

	グ リンリン
氏 名	GU LINLIN
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博第1061号
学位授与の日付	平成28年9月7日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学位論文題目	Quantitative Evaluation for the Deformation of Structures Built in Soft Ground Subjected to Dynamic Loads (軟弱地盤に建設される土構造物の動的荷重による変形特性の定量的評価)
論文審査委員	主査 教授 張 鋒 教授 前田 健一 教授 小畑 誠 教授 野田 利弘 (名古屋大学)

論文内容の要旨

In recent years, the research on the multi-phase problems in Geotechnical Engineering has drawn more and more attention, such as unsaturated slope failures caused by heavy rain, liquefaction caused by earthquakes, long-term stability of geological disposal of high-level nuclear waste, and so on. However, the researches are limited, and most of the problems have not been worked out. When the geotechnical disasters occurred, they may cause tremendous loss of life and properties, therefore understanding the mechanism of multi-phase geotechnical disasters are necessary and urgent. In this thesis, the multi-phase problems especially the deformation of structure built on soft ground subjected to earthquake loading and train loading are quantitatively evaluated based on the sophisticated constitutive model proposed by laboratory experiments and field tests.

Firstly, element tests are conducted to investigate the mechanical behavior of Toyoura sand, standard Japanese sand. Actually, confining pressure besides void ratio also influences the mechanical behavior of sand. Finding out if the confining pressure is another state parameter for sand requires laboratory tests at different ranges of confining pressure. There are various laboratory test data at medium and high confining pressure ($\sigma'_{m0} \geq 49\text{kPa}$), while the test data at low confining pressure ($\sigma'_{m0} \leq 49\text{kPa}$) are limited. Element tests including undrained cyclic loading tests as well as drained and undrained strain-controlled monotonic loading test under low and normal confining

pressure (5-98 kPa) were carried out to investigate the influence of confining pressure on the mechanical behavior of Toyoura sand in loose and medium dense state. The confining-stress dependency was investigated systematically by test data and data collected under high confining pressures (1-3 MPa). The results show that loose sand under low confining pressure behaves like dense sand under normal pressure when subjected to monotonic loading, on the other hand, when subjected to cyclic loading, the smaller the confining pressure is, the easier the sand is to liquefy.

Secondly, numerical tests based on a sophisticated constitutive model and a soil-water coupled finite element method (FEM code: DBLEAVES) is used to predict the mechanical behavior of real designed dike and the surrounding ground not only liquefaction behavior due to seismic motion but also its post-liquefaction behavior. The dike subjected to two different seismic excitations is numerically simulated. The results show that earthquake affects not only the immediate behavior of dike and the surrounding soils but also their long-term settlement due to post-earthquake consolidation. The enhancement effect of partial ground improvement with permeable injection of cement is also simulated and it is found that the deformation can be reduced to almost half, indicating that the ground improvement is effective, and that the method proposed in this study can provide a quantitative evaluating method for the daily design of geoenvironmental engineering.

Thirdly, the settlement of piled-raft foundation of Shanghai soil subjected to high-speed train loading is considered systematically. There is a case study that railway settled significantly due to cyclic train loading after a one-month trial operation. The settlement of soft soils due to traffic loading can be divided into two parts: a settlement induced by plastic deformation of the soils subjected to undrained cyclic loading, and accumulative consolidation settlement induced by the dissipation of excess pore water pressure (EPWP) after the loading. Numerical simulation was conducted to investigate the mechanism of the settlement of the piled-raft foundation and EPWP of soft soils caused by the cyclic train loading. In order to demonstrate the performance of this numerical simulation, the calculated results were compared with the data recorded in the one-month trial operation and the reliability of the proposed numerical method is confirmed.

Fourthly, in order to decrease the settlement due to high-speed train loading and ensure the safety of train operation, countermeasure by ground treatment is proposed and the reinforcement effect is numerically analyzed. Countermeasures by infiltration grouting method in the bearing layer of pile group and split grouting method in soft clay layer are investigated respectively. It is found that infiltration grouting in the pile bearing layer can increase efficiently the tip resistance of the bearing layer and consequently reduce the settlement greatly. On the other hand, the split grouting method in soft clay layer cannot increase efficiently the frictional resistance between the clay and the pile group and therefore has less effort in reducing the settlement. Because of lack of recorded data after the ground treatment, numerical simulation is also used to predict the long-term settlement and the change in the EPWP during one-year period.

According to the above discussion, the research on the deformation of structures subjected to earthquake loading and cyclic train loading is comprehensively conducted, and it is useful for the development of geomechanics and can provide the theoretical foundation to solve these kinds of engineering problems.

論文審査結果の要旨

近年に多相系における地盤工学の諸問題はよく議論されるようになった。例えば、豪雨によって表層斜面の崩壊問題、地震による砂質地盤の液状問題、高レベル放射性廃棄物地層処分の長期安定性問題など様々な課題が解決しなければならない。自然災害が発生するたびに、人命・インフラと自然環境は大きな被害を受けている。多相系における地盤災害のメカニズムを解明するために、室内・現場試験は勿論重要であるが、適切な数値解析手法を用いて検討することも重要である。本論文の目的は論理的な地盤構成式を提案し、それに基づき、多相系の地盤工学諸問題、特に地震荷重、列車振動荷重による地盤・構造物の変形を適切に評価できる解析手法の確立することである。

本研究では、まずに地盤材料の要素レベルでの力学挙動を実験的に調べることに着手した。地盤の変形特性を精度良く表現するためには、要素試験によって種々の拘束圧における砂の力学挙動を把握する必要がある。中・高拘束圧 ($\sigma_{mo} \geq 49\text{kPa}$) での要素試験は多く実施されているが、低拘束圧 ($\sigma_{mo} < 49\text{kPa}$) の要素試験はまだ十分ではない。本研究では、低・中拘束圧条件下での非排水繰返し三軸試験、排水・非排水単調載荷三軸試験を実施し、異なる間隙比の砂の力学挙動を検証した。排水・非排水変位制御単調載荷三軸試験を実施した結果、間隙比だけでなく、拘束圧も砂の粗密状態を判断する要因になることがわかった。また非排水繰返し三軸試験も実施した。その結果、初期拘束圧依存性は繰返し載荷においても確認できた。すなわち、拘束圧も砂の粗密状態を判断する要因になることがわかった。

次に、有限変形理論に基づいた水・土連成の静的・動的一体型有限要素法 (FEM) を用いた解析手法により、堤防液状化による沈下の定量評価を実施した。従来の解析手法では、液状化は液状化解析手法、沈下は圧密沈下理論をそれぞれ用いて評価するが、その一貫性が欠けていた。本研究で提案した静的・動的一体型有限要素解析手法を用いることで、地盤が最初から液状化するかどうかを指定しなくても、計算の過程で自動的に判断することができる。また、液状化後の圧密による堤防沈下も自動的に計算することができ、地盤材料のパラメータの改ざんは一切なくて済む。解析の合理性が確保されていることで、精度良く堤防沈下を定量的に評価することができた。また、浸透 固化工法を用いた地盤改良による同堤防の耐震補強効果も同様な手法を用いて検討し、約半分の変位を抑えたという結論に至った。このような解析手法を用いれば、定性的だけでなく、定量的な評価にも適応できる可能性を示唆した。

さらに、列車の振動荷重による軟弱地盤中に建設された基礎の長期にわたる沈下について、定量的な評価手法を検討した。この問題は今までの研究では、振動荷重を時系列的に計算することで沈下量を定量的に評価することが皆無であった。その原因は地盤の静的 (列車通過後の過剰間隙水圧の圧密消散) と動的 (列車通過時) 力学挙動を統一的に評価できる解析手法が確立されていなかったことにある。本研究では、前章でも述べたように、軟弱地盤の静的・動的力学挙動を統一的に評価できる構成式に基づいた水・土連成の静的・動的一体型 FEM を用い、高速列車の振動荷重を時系列的に計算することで、軟弱地盤に建設されたパイルドラフト基礎の長期沈下を精度良く計算した。得られた解析結果は現場計測データと比較することで、その合理性が確認された。ただし、計算量が莫大であるため、長時間を要し、現在の計算能力の限界で、一ヶ月間の沈下をしか計算できないのは現状である。

最後に、列車の振動荷重による軟弱地盤の長期沈下を抑えるために、どのような対抗策が有効であるかを調べるために、確立された解析手法により、数値実験も実施した。施工条件と能力を勘案して、2種類の地盤改良パターンを調べた。すなわち、摩擦抵抗を高めるための中間粘土層を割裂浸透 固化工法で固める方法と、先端支持抵抗を高めるための底部砂質土層の浸透 固化工法で固める方法で地盤改良方法の有効性を調べた。その結果、先端支持抵抗を高める工法がもっとも効果的であることが確認された。この結果は現場施工において工法の選定に理論根拠を提供することができ、工学的応用価値が多いにあることは明白である。

以上の結果に基づき、本論文で得られた知見は地盤力学の理論発展だけでなく、工学的応用価値も大にあることから、博士 (工学) 論文として十分価値があると認める。