

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：12701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14714

研究課題名(和文) 微視的形成過程を考慮した地震時の鋼部材における表面亀裂発生予測式の提案

研究課題名(英文) Formulation of surface crack occurrence criteria on steel members during earthquakes considering microscopic mechanism

研究代表者

田村 洋 (Tamura, Hiroshi)

横浜国立大学・大学院都市イノベーション研究院・准教授

研究者番号：10636434

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)：本研究の目的は、土木構造物の地震時脆性破壊に対する安全性照査に必要な、繰返し塑性ひずみ履歴を受ける鋼材の表面亀裂発生限界予測式を提案することであった。研究は大きく分けて、1)表面亀裂の発生メカニズムに関する仮説の検証、2)数値シミュレーション手法の開発、3)表面亀裂発生限界予測式を提案の3段階となる。研究費の支援を受けた3年間で1)については、計測上の想定外の難しさによって時間を要したが概ね達成できたと考えている。2)は、一部の事例についてであるが分岐問題とみなして空間周期性の発現を定性的に再現することができた。3)については検討が不十分であり、シミュレーションの汎用性向上に必要な段階にある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

表面亀裂形成過程について申請段階では、繰返し変形の中の圧縮過程において微視的に空間的周期性を有するしわ状の凹凸が表面に形成され表面亀裂の発生過程に深く関わっているという見解をもっていたが、これは仮説の域を出ていなかった。また、凹凸の形成は材料の微視的構造よりもむしろ分岐現象として材料を連続体とみなして説明可能であるとの見通しについても裏付けが不十分であった。本研究によって、これらの見解、見通しについての実証を大きく前進させることができた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was formulation of surface crack initiation criteria for steels subjected to cyclic plastic strain history, which is necessary for the evaluation of resistance to brittle fracture of steel structures during earthquakes. The research could be divided into three phases: 1) validation of the hypothesis regarding the mechanism of surface crack initiation, 2) development of numerical simulation method, and 3) formulation of surface crack initiation criteria. Regarding 1), it was mostly achieved. In 2), the expression of spatial periodicity could be qualitatively reproduced by developed simulation. Regarding 3), the examination is insufficient, and it is at the stage where it is necessary to improve the versatility of the simulation.

研究分野：土木工学

キーワード：鋼部材 表面亀裂 繰返し弾塑性変形 分岐問題

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

Northridge 地震や兵庫県南部地震では、多くの鋼構造物に設計想定外の脆性破壊（以下、地震時脆性破壊）が発生し、重大な損傷をもたらした[1]。

地震時脆性界の発生メカニズムとしては、地震時の繰返し変形の過程で鋼部材に表面亀裂（延性亀裂）が形成された場合、これを起点として発生することが先行研究で明らかにされていた[2-4]。しかしながら、その表面亀裂の発生限界については一部の条件については破壊実験の結果からその予測式が提案されていたが、実構造物において想定される広範な条件に適用させることは困難であり、実構造物における地震時脆性破壊の発生に関する安全性照査手法の確立には至っていなかった。そこで、実構造物における条件の広範さに対応するためには、表面亀裂の発生メカニズムをさらに深く理解し、破壊実験を補う形で使用可能な数値シミュレーションによる検討手法の構築を行う必要があると考えた。また、表面亀裂発生メカニズムの解明の足掛かりとして、形成された亀裂がほぼ 1mm 程度のオーダーの間隔で平行に群を成していることに注目し、発生に大きく関与している因子が材料の微視的構造ではなく、連続体力学の範疇で説明可能な力学的状態にあると考えた。そして、表面亀裂発生までの過程として、圧縮荷重下で表面の不安定化が起こり分岐モードとして波状の空間的周期性が微視的に発現し、鋼材の繰返し変形の過程でこの波状の凹凸の中の谷部の曲率半径が縮小し高いひずみ集中を伴うそれぞれの谷部に沿って表面亀裂が選択的に発生するという、分岐理論[5]に立脚した仮説を立てた。

2. 研究の目的

本研究では、土木構造物の地震時脆性破壊に対する安全性照査法確立のために必要な、繰返し塑性ひずみ履歴を受ける鋼材の表面亀裂発生限界予測式を提案することを目的とした。照査法の実用性を確保するためには、予測式に高い予測精度と一般性が求められる。そこで、従来積極的に評価されてこなかった亀裂の微視的形成過程に着目し、分岐理論に基づく独自の視点も交えこれを解明するとともに、実構造物で問題となるひずみ履歴・拘束状態・初期表面粗度・鋼種等が亀裂の微視的形成過程に影響を及ぼすメカニズムを明らかにすることを試みた。また、実構造物における多様な条件を検討するための数値シミュレーション手法の開発も行い、実験と解析の双方から高精度で一般性の高い表面亀裂発生限界予測式を提案することを考えた。

3. 研究の方法

研究は大きく分けて、1)表面亀裂の発生メカニズムに関する仮説の検証、2)数値シミュレーション手法の開発、3)表面亀裂発生限界予測式を提案の3段階となる。

1)については、報告者らが本研究のために考案した、座屈を発生させることで大振幅の塑性ひずみを着目部に非接触で繰返し導入することが可能な小型供試体とレーザースキャンによって実験中に簡易的に 10 μ m オーダーの平面形状を計測できる計測システムによって、実験データを蓄積することから着手した。データの分析にあたっては、空間的周期性の発現の検知を目指すことから実験で取得した表面高さデータのスペクトル解析を行うこととした。そして、空間的周波数特性の発現度合いを定量化し、鋼材の繰返し変形の過程で発生する表面亀裂との関係性の有無を調べることで上述の仮説の真偽を検証し、真であった場合には表面状態や鋼種、载荷パターン等と違いの影響について室内実験を通して明らかにすることとした。

2)については非線形有限要素解析と分岐理論的アプローチにより表面不安定化限界に関

する数理的(数値解析的)予測手法の構築を行うこととした。すなわち、実験時の荷重下における供試体の変形を非線形有限要素解析により再現し、そのなかで大きな圧縮塑性ひずみを伴う着目部(実験で表面計測を実施した部位)の状態を再現した。そして着目部の力学状態を記述した弾塑性接線剛性行列の固有値を求め、固有値が負に転じる際の荷重-変位プロットを分岐点とみなし、その時点で表面の力学状態の解が分岐し、波状の空間的周期性を孕む可能性があるとし、どの時点で固有値が負に転じるのか、そして負に転じた固有値に対応する固有ベクトルがどのようなものであるのか(どの程度の周期を有するモードであるのか)に注目することとした。そして、様々な鋼種、载荷パターン、表面状態についてそれらを調べることで、次の表面亀裂発生限界予測式を提案につなげる基礎とすることとした。

3)については、低サイクル疲労亀裂の発生条件を示すためによく用いられている S-N 線図(ひずみ振幅-振幅発生回数関係図)において、本研究で明らかにした詳細な条件ごとの亀裂発生予測式を提案し、疲労寿命に大きな影響を与えながら従来 log スケールにおけるばらつきとして十分検討されることのなかった、鋼種、载荷パターン、表面状態の諸因子の影響を定量化し、これらのデータがあれば従来よりも高い精度で亀裂発生限界の予測が可能となる手法の提案を目指すこととした。

4. 研究成果

上記の 1)~3)の段階に分けて成果を記述する。ただし、これから成果を発信することを予定している部分が多いため、可能な範囲で報告をする。

1)については、空間的周期性の発現を捉えたと当初考えていたレーザースキャンデータに、問題があることが分かり進捗が大きく遅れる原因となった。これはレーザースキャンに使用していたアレキ型のレーザ変位計の使用限界を結果的に逸脱していたことで起きたもので、荷重下が変形した供試体の湾曲した表面を計測する際に数 μm のオーダーで発生する画素うねりによる周期的ノイズが計測データに混入し、計測データが示す空間的周期性が実際の表面形状の微視的变化によるものか、画素うねりによる実態と乖離したものなのかの判別を行う必要性が生じた。これについては、光学式の機器など計測メカニズムの異なる機器による計測を委託し、複数の手法で得られた結果を比較することで、载荷の過程で確かに表面に周期性が現れ、増大していることが確認できた。また、ここで検出された表面の凹凸の周期は最終的に発生する表面亀裂の周期とほぼ等しいことが分かり、分岐論的表面不安定化の発生を示唆する表面の微視的形状変化と表面亀裂の発生間の因果関係の存在を強く示す結果を得た。

2)については、供試体全体系と供試体着目部の中央断面の局所系の 2 つの系を対象に、汎用解析プログラム Abaqus を用いていわゆるズーム解析を実施した。前者はソリッド要素を用いた 3 次元モデルとし、初期たわみを導入することで供試体の座屈を再現させる疑似分岐解析の対象とし、材料非線形と幾何学的非線形性を考慮した解析により供試体の変形を再現した。後者では平面ソリッド要素を用いた 2 次元モデルとし、モデルの縁に供試体全体系の解析で得られた変位を強制変位として付与した。そして、弾塑性接線剛性行列を再構成するために必要な力学量を出力し、弾塑性接線剛性行列の固有値を調べることで理想化された供試体において分岐現象が起きる可能性の真偽、真の場合にいつ起きうるのか、それは鋼種、载荷パターン、表面の状態によって異なるのか、といった点について定量的に調査することを目指した。その結果、一つの鋼種については、鋼材が降伏した後に、分岐現象の発生を示唆する固有値がゼロとなる状態が複数あること、またその中のいくつか

は実験で確認された空間的周期性を示す表面高さの周期と近い周期を有していることが確認された。ただし、この確認は一つの鋼種についてしか実施できておらず、定量的には実験結果と不整合を示す部分も現時点で認められるため、今後さらなる手法の改良が必要と考えられる。

3)については、2)で構築を目指している数値シミュレーション手法をより汎用的に定量的予測が可能なレベルまで高める必要があるため、研究期間中に着手することができなかった。

参考文献

[1] 岡下勝彦ら：兵庫県南部地震による神戸港港湾幹線道路 P75 橋脚隅角部におけるき裂損傷の原因調査・検討，土木学会論文集，No. 591/ I-43，pp. 243-261，1998。

[2] Kuwamura, H. and Yamamoto, K.: Ductile crack as trigger of brittle fracture in steel, Journal of Structural Engineering, pp. 729-735, 1997.

[3] 田村洋ら：修正ワイプル応力に基づく鋼部材の地震時脆性破壊発生限界の評価，土木学会論文集 A1, Vol. 71, No. 2, pp. 173-185, 2015.

[4] Hanji, et al.: Low- and high-cycle fatigue behavior of load-carrying cruciform joints containing incomplete penetration and strength mismatch, Welding in the World XIII-2330-10, 2012.

[5] A. N. Gent: Elastic instabilities in rubber, International Journal of Non-Linear Mechanics, No. 40, pp. 165-175, 2005.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 木村優里, 田村洋, 佐々木栄一 |
| 2. 発表標題 繰返し塑性ひずみに伴う鋼材表面の微視的形狀変化と亀裂形成 |
| 3. 学会等名 土木学会 |
| 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 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|