溶接材の二次元き裂進展シミュレーション*

菊池 正紀^{*1}, 小林 光夫^{*2}

Two-Dimensional Crack Growth Simulation across the Fusion Line

Masanori KIKUCHI and Mitsuo KOBAYASHI

Crack growth analyses of inhomogeneous CT (Compact Type) specimens are carried out by means of the two-dimensional finite-element method. The CT specimen is made of a welded plate of A533B and HT80-type steel. The fusion line exists perpendicular to the crack direction. By changing the ratio of the widths of the two metals, the three specimens are analyzed. Based on the experimental results, generation phase analyses are conducted. The J -integral is evaluated using several conventional equations, and their availabilities for inhomogeneous material are discussed. The results show that the effect of the fusion line is strong when it is located in front of the crack tip. The crack tip fields are compared with HRR (Hutchinson-Rice-Rosengren) solutions and their deviations from the HRR solutions are measured by the Q -factor. The change of the stable crack growth condition is discussed using Q -factor.

Key Words: Fracture, Inhomogeneous CT Specimen, Fusion Line, Stable Crack Growth, J -Integral, Q -Factor

1. はじめに

弾塑性破壊力学は J 積分とHRR解とをその基礎として活発な研究が行われてきた。しかし、実用構造物の強度・信頼性保証の上で常に大きな問題となってきた溶接部での破壊挙動の研究は、問題の複雑さのためにまだ十分研究が行われたとは言えないのが現状であろう。溶接部の破壊には、材料の非均質性と溶接残留応力とが大きな影響を持つものと思われるが、それらの影響はまだ十分解明されていない。この問題は、破壊に影響を及ぼすパラメータの数が均質材の破壊に比べて多いため、特に実験と数値解析とを注意深く行う必要がある。近年、日本溶接協会内にEPI小委員会(Elastic-Plastic Fracture of Inhomogeneous Materials, 主査: 矢川元基 東大教授)が設置され、多数の研究者の共同作業によりこの問題が実験的、数値解析的に検討されている。^[1-3]

本報ではEPI小委員会の活動の一貫として筆者らが行った、溶接線に垂直に存在するき裂を有するCT試験片の二次元有限要素法による安定き裂成長解析結果を紹介する。解析結果より、非均質材に対する簡易評価法による J 積分の有効性を検討し、またき裂進展にともなうき裂先端応力場の変化と破壊抵抗曲線との関係について考察した。

2. 解析モデル

解析対象とした材料は、A533B鋼とHT80鋼とを電子ビーム溶接したものである。溶接部の幅は3mmである。これより、図1に示すようなCT試験片を採取した。試験片幅 $w=50.0\text{mm}$ 、板厚 $B=19\text{mm}$ の標準CT試験片である。試験片の幅に占めるA533B鋼の比 $W1/W$ を0.3、0.6、0.8の三通りに変え、それらをAH03、AH06、AH08試験片と呼ぶことにする。き裂は溶接線に垂直に位置しており、初期き裂長さ a はAH03試験片で29.6mm、AH06試験片で32.4mm、AH08試験片で29.3mmである。AH06試験片ではき裂先端は溶接線の中央部から2.4mmだけHT80鋼内に入っている。したがってき裂進展開始後は、AH03とAH06試験片とはHT80鋼内を進展し、AH08試験片ではA533B鋼内を進展することになる。

図1 非均質材CT試験片

* 平成5年3月31日 第70期通常総会講演会において講演、原稿受付 平成5年5月17日。

^{*1} 正員、東京理科大学 (〒278 野田市山崎 2641)。

^{*2} 東京理科大学大学院。

図2には二つの材料の応力-ひずみ関係を示す。HT80鋼の降伏応力はA533B鋼のその約1.4倍である。それぞれの応力-ひずみ関係は次式で近似してFEM解析に用いた。

A533B steel:

$$\begin{aligned} \sigma &\leq \sigma_0; \quad \varepsilon = \frac{\sigma}{E} \\ E &= 206 \text{ GPa}, \nu = 0.3, \sigma_0 = 550 \text{ MPa} \\ \sigma &\geq \sigma_0 \text{ and } \varepsilon_p \leq 0.02153; \\ \varepsilon &= \frac{\sigma}{E} + \left\{ \left(\frac{\sigma}{E'} \right)^n - \left(\frac{\sigma_0}{E'} \right)^n \right\} \\ \sigma_0 &= 550 \text{ MPa}, n=2, E' = 206 \text{ GPa} \\ \sigma &\geq \sigma_0 \text{ and } \varepsilon_p \geq 0.02153; \\ \varepsilon &= \frac{\sigma}{E} + \left\{ \left(\frac{\sigma}{E'} \right)^n - \left(\frac{\sigma_0}{E'} \right)^n \right\} + \varepsilon_0^p \quad (1-1) \\ \sigma_0 &= 554.87 \text{ MPa}, \varepsilon_0^p = 0.02153 \\ n &= 10, E' = 850 \text{ MPa} \end{aligned}$$

HT80 steel:

$$\begin{aligned} \sigma &\leq \sigma_0; \quad \varepsilon = \frac{\sigma}{E} \\ E &= 206 \text{ GPa}, \nu = 0.3, \sigma_0 = 760 \text{ MPa} \\ \sigma &\geq \sigma_0; \\ \varepsilon &= \frac{\sigma}{E} + \left\{ \left(\frac{\sigma}{E'} \right)^n - \left(\frac{\sigma_0}{E'} \right)^n \right\} \quad (1-2) \\ \sigma_0 &= 760 \text{ MPa}, n=10, E' = 1105 \text{ GPa} \end{aligned}$$

図2 A533B鋼とHT80鋼の応力-ひずみ関係式

ここに、 σ_0 は降伏応力、 ε_0^p 、 ε^p は相当塑性ひずみである。またこれをRamberg-Osgood型の式で近似すると、A533B鋼については $\alpha=7.8$ 、 $n=8$ となり、HT80鋼では $\alpha=3.7$ 、 $n=12$ となった。後述するHRR解はこれを用いて求めている。

き裂進展解析は生成型解析を行った。すなわちEPIの他のメンバーにより実験的に得られたき裂長さとし荷重線開口変位との関係をき裂進展の基礎データとして用いた^[3]。図

3にはAH06試験片の解析に用いたデータとFEM解析の出力結果を示す。実験結果が忠実に再現されており、妥当な生成型解析が行われていることを示している。

図4には要素分割の一例を示す。これはAH06試験片のものである。き裂先端の最小要素寸法は0.24mmであり、節点反力解放によりき裂は一要素ずつ進展する。図中の番号を付した破線はJ積分を計算する積分経路である。6経路によりJ積分を計算している。

図3 AH06試験片の δ - Δa 関係

図4 AH06試験片の要素分割図

3. FEM解析結果

3.1 各種J積分の比較 図5には一例としてAH06の試験片の荷重-荷重線変位関係を示す。FEM解析は平面ひずみ条件で行っている。AH06試験片の解析結果は実験結果と比較的良く一致している。ここでは示さないが、AH03試験片の結果も比較的实验値と一致しているが、AH08試験片は実験値よりかなり高めの荷重が得られている。実験とFEM解析とが細部にわたって良く一致するわけではないのは、実験結果が除荷コンプライアンス法によりき裂長さを求めていることによる誤差と、FEM解析が二次元近似を行っていることによる誤差とが考えられる。したがって

AH08試験片のこの差を調べるためには、より精密な実験とそれに基づく再計算を行う必要がある。それは今後の課題としたい。

図6にはAH06試験片の J 積分値を経路毎に示す。 J 積分の定義式は、本来均質体に対して定義されており、積分経路が非均質体の界面と交差すると理論的には経路独立性が失われる。AH03とAH08試験片の場合、き裂先端と溶接界面とが離れているため J 積分経路は界面と交差しないが、AH06試験片では全ての経路が交差する。しかし、図6に示すように、き裂進展以前では、全ての経路に対して J 値はほぼ一定の値となっており、近似的に経路独立性が満足されている。著者の一人の解析によれば、ヤング率の異なる非均質材界面を J 積分経路が交差すると、経路毎の値は大きく異なったものとなり、適切な経路補正が必要となる^[4]。本解析では両者のヤング率は等しいとして計算しており、降伏応力のみが著しく異なっている。このような非均質体に対しては、近似的に J 積分は経路独立性が保たれることが分かる。なお、き裂進展後は、き裂先端に近い経路1-3の J 値が経路独立とならないが、これはき裂進展に伴う除荷が原因であり、均質体の場合にも同様の結果となる。

図7には三種類の解析による各種 J 積分値を示す。 J_{path} は経路積分の平均値であり、ここではき裂先端から離れた経路4-6の J 値の平均値を用いている。また J_{M-C} はMerkle-Cortenの簡便評価式^[5]、 J_D はErnstらによる進展き裂の J 値評価式^[6]、 J_M はその修正式^[7]である。これらの J 値簡便評価式は、本来均質体に対して定義されたものであり、こうした非均質部材で有効かどうかは検討を要する。図7(a)のAH03試験片の結果を見ると、き裂進展の全過程を通じて J_{M-C} と J_M は J_{path} と良く一致しており、 J_D も10%程度の違いしかない。このように、き裂の後方に非均質部が存在しても、前方には非均質部が存在しない場合、種々の簡便評価式は妥当な J 値を評価していることが分かる。き裂先端の極く近傍に非均質部があるAH06試験片や、き裂前方に非均質部があるAH08試験片などでは、簡便評価式と J_{path} との一致はこれほど良好ではなく、非均質部の影響が現れている。これらによれば、簡便評価式による J 値は実際の J 値を過小評価していることになる。しかし、その差は実用的に問題になるほど大きなものではなく、せいぜい十数%にすぎない。したがって、この程度の非均質性を持つ材料の溶接部の破壊力学的検討には、これらの簡便評価式によって

図5 AH06試験片の荷重-荷重線変位関係図

図6 AH06試験片の J 積分の経路独立性

(b) き裂進展後

(a) AH03

(b) AH06

(c) AH08

図7 3種類の試験片の J - δ 関係図

妥当な J 値を推定することが可能である。この溶接材は特に降伏応力の差の大きな二種類の金属を溶接している。例えば、原子炉圧力容器の溶接では、母材と溶接金属との差はこれほど大きくないから、簡便評価式による J 値は均質材の場合と同様の式を使用すれば良いことになる。

3.2 抵抗曲線の比較 数値解析の結果得られた J 値とき裂進展量 Δa との関係を図8に示す。ここにはA533B鋼とHT80鋼の均質CT試験片の結果も同時に示す。AH03試験片の結果とHT80鋼均質材の結果はほぼ重なっている。これはAH03試験片においてはき裂進展がHT80鋼内で生じ、A533B鋼はき裂の後方にあるので当然である。しかしAH06試験片の結果は同じHT80鋼内でき裂が進展しているにもかかわらず、HT80鋼均質材の結果よりも高い J 値を示している。また、AH08試験片においても、き裂進展はA533B鋼内で生じているが、 J 値はA533B鋼均質材の結果より大きくなっている。AH08試験片ではき裂先端から溶接線までは比較的距离があるにもかかわらず、溶接線の影響が明瞭に現れている。これはAH06、AH08試験片において、見かけ上材料の靱性値が増加したことを意味している。図9には実験によって得られた同様の関係を示す^[8]。全体の傾向は図8と良く似ている。

図10にはAH03試験片とAH06試験片のき裂進展過程でのCTOAの変化を示す。ある程度き裂が進展した後はCTOAはほぼ一定の値をとり、安定き裂進展が定常状態で生じていることを示している。すなわちこれが臨界CTOAであると考えられる。しかし、両者の試験片ではき裂は同じ材料中を進展しているにもかかわらずCTOA値には大きな違いが認められる。 Δa が1mmから2mmの範囲では両者の比は約1:2となり、AH06試験片の方が2倍程度大きい。図8の抵抗曲線においても J 値はAH06試験片が2倍程度大きくなっている。AH08試験片についても同様にCTOA値はA533B鋼均質材のそれより1.5倍程度大きくっており、CTOA値の違いと J 値の違いは対応している。

3.3 Qファクタによる検討 非均質部の存在がもたらすこのような大きな違いは、き裂先端の特異場とも関係するものと思われる。図11はAH06試験片のき裂進展にともなうき裂先端応力場の変化を示したものである。き裂進展量が小さいうちは応力場はHRR解と良く一致しているが、き裂進展が進むにつれてHRR解から離れていく。破壊が J 積分に支配される条件はき裂先端応力場がHRR解と一致していることであるから、AH06試験片ではこの条件が次第に成立しなくなっていくことが分かる。き裂先端応力場がHRR解と異なる場合、破壊は J 積分のみではなくHRR解との差を定量的に表現したパラメータにも支配される、との提案がO'Dowdらによってなされている。これがQファクタである^[9,10]。Qファクタは次式で定義される。

$$Q = \frac{\sigma_{\theta\theta} - (\sigma_{\theta\theta})_{HRR}}{\sigma_0}, r = \frac{2J}{\sigma_0}, \theta = 0 \quad (2)$$

ここで、 σ_0 は降伏応力、 $(\sigma_{\theta\theta})_{HRR}$ は $\sigma_{\theta\theta}$ のHRR解である。また Q をき裂先端からの距離 $r = 2J/\sigma_0$ で定義しているのはき裂先端のプロセスゾーン内の量を評価するためである。

図12にはこの定義によるQファクタの変化を示す。AH03試験片ではQファクタはほとんど変化せず、ほぼ0となっている。これはき裂進展によってもき裂先端応力場がHRR解と良く一致していることを示している。これに対してAH06試験片とAH08試験片では Q は負の値となっている。特にAH08試験片では Q は絶対値が著しく大きくなっている。このように、図8の抵抗曲線において均質材と大きな違いが生じた試験片ではQファクタが大きく変化している。すなわちQファクタがこれらの試験片の破壊挙動に深く関係していることが推測できる。

図13はQファクタを評価した同じ位置での応力三軸度を調べたものである。分布傾向はQファクタと全く一致している。すなわちここで解析した試験片においては、安定き裂進展過程でもQファクタは応力三軸度と一対一に対応している。応力三軸度はディンプル破壊におけるボイドの発

図8 数値計算による J - Δa 関係図

図9 実験による J - Δa 関係図

図10 AH06とAH03試験片のCTOAの変化

生、成長を支配するパラメータであり、これが小さいことは延性破壊が生じにくいことを意味している。すなわち AH06、AH08試験片においては、き裂が進展するにつれて応力三軸度が急速に低下するために延性破壊が生じにくくなり、結果的に見かけ上の J 値が上昇したと思われる。このように、 Q ファクタを用いることで J 値の大きな変化が理解できる。

ここでAH08試験片において注目すべき点は、き裂が1mm程度進展したところで応力三軸度が負になっていることである。そこでAH08試験片のリガメント内での $\sigma_{\theta\theta}$ の分布を調べると図14を得る。図中の縦の一点鎖線はその時の溶接界面の位置を示す。 Δa が1mm程度までは Q を定義する位置、 $r/(J/\sigma_0)=2$ 、はA533B鋼内に存在している。しかし、き裂がさらに進展すると Q を定義する位置は隣接するHT80鋼内に入ってしまう。また Q の値は $r/(J/\sigma_0)$ により大きく変化している。本来 Q を定義する位置は、材料が均質体であり、かつ Q は $1 < r/(J/\sigma_0) < 5$ の範囲でほぼ一定値をとるとの前提で、プロセスゾーン内の適切な位置、ということ選ばれている。しかしこのケースのように、その位置がき裂先端の存在する材料に隣接する異材内にあり、かつ Q の値が大きく変化する時、 Q の評価法が妥当なものであるかどうかは検討を要する。 Q はまだ提案されて日の浅いパラメータであり、今後こうした点での検討をふまえて J と

Q を用いた非均質材への破壊強度評価法に関する検討を行いたい。

Shihらは試験片形状が異なる同じ材料の試験片でも見かけ上の破壊靱性値が異なるという実験結果の説明を J - Q 理論により説明する試みを行っている。

彼らはこの現象はき裂先端での塑性変形の拘束効果によるものであるとして、 Q を用いて拘束効果を評価する試みを行った^[11]。すなわち、拘束が無い場合の J 値を基準値 J_0 として、 Q ファクタを考慮した破壊時の J 値は次式で表されるとした。

$$J_c = J_0 \left(1 - \frac{Q \sigma_0}{\sigma_c} \right)^{n+1} \quad (3)$$

これはき裂先端での応力がある臨界値に達すると破壊が生ずるとのKnottらの仮定^[12]を基礎にしたものである。ここではこの式を本解析結果に適用してみる。まず、それぞれの鋼材の均質材における安定き裂進展開始時の応力三軸度 $\sigma_{kk}/3$ を σ_c と仮定し、図12の Q を用いて(3)式から非均質材の J_c 値を推定してみた。また、 J_0 としてFEM解析におけるき裂進展開始時の J 値を用いた。結果を図15に示す。き裂が進展するにつれて Q の絶対値が増加していくAH06、AH08試験片では J 値が急増していくこと、またAH03試験片とHT80均質体の結果はほぼ一致していること等の定性

図11 AH06試験片のき裂先端応力場の変化 図12 き裂進展中の Q ファクタの変化

図13 き裂進展中の応力三軸度の変化

図14 AH08試験片のリガメント上での $\sigma_{\theta\theta}$ の分布

図15 き裂進展中の靱性値 J_c の変化

的な点では、図15の結果は図8と良く対応している。しかし J 値の増加傾向は図8のそれより著しく大きく、(3)式そのままではここで考えている現象を定量的に説明することはできない。すなわち非均質性の影響を考慮した破壊強度評価法の開発が今後の課題である。

4. 結言

降伏応力の大きく異なる二種類の金属の溶接材中のき裂進展解析を行った。得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) ここで考えた程度の非均質材では、簡便評価式により妥当な J 値を評価できる。
- (2) 溶接界面の位置により、抵抗曲線における J 値は大きく変化する。AH06とAH08試験片においては、 J 値とCTOA値が均質材のそれより著しく増加した。
- (3) こうした変化は、 Q ファクタの変化と対応している。 Q ファクタは延性破壊に密接に関連しているパラメータであることが示された。
- (4) 非均質材において Q ファクタを適切に定義・評価し、強度評価に利用する方法については今後の検討課題である。

謝辞

本研究は、電力会社、原子力メーカー、米国NRC、マーチン・マリエッタ社(Subcontract No.19X-SD561)からの資金援助のもとに(社)日本溶接協会のEPI小委員会で行われた。貴重なご意見、ご討論を頂いた小委員会委員各位に感謝したい。

参考文献

- [1]. EPI Subcommittee. JWES-AE-9004 (1990)
- [2]. EPI Subcommittee. JWES-AE-9104 (1991)
- [3]. EPI Subcommittee. JWES-AE-9204 (1992)
- [4]. H.Miyamoto and M.Kikuchi, Numerical Method in Fracture Mech., Eds. by D.R.J.Owen and A.R.Luxmoore,(1980),pp.359-370
- [5]. J.G.Merkle and H.T.Corten, A J-Integral Analysis for the Compact Specimen, Considering Axial Force as well as Bending Effects, Transaction of the ASME,(1974),pp.286-292
- [6]. H.A.Ernst, P.C.Paris, and J.D.Landes, Estimations on J-Integral and Tearing Modulus T from a Single Specimen Test Record, ASTM STP 743,(1981),pp.476-502
- [7]. H.A.Ernst, Material Resistance and Instability Beyond J-Controlled Crack Growth,ASTM STP 803,(1983)I-191-213.
- [8]. EPI Subcommittee. JWES-AE-9304 (1993)
- [9]. O'Dowd,N.P. and Shih,C.F., J. Mech. Phys. Solids, 39(1992),989
- [10]. O'Dowd,N.P. and Shih,C.F., J. Mech. Phys. Solids, 40(1992),939
- [11]. O'Dowd,N.P.and Shih,C.F., "A Fracture Mechanics Approach based on a Toughness Locus", for presentation in TWI/EWI/IS International Conference on Shallow Crack Fracture Mechanics Tests and Applications Cambridge,UK,September,1992
- [12]. Ritchie,R.O., Knott, J.F. and Rice,J.R., Journal of Mechanics and Physics of Solids,21(1973),395