

Title	非比例繰返し負荷を受ける構造用鋼材の弾塑性構成式の高精度化に関する研究
Author(s)	靱井, 秀斗
Citation	大阪大学, 2018, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/69600
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

論文内容の要旨

氏名 (榎井 秀斗)

論文題名

非比例繰返し負荷を受ける構造用鋼材の弾塑性構成式の高精度化に関する研究

論文内容の要旨

性能規定型耐震設計法では社会基盤構造物の塑性変形領域から崩壊に至る過程を定量的に評価することが求められる。地震動などの大荷重を想定した鋼製橋脚が崩壊に至る挙動を有限要素解析で予測した既往の研究では、橋脚の最大耐力までの予測精度は実用的に十分であるが、終局状態までのそれは未だ十分とは言えない。これについては、橋脚基部の構造用鋼材が多軸の非比例繰返し負荷および大ひずみを受ける材料非線形性が極めて強い現象であり、解析精度は材料構成式の選択に強く依存するため、材料構成式の高精度化が課題となっている。一方、通常の実稼働時に構造用鋼材が受ける負荷の大きさは一般に降伏応力以下ではあるが、負荷経路は多軸の非比例経路であり、それが不規則に繰返される複雑な状態にある。非比例負荷条件下で繰返し数の増加に伴い塑性ひずみが突如発生・成長する現象、いわゆる繰返し軟化現象を表現可能な材料構成式が開発されれば、実稼働下における塑性変形の成長予測が可能となり、より高度な疲労強度設計を目指す上で有益な情報を得ることが期待できる。

このような背景のもと、本研究では主に理論解析によってその重要性が示されてきた非共軸性の構成式である接線塑性繰返し弾塑性構成式を、鋼製橋脚の崩壊といった幾何学非線形性が無視し得ない具体的境界値問題に適用し得るように汎用非線形有限要素ソルバに実装し、既往の実験結果や従来の共軸性の弾塑性構成式と比較することで、その妥当性を検証した。続いて、降伏応力以下の非比例繰返し負荷のサイクル数の増大に伴って発現する繰返し軟化現象を表現可能なように、当該弾塑性構成式を拡張し新たな一形式の提案を目的とした。

第1章は序論であり、本研究の背景を述べるとともに、既往の研究の問題点を指摘し目的を明確にした。

第2章では、本研究で適用する繰返し弾塑性構成式およびその接線塑性問題への拡張についてその定式化を詳細に述べた。次に本研究で対象とする構造用鋼材の降伏棚現象および硬化特性を表現可能なように硬化関数を拡張した上で、適用する負荷関数、相似中心の発展則、等方・移動硬化則および接線塑性ひずみ発展則の具体関数を規定した。

第3章では、接線塑性弾塑性構成式を有限要素ソルバへ実装する数値計算手続きについて詳細に述べた。計算コストを抑えつつ計算精度の低下を招かないよう、カッティングプレーン・プロジェクションに基づく定式化を行った。次に、種々の数値実験を実施し、参照解として与えられる前進Euler法の結果と比較することで、本数値計算手法は計算精度の低下を招くことなく計算コストが抑えられることを示した。

第4章では、接線塑性弾塑性構成式の妥当性検証を目的に、一定軸力下・水平1軸の漸増繰返し負荷を受ける2種類の鋼製橋脚について、既往の実験結果と有限要素解析結果を比較した。鋼製橋脚柱頭部の変位-反力特性を評価した結果、いずれの鋼製橋脚でも、従来の弾塑性構成式に比べ本研究で適用した接線塑性弾塑性構成式は実験結果で得られた最大荷重のみならず、終局状態までの力学特性を極めて高精度に予測し得ることを確認し、その妥当性を示した。

第5章では、全7経路の一定軸力下・水平2軸の漸増繰返し負荷解析を実施した。その結果、接線塑性弾塑性構成式は従来の弾塑性構成式に比べ予測される荷重が低いという水平1軸負荷と同様の傾向を示したが、その低下度合いは負荷経路に強く依存し、経路がより複雑なほどその差は早い段階から生じ、かつ、その程度も大きくなることが示された。

第6章では、降伏応力以下の非比例繰返し負荷を受ける構造用鋼材の繰返し軟化挙動の表現を目的として、第5章までに適用した接線塑性弾塑性構成式を拡張した。具体的には各増分で生じる微小な接線塑性ひずみの累積値を内部状態変数として構成式に導入することで、負荷サイクルの増加に伴い発生・成長する塑性ひずみを表現し得るように定式化した。薄肉鋼管の2軸非比例繰返し負荷の数値実験を行い、当該現象を表現し得るよう拡張されたことを確認した。さらに、負荷する応力レベルや材料定数のパラメータスタディを実施した結果、応力レベルが高いほどひずみ振幅が急増するまでの繰返し数が小さく、かつ、その振幅も大きくなることや、材料定数を変更することでひずみ振幅が急増するまでの繰返し負荷数やその速度を変化させることができることを確認し、拡張した接線塑性弾塑性構成式は、種々の構造用鋼材の軟化現象に適用し得ることを示した。

第7章では、本研究で得られた成果を総括するとともに、今後の課題を提示し、本研究の結論とした。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (榊 井 秀 斗)			
論文審査担当者	(職)	氏	名
	主 査	准教授	堤 成一郎
	副 査	教授	奈良 敬
	副 査	教授	鎌田 敏郎

論文審査の結果の要旨

性能規定型耐震設計法では、社会基盤構造物の塑性変形領域から崩壊に至る過程を定量的に評価することが求められる。地震動などの大荷重によって鋼製橋脚が崩壊に至る挙動を有限要素法解析で予測した既往の研究では、橋脚の最大耐力までの予測精度は実用的に十分であるが、終局状態までのそれは未だ十分とは言えない。これについては、橋脚基部の構造用鋼材が多軸の非比例繰返し負荷および大ひずみを受ける材料非線形性が極めて強い現象であり、材料構成式の高精度化が課題となっている。一方、通常の実稼働時に構造用鋼材が受ける負荷の大きさは、一般に降伏応力以下ではあるが、負荷経路は多軸の非比例経路である。またそれが不規則に繰返される複雑な非比例負荷条件下にあり、その間に塑性ひずみが突如発生・成長する現象、いわゆる繰返し軟化現象を表現可能な材料構成式が開発されれば、実稼働下における塑性変形の成長予測が可能となり、より高度な疲労強度設計を目指す上で有益な情報を得ることが期待できる。

このような背景のもと、本研究では主に理論解析によってその重要性が示されてきた非共軸性の構成式である接線塑性繰返し弾塑性構成式を、鋼製橋脚の崩壊といった幾何学的非線形性が無視し得ない具体的境界値問題に適用し得るように、汎用非線形有限要素法ソルバに実装している。また、既往の実験結果や従来の共軸性の弾塑性構成式と比較することで、その妥当性を検証している。続いて、降伏応力以下の非比例繰返し負荷のサイクル数の増大に伴って発現する繰返し軟化現象を表現可能なように、当該弾塑性構成式を拡張し、新たな一形式の提案を目的としている。

第 1 章は序論であり、本研究の背景を述べるとともに、既往の研究の問題点を指摘し目的を明確にしている。

第 2 章では、本研究で適用する繰返し弾塑性構成式およびその接線塑性問題への拡張について、その定式化を詳細に述べている。次に本研究で対象とする構造用鋼材の降伏棚現象および硬化特性を表現可能なように硬化関数を拡張した上で、適用する負荷関数、相似中心の発展則、繰返し損傷則、等方・移動硬化則および接線塑性ひずみ発展則の具体関数を規定している。

第 3 章では、接線塑性弾塑性構成式を有限要素法ソルバへ実装する数値計算手続きについて詳細に述べている。計算コストを抑えつつ計算精度の低下を招かないよう、カッティングプレーン・プロジェクションに基づく定式化を行っている。次に、種々の数値実験を実施し、参照解として与えられる前進 Euler 法の結果と比較することで、本数値計算手法は計算精度の低下を招くことなく、計算コストが抑えられることを示している。

第 4 章では、接線塑性弾塑性構成式の妥当性検証を目的として、一定軸力下・水平 1 軸の漸増繰返し負荷を受ける 2 種類の鋼製橋脚について、既往の実験結果と解析結果を比較している。鋼製橋脚柱頭部の変位-反力特性を評価した結果、いずれの鋼製橋脚でも、従来の弾塑性構成式に比べ本研究で適用した接線塑性弾塑性構成式は、実験結果で得られた最大荷重のみならず、終局状態までの力学特性を極めて高精度に予測し得ることを確認し、その妥当性を示している。

第5章では、全7経路の一定軸力下・水平2軸の漸増繰返し負荷解析を実施している。その結果、接線塑性弾塑性構成式は、従来の弾塑性構成式に比べて予測される荷重が低いという水平1軸負荷と同様の傾向を示すが、その低下度合いは負荷経路に強く依存し、経路がより複雑なほどその差は早い段階から生じ、かつ、その程度も大きくなることが示されている。

第6章では、降伏応力以下の非比例繰返し負荷を受ける構造用鋼材の繰返し軟化挙動の表現を目的として、第5章までに適用した接線塑性弾塑性構成式を拡張している。具体的には、各増分で生じる微小な接線塑性ひずみの累積値を内部状態変数として構成式に導入することで、負荷サイクルの増加に伴い発生・成長する塑性ひずみを表現し得るように定式化している。薄肉鋼管の2軸非比例繰返し負荷の数値実験を行い、当該現象を表現し得るよう拡張されたことを確認している。さらに、負荷する応力レベルや材料定数のパラメータスタディを実施した結果、応力レベルが高いほどひずみ振幅が急増するまでの繰返し数が小さく、かつ、その振幅が大きくなることや、材料定数を変更することで、ひずみ振幅が急増するまでの繰返し負荷数やその速度を変化させることができることを確認している。これらにより、拡張した接線塑性弾塑性構成式は、種々の構造用鋼材の繰返し軟化現象に適用し得ることを示している。

第7章では、本研究で得られた成果を総括するとともに、今後の課題を提示し、本研究の結論としている。

以上のように、本論文は、これまで主に理論解析でその重要性が示されてきた接線塑性弾塑性構成式を鋼製橋脚の崩壊問題に適用し、従来の弾塑性構成式や既往の実験結果と比較することで、その妥当性を検証している。さらに降伏応力以下の非比例繰返し負荷条件下で生じる繰返し軟化現象を表現可能なように当該弾塑性構成式を拡張しており、構造用鋼材の弾塑性構成式および弾塑性変形解析の高精度化に資するものであると評価できる。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。