

発生と伝播を統一的に評価する疲労き裂成長シミュレーション — 角回し溶接止端部から発生・伝播する疲労き裂 —

○ 九州大学大学院・正会員・後藤浩二
九州大学大学院・正会員・小沼恵太郎
九州大学大学院・正会員・豊貞雅宏

1 緒言

橋梁等の大型鋼構造物では疲労損傷事故が多発しており、これを事前に定量的に予測して適切な補修を行い延命化を図ることが要求されている。従来の疲労強度検討は、大型供試体を用いた大規模疲労試験と Miner 則に代表される S-N 線図を利用する評価手法に従うのが主流であるが、荷重履歴の影響を理論的に考慮することはできない。また、従来の疲労強度評価では、き裂の発生と伝播を別々の理論体系で取り扱っている上に、特にき裂発生評価に関してはその定義が極めて曖昧であり、理論的背景が明確な評価法とは言い難い。

疲労き裂成長挙動には、繰り返し载荷により疲労き裂先端近傍に生じる塑性変形が大きな影響を及ぼしており、この影響を定量的に考慮することが不可欠である。著者らは、疲労き裂先端近傍において繰り返し载荷により生じる塑性挙動及び疲労き裂発生メカニズムに関して考察した。この結果を理論的背景とする疲労き裂成長シミュレーションコード FLARP¹⁾を開発し、種々の荷重履歴下で、健全箇所から発生・伝播する疲労き裂成長シミュレーションが可能であることを示している。

本研究では、多数の疲労損傷が報告されている、角回し溶接止端部から発生・伝播する疲労き裂の成長を FLARP により推定し、同コードの有用性を示す。

2 FLARP による疲労き裂成長シミュレーションの流れ

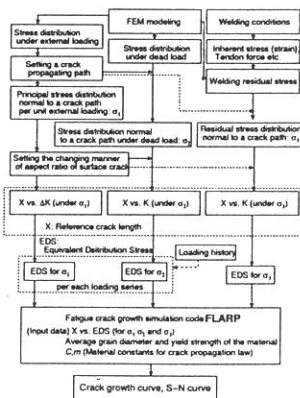


図1 FLARP による疲労き裂成長シミュレーションの流れ

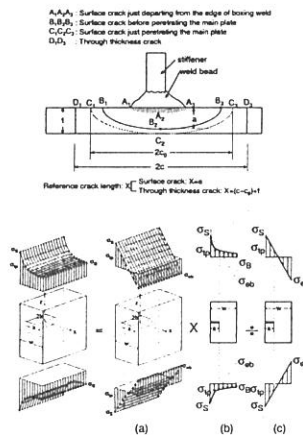


図2 任意応力分布を受ける表面き裂の K 値の与え方と参照き裂長 (X) の定義

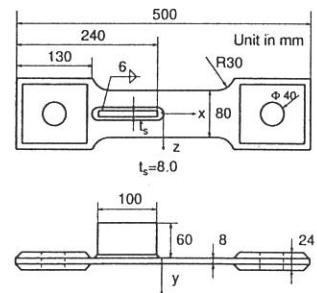


図3 角回し溶接試験片

図1に FLARP による疲労き裂成長予測の流れを示す。FEM 等の構造解析により、単位変動荷重、静荷重が作用する際の応力分布を求める。溶接残留応力が存在する場合は残留応力の算定が必要であり、特に大型溶接構造物では、変形発生源を考慮した弾性 FEM 解析を用いることで、比較的簡便に残留応力が推定できる(実例²⁾に関しては別途発表する)。

単位変動荷重に対する応力分布からき裂伝播経路(最大主応力直角方向)を設定する。板厚方向にき裂が伝播する期間は、安全側の評価を行うために板に垂直に伝播すると仮定する。その後、単位変動荷重、静荷重、溶接残留応力の伝播経路直角方向成分を求める。

疲労き裂は複数の微小表面き裂が多数発生し、合体・成長を繰り返して一つの表面き裂となり、これが成長して板厚貫通き裂となる過程をたどる。これを直接推定する代わりに、複数個の表面き裂をき裂先端近傍の応力場を考慮して単

独の表面き裂に置き換え、このアスペクト比変化を与える手法¹⁾が提案されている。また、表面き裂状態と板厚貫通き裂状態を統一的に取り扱うための参照き裂長さ¹⁾(図2上図参照)が定義されている。

以上で定まった、き裂伝播経路垂直方向の応力成分を等価分布応力¹⁾に変換する。等価分布応力とは、数値シミュレーションの高速化のため、任意形状のき裂と等価な K 値を有する無限板中の直線き裂に置き換えた際に、作用させるべき応力を意味する。なお表面き裂の K 値は図2下段に示す重ね合わせにより与えることができる。

等価分布応力を FLARP に入力することで、発生から伝播を統一的に取り扱った疲労き裂成長シミュレーションが可能となる。

3 計算例

図3に示す角回し溶接試験片の角回し溶接止端表面部から発生、伝播する疲労き裂の寿命評価を FLARP により行った。図4は単位変動荷重によりき裂面に作用する等価分布応力である。これを FLARP に代入して疲労き裂成長シミュレーションを行った。図5は FLARP により計算された、き裂伝播挙動を律する RPG 荷重¹⁾とき裂開口荷重のき裂進展に伴う変化である。

RPG 荷重と最大荷重の間の荷重振幅がき裂進展に寄与することに基づいた有効応力拡大計数範囲 (ΔK_{RPG}) を Paris 則の ΔK と置き換えることでき裂成長を予測できる。図6に板厚貫通までのき裂成長の計算結果を、図7は FLARP により予測された S-N 線図と実験結果の比較を示す。図7には、せん断き裂が最初の結晶粒界に達した時点 (▲)、き裂深さが 1mm になった時点 (◆) 及び主板背面までき裂が貫通した時点 (●) の寿命予測を示している。実験結果は主板背面までき裂が貫通した時点である。板厚貫通時の寿命は精度よく予測できていることがわかる。他の二つの寿命に関しては計測されていないが、板厚貫通時の寿命予測の結果から考えて、妥当な結果を与えていると推察される。

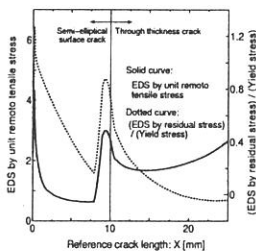


図3 等価分布応力

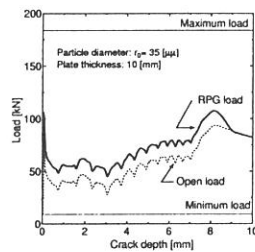


図5 RPG 荷重とき裂開口荷重

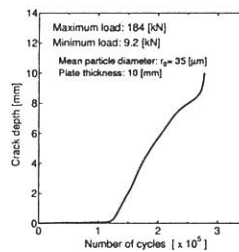


図6 き裂深さ成長曲線

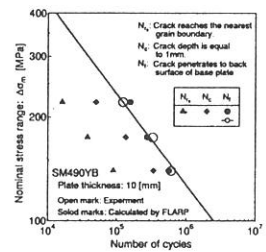


図7 S-N 線図

4 結言

角回し溶接止端部から発生・伝播する疲労き裂の成長を、疲労き裂成長シミュレーションコード FLARP により推定した。得られた疲労寿命は実験結果とよく一致しており、FLARP を用いることで、初期欠陥の存在を仮定せずに、疲労き裂の発生から伝播まで統一的に推定可能であることが確認できた。今後、大型構造物や種々の継手構造の寿命評価を行う予定である。

参考文献

- 1) 豊貞雅宏, 丹羽敏男, “鋼構造物の疲労寿命予測”, 共立出版株式会社, 2001
- 2) 小沼恵太郎, 後藤浩二, 豊貞雅宏, “波形鋼板ウェブ構造に生じる溶接残留応力分布の推定”, 平成 14 年度土木学会西部支部研究発表会, 2003