

## 変動振幅下における低サイクル疲労き裂の進展挙動予測

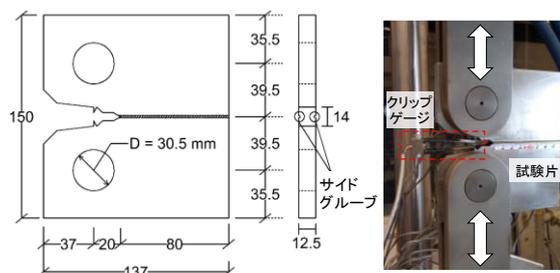
名古屋大学 正会員 ○清水 優 正会員 館石 和雄  
正会員 判治 剛 Arief Panjaitan

### 1. 背景・目的

地震等により鋼部材に塑性ひずみが繰返し生じるとき、低サイクル疲労によるき裂が発生することがある<sup>1)</sup>。これまでに、き裂発起点の局部的なひずみ範囲を用いた疲労強度曲線<sup>2)</sup>や一定振幅下のき裂進展則<sup>3)</sup>が提案されているが、変動振幅下の進展則を検討した研究は少ない。本研究では変動振幅下における低サイクル疲労き裂の進展速度の観察を行い、その推定手法について検討した。

### 2. き裂進展試験

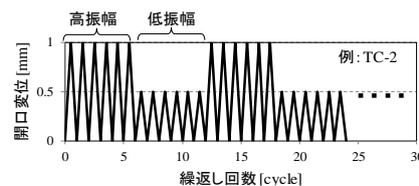
CT試験片を用いてき裂進展試験を行い、各サイクルのき裂進展量を観察した。試験片および試験方法を図-1に示す。载荷は変位制御とし、クリップゲージによって計測されるき裂開口変位の応答値でコントロールした。大小の振幅を数回ずつ交互に载荷した。振幅の大きさと各振幅の繰返し回数は表-1に示す5ケースとした。また、比較として一定振幅の試験も2ケース行った。各サイクルの最大変位に到達するごとに試験を中断し、デジタルカメラでき裂先端付近を撮影して画像計測によりき裂進展量を計測した。



(a) 試験片 (単位: mm) (b) 载荷方法

図-1 試験片および試験方法

表-1 試験条件



試験ケース	開口変位 [mm]		繰返し回数 [cycles]	
	高振幅	低振幅	高振幅	低振幅
VA-1	1.0	0.5	3	3
VA-2	1.0	0.5	6	6
VA-3	1.0	0.75	10	10
VA-4	1.0	0.25	10	10
VA-5	1.0	0.5	10	終了まで
CA-1	一定振幅: 1.0		—	
CA-2	一定振幅: 0.5		—	

### 3. 有限要素解析

これまでに、一定振幅の繰返し荷重下においては、き裂進展速度が繰返し  $J$  積分( $\Delta J$ )と良い相関があることが示されている。そこで、有限要素解析により各き裂長における  $\Delta J$  を算出し、実験により得られたき裂進展速度との関係を求めた。図-2に示すようにき裂長の異なる解析モデルを作成し、1.5cycleの一定振幅を与えた。1.0~1.5cycleの負荷過程において、き裂先端から6mmの領域の応力、ひずみ、変位を用いて  $\Delta J$  を算出した。

### 4. き裂進展速度と $\Delta J$ の関係

各き裂長における、1サイクルあたりのき裂進展量と、解析により求めた  $\Delta J$  の関係を図-3に示す。変動振幅の結果は、高振幅を与えたときの結果と低振幅を与えたときの結果を分けて示している。同図より、一定振幅のき裂進展速度は  $\Delta J$  と高い相関があることがわかる。図中には次式に示す一定振幅の結果のみから求めた回帰曲線も示している。

$$da/dN = 1.74 \times 10^{-6} \cdot \Delta J^{2.00} \quad (1)$$

ここに、 $da/dN$ : き裂進展速度,  $\Delta J$ : 繰返し  $J$  積分。

変動振幅の場合には、 $\Delta J$  が大きいほど一定振幅の回帰曲線の上方に試験結果がプロットされており、特に、図-3(b)に示す低振幅時にこの傾向が強く表れている。すなわち、高振幅と低振幅が混在するとき、低振幅時のき裂進展速度は、大きさが等しい一定振幅下のき裂進展速度よりも速くなる。

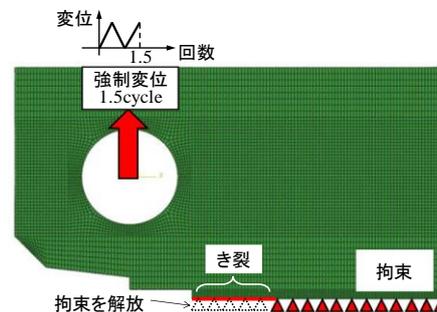


図-2 解析モデル

キーワード 低サイクル, 変動振幅, き裂進展解析

連絡先 〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町 TEL 052-789-4514

## 5. 変動振幅下におけるき裂進展速度の推定

本研究では、式(1)で示した一定振幅のき裂進展速度の右辺に、変動振幅と一定振幅のき裂進展速度の比  $AF$ (Amplification Factor)を乗ずることによって変動振幅下のき裂進展速度を推定することとした。図-3 からわかるように、変動振幅時のき裂進展速度は試験ケースごとに異なる。そこで、隣り合う2つの波形の  $\Delta J$  の比 ( $\Delta J_i/\Delta J_{i-1}$ )を用いて  $AF$  を整理した。図-4 に  $AF$  と  $\Delta J_i/\Delta J_{i-1}$  の関係を示す。高振幅から低振幅に移行するとき ( $\Delta J_i/\Delta J_{i-1} < 1$ )、図-4(a)に示すように、 $\Delta J_i/\Delta J_{i-1}$  が小さいほど  $AF$  が大きくなる傾向がある。低振幅から高振幅に移行するとき ( $\Delta J_i/\Delta J_{i-1} > 1$ )、図-4(b)に示すようには  $AF$  はほぼ1、すなわち一定振幅とほぼ同じき裂進展速度となる。同じ振幅が連続するときには図-4(c)に示すように  $0.96 \leq \Delta J_i/\Delta J_{i-1} < 1$  の範囲で概ね線形関係となり、その傾きは振幅の大きさごとに異なる。これらの傾向から、 $AF$  の推定式を次式の通り構築した。

$$\text{変動振幅: } AF = \begin{cases} -5.30 \cdot (\Delta J_i/\Delta J_{i-1}) + 6.30 & (\Delta J_i/\Delta J_{i-1} < 1) \\ 1.0 & (\Delta J_i/\Delta J_{i-1} \geq 1) \end{cases} \quad \text{一定振幅: } AF = 4.4 \times 10^6 \cdot \Delta J_i^{(-1.77)} \cdot \left(1 - \frac{\Delta J_i}{\Delta J_{i-1}}\right) \quad (2)$$

ここに、 $AF$ : 変動振幅と一定振幅のき裂進展速度の比、 $\Delta J_i/\Delta J_{i-1}$ : 隣り合う2つの波形の  $\Delta J$  の比。

## 6. き裂進展解析

式(1)の右辺に式(2)から求めた  $AF$  を乗ずることにより各サイクルのき裂進展速度を算出し、逐次累積することによりき裂長と繰返し回数の関係を求め、試験より得られたき裂進展挙動との比較を行った。き裂進展解析の結果を図-5に示す。同図には、式(1)のみを用い  $AF$  を考慮せずにき裂進展解析を行った結果も示している。 $AF$  を考慮しない場合には、図-5(c)を除き、推定結果が試験結果と乖離している。 $AF$  を用いてき裂進展解析を行った結果は、実験結果とよく一致しており、変動振幅下のき裂進展挙動をよく再現できている。

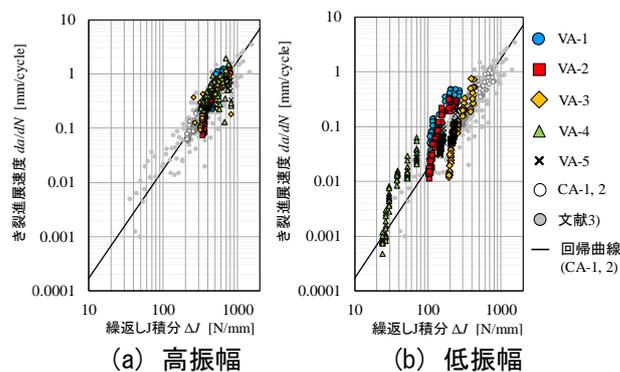
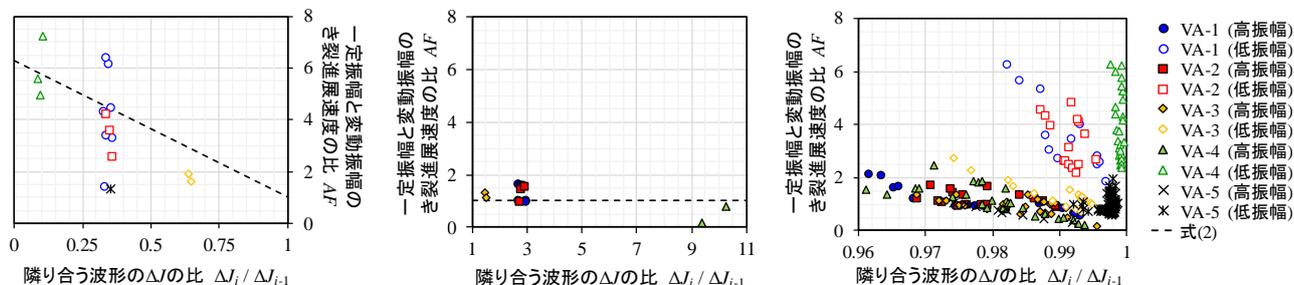


図-3 き裂進展速度と  $\Delta J$  の関係



(a) 高振幅から低振幅に移行するとき (b) 低振幅から高振幅に移行するとき (c) 同じ振幅が連続するとき

図-4  $AF$  と  $\Delta J_i/\Delta J_{i-1}$  の関係

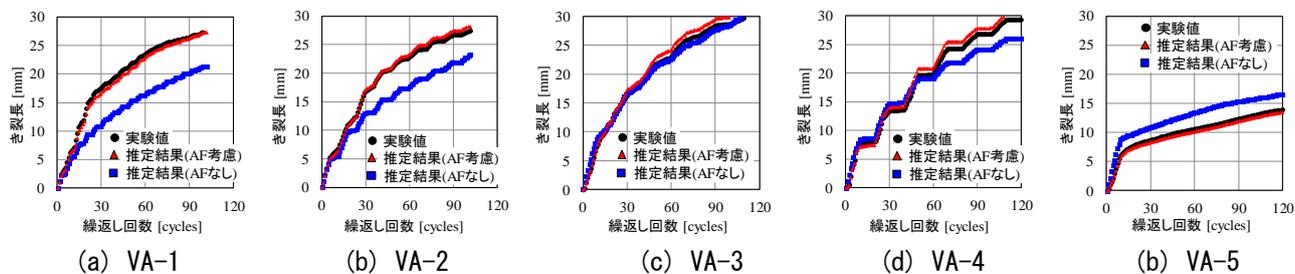


図-5 き裂進展解析結果

## 参考文献

1) 土木学会鋼構造委員会, 1995. 2) 舘石ら, 土木学会論文集, No.773/I-69, pp.149-158, 2004. 3) 判治ら, 鋼構造論文集, 第23巻, 89号, pp.85-95, 2016.