦男, 松岡三郎, 蛭川 寿: 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, 第4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, (2003), 141.
- 7) Beachem, CD., Ed by Liebowitz, H., : Fracture I, Academic Press, Microscopic fracture processes, (1963), 243.