疲労き裂進展に及ぼすブラインド・ホールの影響について*

萩原 芳彦*¹, 笠井 浩樹*²

Through Fatigue Crack Propagation Behavior near the Blind Holes

Yoshihiko HAGIWARA and Hiroki KASAI

Through fatigue crack propagation behavior near the blind holes in the CT specimens of carbon steel were investigated using stress intensity factors calculated by the three-dimensional FEM. The results are as follows. The crack propagation rates for blind-holed specimens differ from those of non-blind-holed ones because of the following reasons. (1) The contours of the crack situated just in front of the blind hole differ from those of a non-holed specimen. (2) The effective stress intensity factor for the through crack which was located in the blind hole differs from that for the non-holed specimen even if the stress intensity factors for both cases are the same. Therefore, the through fatigue crack propagation behavior around the blind hole could not be estimated based on that of a non-blind-holed specimen.

Key Words: Fatigue, Blind Hole, Crack Propagation, 3D-FEM, Crack Closure, Effective Stress Intensity Factor

1. 緒 言

著者らはこれまでに応力集中部を進展する疲労き裂の挙動を明らかにするため、サイド・グループを有するCT試験片を用いて二、三の実験を行い、サイド・グループ付加による貫通き裂前縁に沿っての平均応力拡大係数の低下のため、見かけ上のき裂進展が遅くなる現象を明らかにしてきた⁽¹⁾⁽²⁾。しかしながら、その場合にはき裂前縁に沿っての応力拡大係数の変化状態は単なる平滑試験片の場合に比べて大きいもののき裂進展に伴う応力拡大係数の急激な変化は生じない状態であった。

本研究においてはさらに一歩進め、貫通き裂進展経路上で断面積が急激に変化する状態を有する形状の試験片を作製し、き裂進展挙動がどのようなになるかを調べ、二、三の知見を得たのでここに報告する。

2. 実験方法

試験片は図1に示すようなSK3材からなるCT試

験片の中央部分に二対の左右対称なブラインド・ホール(盲穴)を設けたものであり、第一の穴手前および第一の穴を通過中での貫通き裂の進展挙動を観察した。

穴の直径はすべて6.0 mmとし、穴の深さは片側で6.35 mm および9.53 mm, すなわち、穴を除く正味板厚が12.7 mm および6.35 mm の2種類について穴を左右対称な一対の場合と二対の場合で作製した。また穴を直列に二対設けた場合には穴中心間隔を7.0 mm および14.0 mm の2種類として解析および実験を行った。

図1 試験片形状寸法

* 昭和62年8月21日 第65期全国大会講演会において講演, 原稿受付 昭和62年9月16日.

*¹ 正員, 武蔵工業大学 (〒158 東京都世田谷区玉堤 1-28-1).

*² 准員, 日興證券(株) (〒171 東京都豊島区南池袋 1-20-8).

なお、供試材料の降伏応力は 378 MPa, 引張強さは 670 MPa である。

機械加工した試験片は予き裂を荷重作用線上から約 20 mm の位置まで入れた後、600°C, 3 時間の真空焼鈍を行い、実験に供した。き裂長さの測定は 50 倍の読取り顕微鏡で行い、試験片両表面で測定されたき裂長さの平均値をき裂長とした。

試験機は島津製作所製電気油圧式疲労試験機（サーボ・パルサ Lab 5 形）であり、応力比 $R=0.1$ の片振疲労試験を行った。繰返し速度は 15 Hz, 負荷荷重幅は $\Delta P=9\,800\text{ N}$ の 1 種類とした。

なお、き裂進展中のき裂前縁形状のチェックのため、適宜最大荷重を保った状態で繰返し振幅を減少させ、ビーチ・マークをつけた。また、一部の試験片に対しては試験片背面にひずみゲージを取付け、除荷弾性コンプライアンス法によってき裂開閉口を測定した。

3. 応力拡大係数の算出結果

前報⁽¹⁾同様に有限要素法解析にはアイソパラメトリック 1 次要素を用い、応力拡大係数算出には剛性変化法を使用した。解析モデル形状は実験に用いた試験片と全く同一形状とし、縦弾性係数 $2.18 \times 10^5\text{ MPa}$, ポアソン比 0.28 とした。

実際に実験で観察される貫通き裂の前縁は直線ではなく曲線となるが、まず初めに前縁を直線と仮定した理想状態でのき裂前縁に沿っての応力拡大係数の分布を求め、その分布の平均値のき裂長さによる変化状態を表示したものが図 2, 3 である。なお、本解析における直線貫通き裂並びに実際実験において観察される曲線状貫通き裂前縁に沿って解析した応力拡大係数の分布状態並びにそれらの比較検討については後で実験結果考察時に述べる。

図において横軸はき裂長さであり、縦軸は応力拡大

係数である。本図はき裂長さを 20 mm から 30 mm まで 0.1 mm おきに変化させて解析した時の結果を示したものであり、本論文での実験では繰返し荷重幅 9 800 N を試験片に作用させているのでそれと同じ荷重条件での解析値である。

図中実線はブラインド・ホールを付けてない、いわゆる平滑試験片での結果であり、鎖線類はブラインド・ホールを付けた場合の結果である。なお、第 1 番めのブラインド・ホールの位置は図 2, 3 にも示しているように、き裂長さ 23.8 mm から 29.8 mm までの間である。

図よりわかるように、板厚方向の平均応力拡大係数はき裂が穴手前にある場合、穴に近づくに従って円形穴の応力集中の影響で急激に増加し、穴の深さにもよるが、本解析例では著しい時（図 2 の一点鎖線）には穴のない場合（実線）の 2 倍程度にまで増加している。

その後、き裂が伸びて貫通き裂の前縁が穴内部に入ると（き裂長さ 23.8 mm 以上）深い穴の場合には応力拡大係数値が減少し、また浅い穴の場合には穴通過中の応力拡大係数がほとんど変化しない状態等が得られた。穴部分の終端近く（き裂長さ 29.8 mm 近傍）ではほとんどの形状の場合ほぼ穴のない場合の値に近づくことがわかるが、図 3 に二点鎖線で示すように、穴が二対ある場合においては穴間隔が狭くなると第 2 の穴の影響のため応力拡大係数は穴のない場合の値（実線）まで低下することはなかった。

4. 実験結果および考察

上記の解析で得られた貫通き裂の応力拡大係数平均値を用いて実際に求めたき裂進展速度の結果を整理したものが図 4~7 であり、横軸は応力拡大係数幅 ΔK で示してある。

これらの図からわかるようにブラインド・ホール手

図 2 ブラインド・ホール近傍での応力拡大係数の変化

図 3 ブラインド・ホール近傍での応力拡大係数の変化

前(図中の矢印 A, B で示した間の▲印または■印)およびブラインド・ホール通過中(図中の矢印 C, D で示した間の▲印または■印)のき裂進展は単純には応力拡大係数を用いて整理できない, すなわち平滑試験片の実験値○印と一致しないことがわかる。その原因としては実際の貫通き裂前縁が直線でないこと, き裂開閉口挙動に違いがないかなど考えられるが, 以下にその点を考察する。なお, 図中の△印および□印はブラインド・ホール内へのき裂進展の遷移域であり, き裂前縁形状が複雑であるので本報では検討を省略する。

図 4 き裂進展速度と応力拡大係数の関係

図 6 き裂進展速度と応力拡大係数の関係

図 5 き裂進展速度と応力拡大係数の関係

図 7 き裂進展速度と応力拡大係数の関係

る。

そこで, まずき裂前縁形状の影響について検討する。本実験において実際に観察されたき裂前縁形状と同じに有限要素メッシュを作製し, 解析した結果を示したものが図 8, 9 である。なお, 横軸は板中央からの距離 Z を板厚 B の半分で除し, また縦軸は各条件で解析された応力拡大係数 K_2 を表面で測定されたき裂長さと同等のき裂長さを有する貫通直線き裂の解析により得られた応力拡大係数の平均値 K_{Av} で除してそれぞれ無次元化してある。

図8はき裂がブラインド・ホール手前にある場合のものであり、板表面でのき裂長さが22.10 mm、板中央での長さが22.88 mmの時の解析結果である。また、図9はき裂がブラインド・ホール内部にある場合のものであり、表面でのき裂長さが25.58 mm、中央での長さが25.77 mmの時の解析結果である。

また、これらの図中で○印は表面でのき裂長さと同長の貫通直線き裂を考えた場合、△印は板中央でのき裂長さと同長の貫通直線き裂を考えた場合、□印は実際に観察された前縁が曲線となった貫通き裂前縁に沿って解析を行った場合の応力拡大係数の分布をそれぞれ示している。なお、図中の水平に引かれた実線、点線などの直線はそれぞれこれら解析結果の板厚方向分布の平均値を示している。

これらの図からわかるように、いずれの場合にも表面で測定したき裂による解析結果よりも実際のき裂前縁に沿って解析された結果は高い値を示している。しかしながら、その変化の程度はき裂がブラインド・ホール手前にあるほうが著しかった。

また、その場合の平均応力拡大係数の値は板中央部でのき裂長さを平均き裂長さとして解析した直線き裂の平均応力拡大係数とも良く一致した。

このようなき裂前縁に沿っての解析は手間が掛かるため多くは行わなかったが、き裂前縁に沿って解析さ

れた応力拡大係数の平均値を用いてき裂進展結果を一部整理したものが図5中の矢印EおよびFで示した■印の点であり、き裂前縁が穴手前にある場合矢印Eで示すように□印は○印、すなわち平滑試験片の結果と一致している。

この結果からわかるように貫通き裂の前縁が穴手前にある場合のき裂進展が平滑試験片の結果と一致しなかった原因はき裂前縁形状の違いによっていたことがわかった。しかしながら、き裂前縁が穴の内部にある場合には矢印Fで示すようにき裂前縁形状の違いはそれほどない。すなわち、平均の応力拡大係数はほと

図8 応力拡大係数の試験片厚さ方向分布

図9 応力拡大係数の試験片厚さ方向分布

図10 ブラインド・ホール近傍でのき裂開閉口挙動

んど平滑材, ブラインド・ホール材とも一致し, 平滑材の結果 (○印) との不一致に対して上述と同じ解釈は成立せず, 他の原因を探る必要があるように考えられた。

そこで, 次にブラインド・ホール近傍でのき裂の開閉口挙動を除荷弾性コンプライアンス法を用いて調べた。その結果を示したものが図 10 である。

図において, 横軸はき裂長さ, 縦軸 U は開口比 (K_{op}/K_{max}) である。この結果よりわかるように, 本実験での応力拡大係数範囲では平滑試験片, すなわちブラインド・ホールがない時には○印で示されるようにほとんどき裂は開口状態にあることがわかる。これに対して, ブラインド・ホールをつけた試験片では挙動が異なり, ブラインド・ホールの手前ではき裂はほとんど閉口状態にあるものの, ブラインド・ホール内に入ると閉口状態の割合が増すようになる。また, その増し方も本実験で調べた 2 種類の試験片からもわかるように形状によって異なったものとなった。

このようにして得られた結果を用いて, 前述のき裂進展結果を有効応力拡大係数幅 ΔK_{eff} で整理しなおしたものが図 11, 12 であり, 図中▲または■印で示したものがき裂がブラインド・ホール内にある時の結果である。

なお, 図中の△または○印の点は平均の応力拡大係数値に対してき裂前縁形状の影響が著しい AB 間およびき裂がブラインド・ホールへ進入しかかる遷移域である BC 間の結果であり, き裂前縁に沿った厳密な

応力拡大係数で整理していないため平滑試験片の結果とは一致していない。

本実験ではこれら 2 種類の条件でしか開閉口挙動を調べなかったが, このように有効応力拡大係数を用いて整理すれば, 平滑材, ブラインド・ホール材ともに 1 本の曲線上に整理されることから, ブラインド・ホール内部でのき裂進展挙動も平滑試験片, すなわち応力集中の著しくない試験片, で得られたき裂進展挙動と同じ原理の下にあることがわかる。

しかしながら, 応力拡大係数の板厚方向平均値が同じであっても形状, すなわち応力集中等の違いによって開閉口量は異なることから, 単に応力拡大係数が解析などによって計算されて求められたからといって応力集中部近傍でのき裂開閉口量を平滑試験片のそれから予測することはできないことがわかった。

したがって, 今後このような応力集中部近傍での開閉口の定量的予測をどのようにすべきかの方法を見出すことが応力集中部のき裂進展の定量的予測をする上での課題であり, 種々角度からの実験的研究が必要であろう。

5. 結 論

ブラインド・ホールを有する CT 試験片を用いて炭素鋼 (SK3) の応力集中部での貫通疲労き裂進展挙動を調べた結果, 以下の結論を得た。

(1) ブラインド・ホール手前の領域でのき裂進展はき裂前縁に沿った厳密な応力拡大係数の解析を行え

図 11 有効応力拡大係数を用いて整理した結果

図 12 有効応力拡大係数を用いて整理した結果

ば、平滑試験片のき裂進展結果を用いて定量的に予測できる。

(2) ブラインド・ホール内を進展中の貫通き裂の進展挙動も本質的には平滑試験片中でのき裂進展挙動と同じであることはわかったが、き裂開閉口挙動は平滑試験片の結果とはかなり異なり、ブラインド・ホール内を進展中のき裂挙動を平滑試験片での進展挙動からは予測できなかった。

したがって、ブラインド・ホール内を進展中のき裂挙動を定量的に求めるには応力集中部でのき裂進展挙動を実験的に詳細に検討してゆく必要がある。

計算には東京大学大型計算機センター M680 および武蔵工業大学情報処理センター M360 を使用した。

最後に本研究を遂行するにあたり熱心に協力していただいた嶋津英輔, 備藤士郎, 石井浩, 伊集院将彦氏に深く感謝の意を表す。

文 献

- (1) 峰岸・萩原, 機論, 51-466, A (昭60), 1541.
- (2) Hagiwara, Y. and Sakamoto, T., *Proc. of Int. Symp. on Microstructure and Mechanical Behaviour of Materials, Xi'an China*, (1985), 571.