

繰返し履歴を考慮した切欠きから発生する脆性破壊の予測：累積塑性変形能力推定方法の確立

Prediction of brittle fracture from notches with consideration of cyclic loading effects:
Establishment of a method for evaluating cumulative plastic deformation capacity

有明工業高等専門学校 准教授 岩下 勉

（研究計画ないし研究手法の概略）

1. 研究の目的

地震動を受ける鋼構造物に溶接欠陥等の切欠きがある場合、その先端では圧縮・引張の繰返し負荷が生じることで破壊靱性が低下し、脆性破壊が生じやすくなる。そのため、その影響を評価することが脆性破壊を防止する上で重要である。そこで本研究では、切欠き付試験片の実験・解析から繰返し履歴が破壊靱性に及ぼす影響を検討するとともに、繰返し荷を受けた試験体の切欠きから発生する脆性破壊に着目し、これによって決まる累積塑性変形能力の推定方法を提案することを目的とした。

2. 研究の計画

実験では、切欠きを有する試験片に対して一定振幅の繰返し荷を与えることで、切欠きから発生する脆性破壊の実験を実施した。材料には、低靱性鋼（SM490A相当）とそれよりも高い破壊靱性を有する高靱性鋼（SN490B）の破壊靱性が異なる2種類の材料を準備した。繰返し荷実験では、振幅の大きさを実験変数とし、それが脆性破壊の発生時期（累積塑性変形能力）に及ぼす影響を検討した。また、一定振幅繰返し荷以外にも、一定振幅繰返し荷後の単調荷（以後、繰返し後の単調荷と呼ぶ）も実施し、損傷度による考察を行った。

他方、有限要素解析を用いてワイブル応力を把握した。これにより、振幅の大きさをワイブル応力の大きさとして扱うことができる。実験と解析より得られた結果から、累積塑性変形能力推定方法の検討・開発を行った。

3. 実験の方法

実験で使用する試験片の材質はSM490A相当（低靱性鋼）、および、SN490B（高靱性鋼）である。試験片の形状を図1に示す。試験片には脆性破壊の起点となる切欠きを4ヶ所設け、切欠き半径は0.15mmとした。荷試験は、単調荷、繰返し荷、繰返し後の単調荷の3種類である。図2に荷プログラムを示す。単調荷（M）では、試験体が破断するまで一定方向に荷を行い、繰返し荷（C）では、一定振幅で破断が生じるまで繰返し荷を行った。繰返し後の単調荷（CM）では、一定振幅で1回、2回、あるいは、4回繰返し荷をした後、破断するまで一定方向に単調荷を行った。

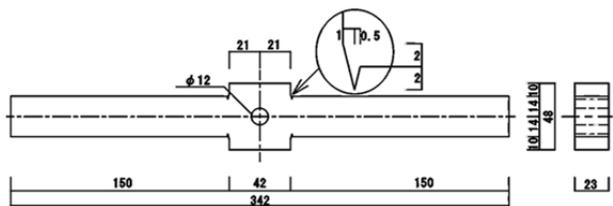


図1 試験片形状・寸法

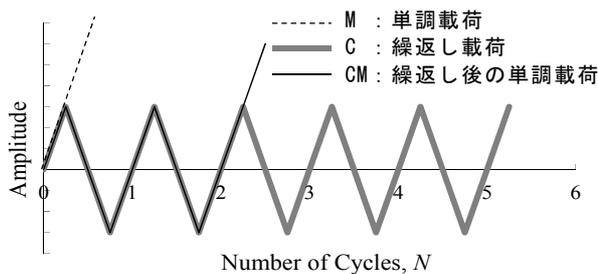


図2 荷重プログラム

(実験調査によって得られた新しい知見)

4. 実験結果と考察

図3に、繰返し荷重における累積塑性変形倍率 η と塑性率振幅 μ の関係を示す．なお、凡例中のCの右に続く数値は振幅の大きさ（単位：mm）を表す．図より、ばらつきがみられるものの、 μ が大きくなると η が小さくなることが確認できた．また、図4に、繰返し後の単調荷重における繰返し部分の累積塑性変形倍率 η_C とそれに対する単調部分の累積塑性変形倍率 η_{CM} を示す．なお、凡例中のハイフンの右に続く数値は一定振幅繰返しの回数を表す．図より、SM材では特に大きなばらつきがみられるが、繰返しによる累積塑性変形が大きくなるにつれて、 η_{CM} が小さくなる傾向がみられた．これは、繰返し負荷による靱性の劣化の影響とみて良い．

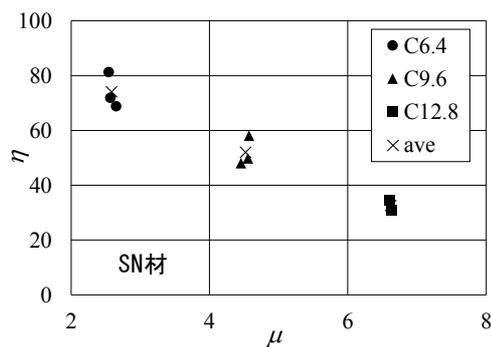
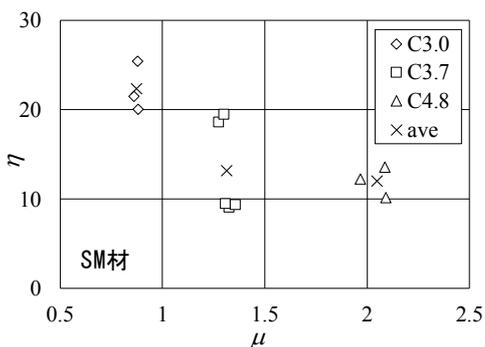


図3 $\eta - \mu$ 関係

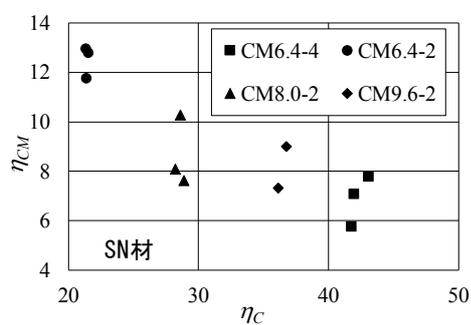
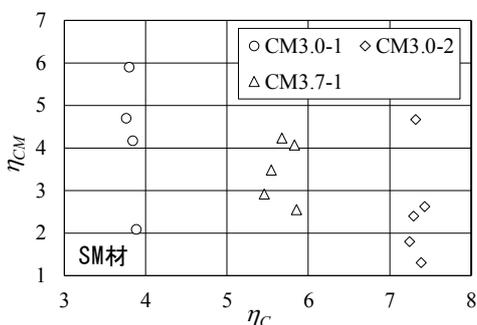


図4 $\eta_{CM} - \eta_C$ 関係

実験より得られた塑性率振幅 μ と修正した破断サイクル数 N_f の相関関係を、近似式、および、決定係数 R^2 値とともに図5に示す．なお、修正した破断サイクルは、 $N_f = \eta/\mu$ として計算した．すべて脆性破断によるプロット点であるが、図から分かる通り、ばらつきが伴うもののManson-Coffin 則の疲労関係式がある程度成立していることが確認できる．

図 5 横軸の修正した破断サイクル数 N_f は、当然ながら、累積塑性変形倍率 η と相関がある。また、一定振幅繰返し载荷により脆性破壊が発生した試験体の累積塑性変形倍率 η と塑性率振幅 μ の関係式を導いている既往研究もあり、これらを参考にしながら、図 5 における横軸 N_f を η に置き換えて、図 5 同様、 μ と η の相関関係を近似式とともに図 6 に示す。

図 6 においても、図 5 と同様に近似式と実験値の相関が確認できる。しかし図 5 に比べると、特に、SM 材でばらつきが目立っており、 R^2 値も低下している（相関係数：0.681）。このようなばらつきを含んでいるものの、図 5、図 6 において SM、SN 両材の近似式の直線勾配は、比較的近い値を示している。そこで、図 6 の μ 、 η に関して、各材料の単調载荷実験による塑性変形倍率 η_M で無次元化し、SM、SN 両材の統一的评价を試みた。図 7 にその結果を示す。なお、SN 材については、単調载荷実験が得られていないため、図 6 中の SN 材における近似式、および、SM 材の単調载荷結果も参考にしながら、本報では $\eta_M = 20.0$ と仮定した。なお、この値を使って得られた SN 材の近似式による η と実験より得られた η の相関係数は、0.977 であった。

以上から、図 7 に SM、SN の両材について、 η_M で無次元化した μ と η の関係を示す。図 7 における近似式より得られた η/η_M と実験から得られた η/η_M の相関係数は、0.900 と比較的高かく、破壊靱性が異なる材料に対しても、脆性破壊の発生を統一的に評価できる可能性が示唆される。

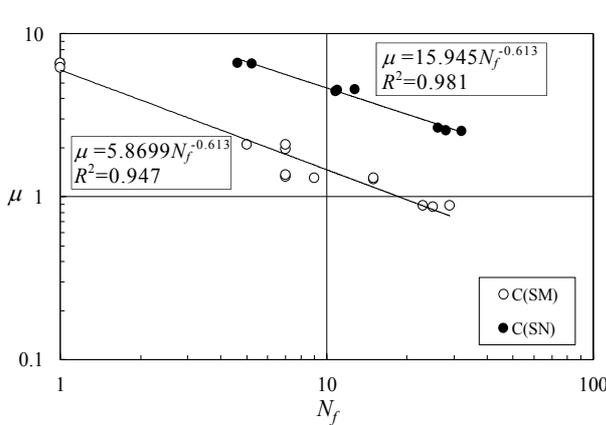


図 5 μ - N_f 関係

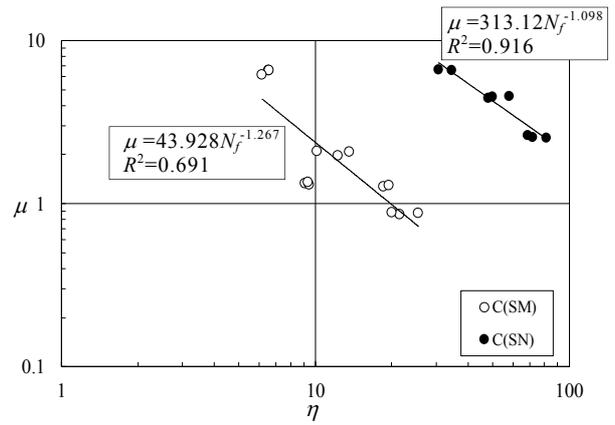


図 6 μ - η 関係

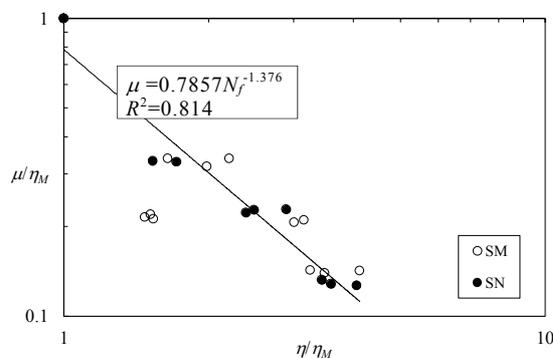


図 7 μ/η_M - η/η_M 関係

本研究では、脆性破壊により破断した試験体の損傷度を求めた。すなわち、図 5 で言えば、ある一定の塑性率振幅 μ による繰返しを受け、修正した破断サイクル数 N_f 回に達した時に脆性破壊が生じた場合、その塑性率振幅 μ を 1 回受けると $1/N_f$ だけ損傷を受け、 N 回受けると N/N_f の損傷を受けることになる。このように求められた損傷度を D_N とした。さらに、これを図 6 のように N_f を η に置き換え、損傷度を前述と同様に求めたものを D_η とし、これをさらに、図 7 のように N_f を η/η_M に置き換えて求めた損傷度を D_{η/η_M} とした。得られた損傷度を用いて、 D_η - D_N 関係、 D_{η/η_M} - D_N 関係について、相関係数を求めたところ、それぞれ 0.951、0.971 と高い相関が得られた。以上より、脆性破壊によって決まる試験体の変形能力に基づいて求めた D 値を用いて、損傷度を検討することができると考えられる。参考のため、図 8 に D_{η/η_M} - D_N 関係を示す。以上より、 D_{η/η_M} を用いて繰返し後の単調载荷の損傷度を考察する。図 9 に損傷度を示す。なお横軸は、繰返し部分の損傷度である。図より、繰返し部分の損傷度の大きさが全体の損傷度に与える影響はほとんどないことが分かる。他方、損傷度の値をみると大きくばらついているが（破壊靱性が非常に小さかった SM 材において、 D 値が約 0.4~1.3 と、特に大きなばらつきを示していた）、平均値は 0.790 と 1.0 より小さくなっていた。このように D 値が小さな値を示したことは、今後検討が必要である。

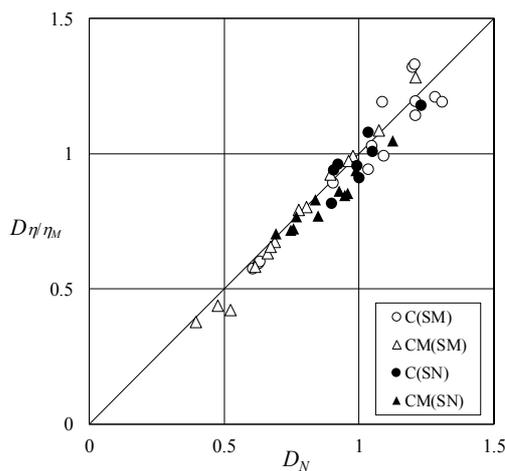


図 8 D_{η/η_M} - D_N 関係

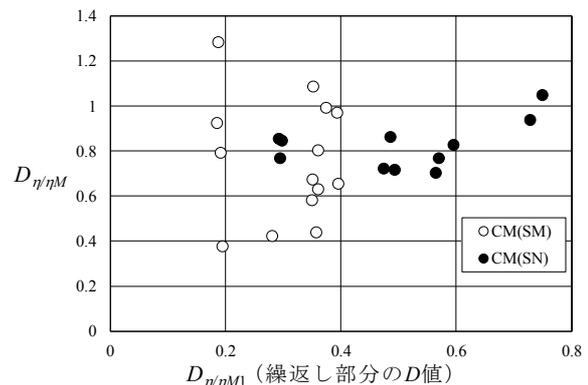


図 9 CM における損傷度 D_{η/η_M}

5. ワイブル応力による検討

実験で示した材料のうち、SM材について、ワイブル応力による検討を行った。ワイブル応力 σ_w は従来からの破壊靱性に替わる応力パラメータで脆性破壊発生の評価指標として用いられる。図10に η - σ_w 関係を示す。繰返し载荷Cのワイブル応力は、各载荷プログラムの最大振幅時の値として有限要素解析より求めた。図10から、ばらつきがあるものの、図3と同様に、 σ_w が大きくなると η が小さくなる傾向を示している。つまり、振幅の増加は、ワイブル応力の増加であり、それにより、変形能力が低下している。また、別の見方をすれば、図10中の近似曲線は、各振幅における限界ワイブル応力の低下量を示していると言える。

また、図11に繰返し後の単調载荷CMを含む η - σ_w 関係を示す。なお、CMのワイブル応力は、実験で得られたP- δ 関係を骨格曲線に置き換え、その骨格曲線における破断時の値として有限要素解析より求めた。また、図中の曲線は、MとCの破断点から得られた近似曲線である。この図から結果に大きなばらつきは存在するが、CMの破断点が近似曲線を横断する形で分布し

ていることが分かる．このことは，ここで示した近似曲線によって，様々な载荷パターンにおける脆性破壊発生の予測，すなわち，累積塑性変形能力推定の可能性を示唆する．

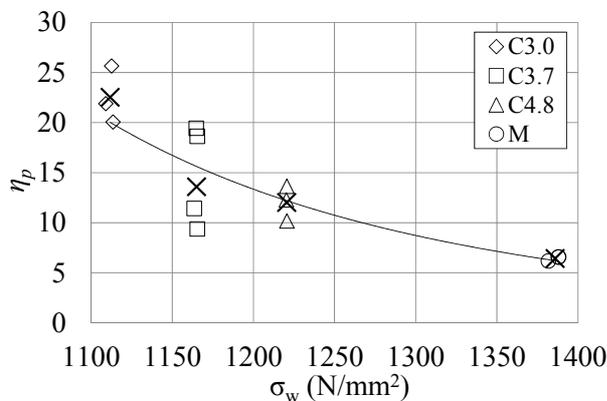


図10 η - σ_w 関係

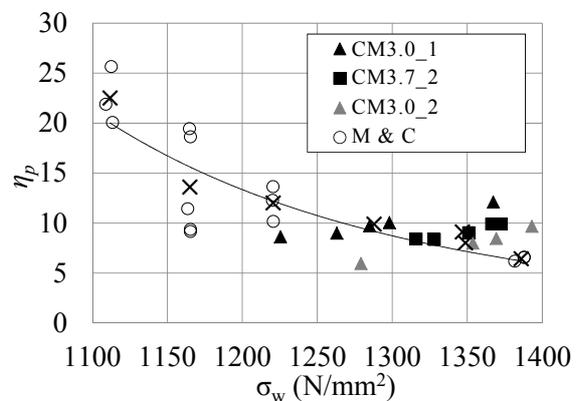


図11 CMを含む η - σ_w 関係

6. 得られた新しい知見および今後の課題

本研究により，得られた知見は以下の通りである．

1. 破断サイクル数から得られた損傷度 D_N と破断サイクル数を累積塑性変形能力に置き換えた損傷度 D_{η/η_M} は，非常に高い相関を示す．
2. 累積塑性変形能力と脆性破壊時のワイブル応力の関係において，繰返し後の単調载荷の脆性破壊発生点は，ばらつきを伴うものの，単調载荷と繰返し载荷試験の得られた近似曲線を横断して分布する．これは，载荷パターンにおける脆性破壊発生の予測，すなわち，累積塑性変形能力推定の可能性を示唆するものである．

上述の通り，得られた結果はばらつきを含んでおり，また，試験数も限られている．今後，試験数を増やすとともに，本報告で示した以外の载荷方法についても検討を行うことで，ワイブル応力を用いた累積塑性変形能力の推定方法の提案を行う．

(発 表 論 文)

1. Iwashita, T., Azuma, K.: Effects of Cyclic Loading on Occurrence of Brittle Fracture in Notched Specimens, Proceedings of The 15th International Symposium on Tubular Structures, pp.599-604, 2015.5
2. 立野文，岩下勉，東康二：繰返し载荷を受ける切欠きを有する鋼試験片の塑性変形能力に関する研究－その1 実験概要と実験結果－，日本建築学会大会学術講演梗概集 構造Ⅲ，2016.8（投稿中）
3. 岩下勉，立野文，東康二：繰返し载荷を受ける切欠きを有する鋼試験片の塑性変形能力に関する研究－その2 塑性率振幅-破断サイクル関係と損傷度の考察－，日本建築学会大会学術講演梗概集 構造Ⅲ，2016.8（投稿中）