

株式会社 東芝

伊藤義康 永田晃則  
大飼元好 深倉寿一  
森 忠夫

[1] 緒言 一般に溶接部には溶込不足(LOP), 融合不良(LOF)などの溶接線方向に沿った二次元平面欠陥が生じやすい。最近, このような溶接欠陥をき裂と見なした溶接継手強度の破壊力学的評価が盛んに行われており, 溶接継手疲労限度が精度良く評価できることが示されつつある。しかし, き裂状の溶接欠陥を有する継手であっても負荷形態によっては必ずしも溶接欠陥が疲労破壊の起点とはなり得ず, 単に破壊力学的手法のみによって継手の疲労強度評価が出来るとは限らない。

本研究では平板の片面突合せ溶接を施した時に生じる溶込不足状欠陥を対象として, これら溶接継手部に繰返し不溶着面が開くような曲げ荷重が作用した時の溶接継手の疲労破壊挙動と強度を明らかにする。

[2] 実験 供試材料は板厚 32 mm の一般構造用鋼 (SS41) であり, L 型開先を施した後  $\text{CO}_2$  溶接を行った。また開先深さを 3 通りに変えることによって不溶着部深さを変化させた。突合せ溶接終了後 600℃, 3 分炉冷の溶接後熱処理を施し, 図 1 に示す 3 種類の試験片を切出し加工した。

実験は容量 5t の電気油圧サーボ式の疲労試験機を用い, 正弦波, 周波数 10~15 Hz, +18℃ において行った。また実験では不溶着面が開くような片振り定荷重振幅を 4 点曲げ負荷形式により与え, 疲労試験中, 試験片背面の長手方向ひずみを連続的に計測した。

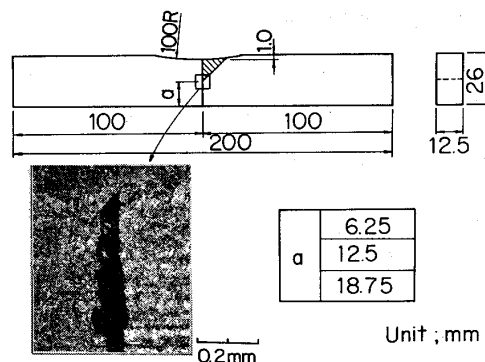


図1. 試験片形状と不溶着部先端

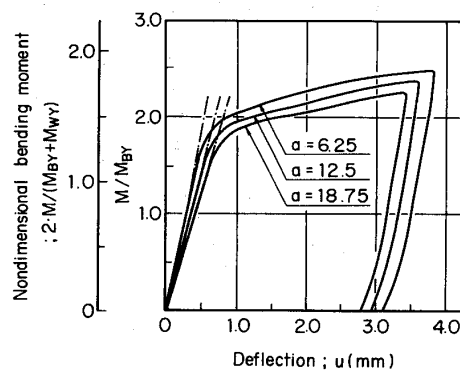


図2. 荷重-たわみ曲線

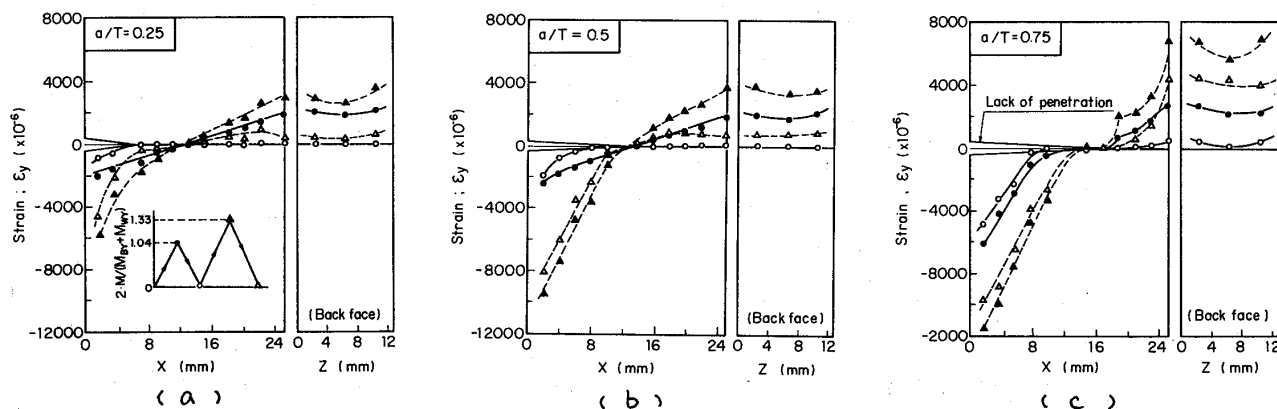


図3. 不溶部線上のひずみ測定結果

### [3] 不溶着を有する溶接継手の静的曲げ

**変形挙動** 不溶着部を有する溶接継手においては単に継手強度の低下のみならず、剛性、降伏荷重の低下など、変形特性によってその使用が制限される場合がある。図2は不溶着部を有する溶接継手の曲げモーメント-たわみ曲線に及ぼす不溶着部長さの影響を示したもので、溶接金属の強度が高いために継手の曲げ降伏強度は均質母材のそれよりも高くなる傾向にある。また降伏強度は不溶着部が深くなるほど若干低下する傾向にあるが顕著ではない。また曲げ剛性も不溶着部が深いほど低下する傾向にあるが、ごくわずかにある。図3は不溶着部線上、ならびに背面での試験片長手方向ひずみ  $\varepsilon_y$  の分布を示したもので、

(a)には板厚  $T$  に対する不溶着部深さ  $a$  の比が

0.25の場合、(b)  $a/T = 0.5$ , (c)  $a/T = 0.75$  の結果

を示す。 $a/T = 0.25, 0.5$ の結果において低負荷の場合には不溶着部の存在には関係なく、ひずみ  $\varepsilon_y$  分布は中立軸に対して線形分布を示す。これは曲げ負荷を受けることで不溶着面が完全に密着し圧縮応力を伝達するためで、そのために不溶着部深さによる顕著な剛性低下が認められないものと考えられる。一方、 $a/T = 0.75$ のひずみ分布からは不溶着部先端において引張のひずみ集中を生じている傾向が認められる。また背面のひずみ分布に注目すると板外縁において  $\varepsilon_y$  は最大となり、板幅中央部において最小となる傾向が認められる。

### [4] 片振り曲げ疲労試験によるき裂の発生挙動と強度

図4には負荷した外力を用いて計算した公称曲げ応力とき裂発生寿命との関係を示す。図から明らかなようにき裂発生強度は  $a/T$  が大きくなるほど低下する傾向にある。特に  $a/T = 0.75$  の疲労き裂発生強度が著しい低下を示している。これは  $a/T = 0.25, 0.5$  の試験片と  $a/T = 0.75$  の試験片とでその破壊形態が全く異なるためである。図5には各試験片についてき裂発生位置およびその伝播状況を示したマクロ写真を示す。写真から明らかなように  $a/T = 0.25, 0.5$  の場合については疲労き裂はいずれも不溶着部と反対面である背面で、しかも板外縁より発生し次第に板中央部へと進展する傾向にある。このようなき裂発生位置は図3で示した試験片長手方向の最大ひずみ発生位置と良好対応を示す。また  $a/T = 0.75$  の場合については疲労き裂は不溶着部先端から発生し伝播することが写真より明らかである。

### [5] 疲労き裂発生寿命の評価について

図6には試験片の不溶着部背面の板縁において計測した試験片

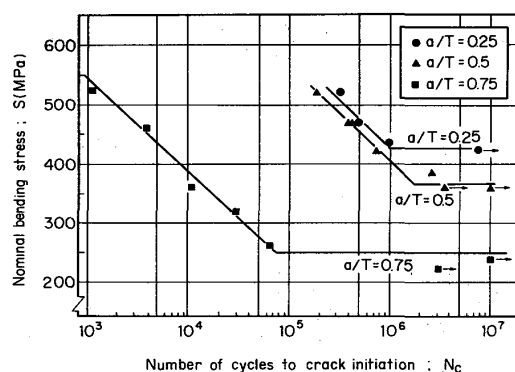


図4. 疲労強度に及ぼす不溶着部の影響

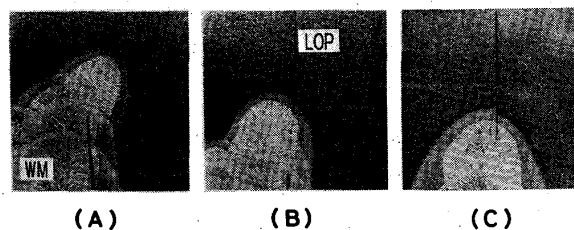


図5. 疲労き裂の発生・伝播位置

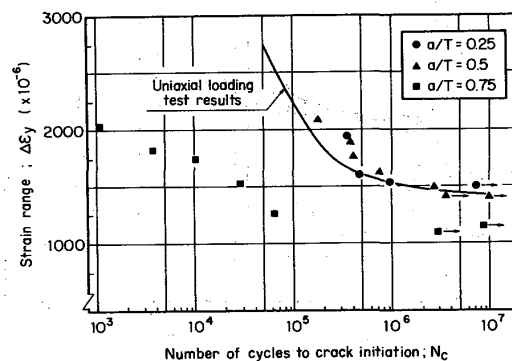
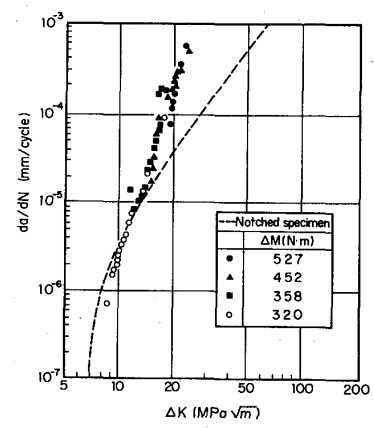
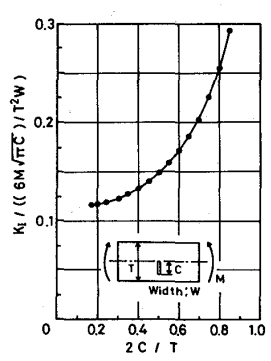


図6. ひずみ振幅-疲労き裂発生寿命関係

長手方向ひずみ範囲  $\Delta \epsilon_y$  を用いて図4の疲労き裂発生寿命曲線を整理し直した結果である。また図中に示す実線は溶接金属の完全両振り疲労試験結果を ASME CODE SEC.III と同様、考えうる完全片振りの場合に補正したものである。図のように疲労き裂発生が不溶着部先端からである  $a/T = 0.75$  の実験結果を除いて実験点は完全両振り疲労試験から推定された実線とほぼ良い一致を示す。図7. 応力拡大係数の算定



完全片振りの定荷重疲労試験において、 $a/T = 0.75$  の試験片の不溶着部先端から発生した疲労き裂について、応力拡大係数を図7より算定した時の疲労き裂伝播曲線を図8に示す。ところで応力拡大係数の算定にあたっては厳密には不溶着面の接触を考慮しておく必要がある。しかし、接触を考慮するためには接触面での摩擦係数を明確にする必要があるが現段階ではさわめて困難である。そこで本研究では工学的な簡便性を考え、圧縮応力側においては必ず変形が生じないで、連続体として変形すると考え図7中に示すようなモデル化により、有限要素法で応力拡大係数を算定した。図8中に示す破線は  $a/T = 0.25$  の試験を用いて不溶着部が開くような片振り引張荷重を加えることにより疲労き裂伝播試験を行った結果である。図から明らかなように疲労き裂の低伝播速度域においては両者の結果は比較的良く一致しており、図7で示したような応力拡大係数の簡便評価手法によっても、疲労き裂伝播特性は十分良く近似できることがわかる。高伝播速度域で実験値が一致しないのは  $a/T = 0.75$  試験片のリガメントが小さいためである。

[6] 考察 図6より不溶着部背面からの疲労き裂発生強度は試験片長手方向ひずみに注目することで、溶接金属の完全両振り疲労試験結果から定量的評価が可能であることが明らかとなった。また不溶着部先端からの疲労き裂発生特性は、特にき裂進展限界について、不溶着部をき裂と見なした破壊力学的な評価手法により近似的に推定可能であることが、図8の結果から推測される。

以上より、本実験で用いた試験片について疲労き裂発生強度に及ぼす不溶着部深さの影響を算定した結果と実験値をあわせて図9に示す。ただし、公称曲げ応力振幅は次式より算定。

$$\Delta S = E \cdot \Delta \epsilon_y \quad E: \text{縦弾性係数}$$

また、応力拡大係数は図7の有限要素法解析結果を用い、 $\Delta K_{th} = 7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  (図8参照) とした。

図から明らかなように本実験に用いた試験片では、 $a/T \approx 0.65$  を境に、それより  $a/T$  が小さいと不溶着部背面において、また  $a/T \geq 0.65$  の場合には不溶着部先端より疲労き裂が発生することが推定でき、このような簡便な寿命推定と実験結果とは比較的良く一致することがわかる。

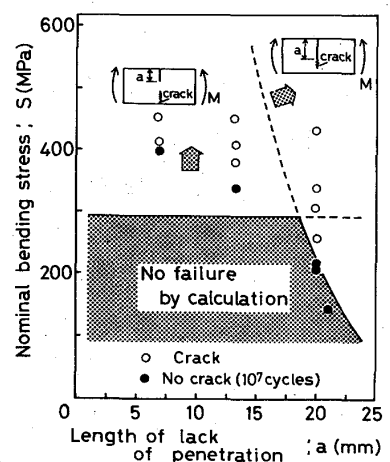


図9. 疲労き裂発生強度と不溶着部長さの関係