

氏名	やまかわ ゆうき 山 川 優 樹
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成15年2月12日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	平成10年3月 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻博士課程前期課程修了
学位論文題目	地盤材料のせん断帯形成における分岐現象と材料不安定性
論文審査委員	主査 東北大学教授 池田清宏 東北大学教授 岩熊哲夫 東北大学教授 風間基樹 東北大学助教授 寺田賢二郎

論 文 内 容 要 旨

本論文では地盤材料における変形の局所化とせん断帯形成挙動に関して、分岐現象と材料不安定性の視点から研究を行った。弾塑性分岐は拡散型分岐モードと不連続せん断帯分岐モードとに大別されるが、このふたつの種類の分岐現象について、実験結果に基づく考察を行うとともに、数値モデル化と数値解析による検討を行った。本論文は5つの章から成り、その構成は以下の通りである。

第1章では、地盤工学における変形局所化とせん断帯形成に関する諸問題と、地盤材料の変形挙動における分岐現象ならびに材料不安定性に関して、諸問題と研究背景・既往の研究について述べるとともに、本研究での研究目的・研究内容を述べた。

第2章では、地盤材料の三軸供試体における分岐変形モードの観察実験について述べた。本章は、本論文の以降の章に先立って地盤材料の要素試験における分岐現象に関する問題提起と、数値解析で明らかにすべき現象やメカニズムの問題設定としての位置付けを成している。一般に、地盤材料の要素試験供試体においては、各種の変形形態の発現や変形局所化・せん断帯の形成が見られる。こうした現象は供試体の力学的応答に大きく影響するため、地盤材料の強度特性評価において障害となるものであり、分岐現象と材料不安定性の影響を強く受けた現象であると認識されているが、地盤工学においては地盤材料の変形・破壊挙動に関する現象論的研究は広く行われている反面、分岐現象の視点からの検討は不足している。本研究では、こうした地盤材料の要素試験供試体に見られる複雑な局所変形挙動は、供試体作製時に不可避免的に存在する材料的な不均質さや幾何学的な形状の不整などの初期不整や、供試体の寸法・形状の影響を受けて、変形に対して支配的な分岐モードが変動することに起因しているとの考え方にに基づき、三軸圧縮試験における供試体の変形挙動の観察を行い、さらに分岐の一般規則に基づいて漸次的な変形過程の分類を行った。実験は、供試体の寸法および形状を様々に変化させた砂質土の三軸圧縮試験を行い、供試体の変形過程の観察を行った。供試体の分岐挙動は微小な初期不整に対しても鋭敏であり、変形モードの変動が予想されることから、こうした状況下でも定性的傾向を捉えられるよう同一条件の実験を複数ケース実施することとした。実験結果の分析においては、はじめに、一般に土質試験で計測対象とされる軸ひずみ-軸差応力関係や軸ひずみ-

体積ひずみ関係といった供試体のマクロ計測量と、供試体の変形形態やせん断帯形成挙動との関連について考察を行った。ここでは、ピーク強度等に対しては材料的要因よりも供試体寸法・形状といった幾何学的要因の影響が支配的であることを示すとともに、供試体形状によって異なる変形モードが発生することによるマクロ計測量への影響を調べた。次に、現象論的な視点に基づいて変形モードの分類を行い、供試体形状ごとに異なる傾向で各種の変形モードが発生していることを示した。さらに、群論的分岐理論による分岐の一般規則に基づき、各形状の供試体における漸次的な変形の進行過程の分類を行った。ここでは、土質試験における標準形状として一般に用いられている形状比 2.0 前後の供試体は、他の形状比と比較して低次の分岐モードを発生する傾向があり、変形の局所化が顕著であることが確認された。以上のように、第 2 章では、現象論的な視点と分岐現象という視点の 2 つの側面から供試体の変形挙動について考察し、供試体が呈する様々な変形形態やせん断帯の形成挙動は、供試体形状の影響による分岐モードの変動に起因していることを実験的検討により明らかにした。

第 3 章では、圧縮せん断供試体における拡散型分岐モードの弾塑性分岐解析について述べた。弾塑性分岐の分類のひとつである拡散型分岐モードは、連続な変形場における分岐であり、供試体が連続・一様に変形できる限界と考えられる。これは主として幾何学的要因が支配的な不安定現象であり、供試体全体の変形モードを支配するものである。例えば鋼材の引張り試験供試体に見られる「くびれ」変形等を引き起こすものであり、土質試験の円柱型供試体では、袈裟懸け型・バルジ型等の低次モードやダイヤモンドパターン・ストライプパターン等の高次モードに相当する。ここでは、平面ひずみ圧縮せん断供試体を対象とし、拡散型分岐モードおよび分岐後の変形挙動について有限要素法を用いた弾塑性分岐解析を行った。はじめに、有限変形弾塑性境界値問題の定式化と弾塑性分岐条件および分岐解析手法について述べた。本研究で行う分岐後挙動の変形解析ではひずみが局所化していく過程を追跡するため、有限ひずみ問題に対しても合理的である、変形勾配の乗算型分解と超弾性構成式に基づく定式化を採用した。また、分岐解析においては、基本つり合い経路である一様応力・変形場の各荷重段階においてどのような分岐モードが発生するかを調べるため、初期不整を利用した疑似分岐解析では不十分であることから、接線剛性マトリックスの固有値解析により分岐点と分岐モードを求めて分岐経路への切替え手続きを行う完全型の厳密な分岐解析を行うこととした。数値解析は、初期状態において均質な平面ひずみ圧縮せん断供試体を対象として弾塑性分岐解析を行った。弾塑性材料としては Drucker-Prager 降伏規準と関連流れ則・等方硬化則に従う基本的な弾塑性モデルを用い、ここでは材料不安定性の要因を排除して議論するためにひずみ硬化型材料のみを用いることとした。一様状態が持続する基本つり合い経路上には多数の分岐点が集中して存在することが確認された。また、各分岐点に対応する分岐モードは対称・反対称の様々な波数を有する調和型の拡散型モードであった。各分岐点から分岐経路への切替えを行い、分岐後の変形挙動を追跡した。基本経路の一様な応力・変形状態から、拡散型分岐の発生を発端として各分岐モードに対応した各種モードの不均一変形が発生し、次第に除荷領域が進展することにより、せん断帯形成に対応すると考えられる狭いバンド状領域にひずみが集中していく過程を調べた。また、分岐経路上において、元の分岐モードとは異なる変形モードに変化するモードジャンプ現象が確認され、次第に対称性の低い局所変形モードへと遷移していく過程を追跡した。モードジャンプが生じる場合、負荷・除荷領域も明らかに異なる分布に変化していることが確認された。軸ひずみ-軸応力関係では、材料がひずみ硬化型であるため基本経路では軸応力は単調に増加していくが、分岐経路では分岐の後に軸応力が低下に転じる場合も確認され、その低下の程度は分岐モードごとに様々であった。また、モードジャンプ後には軸応力が急速に低下することが分かった。以上のように、第 3 章では、拡散型分岐がせん断帯状の局所変形領域を

形成する一因となっていることを明らかにするとともに、供試体全体としてのマクロな軟化挙動は、ひずみ硬化型材料を用いても、ひずみ局所化と除荷領域の進展によるものとして表現可能であることを示した。また、異なる変形モードに段階的に変化するモードジャンプ現象の解析事例についても述べた。

第4章では、材料不安定によるせん断帯分岐の発生と不連続変形の有限要素解析について述べた。ここでは、第3章で取り扱った拡散型分岐と並んで弾塑性分岐のもう一種である、不連続せん断帯分岐モードを対象とした。せん断帯分岐は、連続なひずみ場あるいは変位場に不連続性を生じる分岐であり、地盤材料においてはせん断帯やすべり面の形成に相当するもので、材料が連続的に変形できる限界と考えられる。せん断帯分岐の発生条件やせん断帯の方向は、供試体形状や境界条件に依存せず、材料の構成関係と応力状態により決定づけられ、せん断帯分岐は材料的要因が支配的な不安定現象である。本研究では変位場に不連続性が発生する場合を対象としたが、この場合にはひずみ場、すなわち有限変形問題では変形勾配の場は特異分布となり、局所的に非有界な値を取る。不連続場の議論は微小変形理論に基づいたものもあるが、ここでは分岐問題として不連続場の発生を議論するため、有限変形理論に基づく定式化を行った。はじめに、有限変形問題における不連続変形の運動学とせん断帯分岐の発生条件について述べた。ここでは第3章と同じく、変形勾配の乗算型分解と超弾性構成式に基づく弾塑性材料を対象とした。本研究では、せん断帯発生の可能性に関する議論だけでなく、せん断帯の進展の変形解析を行うため、せん断帯が形成した後の不連続面における構成式、すなわち不連続変位速度と公称表面力速度とを関係づける構成関係が必要となる。そこで、不連続面における客観性を有する構成式の形式についても述べた。次に、不連続変位場を含む有限変形境界値問題の定式化を行い、続いてそれに対する有限要素法の適用について述べ、支配方程式の有限要素離散化を行った。ここでは、不連続変位を非適合モードの拡張自由度として有限要素の内挿関数に導入する強不連続解析法を用いたが、これは一般的な変位法に基づく有限要素法とは異なる形式の変分方程式により定式化される。この不連続変位を運動学的に取り入れた有限要素法により、変位法に基づく一般的な有限要素法では取り扱いが不可能である不連続せん断帯分岐の発生後の挙動についても解析が可能となる。この方法では、局所変形挙動の数値解析で一般に行われているように連続体の構成関係としてひずみ軟化を導入するのではなく、あくまで連続場ではひずみ硬化が持続しているものとし、ひずみ軟化が生じる場合には不連続面上のみに塑性変形が局所化して進展するものとされる。また、不連続場の発生は、せん断帯分岐による新たなメカニズムの発生として解釈される。この考え方に基づき、本研究では比較のための検証例題を除き、連続体の構成関係はひずみ硬化型モデルを用いた。以上の定式化について述べた上で、数値解析を行った。はじめに、一様応力・変形場からのせん断帯分岐の発生条件の判定解析を行った。その結果、微小変形理論に基づく発生条件による判定を行った場合とは異なり、有限変形を考慮した場合には、関連流れ則に従うひずみ硬化型材料でも不連続変位場が発生しうることが確認された。次に、圧縮せん断供試体のせん断帯進展解析を行った。ここでは、通常の変位法有限要素法においてひずみ軟化型モデルを用いて局所変形挙動を再現した解析結果との比較を行い、軸ひずみ-軸応力関係におけるメッシュ依存性を検討し、局所化解析に対する不連続解析法の客観性・有用性を示した。以上のように、第4章では、ひずみ軟化を伴う塑性不安定・局所化現象の数値解析において、せん断帯分岐の発生とそれに起因する不連続場の進展を運動学的に考慮に入れることの重要性を示した。

最後に、第5章では各章での結論を概説して本研究の成果をまとめ、研究の総括を行うとともに、今後の課題と研究の展望について述べた。

論文審査結果の要旨

地盤材料の典型的破壊形態である変形局所化やせん断帯形成挙動は、地盤材料の力学特性評価に大きな影響を及ぼす現象であり、土木工学の重要な問題であると共に、非線形力学や弾塑性論の立場から解明が必要な問題である。本論文は、地盤材料の変形局所化とせん断帯形成挙動について、分岐現象と材料不安定性の視点から実験及び数値解析により研究を行ったものである。供試体の各種変形形態が分岐に起因することを実験的に明らかにするとともに、数値解析により分岐を発端とした変形局所化過程と軟化挙動を追跡している。本論文は全編5章から構成されている。

第1章は序論であり、研究背景ならびに本論文の研究目的と研究内容を述べている。

第2章では、地盤材料供試体における変形形態について調べている。変形形態及びせん断帯形成挙動について現象論的視点に基づき変形形態の分類を行った上で、分岐の一般規則に基づき分岐の過程の分類を行っている。以上より、供試体の各種変形モードやせん断帯形成挙動が分岐モードの変動に起因することを実験的に明らかにしている。

第3章では、有限変形有限要素解析に基づく弾塑性分岐解析により、供試体における拡散型分岐の発生と分岐後の変形挙動を調べている。有限変形・弾塑性境界値問題の定式化と弾塑性分岐条件及び分岐解析手法について述べた上で、圧縮せん断供試体の分岐解析を行い、一様場から発生する拡散型分岐モードを調べている。低次から高次までの各種の拡散型分岐モードの発生を確認し、さらに分岐経路への切替えを行い分岐後挙動の解析を進め、次第に局所変形形態へ遷移するモードジャンプの過程を追跡している。これにより、拡散型分岐が発端となり局所変形が発生し、不均一な応力・変形場と除荷域の進展によりせん断帯状の変形形態を形成することを明らかにしている。

第4章では、せん断帯分岐に起因する不連続変形場の運動学的定式化と分岐条件を述べ、不連続場を含む有限変形境界値問題の定式化を行い、供試体のせん断帯進展解析を行っている。不連続変位を非適合な拡張自由度として導入する手法により、有限要素法による不連続場の運動学的表現を行っている。一様場におけるせん断帯分岐条件の判定解析を行い、関連流れ則に従う硬化型材料でもせん断帯分岐が発生しうることを確認し、塑性硬化が持続する連続変形場からせん断帯分岐により不連続場の新たなメカニズムが発生して軟化を引き起こすという考え方の妥当性を示している。次に供試体のせん断帯進展解析を行い、局所化解析に対する本解析手法の有用性を示している。

第5章は結論であり、研究成果の総括を行うとともに、今後の研究の展望について述べている。

以上要するに本論文は、地盤材料における変形局所化現象とせん断帯形成挙動に関して、実験ならびに数値解析の両手法により検討し、これらの現象が分岐現象及び材料不安定性に支配されていることを実証したものであり、土木工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。