

平成 31 年 5 月 3 日現在

機関番号：57102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06598

研究課題名(和文) 繰返し履歴・延性き裂を考慮した欠陥からの脆性破壊予測：累積塑性変形推定方法の確立

研究課題名(英文) Prediction of Brittle Fracture from Defects Considering Cyclic History Effects and Ductile Crack Growth: Estimation Method of Accumulated Plastic Deformation Capacity

研究代表者

岩下 勉 (Iwashita, Tsutomu)

有明工業高等専門学校・創造工学科・教授

研究者番号：10332090

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、繰返し荷重を受ける切欠き付鋼試験片から延性き裂を伴って発生する脆い破壊現象である脆性破壊を予測することを目的に、実験および有限要素解析の両面により検討を行った。その結果、脆性破壊クライテリアと破断時繰返し回数との関係を定量化した。その上で、累積疲労損傷則(異なる繰返し振幅を受ける時に破壊までの寿命を予測する手法)を活用することで、異なる繰返し振幅荷重を受ける試験片の脆性破壊を比較的精度良く予測できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、繰返し荷重を受ける切欠き付鋼試験片から延性き裂を伴って発生する脆い破壊現象である脆性破壊を予測することで、試験片の持つ変形能力を推定できることを示した。切欠きに圧縮・引張の繰返し荷重が与えられる条件での脆性破壊予測を示した点に学術的意義がある。本研究の成果は、地震動により鋼構造溶接接合部に生じ得る欠陥や切欠き等から延性き裂を伴って発生する脆性破壊を予測・防止につながる。

研究成果の概要(英文)：This research showed a brittle fracture prediction method that could estimate the plastic deformation capacity of notched steel specimens with a ductile crack under cyclic loading. Brittle fracture occurred from notches which were subjected to both compression and tension and the method predicted brittle fracture under the condition. The research outcome is related to prediction and prevention of brittle fracture with ductile crack growth from notches and defects at welded connections in steel structures subjected to an earthquake loading.

研究分野：鋼構造

キーワード：脆性破壊 塑性変形能力 ワイブル応力 繰返し荷重 累積損傷度 延性き裂

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

脆性破壊の予測・防止は耐震性確保のため重要な課題であり、兵庫県南部地震以降多くの研究により、脆性破壊防止の観点からは溶接条件の制限、溶接ディテールの改良、破壊靱性値確保など研究成果が挙げられている。その一方で、溶接欠陥から発生する脆性破壊の的確な予測手法は確立されていない現状がある。

特に、切欠きを内在した状況において、繰返し負荷が作用した場合の脆性破壊の予測に関しては、その手法は確立されていない。さらに、材料靱性が高い場合には延性き裂を伴って脆性破壊が生じるが、そのような場合にも、脆性破壊発生の予測が可能か検討されていない。

2. 研究の目的

地震動を受ける鋼構造物において、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。その際、比較的靱性が高い材料では、延性き裂進展を伴った脆性破壊が生じる。そのため、それら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・解析から繰返し負荷が破壊靱性に及ぼす影響を検討するとともに、繰返し負荷を受けた試験片の切欠きから延性き裂進展を伴って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開発し、その有効性を示すことを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、切欠きを有する試験片に対して単調載荷および繰返し載荷を与えることで、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。繰返し載荷実験では、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。具体的には、

- M：単調載荷
- C：一定振幅繰返し載荷
- CM：一定振幅繰返し載荷後の単調載荷
- Cc：複合振幅繰返し載荷
- Ci：漸増振幅繰返し載荷
- Cr：漸減振幅繰返し載荷

の計 6 種類の載荷方法により実験を行った。試験片および実験装置を図 1 に示す。

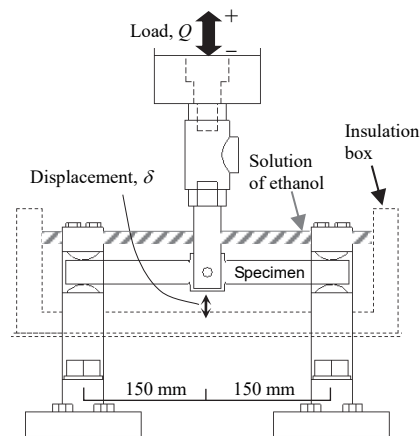


図 1 試験片および実験装置

脆性破壊の予測を行う上で、脆性破壊のクライテリアであるワイブル応力を利用した。これは有限要素解析により切欠き周辺の応力状態を把握するとともに 3 点曲げ破壊靱性試験を実施することにより得た。このワイブル応力と破断サイクル数の関係を定量化し、その上で、マイナー則に基づき、異なる振幅を受ける繰返し載荷による試験片の損傷度を算出した。さらに、これらの結果を用いて、脆性破壊発生の予測手法を提案し、それにより複数の振幅を受けて脆性破壊が発生した試験片の累積塑性変形能力を算出し、予測手法の有効性について検討を行った。

4. 研究成果

- (1) 図 2 に示す延性き裂進展量 Δa と塑性変形能力（引張側） η_{pT} の関係から振幅が大きくなるほど（凡例内の記号 C の横の数値が振幅の大きさ、単位は mm）、き裂進展速度が速くなることが明らかになった。また図中、+ を示した試験片は破断側の切欠きが最初に引張を受けており（先引張）、- を示した試験片は破断側の切欠きが最初に圧縮を受けており（先圧縮）、振幅が大きく、かつ、先圧縮の場合、さらにき裂進展速度が速くなることが分かった。

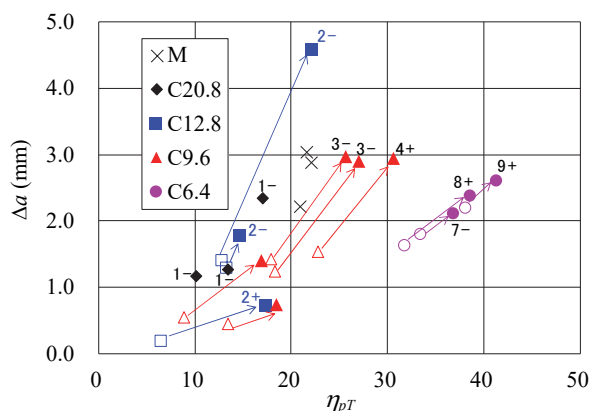
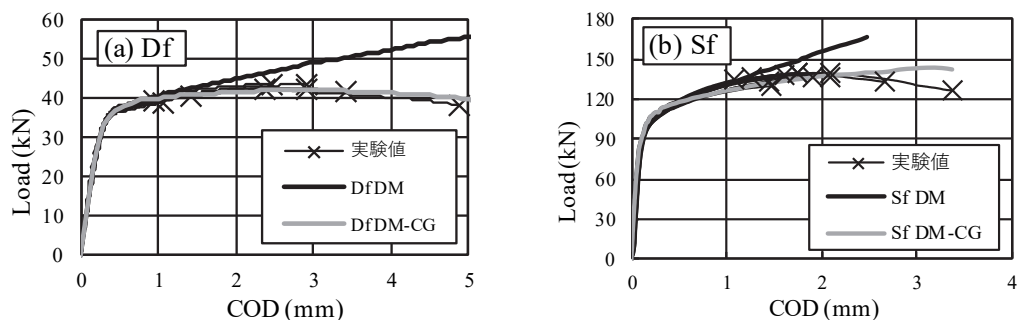


図 2 延性き裂進展状況

- (2) 図 3 に深い切欠きと浅い切欠きの 3 点曲げ破壊靱性試験の荷重変形関係を示す。いずれも灰色線で示す DM-CG がき裂進展を再現した有限要素解析によるシミュレーション結果であり、解析によりき裂進展を精度良く再現できることが明らかになった。なお Sf に関して、COD が 2.5mm 前後以降では、解析モデルにおいてき裂の進展の限界に達したため荷重上昇

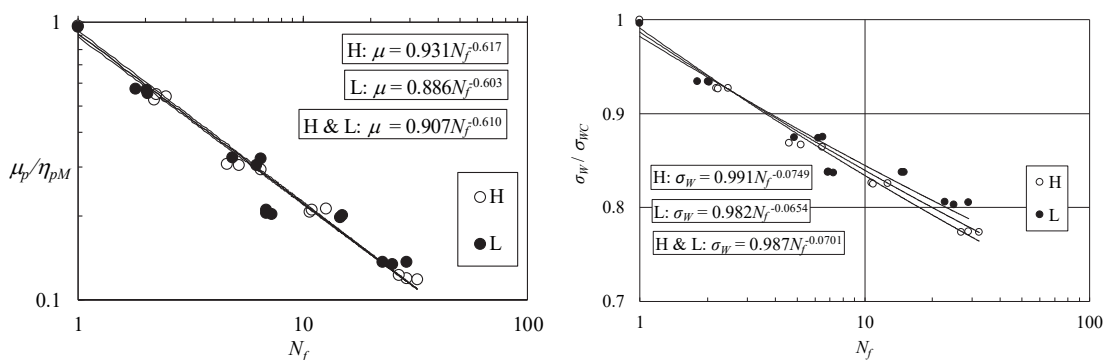
が生じたが、今後モデルの改善により、最終段階までき裂進展の再現は可能である。



(a) Df : 深い切欠き (b) Sf : 浅い切欠き

図3 3点曲げ破壊靱性試験の荷重-COD (き裂開口変位) 関係

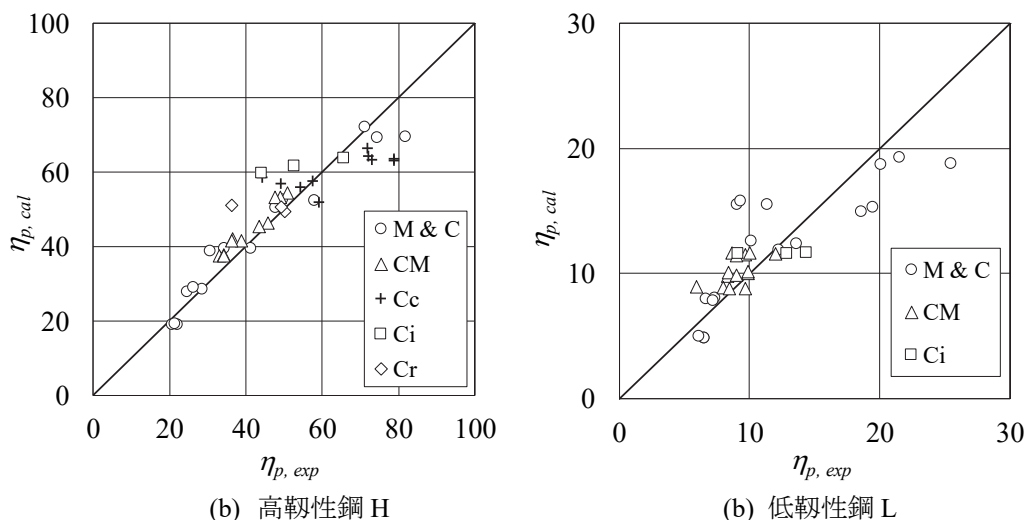
(3) 図4(a)に単調荷重によって得られた試験片の塑性変形倍率 η_{pM} で無次元化した塑性率振幅 μ_p と修正した破断サイクル数 N_f の関係を、また、(b)に限界ワイブル応力 σ_{WC} で無次元化した切欠きに作用するワイブル応力 σ_W と修正した破断サイクル数 N_f の関係をそれぞれ示す。図中、Hは高靱性鋼、Lは低靱性鋼によるC一定振幅繰返し荷重の脆性破壊発生時の結果を示しており、この図より、低靱性鋼の結果では、若干のばらつきは伴うものの、近似式により脆性破壊の発生を精度良く評価できることを示している。なお、このばらつきは材料そのものが持つ脆性破壊発生に伴うばらつきであり、評価手法による誤差等とは異なる。ばらつきの扱いについては今後の検討課題である。



(a) $\mu_p/\eta_{pM}-N_f$ 関係 (b) $\sigma_W/\sigma_{WC}-N_f$ 関係

図4 C試験片における破断サイクル数の検討

(4) 図5に脆性破壊発生のクライテリアであるワイブル応力に基づき、マイナー則の考え方を利用して、複数の異なる振幅を受ける試験片の脆性破壊によって決する累積塑性変形倍率の算出手法を提案した。その手法により算出した予測累積塑性変形倍率 $\eta_{p, cal}$ と実験値 $\eta_{p, exp}$ の



(a) 高靱性鋼 H (b) 低靱性鋼 L

図5 脆性破壊によって決する累積塑性変形倍率の予測 (実験値 $\eta_{p, exp}$ と予測値 $\eta_{p, cal}$ の比較)

関係を示す。その結果、低靱性鋼でばらつきは大きくなっているが、比較的高い精度で累積塑性変形倍率、すなわち脆性破壊の発生を推定できることが明らかになった。複数の繰返し振幅を伴った切欠きを有する試験片に対して、ワイブル応力のような破壊力学的アプローチにより、脆性破壊の発生を精度良く予測した研究はこれまでにほとんど見られない。その意味でも、本研究で示した脆性破壊発生の予測手法は、最大の研究成果と言える。また本研究の成果は、地震動により鋼構造溶接接合部に生じ得る欠陥や切欠き等から延性き裂を伴って発生する脆性破壊を予測・防止につながると考えている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 岩下 勉, 松田郁哉, 東 康二: 切欠きから延性き裂を伴って発生する脆性破壊の損傷度, 鋼構造年次論文報告集, 査読有, 第 26 巻, 2018, 709-715
- ② 島田恵豊, 岩下 勉: 切欠きを有する 3 点曲げ試験片の延性き裂進展シミュレーション, 鋼構造年次論文報告集, 査読有, 第 26 巻, 2018, 716-723

[学会発表] (計 6 件)

- ① Hamasaki, M., Iwashita, T.: Prediction of Rotation Capacity at Brittle Fracture from Defects in Beam-to-Column Connections -Numerical study with the Weibull stress approach-, Proceedings of International Symposium on Innovative Engineering 2019, 査読有, 2019, 46-51
- ② Komiya, S., Iwashita, T.: Effects of Cyclic Loading on Brittle Fracture in Steel Notched Specimens -Evaluation of Cumulative Ductility and Cumulative Damage-, Proceedings of International Symposium on Innovative Engineering 2018, 査読有, 2018, 51-56
- ③ Iwashita, T., Tateno, A., Azuma, K.: Cumulative damage of notched specimens with brittle fracture under cyclic loading, Proceedings of The 16th International Symposium on Tubular Structures, 査読有, 2017, 373-379
- ④ Shimada, K., Komiya, S., Iwashita, T.: Ductile Crack Growth Simulation and Effects of Crack Growth on Single-Edge Notched Bend Specimens, Proceedings of the International Conference of Global Network for Innovative Technology and AWAM International Conference in Civil Engineering, AIP Conference Proceedings, 査読有, Volume 1892, 2017, 020030-1-020030-7
- ⑤ Iwashita, T., Azuma, K.: Effects Of Cyclic Loading On Brittle Fracture In Steel Notched Specimens With Different Fracture Toughness, 14th International Conference on Fracture, 査読有, 2017
- ⑥ Iwashita, T., Azuma, K.: Effects of Cyclic Loading on Occurrence of Brittle Fracture in Notched Specimens and Comparison with Weibull Stress Approach, Proceedings of The 11th Pacific Structural Steel Conference, 査読有, 2017, 1109-1115

[その他]

ホームページ等

研究室ホームページに研究実績・進捗状況等を記載

<http://www.ar.ariake-nct.ac.jp/iwashita/result/kaken2016-18.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

なし

(3) 連携研究者

研究協力者氏名：東 康二

ローマ字氏名：Azuma, Koji

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。