

氏名	ホウ ゲン ホウ 包 元 鋒 BAO YUANFENG
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博第841号
学位授与の日付	平成24年3月23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	Influence of Geometric and Material Nonlinearities of Structures on Soil-Structure Interaction in Superstructure-Foundation-Soil System Subjected to Cyclic Loading (繰返し荷重を受ける上部工・基礎・土一体系の相互作用に与える構造物の幾何学非線形性と材料非線形性の影響)
論文審査委員	主査 教授 張 鋒 教授 中 井 照 夫 教授 小 畑 誠 教授 野 田 利 弘 (名古屋大学)

## 論文内容の要旨

With the rapid development of digital computers, modeling a complete system consisted of superstructures, a foundation and soils has become possible and necessary to conduct dynamic analysis for the problems involved soil-structure interaction (SSI) in the field of geotechnical engineering. Unfortunately, due to different aims between geotechnical engineering and structural engineering, geotechnical engineers usually pay more attention to the soil properties than to the structures. Vice versa, structural engineers usually pay more attention to the structural properties than to the soils. As a result, in the simulations involved SSI, sophisticated models describing geometric and material nonlinearities are usually applied only in one aspect and another aspect is neglected. In this dissertation, we want to improve the accuracy of the FEM analysis for the problems involved SSI by introducing nonlinear structural finite element schemes to geotechnical engineering.

Firstly, a rigorous numerical method for analysis of geometric and material nonlinear dynamic behavior of space beams is introduced. In this formulation, the geometrical nonlinearity of structures is solved by a co-rotational technique, which has attracted many researchers' attention in nonlinear structural analysis. By this approach, rigid displacements can be removed from finite deformations. As to the material nonlinearity, an elasto-plastic constitutive model called "mixed strain hardening

bilinear model" is employed based on the Von Mises yield criterion. The effect of shear stresses due to both transverse shear deformation and Saint-Venant's torsional shear deformation is included in the yield criterion. Based on above two points, a Timoshenko beam element with thin-walled cross section called TWSB, short for Thin-Walled Space Beam, is established, which has the ability to deal with the analysis of the column or beam with a small length-section ratio by taking into consideration the geometric and material nonlinearity. This beam element is coded and embedded into a FEM program called DBLEAVES.

Then, the framework of FEM dynamic analysis theory for a complete system, which consists of superstructures, a foundation and a ground, is discussed. In order to take into account the interaction between soil and water, a soil-water coupling two-phase field theory is addressed based on finite deformation algorithm. The displacement of the solid  $u$ , and the pore water pressure  $p$ , are used as the unknown variables. In the discretization of the governing equations in space, both FEM (Finite Element Method) and FDM (Finite Difference Method) are used. And Newmark- $\beta$  method is used to realize the discretization of field equations in time. In order to describe the mechanical behavior of soils subjected to cyclic loading under undrained condition, a constitutive model called 'cyclic mobility model' is presented briefly. A beam element for RC piles called 'AFD model' is addressed subsequently, which can consider the axial-force dependency in the nonlinear moment-curvature relationship.

In order to investigate the geometric and material nonlinearities of structures on SSI in superstructure-foundation-soil system subjected to cyclic loading, two- and three-dimensional FEM dynamic simulations are conducted for an elevated bridge system, respectively. From the results of calculation, it can be shown that large deformations of superstructure can be traced in the whole process of earthquake and the extra moment of superstructure respected to the bottom of pier will become remarkable due to these large deformations. Furthermore, as the result of proper description for the extra moment occurred in the superstructure, the external forces acting on the piles from the superstructure could be evaluated more reasonably. In the process of simulation, the soils near to the group-pile foundation show very large shear strain compared with the soils in other areas. The soils in far field, however, are less influenced by the soil-structure interaction.

Therefore, in order to ensure the accuracy of dynamic analysis involved SSI problems in geotechnical engineering, modeling a full system of superstructure-foundation-soil is necessary and the individual nonlinearities of both the soils and the structures should be properly described respectively. The work in this thesis provides us a tool to realize the above purpose. But it should be pointed out that this study is just a beginning, and there are still other works to continue within this framework in the future.

## 論文審査結果の要旨

軟弱地盤に建設される構造物の耐震性能を評価する際、解析手法の精度向上のため、構造物と地盤材料の幾何学非線形性（有限変形）と材料非線形性の高精度構成モデルを同時に用いることで、構造力学と地盤力学の双方の観点に基づいた、大地震時の上部構造物・下部基礎・地盤の一体系の数値解析手法を開発することは本論文の目的である。

構造物の力学挙動は上部構造物だけでなく、地盤・下部基礎の非線形特性にも大きく依存している。しかしながら今までの研究において、構造力学分野では上部構造物、地盤力学分野では地盤・下部基礎のみに注目することが主流である。結果として、このような解析手法の精度は構造力学分野と地盤力学分野の双方から常に疑問視されてきた。分野の壁を越えた解析手法を確立する気運が徐々に高まっている。本研究はこのような構造力学分野と地盤力学分野の壁を越えた研究課題に着目し、対象とする鉄鋼構造物と地盤の個々の構成部材を要素レベルで適切に評価する構成式を用い、上部構造物・下部基礎・地盤の一体系力学モデルにより、精度の高い数値解析手法の構築を試みた。

本研究により得られた研究成果は以下のとおりである：

既存の鉄鋼構造物の高精度解析手法を取り入れることにより、地盤の液状化を含めた上部構造物・下部基礎・地盤の一体系の数値解析手法の精度を確実に上げることができた。例えば、構造物の幾何学非線形性を導入することにより、上部構造物の傾きに生じる死荷重の影響、液状化による地盤剛性の喪失にともなう杭の座屈現象といった複雑な力学特性を表現できるようになり、下部基礎の耐震性能評価の精度を確実に上げることができた。

また、地盤の力学挙動に関する最先端の構成式を導入することにより、上部鉄鋼構造物の解析手法の精度向上も確実にとなる。例えば、地盤が液状化した場合、地盤・構造物の相互作用が強非線形性挙動を示し、等価バネといった従来の簡便法では対応できない。一方、提案する方法は上部構造物・下部基礎・地盤の一体系を解析の対象とするため、地盤・構造物の相互作用を適切に評価することができるようになり、上部鉄鋼構造物の力学挙動の経時変化地盤材料と構造物の双方において、材料と幾何学の非線形性特性を高度のモデルで表現することにより、根拠の乏しい様々な解析モデルに関する簡略化を無くし、数値解析に関する理論研究の発展に貢献できたと思う。特に、本研究は構造力学分野と地盤力学分野に跨る研究を遂行するものであり、得られる成果は両分野を融合する研究の普及に繋げていく素材となり得る。

鉄鋼構造物と地盤の力学挙動に関する最先端の構成式を同時に導入することにより、地盤・構造物の解析手法の精度を向上させ、数値解析に関する理論研究の発展に貢献するだけでなく、土木構造物の耐震性能評価手法の高度化にもつながることが期待できる。特に、構造力学と地盤力学の両分野に同時に満足できる評価手法を提供できることは不可能ではないことが証明された。したがって、本論文で得られた知見は工学的応用価値が大であり、博士（工学）論文として十分価値あると認める。