

縦方向溶接部のルートブローホール からの疲労き裂進展解析

THE EVALUATION OF FATIGUE CRACK GROWTH FROM BLOWHOLES AT THE ROOT OF LONGITUDINAL GROOVE WELDS

三木 千寿*, 森 猛**, 阪本 謙二***, 佐々木 利視****

By Chitoshi MIKI, Takeshi MORI, Kenji SAKAMOTO and Toshimi SASAKI

The effects of the size and shape of blowholes on the fatigue strengths of partially penetrated longitudinal welds are studied. Specimens are made of 500MPa class steel and are welded by submerged arc processes. Fatigue crack initiation and propagation behaviors are closely observed. Fatigue crack propagation behaviors are analysed using fracture mechanics concepts. In these analyses, a blowhole is regarded as a ellipsoidal cavity and initial cracks are assumed to exist on the wall of the cavity.

1. はじめに

溶接継手の疲労強度は溶接欠陥により著しく低下するため¹⁾ 溶接部には欠陥が存在しないことが望まれる。しかし、施工法や非破壊検査の能力などの制約により、すべての溶接部から欠陥を完全に除去することは困難である。したがって、溶接部にはある程度の欠陥が存在するとの前提で継手の疲労に対する安全性を検討することが合理的と考えられる。

箱断面トラス部材の材片集成に用いられる部分溶け込み溶接のルート部には、種々の欠陥が生じやすいことから、著者らは部分溶け込み縦方向溶接継手の疲労強度に関する一連の研究を行ってきた²⁻⁵⁾。その結果、ルート部のブローホールが疲労破壊の起点となりやすいこと、ブローホールの寸法が大きくなるにしたがって疲労強度は低下すること、疲労亀裂は寿命の極めて初期に発生すること、ブローホールの内接円を初期亀裂とみなし破壊力学の手法を用いて計算した寿命は実験結果とほぼ一致することなどが明らかとなった。これらの研究成果に基づいて、本州四国連絡橋の疲労設計許容応力が改定され、またそれに対応して溶接欠陥の許容寸法が定められた。⁶⁾ しかし、これまでの研究ではブローホールの形状が疲労強度に及ぼす影響がさ

* 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

** 工修 東京工業大学助手 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

*** 本州四国連絡橋公団 (〒105 東京都港区虎の門4-3-20)

**** 東京電気大学講師 理工学部建設工学科 (〒350-03 埼玉県比企郡鳩山村大字石坂)

ほど明らかにされておらず、また許容欠陥寸法の規定においてもブローホールの形状は考慮されていない。

米国の原子炉圧力容器の検査コード (ASME Sec. XI)⁷⁾ および英国の溶接構造物の欠陥評価の手引き (BSI PD6493)⁸⁾ においては、溶接欠陥をその応力直交面での幅および高さを短軸・長軸とする楕円形の亀裂に置き換え、破壊力学の手法を用いて亀裂進展寿命を算定することにより、継手の疲労に対する安全性を照査することとしている。また、Hirtら⁹⁾ は前述のASMEコードと同じ方法でブローホールを楕円形の亀裂に置き換え、それと応力拡大係数の等しい円形の亀裂を初期亀裂とおくことを提案している。しかし、ブローホールは溶接割れや溶け込み不良などの亀裂状の欠陥とは異なりその形状が丸みを帯びていることから、同様な方法でブローホールを亀裂に置き換えることには検討の余地がある。

本研究では、ブローホールの形状・寸法が縦方向溶接継手の疲労強度に及ぼす影響を明かにする目的で、種々の形状・寸法のブローホールを含む継手の疲労試験を行ない、疲労亀裂の発生・進展性状を詳細に調べた。また、ブローホールは丸みを帯びていることからそれを切欠きとみなし、そこから発生する疲労亀裂の進展の解析を行なった。以上の実験結果および解析結果に基づき、ブローホールの単純な形状の亀裂への置き換えについて検討した。

2. 試験方法

供試鋼材は板厚16mmの溶接構造用圧延鋼材 SM50Y ($\sigma_y=420\text{MPa}$, $\sigma_B=560\text{MPa}$) である。

箱断面部材の角溶接を想定して、この鋼板に深さ8mm、開き角60度のレ形開先を加工し、サ

ブマージアーク溶接法(750A-36V-35cm/min)により部分溶け込み縦方向溶接を行なった。その際、溶接部に種々の形状・寸法のブローホールが生じるように、開先裏面にガムテープを張る、開先面にグリス、ペンキ、マシンオイル等を塗付するなどの工夫をしている。

疲労試験は、図1に示す形状・寸法の試験体に対して、動的能力500kNのアムスラー型疲労試験機および電気油圧式疲労試験機を用い、最小応力を20-30MPaとした片振り引張応力下で実施した。応力波形は正弦波、繰り返し速度は5-8Hzである。一部の試験体については、疲労亀裂の発生・進展性状を調べる目的で、最大応力を一定としたまま所定の繰り返し回数ごとに応力範囲を半減するピーチマーク試験を行なった。

疲労試験終了後、すべての試験体について図2に示すごとくルート線に沿って溶接部を露呈し、ブローホールの状況を観察した。ブローホールの内壁に疲労亀裂が観察された場合には、さらに亀裂面を露呈し、ブローホールの溶接直角断面での幅(W寸法、図3参照)および疲労亀裂の寸法を測定した。以上の溶接部および疲労亀裂を露呈する作業は、塑性変形をさけるため、すべて液体窒素で十分に冷却した状態で実施している。

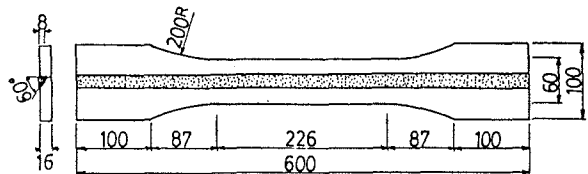


図1 試験体の形状および寸法

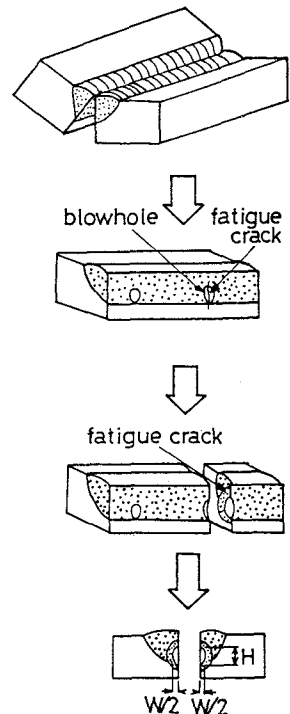


図2 溶接部および潜在疲労亀裂の露呈手順

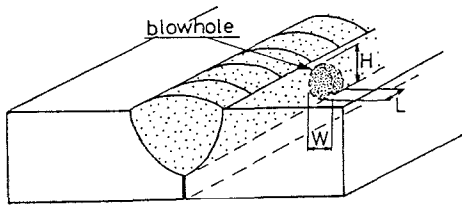


図3 ブローホールの寸法の定義

3. ブローホールの形状・寸法および応力集中

図4にブローホールを含む溶接部のマクロ写真を示す。図4(a)は溶接直角断面、図4(b)は溶接方向と平行な断面、図4(c)は水平断面でのマクロ写真である。ブローホールはルート部から溶接金属の成長方向に沿って生じている。ブローホールの内面は滑らかであり、割れなどの存在は認められない。またブローホールの水平方向の断面はほぼ円形であり、図5に示すごとくブローホールの溶接直角断面での幅(W寸法)と溶接方向の長さ(L寸法)はほぼ等しい。

図4に示すごとく、溶接直角断面でのブローホールの形はほぼ楕円形であり、W寸法とL寸法がほぼ等しいことから、ブローホールによる応力集中は、回転楕円体形の空洞による応力集中で近似できると考えられる。無限体内に一つの回転楕円体形の空洞が存在する場合の応力集中については、Sadowsky¹⁰⁾の解がある。図6に示すごとく、x方向に一樣な応力が作用する場合の最大応力は、y z面の空洞の周

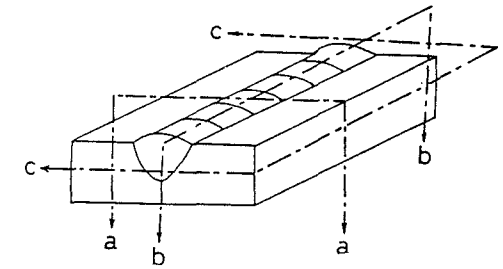


図4 ブローホールを含む溶接部のマクロ写真

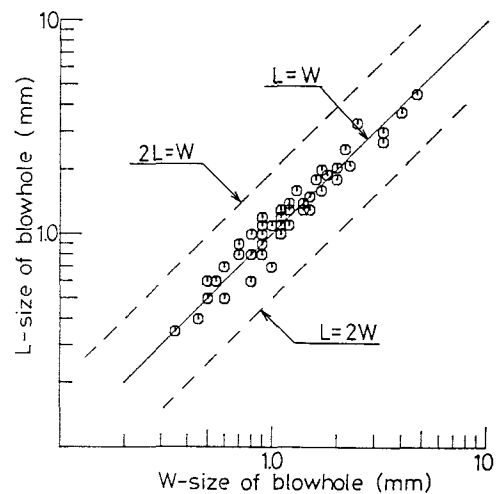


図5 ブローホールのL寸法とW寸法の関係

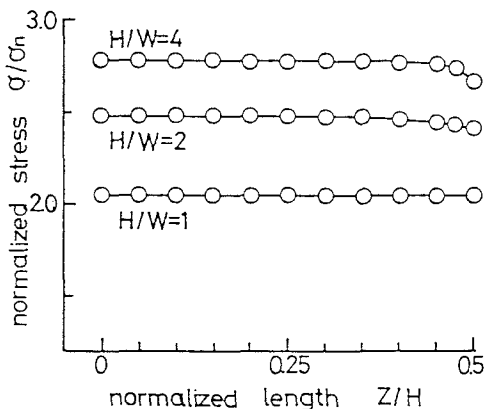
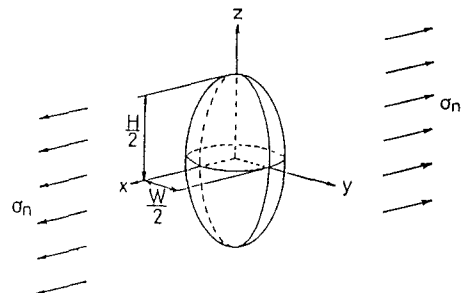


図6 回転楕円体の周に沿う応力分布



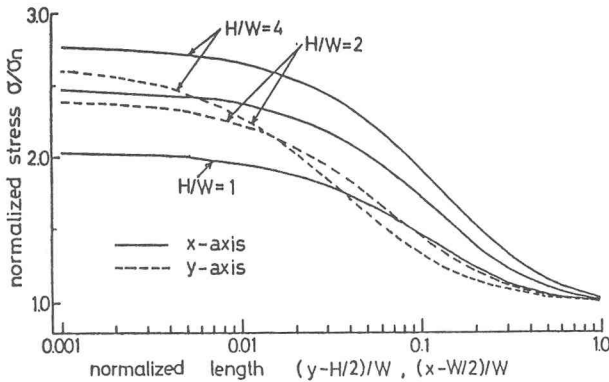


図7 回転楕円体の短軸および長軸方向の応力分布

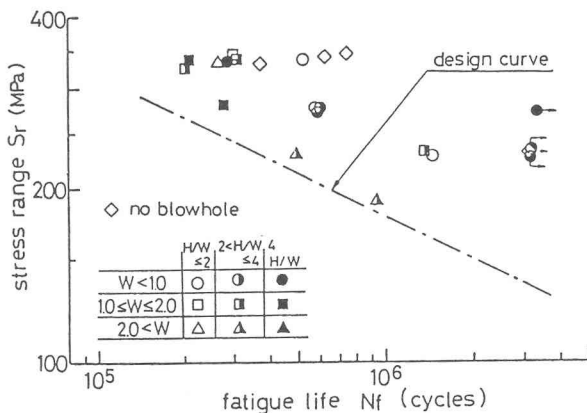


図8 疲労試験結果

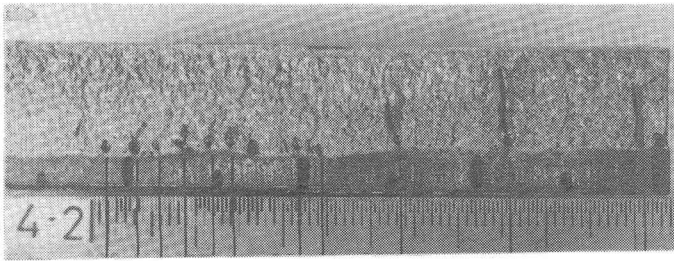


図9 露呈した溶接部の状況

図9にルート線に沿って露呈した溶接部の状況を示す。溶接部には破面に現われたブローホールの他にも多数のブローホールが存在しており、その内には疲労亀裂が生じていたものもあった。ここでは、このような亀裂を潜在疲労亀裂と呼ぶ。潜在疲労亀裂の多くは、応力集中の高いブローホールの中央断面付近に生じている。

ここでブローホールを観察した試験体は、それぞれ異なった応力範囲 S_r および応力繰返し回数 N を受けている。ここでは、疲労被害の程度が $S_r^4 N_f$ で与えられるものと仮定し、 $S_r^4 N_f$ の値に基づいて、ブローホールと亀裂発生との関係について検討した。なお、SM50Y 縦方向溶接継手の設計寿命線は $S_r^4 N_f = 1.0$

において生じる。この周に沿っての応力分布を、図6に示す。周に沿っての応力はほぼ一様である。また、応力は楕円の形状が細長くなるにしたがって高くなっている。図7は、 $y-z$ 面での楕円の短軸および長軸方向の応力分布を示している。応力集中の生じる領域は長軸方向に比べ短軸方向において長くなっており、その傾向は楕円の形状が細長くなるにしたがって顕著となっている。疲労亀裂は $y-z$ 面で発生し進展することから、この面での応力分布は、疲労亀裂の進展を考える上で重要となる。

4. 疲労試験結果

応力範囲と破断に至るまでの寿命 N_f (疲労寿命) の関係を、破面上に現われたブローホールの幅 W 、形状比 H/W により試験体进行分类し、図8に示す。未破断の試験体については、より高い応力範囲で再試験を行ない、その破面に現われたブローホールにより分類した。疲労強度はブローホールの幅が広くなるにしたがって低下している。幅が同程度のブローホールを有する試験体では、形状が細長くなる程疲労強度が低下する傾向が認められる。

5. 疲労亀裂の発生および進展性状

(1) ブローホールの形状・寸法と亀裂発生率

$\times 10^{15}$ (Sr:MPa, Nf:cycles)である。図10は、ブローホールの溶接方向での長さ(L寸法)と高さ(H寸法)の和(L+H)と疲労亀裂の発生率の関係を示している。亀裂発生率は、L+Hにより分類したブローホールごとに、(疲労亀裂が生じていたブローホールの数)/(ブローホールの総数)と定義している。Sr⁴N $\geq 2.0 \times 10^{15}$ では、L+Hが2mmのブローホールで約半数、L+Hが4mmではほぼ全数において疲労亀裂が生じている。1.0 $\times 10^{15}$ < Sr⁴N < 2.0 $\times 10^{15}$ では、疲労亀裂の発生率が50%となるL+Hは10mmである。Sr⁴N < 1.0 $\times 10^{15}$ では、L+Hが14mmとなっても疲労亀裂の発生率は20%程度にすぎない。なお、亀裂発生率については、L, H, LxHについても検討したが、ブローホールの周長を代表すると考えられるL+Hとの相関が最も高かった。

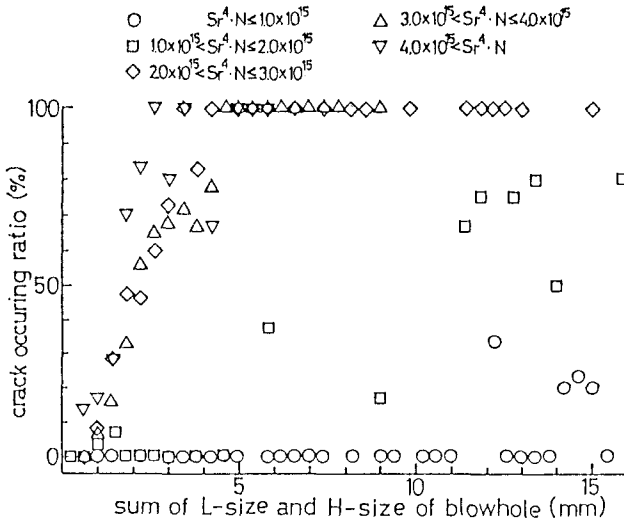


図10 疲労亀裂の発生率

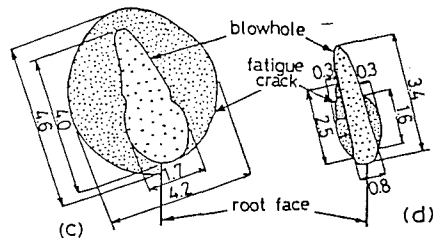
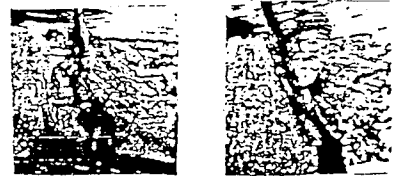
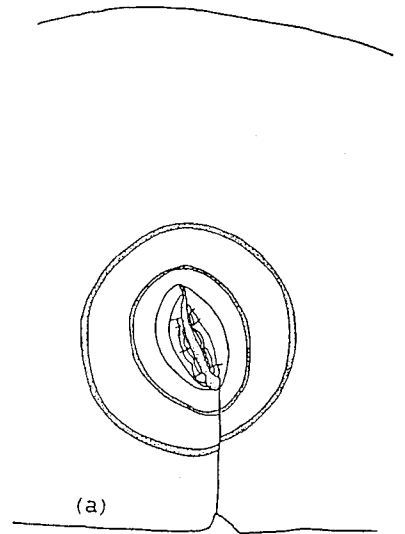
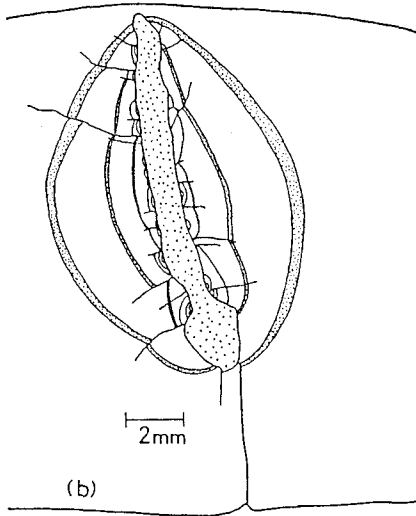


図11 ビーチマークと潜在疲労亀裂の観察図

(2) 一つのブローホールから発生する疲労亀裂の数

ビーチマークおよび潜在疲労亀裂を観察することにより、一つのブローホールから発生する疲労亀裂の数および発生間隔を調べた。図11(a), (b) にビーチマークの観察図、図11(c), (d) に潜在疲労亀裂の観察図を示す。ビーチマークの観察から、図(a) の破面ではブローホールの側壁の20箇所、図(b) の破面では13箇所から疲労亀裂が発生していることがわかる。また、図(d) の潜在疲労亀裂面では4箇所から疲労亀裂が発生している。

図12に破断面および潜在疲労亀裂面を観察することによって求めたブローホールの周の単位長さ当たりの亀裂発生数とブローホールの形状比 H/W の関係を、ブローホールの幅 W によって記号を変えて示す。単位長さ当たりの亀裂発生数は、 H/W あるいは W が変わっても、さほど変化していない。したがって、周の長いブローホールほど亀裂発生数は多くなる。なお、ここでの単位長さ当たりの亀裂発生数の平均は 0.9個/mmである。

図13に亀裂発生間隔の分布を示す。亀裂発生間隔は 0.2mm~12.2mmの範囲に分布している。図中の破線は亀裂発生間隔が対数正規分布に従うと仮定して求めた分布曲線である。この仮定はカイ二乗検定により有意水準5%で妥当であることが確かめられた。

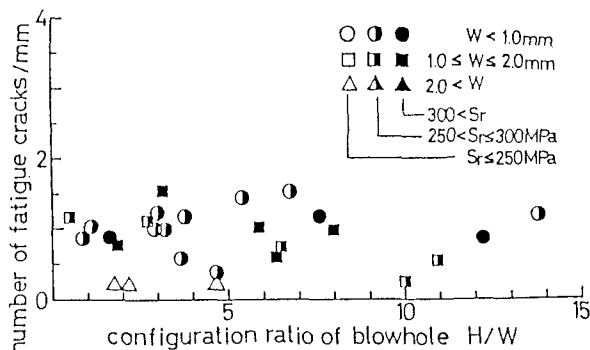


図12 ブローホールの周の単位長さ当たりの亀裂発生数

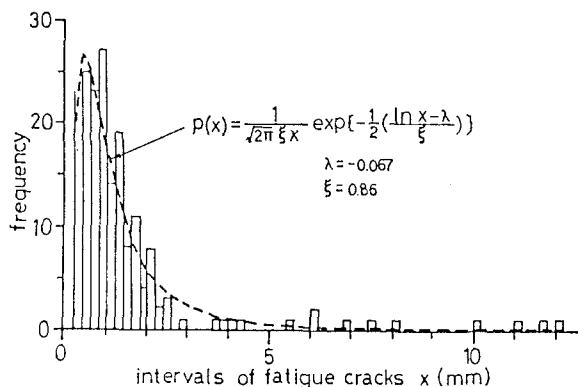


図13 疲労亀裂発生間隔の分布

(3) 疲労亀裂の進展性状

図14に示すごとく疲労亀裂の寸法を定義し、ビーチマークを観察することによって求めた亀裂深さ a と寿命比 n/N_f (n : 対応するビーチマークが形成されるまでの寿命、 N_f : 疲労寿命)の関係を図15に示す。疲労亀裂は寿命の極めて初期に発生しており、例えば深さ0.1mmの亀裂は疲労寿命の約20%の時点で生じている。

図16に、図11(a), (b) の破面での亀裂進展に伴う亀裂形状比 a/b の変化を示す。ブローホールの側壁に生じた複数の微小な亀裂は、進展に伴い互いに合体を繰り返しながらブローホールを包み込むように進展している。このとき、最初の亀裂の形状が半円形に近い場合、亀裂の形

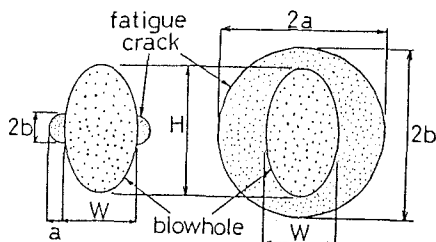


図14 疲労亀裂の寸法の定義

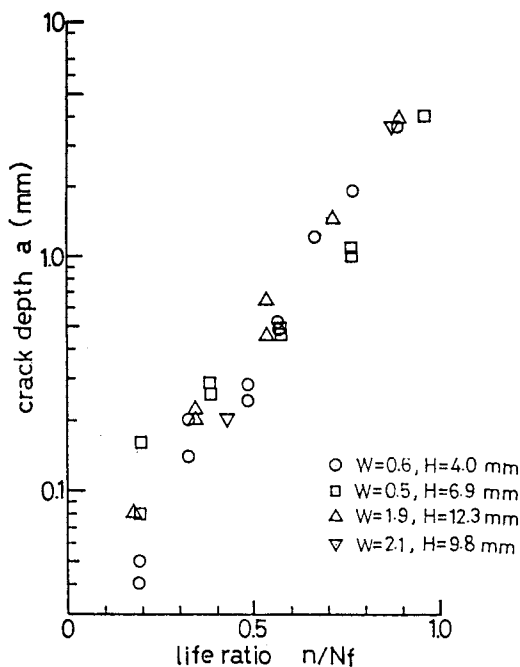


図15 亀裂深さと寿命比の関係

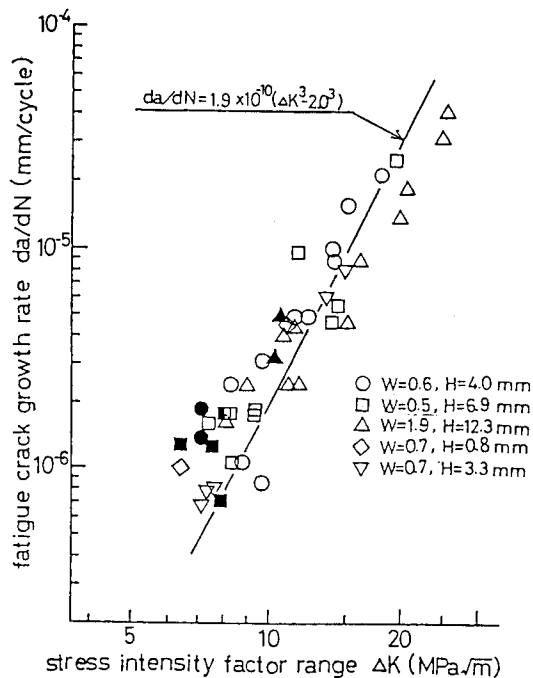


図17 ブローホールから発生した疲労亀裂の進展速度

状は進展に伴い偏平となる。最初の亀裂の形状が偏平な場合には、一旦半円形に近づくように進展し、最初の亀裂の形状が半円形に近い場合の亀裂形状変化とはほぼ一致する。また、複数の亀裂の合体が生じれば、亀裂の形状は一時的に偏平となる。さらに亀裂が進展しブローホールを包含すると、亀裂の形状は進展に伴い偏平な楕円形から円形に近づく。

図17にピーチマークの間隔から求めた深さ方向の疲労亀裂進展速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK の関係を示す。 ΔK の算出においては、後述するように応力集中、亀

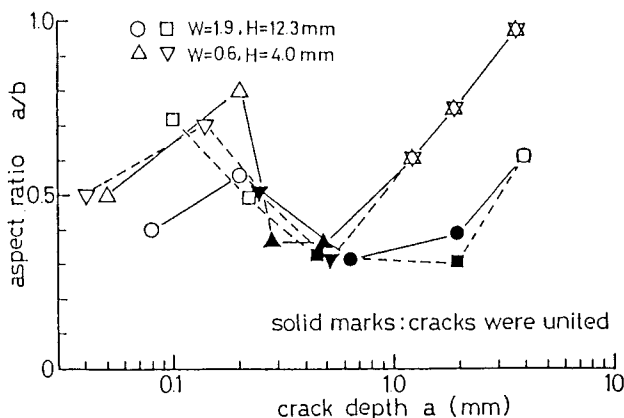


図16 進展に伴う亀裂形状の変化

裂形状、表面亀裂、板幅の影響を考慮している。図中の実線は、数多くの疲労亀裂進展に関するデータを収集・整理することにより求めた鋼素材での平均的な $da/dN - \Delta K$ 関係である。¹¹⁾ また、黒塗りの印は深さ0.1mm以下の微小な亀裂からの進展速度を示している。

ブローホールから発生する疲労亀裂の進展速度と応力拡大係数範囲の関係は両対数紙上でほぼ直線関係にあり、実線で示す鋼素材での関係とはほぼ一致している。また、ブローホールの形状・寸法がかわっても、疲労亀裂進展速度と応力拡大係数範囲の関係はさほど変化していない。亀裂が微小な間の進展速度は、亀裂が比較的大きいときの進展速度と比べ若干高くなっている。

6. 疲労亀裂進展の解析

本章では、破壊力学の手法を用いて、ブローホールから発生する疲労亀裂進展の解析を行なう。

(1) 解析条件

a) ブローホールの単純な形状の切り欠きへの置き換え

3で示したごとく、ブローホールの溶接直角断面での幅Wと溶接方向の長さLはほぼ等しいことから、高さ方向を軸とする回転楕円体形の空洞に置き換えた。また、疲労亀裂は応力直角断面（図6のy z面）で発生し進展すると考えた。

b) 応力拡大係数範囲

図14(a)に示す半楕円形の亀裂の最深点（A点）での応力拡大係数範囲 ΔK_A および幅方向の前縁（B点）での応力拡大係数範囲 ΔK_B は次式から求めた。

$$\begin{aligned}\Delta K_A &= F_{eA} \cdot F_{sA} \cdot F_{gA} \cdot S_r \sqrt{\pi a} \\ \Delta K_B &= F_{eB} \cdot F_{gB} \cdot S_r \sqrt{\pi a}\end{aligned}\quad (1)$$

S_r : 公称応力範囲、 a : 亀裂深さ

F_{eA} 、 F_{eB} は亀裂形状、 F_{sA} は亀裂が自由表面（ブローホールの内壁）を有することに対する補正係数であり、次式で与えられる。¹²⁾

$$\begin{aligned}F_{eA} &= 1 / [1 + 1.464(a/b)^{1.65}] \quad (a/b \leq 1) \\ &= 1 / [1 + 1.464(a/b)^{1.65}] \sqrt{a/b} \quad (a/b > 1) \\ F_{eB} &= F_{eA} \cdot \sqrt{a/b}\end{aligned}\quad (2)$$

$$F_{sA} = 1 + 0.12 (1 - a/b) \quad (3)$$

F_{gA} 、 F_{gB} はブローホールの応力集中に対する補正係数である。 F_{gA} の値は図7に示した応力分布に基づき重ね合わせの原理から求めた。^{13,14)} F_{gB} の値は、図6に示すごとく回転楕円体の周に沿っての応力集中がほぼ一様であることから、それらの平均とした。

図18にブローホールの幅Wを 0.5, 1.0, 2.0mm、形状比 H/Wを1, 2, 4 とした場合の亀裂深さに伴う F_g の値の変化を示す。 F_{gA} の値は、ブローホールの幅が広くなるにしたがって、また形状が細長くなるにしたがって高くなっている。

図14(b)に示す楕円形の亀裂のA点、B点での応力拡大係数範囲 ΔK_A 、 ΔK_B は次式から求めた。

$$\begin{aligned}\Delta K_A &= F_{eA} \cdot F_{tA} \cdot S_r \sqrt{\pi a} \\ \Delta K_B &= F_{eB} \cdot F_{tB} \cdot S_r \sqrt{\pi a}\end{aligned}\quad (4)$$

F_{tA} 、 F_{tB} は、有限板幅・板厚に対する補正係数であり、次式で与えられる。

$$F_{tA} = [1 - 0.025 (2a/D)^2 + 0.06 (2a/D)^4] \sqrt{\sec(\pi a)} \quad (5)$$

$$F_{tB} = [1 - 0.025 (2b/T)^2 + 0.06 (2b/T)^4] \sqrt{\sec(\pi a)}$$

D, T : 試験体の幅(60mm)、板厚(16mm)

c) 疲労亀裂進展速度と応力拡大係数範囲の関係

疲労亀裂進展速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK の関係は次式で与えた。

$$da/dN = 1.9 \times 10^{-10} (\Delta K^4 - \Delta K_{th}^4) \quad (6)$$

da/dN : mm/cycle, ΔK : $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, ΔK_{th} : 下限界応力拡大係数範囲($2\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)

(6) 式は奥村らの提案式¹¹⁾(図17の実線)に、 ΔK_{th} を考慮したものである。 ΔK_{th} の値は、溶接継手の疲労亀裂進展特性について検討した結果¹⁵⁾に基づいて定めた。

d) 亀裂合体条件

図19に示すごとく、ブローホールの側壁から複数の疲労亀裂が生じる場合、隣接する二つの亀裂 (a_1, b_1), (a_2, b_2) の前縁が接した時点で二つの亀裂は合体したとみなした。合体後の亀裂は、深さ a_3 を a_1, a_2 のどちらか大きいほうと等しく、幅 b_3 を b_1 と b_2 の和とした。亀裂が合体するまでの亀裂の相互干渉効果はないものとした。

e) 解析手順

- 1 初期亀裂の数、寸法 (a_i, b_i)、位置を設定する。
- 2 a) 項にしたがい、 ΔK_A 、 ΔK_B を算出する。
- 3 ΔK_A 、 ΔK_B を (6) 式に代入し、 Δn 回の応力繰返しによる亀裂増分 Δa 、 Δb を求める。
- 4 新たな亀裂寸法 ($a + \Delta a$ 、 $b + \Delta b$) を定める。
- 5 2に戻る。

2 から 5 の手順を、亀裂が所定の寸法となるまで繰り返す。

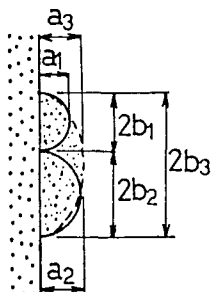


図19 亀裂合体の定義

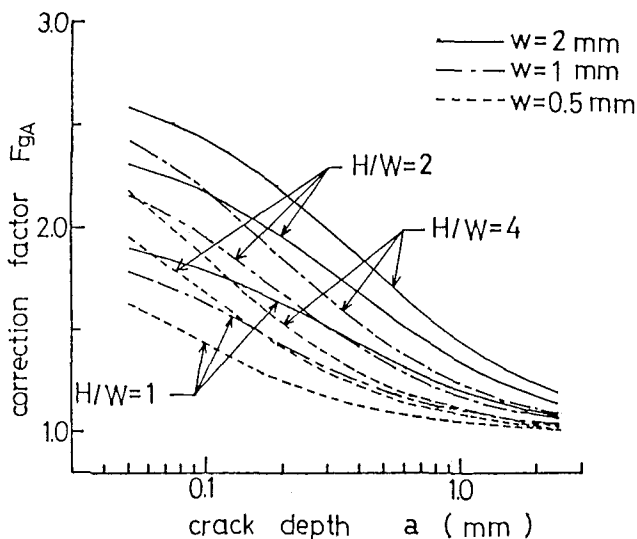


図18 亀裂深さに伴う補正係数 F_g の変化

analyzed measured

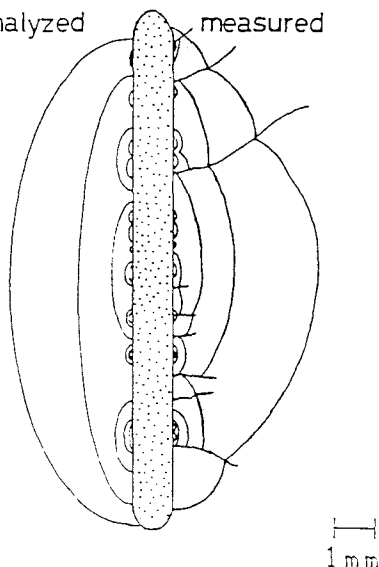


図20 疲労亀裂の進展図

(解析結果と実験結果の比較)

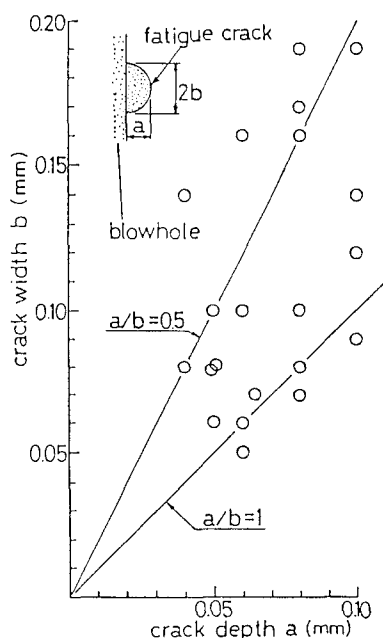


図21 微小亀裂の形状

(2) 解析結果

図11(b)に示すピーチマークを対象として、亀裂進展の解析を行なった結果を図20に示す。解析結果は実験結果と良く一致している。

破壊力学の手法を用いて継手の疲労寿命を予測する場合、初期亀裂をどのように仮定するかが結果に大きな影響を及ぼす。図16に示すごとく、深さ 0.1mmの疲労亀裂が形成されるまでの寿命は疲労寿命の 20%程度にすぎない。したがって、初期亀裂の深さを 0.1mm 以下とすれば、疲労寿命の大部分が予測可能となる。図21は、深さ 0.1mm以下の微小な亀裂の深さ a と幅 b との関係を示している。データの多くは、形状比 a/b が 0.5-1.0の範囲にプロットされている。また、ここでの最小の亀裂深さは 0.04mm であるが、このような小さな亀裂からの進展速度も (7) 式の $da/dN - \Delta K$ 関係とはほぼ一致している (図17参照)。以上の結果および (2) 項の亀裂発生間隔の分布に基づき初期亀裂を仮定し、疲労寿命を予測した。その際、限界亀裂寸法は、 $2b =$ (板厚の8割) とした。初期亀裂は、モンテカルロシミュレーションにより求めた間隔、深さ、幅でブローホールの側壁に複数個仮定した。初期亀裂の間隔は 0.2-12.2mm の範囲で図13に示す分布から定めた。また、初期亀裂深さ a_i は 0.05-0.10mm、形状比 a_i/b_i は 0.5-1.0の範囲で一様分布に従うとして定めた。

以上の条件で、種々の形状・寸法のブローホールについて疲労寿命を予測し、それとブローホールの幅との関係を図22に示す。ここでは、一つのブローホールについて10回ないし50回のシミュレーションを行ない初期亀裂を設定している。図中の黒く塗り潰した印は50回シミュレーション、白抜き印10回シミュレーションから求めた疲労寿命の対数平均値を示している。また、寿命の対数平均値から標準偏差だけ離れた値も示している。疲労寿命は、ブローホールの幅が広くなるにしたがって、両対数紙上ではほぼ直線的に減少しており、幅が2倍となれば寿命はほぼ 1/2となっている。。また、幅が同じであれば、ブローホールの形状が細長くなるにしたがって疲労寿命は減少しており、 H/W が2倍になると寿命は 2/3から 1/2まで減少している。これは、図18に示したよ

うに、幅が大きく、また形状が細長なるにしたがって、応力集中に対する応力拡大係数の補正係数 F_g の値が高くなり、疲労亀裂進展速度が高くなるためである。

潜在疲労亀裂を初期亀裂として亀裂進展寿命を求め、それと潜在疲労亀裂が形成されるまでの寿命を加えることにより、疲労寿命を求めた。図23は、図8に示した結果も含めて、応力範囲 S_r と疲労寿命 N_f の関係を示したものである。図24は、図23に示す $S_r - N_f$ 関係のうち、比較的データの数が多い $S_r = 335\text{MPa}$

近傍の疲労寿命を対象として、ブローホールの幅 W との関係を示したものである。データはブローホールの形状が細長いものほど (H/W が大きい) 短寿命側に位置している。図中の実線は疲労寿命の予測値であるが、予測値はここでのデータとほぼ一致している。

7. ブローホールの円形亀裂への置き換え

図25は、ASMEコードにしたがってブローホールをその幅および高さを短軸・長軸とするだ円形のき裂に置き換えた場合の寿命推定値とブローホールの幅の関係を示したものである。なお、ブローホールの形状比 H/W が1のとき、ブローホールをその内接円に等しいき裂に置き換えることと対応する。図中の一点鎖線はASMEコードと同様にき裂が相似形を保ちながら進展するとした場合、破線は進展に伴う亀裂形状の変化を考慮した場合の寿命予測値である。また、実線は前章で示したごとくブローホールを微小な亀裂を伴う回転楕円体形の空洞とみなした場合の寿命予測結果である。楕円形の亀裂に置き換えたいずれの場合も空洞とみなした場合と比べ、ブローホールの幅の増大に伴う予測寿命の変化が急となっている。特に、相似形を保ちながらき裂が進展するとした場合に予測寿命の差が大きい。

以上のように、ブローホールをその幅および高さを短軸・長軸とするだ円形のき裂に置き換えた場合、ブローホール寸法の増大に伴う疲労寿命の減少率を高めに見積ることになる。しかし、計算の簡便さからブローホールを単純な形状に置き換えること、また進展に伴うき裂形状の変化を単純化することは有益である。そこでブローホールを次ように円形のき裂に置き換えた。すなわち、幅 W 、高さ H のブローホールについて、空洞とみなした場合の予測寿命と円形のき裂からの寿命が一致するようにき裂の直径 $2ae$ を定めた。

$2ae$ と W 、 H の関係について重回帰解析を行なった結果、次の関係が得られた。

$$2ae = 0.80 \times W^{0.057} \times H^{0.616} \quad (7)$$

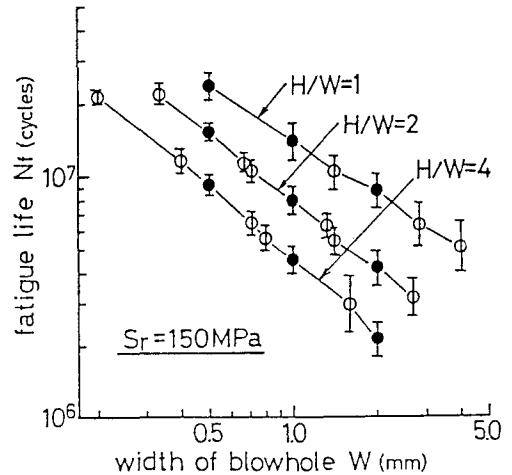


図22 疲労寿命予測値とブローホールの幅の関係

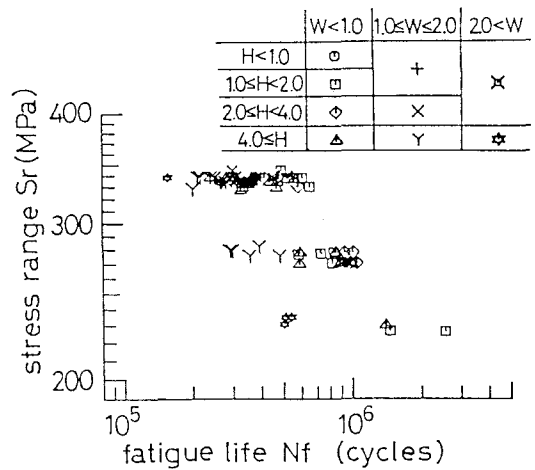


図23 応力範囲と疲労寿命の関係

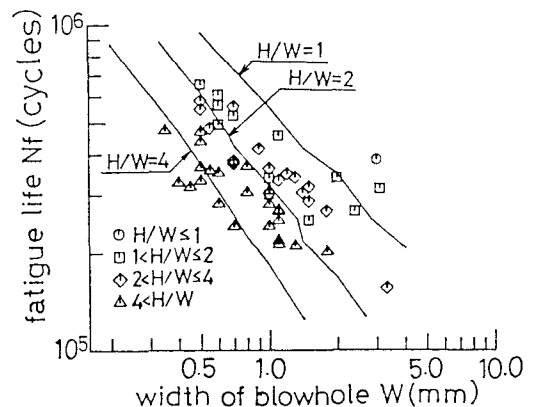


図24 疲労寿命とブローホールの幅の関係

図26は、図24に示すデータについて (7)式より $2ae$ を求め、疲労寿命との関係を示したものである。

$2ae$ で整理した場合、 W で整理した場合に見られたようなブローホールの形状比 H/W による疲労寿命の相違は認められない。図中の実線は寿命推定結果である。推定寿命はここでのデータと比べ若干短寿命側位置しているにすぎない。したがって、(7) によるブローホールのき裂への置き換えは有効と言えよう。

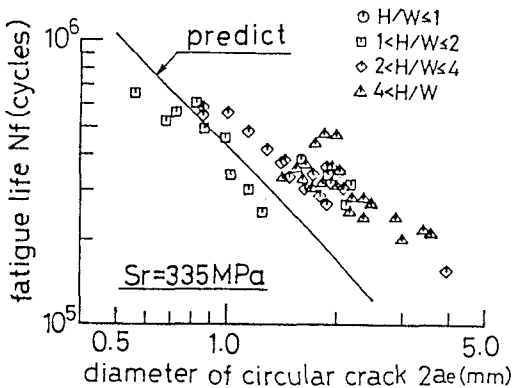


図26 疲労寿命と等価円形亀裂の関係

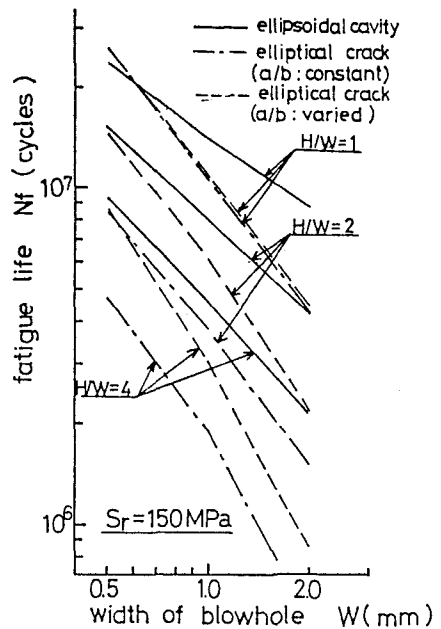


図25 楕円形の初期亀裂亀裂を
仮定した場合の疲労寿命

8. まとめ

- (1) 継手の疲労強度は、ブローホールの幅および高さが大きくなるにしたがって低下する。
- (2) ブローホールから疲労き裂が発生する確率は、ブローホールの周が長いほど高い。
- (3) ブローホールの周の単位長さあたりのき裂発生数はブローホールの形状・寸法にさほど影響されない。
疲労き裂の発生間隔は対数正規分布にしたがう。
- (4) 寿命の極めて初期に複数の半だ円形の疲労き裂がブローホールの壁面から発生する。それらのき裂は互いに合体を繰り返しながらブローホールを包み込むように進展する。このときの疲労き裂進展速度と応力拡大係数範囲の関係は、鋼素材での関係とほぼ一致する。
- (5) ブローホールを微小なき裂を伴う回転楕円体形の空洞とみなし、疲労亀裂進展の解析を行なった。その結果は、実験結果とよく一致した。
- (6) ブローホールをその幅と高さを短軸・長軸とするだ円形のき裂に置き換えることは、ブローホールの寸法の増大による疲労寿命の減少の程度を高め評価することになる。
- (7) (5) の結果に基づき、幅 W 、高さ H のブローホールは直径 $2ae$ の円形のき裂に置き換えられることを示した。

$$2ae = 0.80 \times W^{0.057} \times H^{0.616}$$

<参 考 文 献>

- 1) Gurney, T.R. : *Fatigue of Welded structures* (2nd edition), Cambridge University Press (1979)
- 2) 西村俊夫、田島二郎、奥川淳志、三木千寿 : レ型開先縦方向溶接継手を有する鋼部材の疲労強度, 土木学会論文報告集, No.291, pp.27-40 (1979)
- 3) Miki, C., Nishino, F., Tajima, J. and Kishimoto, Y. : Initiation and Propagation of Fatigue Cracks in Partially Penetrated Longitudinal Welds, *Proceedings of JSCE*, No.312, pp.129-140 (1981)
- 4) Miki, C., Tajima, J., Asahi, K. and Takenouchi, H. : Fatigue of Large-Sized Longitudinal Butt Welds with Partial Penetration, *Proceedings of JSCE*, No.322, pp.143-156 (1982)
- 5) Miki, C., Nishino, F., Hirabayashi, Y. and Ohga, H. : Fatigue Strength of Longitudinal Welded Joints Containing Blowholes, *Proceedings of JSCE*, No.325, pp.155-165 (1982),
- 6) 久保村圭助、下川浩資、竹名興英 : 鉄道併用橋建設のための新技術の開発, 土木学会誌, Vol.8, No.6, pp.18-27 (1983)
- 7) ASME : *Boiler and Pressure Vessel Code*, Section XI, Rule for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components (1983)
- 8) BSI : *Guidance on Some Methods for the Derivation of Acceptance Levels for Defects in Fusion Welded Joints*, PD6493 (1980)
- 9) Hirt, M.A., and Fisher, J.W. : Fatigue Crack Growth in Welded Beams, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.5, pp.413-429 (1973)
- 10) Sadowsky, M.A. and Sternberg, E. : Stress Concentration Around an Ellipsoidal Cavity in an Infinite Body under Arbitrary Plane Stress Perpendicular to the Axis of Revolution of Cavity, *Journal of Applied Mechanics*, Trans. ASME, Vol.70, pp.A191-A201 (1947)
- 11) Okumura, T., Nishimura, T., Miki, C. and Hasegawa, K. : Fatigue Crack Growth Rates in Structural Steels, *Proceedings of JSCE*, No.322, pp.175-178 (1982)
- 12) Newman, J.C.Jr. : A Review and Assessment of the Stress Intensity Factors for Surface Crack, *ASTM STP687*, pp.16-49 (1979)
- 13) 岡村弘之 : 線形破壊力学入門、倍風館 (1977)
- 14) Albracht, P. and Yamada, K. : Rapid Calculation of Stress Intensity Factors, *Proceedings of ASCE*, 103-ST2, pp.377-389 (1977)
- 15) Miki, C., Mori, T. and Tajima, J. : Effect of Stress Ratio and Tensile Residual Stresses on Near Threshold Fatigue Crack Growth, *Proceedings of JSCE* (投稿中)

(1985年10月18日受付)