

氏名	いしかわ あきら 石川 明
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成22年 3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) 土木工学専攻
学位論文題目	土の非線形弾性構成則を用いた複合地盤のマルチスケール解析法の開発
指導教員	東北大学教授 京谷 孝史
論文審査委員	主査 東北大学教授 京谷 孝史 東北大学教授 風間 基樹 東北大学准教授 寺田 賢二郎 東北大学准教授 渦岡 良介

論文内容要旨

性能規定型の構造物の設計が広まる中で、地盤改良を併用する「複合基礎」工法が増加している。上部構造物から要求される基礎の性能を満足させるために、「原地盤の力学特性を最大限に発揮させ、足りない部分を最小限の地盤改良で補う」といった設計が増え、設計者の力量が試される時代になってきている。こうした中で、改良体・杭・地盤が混在する複合地盤の力学特性を効率的に求めて基礎設計に反映させていくためには、現在の指針に載っている方法や従来の FEM 解析の延長線上では不十分であり、複合地盤全体のマクロな力学特性に着目した設計を行うべきである、というのが筆者の主張であり、本論文ではそのための具体的なツールを開発し、実験や実測により検証を行った。本論文におけるオリジナリティは、「複合地盤のマルチスケール解析法」を成立させるための諸条件を明確にし、それを具体的なツールとして具現化したことにある。これらにより、複合地盤の非線形なマクロ力学特性の評価がはじめて可能となった。

以下では、各章で得られた結論および今後考慮すべき問題点や研究の発展性について総括する。

第1章では、「複合基礎」が近年、構造物の基礎形式として増えている背景について述べ、その幾何学的、力学的、設計的な特性について列挙することで、複合地盤の力学特性を巨視的(マクロ)な観点からとらえる必要性について論じた。また、複合地盤の既往の設計法が複合地盤全体の力学特性を反映しない安全側の設計となっていたり、研究的にも構成要素の線形性や改良形状・変形方向を規定した限定的な条件のもとでの力学特性を論じている点について指摘した。こうした問題点を踏まえた、汎用性のある複合地盤の非線形なマクロ力学特性手法を構築するために、均質化理論を用いたマルチスケール解析によるマイクロ・マクロ連成解法や非連成解法の導入の必要性を指摘し、そのために必要な諸条件、マイクロ・マクロ連成解法への地盤の非線形特性の導入や少ない周期条件数の検証、マイクロ・マクロ非連成解法を実現するための複合地盤全体の構造異方性を表現する構成則の提案やそのパラメータ同定手法を明確にした。

第2章では、複合地盤のマルチスケール解析に組み入れる土の3次元非線形弾性構成則を提案した。提案した

構成則は、Duncan-Chang らにより提案された軸差応力と軸ひずみで記述された 1 次元非線形弾性構成則を 3 次元問題に拡張し、任意の 3 次元応力場で主偏差応力—主偏差ひずみの双曲線関係を再現できる。また、剛性の拘束圧依存性を体積ひずみと関連づけることにより応力の静水圧分を完全に変形規定型として接線係数を陽に求められる特徴をもつ。提案した構成則に関して、異なる 3 種類の初期拘束圧での側方応力 σ_3 一定および平均主応力 σ_m 一定の三軸圧縮試験により偏差成分に関連するパラメータを、また等方圧縮試験により体積成分に関連するパラメータを同定できることを示した。また、これらのパラメータを用いた再現解析から、主軸が固定された三軸要素試験の結果を再現できることを示した。次に、任意の応力下での構成則の性能検証をするために、遠心模型実験による 30 g 場での静的載荷実験を実施し、対応する有限要素解析を行った。実験では、メンブレンを介した水の自重により $D_r = 55\%$ の豊浦砂からなる地盤を載荷すると、荷重面に対してほぼ水平に沈下分布が生じた。この沈下分布を提案した構成則が定量的に再現できることを示した。比較として地盤を等方弾性体と仮定した実験の再現解析を行ったが、載荷範囲中央部の沈下が端部に比べて大きく、また、載荷端部は中心部に引き込まれるように沈下して、実験で得られたような沈下形状を表現することはできなかった。提案する構成則は、双曲線型の挙動に主軸の回転を考慮したことで、実験で得られた沈下分布を良好に再現することができたと考えられる。

第 3 章では、前章で提案した土の非線形弾性構成則をマイクロ構造の地盤の材料モデルに組み入れた、地盤材料と杭・改良体からなる単位周期構造（ユニットセル）をマイクロ構造、複合地盤全体をマクロ構造とする「マイクロマクロ連成解法による複合地盤のマルチスケール解析法」を開発した。この解析法を用いて、改良率 16% の柱状、格子状改良地盤を模したマイクロモデルに様な変形を作用させる数値材料実験を行った。鉛直方向の軸圧縮によるマクロせん断応力 T ～せん断ひずみ Γ 関係は、混合則による改良断面率のみで説明できる一方で、単純せん断を作用させた場合の T — Γ 関係は、柱状改良では地盤、格子状改良では改良体の力学特性を反映したものになることを示した。次に、任意の非一様な応力変形下でのマルチスケール解析法の検証を目的として、砂地盤と同様の 30 g 場での静的載荷実験を柱状に改良した地盤に対して実施した。実験結果によれば、改良地盤は中心がやや大きくなる沈下分布を示し、砂地盤と比べてやや弾性的な沈下形状を示したが、解析は荷重境界部を除いてこの沈下分布をよく再現できた。荷重境界部は、砂地盤の解析における沈下分布と比べると沈下勾配が緩やかで周辺地盤を引き込む現象が見られ、載荷範囲外で計測した実測沈下との乖離が見られた。改良体を厳密にモデル化した FEM 解析結果との比較から、マルチスケール解析による沈下分布は載荷中心部では改良体と地盤のほぼ中間的な沈下量を示すのに対して、載荷端部では実際よりならした沈下分布として計算される。すなわち、本実験のように荷重端部が柱状の改良体間にある場合には、均質化法の理論と乖離した有限な周期数の影響が見られる。混合則を用いた弾性解析結果は、マルチスケール解析結果と比べて載荷中心に向けて滑らかに沈下し、載荷範囲の沈下の影響が外側に広がる傾向を示すなど、より強い弾性沈下傾向を示すことがわかった。

第 4 章では、実用規模の複合地盤の設計支援を意図して、マイクロマクロ非連成解法によるマルチスケール解

析手法を構築し、マイクロマクロ連成解析との比較によりその実用性について確認した。提案するマイクロマクロ非連成解法は、マクロ一様変形あるいは応力を作用させる数値材料実験を行いマクロ応力とひずみの応答データを取得し、対応するマクロ材料挙動を再現できるマクロ構成則のパラメータを同定することで、マクロ解析に先立って「マイクロ周期構造を反映したマクロ力学応答」を予め用意しておくことにその特徴がある。まず、数値材料実験で取得できるマクロ応力とマクロひずみの全成分を利用した誤差関数を定義し、「複合地盤全体」の挙動を表す構成則として、2章で提案した等方的な非線形弾性構成則に異方性を表す2つのパラメータ $G_a \sim \alpha$ を付加した異方非線形弾性構成則を提案した。また、パラメータ同定の手法として実数値 GA を採用し、具体的な同定アルゴリズムを示した。提案手法の検証のため、まず、真値が既知の等方性および異方性均質体に一樣な軸圧縮3方向 X_{11} , X_{22} , X_{33} , K_0 圧縮3方向 X_{11} , X_{22} , X_{33} , 単純せん断3方向 X_{12} , X_{13} , X_{23} の強制変位を作用させる数値材料実験を行い、得られた数値材料実験データを用いた実数値 GA により、これら均質体のパラメータを精度よく同定できることを示した。次に、柱状と格子状改良地盤に対しても同様に数値材料実験を行い、異方非線形弾性体のパラメータをある程度精度よく同定し、このパラメータを用いたシングルスケール解析が、複合地盤の数値材料実験結果を概ね再現できることを示した。さらに、静的沈下問題を取り上げ、マイクロマクロ非連成解法と連成解法を適用したマルチスケール解析を行った。これらの解析結果から、両解法はほぼ同等の応力変形状態を再現できることを示した。非連成解法の実行時間はマイクロマクロ連成解法の約 1/4 であり、本章で提案した非連成解法は実現場など大規模問題の解法に適した手法であることを示した。

第5章では、3章で提案した土の非線形弾性構成則を用いたマイクロマクロ連成解法と4章で提案した複合地盤の異方非線形弾性構成則を用いたマイクロマクロ非連成解法を建物面積 23,000 m²、建物荷重約 70 kN/m²、地上 5F、地下 1F の低層建物の沈下問題に適用した。まず、実測沈下結果から、建物の構造躯体完成時（5FL スラブ打設後）の沈下量は最大値で 12 mm、最大スラブ傾斜角は 0.3~1.0/1000、原地盤と既存杭残存部の境界部における傾斜角は 0.4/1000 であり、建物がほぼ一体的に沈下していることを示した。次に、既存杭とその周辺地盤からなる単位周期構造をマイクロモデルとするマイクロマクロ連成解法を行い、同手法が敷地全体の沈下分布をよく再現できることを示した。解析により得られた鉛直ひずみ分布から、原地盤部は地盤剛性に応じた沈下が生じているのに対して、既存杭打設部は杭頭部を壊して埋戻した層厚 1m の層にひずみが集中する状況が再現された。これらのことから、提案するマイクロマクロ連成解法が実地盤にも適用可能であることを示した。さらに、4章で提案したマイクロマクロ非連成解法を、既存杭が打設された $A_{s1} \sim A_{s2}$ の4つの地層に適用し、同定したパラメータを用いた敷地全体の沈下解析を行った。各層の数値材料実験結果を、同定したパラメータは比較的精度よく再現できた。同定したパラメータを原地盤の物性と比較すると、等方性を表す6つのパラメータは原地盤とほとんど変化しておらず、異方性を表すパラメータ α は各層でほとんど同じ値を示した。高い剛性の杭が低改良率（約 1.2%）でまばらに打設された複合構造の場合は、等方性のパラメータは原地盤とほとんど変わらず、異方性のパラメータは杭の剛性によりほぼ一意に決まることがわかった。同定したパラメータを用いた沈下解析結果はミク

ロ・マクロ連成解法による結果とほぼ同等の値を示した。このことから、ミクロ・マクロ非連成解法は比較的剛性の小さい改良体からなる複合地盤の全体挙動だけでなく、剛性が高い杭と地盤からなる複合地盤の挙動も再現できることがわかった。

第6章では、上記から得られた結論についてまとめた。

本論文では、複合地盤の静的沈下問題における沈下分布を主なターゲットとして解析・検証を行ってきたが、非線形なマクロせん断剛性を評価できる工学上のもう一つの大きな利点は、複合地盤の動的な挙動を仮想的な均質体として取り扱える点にある。そのためには、ひずみによる剛性低下だけでなく、複合地盤全体の減衰特性について評価する必要がある。その道筋はある程度明確であり、今回提案した土の非線形弾性構成則を履歴が考慮できる形に拡張し、4章に示した数値材料実験を繰り返し载荷にすることで解析的な評価は可能となる。この手法を用いて、格子状改良の改良率、改良体剛性を決定する手法を確立すれば、比較的簡便で合理的な複合地盤の全体挙動を反映した設計が可能となるであろう。

論文審査結果の要旨

低炭素化やコストダウンを目的として、構造物基礎に対して性能規定に基づく設計が広がりつつある。特に、部分的に改良体を配置させた複合構造基礎が増加してきており、その合理的な設計法の開発が急務とされている。本研究は、均質化理論を応用したマルチスケールモデリングの枠組みを適用した複合地盤のマルチスケール解析法と、マルチスケール数値材料実験によって複合地盤全体としての巨視的構成則を定式化してその全体挙動を解析する二つの数値解析法を提案し、遠心模型実験、原位置実測との比較によりそれらの妥当性を検証した研究であり、全6章よりなる。

第1章は序論であり、複合地盤に関する既往の研究および設計法を整理し、研究の背景と目的を述べている。

第2章では、複合地盤のマルチスケール解析に組み込む土の3次元非線形弾性構成則を提案している。まず、マルチスケール解析に整合する構成則の定式化の特徴について述べ、室内試験によるパラメータ設定法を示している。次に、室内三軸試験と遠心場における静的沈下実験の再現解析から、この構成則が簡易な非線形弾性構成則でありながら、砂地盤の沈下性状を定量的に評価できることを示している。

第3章は、2章で提案した構成則を組み込んだ複合地盤のマルチスケール解析法を提案している。まず、異なる改良形状に対する数値実験から、マクロ要素の応答がマイクロ要素の改良形状に依存していることを示し、次に2章と同様の装置を用いた柱状改良地盤の静的沈下実験の再現解析を行い、複合地盤の沈下性状を定量的に再現できることを示している。

第4章では、大自由度の問題に対する効率的な解法として、マルチスケール数値材料実験によって複合地盤全体としての挙動を表す構成則の定式化方法および実数値 GA によるそのパラメータ同定法を提案している。これら一連の手法は3章に示した方法の近似的な手法でありながら、格子状、柱状などの改良形状に関わらずマクロな複合地盤の全体挙動を再現でき、3章に示した方法とほぼ同等の精度の解を得ながらも大幅な実行時間の削減できることを示している。

第5章では、3章、4章で提案した解法を多数の既存杭上に構築された建物の沈下問題に適用している。これらの解析結果から、提案手法が実際の複合構造基礎の設計問題へ適用可能であることを示している。

第6章では、本研究の結論および今後の課題について述べている。

以上、本論文は、均質化理論を応用した複合地盤の合理的かつ効率的な解析法を提案し、実験と実測データによる検証および実務問題への適用性を確認したものである。本研究の成果は、複合地盤の新たな設計法に大きく寄与するもので、その工学的な意義は大きい。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。