

[別紙2]

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 シャナザリ ハビブ

地盤の地震時挙動を数値計算する手法は、地震災害の予測および対策の効果を見積もるための重要な方法の一つである。この手法の長所は複雑な地形や地層、あるいは構造物と地盤の相互作用を容易に取り扱えることであり、実際にも頻繁に利用されている。それと同時に問題点も幾多あり、その一つに使用されている土の応力ひずみモデルの良否に計算の信頼性が強く依存することがある。この事情は震動の強弱を推定する場合にもあてはまるが、ゆる詰め砂地盤で過剰間隙水圧が蓄積して地盤が軟化してしまう液状化の予測において、特に深刻である。

現在の時点において、液状化を含む地盤の地震応答解析には、いくつもの手法が利用可能である。そこで利用されている応力ひずみモデルのうち、或は砂の単調静的載荷、すなわちせん断応力が単純に増加する時の挙動を理想化した弾塑性モデルに基づいており、地震時に特有の繰り返しせん断荷重載荷に実験的に関する実験的知見があまり考慮されていない。また他の手法は砂の繰り返しせん断挙動に基づくモデル化が行なわれているものの、1サイクルごとの累積変形しか考慮しない粗いモデルであったり、非排水せん断条件にしか適用できない過剰間隙水圧上昇挙動であったりしている。後者はすなわち、間隙水圧上昇に伴う水の流動は考慮外ということである。また、応答解析への適用にこだわらず、砂の繰り返しせん断挙動に関する実験的研究を見渡してみると、剛性やエネルギー減衰、非排水せん断時の過剰間隙水圧上昇に関する研究が詳細かつ豊富であるのに対し、正のダイレイタンスーすなわち排水せん断時の体積収縮に関する研究が少ないことが判る。数少ない例でも繰り返しせん断載荷のサイクル数が少なく、10ないし20サイクル以上に及ぶ地震載荷状況に直接応用できない。

上述のような状況になっている理由として、液状化の直接の原因である過剰間隙水圧上昇があまりにも重視されすぎたことが考えられる。水圧上昇を予測することの重要性は疑うべくもないが、問題の第一は、水圧上昇100%すなわち液状化としても、液状化発生後の地震荷重の継続の程度に応じて被害の度合いに大差の生ずることが、水圧上昇量だけでは評価できないことである。また第二の問題は、実地盤のように水圧上昇と同時に透水と圧力の伝播が起こるような状況は、非排水せん断モデルだけでは極めて解析しにくいこと、すなわち根拠に乏しい恣意的なモデル化を相当行なわなければならないことである。このような視点から本研究では、繰り返し載荷を多数行ないつつ、砂の体積収縮量を調べ、そのモデル化を行なった。それと同時に、従来の弾塑性論の問題点と考えられる塑性ひずみ増分方向の一意性、つまりひずみ増分方向が応力増分方向には依存しない、という仮定の良否を検定した。

本論文は全11章から構成されており、第一章では研究目的と研究方針を説明した。また第二章では、中空ねじりせん断装置を用いた実験の手法について詳しく説明されている。そして第三章以降が研究の内容に当たる。

第三章は等方圧密実験の結果を述べた。これは排水条件で等方的な圧縮応力の増減を繰り返すもので、メンブレン貫入誤差を補正式を得るのが目的であった。この貫入誤差とは砂試料を包むゴム膜(メンブレン)が砂粒子の隙間に食い込む現象が起こり、砂の圧縮変形を過大に見積もってしまうことになる。本研究の実験では、このような体積収縮量を本章の補正式によって修正している。

第四章では弾塑性論の根源的な仮定である、塑性ひずみ増分の方向が載荷履歴や応力増分方向に依存せず、現在の応力状態から定まる塑性ポテンシャルによって一義的に定まる、という考え方を検証した。そのために、二通りの大幅に異なる履歴をたどった後に同一の応力状態を実現し、そこから発生する塑性ひずみ増分の方向を比較検討した。その結果、応力履歴によってひずみ増分には影響が生まれることを確認した。このような現象は既存の弾塑性モデルでは再現できないものであり、研究者らが創案してきた全く異なる理論によって説明されるものである。

第五章では繰り返しせん断実験の結果を提示した。排水せん断では体積収縮とせん断剛性の増加、非排水せん断では過剰間隙水圧の上昇と砂の軟化が起こった。

本研究の中心テーマは、繰り返し排水せん断時の体積収縮量の評価である。そこで第六章では、体積収縮について詳しく検討した。それによれば、載荷一サイクル当たりの体積収縮量は、現時点の間隙比(充填率)のみならず、第一サイクル以降に累積した体積収縮にも影響を受けることがわかった。また体積収縮に伴って砂のせん断剛性も増えるが、剛性増加もまた現在の間隙比だけでなく、せん断履歴の影響をも被っ

ていることがわかった。そして剛性増加と体積収縮の間に一対一の相関を見出した。

第七章では、繰り返しせん断中に消費されたひずみエネルギーと指標にして、過剰間隙水圧や体積収縮量との相関を検討した。既往の研究によれば、過剰間隙水圧とひずみエネルギーとの間には、良好な相関関係が存在し、それをモデル化することも可能である。しかし刻々の体積収縮について、同様のモデル化はできなかった。ただしサイクルごとの残留体積収縮に限れば、累積ひずみエネルギー消散量の関数としてこれをモデル化することは可能であった。

刻々の体積収縮量を決定できるモデルを構成するためには、エネルギー相関というアプローチが使えないことが前章で判明した。そこで第八章ではせん断ひずみと体積ひずみの増分を刻々の応力比(せん断応力と圧縮応力との比)に関連づける「ストレスダイレイタンス」の手法を試みた。これは従来、単調載荷に対して適用され、ある程度の成果を挙げて来たものである。これを百を越える繰り返し回数の実験結果にも適用してみた。その結果、除荷と再載荷を含む繰り返し載荷について、モデル化をすることが出来た。特に不規則載荷においても、応力比・ダイレイタンス比グラフ中の対角線上からストレスダイレイタンス曲線が始まること、見出されたことは、第九章で展開されたモデル化において有用であった。

本研究の成果をまとめた変形予測モデルを使用した例が、第十章に示されている。モデルは未だ一次元の応力条件(水平地盤の一方向震動)にしか適用できない簡単なものではあるが、過剰間隙水圧が地震時に上昇する様子、そして砂のせん断剛性が低下する現象を再現することが出来た。

以上をまとめると本論文は、地震荷重の作用する砂質地盤の挙動のモデルという問題に対して、要素のせん断実験という立場から研究したものである。その成果は地盤の地震応答と液状化の解析のために有用であり、地盤工学と耐震工学上の業績は大きい。よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。