

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23246097

研究課題名(和文) 鋼構造部材の座屈と破壊の連成に関する研究

研究課題名(英文) Study on the coupling of buckling and fracture of steel structural members

研究代表者

桑村 仁 (Kuwamura, Hitoshi)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20234635

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の成果を要約すると、次のようになる。大きな塑性ひずみを繰返し受ける構造用鋼材が破壊するまでの全挙動を表現する数理モデルを考案したこと。それを組み込んだ数値シミュレーションを開発したこと。それにより座屈後挙動の大変形繰返し挙動を再現できることを実験との比較により確認したこと。亀裂の発生条件の数理モデルを構築し、材料実験によりその精度を確認したこと。鋼管柱の繰返し実験で座屈と破壊の連成を再現し、本研究で開発したシミュレーターでそれを数値的に追跡できることを確認したこと。地震応答解析により鋼構造に座屈と破壊が連成すると、座屈単独の場合より倒壊までの塑性変形能力が低下することを示したこと。

研究成果の概要(英文)：The major findings are as follows: a mathematical model for the entire mechanical behaviors of structural steels subjected to large plastic strain reversals was developed; a numerical simulator in which the model was incorporated was established; the simulator was confirmed to reenact the actual post-buckling behaviors by comparing the simulation with experiment; a mathematical model for cracking behaviors was established and its accuracy was verified by material tests; the simulator incorporating the models of plastic behavior as well as cracking behavior was found well follow the actual coupling behaviors of buckling and fracture of steel tubular columns subjected to cyclic loadings; and the simulator installed in a seismic response analysis demonstrated that the ductility or the deformation capacity up to structural failure is decreased when the coupling takes place in comparison with the failure due to buckling alone.

研究分野：建築構造

キーワード：鋼構造 座屈 破壊 塑性変形能力 耐震設計

1. 研究開始当初の背景

鋼構造物の終局状態は座屈と破壊のいずれかに支配されることが古くから知られている。また、鋼構造物を終局状態に至らしめる主たる外力は巨大地震によると認識されている。そのため、終局耐震設計において、座屈あるいは破壊によって決まる鋼構造の塑性変形能力に関する研究が精力的に行われ、その知見が今日の耐震設計に生かされている。

座屈による終局挙動については1960年頃から1980年くらいに大学研究機関を中心に研究が行われ、1981年の建築基準法改正(いわゆる新耐震設計法)にその研究成果が取り込まれた。具体的には、柱、梁、筋かいについて、座屈で決まる塑性変形能力を考慮した部材ランクが導入された。その後、1995年兵庫県南部地震が引き起こした甚大な構造被害の調査から、座屈のみならず破壊による被害が多数を占める実態が明らかにされた。この中には、溶接施工の不良による被害も多く含まれていたが、設計や施工が新耐震設計法の規定を満たしているにも関わらず、脆性破壊と呼ばれる構造被害が生じた。これを契機に、破壊が多発した柱梁接合部を中心に、材料選定、溶接施工、ディテール設計のすべての面から破壊の研究が進められ、破壊に関する有用な知見が蓄積されてきた。このように、鋼構造の終局挙動を支配する座屈と破壊が時期を前後して別々に研究されてきたという経緯がある。

ところが、1995年兵庫県南部地震における鋼構造の被害を再点検してみると、座屈と破壊が連成した被害が少なからず報告されていたことに気づく。例えば、ラーメン鉄骨の梁端部の下フランジが局部座屈すると同時に延性き裂が発生する事例、下フランジが局部座屈後に完全に延性破壊し分断される事例、角形鋼管の柱が局部座屈を伴いながら上下に完全に擬似脆性破断する事例、筋かいが曲げ座屈に誘引された部材中央の屈曲が局部座屈を引き起こし、最終的に延性破壊する事例、土木橋梁における円筒形の鋼製橋脚に生じた座屈(elephant-foot buckling、象足座屈)の波形が増長し、最大曲率が生じる波高頂部が延性破壊する事例などである。このように、座屈と破壊が連成した被害形態が実際に生じていたわけであるが、この連成問題については諸外国も含め、まだ学術的なメスが入られていない。

座屈だけであれば材料の連続性が保持されるので、荷重の伝達能力が低下するとはいえ、ある程度は維持される。ところが、座屈変形過程で破壊が生じてしまうと、荷重の伝達能力が一気に失われ、構造物にとっては危険な状態に陥ると考えられる。

2. 研究の目的

本研究は、鋼構造部材に座屈と破壊が連成する場合の塑性変形能力を解明することを

目的とするものである。ここでいう座屈は固有値問題としての座屈ではなく座屈後挙動を指し、破壊は延性破壊あるいは擬似脆性破壊を指す。擬似脆性破壊は破断面のかなりの領域に延性き裂の進行を経たのち最終的に脆性破壊する形態で、多くは耐力劣化域で生じる(通常の脆性破壊は座屈と連成しない)。

座屈と破壊の連成現象は、上で紹介したように兵庫県南部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。建築鋼構造の分野では、座屈と破壊がそれぞれ個別に研究されて来ており、その連成現象についてはまだ研究が着手されていない。座屈と破壊の連成を考慮した耐震設計の手法を提案するまでを本研究の目的とする。

3. 研究の方法

本研究目的を達成する方法は、実験と数値解析の両方を組み合わせたものとなる。座屈後挙動の過程で破壊が生じる現象を実験室で再現することが第一義的に重要であることは構造研究者が誰しも認めるであろう。

次に、大切なことは、実験結果をどのように分析するかである。ここは、研究者によってアプローチの仕方が相当異なってくる部分で、研究の独創性が問われるところでもある。破壊が延性破壊あるいは擬似脆性破壊となることを想定すると、破壊起点における応力とひずみの状態が決定的支配要因となる。実験では、破壊起点をピンポイント予測できないので、その位置の応力とひずみを計測することはまず不可能である。

したがって、座屈と破壊の連成理論を構築するには、実験とともに有限要素解析を援用する必要がある。破壊起点の応力ひずみ状態を求め、それを実験データ(荷重、変形、座屈波形内のひずみの測定値)と比較しながら、連成理論の適用性や信頼性を検証することとなる。

4. 研究成果

研究成果を項目別に列挙すると次の通りである。

(1) 鋼材の塑性挙動の基本となる単調引張での応力とひずみの関係を表す数理モデルについて検討した。くびれが生じた後の真応力と真ひずみの関係については諸説があるが、改良重み付け平均法(MWA method)を適用して、対象とする鋼材に応じて重み付け係数の値を定め、大ひずみ領域での応力ひずみ関係の再現精度を確かなものとした。

(2) 前記(1)の成果を繰返し塑性ひずみ履歴の問題に拡張した。鋼材の繰返し塑性にはひずみ硬化とパウシンガー効果があり、それぞれに対応して等方硬化モデルと移動硬化モデルが発展してきたが、いまだ普遍的に適用可能なモデルには到達していない。有望とされるPragerモデル、Chabocheモデル、

Yoshida - Uemori モデルについて、実験データを用いて検証した結果、いずれも精度が不十分であったが、Yoshida - Uemori モデルにおいて等方硬化則、記憶面、降伏棚の3点について改良を施すことによって、構造用鋼材の大塑性ひずみ履歴を精度良く追跡できることを明らかにした。また、単調引張試験で得られる応力 ひずみ曲線の情報のみからモデルパラメータの値を決定できるところに提案手法の工学的意義がある。

(3) 単調引張での延性き裂の発生条件を Rice-Tracey のポイド成長モデルをベースに検討し、延性き裂発生ひずみを応力三軸度と材料定数としての限界ポイド半径で表した。ただし、塑性ひずみが増大すると、それに伴って応力三軸度も変化するため、疲労の分野で Miner 則として知られている線形累積損傷を援用した損傷指数を導入し、損傷指数が1に達したとき延性き裂が発生するという規範式を新たに導入した。数値解析では延性き裂発生条件を満たした要素を消去していくことによって、延性き裂の進展を追跡する方法を編み出した。き裂の観察を行った人工ノッチ付き鋼材の単調引張データと解析結果を比較することによって、この提案手法が延性き裂の発生および進展過程を解析的に再現できることを確認した。

(4) 前記(3)の延性き裂発生条件を繰返し塑性ひずみ履歴の問題に拡張し、前記(2)の応力 ひずみ関係のシミュレーション手法とも組み合わせた。応力三軸度が負の領域での延性き裂の発生条件については、依然として不明な点が残されているが、砂時計型試験片の延性破壊に至るまでの実験データと比較することにより、荷重 変形履歴曲線および延性破壊点の予測について概ね満足できる結果が得られた。

(5) 以上の知見を実構造部材に適用し、その精度を確認した。すなわち、鋼構造建築物の柱部材として多く用いられる角形鋼管が局部座屈したあと延性破壊に至るまでの挙動を実験的に調べ、それを本研究で開発した数値シミュレーションで追跡した。実験変数は、熱処理の有無、幅厚比、載荷パターンの3種である。熱処理の有無は鋼材質の均一性と不均一性、幅厚比の大小は局部座屈波形の発達程度、載荷パターンは地震入力に対する応答の違いを反映したものである。その結果、全てのケースについて局部座屈波形内に発生する延性き裂を伴う破壊挙動を再現でき、その精度は耐震設計への応用という観点からはじゅうぶんであることを確認した。

(6) 本研究で得られた座屈と破壊の連成挙動の理論を地震応答解析ソフトに組み込み、座屈のみが単独に発生するとした従来の手法と比較したところ、連成する場合には、

倒壊までの塑性変形能力が低下することを具体的に明らかにした。幅厚比が大きい場合、すなわち座屈劣化が顕著な場合には連成の影響が小さいが、従来から韌性に富むとされている幅厚比の小さい部材に対しては連成の影響が顕在化するので、そのような場合には、本研究で得られた連成の理論を用いて耐震安全性を確認することを提案した。

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4件)

JIA, Liang-Jiu, and KUWAMURA, Hitoshi: Prediction of Cyclic Behaviors of Mild Steel at Large Plastic Strain Using Coupon Test Results, Journal of Structural Engineering, ASCE, 査読有 Vol.140, No.2, Paper No. 04013056, 2014.2.

JIA, Liang-Jiu, and KUWAMURA, Hitoshi: Ductile Fracture Simulation of Structural Steels under Monotonic Tension, Journal of Structural Engineering, ASCE, 査読有, Vol.140, No.5, Paper No. 04013115 (pp.1-12), 2014.5.

JIA, Liang-Jiu, KOYAMA, Tsuyoshi, and KUWAMURA, Hitoshi: Experimental and Numerical Study of Postbuckling Ductile Fracture of Heat-Treated SHS Stub Columns, Journal of Structural Engineering, ASCE, 査読有, Vol.140, No.7, Paper No. 04014044 (pp.1-13), 2014.7.

桑村 仁: 大型構造用鋼管の力学的特性、残留応力、及び寸法精度、日本建築学会構造系論文集, 査読有, 第80巻, 第708号, pp.333-343, 2015.2.

[学会発表](計7件)

JIA Liangjiu, KOYAMA Tsuyoshi, KUWAMURA Hitoshi: Selected Plasticity Models for Structural Steel under Cyclic Large Strain (Cyclic Stress-Strain Behavior to Fracture of Structural Steel, Part 1), 2011年度日本建築学会関東支部研究報告集, No.2088, pp.541-544, 2012.3.

JIA Liangjiu, KOYAMA Tsuyoshi, KUWAMURA Hitoshi: Uniaxial True Stress-True Strain Behavior to Fracture (Cyclic Stress-Strain Behavior to Fracture of Structural Steel, Part 2), 2011年度日本建築学会関東支部研究報告集, No.2089, pp.545-548, 2012.3.

JIA Liangjiu, KOYAMA Tsuyoshi, KUWAMURA Hitoshi: Prediction of Cyclic Plasticity Using Monotonic Coupon Test Results (Cyclic

Stress-Strain Behavior to Fracture of Structural Steel, Part 3) , 2011 年度日本建築学会関東支部研究報告集 , No.2090 , pp.549-552 , 2012.3.
Jia Liang-Jiu, Koyama, T., Kuwamura, H.: Prediction of Cyclic Plasticity of Prestrained Steel by Chaboche Model (Cyclic Stress-Strain Behavior to Fracture of Structural Steel, Part 4) , 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海) , 構造 I No. 20128 , pp.255-256 , 2012.9.
JIA, Liang-Jiu, and KUWAMURA, Hitoshi: Ductile Fracture Model for Structural Steels under Monotonic Loading, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道) , 構造 III No. 22355 , pp.709-710 , 2013.8.
齋藤剛寛, 小山 毅, 桑村 仁: 地震動を受ける角形鋼管の耐力劣化に対する局部座屈と延性破壊の影響に関する解析, 2013 年度日本建築学会関東支部研究報告集 I , pp.545-548 , 2014.2.
齋藤剛寛, 小山 毅, 桑村 仁: 局部座屈と延性破壊が連成する角形鋼管柱の地震応答, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿) , 構造 III , No.22480 , pp.959-960 , 2014.9.

東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号: 20234635

(2)研究分担者
なし

(3)連携研究者
なし

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等
<http://stahl.arch.t.u-tokyo.ac.jp/index-j.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

桑村 仁 (KUWAMURA, Hitoshi)