

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05693

研究課題名(和文) 重合メッシュ法による三次元疲労き裂進展解析技術の高度化

研究課題名(英文) Improvement of S-version FEM code for 3-d. fatigue crack growth simulation.

研究代表者

菊池 正紀(Kikuchi, Masanori)

東京理科大学・理工学部機械工学科・教授

研究者番号：90107540

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：重合メッシュ法による亀裂進展解析手法の高度化のためにき裂縁に沿った閉口比の簡易算出法を開発した。これにより現実的なき裂進展形状の予測が可能となった。次いで3次元的な挙動を伴う疲労き裂進展解析を可能にした。開発した機能を用いて、原子力設備の維持規格で定められているAlignment ruleの精度検証を実施した。また閉口比の推定法のもう一つの方法として人工知能(AI)を利用する。その基礎的検討のために、機械学習によるき裂進展予測を実施した。本手法の普及、発展のためにS-FEM研究会を開催し、また成果を論文や国内外での学会で公表した。

研究成果の概要(英文)：S-version FEM code was updated. The crack closure effect is estimated by conventional method, and realistic fatigue crack growth simulation became possible. 3-dimensional crack growth simulation is applied to verify the alignment rule for nuclear power plant maintenance code. A new method estimating crack closure effect is proposed using AI technique. Basic research for the study by deep-learning is conducted. To improve the S-version FEM code, S-FEM seminars were organized. Research results have been published in the Journal and presented in domestic and international conferences

研究分野：材料力学、破壊力学、計算力学

キーワード：疲労亀裂進展解析 重合メッシュ法 有限要素法 き裂閉口比 疲労寿命

1. 研究開始当初の背景

近年、有限要素法によるき裂進展シミュレーション技術がいくつか開発されてきた。X-FEM がその一例であり、また FRANC3D などのき裂進展解析専用ソフトが市販されている。

申請者は重合メッシュ法によるき裂進展解析ソフトを開発し、様々な分野での問題を取り扱い、その成果を国内外の学術誌に公表してきた。これら一連の研究の中で申請者らは疲労き裂進展試験も実施し、数値解析結果との詳細な比較を行ってきた。その結果、現状のき裂進展解析システムを疲労き裂進展に利用しようとするときに避けられない問題点があることを指摘してきた。

その一つは、き裂先端に形成される塑性ひずみによるき裂閉口現象の評価である。従来は二次元き裂モデルを想定してこの評価が様々に行われてきた。しかし実在のき裂は三次元形状をしており、単純な三点曲げ試験による貫通き裂であっても、試験片厚さ方向にトンネリング現象を生じ、板厚方向に一樣な進展は生じない。またき裂閉口現象は板厚方向で異なる傾向を示す。これらを正確に評価して有効応力拡大係数範囲を定義しないと、三次元的なき裂形状の予測は全くできないことになる。この事実は申請者らの研究によって初めて明らかになったものである。しかしこの評価には多大の計算時間を必要とし、現実的ではなはため、より簡便な評価法の開発が必要である。

また原子力施設の維持基準に設けられている安全性を担保するルールはあまりに保守的である場合がある。その保守性の程度を評価するためにはここで開発された詳細な三次元き裂進展解析手法が必要である。その意味で本手法はそうした維持基準の評価・改良のために大きな役割を發揮することが期待できる。

一方こうした手法の開発の必要性は、国内・外ともにき裂進展解析が始まったばかりの時期であり、広く認識されているとは言えない。そこで S-FEM 研究会を主催して、本手法の普及を図るとともに、国内外での学会に積極的に参加して研究成果を広く知らせることで、この分野に関心を持ち研究に参加する研究者を増やすことが必要である。

2. 研究の目的

- (a) 疲労き裂進展解析におけるき裂閉口比の簡便な推定法の開発すること。これによりき裂進展予測をより現実的なものとする。
- (b) パラメトリックな疲労き裂進展試験の実施とデータ取得による Validation の確認。
- (c) 三次元き裂進展数値解析における有効な相当応力拡大係数の提案、特に混合モード下での検討
- (d) 研究会の開催による自動き裂進展数値

シミュレーションソフトの機能向上と普及。

- (e) 国内・外の学会、学会誌上での研究成果の発表

3. 研究の方法

- (a) 重合メッシュ法によるき裂進展数値解析システムの利便性を高め更なる高度化に取り組んだ。
- (b) き裂進展に伴うき裂閉口比の変化を拘束、かつ短い計算時間で推定する新たな方法を開発した。
- (c) それを用いて原子力施設の維持基準のうち、き裂の相互干渉問題に関する基準の妥当性の検討を行った。
- (d) 疲労き裂進展時のき裂閉口挙動の推定法として新しく AI の利用について基礎的検討を行った。
- (e) S-FEM 研究会を定期的で開催し本手法の普及に努めた。得られた研究成果を国内外の学会で講演し、学術誌に論文を発表した。

4. 研究成果

重合メッシュ法による亀裂進展解析手法の高度化を行った。特に疲労き裂進展解析の高精度化のためにき裂縁に沿った閉口比の簡易算出法を開発した。き裂閉口比の評価には弾塑性解析とその状態でのき裂進展解析が不可欠である。これを従来の方で行うと計算時間が飛躍的に増加し、実際的な手法とはならない。本研究では、き裂先端近傍のある領域に限定してそこでの弾塑性解析とき裂進展解析を行うことで計算時間の短縮を図った。またこの領域の大きさの決定法の妥当性を確認した。これにより進展き裂の形状、疲労寿命の予測の点で、現実的なき裂進展形状の予測が可能となった。

上記の手法の開発により三次元的な(非平面的な)挙動を伴う疲労き裂進展解析を可能にした。具体的には、き裂を表現するローカルメッシュの作成において二次元的な(平面的な)き裂を作成し、3次元方向に変形を与えることで、三次元的なき裂形状に対する自動メッシュ生成を可能にした。開発した機能を用いて、相互作用する2つの埋没き裂の疲労き裂進展解析を実施し、原子力設備の維持規格で定められている Alignment rule の精度検証を実施した。その結果、埋没き裂に対しても、表面き裂の疲労き裂進展挙動を元に作成された Alignment rule が適用可能であることを確認した。さらに、Alignment rule の適用条件を応力拡大係数を用いて検証し、2つのき裂先端が直上にあるとき、応力拡大係数が単独き裂の応力拡大係数と比較して4%上昇する場合に Alignment rule が適用されることがわかった。

また、同一平面上にある2つの大きさの異なる埋没き裂の進展解析を行い、維持規格で定められているき裂の合体条件の検討を行な

った。その結果、維持規格で定められている合体条件は、過剰に安全側の評価を与えることがわかった。そこで、さらなる評価の高精度化を目指し、楕円き裂への近似、き裂先端曲率を合わせた近似、合体前後のき裂の面積を同一にした近似について検討した。いずれの近似法も現在の維持規格で定められている合体条件に比べて精度の良い結果を与えるが、更なる検討が必要である。

またき裂進展則の学習の可能性およびき裂進展則の妥当性の検討のために機械学習によるき裂進展予測を実施した。き裂進展を学習させるために、1. 応力拡大係数、2. き裂先端近傍の応力、ひずみ、3. き裂位置、直近の進展ベクトル、以上の3つのケースでのデータによる学習が効果的かを調べた。その結果、1. の応力拡大係数を学習させき裂進展則の予測を実施したほうが少ない学習数であった。一方3. 位置と進展ベクトルでは学習回数は大幅に増加するが1. のケースと同じだけの精度を出すことも確認した。また、精度が低下する箇所はき裂が急速のその向きを変化させる場合である。その結果、予測されるき裂形状はおおむね一致する一方で、進展が十分でない場合には差異も確認される。き裂進展予測の高い精度の予測のためには、き裂進展方向の変化に対しての実験における測定および進展則の精度向上が望まれる。特にこの手法は混合モード下でのき裂進展を予測しうる等価応力拡大係数の開発への利用が期待される。

ここで開発した手法の普及、発展のためにS-FEM研究会を定期的に開催し、国内・外の研究者からの要望に応じてここで開発したソフトを配布し、利用のための指導・教育を行った。主な配布先は、インドネシアのスリピジャヤ大学、バンドン工科大学、マレーシアの国立マレーシア大学、国内では筑波大学、工学院大学、日本原子力研究開発機構、(株)みずほ総研等である。

本研究により得られた成果を5編の論文として公表し、国内外での学で24回の講演を行い研究成果の普及に努めた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

1. 高橋昭如、和田義孝、圓道貴文、菊池正紀、繰り返し引張荷重下における疲労き裂のき裂開口挙動、日本機械学会論文集、81 巻、830 号、2015、https://www.jsatge.jst.go.jp/article/trasjsme/81/830/81_15-00131/article-char/ja/
2. Masanori Kikuchi, Yoshitaka Wada, Yulong Li, Crack growth simulation in heterogeneous material by S-FEM and comparison with experiments., Engineering Fracture Mechanics, vol.167, pp.239-247, 2016
3. Kunio Hasegawa, Yinsheng Li,

Ryousuke Serizawa, Masanori Kikuchi, Proximity factor on transformation from subsurface to surface flaw., Sicence Direct, 2016, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

4. M.R.M. Akramin, A.K. Ariffin, Masanori Kikuchi, S. Abdullah, Sampling method I portabilistic S-versiono finite element analysis for initial flaw size., Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2016, 10.1007/s40430-016-0549-z
5. Akiyuki Takahashi, Ayaka Suzuki, Masanori Kikuchi, Fatigue Crack Growth Simulation using S-version FEM : Application to Interacting Subsurface Cracks, Key Engineering Material, vol.741, pp.82-87, 2017

〔学会発表〕(計 24 件)

1. 菊池正紀、圓道貴文、疲労き裂進展解析のためのき裂開口比の評価、日本計算工学会、2015年5月9日、つくば国際会議場
2. 菊池正紀、圓道貴文、篠塚智大、中村大紀、福本亮介、疲労き裂進展における開閉口挙動の研究、日本材料学会、2015年5月23日、山形大学工学部
3. Masanori Kikuchi, Ryosuke Serizawa, Yulong Li, Multiple Inner Crack Growth Simulation using S-version FEM, Proc. ASME PVP2015, 2015-45210, 2015年7月21日, Boston Park Plaza, Boston, USA
4. Masanori Kikuchi, Fracture simulation using S-FEM in heterogeneous material and some future problem., 7th International Conference on Numerical Analysis in Engineering, (Invited Paper) Batam Kepulauan Risa, Indonesia
5. Masanori Kikuchi, Yoshitaka Wada, Yulong Li, Crack Growth Simulation in Heterogeneous Material by S-FEM and Comparison with Experiments., 5th International conference on CRACK PATHS, 2015年9月18日, Ferrara, Italy
6. Masanori Kikuchi, Numerical simulation of Fatigue Fracture and Ductile Fracture Processes using FEMA (Invited Lecture), ComFoS15: Mathematical Analysis of Continuum Mechanics and Industrial Applications, 2015年11月7日, 九州大学
7. Ayaka Suzuki, Akiyuki Takahashi and Masanori Kikuchi, Fatigue Crack Growth Simulation of Subsurface

- Cracks using s-version FEM, International Research Committee on Ductile Fracture Simulation, 2015年12月3日, Seacloud Hotel, Busan, Korea
8. Masanori Kikuchi, Multiple subsurface crack growth simulation using S-version FEM, Asian Society for Integrity of Nuclear Components, 2016年4月13日、長崎クラウンプラザホテル、長崎市
 9. Ayaka Suzuki, Akiyuki Takahashi, Masanori Kikuchi, Fatigue crack growth analysis of interactiong subsurface cracks using S-versioon FEM, ASME PVP 2016, 2016年7月19日、Vancouver, Canada
 10. Akiyuki Takahashi, Masanori Kikuchi, Ayaka Suzuki, Multiple subsurface crack growth simulation using S-version FEM, Symposium on Mechancis in Materials and Structures (Invited lecture), 2016年8月9日, UKM, Bangi, Malaysia
 11. Ayaka Suzuki, Akiyuki Takahashi, Masanori Kikuchi, S-version finite element simulation of fatigue crack growth behavior of interacting subsurface cracks, Symposium on Mechanics in Materials and Structures, 2016年8月9日, UKM, Bangi, Malaysia
 12. Ayaka Suzuki, Akiyuki Takahashi, Masanori Kikuchi, S-version FEM analysis of fatiguge crack growth and interaction of subsurface cracks, 10th International Conference on Fracture & Strengh of Solids, 2016年8月29日, 東京理科大学金町校舎、東京都
 13. 鈴木彩夏、高橋昭如、菊池正紀、重合メッシュ法を用いた表面近傍における疲労き裂進展解析、第21回計算工学会、2016年6月1日、朱鷺メッセ、新潟市
 14. 和田義孝、榊原直樹、CAEにおけるディープラーニング活用のための一考察(ディープラーニングによるき裂進展挙動予測)、第48回関西CAE懇話会、2016年10月21日、京都大学吉田キャンパス、京都
 15. 和田義孝、榊原直樹、CAEにおけるディープラーニング活用のための一考察(重合メッシュ法によるき裂進展挙動学習について)、防災科学技術研究所平成28年度数値振動台建築WG、2017年2月23日、東京八重洲ホール、東京都
 16. Akiyuki Takahashi, Yoshinori Shinozaki, Ayaka Suzuki, Yuuichi Shintaku, Masanori Kikuchi, Fatigue Crack Growth Simulation with Plasticity Induced Crack Closure Effect using s-version FEM, The 10th International Conference on Numerical Analysis in Engineering, 2017年9月5日、Hermes hotel Banda Aceh, Banda Aceh, Indonesia (Plenary Lecture)
 17. Yoshinori Shinozaki, Akiyuki Takahashi, Yuuichi Shintaku, Fatigue Crack Growth Simulation with Crack Closure Effect Using S-version FEM, 14th U.S. National Congress on Computational Mechanics, 2017年9月23日、Palais des Congres de Montreal, Montreal, Canada
 18. 鈴木彩香、高橋昭如、菊池正紀、重合メッシュ法を用いた複数内部き裂の疲労き裂進展解析、第22回計算工学講演会、2017年5月30日、大宮ソニックシティ埼玉県
 19. 篠崎勇人、高橋昭如、新宅勇一、菊池正紀、き裂開閉口挙動を考慮した2次元疲労き裂進展解析システムの構築、第22回計算工学講演会、2017年5月30日、大宮ソニックシティ埼玉県
 20. 和田義孝、機械学習による疲労き裂進展予測、日本機械学会第30回計算力学講演会、2017年9月17日 日本機械学会、近畿大学東大阪キャンパス(大阪府、東大阪市)
 21. 鈴木彩香、高橋昭如、菊池正紀、重合メッシュ法を用いた異なる平面上にある複数内部き裂の疲労き裂進展解析、日本機械学会第30回計算力学講演会、2017年9月16日、近畿大学、大阪府
 22. 和田義孝、ディープラーニングによるき裂進展挙動予測～重合メッシュ法によるき裂進展挙動学習 日本機械学会第30回計算力学講演会 2017年9月16日、近畿大学、大阪府
 23. 和田義孝、CAEにおけるディープラーニング活用～重合メッシュ法によるき裂進展挙動学習～、ADVENTUREClusterユーザー会2017 2017年7月7日、東京コンファレンスセンター・品川(東京都、品川区)
 24. 和田義孝、ディープラーニングのCAEへの適用可能性～ディープラーニングによるき裂進展挙動予測～、自動車技術会 構造強度部門委員会 2017年6月16日、伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 西日本支社、大阪府
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
 菊池 正紀 (KIKUCHI, Masanori)
 東京理科大学・理工学部・嘱託教授
 研究者番号：90107540

(2)研究分担者

和田 義孝 (WADA, Yoshitaka)

近畿大学・理工学部・教授

研究者番号 : 40350847

高橋 昭如 (TAKAHASHI, Akiyuki)

東京理科大学・理工学部・准教授

研究者番号 : 00366444