

主論文の要旨

題名

限界状態近傍における粘土の
弾塑性挙動と、水～土骨格
連成有限変形解析に関する研究

氏名 野田利弘

主論文の要旨

報告番号

※ 甲 第

号

氏 名

野田利弘

材料強度試験では、往々にして荷重～変位関係でピーク(極値)が見られ、その後の荷重不安定の続く間に変位その他の局所化が進み、やがて破断や滑りその他供試体全体の破壊に至ることが多い。この一連の挙動全体は、これを材料非線形性だけで説明するのには無理があるし、幾何学的非線形性だけで説明するのにも同じように無理があるとされている。

実際の現象が材料非線形性と幾何学的非線形性の両者の重なり合ったものであると言うのは正しいと言えるであろう。しかしこれを言うときには同時に、材料非線形性だけがきわだって卓越して起こる事例を指摘したり、また逆に幾何学的非線形性が有意に機能してこそはじめて起こる現象も検討しておくのでなければ、議論はわかりにくいままに終わってしまう。上に挙げた材料強度試験での「荷重不安定」などは、構成式レベルでの軟化だけでも無理すれば説明できるであろうし、一方、線形弾性体でも座屈はするのであるから、現象記述のためだけであればどちらかひとつの非線形性だけで十分などとなってしまいかねないからである。

本論文の目的は、飽和粘土の力学的な不安定現象について、材料非線形性と幾何学的非線形性の両者の関わり合いを、水～土骨格連成の有限変形計算を道具にして調べることにあるが、その主たる内容はおおよそ以下のようにまとめられる。塑性体積変化を履歴パラメータにとる土の弾塑性モデルは、限界状態概念を基礎にして、排水による硬化と吸水による軟化の両者が可能な、一種独特の土らしいモデルであることを知るのがまず重要である。そしてその数値的な実現のためには、水～土骨格連成の有限変形解析が不可欠であることも強調する。吸水軟化によって正規圧密曲線上のもといた点に同じ土がもう一度帰る現象などは以上のような弾塑性モデルの非線形性(とくに塑性不安定)が第一義的であって、このことを計算に実験事実を添えて説明する。一方、均質一様圧縮場で基本経路を辿っていたはずの供試体が突如として荷重不安定を示す現象は、はじめから抱えていたごく僅かの初期不整によるごく僅かの幾何形状変化の影響が「分岐点」に至って突如として表す効果であると理解するのが第一義的である。これは、本論文では飽和土の「長柱」の圧縮を用いて、やはり水～土骨格連成の有限変形解析によって論じるが、ここでは材料の非線形性は二義的である。ところが土質力学で一般のサイズの供試体の圧縮試験では、とくに荷重ピーク後の不安定や各種の局所化現象は材料と幾何学的との両方の非線形性の効果が間隙水の移動のもとで重

主論文の要旨

報告番号	※甲第	号	氏名	野田利弘
<p>ね合わさって起こっており、その様子も計算で示す。</p> <p>本論文は序論・結論を含め7章からなり、以下本論文の概要を示す。</p> <p>第2章では微小変形の仮定で作られたカムクレイモデルを、あらたに有限変形解析用に体積変化を考慮しつつ拡張した。また、カムクレイモデルの負荷基準を考察し、このモデルが壊れて限界状態近傍にある粘土の(1)限界状態線の下側で排水硬化、(2)限界状態線上で吸排水がなく完全塑性、さらに、(3)限界状態線を越えたところで吸水軟化といった弾塑性挙動を表現できることを間隙水の収支に関連づけて明らかにした。</p> <p>第3章では非排水3軸試験を、境界条件が明確な境界値問題として捉えられる立場から、供試体の4分の1断面を対象に計算を行い、繰り返し川崎粘土供試体を用いた実験事実と対応させて調べた。計算では、3軸試験といえども「エレメント試験」とはなり得ず、軸「ひずみ」速度の違いによって供試体内部の比体積や間隙水圧などの不均質性の発展の様子に違いが生じることを示した。計算で軸「ひずみ」速度が小さい場合は、大きい場合よりも間隙水が十分に移動して、排水硬化と吸水軟化などの土エレメントの弾塑性挙動により比体積が大きくばらつくことがわかるが、実験でも供試体内部で吸水軟化(塑性不安定)が生じているのかを探るために、軸「ひずみ」速度が小さい場合について、軸「ひずみ」13%時の3軸供試体を50分割して比体積を調べた。これを、供試体の見掛けの平均有効「応力」の値と計算で得られる土エレメントの平均有効応力の値と対応づけてみたところ、実際の供試体内部の土エレメントの一部が、初期状態からの弾性膨潤では到達し得ないところにまで吸水膨潤しており、実験の供試体内部でもカムクレイモデルが表現するような吸水軟化が生じているものと推論した。</p> <p>さらに、遅い載荷時にのみ可能な供試体の「エレメント」としての有効応力経路を調べると、実験と計算ともに「変相角」を呈した後、軸差「応力」の増加を確認した。この増加は、実験でも計算でも軸「ひずみ」～軸差「応力」関係における軸「ひずみ」約3%以降の軸差「応力」の直線的増加に対応するが、これは形状変化を考慮し得ない微小変形解析からは得られないことから、供試体の形状変化(geometry change)に起因すると結論づけた。なお、軸「ひずみ」速度の違いによる軸「ひずみ」～軸差「応力」関係への影響を調べたが、供試体の幾何的な対称性を拘束した計算では、ほとんど差が生じないことも明らかにした。</p>				

主 論 文 の 要 旨

報告番号

※ 甲 第

号

氏 名

野田利弘

微小変形解析では、土エレメントが限界状態近傍になるとカムクレイモデルが機能しないことを計算を用いて証明し、壊れて限界状態近傍にある粘土の挙動を調べるには、有限変形解析が有用であることを示した。

第4章では軟弱粘土の実務では壊れる以前の粘土の挙動と同じく、粘土の「破壊後挙動」が重要であるという観点から、3軸試験機を用いた実験と計算により、非排水的に壊した3軸供試体全体の「破壊後挙動」を調べた。非排水的に壊した3軸供試体があるときに発生した過剰水圧の消散・排水過程によって、実験では2回目の非排水「強度」は1回目比べて約1.7倍の増加を得た。計算では2回目の非排水せん断時に軸差「応力」が、圧密過程を経るだけで、そうでない場合と比べ、軸「ひずみ」25%時において約1.3倍増加することがわかった。また、計算で2回目の非排水せん断時の供試体内部の不均質性が1回目の非排水せん断時よりも発展していることを示し、全体として強度を挙げつつも内部の強度の不均質性が発展するという経験的事実を供試体を用いて再現した。

つぎに非排水的に破壊した3軸供試体を、その後セル圧をゆっくりと低下させつつ境界から水を供給しながらさらにせん断を与えた。すると、実験でも計算でも供試体の見掛けの応力経路において「変相角」が現れた頃に発揮していた軸差「応力」が約50%減少し、初期状態の弾性膨潤だけでは説明できない程の体積膨潤を観察した。計算では土エレメントの吸水軟化によるところが大きいことから実験でも供試体全体で、吸水軟化が起きていると結論づけた。

カムクレイモデルが表現できる粘土の吸水軟化挙動に着目して、1要素の3軸供試体を用いた水～土連成計算により、吸水軟化と圧密過程を経て正規圧密線上にもといた点に帰り、せん断開始時と同じ物性（空隙比と応力状態）を有する粘土を計算機の中に作製した（粘土のアニール）。

第5章では、境界非排水・端面摩擦なしの平面ひずみ矩形供試体の1軸圧縮問題を有限変形水～土骨格連成計算を用いて調べた。幾何的拘束のない全断面を対象にし、実験で用いる供試体には必ず傷が含まれていることを考慮して、矩形状平面ひずみ供試体の側面にあらかじめ幾何的な初期不整としてごく僅かな切り欠きを設けて計算した。その結果、供試体は荷重～変位関係において基本経路から離脱し、非対称1次コサインの分岐モードを発現しつつ荷重不安定になる様子を発見的に検出した。

この切り欠き計算は分岐の近似計算であるので、今度はあらかじめ初

主 論 文 の 要 旨

報 告 番 号	※ 甲 第	号	氏 名	野 田 利 弘
<p>期不整として、振幅が小さく波数の異なる非対称コサインモード(分岐モード)を横4cm×縦72cmの「長柱」供試体側面に操作的に導入して計算した。その結果、基本経路からいくつも分岐する様子を得るとともに、低次の(波数の少ない)分岐モードで発現した場合ほど、ピーク荷重が小さいことを示し、幾何学的非線形性が重要であることを明らかにした。</p> <p>つぎに横12cm×縦36cmの矩形供試体側面に、初期不整として大きさ1/100cmの1次～4次の非対称コサインモードを設定し、直径3.5cm、高さ8cmの川崎粘土供試体を用いた非排水3軸試験におけるせん断「強度」に及ぼす軸「ひずみ」速度効果が現れたレンジを考慮して、軸「ひずみ」速度4.9%/minと$9.12 \times 10^{-3} \%$/minを与えて計算した。この結果、遅い载荷の場合は速いときと異なり、高次の初期不整でも1次モードが発現して軸差「応力」が小さくなることがわかった。一方、初期不整の大きさや形状も含めてこの供試体の寸法を100倍にして計算を行ったところ、今度はたとえ遅い载荷であっても1次のモードを発現することなく、荷重は上がり続けた。供試体の寸法を100倍にした計算が間隙水の移動が生じにくい载荷が速い場合に対応することを考慮すると、実験で得られるような軸「ひずみ」速度効果の原因は、水～土骨格連成場においてちょうどこの形と寸法をもった供試体が有する初期不整(傷)に誘発されるかたちで発現する分岐解(初期不整解)の違いではないかと推論した。</p> <p>そして、この初期不整の大きさが荷重～変位関係に及ぼす影響を調べ、3軸供試体が必ず含むような傷が1/10000cm～1/10cm程度であれば、試験結果には大差は生じないと予想した。</p> <p>供試体の分岐後の荷重不安定時であっても荷重～変位関係に及ぼす有限要素のメッシュサイズ依存性はほとんどないことを計算で示した。これは土骨格の体積変化が常に水の出入りによって拘束される計算のためであると考えた。</p> <p>第6章では、はじめからすべての土エレメントが限界状態線上にある平面ひずみ矩形供試体の摩擦なし・非排水1軸圧縮問題を考えたところ、剛塑性有限要素法を用いた水～土骨格連成変形解析をするかぎり、この供試体は「基本経路」上の任意の1点からすべての「分岐モード」を発生させられることを示した。これは、Hill and Hutchinsonが言及している固有値の集積点(point of accumulation)を観測し、砂の実験で観察されたいくつかの分岐パターンがこの計算結果に対応するものと考えた。</p>				