

## 低サイクル疲労き裂を起点とするぜい性破壊の発生可能性に関する基礎的研究

名古屋大学 学生会員 ○荒川 純 正会員 判治 剛  
フェロー会員 館石 和雄 正会員 清水 優

## 1. 研究背景

地震時の鋼橋の耐震性能を適切に評価するためには、低サイクル疲労き裂を起点とするぜい性破壊の発生可能性を予測する技術の確立も必要である。しかし、低サイクル疲労き裂が成長してぜい性破壊に至るまでのプロセスを適切に予測できる手法は十分に検討されていない。そこで、地震時に発生した低サイクル疲労き裂を起点としたぜい性破壊の発生評価法を構築する足掛かりとして、本研究では、異なる载荷パターンで導入した低サイクル疲労き裂を対象に CTOD 試験を行い、高サイクル疲労き裂に対する試験結果と比較し、ぜい性破壊の発生しやすさとの関係について考察を加えた。

## 2. 試験体

本試験では、図-1 に示す V 字型のサイドグループを切削した CT 試験片<sup>1)</sup>に低サイクル疲労き裂を導入した後、図-2 に示す CTOD 試験用の 3 点曲げ試験片をワイヤカット放電加工により切り出した。低サイクル疲労き裂の導入方法は後述する。供試鋼材は一般構造用圧延鋼材 SS400 とし、その機械的性質を表-1 に示す。試験片の製作を 2 回に分けて行い、それぞれで別々の鋼板を使用したため、末尾に I, II を付けて区別している。高サイクル疲労き裂用の CTOD 試験片も同じように CT 試験片から切り出して製作したが、疲労き裂は 3 点曲げ载荷にて導入した。ASTM E1820<sup>2)</sup>に従い、最大荷重 3.1kN、最小荷重 0.3kN (最小/最大荷重は 0.1)、振動数 10Hz 以下で試験を行い、規定される長さまで疲労き裂を進展させた。

## 3. 低サイクル疲労き裂の導入

低サイクル疲労き裂は過去の研究<sup>1)</sup>の試験方法を参考に、一定振幅の繰返し変位を与えて導入した。高サイクル疲労き裂と同程度の長さまでき裂を成長させた後、き裂先端を含むように 3 点曲げ試験片を採取した。き裂先端の塑性ひずみの大きさや履歴を変化させるために、表-2 に示す最大変位の異なる 2 種類の载荷条件を設定した。き裂進展試験の結果、本研究にて導入した疲労き裂の進展速度は、従来の線形破壊力学に基づく Paris 則<sup>3)</sup>では評価が難しい、0.2~1.5mm/cycle 程度であった。

低サイクル疲労き裂が約 15mm まで進展する間のき裂長と繰返し回数の関係を図-3 に示す。与えた変位の最大値は異なるが、変位振幅が同じであるため、载荷ケースによるき裂進展挙動の顕著な違いはみられない。

キーワード 低サイクル疲労、ぜい性破壊、限界 CTOD

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土木工学専攻 TEL : 052-789-4620

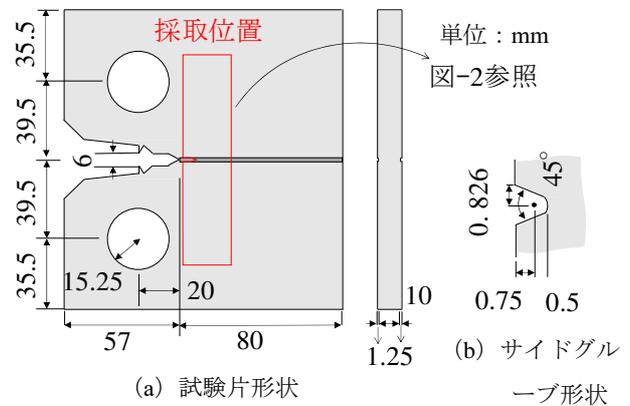


図-1 CT 試験片形状

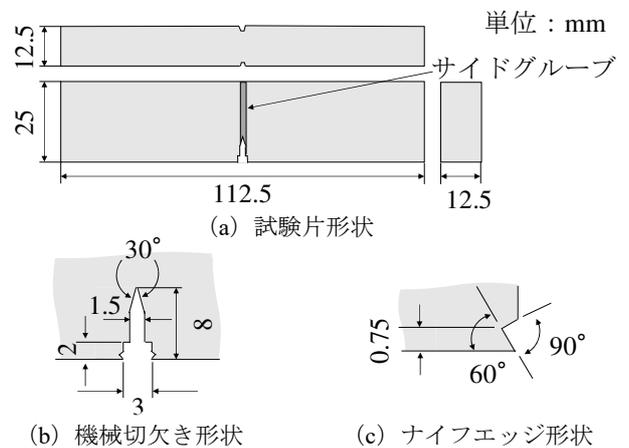


図-2 3 点曲げ試験片形状

表-1 鋼材の機械的性質

鋼板	機械的性質		
	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
鋼材 I	355	477	27
鋼材 II	296	431	32

表-2 予き裂導入条件

試験片名	低サイクル疲労			高サイクル疲労
	L15-I	L15-II	L30-II	H-I
予き裂導入条件	0.0~1.5 mm	0.0~1.5 mm	1.5~3.0 mm	0.3~3.1 kN
鋼材	I	II	II	I
試験数	3	3	1	9

#### 4. CTOD試験

CTOD試験はASTME1820<sup>2)</sup>に準拠して行った。試験状況を図-4に示す。試験中は温度を一定に保つために、断熱材で作成した恒温槽で囲い、試験片が十分に浸かるようにエタノールを満たした。冷却剤には液体窒素を用いた。試験片の温度は、試験片の表裏面に設置したK型熱電対により計測し、その平均を試験温度とした。試験片数が限られたことから、 $-40^{\circ}\text{C}\sim-80^{\circ}\text{C}$ の範囲で行った高サイクル疲労き裂の試験結果を基に、低サイクル疲労き裂に対する試験は $-60^{\circ}\text{C}$ のみとした。荷重は変位制御で与え、速度は $0.001\text{mm/s}$ とした。試験片のナイフエッジにクリップゲージを取り付け、荷重と開口変位を測定した。

SEMによる低サイクル疲労き裂先端の破面観察結果の例を図-5に示す。低サイクル疲労により導入したき裂面には延性破面の特徴であるディンプルと呼ばれる微小空洞がみられる。また、その疲労き裂を起点としてぜい性破壊に移行している様子を確認できる。

実験により得られた限界CTODと温度の関係を図-6に示す。図中には高サイクル疲労き裂を対象とした本研究の試験結果と過去の研究の結果<sup>4)</sup>も載せている。本研究の高サイクル疲労き裂に対する限界CTODは過去のそれとほぼ同じ領域に分布しており、独自に作成した試験システムの妥当性を確認できる。また、低サイクル疲労き裂に対する限界CTODは高サイクル疲労き裂のそれとほぼ同等であった。低サイクル疲労領域では、き裂先端の鈍化による幾何的な影響が大きく、限界CTODが増加すると予想されたが、それとは反する結果であった。この理由として、繰返し塑性ひずみによる靱性の劣化が影響していると考えられる。つまり、き裂先端の鈍化の影響が材料の靱性劣化により相殺された可能性がある。ただし、試験片数が限られていることや、図-5に示すように導入したき裂面が過度に湾曲している試験片もみられたことなどから、結果の妥当性の再検討も踏まえ、今後のさらなる結果の蓄積が不可欠である。

#### 5. まとめ

本研究では、低サイクル疲労き裂に対するCTOD試験を実施し、得られた限界CTODは高サイクル疲労き裂に対するそれとほぼ同程度である可能性が示された。しかし、試験片数が限られていることなどから、要因分析を詳細に行えるだけの十分な結果が得られず、引き続きの検討が必要である。

**謝辞** 本研究の一部は科学研究費補助金(18H01520, 代表: 判治剛)によるものである。試験治具の製作および試験片加工に関しては、名古屋大学全学技術センター 長谷川達郎氏に、SEM画像の撮影に関しては、名古屋大学高度計測技術実践センター 樋口哲夫氏に多大なるご協力をいただいた。ここに記して深謝します。

**参考文献** 1) Panjaitan et. al.: 鋼構造論文集, Vol.27, No.106, pp.75-80, 2020. 2) ASTM E1820: Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, 2020. 3) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 2012. 4) 表ら: 寒地土木研究月報, No.700, pp.30-35, 2011.

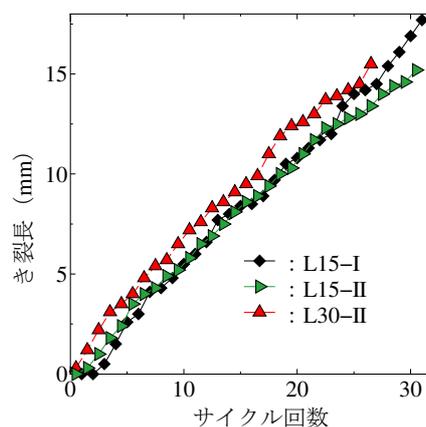


図-3 き裂長-繰返し回数関係

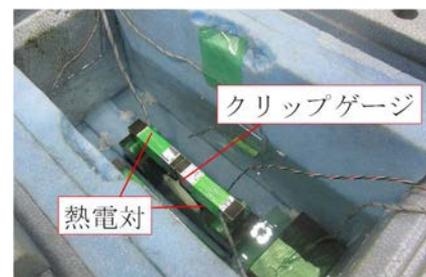


図-4 試験状況

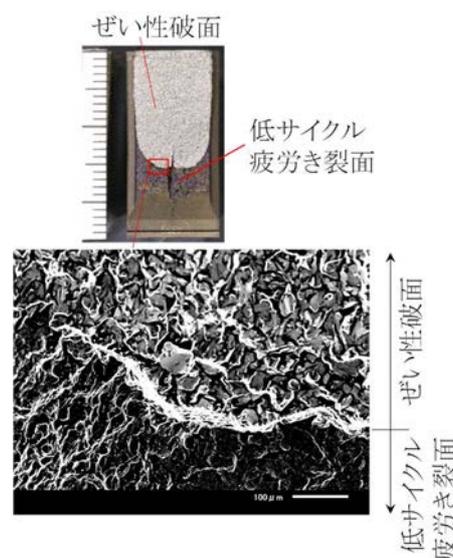


図-5 破面観察の例

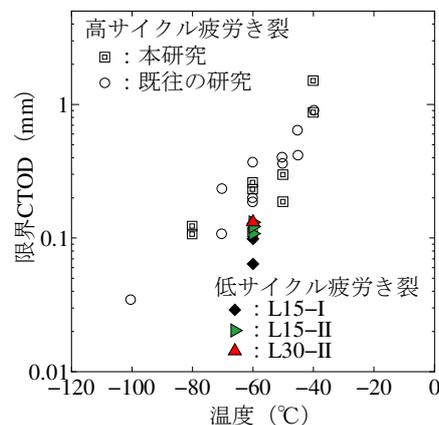


図-6 限界CTOD