疲労き裂進展経路の予知に関する研究*

(第 1 報, 予備的検討)

藤 原 敏**, 宮 園 高***, 福 田 収 一****

A Study on the Prediction of a Fatigue Crack Growth Path

(1st Repopt, A Preliminary Study)

by Satoshi FUJIWARA, Takashi MIYAZONO, and Shuuichi FUKUDA

For the prevention of fatigue fracture, the prediction of the fatigue crack growth path is an important item. This paper deals with a fundamental study of this problem. Fatigue crack growth tests were carried out on SM 41 steel compact tension type specimens having drilled hole and the influence of hole location upon the crack growth path is investigated. The method of solution is based upon an application of Murakami's method, a convenience method for stress intensity factor solution by the finite element method. Solution results depend on mesh size that is crack growth size per one stage. The prediction of the fatigue crack growth path by a numerical approach using the finite element method agreed comparatively well with the experimental data.

Key Words: Fatigue, Crack Growth Path, CT Specimen, Hole Location, Finite Element Method

1. ま え が き

大形溶接構造物等においては, 構造上必要な開口部や, 切欠き, 不溶着部さらには溶接欠陥等の存在は避け難く, き裂の発生・進展を許容せざるをえない場合がある。しかし, このような構造物では裕度の高い構造形式をとることにより, たとえ, き裂が発生・進展したとしてもただちに破壊にいたらないような設計, すなわち, 損傷許容設計を行うことが可能である。

き裂進展を許容する設計法としては, 対象に応じて種々の方法が考えられる。その一つに, 事前にき裂の進展経路を予知するという重要な課題があげられる。

本論文は, 構造物の疲労破壊防止の観点から, 疲労き裂進展経路の予知を簡便な方法で行うことを目的とした一連の研究の一環である。

本報では, き裂前方に円孔欠陥を有する材が繰返し荷重を受ける場合をとりあげ, 有限要素法を用いて弾性破壊力学の立場から, き裂進展経路の予知を試み, 実験結果と比較・検討した。

2. 研究の概要

これまでに, 疲労き裂の進展経路を扱った研究はかなり多くなされている^{(1)~(6)}。しかし, これらは応力拡大係数 K_I , K_{II} を精度よく求めるために細かいメッシュ分割を必要としたり, 二次の変位関数を用いたり, 比較的煩雑な計算によるものである。

本研究では, より簡便な方法でき裂進展経路を予知したいとの観点から, 普通要素による有限要素法にて解析を行った。疲労き裂進展試験には, 大形試験機を用いることなく比較的簡単に実験が行えることから, コンパクトテンション形試験片を用いた。き裂進展経路を変える目的で, 初期き裂(スリット)延長上からはずれた位置に円孔欠陥を施した場合のものについて実験し, 解析結果と比較・検討した。

2.1 疲労き裂進展試験 供試材料として溶接構造用軟鋼 SM 41 鋼を用いた。その化学組成ならびに機械的性質を表 1 に示す。

試験片はコンパクトテンション形で $L-T$ 方向から採取し, ASTM 規格 E-647-81 に従って製作した。その形状寸法を図 1 に示す。

欠陥としては, ドリル加工後リーマ加工した径 2 mm の円孔欠陥を用いた。疲労き裂進展経路を変える

* 昭和 61 年 6 月 27 日 北陸信越支部北陸地方(金沢)講演会において講演, 原稿受付 昭和 61 年 1 月 22 日。
** 正員, 津山工業高等専門学校 (〒708 津山市沼 624-1)。
*** 大阪大学大学院 (〒567 茨木市美穂ヶ丘 11-1)。
**** 正員, 大阪大学溶接工学研究所。

目的から、荷重線から円孔中心までの距離 l を 25 mm 一定として、初期き裂(スリット)延長上から円孔中心までのずれ s を 2.0, 3.0, 5.0 と変化させた。円孔欠陥配置の状況を図 2 に示す。

き裂進展試験は容量 98 kN の電気油圧サーボ式疲労試験機を用い、応力比 $R=0.05$ の正弦波で、繰返し速度 20 Hz で行った。なお、荷重範囲は 7.3 kN で、き裂長さの測定には測微顕微鏡を用いた。

2.2 有限要素解析 応力拡大係数 K_I , K_{II} の計算は特別な要素を用いることなく、しかも、少ない節点数で精度よい K 値を簡単に計算できる方法として知られている村上の方法⁽⁷⁾を用いた。通常の有限要素法による K 値の決定法では、き裂先端要素の応力値にもき裂が存在しないと仮定した時の応力値が含まれていることを考慮して、それに対する修正を行い精度の高い K 値を求めようとする方法を用いて計算した。

K_I の計算に必要な基準の応力 σ_c は村上⁽⁷⁾による σ_c と x_0 との関係図より求められた次式を用いた。

$$\sigma_c = 0.3033 x_0^{(-1.121 - 0.09547 \ln x_0)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

また、 K_{II} の計算に必要な基準の応力 τ_c は図から計算点は少ないが次式にて近似して用いた。

$$\tau_c = 0.0811 x_0^{(-1.392 - 0.09373 \ln x_0)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 x_0 はメッシュ寸法 l とき裂長さ c との比 l/c で表される。

一般に、き裂進展経路選択則としては、

表 1 化学組成(%)ならびに機械的性質

C	Si	Mn	P	S
0.15	0.20	0.81	0.020	0.006

Yield Stress (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elong. (%)
314	461	30.0

図 1 試験片全体図

- (1) σ_a 最大説⁽⁸⁾
 - (2) ひずみエネルギー最大説⁽⁹⁾
 - (3) ひずみエネルギー密度関数最小説⁽¹⁰⁾
- がある。

宮本ら⁽³⁾によると(1)と(3)の説による解析結果に顕著な差は認められないとされている。また、樋口ら⁽²⁾の実験結果から(1)の説で充分実用的な精度が得られるとされている。そこで本報では、き裂進展方向

$$l = 25.0, \phi d = 2.0, s = 2.0, 3.0, 5.0$$

図 2 円孔欠陥位置

(a) 共通領域の要素分割

(b) き裂周囲の要素分割(A部詳細)

図 3 試験片の要素分割 ($l=25, s=3.0$)

の条件式として次式を採用した。

$$K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1) = 0 \dots\dots\dots (3)$$

CT 試験片をモデルとしたメッシュ分割の例を図3に示す。解析対象モデルは、荷重線から欠陥中心までの距離 $l=25$ mm, 初期き裂延長上からのずれ $s=2.0$, 3.0 mm および 5.0 mm と変化させたものの3種類である。

図3は $s=3.0$ mm のものである。図3の(a)は3種類に共通な領域のメッシュ分割を、(b)はき裂まわりのメッシュ分割を示す。この分割は、1回あたりのき裂進展量を 2 mm とした場合のものであるが、き裂進展量を 1 mm とした場合のものについても解析した。

荷重条件としてはピン負荷を模擬するが、計算モデルではピン穴の影響を無視して、ピンの上端に相当する位置 M での集中節点力を与えた。また、初期スリット幅は無限小と仮定し、円孔欠陥は八角形近似して計

算した。

拘束条件としては、節点 M の x 方向の節点変位を零、節点 N の x および y 方向の節点変位を零に拘束した。材料定数として、縦弾性係数 $E=206$ GPa, ポアソン比 $\nu=0.3$ を用いた。

き裂進展経路を精度よく求めるには、メッシュ分割を細かくし、き裂をある距離進展させるたびにメッシュの再分割を必要とするなど極めて多大の労力を要する。

本研究では、労力を少なくし比較的あらいメッシュでもき裂進展経路の予知が可能か否かを検討することを目的としている。このため、き裂進展のたびごとにメッシュの再分割をせず、単なる座標の移動だけで処理した。

2.3 実験結果ならびに解析結果との比較

図4にき裂進展経路の写真を示す。図4(a)よりき裂前方に欠陥がない場合、CT 試験片においてもき裂の直進性は良好であることがわかる。図4(b)~(d)は欠陥を初期き裂延長上から 2.0 , 3.0 , 5.0 mm と変えた場合のものである。写真より、欠陥の位置によりき裂の進展経路に違いのあることがわかる。すなわち、進展経路としては、

- (1) き裂が欠陥と合体する場合
- (2) 欠陥に接近するもののその後ふたたびほぼ直

図4 疲労き裂進展状況

図5 有限要素解析結果

(a) き裂進展量 2 mm

(b) き裂進展量を 2 mm から 1 mm へと変化した場合

図 6 解析結果と実験結果の比較

進する場合

(3) 欠陥の影響をほとんど受けることなくほぼ直進する場合

とに区別することができる。

図 5 に 1 回あたりのき裂進展量を 2 mm とした場合の解析結果を示す。s=2.0 mm で若干蛇行するものの、いずれの場合もき裂は欠陥の影響を受け徐々に屈折しながら進展することがわかる。また、円孔欠陥が初期き裂延長上から離れるにしたがって、き裂の曲がり方は小さくなる傾向にあることがわかる。

図 6 は s=3.0 mm のものについて、実験結果と解析結果とを比較したものである。実線はき裂進展経路の座標を 0.5 mm 間隔で測定した結果を滑らかに結んだ線である。図 6 (a) の解析結果はき裂進展量を 2 mm とした場合である。図 6 (b) は実験結果をもとに、き裂が曲がり始めるき裂長さ $a=21.5$ mm からメ

ッシュ分割を細かくし、き裂進展量を 2 mm から 1 mm に変えた場合の結果である。図 6 (a) より解析結果はき裂経路を 2 mm の折れ線で近似したことになるので、比較的急激にき裂経路が変わりだす付近では解析結果と実験との差が大きいものと思われる。しかし、図 6 (b) よりある程度メッシュ分割を細かくしてき裂の進展量を小さくすれば、き裂進展経路の予知が可能になることがわかる。

3. ま と め

本論文では、構造物の疲労破壊防止の観点から、疲労き裂進展経路の予知を簡便な方法で行うことを目的とした一連の研究の一環として、き裂前方に欠陥を含む材が繰返し荷重を受け、き裂が屈折して進展する場合をとりあげ、有限要素法で予知するために解析した。その結果、き裂進展量をある程度細かくすれば、き裂経路をほぼ予知できることが判明した。き裂進展量をどの程度細かくしていくべきかの指針を今後実験と数値計算から確立してゆきたい。さらに、入力容易化のため、今後有限要素法にかえて境界要素法の適用を考えたい。

文 献

- (1) Iida, S. and Kobayashi, A. S., *Trans. ASME, Ser. D*, 91-4 (1969), 764.
- (2) 樋口・川原・ほか 2 名, 造論, 139 (昭 51), 221.
- (3) 宮本・福田・ほか 2 名, 機論, 43-375 (昭 52), 3970.
- (4) 村上, 機論, 46-407, A (昭 55), 729.
- (5) 河野・ほか 2 名, 境界要素法研究会資料, BEM 85-8-2 (昭 60).
- (6) 角, 造論, 149 (昭 56), 219.
- (7) 村上, 機論, 42-360 (昭 51), 2305.
- (8) Erdogan, F. and Sih, G. C., *Trans. ASME, Ser. D*, 85-4 (1963), 519.
- (9) Sih, G. C., *Eng. Fract. Mech.*, 5-2 (1973-6), 365.
- (10) Nuismer, R. J., *Int. J. Fract.*, 11-2 (1975), 245.