氏　名	小　林　正　実

（論文内容の要旨）

本論文は、１次元梁−柱部材に対して展開されている対称限界理論に対し、交番塑性領域まで含めて、完全弾塑性材料で構成される３次元連続体に対する拡張一般化を行ったものである。更に、この理論を用いて、薄肉円筒部材における繰り返しねじれ変形の下での歪の非一様化現象の臨界点を予測する理論を展開している。以下の６章から構成されている。

第１章は序論であり、研究の背景、既往研究の状況、研究の目的を述べ、本論文の構成を示している。

第２章では、シェイクダウン領域に限定して、３次元連続体に対する対称限界理論の拡張一般化が行われている。対称限界理論は、漸増振幅繰り返し載荷プログラムの下で連続的に生成される定常状態列を表す定常状態経路の分岐点として、対称限界を予測するものである。したがって、構成則として、定常状態の増分変化に伴う応力と歪の変化率の関係式が必要である。理論を３次元連続体に対して拡張する際には、多軸応力状態における構成則が必要となるため、この構成則を誘導する部分で１次元連続体の場合とは異なる定式化が必要となる。刻々の応力状態に依存する塑性流れ法則から、定常状態の増分変化に対する構成則を導くことは、シェイクダウン領域においても、一見非常に難しく見える。しかし、シェイクダウン領域では、定常状態において塑性歪が一定であり、単軸応力状態と同様の誘導方針に従い、基礎式から塑性歪を消去することにより、比較的容易に構成則を導けることを示している。この構成則に基づいて、定常状態増分変化に対する変化率方程式を定式化している。初期形状における対称面に関して、対称に設けた一対の座標系を導入することにより、３次元連続体の定常状態の対称成分と逆対称成分を新たに定義している。対称成分と逆対称成分への変数変換を行い、これら２つの成分に関する方程式は互いに連成せず、完全に分離され、１次元梁−柱に対する対称限界理論と共通の特徴が保持されることが示されている。対称成分に関する変化率方程式を用いて、対称定常状態経路を追跡し、対称定常状態経路上で、逆対称成分に関する変化率方程式が非自明解を持つ定常状態を見出し、対称限界を求めることができる。更に、数値解析例として、２次元有限要素梁−柱モデルについて、対称限界予測解を求めており、これを、同一モデルの履歴挙動数値解析結果と比較し、理論の妥当性の検証を行っている。

第３章では、交番塑性領域における３次元連続体に対する定常状態経路解析法が展開されている。交番塑性領域では、定常状態において、塑性変形過程が含まれ、塑性歪が変動する。刻々の応力状態に依存する塑性流れ法則が適用される多軸応力状態に対しては、この定常状態における塑性変形過程の釣合経路の追跡が含まれる定式化によらなければ定常状態の増分変化を求めることはできない。したがって、まず、定常状態経路の追跡について、単軸応力状態に対する理論とは全く異なる理論を構築しなければならない。この章では、反転時の塑性歪の定常状態増分変化に対する変化率を未知量のまま残しておき、定常状態釣合経路上の全ての釣合状態における全ての定常状態変数変化率を、この反転時塑性歪変化率を用いて表していく増分解析法を新たに構築している。この解析法では、（１）まず、反転時釣合状態における定常状態変数の変化率を、塑性歪変化率で表す。（２）次に、反転時釣合状態を出発点として反対側の反転時まで、釣合経路上の全ての時刻の全ての定常状態変数の変化率を、反転時の塑性歪変化率で表していく増分解析を行う。（３）これにより、反転時の塑性歪変化率を、反対側の反転時からの塑性歪の変動を反映させる形で表すことができる。よって、塑性歪の軌道が閉じる条件から、反転時の塑性歪変化率を決定できる。以上の手続きにより、定常状態経路の変化率解を求め、定常状態経路を追跡するものである。この解析法によれば、交番塑性要素の降伏の時刻の変化率も反転時塑性歪変化

氏　名	小　林　正　実

率を用いて厳密に表現でき、また、交番塑性要素が多数存在する場合でも、（２）の増分解析の際に消去していくことにより、未知量を増やさずに解析できる。また、（２）の増分解析は、両反転点から履歴を遡る方向に行えば、弾性過程の釣合経路の追跡を省くことができ、これを逆時間方向解析と名付け、その場合の定式化も示されている。更に、２次元有限要素梁–柱モデルについての数値解析例を示しており、履歴挙動数値解析結果との比較により、解析法の検証を行っている。

第４章では、３章で展開した定常状態経路解析法に基づいて、交番塑性領域まで含めて、３次元連続体に対する対称限界理論の拡張一般化が行われている。３章における、定常状態経路の変化率解析は、変数を反転時塑性歪変化率で表していき、最終的に、反転時塑性歪変化率に関する方程式に帰着させるものであった。定常状態経路の特異性条件もまた、この反転時塑性歪変化率についての方程式に帰着可能なことが示されている。２章で導入した、初期形状に関して対称に設けた一対の座標系を用いて、この変化率方程式を、対称成分と逆対称成分に関する方程式に変換する。交番塑性領域においても、これら２つの方程式は互いに連成せず、完全に分離されることが示されている。対称限界条件は、逆対称成分に関する方程式が、非自明解を持つ条件として導かれる。以上の基礎式に基づいて、対称限界解析法が展開されている。更に、数値解析例として、２次元有限要素梁–柱モデルについて、対称限界予測解を求めており、履歴挙動数値解析結果との比較により、理論の妥当性の検証を行っている。

第５章では、繰り返しねじれ変形を受ける薄肉円筒部材における歪の非一様化現象の臨界点を予測する理論が展開されている。辻らによる、鋼構造薄肉円筒部材の繰り返しねじれ載荷実験において、ほぼ一様であるはずの歪分布が顕著に非一様化する結果が報告されている。同種の実験は、多軸応力状態に対する標準的な材料試験方法として行われるため、このような現象の発生限界とその性状を把握しておくことは極めて重要である。この円筒部材における歪の非一様化は、Biot によって示された、剛体に囲まれた一様な応力状態にある弾性体において不均一な変形が生じる Internal buckling と類似の現象が、繰り返し載荷の下で起こったものと考えられる。したがって、対称限界理論の応用により明らかにすることが期待できる。肉厚が十分に小さく平面応力状態にあると見なせる薄肉円筒部材を解析対象とし、２次元有限要素により離散化近似し、これに漸増振幅の繰り返しねじれ変形を作用させる問題を考える。シェイクダウン領域に限定して理論が展開されている。まず、基本経路に対応する、歪が一様な定常状態解を求めている。次に、定常状態の増分変化に関する方程式を導く。この方程式には、自明解として、上で求めた基本経路をたどる歪一様な増分解が存在し、余解が存在する条件として、歪の非一様化の臨界点条件が導かれている。また、本理論に基づく数値解析が実施されている。辻らの実験結果で報告されている円周方向の歪の非一様化に対応する分岐モードが得られ、低次モードほど波長が短く、Internal buckling と類似した性質を持つことが示されている。単調ねじれ載荷に対する分岐点解析も行っており、上述の円周方向の歪の非一様化を引き起こす分岐モードの発生は、繰り返し載荷時に特有の現象であり、また、単調載荷時の分岐点振幅よりはるかに小さい振幅で現れることを予測している。更に、同一モデルの履歴挙動解析を行い、繰り返し載荷時において、単調載荷時の分岐点振幅より小さい振幅で、急激に軸方向の歪の非一様化が起こり、本理論予測と整合する結果となっていることが示されている。

第６章は結論であり、本論文で得られた成果を要約している。

氏　名	小　林　正　実

（論文審査の結果の要旨）

本論文は、１次元梁-柱部材に対して展開されている対称限界理論に対し、交番塑性領域まで含めて、完全弾塑性材料で構成される３次元連続体に対する拡張一般化を行ったものである。更に、この理論を用いて、薄肉円筒部材における繰り返しねじれ変形の下での歪の非一様化現象の臨界点を予測する理論を展開している。得られた主な成果は次のとおりである。

１．シェイクダウン領域における３次元連続体に対する対称限界理論を構築した。定常状態の増分変化に対する多軸応力状態における構成則を、単軸応力状態の場合と同様の誘導方針により導けることを示した。３次元連続体における定常状態の対称成分と逆対称成分を新たに定義し、これらの成分を用いた定式化を行い、１次元梁-柱部材と共通の特徴を持つ理論展開となることを示した。

２．交番塑性領域における３次元連続体に対する定常状態経路解析法を展開した。シェイクダウン領域と同様の方法で構成則が導けないため、反転時の塑性歪変化率を未知量のまま残しておき、定常状態釣合経路上の全ての釣合状態における全ての定常状態変数変化率を、反転時塑性歪変化率を用いて表していく増分解析法を新たに構築した。この解析法によれば、交番塑性要素の降伏の時刻の変化率も、反転時塑性歪変化率を用いて厳密に表現できる。また、定常状態釣合経路を、時間を遡る方向にたどることにより、弾性過程の追跡を省くことができ、この場合の定式化も行った。

３．２．の定常状態経路解析法に基づいて、交番塑性領域における３次元連続体に対する対称限界理論を構築した。２．の定常状態経路変化率解析は、最終的に、反転時塑性歪変化率に関する方程式に帰着され、定常状態経路の特異性条件もまた、この反転時塑性歪変化率についての方程式に帰着可能なことを示した。この変化率方程式を、対称成分と逆対称成分に変換し、交番塑性領域においても、１次元梁-柱部材に対する理論と共通の特徴が保持されることを示した。以上の基礎式に基づき、対称限界解析法を展開した。

４．上述の３次元連続体に対する対称限界理論を応用して、繰り返しねじれ変形を受ける薄肉円筒部材における歪の非一様化現象の予測理論を展開した。理論に基づく数値解析を実施し、Biot の示した Internal buckling と類似した性質を持つことを明らかにした。また、繰り返し載荷時の分岐現象が、単調載荷時分岐点よりはるかに小さな振幅で起こり、更に、単調載荷時とは全く異なる形質を持つことを示した。

以上要するに、本論文は、準静的繰り返し載荷を受けるあらゆる種類の構造物の分岐現象を予測するための一般理論を展開し、円筒部材における歪の非一様化現象という実際的な問題への応用まで行ったもので、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成２１年５月２２日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。