

XFEM による溶接継手の疲労耐久性評価

JFE スチール スチール研究所 土木・建築研究部
近畿大学 工学部 建築学科

正会員 ○栗原 康行
正会員 崎野 良比呂

1. はじめに

老朽化や交通荷重の増加により鋼道路橋など社会インフラ構造物の疲労損傷が社会問題となっている。近年、Berytschko ら¹⁾によって提案された、リメッシュ不要のき裂進展解析 XFEM (extended finite element method) が疲労分野でも着目されている。そこで、この解析を用いて継手の疲労耐久性を評価し、疲労実験の補完ツールとして応用が出来るか、基礎的な疲労試験を対象として検討を行った。ここでは、片面面外ガセット溶接継手の疲労試験と XFEM による比較検討結果について報告する。

2. 疲労試験

試験体は、形状を図 1 に示すように片面面外ガセット溶接継手とした。ベース板の材質は HT780 の 9mm、中央部のガセット板も同質材の 6mm を使用し、高張力鋼用ソリッドワイヤー MG80 を用いて脚長 6mm の隅肉回し溶接で接合している。疲労試験は、高速疲労試験機（最大荷重振幅 750kN）を用い、試験体のベース板両端をチャッキングし、引張疲労試験（図 2）を実施した。

載荷条件は、応力比 10%として、ベース板の公称応力範囲が 100, 200MPa の引張繰返し応力が作用するように荷重を調整し、5~10Hz で載荷を行った。

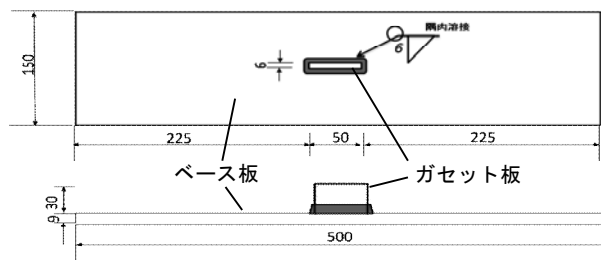


図 1 疲労試験体

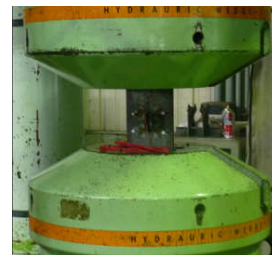


図 2 疲労試験（引張）

3. 疲労き裂進展解析

解析は、汎用構造解析プログラム ABAQUS に付属する XFEM を用いた。解析モデルは、平面ひずみ要素を用い、試験体中心面で 1/2 対称モデルとした。要素の大きさは、溶接部近傍とき裂が進展する周辺の要素は 0.5mm 程度となるよう、細かくメッシュを切り、一般部は、1mm 程度とした。初期き裂として溶接止端部に隣接するメッシュに 0.5mm のき裂を与えた。これは、今後の検証が必要であるが、溶接ままの溶接止端部の応力集中が、極めて微小なき裂による応力集中とほぼ同等であると仮定して初期状態から与えた。載荷は、試験と同様、ベース板の公称応力範囲が、50, 100, 150, 200MPa となるように載荷荷重（応力比 ∞ ）を与えた。鋼材の物性値は $E: 2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, $\nu: 0.3$, 疲労き裂進展速度は式(1)で表されるが、各定数の値は、文献²⁾で示される疲労試験データの回帰計算より得られた平均曲線の値, $C: 1.15 \times 10^{-12}$, $n: 2.74$, $\Delta K_{th}: 77.2 \text{ N/mm}^{3/2}$, を用いた。

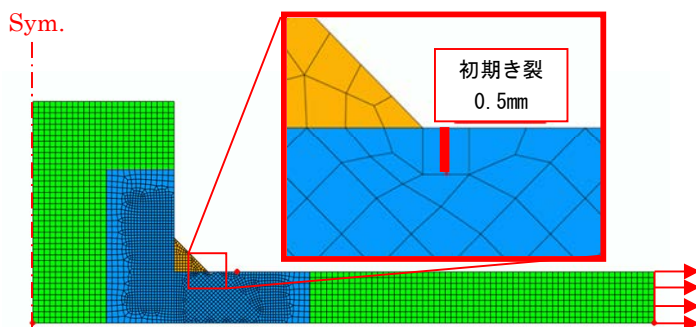


図 3 解析モデルと境界条件

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K^n - \Delta K_{th}^n) \quad (1)$$

a : き裂寸法(mm)

N : 疲労寿命(回)

ΔK : 等価応力拡大係数範囲 ($\text{N/mm}^{3/2}$)

ΔK_{th} : 下限界応力拡大係数範囲 ($\text{N/mm}^{3/2}$)

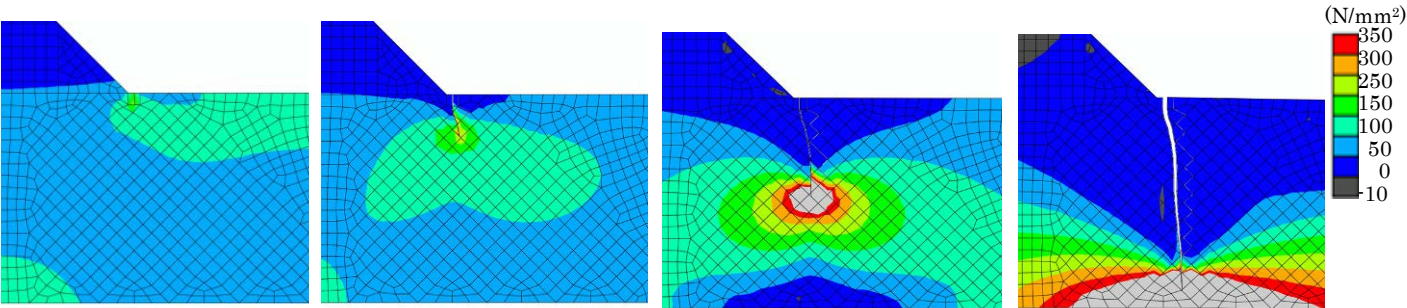
C, n : 材料などによって決まる定数

キーワード XFEM, 疲労, き裂, 進展解析, 寿命, 継手, 等級, 耐久性

連絡先 〒223-0855 神奈川県川崎市川崎区南渡田町 1-1 JFE スチール スチール研究所 土木・建築研究部 TEL 044-322-6638

4. 結果の比較

図 4 に XFEM による応力範囲 100MPa 時のき裂進展状況を変形応力図（最大主応力）により示す．表 1 に疲労試験と XFEM の応力範囲と破断回数，図 5 にこれらの結果を S-N 線図上にプロットし，同グラフに JSSC の継手 A～E 等級の曲線（一定振幅時の疲労限）を記載した．写真 1 に疲労試験の破断後のき裂状況の写真を示す．



(a) 初期き裂(0 回) (b) 1/4 程度進展(188 万回) (c) 板厚中央付近(266 万回) (d) 破断直前(271 万回)

図 4 XFEM き裂進展状況と応力状態

表 1 破断回数一覧表

応力範囲 (N/mm ²)	疲労試験破断 回数 (回)		XFEM 破断回数 (回)
50	—		進展なし
100	1, 920, 265		2, 716, 942
150	—		869, 292
200	231, 958		377, 004

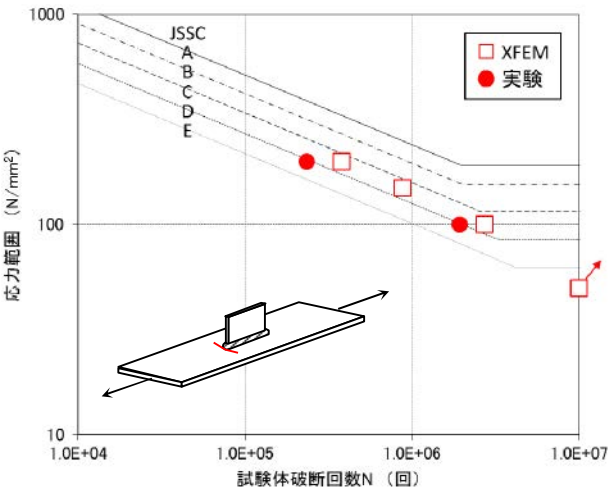
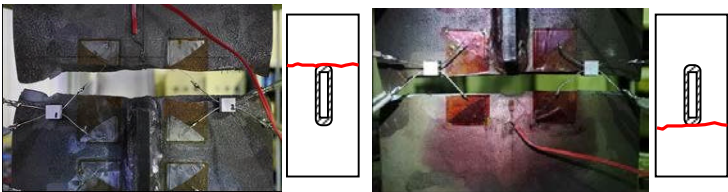


図 5 S-N 線図(破断)



(a) 200N/mm² 破断状況 (b) 100 N/mm² 破断状況

写真 1 試験体の破断状況

5. 結果の考察

写真 1 から疲労試験体 2 体とも，解析と同様，回し溶接の先端部からき裂が発生・進展し破断に至っていることがわかる．また，図 5 から，対象とした継手は，XFEM，疲労試験とも，継手等級は，D 等級と評価出来るが，いずれの結果も XFEM の方が疲労試験に比べて長寿命側になっている．これは，XFEM では，溶接による残留応力の影響を考慮していないことが原因の一つとして考えられる．また，応力範囲 50MPa の XFEM 解析では，き裂が進展しなかった．これは， ΔK_{th} に依存するものと思われるが，疲労限が評価できる可能性を示していると考えられる．

6. まとめ

- 片面隅肉回し溶接継手を対象とした疲労試験と XFEM を比較検討した結果，以下の知見が得られた．
- ・破断寿命は，継手疲労試験と比べ，XFEM がやや長寿命側となったが，疲労耐久性の継手等級による評価は，いずれも D 等級となり現状の実験，解析条件では，同一の等級の評価となった．
 - ・対象継手の疲労限を下回る応力範囲では XFEM 解析でも，き裂が進展しないことから，疲労限が評価出来る可能性を示すことが出来た．

参考文献

1) T.Belytschko, T.Black:Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing. Int. J. Numer. Meth. Eng., 45(5), 601-620(1999)
2) 日本鋼構造協会編：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，2012. 6