オーステナイト系ステンレス鋼ならびにその溶接継手における応力腐食割れ伝播特性の破壊力学的評価に関する研究 (第2報)*

—応力腐食割れ伝播特性におよぼす荷重形式の影響について—

向井 喜彦** 村田 雅人** 福嶋 寿文***

An Application of Fracture Mechanics to Stress Corrosion Cracking in Austenitic Stainless Steels and Their Welded Joints (Report II)*

—Effect of Loading Type on Crack Propagation Behavior—

by Yoshihiko Mukai**, Masato Murata** and Hisafumi Fukushima***

To study the applicability of fracture mechanics to stress corrosion cracking of SUS 304 stainless steel in 42 % MgCl_2 solution (143°C), three different types of tests i.e, K increasing, constant and decreasing type have been performed. It was made clear that crack propagation rate, da/dt was well characterized by K value in almost the same way in spite of the difference of testing types. Namely, the correlation curve between da/dt and K value could be divided roughly into two regions, regions I and II. In region I, da/dt was approximately proportional to the square of K value and in region II, after discontinuous dropping of da/dt , da/dt increased again with K increasing. In addition, it was confirmed from the result of K decreasing type test that threshold stress intensity factor for stress corrosion cracking, K_{ISCC} was nearly equal to $10 \text{ kg}\cdot\text{mm}^{-3/2}$ in this combination of environment and material. From the observation of crack appearance, it was made clear that crack grew along single path in region I but it branched almost into two cracks in region II, so that the dropping of da/dt in region II would be caused by decreasing of K value with crack branching.

1. 緒 言

第1報においては, CB 試験片 (Canti-lever 型試験片) による一定曲げモーメント試験 (き裂の進展とともに K が増加していく型) を例にとり, 応力腐食割れ伝播過程を破壊力学的に取り扱うことが可能であることを明らかにした。そして, その伝播速度 da/dt は正味応力, σ_{net} よりも応力拡大係数 K 値により, より厳密に特徴づけられることを明示した¹⁾。しかし, 実際の構造物では, 曲げ荷重や引張り荷重など荷重形式もさまざまであり, 又, き裂の伝播に伴い K が増加する場合のみではなく K が減少する場合やあまり変化しない場合などが考えられる。

そこで, 本報においては実際の構造物の応力腐食割れき裂伝播寿命を推定するための基礎的資料を得る目的で

種々の荷重付加様式ならびに, 静的な K 値の変化特性下におけるき裂伝播特性を検討した。また, それぞれのき裂の形態を観察することにより, そのき裂伝播特性の現象論的な解釈を試みた。

2. 供試材料ならびに実験方法

供試材料は, 第1報で示したのと同じ SUS304 鋼で, 同じ条件の溶体化熱処理を行ったものを使用した¹⁾。

試験片は Fig. 1 に示す3種類のものを用意した。き裂の進展途中の K 値は図中に示す式により算定した^{2,3)}。

試験方法は, き裂の進展にともない K が増加する K 増加型試験として, (a) の試験片に曲げ, 又は引張りの一定荷重をかける場合と, (b) の試験片に引張りの一定荷重をかける場合の3種類を行なった。また, き裂の進展に関係なく, K 値がほぼ一定に保たれる K 一定型試験には, (c) に示す tapered DCB 試験片を用い一定荷重により K 値をほぼ一定に保った。き裂の進展にともない K 値が減少する K 減少型試験については, (c) の tapered DCB 試験片を用い荷重点における変位を拘束すること

*原稿受付 昭和53年4月19日 (昭和52年度春季全国大会にて発表)

**正 員 大阪大学工学部 Member, Faculty of Engineering
Osaka University

***正 員 住金大径鋼管(株) Member, Sumikin Weld Pipe
Company Limited

(All dimensions in mm)

Fig. 1 Dimensions of test specimens and their stress intensity factor, K value

Fig. 2 K variation features in several type tests i.e., K increasing, constant and decreasing type

により、き裂の進展とともにK値が減少するようにした。それぞれの試験片におけるKの変化特性を Fig. 2 (a) (b) (c) に示す。ここで、Kの減少特性については、コンプライアンスによりエネルギー解放率を算定することによって求めた。

腐食環境としては、第1報と同様、沸騰 42% $MgCl_2$ 水溶液 (143°C) を用いた。き裂長さは、第1報で示したように試験片表面でのき裂長さと代表のき裂長さと見なすことができる¹⁾ので、試験途中のき裂長さは、22倍の光学顕微鏡により連続測定した。

3. 実験結果ならびに考察

3.1 各種荷重形式における応力腐食割れ伝播特性のK値による評価

Fig. 3 (a)(b)(c) は、K増加型試験として切欠曲げ、片側切欠引張り、両側切欠引張りの3つの荷重負荷様式の試験におけるそれぞれのき裂長さと時間の関係ならびに第1報に示した方法により求めた fitting curve (a-t 曲線) を示したものである。Fig. 4 (a), (b) は、それらの a-t 曲線の接線勾配より求めたき裂伝播速度 da/dt を正味応力 σ_{net} とK値により整理した代表例を示したものである。このように σ_{net} で整理した場合、データは著しい分散を示すが、K値によるとはほぼ一義的に表わせる。

しかし、領域IIにおける伝播速度は荷重形式によりわずかであるが変化するようにである。また、領域IからIIへ遷移するK値は荷重形式の影響はあまり受けない。次に、K一定型の a-t 曲線を Fig. 5 に示す。Fig. 6 は、それを $da/dt-K$ 関係に整理したものである。また、図中の破線はK増加型のそれを示す。このように、K一定

Fig. 3 Crack length vs. testing time in several loading type tests (K increasing type tests)

Fig. 4 (a) Crack growth rate (da/dt) vs. net stress
(b) Crack growth rate (da/dt) vs. K value

型の伝播特性は、K増加型のものとほぼ一致する。K減少型の $a-t$ 曲線ならびに $da/dt-K$ 関係を Fig. 7, Fig. 8 に示す。このようにK減少型では、初期K値、 K_{in} を領域 I 内のK値で開始すれば、 $(da/dt)_I$ はK増加型、一定型のそれと一致するが、領域IIから開始した場合、 $(da/dt)_I$ はK増加型、一定型のそれよりも若干低い速度でK増加型、一定型のき裂伝播特性にK値が低下するに従って漸近する。また、K減少型において $K=15 \text{ kg mm}^{-3/2}$ から da/dt は急激に低下し、 $K=10 \text{ kgmm}^{-3/2}$ では、10000 分保持してもき裂の進展は全く見られなかった。すなわち、応力腐食割れ進展に対する限界の応力拡大係数、 K_{ISSC} は、この場合存在するものと工学的見地から見なすことができるようで、その値はほぼ

Fig. 5 Crack length vs. testing time in K constant type test

$K_{ISSC} \approx 10 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ であった。

Fig. 9 は、K増加型、一定型、減少型で得られた以上の特性結果を模式的に示したものである。このように、K増加型、一定型では領域IからIIへ遷移するときに著しい不連続的な現象が見られるが、減少型では、 K_{in} が領域IIで始まるときには、連続したなだらかな曲線となる。

以上より、応力腐食割れ伝播速度は、K増加型、一定型および、 K_{in} が領域IにあるK減少型において、K値により一義的な評価が可能であることが明らかになった。 K_{in} が領域IIより開始するK減少型試験において

Fig. 6 Crack growth rate (da/dt) vs. K value in K constant type test

Fig. 8 Crack growth rate (da/dt) vs. K value in K decreasing type test

Fig. 7 Crack length vs. testing time in K decreasing type test

Fig. 9 Schematic view of the comparison of crack growth rate vs. K curves in K increasing, constant and decreasing type tests

は、わずかにその特性は異なるがこの点については、後に述べる。

3.2 応力腐食割れ伝播特性の各領域におけるき裂の様相について

42% MgCl_2 水溶液中における応力腐食割れ伝播特性は、 da/dt , K 関係線図において大きく2つの領域に分類できた。ここでは、これらの領域におけるき裂の形態

を観察することによりそれらの領域が生ずる原因を現象論的に検討した。

まず、応力腐食割れ破面の様相を走査電子顕微鏡により試験片中央部を観察したものを Fig. 10 に示す。このように領域 I, II とともに典型的な fan shaped pattern を示し、Dimple など機械的な破壊の跡は認められず、

Fig. 10 Fractographs of stress corrosion cracking of SIUS 304 steel in 42% MgCl_2 solution (143°C)

Fig. 11 Appearance of stress corrosion crack growth in surface and midsection of test specimen

破面的な様相からは、その破壊様式に差は見られなかった。そこで、さらに試験片内部のき裂伝播状態を知るために試験片を板厚方向にスライスした。それぞれの位置におけるき裂伝播の様相を Fig. 11 に示す。このように試験片外部は単一き裂であるが内部では板厚中央部において巨視的な分岐がおこっている。この分岐開始時のK値は $40\sim 45 \text{ kgmm}^{-3/2}$ であり、領域ⅠからⅡへ遷移するときのK値とよく一致している。そこで、分岐現象とき裂伝播速度の対応関係について検討した。

Fig. 12 は、SUS304 鋼の 42% MgCl_2 水溶液 (143°C) 中におけるき裂進展の状態を示したものである。このように、き裂の分岐は主き裂の分岐（巨視的分岐）とそれとともなう 2 次き裂的な分岐（微視的分岐）の 2 種類に分類できる。そこで分岐頻度とK値の相関性を見るために同図に示すように、スリット方向に対し直角の line がき裂と交わる回数を求めた。Fig. 13 にき裂伝播特性と分岐頻度の関係を示す。また、図中には主き裂の分岐もあわせて示す。このように、領域Ⅰでは主き裂は 1 本でありそれが内部で 2 本に分岐すると同時に領域Ⅱが開始する。また、微視的分岐頻度は、領域ⅠではK値の上昇とともに高くなり領域ⅠからⅡへ遷移する点で最大となる。さらに、領域Ⅱになるとその分岐頻度は低下している。このことはすなわち、単一き裂の場合に

Fig. 12 An example of measuring the frequency of crack branching

Fig. 13 Relation between crack growth rate (da/dt) vs. K curve and the frequency of crack branching

は、2 次き裂頻度がK値の上昇とともに高くなりK値との間に相関関係を有するものとみなすことができる。しかし、領域Ⅱでは、主き裂が分岐するため、種々の分岐き裂の応力解析の結果より明らかにされているよ

うに^{4,5)}、き裂先端部における実効のK値が低下する。このため、その2次き裂頻度も低下したものと考えられる。つぎにき裂進展の様相であるが、試験片の各位置におけるき裂面の変化を Fig. 14 に示す。領域Ⅰではき裂面は平坦であるが領域Ⅱでは分岐がおりき裂面は曲面を呈する。このことは、領域Ⅱにおける塑性変形様式が領域Ⅰと異なり、shear 型の様式が混合するためと考えられるがこの詳細については、また後に述べる。

Fig. 14 Schematic view of crack growth in surface and midsection of test specimen

以上より、応力腐食割れ伝播特性において、領域Ⅰではき裂は巨視的に単一き裂であり、 $da/dt-K$ 関係は試験法によらず一義的にあらわされる。領域Ⅱは単一き裂が分岐することによりき裂先端部の実効のK値が減少する。分岐は、最初試験片中央部で起こり全体に貫通した形では生じなかったが、試験片中央部ではこのためにKの急激な低下が生じ、き裂伝播速度は低下する。さて、第1報でも示したように、き裂深さは、試験片表面、内部ともあまり大きな変化は見られなかったことから、試験片全体の伝播速度は、中央部の遅い伝播速度に束縛され、やはり、低下することが考えられる。すなわち、試験片表面で観察した急激な伝播速度の低下は、試験片内部の状況をよく反映しているものと考えられ、試験片全体の伝播速度をほぼ代表しているものと見なすことができる。以上の理由により、き裂伝播速度は一担低下し、さらにき裂が成長するにつれてまた実効のK値は増大していくので、き裂伝播速度は再び上昇していくが、これは領域Ⅱのより高いKの範囲に属する。

さて、Kの増加型、一定型とK減少型のき裂伝播特性が異なるのは、K減少型で領域ⅡのK値で実験を開始した場合、き裂は初期から分岐をおこし実効のK値は低下する。領域ⅠのK値までKが減少してもき裂が分岐しているため増加型の単一き裂の場合にくらべて実効のK値は低いのでき裂伝播速度も低くなる。

この現象をふまえたうえで、応力腐食割れ伝播特性は

K値により、特に領域Ⅰ上で精度よく定量評価できることが明らかになった。また、領域Ⅱにおいては、き裂が内部で分岐していることから、表面でのき裂長さで算定したK値は見かけのK値となるので、この領域の伝播速度を精度よく評価するためには、分岐によるK値の変動に対して、さらに詳しく検討する必要がある。

4. 結 言

(1) 荷重付加形式をK増加型として、切欠曲げ、片側切欠引張り、両側切欠引張りなどき裂前方の全体的な応力勾配の異なる実験を行い、応力腐食割れ伝播速度をK値で整理した結果、 σ_{net} で整理するよりもはるかに分散が小さく精度よく整理できた。すなわち、応力腐食割れ伝播特性はK値により良好に特徴づけられることが明らかになった。

(2) K増加型、一定型、減少型の3種類の試験を行った結果、K一定型試験ではK増加型と同様の特性を示したが、K減少型試験では、 K_{in} を領域Ⅱで開始した場合に限り、領域Ⅰでの速度が増加型のそれよりも低くなることが明らかになった。これはき裂の分岐によるものと考えられる。

(3) 応力腐食割れ伝播速度とK値の関係線図において、その曲線は不連続な遷移点を境に大きく2つの領域に分類できた。走査電顕による破面観察の結果より各領域における破面的な相違が認められず、領域ⅠからⅡへの遷移については、主き裂の分岐が見られたことから、その原因は分岐によるK値の低下が原因であるとみなされる。

終りに、本実験の遂行に協力いただいた当時、大阪工業大学学生、藤井肇君に感謝致します。また、本実験の実施にあたり御援助をいただきました関西電力株式会社に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 本誌投稿中
- 2) W.F. Brown, Jr. and J.E. Srawley; Plane strain crack toughness testing of high strength metallic materials, ASTM STP-410 (1966)
- 3) H. Tada, P. Paris and G. Irwin; The Stress Analysis of Cracks Handbook, Del Research Corp. (1973)
- 4) 北川英夫, 結城良治; 二次元応力状態における分岐き裂の応力拡大係数, 日本機械学会論文集, Vol. 41, No. 346 (1975), 1641-1640
- 5) G.C. Sih; Stress distribution near internal crack tips for longitudinal shear problem, J. Appl. Mech., Vol. 32, No. 1 (1965), 51-58