



A Study on the Fatigue Crack Growth Characteristics and Mutual Interaction Effect of Micro Defects in Structures

Lee, Hoyeon

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2013-09-25

(Date of Publication)

2014-09-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第5972号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1005972>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



論文内容の要旨

氏 名 李 浩 洲

專 攻 海事科学專攻

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

A Study on the Fatigue Crack Growth Characteristics and Mutual Interaction Effect of Micro Defects in Structures

(構造部材中の微小欠陥群の相互干渉効果及び疲労き裂進展特性に関する研究)

指導教員 藤本岳洋

【概要】

A Study on the Fatigue Crack Growth Characteristics and Mutual Interaction Effect of Micro Defects in Structures

(構造部材中の微小欠陥群の相互干渉効果及び疲労き裂進展特性に関する研究)

Chapter 1

Evaluation of Fatigue Crack Growth Behavior in Materials with Lubricating Oil Holes

構造部材の多くは用途に合わせた形状付与、締結などのためのボルト孔、冷却油孔等の認定がなされている。その結果、外力の作用によって部材局部に応力集中が生じることがある。通常、設計段階においてこの応力集中は許容値以下に抑制されている。しかし、この応力集中部もしくはその周辺に微小欠陥が生じるときには欠陥からの疲労き裂成長の予測が事故防止、適切な保守手法の選定のために重要な問題となる。

本章では疲労き裂進展実験によって円孔などによる部材局所の応力集中が疲労き裂進展に及ぼす影響を明らかにする研究目的に着目し、疲労実験を行った。研究では下の図1、2に示す装置や試験片(a12024-T351)を用いて行った。実験条件は荷重制御で最大荷重40kN、応力比0.1、繰返し速度、繰返し波形Sinに設計した。

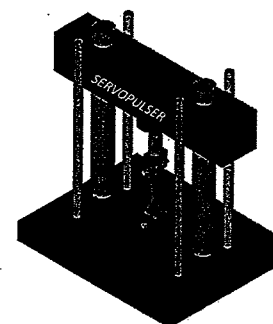


図1 実験装置

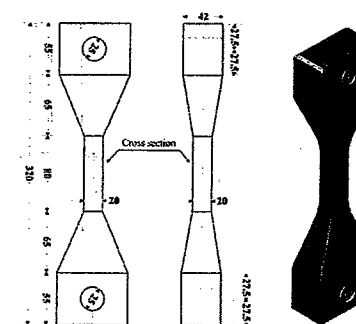


図2 試験片

(氏名： 李 浩淵 NO. 2)

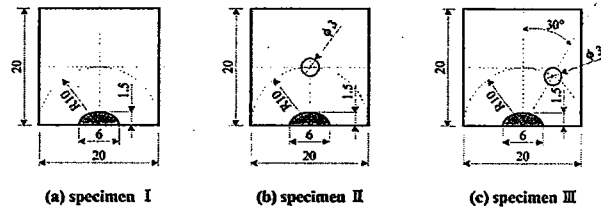


図3 応力集中部（円孔）位置

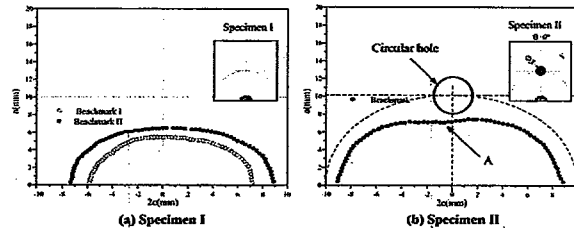


図4 円孔の有無によるき裂成長様子

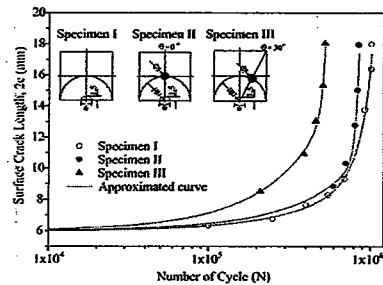


図5 表面疲労き裂長さとサイクル数の関係

そして、内部き裂進展様子を把握するためピーチマークを挿入する場合は荷重振幅を通常荷重振幅の50%にして 10^4 サイクルから 10^5 サイクル間に応力比を変えてピーチマークを破断面に挿入した。応力集中部の存在が疲労き裂成長に及ぼす影響を詳しく調べるため、図3(a)~(c)のように円孔設定箇所を変更した各種試験片を用いてき裂成長実験を行った。

その結果、図4に示したように円孔の存在は単純な引張荷重の下で表面き裂進展挙動に多大な影響を及ぼすことをわかった。また、図5のように疲労き裂進展寿命は円孔配置の影響を強く受けることがわかった。

(氏名： 李 浩淵 NO. 3)

Chapter 2

A Study on Fatigue Crack Growth Characteristics for Mutual Interaction Effect on 3-D Surface Crack

欠陥やき裂は単独で存在する場合もあるが、複数が密集して発生することもあり、これは新たなき裂の発生や成長挙動に影響を及ぼすことが指摘されている。接近したき裂や欠陥は相互干渉によって複雑な破壊挙動を示し、必ずしも単一き裂と同じ知見を適用することができない。そのため、欠陥評価において相互干渉の影響を安全側に考慮することが重要となる。しかし、接近したき裂や欠陥の相互干渉効果については実験および数値解析的な研究が実施されてきたが、その複雑性、多様性のために必ずしも定量的な評価に基づいて安全性を導出しているわけではなく過剰な安全率によって構造安全を表していることも少なくない。

本章ではき裂の相互干渉効果を定量的に高精度で調べるため単独や接近した二つの半楕円表面き裂に対して実験を実施する。実験で使用する試験片や初期き裂形状は図6, 7で示す。図7に示したようにき裂の形状はアスペクト比1とし、単独や二つのき裂の相互距離を変化させて試験片を加工する。そして、本実験ではピーチマーク法を用いて表面き裂成長挙動及び内部き裂前縁を把握して相互干渉効果の観察を行った。

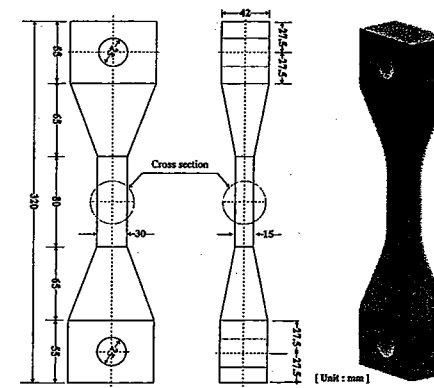


図6 試験片

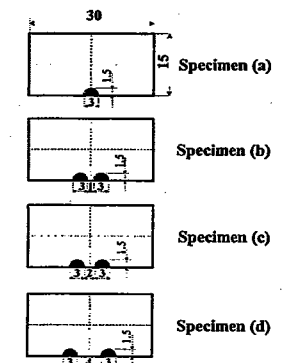


図7 初期き裂の形状

Chapter 3

3D Observation of Distorting Crack Growth in Three-Point Bending Specimen

構造物、機械には材料中の介在物、使用中の腐食や疲労、およびその他の原因で必ず微小的な欠陥が存在する。これらの微小欠陥を端として、有意な寸法の欠陥、き裂が生じることは少なくない。多くの構造物がき裂状欠陥を含み、その対策を強いられているが今日の現状である。この条件下において、構造物に予期せぬ過負荷が使用した状態を考える。このとき、構造物に生じたき裂面に対して荷重の使用方向は必ずしも法線方向であるとは限らない。構造物や機械などに生じたき裂面に対して荷重に使用が法線方向ではない場合、き裂面はねじれながら構造物中を進展していく。しかしながら、このような破壊挙動の詳細は必ずしも明らかにされているとはいえない。

従って、構造物や機械の最重要部にき裂が進展してしまうことを防ぎ、破壊事故の損害をできる限り軽くするためには、これら様々なき裂のねじれ進展現象における破壊経路予測理論を確立することが必要不可欠である。そのため、本研究ではまず実験は図8のような試験片を用いて三点曲げ破壊実験を行った。試験片材料PMMAはアクリル樹脂であるポリメチルメタアクリレートであり、図8に示したように初期き裂は、端面から25mmまで機械加工してから、ポップインでさらに10mmのエッジクラックを追加している。また、試験片に挿入したき裂は必ずしも表面に対して直角に設定したものばかりではない。図8下に示すようにZ軸とき裂面のなす角度 θ は 0° から 15° ずつ 45° まで変化させている。実験では、試験片に準静的荷重を作用させ、進展中のき裂を正面、Z軸側、X軸側からCCDカメラ、デジタルカメラを用いて撮影した。

そして、破壊経路の相違点とき裂進展量、き裂速度、応力拡大係数、破壊靱性値が各試験片のき裂面の初期傾斜角度 θ によりどのように違うかを明らかにした。

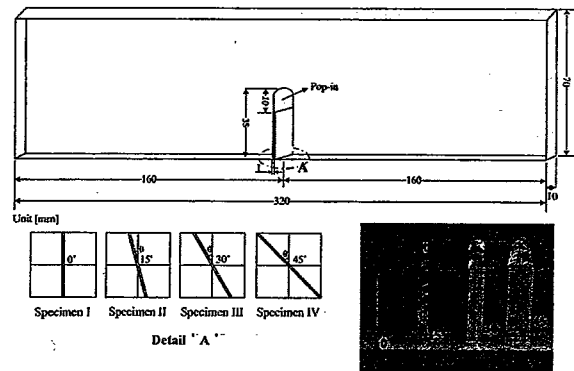


図8 試験片の寸法や形状

Chapter 3-1

Evaluation of Fatigue Crack Growth Characteristics about Mixed Mode Influence and Thickness Dependence Using the Three-point bending Specimens

最近、構造物や機械部品の軽量化を図るために、高強度鋼の使用が増えつつある。高強度鋼の一つであるクロムモリブデン鋼(SCM 鋼)は焼戻しに対する抵抗、機械的性質、靱性にも優れることから、自動車のクランクシャフトや歯車などに至るまで様々な機械部品に使用されている。それらの機器では、使用される場所、環境や状態によって荷重量は大きく変動し、またその使用方向も変化する。このような繰り返し荷重が長期に渡り使用すると金属疲労によって表面き裂が生じる。最終的な疲労き裂の向き、進展方向は荷重使用方向を法線方向とする方向となり、その大半はモードI支配型になることが知られている。しかし、高速作動機器の部材として利用された場合、衝突等、突発的要因で欠陥、微小き裂が生じる可能性がある。このような欠陥やき裂から成長する疲労き裂はモードI支配型になるようにき裂形状を変化させていく(疲労き裂成長が生じる)ものと考えられているが、モードI支配に至るまでの遷移過程の詳細は十分には明らかにされていない。最近混合モード状態における疲労き裂進展挙動の研究も進められているが、その背景には疲労き裂成長の挙動次第ではき裂位置の検出が困難となり構造物には思いもしない危険箇所が見過ごされ得る恐れがある。また、疲労き裂の相互干渉や安全性評価の指標であるASME SECTION XIの主たる適用範囲は自発的に生じた疲労き裂に対するものであり、突発的要因で生じた疲労によらない表面き裂に対しては普遍的に適用できる保証がない。そこで、本研究では図9に示したように傾斜初期き裂を挿入した三点曲げ試験片を用いて疲労き裂進展実験によって混合モード状態での疲労き裂挙動の観察を行い、その疲労き裂成長メカニズムを調べることにした。

その結果、き裂から生じる疲労き裂はねじれながら進展し、き裂傾斜角度は減少していく。その際、き裂先端前縁形状には大きな変化が無いことをピーチマークから確認した。疲労き裂進展がある程度継続するとき傾斜角度が減少し、き裂先端の力学的状態はモードI支配型へ移る。全体的なき裂進展履歴をみても、き裂進展末期のき裂進展率は純モードIき裂進展(き裂傾斜角度 0°)と大差ない状態になっていることが確認できた。

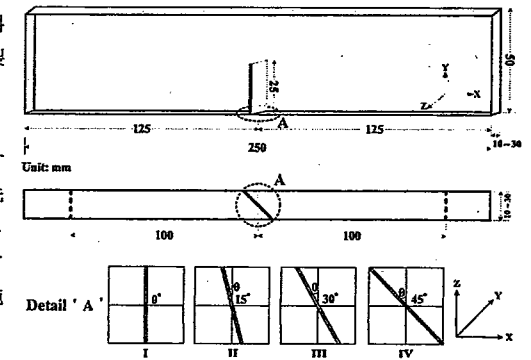


図9 試験片

Chapter 4

Strength Evaluation of Marine Hooks by Static-load and Fatigue Experiments

最近、建設現場や産業現場などで様々な用途にクレーンフックが幅広く使用している。例えば、船舶でエンジンの修理に用いられているオーバーヘッドフック、貨物の運搬や運送で用いられているクレーンフック、ショベルカーに取り付けられるフックの場合もある。

このように様々な用途にクレーンフックが使用されているがこのフックの破損、破損が問題となっている。特に作業するとき、業者の経験に基づいて行われる場合が多いので、フックには非常に大きな荷重がかかる。この作業が繰り返したらフックには変形、損傷などが生じる。実際現場では少々の変形や破損の程度で交換するということではなく、破断に至るまで使用しているので非常に危険である。従って、本研究では建設現場や産業現場、船舶などで幅広く使用しているフック (Specimen1) とよく破損される部分の直径及びラウンディングを変更させた3種類の試験片 (Specimen2) を用いて静的荷重実験および疲労実験を行った。そして、荷重を変化させることによってフックにどのような破損、破断が起こるかを調べた。

その結果、定格荷重の使用ではフックには大きな変形はなかったし、フックの首下部の直径が大きくなればフックの強度は増加することを確認した。

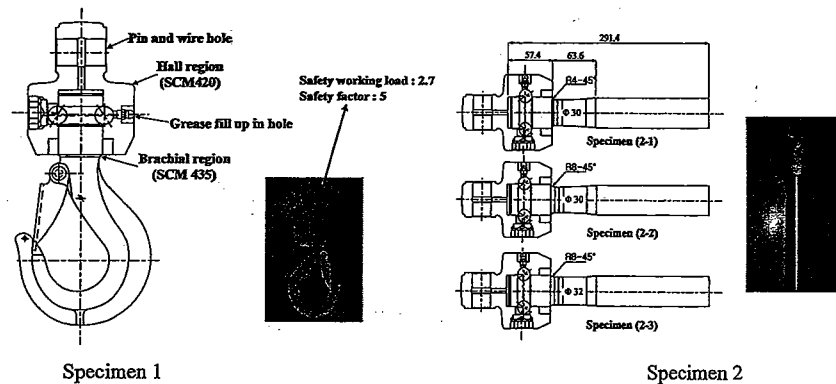


図10 試験片

氏名	李 浩淵		
論文 題目	A study on the fatigue crack growth characteristics and mutual interaction effect of micro defects in structures (邦文題目：構造部材中の微小欠陥群の相互干渉効果及び疲労き裂進展特性に関する研究)		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	准教授	藤本 岳洋
	副 査	教授	福岡 俊道
	副 査	教授	阿部 晃久
	副 査		
	副 査		印
要 旨			
【論文概要】 研究背景・目的： 構造強度の確保，事故防止の観点において，材料疲労が重要視されている．金属疲労を本来の原因とする破壊事故件数は構造物破壊事故の約8割を占める．また，近年の機械構造の軽量化，高出力化，形状複雑化等の影響を受けて，構造材料の疲労損傷挙動も多様化，複雑化している．今日の多様な構造利用環境において，検出き裂の危険性を高精度で見積もるために，様々な負荷条件下の疲労き裂成長メカニズムの解明が望まれるようになりつつある． 本研究では，様々な負荷条件下の疲労き裂成長挙動の基礎データを得るために，不連続部と成長き裂の干渉効果，複数表面き裂の干渉効果，非モードⅠ（非開口型）荷重条件下の疲労き裂成長に関する基礎実験を行っている．さらに，その応用例としてクレーンフックに関する横繰り返し荷重作用下の疲労破壊実験も行っている． 研究内容： 第1章 Introduction 本章では研究背景・目的（上記参照）を説明している． 第2章 Basic concepts in fatigue and fracture 破壊力学の基礎事項，材料疲労，開口型荷重支配下の疲労き裂進展則といった既知の基礎事項をまとめている． 第3章 Evaluation of fatigue crack growth behavior in materials with lubricating oil holes 内部に孔状不連続部を有する構造に生じる疲労き裂成長過程を評価した実験についてまとめている．この実験では，単に構造内部に孔状不連続部を設けると疲労寿命が低下するわけではなく，疲労き裂成長自体が孔の配置に強く依存することも判明している． 第4章 Fatigue crack growth path for structure containing multiple circular holes 複数表面き裂の干渉効果を調べるために，間隔を系統的に変化させた2つの表面き裂それぞれの成長過程観察実験を行っている．き裂間初期間隔が大きいほど，き裂同士が合体し単一き裂となり等価き裂断面を形成するために要する荷重サイクル数は増大する．き裂同士が合体し単一き裂面を形成するまでのき裂成長率はき裂間初期間隔に依存し，後続のき裂成長に大きな影響を及ぼすことが判明している． 第5章 3D observation of distorting crack growth in three-point bending specimen 非モードⅠ負荷下のき裂成長を調べるため，初期傾斜き裂に関する漸増負荷下のき裂成長予備実験を行っている．本章では試験片材料として透明ぜい性材を用いた．き裂進展初期には不安定なねじれ進展が生じることが確認できた． 第6章 Evaluation of fatigue crack growth characteristics about mix mode influence and thickness dependence using the three point bending specimens 非モードⅠ負荷下（混合モード下）の疲労き裂成長を調べるため，初期傾斜き裂に関する繰り返し荷重下の疲労き裂成長試験を行っている．この実験は各種の傾斜角度，板厚の条件下で実施されている．き裂の初期傾斜角度が大きい場合，き裂断面が大きくなること，混合モードの度合いが大きくなることから，同一負荷あたりに対してはき裂先端前縁における応力集中が緩和され，疲労き裂成長が遅れる傾向が認められた．			

氏名	李 浩淵
また，板厚が大きい試験片でもき裂断面が大きくなり疲労き裂進展が遅れる．但し，この場合は板厚そのものが大きいので，ねじり進展によってき裂先端の力学的状態がモードⅠ状態に戻るまでに相当量のき裂進展を要する．そのため，厚板構造の混合モード下の疲労き裂進展では，見かけの疲労寿命が増す傾向が認められた． 従来の純モードⅠの知見に基づくと，エンジニアは疲労き裂長さによって構造欠陥の危険性を断じがちになるが，混合モード作用下の疲労き裂に対しては板厚依存性が強く生じることには留意すべきである． 第7章 Strength evaluation of marine hooks by static-load and fatigue experiments 本章では研究の応用例の一端として，クレーンフックの横荷重繰り返し作用下の疲労損傷実験を行っている．クレーンの損傷は首下部位に集中し，横荷重に対しては軸径を増大させることがラウンディング増大より効果的であることが認められた． 【審査内容及び評価】 本研究では多様な荷重環境下における疲労き裂進展メカニズムを解明するため，各種の疲労き裂進展実験を行い，多くの知見を得ている．特に実用構造にも多々生じる疲労き裂と不連続部の干渉問題，疲労き裂同士士の干渉問題，混合モード下の疲労き裂干渉問題の基礎実験に取り組み，有益なデータを示したことは評価に値する．これらのデータを基に今後，複雑環境化の疲労破壊メカニズムの解明が進むことが期待できる． 以上のことから，本論文は博士（工学）の学位を得るに値する内容であると判断する． なお，本研究に関する公表論文は以下の査読付論文4編である．(1),(2)についてはフルペーパー審査であるとともに，国際会議において，本人が登壇，英語にて講演を行っている． (1) Nishioka, T., Lee, H. Y., Won, Y. J., and Fujimoto, T., "Strength Evaluation of Marine Crane Hooks by Static-load and Fatigue Experiments", The Japan Institution of Marine Engineering, Journal of JIME Vol.45 Special Issue ISME Busan 2009, pp.91-96, (2010.11) (7章の内容) (2) Nishioka, T., Lee, H. Y., "3D Observation of Distorting Crack Growth in Three-point Bending Specimen", Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol.5, No. 11-0671, (2012.06) (5章の内容) (3) 西岡俊久，元瑛暎，李浩淵，藤本岳洋，“潤滑油円孔を含む材料の疲労き裂進展特性評価”，日本マリンエンジニアリング学会誌 47 巻 5 号, pp89-94 (2012) (3章の内容) (4) 李 浩淵，藤本岳洋，“三点曲げ傾斜き裂試験片を用いた疲労き裂進展挙動に対する混合モードの影響及び板厚依存性に関する評価実験”，日本実験学会論文集「実験力学」（掲載決定済）	