

氏 名	とび た よし へ	飛 田 善 雄
授 与 学 位	工 学 博 士	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 62 年 3 月 13 日	
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項	
最 終 学 歴	昭和 53 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 2 年の課程修了	
学位論文題目	A Micromechanical Study on Constitutive Models of Granular Materials (粒状体の構成モデルに関する微視力学的研究)	
論文審査委員	東北大学教授 柳澤 栄司 東北大学教授 佐武 正雄 東北大学教授 阿部 博之 東北大学助教授 岸野 佑次	

論 文 内 容 要 旨

原子力発電所、海洋土木構造物、都市における地下道建設に代表される様に、近年の土木構造物は、厳しい条件下での設計、施工が要求される。このため、地盤材料の変形・破壊挙動を精度良く表現できる構成モデルが、地盤の挙動を予測するために必要となる。

地盤材料の複雑な変形・破壊挙動を反映する非線形構成モデルが現実的な意味を持つ様になったのは、有限要素法、境界要素法に代表される数値解析手法及び電子計算機の発達によるものである。

実際の土構造物の解析に用いる構成モデルは、土の様な地盤材料が示す複雑な挙動を表現しうる事が望ましいが、解析の目的、土構造物で卓越する応力（変形）状態、要求される精度に応じて、適切で簡単な構成モデルを使用する必要がある。工学的に重要な事は、構成モデルの適用性と限界をわきまえて、問題に応じて適切なモデルを選定し、そのパラメーターを限られた情報から、適切に決定する事である。

構成モデルの適用性とその限界を的確に判断するためには、地盤材料が微視的にどのようなメカニズムで運動するのか、そしてそれが巨視的応答とどのような関係にあるのかを研究する微視力学的アプローチによる研究が不可欠である。微視的観点より導入される構成モデルは、地盤材料の変形・破壊挙動の本質を反映するより合理的なモデルと考えられるばかりでなく、現象論的構成モデルの適用性と限界を考察する上で、重要な指標を与える。また、本質的な変形メカニズムの理解により、材料の本質的な応答性よりそれ程逸脱する事なく、ある事象を表現できる有効且つ単純な工学的関

係式を求める事も可能である。

本論文は、上記の考え方に基づいて、粒状体の力学の分野で得られた実験事実、微視的諸量の定式化及び金属材料の構成モデルの定式化を基礎として、砂の様な粒状体の合理的な構成モデルの確立を目指したものである。ただし、ここで議論される変形挙動は、破壊以前のひずみ硬化時の変形（いわゆる安定変形）に限定しており、また、時間に依存しない挙動のみを取り扱っている。以下に、本論文各章の内容について記述し、重要な成果についてとりまとめる。

第 1 章 序 論

本章では、本論文に密接に関連する既往の研究を整理し、簡潔な紹介を行っている。

第 2 章 砂の様な粒状体の構造、応力、運動則に関する準巨視的考察

砂の様な粒状体の内部変数として、粒子間接触面積に基づいて導かれるコンタクトテンソルを導入し、このテンソルを通して、粒状体の微視的構造を反映する修正応力を定義した。この事により、従来、定性的にしか議論のできなかった内部構造の影響を、数学的に取り扱う事が可能となる。これらのテンソルの物理的意味及びその移行モデルの考察（図 1 参照）を中心に議論した。

さらに、粒状体の変形挙動が、(1)構造変化を伴わない弾性的変形；(2)構造変化による非可逆的変形；(3)粒子間の相対的すべりによる塑性変形より成り立ち、速度形式で重ね合わせが可能とし、それぞれを定式化した。従来のモデルでは説明できなかった変形特性、特に、ダイレイタンス特性が、この様な二つの非可逆的変形成分を考える事により、统一的に記述できる事を明らかにした。

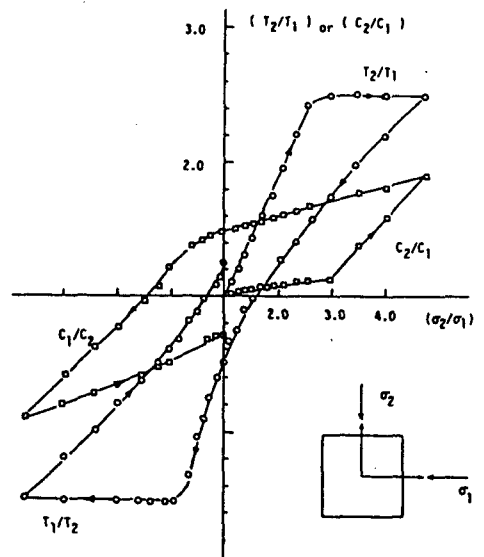


図 1 大振幅時におけるコンタクトテンソルと修正応力の移行モデル

第 3 章 砂の様な粒状体の微視的構成モデル

本章では、砂の様な粒状体の非弾性変形が、(1)粒子間力の再配分に伴う構造の変化による成分；(2)粒子間の相対的すべりによる成分と考えた時の速度型構成モデルの一般的定式化を微少ひずみ理論の範囲で与えた。構造変化のもたらす変形が無視できるものと仮定する時、このモデルは、従来のすべりモデルの拡張となっており、これを多重すべりモデル (Multi slip model) と名付けた。多重すべりモデルは、(1)砂の様な粒状体のもたらす硬化が異方的であり；(2)主応力軸の回転に伴う非弾性変形が、逆向きすべりの存在により、応力増分方向にずれること等を表現するモデルである。多重すべりモデルに要するメモリーを低減する目的で、二重せん断モデル (Double

shearing model) が、異方的硬化特性を表現しうる様に修正した。

第2章で導かれたコンタクトテンソル及び修正二重せん断モデルを用いて、初期異方性が、砂の変形挙動に及ぼす影響に関する数値計算例を示した(図2参照)。

最後に、砂の様な粒状体へのすべりモデルの適用性とその限界を微視的観点から論じ、すべりモデルは、物理的基礎が必ずしも充分でなく、構造変化をもたらす変形の定式化も、粒状体力学の構成上、考慮に入れる必要がある事を指摘した。

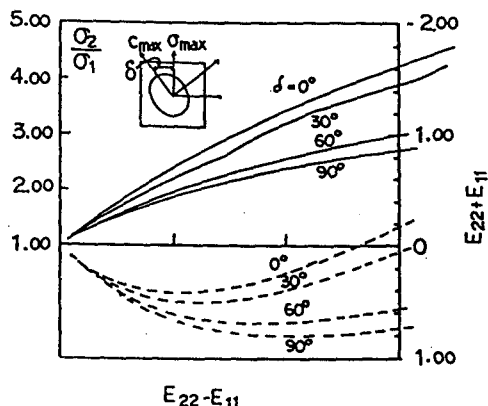


図2 すべりモデルによる変形挙動に及ぼす初期異方性の影響の数値計算例

第4章 構造変化とすべりを考慮した砂の様な粒状体の巨視的構成モデル

第2章、第3章の結果に基づいて、“構造変化”と“すべり”の両者のメカニズムが非弾性変形をもたらすとの仮説に基づく構成モデルの定式化を、通常の応力空間とともにひずみ空間においても行った。両者の定式間に存在する関係も併せて示した。コンクリート、岩質材料に対して提案されている二つの非弾性成分を有する Plastic fracturing model (PFM)との比較を行い、提案する構成モデルが、PFMを含むより広範囲な地盤材料に適用可能なモデルである事を示した。

提案する構成モデルの特性を示すために、応力状態を三軸状態に限定して、具体的な構成モデルを与え、数値計算例を示した。その結果、このモデルが、従来の構成モデルでは、表現できなかった粒状体の変形挙動のいくつかを統一的に記述できる事を示された。例えば、

- (1) 等 γ 線が、平均主応力に依存する挙動。
- (2) 圧密変形とせん断変形の連成的挙動(図3参照)。等が記述できる。

この構成モデルが、砂の様な粒状体の基本的変形・破壊挙動を考える上で重要なものである事を示した。

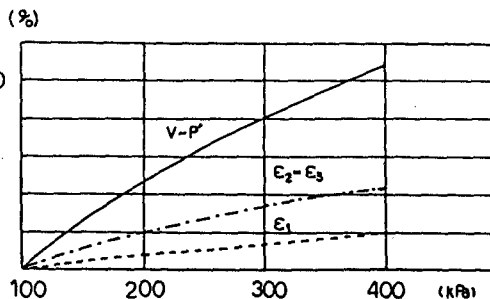


図3 提案モデルによる大きなせん断を受けた砂の等方圧縮時の異方的ひずみの発生に関する数値計算例

第5章 砂の繰り返し载荷時変形挙動に関する異方硬化モデル

本章は、工学的応用に係わる内容である。まず、前章までの結果に基づいて、弾塑性体の変形を支配する各種の関数と、粒状体の微視的変形メカニズムの関係について考察し、従来、地盤材料の構成モデルの主流となっている弾塑性体としての定式化における問題点を指摘した。

しかし、弾塑性モデルの有する数学的簡潔さが、工学的には重要である事を考えて、砂の繰り返し载荷時の変形挙動の表現を主たる目的とする異方硬化モデルを提案した。モデル化に際して、特に、数学的簡潔さを保持する事に注意し、新たな概念を導入した。例えば、

(1) 等方硬化モデルによる負荷面を等塑性係数面と考え、繰り返し変形挙動をモデル化するための境界面とする。

(2) 塑性ポテンシャルを直接に導入せず、応力経路に応じたストレス-ダイレイタンス-関係を設定する。等である。

ここで提案するモデルは、繰り返し载荷時の基本的な変形特性を表現するばかりでなく、非排水変形時のサイクリックモビリティ現象、主応力回転時の塑性変形挙動も表現できるものである事を数値計算例により示した(図4参照)。

最後に、提案モデルの修正、改良を考える上で重要となる概念について基本的な議論を行った。

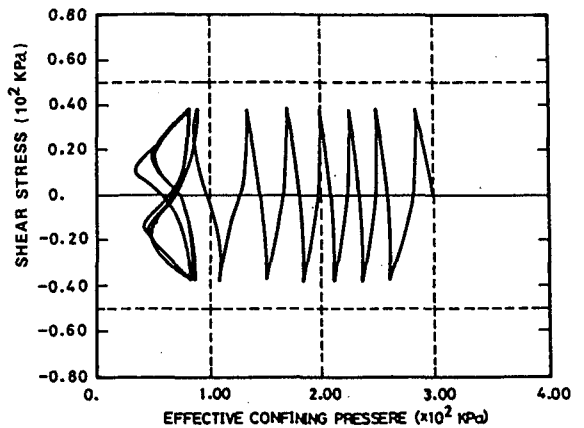


図4 非排水試験時のサイクリックモビリティ現象に関する計算例

第6章 結 論

本論文の内容を概括し、主要な結論を示した。さらに、粒状体力学および地盤材料の構成モデルの分野で、今後必要とされる研究を示唆した。

審査結果の要旨

構造物の基礎を支持している地盤の変形挙動を正確に予測することは、構造物設計上極めて重要なことである。地盤を構成する砂や礫のような粒状材料は、複雑な変形・強度特性を有しており、これを正確に表現できる構成モデルを確立することは、最近の土質工学の基本的問題の一つとなっている。

本論文は、粒状体の変形挙動を微視力学的に考察し、微視的諸量に基づいた構成モデルを考案することにより、砂のような粒状材料の複雑な変形挙動を合理的に説明することを試みたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、粒子間の接触面積に基づくコンタクトテンソルの概念を導入し、このテンソルを用いて粒状体の微視的構造を反映する修正応力を定義した。更に、粒状体の変形挙動が、弾性変形、構造変化による非可逆的変形および粒子間の相対すべりによる塑性変形の三つの成分より成立つものと仮定し、それぞれのひずみの定式化を行った。これにより、従来のモデルでは説明できなかった変形特性、特にダイレイタンス特性が統一的に記述できることを示した。これは新しい知見である。

第3章は、粒子間のすべりの方向がランダムに分布する多重すべりの考え方に基づいて、二重すべり理論の修正について考察したものである。このモデルにより、異方硬化特性および主軸の回転にともなう非弾性的挙動などの砂の変形特性が表現できることを示した。

第4章は、構造変化とすべりの二つのメカニズムに基づく非弾性的変形の定式化を行ったものである。この構成モデルを用いると、通常の三軸圧縮状態での砂の変形挙動として知られている、等 γ 線が平均主応力に依存する挙動および圧密変形とせん断変形が連成する挙動など、従来の構成式では十分に表現できなかった変形挙動が統一的に記述できることを示した。これは重要な成果である。

第5章では、これまで論じた微視的な変形機構を基礎において、繰返し載荷時の砂の変形挙動を表現できる新しい弾塑性モデルを提案した。異方硬化則と応力・ダイレイタンス関係を導入することにより、排水時の変形挙動ばかりでなく、非排水時のサイクリックモービリティ現象および応力主軸回転時の塑性変形をも表現できることを示した。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、砂のような粒状体の変形・強度特性を、粒子の微視力学的な運動機構から説明し、その変形挙動を記述できる合理的な構成モデルを考案し、その適用性を論じたものであり、その成果は土質力学・地盤工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。