

(続紙 1)

京都大学	博士 (工学)	氏名	上田 恭平
論文題目	砂の力学モデルとしての多重せん断モデルの大変形解析の定式化およびその適用性に関する研究		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、地盤の液状化をはじめとする強い非線形性を有する現象の解析的課題を対象とし、多重せん断機構に基づく砂の力学モデルの大変形解析の定式化を提案するとともに、その適用性を、地盤・構造物系の地震時動的解析をはじめとする種々の検討により明らかにしたものであって、8章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、液状化地盤上の地盤・構造物系の地震時被害予測において、被災変形量を高い精度で解析する手法の必要性を論じ、さらに、既往の関連研究のレビューに基づいて、大変形に起因する幾何的非線形効果を的確に考慮するための新たな理論構築の必要性を論じている。</p> <p>第2章では、大変形解析に先立ち、微小変形解析の枠組み内で、砂のような粒状体の力学モデルとして、ひずみ空間における多重せん断モデルに新たなストレス-ダイレイタンスー関係を組み込むことにより、より一般化した多重せん断モデルを提案した。この定式化では、ダイレイタンスーによる体積ひずみを膨張的成分と収縮的成分とに分解し、せん断応力ひずみ関係における骨格曲線に沿う載荷時には仕事をしないせん断機構として膨張的ダイレイタンスー成分を定式化、また、収縮的成分は、累積塑性せん断ひずみに比例する成分として定式化した。この定式化において、偏差成分を表現する多重せん断機構は、粒状体の粒子構造を特徴づけるbranch vectorと、それに直交するtangential vectorとのdyad積に基づいて、砂の誘導異方性を考慮できる構造に基づいている。モデルパラメータは15個であり、そのうち3個は体積成分、3個は偏差成分、9個はダイレイタンスー成分を規定するものである。</p> <p>第3章では、この多重せん断モデルを大変形理論に基づいて拡張し、材料非線形のみならず、幾何学的非線形性をも考慮できる砂の力学モデルを提案した。この定式化においては、基準配置に基づく物質表示系のTotal Lagrangian(TL)法、および現配置に基づく空間表示系のUpdated Lagrangian(UL)法の両者により構成式を与えた。大変形理論に基づく拡張においては、粒状体の粒子構造を特徴づけるbranch vectorやtangential vectorなどのベクトル類は、物質の変形に伴い、その方向とともに大きさを変えるものとした。構成式は、応力テンソル-ひずみテンソルを直接的に規定する積分形、および、それらの物質時間微分の関係規定する増分形の両者により与えた。これらの定式化において採用した応力、ひずみテンソルは、物質表示では、第2 Piola-Kirchhoff応力およびGreen-Lagrangeひずみ、また、空間表示ではCauchy応力およびEuler-Almansiひずみである。増分形の構成式は、物質表示では、積分形構成式の物質時間微分により、また、空間表示では、積分形構成式のLie時間微分により導いた。</p> <p>第4章では、間隙水で満たされた多孔質体の支配方程式を、TL法、UL法の両者による大変形解析の枠組みに即して定式化するとともに、有限要素解析のための離散化を行った。対象とした支配方程式は、多孔質体の運動方程式、および間隙水の収支バランス式である。さらに、離散化された基本方程式に基づき、有限要素法における自重解析などの静的解析、および、地震応答解析に代表される動的解析のそれぞれに対</p>			

する解法を、TL法、UL法の両枠組みで示した。

第5章では、第3章で提案した大変形理論に基づく粒状体の構成式の適用性を検討するための第一段階として、同構成式における仮想単純せん断応力と仮想単純せん断ひずみの間に線形関係を課すことにより、大変形理論に基づく新たな線形弾性体の構成式を導き、その挙動の適用性を検討した。ここで導いた線形弾性体は、多重せん断型の線形弾性体であり、通常の微小変形理論における線形弾性体の構成式が2個の多重せん断機構モデルに還元されるという事実との対比の観点からは、通常の線形弾性体を一般化した線形弾性体の構成式といえる。有限要素解析における一要素による一軸圧縮引張試験のシミュレーションを実施し、多重せん断型の弾性体では、TL法、UL法の両者が理論のみならず数値解析においても一致することを確認し、この点に関する解析プログラムの適用性を確認した。次に、通常の線形弾性体を直接物質表示ないし空間表示による大変形解析に当てはめた構成式の挙動のシミュレーションを実施し、既往の大変形解析に関する研究結果との整合性を確認した。さらに、多重せん断型の線形弾性体の挙動のシミュレーション結果に基づく検討により、多重せん断型の線形弾性体の挙動は、通常の線形弾性体による大変形解析に当てはめた構成式の挙動よりも、現実に存在する線形弾性体の大変形挙動の解析に適用性を有することを明らかにした。

第6章では、第3章で提案した大変形理論に基づく粒状体の構成式の適用性を検討するための第二段階として、種々の条件下での砂の要素シミュレーション解析を実施し、その挙動の適用性を検討した。砂の非排水単調せん断のシミュレーションでは、TL法、UL法との整合性を確認するとともに、微小変形解析結果との比較により、ひずみが10%を越える領域において、大変形解析の優位性が顕著となることを明らかにした。また、砂の非排水せん断試験を、多数の有限要素を用いて解析した結果、ひずみ軟化の過程において、ひずみの局所化によるせん断帯の形成を的確に解析できることを示した。特に、砂の供試体のアスペクト比に応じてひずみの局所化が異なり、アスペクト比が比較的大きい場合には「く」の字型のせん断帯が、また、アスペクト比が小さい場合にはクロス(X字)型のせん断帯が発生する様子を的確にシミュレーションすることを明らかにした。

第7章では、液状化現象を含む種々の強い非線形動的現象を対象として、各種形式の地盤・構造物系に対して大変形解析による地震時の被災事例解析を実施し、提案する大変形理論に基づく多重せん断モデル構成式の適用性を検討した。飽和地盤上に建設された盛土の動的遠心模型実験に対する解析では、大変形解析を適用することにより、微小変形解析でみられた過大な盛土の変形が抑えられ、解析による沈下量が実験値と整合する結果となった。1995年兵庫県南部地震における神戸港のケーソン式岸壁の解析では、微小変形解析と大変形解析との間で、著しい相違は見られなかった。これは、解析において発生したひずみが最大10%程度であったことによるものと考えられる。同地震における神戸港の防波堤に対する解析では、大変形解析を適用することにより、微小変形解析における堤体の過大な沈下が抑えられ、実測値と整合する解析結果が得られた。以上の結果に基づいて、幾何学的非線形性を考慮した大変形理論に基づく提案モデルは、液状化地盤上に構築された地盤・構造物系の地震時の被災程度や被災状況の解析に適用性を有することを明らかにした。

第8章は結論であり、本研究で得られた成果について要約している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、地盤の液状化をはじめとする強い非線形性を有する現象の解析的課題を対象とし、多重せん断機構に基づく砂の力学モデルの大変形解析の定式化を提案するとともに、その適用性を、地盤・構造物系の地震時動的解析をはじめとする種々の検討により明らかにしたものである。得られた研究成果の概要は、次のようにまとめられる。

1) 大変形解析に先立ち、多重せん断モデルに対して、新たなストレス-ダイレイタンスー関係を組み込むことにより、より一般化した多重せん断モデルを提案した。この定式化では、ダイレイタンスーによる体積ひずみを膨張的成分と収縮的成分とに分解し、せん断応力ひずみ関係における骨格曲線に沿う载荷時には仕事をしないせん断機構として、膨張的ダイレイタンスー成分を定式化、また、収縮的成分は、累積塑性せん断ひずみに比例する成分として定式化した。

2) この多重せん断モデルを大変形理論に基づき拡張し、材料非線形のみならず、幾何学的非線形性をも考慮できる砂の力学モデルとして、構成式を提案した。この定式化においては、基準配置に基づく物質表示系の Total Lagrangian(TL)法、および現配置に基づく空間表示系の Updated Lagrangian(UL)法の両者により構成式を与えた。あわせて、間隙水で満たされた多孔質体の支配方程式を、TL法、UL法の両者による大変形解析の枠組みに即して定式化した。

3) 提案した定式化の適用性を、まず、最も基本的な多重せん断型の線形弾性体について検討し、既往の大変形解析に関する研究結果との整合性、TL法、UL法の相互間の整合性を確認し、提案する定式化について、その基礎的な適用性があることを明らかにした。

4) 大変形理論に基づく多重せん断モデル構成式について、液状化現象を含む種々の強い非線形動的現象を対象として検討し、TL法とUL法との整合性を確認するとともに、その適用性を明らかにした。特に、幾何学的非線形性を考慮した提案モデルにより、液状化地盤上に構築された地盤・構造物系の地震時の被害程度や被災状況を精度よく再現できることを示した。あわせて、微小変形解析との比較を行い、大変形解析での優位性が発揮されるのは、せん断ひずみが概ね10%を超える領域であることを明らかにした。

以上のとおり、本論文は、大変形解析の定式化に基づく独創的な砂の力学モデルを提案し、地盤の液状化をはじめとする強い非線形性を有する現象の解析における著しい精度向上に成功したものであり、学術上、實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22年1月29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。