

極低サイクル疲労領域における鋼材のき裂進展挙動

名古屋大学 学生会員 ○寺尾 名央 名古屋大学 正会員 判治 剛 名古屋大学 フェロー会員 館石 和雄

1. 本研究の目的

鋼構造物に地震力が作用したとき、溶接継手などに大きな塑性変形が繰り返され、少ない回数で疲労き裂が発生し、破壊に至る。これは極低サイクル疲労と呼ばれ、これまでの研究では主にき裂の発生を対象としてきた¹⁾。本研究では、極低サイクル疲労領域のき裂の進展に着目し、それを明らかにすることを目的とする。

2. 極低サイクル疲労領域におけるき裂進展試験

試験片の形状および寸法を図-1に示す。試験片はコンパクトテンション型とし、その表面にASTM E 1820-08に準拠したサイドグループ加工を施している。鋼材にはSM490Aを用い、そのミルシートによる機械的性質を表-1に示す。荷重線変位（以下、単に変位と呼ぶ）はクリップゲージにより計測し、試験はその変動範囲（以下、変位範囲と呼ぶ）を制御しながら行った。表-2に試験ケースを示す。変位範囲を変えた4ケースとした。なお、荷重は極めてゆっくりと行った。

き裂進展量は、最大荷重時に定期的に試験機を停止して、40倍の実体顕微鏡により試験片表面において計測した。進展量に合わせて1~50サイクルごとに観察を行った。試験はき裂長が15mm程度以上になるまで継続し、その後は弾性域での繰返し荷重により破断させた。

荷重-変位関係を例を図-2に示す。最大荷重はき裂の進展とともに徐々に低下するが、この程度は変位範囲が大きいものほど顕著であった。また除荷過程で変曲点をもつが、これはき裂が閉口することにより生じると考えられる。図-3に破面を例示する。サイドグループ加工により、き裂の進展は表面と内部で同程度もしくは表面で若干早くなっており、試験片表面でも十分にき裂の進展を計測できていると考えられる。

3. 繰返しJ積分によるき裂進展の評価

本研究では、有限要素解析により求めたき裂先端の応力ひずみ場から繰返しJ積分を算出し、それにより試験結果を整理した。解析にはAbaqus 6.12を用いた。解析モデルおよび境界条件を図-4に示す。試験片の対称性を考慮して1/4モデルとし、試験片表面にはサイドグループを設けている。最小要素サイズはき裂先端部で0.5mm×0.14mm×0.5mmである。境界条件として、リガメント部の鉛直方向変位を固定し、ピン孔中心に繰返し変位を与えた。鋼材のヤング率は $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比は0.3とした。材料構成則は、降伏強度 357 N/mm^2 で2

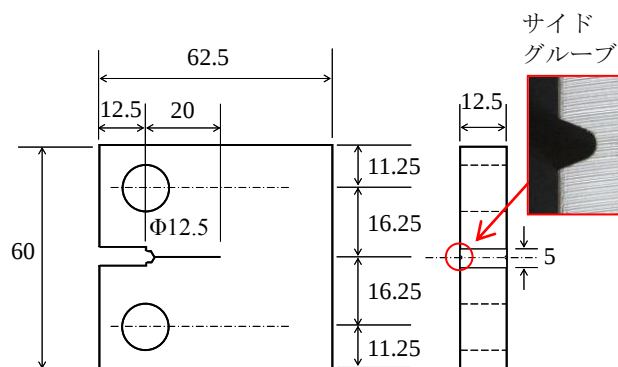


図-1 試験片形状および寸法 (単位: mm)

表 1 供試鋼材の機械的性質

鋼種	引張試験結果		
	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
SM490A	357	519	30

表 2 試験ケース

試験片 No	最小変位 (mm)	最大変位 (mm)	変位範囲 (mm)
1	0	0.8	0.8
2	0	1.5	1.5
3	0	3.6	3.6
4	1.5	3.0	1.5

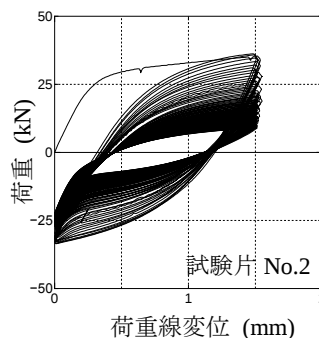


図-2 荷重-変位関係

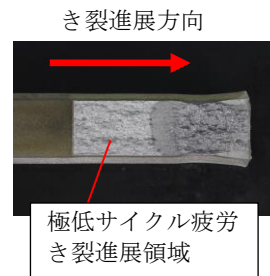


図-3 破面状況

キーワード 極低サイクル疲労、き裂進展速度、繰返しJ積分、き裂進展解析

連絡先 〒464-8603 名古屋市千種区不老町 名古屋大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 TEL052-789-4620

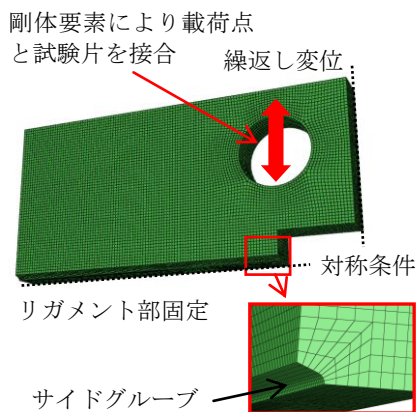


図-4 解析モデルおよび境界条件

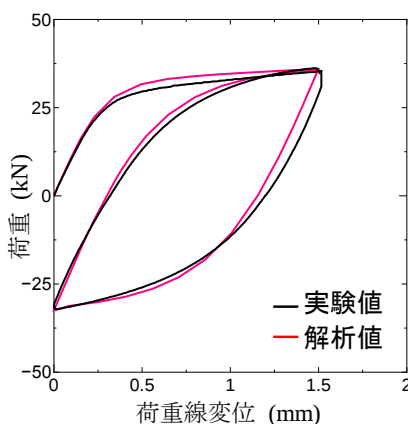


図-5 荷重-変位関係の比較

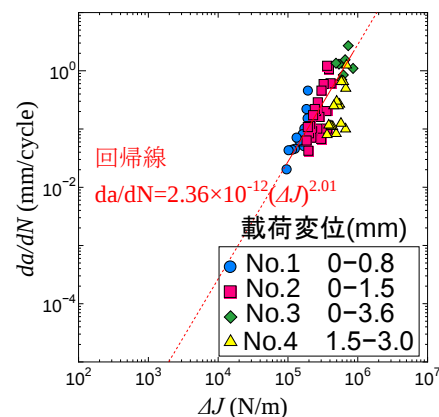


図-6 繰返し J 積分による評価

次勾配 E/200 をもつバイリニア型の移動硬化則とした。J 積分はき裂先端を囲む経路を設定して経路積分により求めた。なお本解析では、き裂閉口を再現するためにき裂面に接触面を設けている。

図-5 に荷重-変位関係の実験値と解析値の比較を例示する。解析値は実験値とほぼ一致しており、解析モデルの妥当性を確認することができる。解析による繰返し J 積分を用いて、試験片のき裂進展速度を整理した結果を図-6 に示す。多少のばらつきはみられるが、結果が比較的狭い範囲に分布している。そこで試験結果を基に、最小二乗法により回帰線を求めると、図中の関係式が得られた。ここで、試験片 No.4 に関しては、他の試験片と若干傾向が異なったため、回帰線の算出の際には除くこととした。その原因としては、変位の最小値と最大値の比の違いが考えられるが、今回は十分に検討できないため、この点は今後の課題としたい。

4. き裂進展解析による溶接継手の極低サイクル疲労寿命予測

過去に実施した角溶接継手の低サイクル疲労試験²⁾を対象にし、図-6 にて求めたき裂進展評価式による進展解析を行い、き裂進展寿命の推定を試みた。試験の詳細は文献²⁾を参照されたい。

解析モデルを図-7 に示す。鋼材のヤング率は $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比は 0.3、降伏強度は 429 N/mm^2 とし、材料構成則にはマルチリニア型の混合硬化則を用いた。実験を再現するために上下の荷重治具もモデル化した。変位範囲は 0mm~18mm と 0mm~15mm の 2 ケースとした。試験体と同様に最初の未溶着部寸法を 8mm とし、図-7 中に示す方向にき裂が進展すると仮定した。

本解析により求めたき裂長と繰返し数の関係を、実験による計測結果とともに図-8 に示す。図より、解析値と実験値は概ね一致していることがわかる。よって、試験数は限られているが、繰返し J 積分を用いたき裂進展評価式により極低サイクル疲労領域における溶接継手のき裂進展寿命を推定できる可能性が示された。

5. まとめ

本研究では、極低サイクル疲労領域における鋼材のき裂進展挙動を明らかにすることを目的とし、き裂進展試験および有限要素解析を実施した。その結果、繰返し J 積分を用いることにより、極低サイクル疲労領域におけるき裂進展速度を評価できる可能性が示された。

謝辞 本研究の一部は、日本鉄鋼連盟、日本橋梁建設協会の助成によるものであり、ここに記して深謝いたします。

参考文献 1) 例えば、館石ら：構造工学論文集，Vol.51A，pp.1275-1282，2005。

2) Park J.E. et.al.: 第 69 回土木学会年次学術講演会，部門 I（印刷中）

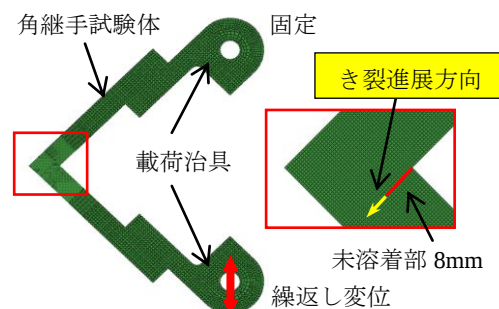


図-7 解析モデル

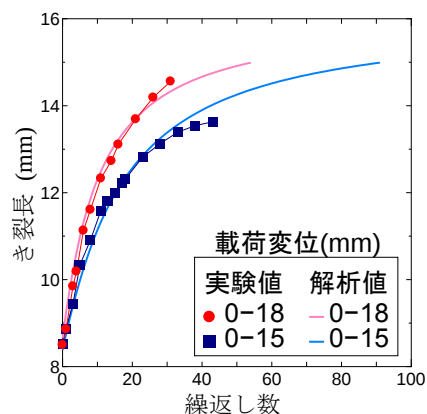


図-8 き裂長と繰返し数の関係