

学 位 論 文 題 名

砂の繰返し載荷試験結果に及ぼす諸因子の影響と 試験結果の適用に関する研究

学位論文内容の要旨

室内試験から地盤の液状化強度特性および動的変形特性を求める場合、繰返し三軸試験が広く用いられている。しかし、この試験では繰返し載荷時の土要素の応力状態が実際の地盤内の状態と異なっている。それに対し、中空ねじり試験あるいは単純せん断試験では、原位置の応力状態により対応した条件で試験を行うことができる。一方三軸試験は、試験装置の取扱い易さ、不攪乱試料の成形し易さ、試験装置の普及度から、今後も広く研究および実務において用いられると考えられる。したがって、両試験から得られた試験結果の相互関係および試験結果に及ぼす要因を的確に評価することによって、繰返し三軸試験の価値も高まると考えられる。そこで、本論文では三軸試験装置および中空ねじり試験装置を用い、繰返し載荷に対する砂の変形・強度特性を求め、試験結果に及ぼす各種影響因子を定量的に評価することによって、現状の液状化判定法に対して試験結果の適用性を図ること、および現在基準化されていない動的変形試験方法の確立のための提言を目的としている。

本論文は5章よりなっており、各章を要約すると以下のようである。

第1章では、地盤の動的変形・強度特性を評価する必要性および繰返し載荷試験方法の現状と問題点を述べ、これに対応した本研究の目的を述べている。また、既往の研究成果をまとめ、本研究の位置づけを行っている。

第2章では、本研究で用いた試料、および供試体の異方性の影響を調べるために用いた供試体作製方法について述べている。また、微小なひずみレベルから大ひずみレベルまで、1つの装置を用いて試験を行うことが可能なように改良した試験装置の概要、およびその試験方法について示している。

第3章では、液状化強度特性に影響を及ぼす諸因子について、その影響の程度と試験結果の液状化判定への適用性について検討している。得られた結果は以下のようにまとめられる。

供試体の作製方法の影響に関しては、作製方法の相違すなわち構造異方性の相違によって、得

られる液状化強度は異なり、特に三軸試験においては供試体作製方法によって2倍以上も液状化強度が異なることが明らかにされた。

過圧密履歴については、不攪乱試料の場合、室内で短時間の過圧密履歴を与えた場合よりも、原位置で長期間の過圧密履歴を受けた場合の方が液状化強度の増加率は高くなることが示された。また、再構成砂に室内で短時間の過圧密履歴を与えた場合の液状化強度増加率は、不攪乱砂の場合よりも高くなることが明らかにされた。

異方圧密履歴の影響に関しては、液状化強度に及ぼす影響の程度が供試体の初期構造によって異なることが三軸試験において示された。このことは、異方圧密履歴によって導入された供試体のダイレイタンス特性の相違とともに、三軸伸張条件での変形特性の変化が、同じ異方圧密履歴を受けても初期構造によって異なるためであるとしている。それに対して、中空ねじり試験では、供試体の作製方法によらず異方圧密履歴の影響は認められなかった。これは、異方圧密時と繰返し載荷時の主応力方向が異なるため、三軸試験のような大きな影響が現れなかったとしている。

三軸試験と中空ねじり試験による液状化強度の関係は、供試体作製方法および試料の相違によって複雑に変化した。そこで、両試験による液状化強度の関係を定量的に評価するために、供試体の異方性の程度を現すパラメータとして軸ひずみ比 $\varepsilon_{a,comp}/DA$ および間隙水圧比 $U_{1,comp}/U_1$ を採用した。その結果、軸ひずみ比および間隙水圧比と三軸試験と中空ねじり試験による液状化強度の比とは密接に関係しており、供試体の作製方法および試料に依らない一義的な関係が存在することが明らかにされた。これらのパラメータを用いることによって、三軸試験で得られた液状化強度から、よりの確な液状化強度の予測の可能性が示された。

第4章では、第3章で検討した諸因子が、動的変形特性に対してはどのような影響を及ぼすかを検討している。また、動的変形試験を行う際に特有な問題である、繰返し載荷時の排水条件、載荷回数、ステージ数等の影響についても示している。得られた結果をまとめると以下のとおりである。

供試体作製方法の影響については、作製方法が異なることによって得られる動的変形定数はやや異なることが示された。この傾向は三軸試験と中空ねじり試験の両結果に認められたが、供試体作製方法の相違による動的変形定数の差は、 $\gamma = 10^{-6}$ でのせん断弾性係数 G_{max} において、10～15%程度であり、液状化強度にみられたような大きな相違は認められなかった。また、三軸試験と中空ねじり試験による動的変形定数を比較した結果、どの供試体作製方法においても三軸試験による G がひずみの範囲によらず低くなった。これは、微小ひずみレベルにおいては、三軸

試験における供試体端面のベディングエラーの影響に、またひずみレベルの大きいところでは排水条件の相違によるものであるとしている。

異方圧密履歴の影響については、 G は三軸試験では異方圧密履歴を受けることによって変化するが、中空ねじり試験においては、異方圧密履歴の影響は現れないことが示された。これは、三軸試験と異なり中空ねじり試験では、異方圧密時と繰返し載荷時の主応力方向が異なるため、異方圧密履歴を受けても繰返し載荷時の変形特性が三軸試験のように変化しなかったためとしている。

繰返し載荷方法に関しては、測定する載荷回数によって得られる G 、 h は変化するが、その傾向は排水条件によって異なり、ひずみレベルが大きくなると排水状態では載荷回数の増加とともに G は増加し h は減少するが、非排水状態では逆に G は減少し h は増加することが示された。また、ステージ数を多くすると、ひずみレベルの大きいところでは G は高く h は低くなった。これは、以前のステージで受けた繰返し履歴による硬化の程度が、ステージ数の大小によって異なり、間隙水圧の発生量に相違が生じたためとしている。

さらに、第3章で得られた液状化強度と G_{max} の関係を比較している。その結果、両者の関係は同じ試料を用いても供試体の作製方法の相違や異方圧密履歴を受けることによって多様に変化し、一義的な関係は存在しないことが明らかにされた。

第5章は、本論文の結論であり、各章で得られた結果を要約している。

以上のように構成された本研究より、微小ひずみレベルから液状化に至るような大ひずみ領域までの広範なひずみレベルの、砂の繰返し載荷に対する変形特性および強度特性に及ぼす各種因子の影響が定量的に評価された。また、得られた試験結果から、試験方法の確立のための有用な提言とともに、供試体の異方性と試験時の応力系を考慮した液状化強度の評価方法が示された。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	土 岐 祥 介
副 査	教 授	三田地 利 之
副 査	教 授	鏡 味 洋 史
副 査	助教授	澁 谷 啓
副 査	助教授	三 浦 均 也

地震の多発国である日本においては、地震時に発生する砂質地盤の液状化現象により多大な被害が生じている。この液状化現象のメカニズムを解明し、その対策を行うためには、地盤材料が繰返し載荷を受けたときの強度および変形特性を適切に評価できる室内試験方法を確立するとともに、試験結果に及ぼす各種因子の影響を定量的に把握していなければならない。

このような背景のもとで本論文は、種々の条件のもとで室内繰返し載荷試験を行い、試験結果に及ぼす諸因子を定量的に評価するとともに、現状の液状化判定方法への試験結果の適用性の検討、および現在進められている繰返し変形試験方法の基準化のための提言を行ったもので、5章より構成されている。

第1章では、本研究の背景、目的および内容の概要について述べている。

第2章では、本研究で用いた試料、および著者が新たに開発した供試体作製方法を含む試験方法について述べている。また、微小なひずみレベルからの変形特性を正確に測定するために改良した試験装置の概要について示している。

第3章では、液状化試験結果に及ぼす諸因子の影響の定量的評価と、試験結果の液状化判定への適用性について検討している。具体的には、供試体作製方法、過圧密履歴および異方圧密履歴の影響を考察するとともに、三軸試験とねじり試験による液状化強度の比較を行い、液状化判定に広く用いられている三軸試験結果から、実際の地盤内における応力条件との相違を考慮に入れた液状化強度の推定方法を示している。

この中で、供試体作製方法の影響については、作製方法の相違によって得られる液状化強度は異なり、特に三軸試験においては供試体作製方法によって2倍以上も液状化強度が異なることを明らかにしている。したがって、異方的な堆積状態にある原位置から鉛直方向に採取した不攪乱試料を用いて、三軸試験から液状化強度を推定する場合、実際の地盤の液状化強度を必ずしも的確に判定できないことを示している。

そこで、三軸試験よりも地盤内での地震時の応力状態に近い状態で試験ができるねじり試験を行い、三軸試験結果と比較している。試験結果に基づき、新しいパラメータとして軸ひずみ比 $\varepsilon_{a.comp}/DA$ の導入を提案し、三軸試験で得られた液状化強度から、在来の方法にくらべ信頼性の高い液状化強度の予測が可能であることを示している。

第4章では、繰返し変形特性に及ぼす供試体作製方法、応力履歴、試験装置の相違、および繰返し変形試験特有の問題である繰返し荷重の載荷方法の影響について検討している。その結果、変形定数を室内試験から求める場合、三軸試験で得られる変形定数はねじり試験よりも多くの因子の影響を受けるが、それらの影響を定量的に評価することによって、試験が容易で普及度の高い三軸試験から、十分に信頼性の高い結果を求め得ることを示している。

また、繰返し載荷試験と単調載荷試験による変形係数の比較を行い、単調載荷試験での測定精度の向上によって、両試験の微小ひずみレベルでの変形係数は一致することを示している。このことは、従来1つの供試体から求められなかった微小ひずみ領域での変形係数と破壊強度が同時に得られることも示している。

さらに、第3章で得られた液状化強度とせん断剛性率の関係を比較し、両者の間には在来いくつかの報告で示されているような一義的な関係が必ずしも存在しないことを示している。

第5章は、本論文の結論であり、各章で得られた結果を要約し、今後の課題について述べている。

これを要するに本論文は、砂の広範なひずみ領域での繰返し載荷に対する変形特性および強度特性に及ぼす各種因子の影響を定量的に評価し、地盤の変形および強度特性を精度よく求めるための室内試験方法に対して重要な知見を与えている。また、現在基準化されていない繰返し変形試験方法の確立のための有用な提言を行うとともに、三軸試験による在来よりも信頼性の高い液状化強度の評価方法を提案しており、地盤工学および土質工学の進歩に寄与するところが大きい。よって、著者は、博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。