隣接内部き裂の欠陥評価法に関する検討[†]

武 藤 陸 治* 坂 本 勲*
井 上 昌 弘** 岩 本 利 一***

Study on an Assessment of Defects for Neighbouring Embedded Cracks

by

Yoshiharu MUTOH*, Isao SAKAMOTO*, Masahiro INOUE**
and Toshikazu IWAMOTO***

Fracture toughness tests were performed on the specimens with neighbouring embedded cracks produced by using the diffusion welding method in order to investigate the method of assessment for neighbouring embedded defects.

It was found that for $s/r_{e2} > 0.7$ (where s/r_{e2} is the ratio of the spacing of adjacent cracks and the radius of a reduced circular crack with an area equivalent to that of a larger crack), the K -value can be estimated by supposing isolated cracks, and for $s/r_{e2} \leq 0.7$, it can be estimated by using a reduced circular crack with an area equivalent to an added area of adjacent cracks. The proposed method of combining two adjacent cracks does not contradict with the one proposed in the previous paper, in which an embedded crack near surface is substituted with a surface crack.

キー・ワード：内部欠陥，破壊じん性，欠陥評価，隣接欠陥

1 緒 言

著者らは内部き裂に関する既設の欠陥評価規格^{1)~3)}に対する実験的検証が行われていないこと，既設の欠陥評価規格が過度に安全側の評価を与える傾向のあること，および破壊力学の工業的応用を進めるためにも実用上より簡易な欠陥評価法が強く望まれることなどの情況に鑑み，これまでに，拡散接合法を利用した内部き裂材の製作，および表面近傍に内部き裂を有する試験片のじん性試験を行い，その欠陥評価法の検討などを行ってきた⁴⁾。それらによると，製作した内部き裂材の接合部は組織的および材質的に母材と同等とみなすことができ，導入した内部き裂も十分に鋭いき裂とみなすことができる。表面近傍の内部き裂はリガメント比 l/r_e (l はリガメント幅， r_e は等価面積円状き裂の半径)が0.5より大きいとき，引き直した等価面積円状き裂が中央に存在するとして K 値評価できること，また l/r_e が0.5以下の場合，等価面積を有する半円状表面き裂に置き換えて K 値評価できることなどが明らかとなった。

本報告では，これらの研究の一環として，表面近傍の内部き裂と同様に実用上その取扱いが重要な隣接する内部き裂の問題をとりあげた。隣接内部き裂を扱った研究としては西谷・村上および西岡らの数値解析の試みがある程度であり，実験的検討の試みはこれまで

なされていないようである。本研究では前報と同様⁴⁾⁵⁾，拡散接合法を用い隣接だ円状内部き裂材を製作し，そのじん性試験結果から，既設の欠陥評価規格に検討を加えるとともに，前報の表面近傍内部き裂の場合と類似のき裂面積に基づいた簡便な欠陥評価手法の可能性について検討した。

2 実験方法

供試材は直径 25.4 mm の低炭素鋼 S10C 圧延丸棒であり，その化学成分および機械的性質をそれぞれ Table I および II に示す。拡散接合法を利用した内部き裂材の製作方法等については，前報⁴⁾で詳細に述べたので本報では省略するが，接合試料の片側に旋盤あるいはフライス盤を用い所定の寸法の隣接する浅い円状あるいはだ円状切欠きを導入した後，拡散接合するこ

Table I. Chemical composition (wt%).

Material	C	Si	Mn	P	S
S10C	0.08	0.26	0.35	0.012	0.036

Table II. Mechanical properties.

Material	σ_{ys} (MPa)	σ_B (MPa)	R. A. (%)
S10C	257.1	376.2	77.3

[†] 原稿受理 昭和60年8月15日 Received Aug. 15, 1985

* 正 会 員 長岡技術科学大学 長岡市上富岡町, Technological University of Nagaoka, Kamitomioka-cho, Nagaoka

** 日立造船(株) 大阪市此花区桜島, Hitachi Shipbuilding and Engineering Co. Ltd., Sakurajima, Konohana-ku, Osaka

*** 三菱電機(株) 長岡京市馬場岡所, Mitsubishi Electric Corporation, Banbazusho, Nagaokakyo

とにより製作した。なお、拡散接合条件は前報と同じく、接合温度 900℃、接合圧力 9.8 MPa および接合時間 30 min である。

製作した内部き裂試験片の最終的な形状寸法は Fig. 1 に示す通りであり、等大あるいは非等大 ($b_1 < b_2$) の隣接内部き裂がき裂間隔 S で導入されている。じん性試験は島津オートグラフ DSS-25T を用いクロスヘッド速度を 1 mm/min とし、また試験温度は 77 K (−196℃) として行った。

Fig. 1. Specimens.

丸棒中の隣接だ円状内部き裂の K 評価式は現在不明であるので、等大隣接だ円状内部き裂の K 評価に際しては、無限体中の等大だ円状内部き裂の近接を扱った西谷らの数値解析結果を近似的に用いた。なお、本実験範囲の内部き裂寸法であれば、有限体中であるための補正は、解析結果の存在する円状内部き裂の場合のそれから類推すると最大で 6% 程度であろうと思われる。つぎに、き裂の干渉を考慮せず単一き裂として K 評価することが可能な範囲について検討した。この場合のだ円状内部き裂の K 評価に際しては、前報に従い、だ円を等価面積円に引き直し次式を用いた。

$$K_I = \frac{2P}{\pi^2(R^2 - r^2)} \sqrt{\pi r} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{r}{R} \right) - \frac{5}{8} \left(\frac{r}{R} \right)^2 + 0.421 \left(\frac{r}{R} \right)^3 \right] \sqrt{1 - \left(\frac{r}{R} \right)} \quad (1)$$

ここで、 r は円状内部き裂の半径、 R は平滑部の半径、 P は負荷荷重である。

3 実験結果および考察

3.1 等大隣接だ円状内部き裂

等大隣接だ円状内部き裂材のじん性試験結果から、西谷らの数値解析結果を用いて評価した K_c 値とだ円の短軸半長 b で標準化したき裂間隔 s/b との関係を図 2 に示す。図中の $K_{Ic} = 22.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ の実線が本供試材の平面ひずみ破壊じん性値である。図よりわかるように、 $b/a = 0.3$ および 1.0 のいずれの場合においても西谷らの数値解析結果を用いて評価した K_c 値は K_{Ic} 値と良い一致を示している。なお、前節で述べたように有限体の補正（最大の場合で 6% 程度）を加えたとしても、 K_c 値は若干小さくなるものの全体としては K_{Ic} 値とほぼ一致する傾向には変わりがないと思われる。

Fig. 3 に、等大隣接だ円状内部き裂を干渉がなく単

Fig. 2. Relationship between K_c -value evaluated by using the numerical results of Nishitani and Murakami and the spacing s/b .

Fig. 3. Relationship between K_c -value evaluated by supposing isolated cracks and using eq. (1) and the spacing s/b .

独に存在するき裂とみなし、さらに等価面積円状き裂に引き直し、式(1)を用いて評価した場合の K_c 値とき裂間隔 s/b の関係を示す。図からわかるように、 $b/a = 1.0$ の場合 $s/b < 0.6$ において、 $b/a = 0.3$ の場合 $s/b < 1.0$ の範囲でき裂の近接による K_c 値の減少の傾向が認められる。既設の各種欠陥評価規格では近接による欠陥の相互作用が顕著な範囲では二つの欠陥を複合させる手法を用いているが、複合すべき近接の条件は ASME ならびに BSI では $s/b \leq 2.0$ 、WES では $s/b \leq 1.0$ となっている。ASME の規格に対する理論的根拠は明確ではないが、BSI では Kobayashi らの数値解析結果を基に、欠陥の近接による K 値の増大が単独の場合の 20% を越えるとき、複合欠陥として扱うことが記述されている。また、WES では Kobayashi らの数値解析結果を基に K 値が 20% 以上増大するとき複合欠陥とすることが述べられている。BSI と WES は同様の根拠に基づいているにもかかわらず、複合条件が異なっているが、これは各規格でさらに独自の安全性等が考慮されているためと思われる。Fig. 4 は Fig. 3 の横軸を s/r_e に置き換え整理し直したものである。ここで、 r_e はだ円状内部き裂を引き直した等価面積を有する円状内部き裂の半径である。図より K_c 値は、だ円の長短軸比 b/a および短軸半長 b にかか

Fig. 4. Relationship between K_c -value evaluated by supposing isolated cracks and using eq. (1) and the spacing s/r_e .

わらず, $s/r_e > 0.7$ ではば一定値を示しており, $s/r_e \leq 0.7$ ではき裂の相互干渉により K_c 値が低下していることがわかる. 西谷らの数値解析結果によれば $s/b = 0.7$, $b/a = 1.0$ のとき, K 値は単一き裂より 4% 増加した程度であり, $b/a \neq 1.0$ の場合にも s/r_e を用いて整理すると K 値は b/a の値にかかわらず円状内部き裂 ($b/a = 1.0$) の場合に等しくなっている. このような解析結果からも複合の近接条件としては $s/r_e \leq 0.7$ のとき複合欠陥とするという条件で問題はないようである.

つぎに, 隣接欠陥を単一の複合欠陥へ置き換える手法について考える. 既設の欠陥評価規格での複合操作は各規格とも同様で Fig. 5 に示すごとくである. 等大隣接だ円状内部き裂材のじん性試験結果から, Fig. 5 に示す置き換え手法により複合しただ円状き裂をさらに等価面積円状内部き裂に引き直し, 式(1)を用いて求めた K_c 値と s/r_e の関係を Fig. 6 に示す. 図よりわかるように, K_c 値は $b/a = 0.3$ の場合 K_{Ic} 値に比較的好く一致しているものの, b , b/a に対する依存性が認められ, b が大きい場合には過度の安全側評価に

Fig. 5. Procedure for combining neighbouring cracks.

Fig. 6. Relationship between K_c -value evaluated as per the standard codes and the spacing s/r_e .

なっている. そこで, 本報告では, 欠陥面積の測定が比較的容易な超音波探傷試験を用いた欠陥評価という立場から, 隣接だ円状内部き裂を二つのき裂が持つ面積に等しい円状内部き裂に複合してじん性評価してみる. Fig. 7 に複合した等価面積円状内部き裂に式(1)を用いて求めた K_c 値と s/r_e の関係を示す. 図よりわかるように, K_c 値は b , b/a の値に依存せず, 欠陥評価規格に準じた Fig. 6 の場合に比べ過度に安全側でない比較的よい近似が得られている.

Fig. 7. Relationship between K_c -value and the spacing s/r_e using the combined and reduced circular crack proposed in the present study.

以上の結果より, 等大隣接だ円状内部き裂は $s/r_e > 0.7$ の場合単一き裂として, $s/r_e \leq 0.7$ の場合等価面積円状内部き裂に複合して K 値評価すればよいものと考えられる. このような手法は前報の表面近傍内部き裂を表面き裂へ置き換える際の手法と同一の考え方に基づいており, 統一性のあるき裂の標準化手法となっている.

3・2 非等大隣接だ円状内部き裂

前節に加え, さらに一般的な場合として, 非等大の隣接だ円状内部き裂についても同様の欠陥評価手法が合理的であるかについて検討する. じん性試験片に導入した非等大隣接だ円状内部き裂の形状および位置等は Fig. 1 (b) に示すとおりであり, 大小関係は $b_1 < b_2$

Fig. 8. Relationship between K_c -value of two unequal cracks evaluated by supposing isolated cracks and the spacing s/r_{e2} .

である。また、き裂間隔 s は一定 (0.9 mm) とし三つのき裂の寸法比 (b_1/b_2) を種々に変化させている。Fig. 8 は、非等大隣接だ円状内部き裂材の破壊じん性試験結果を大きい方のき裂だけが存在するとみなし、さらにそれを等価面積円状内部き裂に引き直し、式(1)を用いて求めた K_c 値とき裂間隔 s/r_{e2} の関係を示したものである。ここで、 r_{e2} は大きい方のだ円状き裂を等価面積となるよう引き直した円状内部き裂の半径である。図より、等大隣接き裂の場合と同様、 $s/r_{e2} \leq 0.7$ でき裂の近接による K_c 値の減少の傾向が認められる。なお、等大隣接き裂の場合とは異なり、複合すべき近接の条件を与える際に、き裂間隔 s を大きい方の等価面積円状き裂半径と小さい方のそれぞれのいずれで標準化すべきか問題となるが、非破壊検査と組合せた欠陥評価という観点から、検出率および測定精度が高い大きい方のき裂半径 r_{e2} で標準化の方が合理的と考えられる。

Fig. 9 に非等大隣接だ円状内部き裂材のじん性試験結果から、Fig. 5 に示す既設の欠陥評価規格に準じ複合操作を行い、複合だ円状内部き裂をさらに等価面積円状内部き裂に引き直し、式(1)を用いて求めた K_c 値とき裂間隔 s/r_{e2} の関係を示す。図よりわかるように、

Fig. 9. Relationship between K_c -value of two unequal cracks evaluated as per the standard codes and the spacing s/r_{e2} .

既設の欠陥評価規格に従った複合手法によれば、 $s/r_{e2} \leq 0.7$ の範囲で 2 ~ 20 % 程度安全側の比較的良好な K_c 値評価となっている。しかし、Fig. 6 に示す等大隣接き裂の場合から推察されるように、だ円状き裂の長短軸比 b/a が大きくなると過度に安全側の評価を与えるものと思われる。Fig. 10 に、非等大隣接だ円状内部き裂を二つのき裂が持つ面積と等価な面積を有する円状内部き裂に複合し、式(1)を用いて求めた K_c 値と s/r_{e2} の関係を示す。図よりわかるように、前節の等大隣接き裂の場合と同様の等価面積円状き裂に複合するという本手法によれば、 $s/r_{e2} \leq 0.7$ において K_c 値がほぼ K_{Ic} 値に一致するという良好な結果を与えている。Fig. 11 に、き裂の干渉を考慮せず大きい方のき裂だけ存在するとして等価面積円状き裂に引き直し、

Fig. 10. Relationship between K_c -value of two unequal cracks and the spacing s/r_{e2} using the combined and reduced circular crack proposed in the present study.

Fig. 11. Relationship between K_c -value of two unequal cracks evaluated by supposing isolated cracks and the configuration ratio b_1/b_2 .

式(1)を用いて求めた K_c 値と、非等大き裂の寸法比 b_1/b_2 の関係を示す。図において $b_1/b_2 = 0$ の点は単一き裂の場合、 $b_1/b_2 = 1.0$ は等大き裂の場合に相当している。図からわかるように、 b_1/b_2 の値が大きくなるほど干渉効果により K_c 値は低下しており、等大き裂

の場合が干渉効果が最も大きい。したがって、前節に示した等大き裂に関する複合条件は、本節の非等大き裂に対しても安全側の評価を与える複合条件となっており、非等大隣接き裂に対して適用しても問題ないものと考えられる。

3.3 長軸端同士が隣接する等大だ円状内部き裂

実在の構造物において、隣接欠陥は前述の短軸端同士が隣接する場合のみならず、長軸端同士が隣接する場合もしばしば見られる。一般に前者の方が干渉効果が大きく力学的に厳しい状態にあるが、後者の場合の取扱いも実用上重要である。そこで、Fig. 1 (c) に示す長軸端が隣接する等大だ円状内部き裂 ($b/a=0.3$, $a=2.5$ mm) を導入した試験片を製作し、じん性試験を行った。

Fig. 12 に得られたじん性試験結果から、隣接き裂を、(1)単独き裂として (図中○印)、(2)既設の欠陥評価規格に準じて複合したき裂として (図中△印)、および(3)二つのき裂がもつ面積と等しい面積を有するよう複合した円状き裂として (図中□印)、それぞれ引き直した等価面積円状き裂に式(1)を用いて評価した K_{IC} 値と s/r_e の関係を示す。図より、隣接き裂を単独き裂とみなした場合、 $s/r_e \leq 0.7$ で K_{IC} 値が若干低下していることがわかる。隣接き裂を Fig. 5 に示す既設の欠陥評価に準じて複合し評価した K_{IC} 値は30~40%過大な値となっている。これに対し、隣接き裂を二つのき裂が持つ面積に等しい円状内部き裂に複合するという本手法によれば、欠陥評価規格に準じた場合ほど過大でなく、しかも安全側の評価が得られている。

Fig. 12. Relationship between K_{IC} -value of two equal cracks meeting with each other at the end of long axis and the spacing s/r_e .

4 結 言

隣接内部き裂の欠陥評価法について検討するため、拡散接合法を利用し、種々の隣接だ円状内部き裂材を製作し、そのじん性試験を行った。その結果以下のごとき、簡便でかつ既設の欠陥評価法ほど過度に安全側の評価とはならない新手法が明らかとなった。すなわち、隣接だ円状き裂が等大あるいは非等大であるにかかわらず、また短軸端同士あるいは長軸端同士の隣接にかかわらず、 $s/r_{e2} > 0.7$ (等大き裂の場合 $s/r_e > 0.7$) の場合、大きい方の、あるいは等大き裂の場合には一方のき裂だけが存在するとして、そのき裂を等価面積円状き裂に引き直し、式(1)を用い K 値を評価すればよい。また、 $s/r_{e2} \leq 0.7$ (等大き裂の場合 $s/r_e \leq 0.7$) の場合、隣接するき裂の有する面積に等しい単一の円状内部き裂に複合し、式(1)を用い K 値評価すればよい。

本手法によれば、既設の欠陥評価規格のようにき裂形状を検出する必要がなく、き裂面積と位置を検出すればよいので、非破壊検査、特にそれらの計測が容易な超音波探傷試験と組合せた簡易で実用的な欠陥評価手法となりうるものと思われる。また、分解能の制約から、き裂間隔 s が小さい隣接き裂の場合には、き裂の非破壊検査時にすでに自動的に複合され単一き裂として検出されていることが考えられる。本手法はこのような非破壊検査の実情とも合致した手法となっている。

(昭和59年5月29日 日本材料学会第33期学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI (1980).
- 2) BSI PD6493 (1980).
- 3) WES 2805, (1980).
- 4) 武藤睦治, 坂本 勲, 井上昌弘, 齊藤 力, 材料, **33**, 1153 (1984).
- 5) 武藤睦治, 坂本 勲, 井上昌弘, 岩本利一, 材料, **34**, 1031 (1985).
- 6) 西谷弘信, 村上敬宣, 日本機械学会論文集, A-40, 31 (1974).
- 7) 西岡俊久, P.E. O'Donoghue, S.N. Atluri, 日本機械学会論文集, A-51, 342 (1985).
- 8) H. Tada and P.C. Paris, "The Stress Analysis of Cracks Handbook" (1973) DEL Res. Corp..
- 9) A.S. Kobayashi, Int. J. of Fract. Mech., **1**, 81 (1965).
- 10) A.S. Kobayashi, ICM II (1976).