

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：57102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820276

研究課題名(和文) 繰返し履歴を考慮した欠陥から発生する脆性破壊予測：累積塑性変形能力推定方法の確立

研究課題名(英文) Prediction of Brittle Fracture from Defects Considering Cyclic History Effects: 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・その他部局等・准教授

研究者番号：10332090

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：繰返し载荷を受けた切欠きを有する試験片から発生する脆性破壊に着目し、これによって決定する累積塑性変形能力の推定方法を確立することを最終目標として、実験および解析を行った。その結果、破壊靱性が異なる材料に対して、振幅と塑性変形能力の関係から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た。また、破断サイクル数から得られた損傷度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は、非常に高い相関を示すことが確認された。そして、脆性破壊発生のクライテリアとなるワイブル応力を検討した結果、任意の振幅・载荷パターンにおいて累積塑性変形能力を推定できる可能性を示唆した。

研究成果の概要(英文)：The research purpose was to establish an estimation method of accumulated plastic deformation capacity determined by brittle fracture from notched specimens under cyclic loading. The test results showed that a relationship between amplitude and plastic deformation capacity could assess occurrence of brittle fracture in a unified manner for different fracture toughness materials. Also, the results showed a high correlation between cumulative damages from fracture cycle number and accumulated plastic deformation capacity. Finally, an estimation method with the Weibull stress, which is the brittle fracture criterion, showed the possibility of predicting accumulated plastic deformation capacity for various loading patterns with a different amplitude.

研究分野：建築構造・材料

キーワード：脆性破壊 累積塑性変形能力 ワイブル応力 損傷度 繰返し载荷 切欠き

1. 研究開始当初の背景

脆性破壊の防止は耐震性確保のため重要な課題とされており、兵庫県南部地震以降多くの研究が積み重ねられ、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。

これまでに研究代表者はこの塑性拘束の影響に着目し、改良したワイブル応力を切欠き深さの異なる3点曲げ試験や切欠きを有する引張試験等の実験結果に適用し、塑性拘束が脆性破壊の発生に及ぼす影響を定量的に評価した。しかし、一連の脆性破壊の予測に関する研究の中で、柱梁接合部をモデル化した溶接始終端部に欠陥を有する試験体が繰返し载荷を受ける場合に、単調载荷と比べて著しく塑性変形能力が低下する実験結果がいくつか見られた。さらにその一方で、繰返し载荷を受けても欠陥が脆性破壊の起点とならない逆のケースも見られた。これらは欠陥寸法・形状等(塑性拘束に影響)が関係しており、繰返し負荷と塑性拘束の影響が相互に作用し、それが脆性破壊の発生時期に影響を及ぼしたためである。従って、繰返し負荷・塑性拘束の両者が脆性破壊に及ぼす影響を捉えることが脆性破壊を評価する上で重要であると言える。塑性拘束の影響については改良したワイブル応力を用いて考慮することが可能であることから、これまでの研究をベースに繰返し負荷が脆性破壊に与える影響を定量的に評価することが必要となった。

2. 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、繰返し载荷を受けた試験片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。

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一定振幅の繰返し载荷を与えることで、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。繰返し载荷実験では、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、一定振幅繰返し载荷以外にも、

一定振幅繰返し载荷後の単調载荷(以後、繰返し後の単調载荷と呼ぶ)も実施し、損傷度による考察を行った。

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。载荷試験は、単調载荷、繰返し载荷、繰返し後の単調载荷の3種類である。図2に载荷プログラムを示す。単調载荷(M)では、試験体が破断するまで一定方向に载荷を行い、繰返し载荷(C)では、一定振幅で破断が生じるまで繰返し载荷を行った。繰返し後の単調载荷(CM)では、一定振幅で1回、あるいは、2回、繰返し载荷をした後、破断するまで一定方向に単調载荷を行った。以上の実験から、繰返し負荷が累積塑性変形能力に及ぼす影響を検討した。

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。

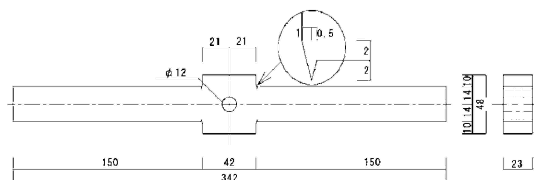


図1 試験片形状・寸法

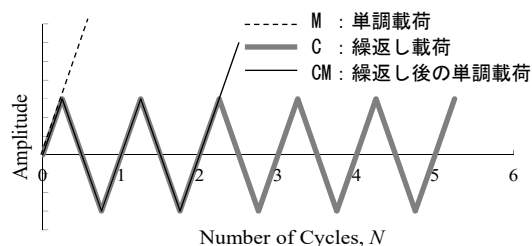


図2 载荷プログラム

4. 研究成果

(1) 実験結果

① 繰返し負荷が累積塑性変形能力に及ぼす影響

図3に、繰返し载荷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3より、ばらつきがみられるものの、SM, SN両材において 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、繰返し後の単調载荷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。凡例中の最右端の数値は一定振幅繰返しの回数を表す。図4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。

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 5 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。

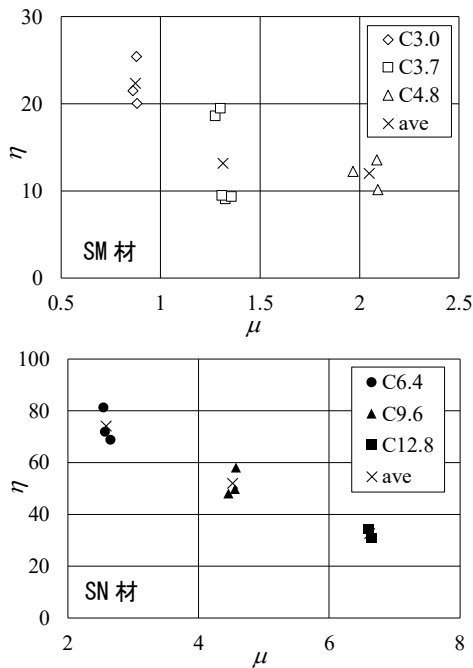


図 3 $\eta - \mu$ 関係

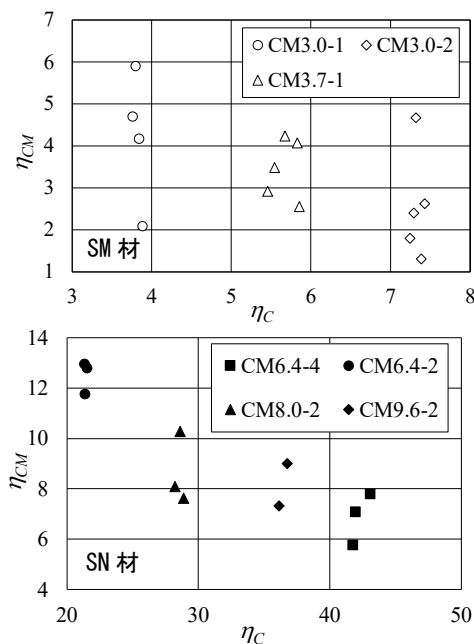


図 4 $\eta_{CM} - \eta_C$ 関係

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 材では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 両材の統一的評価を試みた。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。

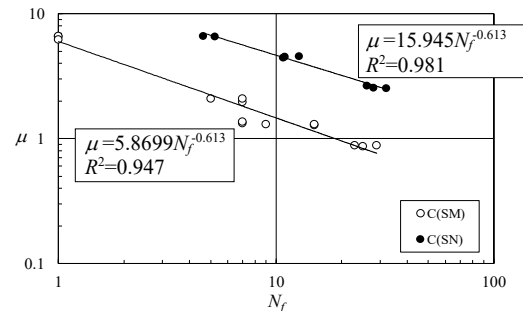


図 5 $\mu - N_f$ 関係

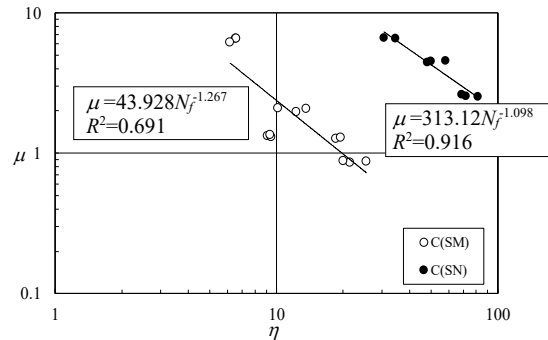


図 6 $\mu - \eta$ 関係

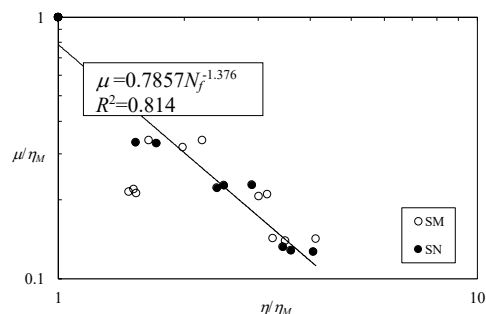


図 7 $\mu/\eta_M - \eta/\eta_M$ 関係

② 損傷度による検討

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と非常に高い相関が得られた。すなわち、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可能であることが明らかになった。図8に D_{η/η_M} - D_N 関係を示しておく。

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9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SM材において大きなばらつきがみられるが、平均値は0.790と1.0より小さくなっていった。このように D 値が小さな値を示したことについては、今後検討が必要である。

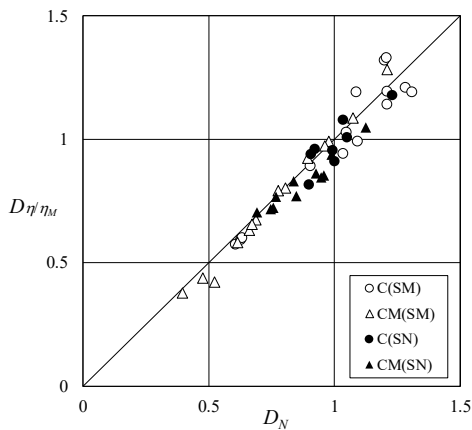


図8 D_{η/η_M} - D_N 関係

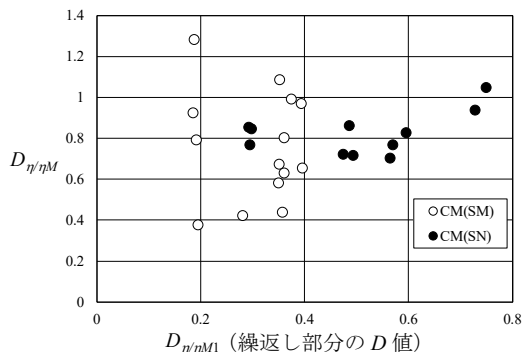


図9 CMにおける損傷度 D_{η/η_M}

(2) ワイブル応力による脆性破壊発生の予測

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、図10中の近似曲線から、各繰返し振幅における限界ワイブル応力の低下量を推定できる。

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している。

以上の通り、本研究において累積塑性変形能力推定の可能性を示したが、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。また、高靱性材での実験では、脆性破壊発生までに大きな延性き裂の進展が観察されており、ワイブル応力を算出する

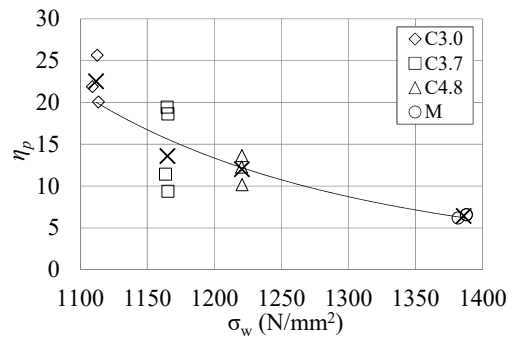


図10 η - σ_w 関係

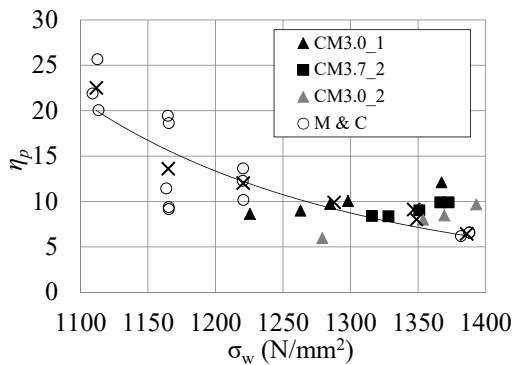


図11 CMを含む η - σ_w 関係

にあたり、有限要素解析においてき裂の進展を考慮する必要がある。従って、今後、試験数を増やすとともに、き裂進展を再現した有限要素解析を実施することで、き裂進展を考慮した累積塑性変形能力の推定方法の提案を行う。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① Azuma, K., Akahoshi, T., Iwashita, T.: Prediction of Brittle Fracture from Defects at Groove Face of Complete Joint Penetration Welded Joints, *Welding in the World*, Volume 60, Issue 4, pp 757-766, 査読あり, 2016
DOI: 10.1007/s40194-016-0328-6

[学会発表] (計7件)

- ① 立野文, 岩下勉, 東康二: 繰返し荷重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, 2016.8.24, 福岡大学 (福岡県)
- ② 岩下勉, 立野文, 東康二: 繰返し荷重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, 2016.8.24, 福岡大学 (福岡県)
- ③ 赤星拓哉, 東康二, 岩下勉: 完全溶込溶接始末端部の欠陥から発生する脆性破壊の予測手法の検討, 日本建築学会大会, 2015.9.4, 東海大学 (神奈川県)
- ④ Akahoshi, T., Azuma, K., Iwashita, T.: Prediction of brittle fracture initiating at defects in the end of complete penetration groove welds, the 25th International Ocean and Polar Engineering Conference, 2015.6.25, ハワイ (米国)
- ⑤ Iwashita, T., Azuma, K.: Effects of Cyclic Loading on Occurrence of Brittle Fracture in Notched Specimens, The 15th International Symposium on Tubular Structures, 2015.5.27, リオデジャネイロ (ブラジル)
- ⑥ Iwashita, T., Azuma, K.: Application of the Weibull Stress Approach to the Prediction of Brittle Fracture Originating from Defects at the Ends of Groove-Welded Joints, The 15th International Symposium on Tubular Structures, 2015.5.28, リオデジャネイロ

(ブラジル)

- ⑦ 赤星拓哉, 東康二, 岩下勉: 溶接始末端部の欠陥から進展した延性き裂を起点とする脆性破壊の予測, 日本建築学会九州支部研究発表会, 2015.3.1, 熊本県立大学 (熊本県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩下 勉 (IWASHITA, Tsutomu)

有明工業高等専門学校・建築学科・准教授
研究者番号: 10332090