OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Evaluation of SIFs for Fatigue Cracks in Welding Residual Stress Fields Using the Crack Face Traction Force Analysis
Author(s)	Gadallah, Ramy Saeed Shafeak
Citation	大阪大学, 2017, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/67160
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

Form 3

Abstract of Thesis

Name	(Ramy Saeed Shafeak Gadallah)
Title	Evaluation of SIFs for Fatigue Cracks in Welding Residual Stress Fields Using the Crack Face Traction Force Analysis （き裂面分布応力を用いた溶接残留応力場中にある疲労き裂の応力拡大係数評価）

Abstract of Thesis

In this study, the stress intensity factors (SIFs) were evaluated based on a developed technique for fatigue cracks in welding residual stress (RS) fields using the crack face traction force analysis. The research was conducted in four parts:

1. validating the superposition method using different numerical integration methods.
2. proposing a technique for calculating SIF for surface cracks in welding RS fields.
3. verifying the proposed technique based on welding simulation and fatigue life evaluation.
4. developing the proposed technique to evaluate mixed-mode SIFs for cracks in non-uniform stress fields.

Cracks, in general, are considered one of the main factors that influence the structural integrity of welded structures. For reliable prediction of fatigue crack propagation rate, accurate SIFs solutions along the crack front are needed. Therefore, in order to obtain accurate SIFs solutions for surface cracks in welding RS fields, the influence of RS field must be included.

The thesis is composed of seven chapters, as follows:

Chapter 1 gives a background on welding RS and their influence on the integrity of structures, the concept of SIF and the superposition method. The challenges, objectives and structure of this thesis is also addressed in this chapter.

Chapter 2 gives a background on the numerical methods that used in SIFs evaluation for 3-D cracks.

Chapter 3 studies the validation of the superposition method using different FE models based on different numerical integration methods. It was found that when the crack face traction (CFT) integral is included in the SIF numerical method, a percentage difference of less than 0.5 is obtained at the crack deepest point.

Chapter 4 presents a proposed technique used for evaluating SIF for surface cracks in non-uniform stress fields. It is noticed that when a fine crack mesh is used, the smoothness and accuracy given by the CFT-solutions are improved. A percentage difference of less than 1% was obtained at the crack deepest point between the CFT-solution and that given by external loading for all numerical examples examined in this study. As well, SIF was evaluated appropriately based on real welding RS using the proposed technique. Moreover, simplification of welding RS gave a clear influence on the behavior of SIF. Therefore, actual RS field is recommended to be used to obtain accurate SIF solution.

Chapter 5 examines the influence of the change in welding heat input (HI) and the induced welding RS on the behavior of SIF and fatigue crack propagation (FCP) for a bead-on-plate model. It is observed that the change in welding HI has a clear impact on the distribution of welding RS. However, it gave trivial influence on the behavior of SIF and FCP. In addition, it is found that welding RS has a significant influence on the behavior of SIF and FCP compared with the results that neglected the influence of welding RS. It is noticed that if the difference in the applied RS is small, a disregarded difference is obtained in the behavior of SIF and FCP and vice versa.

Chapter 6 introduces a developed technique to calculate mixed-mode SIFs accurately for cracks in non-uniform stress fields. The developed technique was validated based on the superposition method in which a percentage difference of less than 0.5% was obtained at the crack deepest point.

Chapter 7 summarizes the conclusions of the main points in this study. This chapter also gives some recommendations for further works related to this study.

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名	（Ramy Saeed Shafeak Gadallah）		
論文審査担当者		（職）	氏　名
	主 査	教授	大沢　直樹
	副 査	教授	藤久保　昌彦
	副 査	准教授	堤　成一郎

論文審査の結果の要旨

溶接継手に生じたき裂は，溶接構造物の構造健全性の重要な影響因子である．溶接構造中のき裂は，多くの場合，複雑な残留応力場中に発生する．実構造中の表面き裂の発生部位・寸法・形状は多様である．精度良い疲労き裂伝播寿命および破壊強度評価を達成するには，き裂前縁に沿った応力拡大係数（SIF）の計算が必要である．SIF 計算では残留応力が SIF に与える影響を定量的に評価する必要があるが，既往研究では，対象継手・き裂形状と残留応力分布形状が限定され，モード I でのみ有効な SIF 計算手法しか提案されていない．本研究では，任意の継手・き裂形状に適用でき，混合モード SIF の分離が可能な評価手法が提案され，その有効性が検証されている．本論文は，以下の 7 章から構成されている．

第 1 章では，溶接残留応力の発生機構と残留応力が構造健全性に及ぼす影響に関する研究の背景と，溶接構造に発生するき裂形状と残留応力分布の多様性を説明している．残留応力場中き裂 SIF の計算手法としての重ね合わせ原理の有効性を述べている．既往研究では，任意の継手・き裂形状を対象とし混合モード SIF の分離が可能な解析手法が確立されていないことを示している．この調査結果をふまえ本研究の目的と意義を示している．

第 2 章では，本研究で 3 次元表面き裂 SIF の数値計算理論として採用した領域積分法（DI）および interaction integral 法（IIM）について解説し，重ね合わせ原理を使用する場合のき裂表面力（CFT）積分の必要性を示している．また，CFT 積分を実装した FE 計算ソフトウェアが非商用研究用コード WARP3D しか現存しないこと，および WARP3D でもき裂面上に均一な法線応力が作用する場合しか計算できない仕様であることを述べている．

第 3 章では，WARP3D を不均一 CFT 分布で計算できるよう改良し，平板・溶接継手止端に生じた表面き裂の FE モデルを作成して，重ね合わせ法の精度を数値的に検証している．重ね合わせ計算は，MSC Marc・DI 法と WARP3D・IIM（CFT 積分あり）で実施している．その結果から，CFT 積分を実施すると，SIF 重ね合わせ解の直接解に対する計算誤差が 0.5%以下になること，および CFT 積分を行わないと SIF が直接解より約 5%小さく評価されること，すなわち MSC.Marc 等の商用 FE 計算コードを使用した重ね合わせ法計算が，非安全側の SIF 評価を与えることを示している．

第 4 章では，第 3 章で開発した不均一 CFT 積分機能付 WARP3D を使用して，種々の継手形状・き裂寸法・荷重様式で，き裂ブロックの FE 分割を変えて直接解と重ね合わせ解を比較し，計算誤差を 1%以下に抑制できる推奨 FE 分割仕様を示している．続いて，突合せ継手の滑らかな残留応力分布中に生じた表面き裂の SIF を計算した結果が Shiratori et al.（1986）の参照解と良好に一致することを示し，不均一 CFT 積分機能付 WARP3D の残留応力場中き裂への適用性を示している．また，本章で解析した何れの計算例でも，第 3 章の基礎検討結果と同様に，CFT 積分を行わない場合に SIF が約 5%過小に評価されることを示している．

第 5 章では，溶接入熱が残留応力場中き裂 SIF に与える影響を評価している．解析対象は Kusuba(2007)が疲労き裂伝播(FCP)試験を実施した，船体溶接継手を模擬したビードオン溶接止端表面き裂である．残留応力分布は熱弾塑性 FE 解析コード JWRIAN により計算している．大きさが異なる溶接入熱で計算した残留応力分布の各々で，開発手法により計算した SIF を比較し，本研究の解析条件では SIF への溶接入熱の影響が小さいことを示している．Kusuba(2007)の

FCP 試験条件で残留応力を考慮した最大・最小荷重時の SIF を計算し，Kusuba(2007)のき裂アスペクト比変化曲線と Kumar(1992)の開口比推定式を用いて FCP 解析を実施し，解析結果が試験結果と良好に一致することを示している．この結果は，開発 SIF 計算手法が，残留応力場中にある溶接継手中表面き裂のき裂伝播寿命推定に有効であることを示している．さらに，残留応力を無視した場合と溶接入熱が非常に大きい場合の FCP 解析を実施し，一般の場合における溶接入熱とき裂伝播寿命の関係について論じている．

第 6 章では，WARP3D にさらなる改良を加えて混合モード不均一 CFT 積分機能付 WARP3D を開発し，混合モードが生じる傾斜表面き裂の SIF を直接法・重ね合わせ法で計算して比較している．その結果，品質の良いき裂前縁 FE メッシュを使用すれば，混合モード不均一 CFT 積分機能付 WARP3D により，混合モード SIF を極めて高い精度（計算誤差 0.5%以下）で計算できることを示している．

第 7 章では本研究で得られた成果と課題を総括し，本論文の結論を述べている．

以上のように，本論文では，任意の継手・き裂形状に適用でき，混合モード SIF の分離が可能な，不均一で多軸状態にある残留応力場中の表面き裂の SIF 評価手法が初めて提案され，多くの解析と疲労試験結果との比較により，その精度と疲労き裂伝播寿命推定での有効性が検証されている．これにより，溶接構造物の疲労・破壊強度評価の精度が向上し，船舶海洋構造物の構造健全性評価技術の高度化に大きく貢献することが期待できる．

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める．