

氏 名	多 田 周 二
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成元年3月24日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学第二専攻
学 位 論 文 題 目	疲労き裂進展抵抗評価に関する破壊力学的研究
指 導 教 官	東北大学教授 前川 一郎
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 前川 一郎 東北大学教授 北條 英典 東北大学教授 高橋 秀明 東北大学助教授 沢木 洋三

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

近年科学技術の進歩にともない、機械・構造物は複雑化し、その高性能化が一段と求められている。このため、限界に近い設計が課せられ、従来の材料力学的設計手法においては取り扱い得なかった材料内のき裂状欠陥に対しても、構造安全性を保証しておくことが必要不可欠となってきている。このためには、疲労き裂伝播速度に対する解析的表示式を得ることが基本となり、この分野の研究が強く望まれている現状である。

このような点から、本論文は材料の疲労き裂進展抵抗評価に関して、特に下限界から最終破断にいたる応力拡大係数の全範囲にわたる破壊力学的評価方法を提案し、これを基礎として腐食環境や低温環境の場合も含めた統一的な説明を目的としたもので全文6章よりなる。

第 2 章 疲労特性応力拡大係数の提案と疲労き裂進展抵抗表示式

材料の疲労き裂伝播速度 da/dN と応力拡大係数幅 ΔK との関係は、Bowie らによって提案された四母数ワイブル関数、

$$\frac{da}{dN} = e + (V - e) \left\{ -\ln \left(1 - \frac{\Delta K}{\Delta K_{rc}} \right) \right\}^{1/\kappa} \quad (1)$$

によって、下限界応力拡大係数幅 ΔK_{ls} から最終破断時疲労破壊靱性幅 ΔK_{rc} にいたる応力拡大係

数幅の全範囲にわたりうまく表示される。しかしながら、パラメータ e および v の物理的意義については従来明らかにされていなかった。

そこで、これら e および v に対応する応力拡大係数幅をそれぞれ ΔK_o および ΔK_v として応力比 R 依存性を調べたところ(図1)、これらの値はいずれも $1-R$ に比例し、繰り返し荷重中の最大応力拡大係数 K_{max} が材料によって決まる一定の値になっていることが見いだされた。また、これらの値は、き裂伝播挙動の第二領域の開始および第三領域の開始を規定していることも明らかにされた。

K_o はき裂先端の塑性域寸法が材料の結晶粒径に等しくするときの応力拡大係数であると考えると、材料の降伏応力を σ_y 、結晶粒径を d として $\sigma_y\sqrt{d}$ に比例することになり、多くの実験結果をうまく説明することができる。

また詳細な破面観察によって、 K_v は疲労き裂の進展に静的割れの影響が重畳し始めるときの応力拡大係数に対応していることが明らかにされ、この値は疲労破壊靱性 K_{rc} の0.632倍で与えられる。このように、いわゆる疲労き裂進展の第二領域ならびに第三領域は、き裂先端の応力拡大係数が材料によって決まる特定の値に達したときに開始するものであることを明らかにし、それぞれ疲労特性応力拡大係数 K_o および K_v として提案した。

第3章 疲労き裂進展抵抗表示式の推定

第2章で提案した疲労特性応力拡大係数幅 ΔK_o および ΔK_v に対して、疲労破壊靱性幅 ΔK_{rc} との関係として次式が導かれた、

$$\Delta K_v = 0.632\Delta K_{rc} \quad (2)$$

$$\Delta K_o = \Delta K_{rc} \left(\frac{-2e}{v} \right)^k \quad (3)$$

これらの特異な関数関係を利用することにより、疲労き裂進展速度表示式のパラメータを簡単に推定することができる。

図2に示す、比較的短時間のもとで得られた疲労き裂進展データ(黒丸印)に対して、き裂進展速度の遅い範囲のデータを直線(破線)で近似すると、データがこの直線から逸脱し始める点として点 V が決まり、(2)式の関係とあわせてパラメータ v 、 ΔK_v および ΔK_{rc} が決まる。

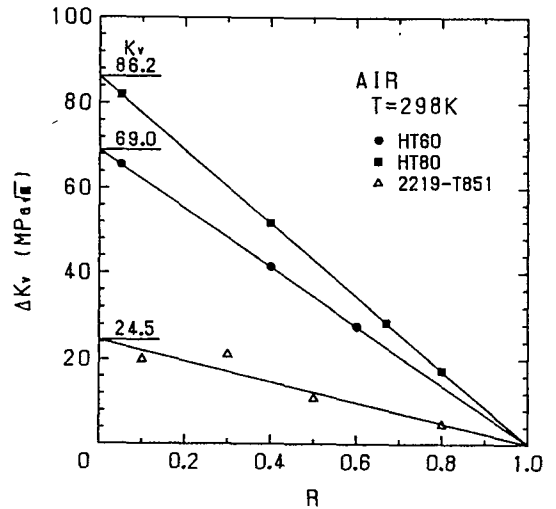


図1 ΔK_v の応力比依存性

一方、(1)式を変形し両辺の対数をとると次式が得られ、

$$\ln\{-\ln(1 - \frac{\Delta K}{\Delta K_{fc}})\} = K \ln(\frac{da}{dN}) - K \ln(v) \quad (4)$$

従って、いわゆるワイブル確率紙上にデータをプロットすると直線として表され、その勾配がパラメータ k を与える。よって図2において点D ($2k \Delta K_{fc} \cdot V$) が決まり、この点を通り $1/k$ の勾配をもつ直線(一点鎖線)を描くと、(3)式の関係よりこの直線は第二領域を近似した直線(破線)と点E (ΔK_{th} , $-e$) で交わることになる。

図2中の実線はこの推定結果を示したものであるが、この解析には含まれなかった白丸印で示したき裂進展速度の遅いデータに対してもよく一致していることがわかる。

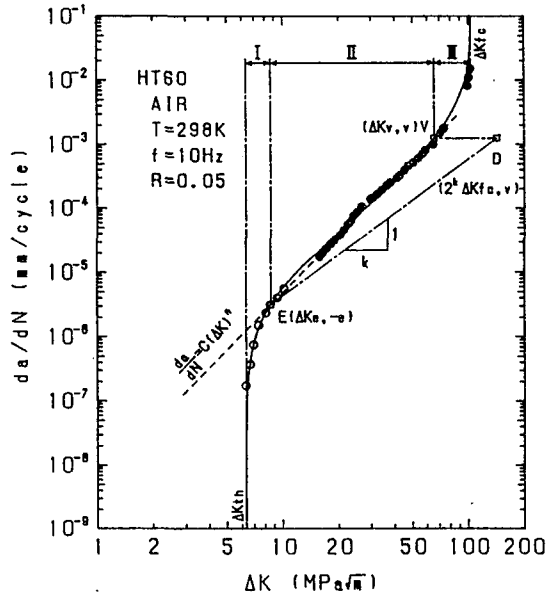


図2 疲労き裂進展曲線の推定

第4章 腐食環境中における疲労き裂進展挙動

このように、材料の疲労き裂進展速度 da/dN と応力拡大係数幅 ΔK との関係が明らかにされたので、環境が変わった場合の挙動の変化について検討した。その結果、腐食環境中における疲労き裂進展データは、 ΔK の低い範囲ではいずれの温度および応力周波数の場合においても、常温大気中におけるそれを低 ΔK 側へ平行移動したものとして表されることが明らかにされた(図3太い実線)。

腐食環境中における疲労き裂伝播挙動には、機械的き裂進展挙動に化学的な腐食反応が重畳している。

応力拡大係数の小さい領域では腐食反応に十分な活性面が形成されないが、応力拡大係数が大きくなるとき裂進展速度も速くなり、腐食反応がこれに追従し得なくなる。よって、き裂進展挙動は大気中の挙動に漸近する。

いま、仮に材料が最終破断にいたるまで腐食反応が追従し得たと仮定すると、これはき裂先端部の材料が局部

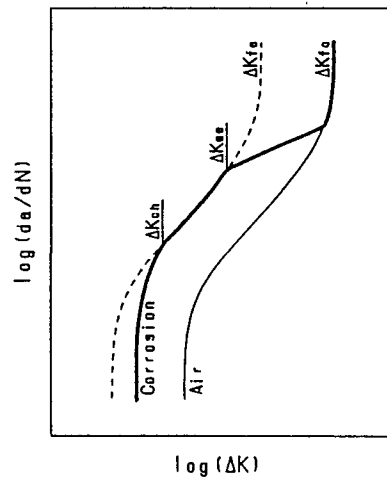


図3 腐食疲労き裂進展曲線

的に強度の低い材料に置換された状態に相当すると考えられる。このように仮定すると、腐食疲労き裂進展曲線は腐食環境中の疲労破壊靱性幅とも言うべき値に漸近して行くことになる(図3破線)。仮想的な値ではあるが、この値を環境疲労破壊靱性幅 ΔK_{re} として提案した。

この環境疲労破壊靱性 K_{re} は、水素の拡散による原子間結合力の低下を考慮することにより、疲労破壊靱性 K_{rc} との関係として次式が導かれた、

$$K_{rc} - K_{re} = \gamma \left\{ D_0 \cdot \exp\left(\frac{-Q}{R_0 T}\right) \cdot \frac{1}{f} \right\}^{1/2} \quad (5)$$

ここで T は環境溶液の温度、 f は応力周波数である。図4は上式の関係を示したものであるが、この環境疲労破壊靱性 K_{re} により、き裂進展速度に及ぼす温度および繰り返し速度の影響等が統一的に説明されることを明らかにした。

第5章 低温環境中における疲労き裂進展挙動

極低温環境下での疲労試験は、長時間にわたり低温環境を保持する必要があることなど、大気中の場合のそれと比較してはるかに困難なものである。そこで、ここではこれまでほとんど成果の得られていなかった下限値 ΔK_{th} ならびにその近傍における疲労き裂進展挙動について、第3章で提案した推定法を基礎として、4 Kを含む低温環境下での疲労き裂進展抵抗評価についての系統的な実験を行った。

オーステナイト系ステンレス鋼(SUS 304L)では、77 Kまでは温度の低下とともに疲労き裂進展曲線は ΔK の大きい範囲に移動し、き裂伝播曲線の交差はみられない。4 Kになると ΔK_{rc} が低下し、き裂進展速度が加速するとともに ΔK_{th} も低下するが、依然として ΔK_{rc} と ΔK_{th} との差は大きく、この温度においてもき裂は安定的に成長する。F T T以下の温度において、 K_{rc} が急激に低下するB C C構造の高張力鋼(HT 60)の結果と比較して、低温用構造材料としては、 K_{rc} が急激に低下することのない材料が有用であることが指摘された。

また本研究により、低温環境中での下限界近傍におけるき裂進展挙動が明らかにされたが、特に下限界応力拡大係数 K_{th} に対して次式が提案された。

$$K_{th} = \gamma \frac{\sigma_r \sqrt{d}}{2^k} \quad (6)$$

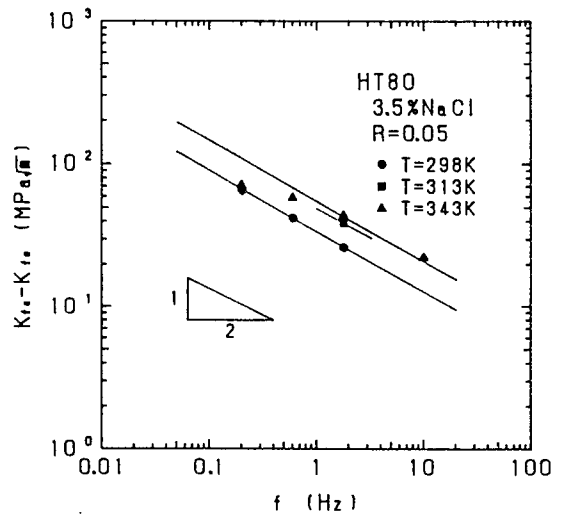


図4 $K_{rc} - K_{re}$ の周波数依存性

この関係は、各種の材料に対して低温環境下でも成立する式であることが実験的に確認された。

第6章 結 論

ますます過酷化する機械構造物の構造健全性評価に関連して、疲労き裂進展抵抗に対する破壊力学的評価法を提案し、従来必ずしも明らかにされていなかったいくつかの問題点を明らかにすることができた。いわゆる疲労き裂伝播の第二領域および第三領域は、き裂先端の応力拡大係数が材料によって決まる特定の値に達したときに開始することを明らかにし、これらを疲労特性応力拡大係数として提案した。

これら疲労特性応力拡大係数を知ることにより、 ΔK の全範囲にわたる疲労き裂進展曲線を推定する方法を提案した。

腐食環境中では、大気中の疲労破壊靱性に相当する環境疲労破壊靱性を考えることにより、環境の影響が統一的に説明される。

本研究で提案した推定法が、低温環境中での下限界値やその近傍での疲労き裂進展挙動の推定法として有効であることが確認された。

審 査 結 果 の 要 旨

近年、機械・構造物に対する設計条件は、ますます厳しいものとなり、その構造健全性を破壊力学の観点から保証しておくことが必要不可欠となってきた。本論文は、このための基礎として疲労き裂進展抵抗に対する破壊力学的評価法を提案し、これにより腐食環境や低温環境の場合を含めた統一的説明が行えることを高張力鋼、ステンレス鋼等数種の実用鋼材で実験的に確かめたほか、この方面で多くの新しい知見を得たものであり全編6章より成る。

第1章は緒論である。

第2章では、疲労き裂伝播の第二領域及び第三領域の開始が、いずれもき裂先端の応力拡大係数が材料によって決まる特定の値に達した時であることを明らかにし、これらを疲労特性応力拡大係数として提案している。また、これらの値は、疲労き裂伝播速度表示式としてBowieらが提案している四母数ワイブル関数のパラメータと対応したものとなっており、従来明らかにされていなかった物理的意味を明確にした。

第3章では、提案された疲労特性応力拡大係数と疲労破壊靱性などき裂進展抵抗を規定している他のパラメータとの関係を明らかにし、これを利用したき裂伝播曲線の簡単な推定法を提案している。

第4章では、腐食環境中でのき裂伝播速度の加速が、環境の影響による疲労破壊靱性の低下と対応していることを見出し、低下した靱性を環境疲労破壊靱性として提案している。この値は、環境の温度や繰返し速度などの影響を統一的に評価し得るものとなっており、広く有用な成果である。

第5章では、第3章で提案した推定法が低温環境中での下限界値やその近傍での疲労き裂進展挙動の評価法として有効であることを確認している。従来、特に低温において、実験的な決定が極めて困難であった事に対する解決策として実用価値の高い成果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、疲労き裂進展抵抗を規定している新しい破壊力学的パラメータを見いだし、繰返し速度、応力比はもとより、腐食環境や低温環境のような環境の影響も含めた統一的評価法に応用したもので、機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。