

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 賈 良 玖

本論文は大きな塑性ひずみを繰返し受ける構造用鋼材が延性破壊するまでの全挙動を表現する数理モデルを考究し、それを汎用コード ABAQUS に組み込んだ数値シミュレーションのスキームを構築し、実験により数値解析の信頼性を確認したものである。本論文は 7 章から成り、本文を補足する 7 つの付録 A～G が付いている。

第 1 章は序章となっており、大地震で塑性ひずみ履歴を受ける鋼材に延性き裂が生じて鋼構造物に被害をもたらす事例を紹介し、本論文の研究目的がそのような挙動の解明にあることを述べている。さらに、延性き裂の発生に関する既往の研究を概観している。

第 2 章は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ている。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ている。

第 3 章は第 2 章を繰返し塑性ひずみ履歴の問題に拡張したものである。鋼材の繰返し塑性にはひずみ硬化とバ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が明らかとなった。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。

第 4 章は単調引張での延性き裂の発生条件を Rice-Tracey のボ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ボイド半径で表したものである。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ており、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ている。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している。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ている。

第 5 章は第 4 章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たもので、第 3 章の応力 ひずみ関係のシミュレーション手法とも組み合わせたものである。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ている。

第 6 章は前章までの知見を実構造部材に適用したものである。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、それを本論文で開発した数値シミュレーションで追跡している。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ている。

第 7 章は結論となっており、本研究で得られた知見がまとめられている。また、今後の課題もあわせて整理されている。

付録 A は実験に用いた砂時計型試験片の製作図、付録 B はその実験結果（荷重と縦変形・横変形の関係）、付録 C はそのマクロ破面および走査型電子顕微鏡によるミクロ破面を掲載している。付録 D は角形鋼管の繰返し載荷試験装置、角形鋼管試験体の詳細図、および角形鋼管からの材料試験片のサンプリング、付録 E はその材料試験結果、付録 F と G はそれぞれ熱処理を施した角形鋼管と熱処理のない冷間加工のままの角形鋼管の繰返し試験結果（局部座屈の発生状況、き裂の発生進展状況、履歴曲線）の詳細データを掲載している。

以上のように、本論文は構造用鋼材が大きな塑性ひずみ履歴を受けて延性破壊に至るまでの全挙動を予測するシミュレーション技術を開拓したものであり、鋼構造建築物の耐震設計において非常に有用な知見を提供したと考えられる。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。