

令和 5 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601
研究種目：基盤研究(A)（一般）
研究期間：2019～2022
課題番号：19H00802
研究課題名（和文）地震・波浪影響を高精度予知可能な繰返し予歪損傷考慮型CTOD破壊評価標準法の創成

研究課題名（英文）Creation of a Standard Method for CTOD Fracture Assessment with Repeated Prestrain Damage Consideration for Highly Accurate Prediction of Seismic and Wave Effects

研究代表者
川畑 友弥（Kawabata, Tomoya）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授

研究者番号：50746815
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 44,850,000円

研究成果の概要（和文）：溶接継手CTOD評価の際に必要な逆曲げ/局部圧縮処理を行った際の材料損傷、靱性低下について実験・数値解析双方から検討した。ベイズ最適化を用いた溶接～破壊シミュレーションにて最適条件を見出し検証試験も実施した。ISO会議でISO15653改訂の合意を得た。また、正負交番予歪による材料損傷を高精度把握すべくFE-SEM内その場観察を行った。正負交番予歪付与後脆性破壊発生特性は繰返し予歪による低下が見られるが、特に靱性値が背応力の変化率を考慮したワイブル応力クライテリオンと良好な相関があることを知見した。最終的にマクロ変形履歴情報のみから計算可能な損傷蓄積予測式を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では鋼構造物が予歪を受けた際の耐破壊特性変化がその予歪履歴の影響を受けることから、より精緻にメカニズムを研究し、高精度予測を行うことを目指したものである。一つの応用は残留応力を持つ溶接継手の破壊靱性評価の際に必要な前処理方法について妥当かつ統一的な方法を提供したことであり、得られた成果はISO規格として成立し世界の技術者が使うことになる。もう一つは繰返し負荷が破壊以前に作用した場合の損傷量の定量化である。精緻なメカニズム研究を基礎に簡易式を構築したので、地震や波浪を経た後の海上・陸上構造物の継続使用可否判断などに有効となる。

研究成果の概要（英文）：Material damage and toughness degradation due to reverse bending/local compression treatment, which is necessary for CTOD evaluation of welded joints, were investigated both experimentally and numerically. The optimal conditions were found by weld-to-fracture simulation using Bayesian optimization, and validation tests were conducted. In-situ FE-SEM observation was also conducted to accurately determine material damage caused by positive and negative cyclic prestrain. It was found that the brittle fracture initiation characteristics after positive and negative cyclic prestrain were decreased by cyclic prestrain, and in particular, the toughness values were well correlated with the Weibull stress criterion, which takes into account the rate of change of back stress. Finally, a damage accumulation prediction equation that can be computed only from macro deformation history information was developed.

研究分野：破壊力学、鉄鋼材料、溶接力学

キーワード：脆性亀裂発生 CTOD 繰返し負荷 材料損傷 結晶塑性

1. 研究開始当初の背景

我が国社会活動の基盤となっている社会インフラなどに用いられる大規模鋼構造物において脆性破壊は甚大な被害をもたらす元凶になるため、防止に対して特にシビアな管理がなされている。多くの場合 CTOD クライテリオンを用いた破壊力学アセスメントが行われるが、近年の地球環境条件の激化もあり、より高精度な評価が求められる気運にある。

2. 研究の目的

(1)しかし、材料抵抗値を評価する方法は規格として設定されているものの不完全な部分が多く評価者のノウハウに依存する 경우가多く大きな問題である。本研究の第一の目的は、特に破壊発生が想定される溶接継手部における限界 CTOD 値を正確に把握するための標準評価条件を明らかにし、真に評価者に依らない客観的な評価手法を提供することである。

(2)また、波浪や地震などの外力を考慮した場合には、繰り返し予ひずみによる限界特性の棄損と残存靱性を正しく評価することが重要であるが、この点については実際の破壊アセスメント時にほとんど考慮されていないと言っても良い。本研究の第二の目的は正負交番予ひずみによる材料損傷を精度良く予測し、CTOD パラメータによる破壊アセスメントに組み合わせる方法を構築することである。

3. 研究の方法

(1)継手 CTOD 値を正確に求めるための前処理の標準化

強い残留応力が分布する FCAW 継手を用いてまず多くの実験を実施することにより、逆曲げおよびプラテンの残留応力分布改善と破壊靱性評価不変性のバランスの取れる条件を模索した。さらに数値解析結果も援用してその結果を裏付けるため理論的考察を行った。得られた結果をまとめて最も強力な世界標準である ISO の会議にて評価を受ける。

(2)繰返し予歪が鋼材破壊靱性に与える評価の定量化

実際に様々なパターンの予歪を付与した後の靱性評価を行うとともに、理論的に補強するためにこれまで適用されることの多かった複合効果則の適用だけでなく、結晶塑性法、SGP 有限要素法にて転位のパイルアップなどを可視化した。また、それらを実験的にサポートするため、SEM 内引張試験にて実証を行った。また、SEM 内で小型引張試験を実施し、EBSD で観察可能な損傷をモニタするとともに、応力多軸度の影響を評価するため、小型試験機を単調載荷形式のみならず十字引張形式も可能にした。

4. 研究成果

(1)継手 CTOD 値を正確に求めるための前処理の標準化

これまでに概念的な解析が阪野によってなされているが、現実的な鋼材の変形特性に即した検討はなされたことはなかった。B=50 mm, B×2B, M=44 mm, θ=60°, ρ=0.5 mm の 490 MPa 級母材試験片を対象として、逆曲げをシミュレートした数値解析を実施した。荷重比 Lr 1.4 では逆曲げ除荷時に試験片全体に S 字状の大きな残留応力を分布させること、リガメント部の大半に著しい塑性歪が付与されることが判る。この Lr 過大の際に見られる S 次状の残留応力は荷重 - クリップゲージ変位曲線曲線において荷重低下の原因にもなる。実際に母材を用いて逆曲げが限界値判定に及ぼす影響を調査した結果を図 2 に示す。Lr=1.35 (図中白四角) 条件のものは、限界値が明確に低下しており、これらの考察を裏付けるものである。過大な Lr は過剰に保守的な限界値評価につながる。評価としては安全側であるとも言えるが正確な評価を期するためには避けるべきである。修正ワイブル応力概念をクライテリオンとした逆曲げ後の破壊靱性予測では図 3 に示すように荷重比 Lr が 1.2 を超えたあたりから急激に破壊靱性値が低下する (コンターの青色) ことが示されている。疲労き裂長さには下限値も存在することから Lr は 0.8

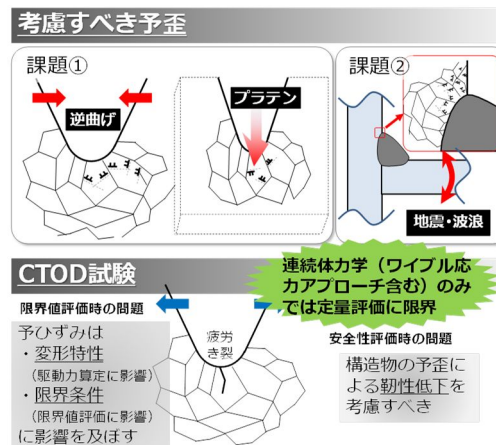


図 1 溶接継手破壊安全性評価における予ひずみ影響の模式図

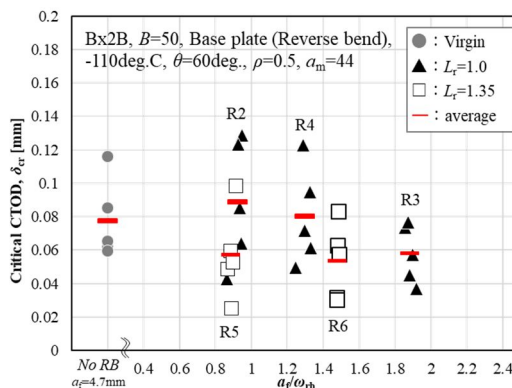


図 2 母材を用いた逆曲げ試験結果

修正ワイブル応力概念をクライテリオンとした逆曲げ後の破壊靱性予測では図 3 に示すように荷重比 Lr が 1.2 を超えたあたりから急激に破壊靱性値が低下する (コンターの青色) ことが示されている。疲労き裂長さには下限値も存在することから Lr は 0.8

以上、疲労き裂長さ比 k の値はおよそ 1 以上の数値とする必要があることが判った。この領域では破壊靱性値が 20%程度低下することが判った。

局部圧縮法についても、実験と解析双方から、残留応力改善効果と破壊靱性評価値不変性を両立可能な条件を探索した。最終的にベイズ最適化(図4)の手法を用いて解析を連続的に処理し、良条件を抽出した。最終的に数値解析で得られた条件を確認する実験を実施し、ISO15653 に提案し、今後反映される見込みである。

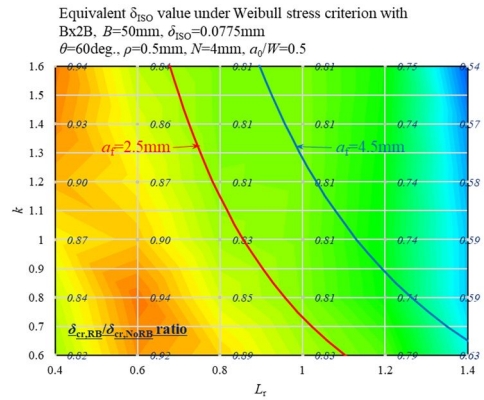


図3 逆曲げ後の限界 CTOD 予測

(2) 繰り返し予歪が鋼材破壊靱性に与える評価の定量化

結晶粒内の転位密度偏在を表現するためには連続体ベースの有限要素法では限界があり、本研究では結晶塑性法および歪勾配塑性法 (SGP; Strain Gradient Plasticity) を取り込んで解析に活用した。実験と組み合わせた研究により、1) 予ひずみ方向が靱性に与える影響、2) 予ひずみ脆化の小さな鋼材マイクロ組織の在り方提案を行うことに成功した。実験/数値解析的検討はトップジャーナルへの公表も進み、大きなインパクトを与えられた。また、結晶塑性法についても既存のオープンモジュールを用いた数値解析を試行できた。2019年度に製作した、これらの損傷を観察するための世界初のFE-SEM内二軸引張試験機はコロナの影響によりなかなか実験が出来ずにいたが、応力場の多軸性が活動滑り面の選択則に影響を及ぼすことにより損傷進行に影響を及ぼすことが明らかになった(図6)。

最終的には、工業的に使いやすいマクロ応答曲線から材料の損傷を予測する簡易式を提案した。特筆すべき知見としてはき裂先端の局部応力が圧縮から引張に転じ背応力が劇的に増加する局面で破壊発生が起こりやすいことを知見したことで、それを式に反映したことが言える。

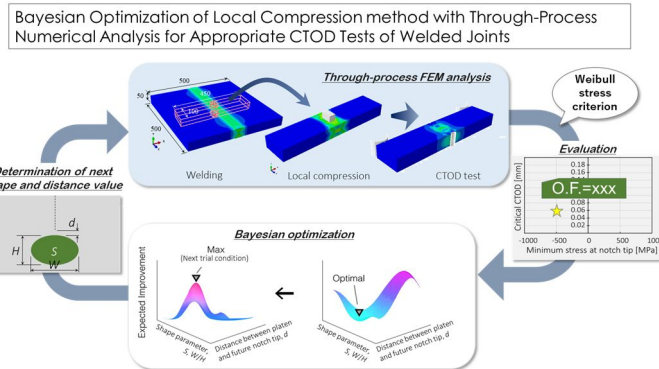


図4 ベイズ最適化法による良好プラテン条件探索

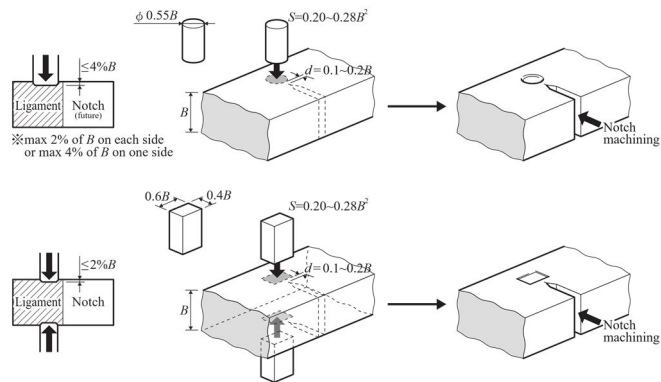


図5 開発成果を反映させた ISO 規格提案範囲

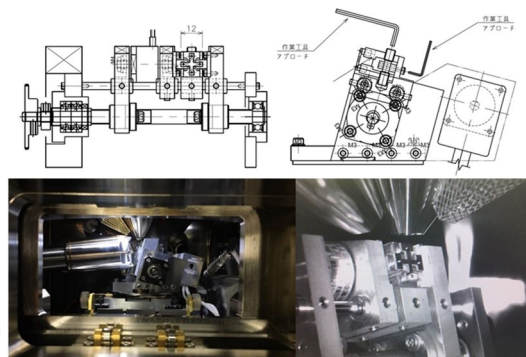
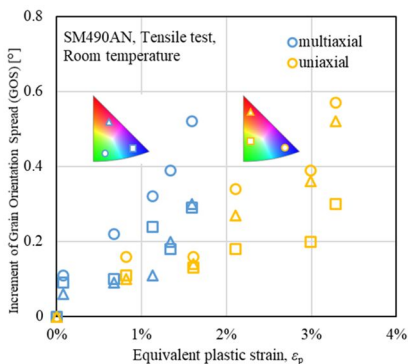


図6 SEM内ミニチュア二軸試験による材料損傷に及ぼす応力場の影響直接評価

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Hiroaki Kosuge, Tomoya Kawabata, Taira Okita, Hidenori Nako | 4. 巻 10(10) |
| 2. 論文標題 Accurate estimation of brittle fracture toughness deterioration in steel structures subjected to large complicated prestrains | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Crystals | 6. 最初と最後の頁 867 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/cryst10100867 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Takumi Ozawa, Hiroaki Kosuge, Yoshiki Mikami, Tomoya Kawabata | 4. 巻 Weld World (2021) |
| 2. 論文標題 Typical LC Effect on Crack Front Straightness and Fracture Toughness | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Weld in the World | 6. 最初と最後の頁 TBD |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s40194-021-01119-x | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Tomoya Kawabata, Hiroaki Kosuge, Takumi Ozawa and Yoshiki Mikami | 4. 巻 accepted |
| 2. 論文標題 Simplified prediction method of Stress Intensity Factor in mid-thick plane in 3D cracked body and its difference from 2D handbook formula | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Testing and Evaluation | 6. 最初と最後の頁 TBD |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Tomoya Kawabata, Yoichi Kayamori and Tetsuya Tagawa | 4. 巻 5 |
| 2. 論文標題 A Proposal of the Crack Tip Opening Displacement Calculation Formula and Its Conversion Factor to J-Integral in C(T) Specimens | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Materials Performance and Characterization | 6. 最初と最後の頁 608-626 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1520/MPC20190196. | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|----------------------|
| 1. 著者名 Hiroaki Kosuge, Tomoya Kawabata, Taira Okita, Hideaki Murayama, Shunsuke Takagi | 4. 巻 Volume 185 |
| 2. 論文標題 Establishment of damage estimation rules for brittle fracture after cyclic plastic prestrain in steel | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Materials & Design | 6. 最初と最後の頁 108222 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.matdes.2019.108222 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 Hiroaki Kosuge, Tomoya Kawabata, Taira Okita, Hideaki Murayama, Shunsuke Takagi | 4. 巻 300(3-4) |
| 2. 論文標題 Establishment of damage estimation rule for brittle fracture after cyclic plastic prestrain in steel | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 MATEC Web of Conferences | 6. 最初と最後の頁 17005 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/mateconf/201930017005 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takumi Ozawa, Hiroaki Kosuge, Yoshiki Mikami, Tomoya Kawabata |
| 2. 発表標題 Typical LC Effect on Crack Front Straightness and Fracture Toughness |
| 3. 学会等名 IIW2020 (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小菅寛輝, 川畑友弥, 高木俊輔 |
| 2. 発表標題 多軸応力場において繰り返し予ひずみを受けた鋼材の材料損傷則 |
| 3. 学会等名 日本船舶海洋工学会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Hiroaki Kosuge, Tomoya Kawabata, Taira Okita, Hideaki Murayama, Shunsuke Takagi |
| 2. 発表標題 Establishment of damage estimation rule for brittle fracture after cyclic plastic prestrain in steel |
| 3. 学会等名 ICMFF12, 12TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MULTIAXIAL FATIGUE AND FRACTURE, June, 2019, Bordeaux (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小菅寛輝, 川畑友弥, 高木俊輔, 沖田泰良, 村山英晶 |
| 2. 発表標題 鉄鋼材料における繰り返し予ひずみが脆化に及ぼす影響 |
| 3. 学会等名 2019年 日本船舶海洋工学会 春季講演会, 2019.6 |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|---|
| <p>解説記事</p> <p>川畑友弥, 溶接部破壊靱性試験規格の改善提案の舞台裏, 溶接学会誌, Vol.89(2020)No.7, p.15-20.</p> <p>川畑友弥, 溶接部破壊靱性評価法の革新 予亀裂形状問題克服技術の歴史と到達点, 日本船舶海洋工学会誌 KANRIN, Vol. 103(2022), p. 16-25</p> |
|---|

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|---|--|----|
| 研究分担者 | 三上 欣希 (Mikami Yoshiki) (40397758) | 大阪大学・接合科学研究所・教授 (14401) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|