

第 部門 小型鋼製供試体を用いた極低サイクル疲労亀裂発生現象の予測に関する基礎的な実験的研究

大阪市立大学工学部 学生員 山根 茂春 大阪市立大学大学院工学研究科 正会員 北田 俊行
 大阪市立大学大学院工学研究科 正会員 山口 隆司
 大阪市立大学大学院工学研究科 正会員 松村 政秀

1. 研究背景および研究目的

兵庫県南部地震による鋼製橋脚の損傷には、座屈、疲労亀裂、倒壊などの被害が見られた。これらのうち、疲労亀裂の発生の要因は、弾性領域を超える大きなひずみが少数回繰り返し作用したためである。この現象は極低サイクル疲労と呼ばれている。このような極低サイクル領域における亀裂の発生、およびその後の進展現象を十分に把握することは、繰返し外力を受ける鋼構造の安全な設計を行う上で必要である。

ここで、低サイクル疲労の亀裂寿命および破断寿命は、一定ひずみ振幅荷重を行う場合、塑性ひずみ振幅の関数で評価できることが知られている¹⁾。しかしながら、地震時には、変動するひずみ振幅が荷重されるため、ダメージの蓄積の評価、破壊モードなど変動ひずみ振幅の影響を考慮することが重要である。

本研究では、図-1に示すように、中央にスリットを設けた供試体を用いて鋼材の極低サイクル疲労による亀裂発生および進展挙動を把握することを目的として、漸増繰返し荷重実験および弾塑性 FEM 解析を実施している。

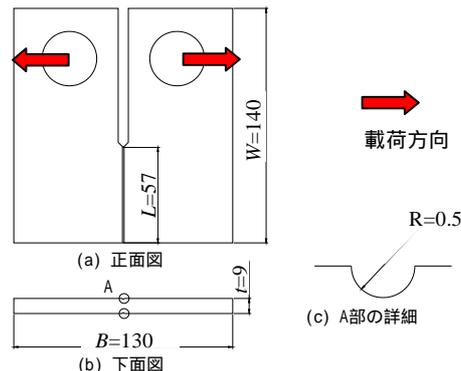


図-1 供試体の形状(寸法: mm)

2. 実験概要

2.1 実験供試体

実験には、板厚 9mm の中央にスリットを有する小型試験片(一般構造用鋼材 SS400)を用いた(図-1)。これらの供試体には、亀裂を直線的に進展させる目的で中央断面に溝状ノッチを設けている。JIS5 号試験片を用いて求めた使用鋼材の機械的性質を表-1 に示す。

2.2 実験方法

荷重には、動的最大荷重±100kN の MTS-810 材料試験機を用い、実験は、試験機の変位(以下、内部変位)を制御し、加振変位波形は、ひずみ速度依存性を考慮し、図-2 に示すように漸増変位振幅の荷重を行った。漸増変位振幅荷重実験は、内部変位を 0.5mm から 1 サイクル毎に 0.5mm 増加させて行った。なお、荷重速度は 0.002 ~ 0.02Hz と 0.4Hz の 2 パターンで行った。

これとは別に、一定ひずみ振幅繰返し荷重も実施している。一定ひずみ振幅繰返し荷重は、スリット先端の全ひずみ振幅が 4% となるように内部変位を制御して行った。荷重速度は 0.05Hz、加振変位波形は三角波に設定した。

2.3 実験結果

表-2 には、実験結果の一覧を示す。ここに、表中の u は 1 サイクル毎の変位増分量、 v は荷重速度、 N_c は亀裂発生寿命、および N_f は破断寿命、 $\sum \epsilon_p$ は累積塑性ひずみである。亀裂寿命はルーペおよびカラーチェックに

表-1 使用鋼材の機械的性質

降伏点 σ_y (N/mm ²)	引張強度 σ_u (N/mm ²)	ヤング率 E ×10 ⁵ (N/mm ²)	ポアソン比 ν
273.1	377.3	1.98	0.286

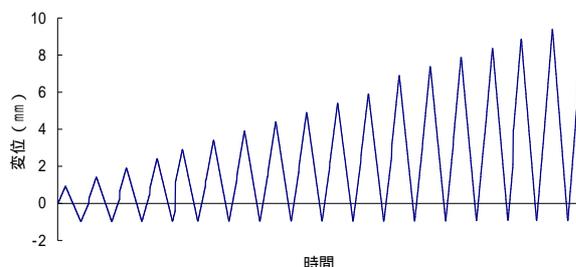


図-2 変位波形(漸増振幅荷重)

表-2 実験結果

供試体	u (mm/cycle)	v (Hz)	N_c (回)	N_f (回)	$\sum \epsilon_p$
w-200-0.005	—	0.005	127	—	10.52(7254 ϵ_y)
w-140-0.02	0.5	0.02 ~ 0.002	12	33	—
w-140-0.4	0.5	0.4Hz	9	31	2.32(1545 ϵ_y)

より、表面に発生した亀裂長さが 1mm 程度確認できたときとし、破断寿命は表面亀裂長さが 40mm に達したときとした。図 - 3 に示すように、繰返し速度が 0.002 ~ 0.4Hz の間では、繰返し速度が亀裂進展速度に及ぼす影響はほとんど認められない。図 - 4 には、最大引張荷重と亀裂長さとの関係を示す。最大荷重は亀裂長さが 4 ~ 5mm(全体長さ L の 9%程度)のときをピークに低下している。

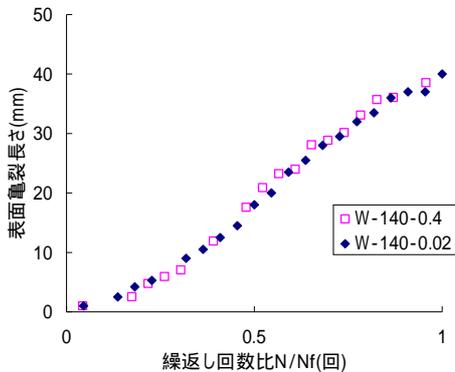


図 - 3 亀裂長さの繰返し回数に対する変化

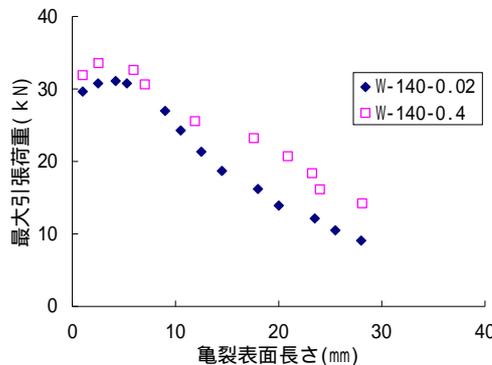


図 - 4 最大引張荷重の亀裂長さに対する変化

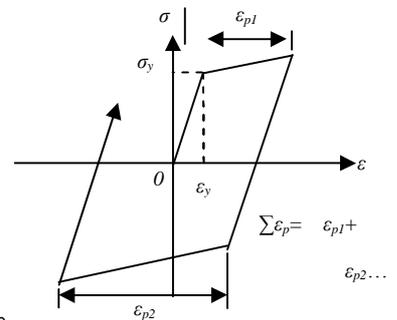


図 - 5 累積塑性ひずみの概念図

3. 弾塑性 FEM 解析による累積塑性ひずみの推定

3.1 解析概要

実験では、直接、正確なひずみの値を得ることの困難であった亀裂発生位置(スリット先端)での詳細な累積塑性ひずみ $\sum \epsilon_p$ を把握するために、ABAQUS を用いて実験供試体に対して弾塑性有限変位解析を行った。図 - 5 には、累積塑性ひずみの概念図を示す。累積塑性ひずみは変形による塑性ひずみの絶対総和で定義する($\sum \epsilon_p = \epsilon_{p1} + \epsilon_{p2} \dots$)。図 - 6 には、サイクル毎の最大・最小荷重点をプロットし、結んだ荷重 - 変位履歴の包絡線を示す。実験結果と解析結果とで、圧縮側で若干差違が認められるが、引張側ではほぼ一致していることが確認できる。

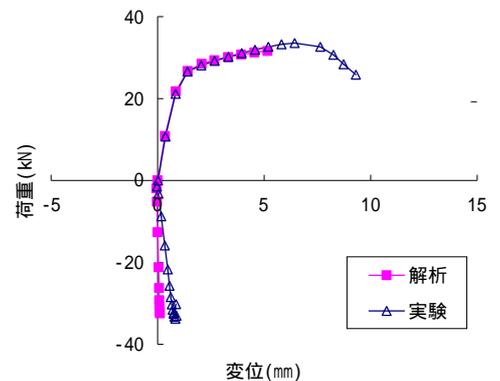


図 - 6 荷重 - 開口変位履歴の包絡線

3.2 解析結果

解析結果より亀裂発生までの累積塑性ひずみ $\sum \epsilon_p = 2.32(1545\epsilon_y)$ を得た。図 - 7 には、累積塑性ひずみ - 亀裂発生寿命曲線を示す。図中に一定ひずみ振幅载荷の実験結果、および西村・三木による亀裂発生寿命曲線¹⁾の塑性ひずみ振幅を累積塑性ひずみに再評価した亀裂発生寿命曲線をプロットしている。同図によると、一定ひずみ振幅载荷実験の結果は、既存の亀裂寿命曲線とよく一致しているが、漸増変位振幅载荷実験の結果は変動ひずみ振幅の影響により寿命曲線と差違が見られる。

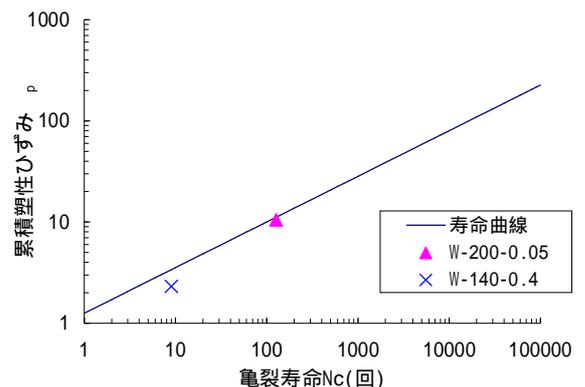


図 - 7 累積塑性ひずみ - 亀裂寿命曲線

4. まとめ

鋼材の極低サイクル疲労による亀裂発生、および進展挙動を、漸増繰返し変位载荷実験、および弾塑性有限変位解析により検討した。主な結果は次のとおりである。(1)表面亀裂長さが全体長さ L の 9%程度進展すると供試体の耐荷力に影響する、(2)繰返し速度 0.002 ~ 0.4Hz の間では、繰返し速度は亀裂の進展に影響しない、(3)スリット先端のひずみは解析により精度良く導出できる。(4)極低サイクル疲労亀裂寿命は、累積塑性ひずみの関数で表すことができる。

参考文献 1) 西村俊夫, 三木千壽: 構造用鋼材のひずみ制御低サイクル疲れ特性, 土木学会論文報告集, 第 279 号, pp.29-44, 1978.11.

2) 坂野昌弘, 三上市蔵, 鷹羽新二: 鋼製橋脚隅角部の低サイクル疲労挙動, 土木学会論文集, No.563, -39, pp.49-60, 1997. 4.