

令和 3 年 5 月 21 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04333

研究課題名（和文）低サイクル疲労に起因する溶接鋼部材の延性破壊メカニズムの解明に関する基礎的研究

研究課題名（英文）Fundamental Study on Clarification of Mechanism of Ductile Fracture due to Low-cycle Fatigue in Welded Steel Members

研究代表者

葛 漢彬（Ge, Hanbin）

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：90262873

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）：本研究は、土木鋼構造物を対象に、極大地震作用下に懸念される延性き裂に着目し、その発生と進展の評価法を検討したものである。まず、実験的および解析的検討により、延性破壊モデルを構築し、各種応力状態における構造用鋼材のき裂の発生・進展・破壊までの一連の現象を明らかにしている。また、補剛箱形断面鋼製橋脚を対象に、beam要素からなるファイバーモデルとshell要素からなる解析モデルの繰り返し載荷解析を実施し、補剛箱形断面鋼製橋脚に対するひずみ集中補正係数を新たに提案し、ファイバーモデルと累積疲労損傷度を用いた、延性き裂発生に対する耐震性能照査法の適用範囲の拡張を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

低サイクル疲労による延性破壊現象は、兵庫県南部地震などの巨大地震で被災した鋼構造物の被害形態として少なからず報告されている。本研究では、各種構造用鋼材を対象とした溶接鋼部材の延性き裂発生から破断までの挙動を精度よく評価できる延性破壊モデルの構築に成功している。また、本研究によって得られた成果は、現行の耐震設計法の高度化に貢献できるとともに、社会インフラ施設の耐震安全性を一層向上させることが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we focused on ductile cracks occurred in civil engineering steel structures under a major earthquake in, and examined the evaluation method of their occurrence and progress. First, by experimental and analytical studies, a ductile fracture model is constructed, and a series of phenomena from crack initiation, growth, and fracture of structural steels under various stress states are clarified. In addition, cyclic loading analyses of both a fiber model consisting of beam elements and a shell model consisting of shell elements were carried out for box-shaped steel piers, and the strain concentration modification coefficient for stiffened box-shaped steel piers was newly proposed. The application range of the seismic performance verification method for the occurrence of ductile cracks was expanded using the fiber model and the cumulative fatigue damage degree.

研究分野：土木工学

キーワード：延性破壊 低サイクル疲労 応力三軸度 簡易照査法 鋼製橋脚

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

土木鋼構造物の延性破壊照査法の開発に関するこれまでの研究においては、鋼製橋脚などを対象とした多くの繰り返し載荷実験が行われ、低サイクル疲労に起因する延性き裂の発生・進展・破壊という一連の現象を再現し、メカニズムの解明に不可欠な実験データを蓄積してきた。また、解析的な検討も実施され、延性き裂の発生に対する耐震照査法を提案している。しかしながら、1) 提案した延性破壊照査法は、延性破壊の第1段階であるき裂の発生のみに着目し、局部座屈評価の場合と同様な解析手法に基づいているため、き裂発生後の進展現象をシミュレーションできない。2) き裂の発生の予測に関しても、一般的な溶接構造物ではシェル要素による解析と損傷度評価指標で推定が可能であるが、未溶着を有する溶接構造物にはこの手法の適用は難しい。このことから、申請時に改訂中の土木学会鋼・合成構造標準示方書耐震設計編には低サイクル疲労の照査を初めて取り入れることになっているが、非常に限定的な内容になる予定である。

このような背景から、巨大地震時の低サイクル疲労による溶接鋼構造物のき裂の発生・進展・破壊の挙動を精度よく評価できる解析手法の確立が急務であると考え、まず溶接鋼部材の破壊に至るまでのシミュレーションができる延性破壊モデルの構築に着想した。

2. 研究の目的

本研究は、低サイクル疲労に起因する橋梁鋼構造物の延性破壊メカニズムの解明とき裂発生から破断までの挙動を評価する手法の開発を目指したものである。低サイクル疲労による延性破壊現象は、兵庫県南部地震などで被災した鋼構造物の被害形態として少なからず報告されている。本研究では、研究代表者がこれまでに行ってきた関連研究の成果を踏まえ、まず、異なる応力三軸度に対応する各種応力状態（引張、引張・圧縮および引張・せん断などの複合応力状態）を模擬する溶接鋼部材（母材、溶接接手）の低サイクル疲労実験を実施する。次に、実験結果を精度よく予測する延性破壊モデルを構築し、き裂の発生・進展・破壊までの一連の現象を明らかにする。さらに、開発した延性破壊モデルの妥当性を過去に行った鋼製橋脚の低サイクル疲労実験のデータにより検証する。本研究によって得られた成果は、現行の耐震設計法の高度化に貢献できるとともに、社会インフラ施設の耐震安全性を一層向上させることが期待される。

3. 研究の方法

これまでの研究において着目した局所塑性ひずみの影響に加え、応力三軸度の影響も考慮し、それと溶接鋼部材の各部位（母材、溶接部および熱影響部）の延性破壊性状との定量的な関係を実験的および解析的検討により明らかにし、応力三軸度の影響を考慮した延性破壊モデルの構築、ならびにその妥当性の検証を行う。

4. 研究成果

(1) 延性破壊モデルの構築に関する検討

まず、応力三軸度が延性破壊特性に与える影響に関する実験的および解析的検討を行った。そのために異なるノッチの半径を有するUノッチ試験片と異なる角度を有するVノッチ試験片の延性破壊実験を実施した。また、メッシュサイズの影響、要素破壊時の塑性変位と不均一比の関係の定式化およびそれを適用した解析手法の妥当性に関する種々の解析を行った。その結果、UノッチとVノッチの実験結果を比較すると、ほぼ同程度の断面積を有する場合でも、Vノッチの方がき裂発生時の変位が小さくなっている。これはVノッチの方がノッチ先端に応力が集中しやすく、高応力三軸状態になりやすいため、Uノッチと比べてき裂発生が早いと考えられる。試行錯誤的に解析を行うことで要素破壊時の塑性変位と、応力三軸度の影響を取り入れた不均一比の相関関係を明らかにした。また、延性破壊モデルを用いた本解析手法は、メッシュの依存性を解決するために有効であると証明できた。実験と解析のき裂の発生・進展、最大荷重および最終破断点が概ね一致していることから、延性破壊モデルを適用することで、単調載荷を受ける鋭いノッチを有する構造用鋼材の延性破壊挙動を精度よく予測することが可能である。

次に、低応力三軸度下における鋼材の延性破壊メカニズムを明らかにするために、せん断応力と引張応力の組み合わせによる複合応力状態下での破壊が生じる試験片を考案し、実験的および解析的検討を行うことで、新たな延性破壊条件（N-VGモデル）を構築し、その妥当性を示した。その結果、既往の延性破壊条件（VGモデル）を用いた場合、低応力三軸度範囲の破壊挙動および荷重-変位関係を精度良く評価できないことを確認した。新しい延性破壊条件（N-VGモデル）を用いた解析では、比較的良好な精度の解析結果が得られた。

さらに、低応力三軸度領域における鋼材の延性き裂の発生・進展を模擬するため、異なる応力三軸度や偏差応力の第三不変量の関数であるLode角パラメータの影響を取り入れた延性破壊条件を提案している。そこで、複合応力状態下での破壊が生じる試験片を対象に、提案した

延性破壊条件を適用した数値解析を行った。解析結果を実験結果との比較により、本手法を用いた場合、低応力三軸度領域における鋼材の延性破壊挙動を精度良く予測することができることが分かった。

(2) 延性破壊モデルを適用した解析手法の提案に関する検討

まず、繰返し曲げを受ける溶接継手を対象に、延性き裂の発生および進展を予測可能とする解析手法について検討を行った。まず、損傷進展エネルギーのメッシュ分割依存性について検討し、要素破壊時の相当塑性ひずみを一定と仮定したとき、要素サイズによらず同様の解析結果を得られることを示した。次に、要素破壊時の相当塑性ひずみの算出法を検討し、材料引張試験と非破壊解析による、より簡便な手法を考案した。これらの結果に基づき、メッシュ分割に応じた損傷進展エネルギーの簡易算出法を提案した。新たに求めた損傷進展エネルギーにて破壊解析を実施し、実験結果との比較から、その適用可能性を示した。

次に、繰返し軸力と曲げを受ける鋼材の延性破壊挙動に関する実験データの蓄積と提案した延性破壊モデルの適用性の範囲拡大を目的とし、新たに繰返し軸力と曲げを同時に受ける鋼材試験体を考案し製作した。そして、実験的および解析的検討を行い、実験結果と解析結果を比較することで、延性破壊モデルの適用性を検証した。その結果、新たな荷重条件下である繰返し軸力と曲げを同時に受ける鋼材の延性き裂発生から破断までの挙動に関する実験データを蓄積することができた。また、本解析手法の妥当性、また延性破壊モデルの新たな荷重条件下における適用性を確認することができた。

(3) 延性き裂の発生に対する簡易照査法の適用性に関する検討

実際の構造物、特に橋脚においては補剛断面がほとんど考えられ、実用的な照査法を確立するには、補剛断面に対する検討をより詳しく行う必要がある。そこで本研究では、鋼製補剛箱形断面橋脚を対象に、ひずみ集中補正係数について再検討し、beam 解析を用いた照査法の適用範囲の明確化と拡大をはかる。まず、補剛箱形断面に対して beam 解析および shell 解析を実施し、幅厚比パラメータ、細長比パラメータ、板厚がひずみ集中補正係数に及ぼす影響を検討した。さらに、補剛箱形断面に適用可能なひずみ集中補正係数の一般式の提案を行った。

また、鋼製補剛箱形断面橋脚を対象に、Pushover 解析を用いた延性き裂発生簡易評価法の適用性を検討した。まず、簡易評価法の精度向上のために提示していた改善策を踏まえ、限界ひずみ補正係数の一般式を提案した。そして、限界ひずみ補正係数を導入した構造レベルの延性き裂発生限界ひずみを破壊基準とした本簡易評価法の結果を shell 解析結果や実験結果と比較した。

さらに、鋼製補剛箱形断面橋脚を対象に、Pushover 解析によって延性き裂発生を評価する手法について検討を行った。まず、補剛箱形断面に対するひずみ集中補正係数の一般式について再検討を行い、比較的薄い板厚の場合の精度向上を図った。次に、beam 要素からなるファイバーモデルに対して、Pushover 解析を実施した。また、既往の研究により提案されている、材料レベルでの延性き裂発生限界ひずみを、ひずみ集中補正係数で除することで、構造レベルでの延性き裂発生限界ひずみとする手法を考案した。さらに、Pushover 解析結果に対し、破壊基準として構造レベルでの延性き裂発生限界ひずみを適用して、延性き裂発生の限界変位を求める手法を提案し、その適用可能性を検討した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 劉 巖, 葛 漢彬, 康 瀾	4. 巻 75-4
2. 論文標題 低応力三軸度下における鋼材の延性破壊条件の予測精度の向上に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集A1 (構造・地震工学)	6. 最初と最後の頁 333-344
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejseee.75.1_333	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 該当する
1. 著者名 吉田聡一郎, 葛 漢彬, 賈 良玖	4. 巻 75-4
2. 論文標題 繰り返し軸力と曲げを受ける鋼部材の超低サイクル疲労挙動に関する基礎的研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集A1 (構造・地震工学)	6. 最初と最後の頁 345-356
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejseee.75.1_345	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 該当する
1. 著者名 藤江 渉, 田口実季, 鈴木元哉, 葛 漢彬	4. 巻 75-4
2. 論文標題 鋼製補剛箱形断面橋脚の延性き裂照査法におけるひずみ集中補正係数に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集A1 (構造・地震工学)	6. 最初と最後の頁 109-122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejseee.75.1_109	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 Liu, Y., Kang, L., and Ge, H.B.	4. 巻 158
2. 論文標題 Experimental and Numerical Study on Ductile Fracture of Structural Steels under Different Stress States	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Constructional Steel Research	6. 最初と最後の頁 381-404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcsr.2019.04.001	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 該当する

1. 著者名 Jia, L.J., Fujie, W., Ikai, T., Yoshida, S., and Ge, H.B.	4. 巻 215
2. 論文標題 Dependency of Mesh Size and Loading History on Crack Propagation Energy of Cyclic Ductile Fracture Model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Engineering Fracture Mechanics	6. 最初と最後の頁 117-137
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.engfracmech.2019.04.038	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 該当する

1. 著者名 吉田聡一郎, 藤江 渉, 賈 良玖, 葛 漢彬	4. 巻 27-105
2. 論文標題 繰り返し曲げを受ける鋼部材の延性破壊メカニズムに関する実験的研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 鋼構造論文集	6. 最初と最後の頁 1-11
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 劉 巖, 葛 漢彬, 康 瀾	4. 巻 74
2. 論文標題 高応力三軸度下における鋼材の延性破壊モデルの予測精度の向上に関する研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集A1 (構造・地震工学)	6. 最初と最後の頁 I_546-I_557
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejsee.74.1_546	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 該当する

1. 著者名 藤江 渉, 吉田聡一郎, 猪飼豊樹, 葛 漢彬	4. 巻 74
2. 論文標題 繰り返し荷重を受ける溶接継手の延性破壊解析における損傷進展エネルギーの簡易算出法	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_591-I_602
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.74.1_591	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13件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 田口実季, 藤江 渉, 葛 漢彬
2. 発表標題 鋼製補剛箱形断面橋脚の延性き裂発生における簡易耐震照査法の精度向上に関する研究
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田聡一郎, 葛 漢彬, 藤江 渉
2. 発表標題 延性破壊解析における損傷進展エネルギーの簡易算出法の一般性に関する一検討
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 劉 徹, 葛 漢彬, 吉田聡一郎
2. 発表標題 Lode 角の影響を考慮した構造用鋼の延性破壊の評価に関する解析的再検討
3. 学会等名 土木学会第39回地震工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田口実季, 藤江 渉, 伊藤諒祐, 葛 漢彬
2. 発表標題 鋼製補剛箱形断面橋脚の延性き裂照査法におけるひずみ集中補正係数の精度向上に関する再検討
3. 学会等名 土木学会第39回地震工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ge, H.B., Fujie, W., and Taguchi, M.
2. 発表標題 JSCE Specification on Evaluation of Ductile Crack Initiation due to ELCF in Steel Bridge Structures
3. 学会等名 International Conference in Commemoration of 20th Anniversary of the 1999 Chi-Chi Earthquake (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ge, H.B.
2. 発表標題 Basic Concept and New Research Progresses of Stain-based Seismic Performance Evaluation Method
3. 学会等名 International Top-Level Forum on Engineering Science and Technology Development Strateg: Future Cities and Infrastructure (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田聡一郎, 葛 漢彬, 賈 良玖
2. 発表標題 繰り返し軸力と曲げを受ける鋼部材に対する延性破壊モデルの妥当性に関する検討
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 猪飼豊樹, 葛 漢彬
2. 発表標題 延性の異なる材料にき裂進展則を適用した際の注意点について
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉田聡一郎, 葛 漢彬, 賈 良玖
2. 発表標題 繰り返し軸力と曲げを受ける鋼部材の超低サイクル疲労挙動に関する基礎的研究
3. 学会等名 土木学会第38回地震工学研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 劉 釅, 葛 漢彬, 康 瀾
2. 発表標題 低応力三軸度下における鋼材の延性破壊条件の予測精度の向上に関する研究
3. 学会等名 土木学会第38回地震工学研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤江 渉, 田口実季, 鈴木元哉, 葛 漢彬
2. 発表標題 鋼製補剛箱形断面橋脚の延性き裂照査法におけるひずみ集中補正係数に関する一検討
3. 学会等名 土木学会第38回地震工学研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田口実季, 藤江 渉, 鈴木元哉, 葛 漢彬
2. 発表標題 鋼製補剛箱形断面橋脚における延性き裂照査法の実験データによる一検討
3. 学会等名 土木学会中部支部平成30年度研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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			
中国	華南理工大学	同済大学	華僑大学	