101393

Abstract

単杭複合基礎の欠点を補うために、複合基礎が工学的に使用されるようになってきている。しかし、高置換率礫杭とバーチカルドレーンによって補強された複合基礎の圧密理論に関する研究は、礫杭内の径方向流動を考慮したもので、文献上ほとんど報告されていない。総合的な複合基礎の圧密モデルを確立することは、石柱や竪坑の貫入深さ、置換率、分布パターンなど、より合理的な設計を行う上で重要である。そこで、このような圧密問題を解決するために、外周に複数のバーチカルドレンを有する礫杭-土ユニットを計算モデルとして考える。

次に、礫杭内の放射状流動を考慮することにより、全平均発現間隙水圧（EPWP）に関連する解析解を導出し、既存の解との比較によりその信頼性を検証した。さらに、圧密挙動を調べるために広範な計算を行い、その結果、地盤中の鉛直方向流動はこの複合基礎の圧密にはほとんど影響しないこと、高置換比の砂利杭内の半径方向流動の影響は無視できないこと、杭間に鉛直ドレーンを設置することで圧密速度を向上させることができることを示した。最後に、このモデルをマレーシアの堤防の沈下計算に適用したところ、提案した解法による結果は実測データとよく一致し、計算モデルの適用性がさらに示された。

Introduction

近年、複合基礎技術は、高い圧縮性と高い含水率を持つ軟弱地盤を処理するために、世界中で広く使用されている（Tang et al、

2021; Uge and Guo, 2020; Zhang et al., 2022）。数多くの模型実験（Dash and bora, 2013; Guo et al.

自然基礎に圧縮弾性率の高い材料を設置することで、垂直ドレーン基礎と比較して、基礎の支持力を効果的に増大させ、建設後の沈下量を低減できることが、数多くのモデル実験（Dash and bora, 2013; Guo et al.

ることが示されている。実際，基礎の支持力と変形は圧密理論と関連している。さらに、透水係数の高い砂利杭では

したがって、複合基礎の圧密理論を研究することは、理論的にも工学的にも大きな意義がある。

鉛直ドレーンに対する圧密理論（Ghandeharioon et al., 2010; Kim et al., 2011）に基づき、様々なタイプの杭で補強された複合基礎に対する圧密理論が進展している（Castro and Sagaseta, 2011; Doan and Fatahi, 2021; Yang et al.） 透水性杭を用いた複合基礎の圧密を解くには、モデルによって境界条件が異なるにもかかわらず、半径方向に間隙水が一方向にのみ浸透する軸対称計算モデルが広く用いられている。図 1 に示すように、モデル A（Zhang et al、

2009） では、透水性杭のみで補強された複合基礎の圧密を扱うために、単一の透水性杭を計算単位として使用している。同様に、透水係数の異なる杭の組み合わせで補強された複合基礎の場合、モデル B とモデル C では、それぞれ透水杭または不透水杭が計算ユニットの中心として使用される（Shanget al.） さらに，面積等価の原則に従って，2 つのモデルの計算ユニットの外周に位置する n 個の杭は，それぞれすべて円形の壁に変換される．

これに基づき、Luら(2016b)は、中心部に1つの鉛直ドレーン、周辺部に複数の鉛直ドレーンを配置し、軟弱地盤中の間隙水が半径方向に双方向に浸透する計算モデル(モデルD)を開発した。しかし、このモデルは群縦ドレーン基礎の圧密しか解くことができず、杭の応力集中効果を考慮する必要がある複合基礎に直接適用することはできない。これに対し、既存の理論的研究では、杭を組み合わせた複合基礎の圧密について、以下のような研究がある。

(Liu et al., 2020; Yu et al., 2020）は、杭の応力集中効果を考慮することはできるが、半径方向への間隙水の双方向浸透を考慮することはできない。一方、砂利杭の間にプレハブ垂直ドレーン（PVD）を設置する新しい複合基礎技術が、近年様々なプロジェクトで広く用いられている（Zhang, 2015）。

この工法の2つの主な利点は、一方では、自然基礎の一部を圧縮弾性率の高い砂利杭に置き換えることによって基礎の支持力を増大させ、他方では、2つの排水体（砂利杭と杭間に設置されたバーチカルドレーン）によって基礎の排水圧密を大幅に促進できることである。

と杭と杭の間に設置された垂直ドレーン)によって、基礎の排水圧密を大幅に促進することができる。さらに、このような技術の経済的コストは、遮水杭で補強された複合基礎よりも低い。残念ながら、上記の4つのモデルのいずれも、軟弱地盤中の間隙水の半径方向への双方向浸透と杭の応力集中効果の両方を考慮する必要があるため、このような複合基礎の圧密を扱うことはできない。既存の研究では、2種類の排水体を有する複合基礎の圧密挙動を調査したものはほとんどない。実際、砂利杭と鉛直ドレーンによって補強された複合基礎は、上海の大型石油タンクの地盤改良（Jia, 2002）、広州市番禺区京珠大道7号橋の両側の橋台下のシルトの処理（Li, 2005）、成都天府国際空港の部分的な軟弱地盤の補強（Xuet al.）

したがって、包括的な圧密モデルを確立することは、今後、砂利杭やバーチカルドレーンを用いて軟弱地盤を処理するプロジェクトにおいて、非常に重要な意味を持つ。

したがって，総合的な圧密モデルを構築することは，今後，礫杭や竪坑を用いた軟弱地盤の処理工事を行う場合，礫杭や竪坑の設計や排水体の分布パターンを，理論的に予測される過剰間隙水圧（EPWP）の消長や沈下進展を参考にすることができる．

(EPWP)の消長と理論解によって予測される沈下進展を参照することができる。

これに基づいて、高置換率礫杭とバーチカルドレーンによって補強された複合基礎の圧密モデルを開発した。そして、理論解析解を求め、検証した。さらに、杭と地盤中の間隙水の径方向および鉛直方向の流れ、礫杭とバーチカルドレーン双方の坑井抵抗、撹乱帯におけるスミア効果など、いくつかの重要な客観的条件を考慮した。最後に、この工法の補強効果を調べるために、様々な条件下でのこの複合基礎の圧密挙動を解析するための広範な計算を行った。

特に、高置換率砂利杭内の放射状流動が圧密挙動に及ぼす影響を分析した。

Conclusion

本研究では、鉛直ドレーンと砂利杭の組み合わせで補強された複合基礎の圧密に関する理論モデルとそれに対応する解析解を、中置換率または高置換率の砂利杭内の半径方向の流れが圧密へ及ぼす影響を考慮して開発した。その結果，次の結論が得られた．

(1)軟弱地盤中の間隙水の水平排水距離をさらに短縮する2つの鉛直排水体が存在するため，この組合せ複合基礎の圧密を取り扱う際に軟弱地盤の鉛直流動を無視することができる．

(2)従来の砂利杭で補強された複合基礎と同様に、杭内の半径方向の流れを無視すると、バーチカルドレインと砂利杭で補強された複合基礎の圧密計算に大きな偏差が生じるが、この偏差は置換比が大きくなるにつれて大きくなり、バーチカルドレインの本数や杭と土の弾性係数比などの他の要因には影響されない。

(3)複合基礎の支持力を満足することを条件として，砂利杭の外周にバーチカルドレーンを設置することは，杭と土の弾性係数比や置換比を大きくして基礎の圧密を促進するよりも，迅速かつ経済的に安価である。

101379

Abstract

トンネル掘削による地表沈下は、いくつかの要因に影響される。しかし、表層沈下と主な影響要因との間には、明確なマッピングによる相関関係は存在しない。本研究では、分類回帰木（CART）、ランダムフォレスト（RF）、勾配ブースティング決定木（GBRT）を含む3つのツリーベースの手法を導入し、大型混合シールドが使用された上海の南虹梅路トンネルのトンネル掘削による地表沈下を予測した。入力変数として、3つのカテゴリー（トンネル形状、地質条件、シールド操作要因）のうち13の影響要因を採用した。その結果、アンサンブル法（RFとGBDT）は単一樹モデル（CART）よりも優れた性能を発揮することが示された。さらに、GBDTは3つの統計的学習手法の中で最も高い予測精度を示した。トンネル掘削による地表面沈下に対する影響因子の重要性を調査した。トンネルの形状が地表沈下に対して最も大きな影響を与えた。次いで、シールド工事に影響する要因であった。さらに、地質条件は他の影響因子ほど影響しなかった。本研究の結果は、他の類似のトンネルプロジェクトにおいて、トンネルによる地表面沈下を評価する際の参考となる可能性がある

Introduction

掘削、支保工、覆工を含むシールド工法は、通常、軟弱地盤のトンネルに採用される。都市化地域の交通量の多い需要に応えるため、シールドの直径は次第に大きくなっている。そのため、トンネル工事は複雑化している。ミックスシールド技術では、掘削室内の支圧を自動制御のエアクッションで精密に管理し、不均質な地質や高い水圧を安全にコントロールすることができる。その結果、ミックスシールド技術は大きな掘削径に対応するのに適している。例えば、本研究では、上海南紅梅路トンネルの掘削径は14.93mである。

大きなトンネルは、比較的小さなシールド径の浅い軟弱地盤のトンネルよりも、地盤変形の影響を受けやすい。懸念されているのは

地下プロジェクトにシールド工法が導入されて以来、懸念が提起されている。いくつかの地表構造物について観測された地表沈下は、掘削の前後で許容範囲内に制限されなければならない。しかし、地表沈下は、トンネルの形状、地質条件、シールドの運用要因など、様々な影響要因に対して非線形性の高い関数を持っている1。トンネルの掘削によって生じる地表沈下、特に軟弱地盤の場合

特に軟弱地盤の場合、トンネル掘削による地表沈下を予測することは、建設業者だけでなく、公共事業、保険会社、政府機関にとっても大きな価値がある。シールドトンネル掘削に起因する地表沈下は、広範囲にわたって検討されている。その研究方法には主に次のようなものがある。

験的な解析は、限られた数の影響因子しか考慮しない。模型実験は、人手と材料資源にコストがかかる。解析解は、単純な境界条件と初期条件に限られ、実用的な工学への適用には限界がある。数値シミュレーションは、複雑な形状と荷重を扱うことはできるが、シールドの運用要因を考慮することはできなかった。

機械学習（Machine Learning、以下MLと略す。） 例えば、人工ニューラルネットワーク(Kim et al., 2001; Ovidio et al., 2008; Darabi et al., 2012; Mohammadi et al., 2015; Suwansawat and Einstein, 2006)やサポートベクターマシン(Yao et al., 2010; Ocak and Seker, 2013)などである。しかし、MLモデルを確立するための統一的なプロセスはなく、既存の沈下予測MLモデルには明らかに欠陥が存在する。Zhang(2020)がハイブリッド・メタ・ヒューリスティック・アルゴリズムとMLを採用し、大域的な最適ハイパーパラメータを効果的に決定し、感度分析によって、地質学的・幾何学的パラメータがトンネルによる沈下に最も影響する変数であることを明らかにした。また、MLアルゴリズムは、ベイズ最適化と組み合わせて、都市トンネルによる地表沈下を予測することも多い（Kim et al.

(2022)は、人工ニューラルネットワークモデルとサポートベクターマシンモデルのブラックボックス特性による地表沈下の解釈の乏しさを考慮し、予測精度と解釈可能性を向上させるために、パラメータ探索のためのベイズ最適化と組み合わせたアンサンブル学習アルゴリズムを利用した。

さらに、予測性能を得るために複数のベース学習器を使用するアンサンブル法（Rokach, 2010; Polikar, 2006;Opitz and Maclin, 1999）は、Laoryら(2014)による土木プロジェクトで採用された場合、良好な性能を発揮する。Kimらの研究者は、TBMの運転によって引き起こされる地表沈下レベルを分類して予測するために、データ駆動型の特徴選択を備えたランダムフォレスト法を使用し、ランダムフォレスト法が複雑なTBMにおける沈下予測を大幅に改善できることを発見した（Kimら, 2022; Liet al.） Cheng Yangら(2022)は、変数の重要度に基づくハイブリッド特徴選択法を使用し、ランダムフォレスト(RF)モデルのサブセットを構築して、トンネルに起因する沈下を予測している。アンサンブル手法は、ベースとなる学習者の組み合わせの構造に基づいて、いくつかの異なるタイプに分けることができる。図1は、最も広く採用されているアンサンブル手法、すなわち、Breiman(1996)によってbaggingと略されることが多いブートストラップ集計と、boosting(Friedman et al.,2000; Freund and Schapire, 1997)を示している。バギングとブースティングの構造を図2で比較する。バギングでは、Efron (1979)によるブートストラップ標本を用いて並列モデルを適合させ、出力（回帰の場合）または投票（分類の場合）の平均によってそれらを結合する。ブートストラップの性質に基づくと

バギングは，置換を伴うランダム・サンプリングを伴うブートストラップの性質に基づき，Jamesら(2013)によって，主に分散を削減し，オーバーフィッティングを回避することで，最もよく知られている．対照的に、ブースティングは段階的にモデルを構築するのに対し、バギングでは段階的にモデルを構築する。ブースティングはSchapire(1990)によって始められた。SchapireはKearns and Valiant(1994)によって投げかけられた質問に肯定的に答えている。

(しかし、初期のブースティング・アルゴリズム(Schapire, 1990;Drucker et al., 1993; Freund, 1995)は、FreundとSchapire(1997)が弱い学習者に適応できるアルゴリズムを開発するまで、実用的な欠点に悩まされていた。

したがって、初期のバージョンのブースティング・アルゴリズムの実用的な難点の多くが解決された。

大規模トンネルの掘削に起因する地表面沈下が評価される場合、ツリーベースモデルの予測能力を比較する研究はこれまで行われていない。ツリーベースモデルには、分類回帰木（CART：図2）、ランダムフォレスト（RF）、勾配ブースティング決定木（GBDT）がある。本研究では、CART、RF、GBDTを適用して、ミックスシールド技術が使用されるトンネルプロジェクトにおけるトンネル掘削に起因する地表面沈下を予測することに焦点を当てる。3つの方法論の精度を評価する。その結果は、今後の地球科学研究に役立つ可能性がある。

Conclusion

本研究では、大型ミックスシールドを用いた上海虹梅路トンネルのデータベースに基づき、トンネル掘削による地表面沈下を予測するために3つの方法論を採用した。

のデータベースを用いて，トンネル掘削に伴う地表面沈下量を予測した．モデルの予測精度を検証統計量パラメータの観点から比較した．また，影響因子の重要性についても検討した．以下の結論が導き出された．

(1) トンネル形状、地質条件、およびシールド操作要因のカテゴリから入力変数を用いて地表面沈下量を予測する場合、アンサンブル法（RF および GBDT）の性能は単一木モデル（CART）の性能よりも優れている。

(2)GBDTは、RMSE、決定係数R2において、3つの統計的学習手法の中で最も高い予測精度を持つ。

(3)地表面沈下量に最も影響を与える要因はトンネル深度であり、次いでトンネル作業要因のカテゴリーに属する要因である。しかし、地質条件の重要性は他の影響因子よりも低い。

101376

Abstract

この論文では、ジャケット支持型洋上風力タービンの杭基礎の応答を予測するための連続体アプローチを紹介する。引張荷重条件は、一般に中間水深で風力エネルギーを利用するために採用されるこの構造形式と組み合わせて使用される杭にとって重要である可能性がある。本アプローチは、コーン貫入試験や実験室試験から容易に得られる限られた数の入力データで簡単な実装を保証し、計算コスト効果を保証するために開発された。このアプローチの性能を評価するために、高密度の砂地に打設され、ドレイン引き抜きにさらされたオープンエンド鋼管杭の技術的規模の試験のデータが使用されている。結果は正確で、実験的な荷重-変位曲線にかなり近いことが示された。また、本アプローチの精度は、最近提案された

Introduction

打ち込み杭上のジャケット・プラットフォームは、中間水深で洋上風力を利用するために一般的に採用されている構造ソリューションである。この構成では

杭基礎の引き抜きに対する応答は、伝統的に、極限軸摩擦予測法と組み合わせた荷重-伝達曲線アプロ ーチを用いて推定される。

杭基礎の引き抜きに対する応答は、従来、極限軸摩擦予測法と組み合わせた荷重伝達曲線法を用いて推定されてきた。海洋杭の場合、極限軸摩擦は現在、コーン貫入試験に基づく方法（CPT 法）を用いて評価されている。これらの方法は、過去 20 年間にわたり、幅広い実験データベースを用いて開発され、最近、統一された定式化 （Lehane et al.） 破壊前の杭の応答は，荷重伝達の定式化の選択に依存する。最近，さまざまなアプローチが，海洋杭に適用された場合に良好な結果をもたらすことが示された（例えば，Zhang et al.，2019，Lehane et al.，2020b）が，杭の耐力予測手法の場合とは異なり，どれが望ましいかについての共通の合意はない。この特殊な荷重条件に対処するために、連続体アプローチ（DeNicola and Randolph, 1993; Broere and Van Tol, 2006）にはあまり注意が払われておらず、代わりに複合荷重や横荷重に広く採用されている（Wakai et al.） 一般に，信頼性の高いモデリング手法は，幾何学的効果や摩擦疲労を含む杭の打設の影響を，後続の 荷重段階において適切に模倣することができなければならない（Jardine et al.，1998；White and Lehane,2004）。 現実的なモデルの観点からは、高度な界面モデル（Staubachet et al.，2022など）で実行される小ひずみシミュレー ションで、初期応力と状態変数（HeinsandGrabe,2017など）を提供するために、杭設置の大変形分析を使用することを意味する。この論文で紹介するアプローチは、荷重移動曲線を実装する一次元アプローチと現実的なモデリング手順の中間に位置する。

実装は簡単で、計算コストは低く、新しい確率論的アプローチ（例えばMentani et al, 2022, Mentani et al, 2023）の枠組みで解釈できるパラメトリックな研究を実施することができる。本アプローチの性能は、技術規模の再現試験で評価される。

技術的規模のテストで評価し、最近開発された予測手法と比較する。

Conclusion

この論文では、一様な杭と堆積物で駆動され、負荷軸方向引抜きを受ける鋼杭の挙動を予測するための連続体アプローチを紹介する。実施には、CPTデータと実験室でのインターフェイス試験が必要である。

実装は簡単で、計算コストも低く、標準ワークステーション（Intel Xeon E3-1240 v5CPU@3.50GHz,16GBRAM）を使用して、約30分でシミュレーションを実行した。

このモデリング手法は、実験室での技術的なスケールテストの結果をモデリングするために適用され、次のような3種類の杭の全体的な荷重-変位曲線を再現する精度を示した。

をモデル化し、直径、細さ、厚さの異なる3本の杭の平均荷重変位 曲線を算出する精度を示した。また、供用期間と最終期間の両条件の予測に成功した。また、剪断応力の漸進的な移動は、杭の剪断応力経路に沿って正確にとらえられ、関連する実験文献と一致した。試験キャンペーンで比較的良好な結果が観察されたのは、経験的な相関関係が特に均質な市販の清浄な珪砂中に設置された杭に適していたこと、および界面試験データを直接実施したことに起因している。

特に、均質な市販の清浄な珪砂中に設置された杭に適している。このことは、実験データと最新のCPTに基づく荷重伝達の予測との間に見られるばらつきを説明する可能性がある。

このことは、自然堆積物中に設置された計装化杭の豊富なデータベースに基づく最新のCPTに基づく荷重移動法の予測値と実験値との間に見られたばらつきを説明する可能性がある。

これらの特徴により、CPT に基づく方法は、洋上サイトでの杭設計に確信を持って導入することができる。

に拡張することは容易ではない。逆に、本研究で提案したアプローチは、人工堆積物で校正された経験的な相関関係を使用し、特定の土質と界面特性を採用することで破壊に至るまでの杭全体の応答をモデル化するため、小規模な杭と大規模な杭の室内試験の結果を比較する際の強力なサポートとなる。アプローチの頑健性を適切に評価するためには、杭試験や鋼-砂界面からのデータをより広範に活用する必要がある。したがって、現段階では、この手法は、CPT に基づく手法のサポートとして使用され、最終的には、軸方向荷重を受けた杭の単調応答について、終局耐力以外の他の特性に関する情報を追加することになるかもしれない。

101401

Abstract

この論文では、25 件の高品質なオフショア事例から得られた動的杭試験データを検証している。この事例では、砂地に打設された管状杭の初期打設終了時（EoID）と再打設開始時（BoR）の計測された動的モニタリングが、既知のセットアップ期間後に、十分に特徴づけられた場所で実施された。2つの独立した専門家チームが異なるソフトウェアを用いて信号照合から導き出した静的抵抗を、CPTに基づく杭の耐力計算と比較し、砂中で打設された大規模な海洋杭の最初の軸耐力とセットアップのデータセットを提供した。同様の杭について動的・静的試験が実施された陸上・近海の 3 つの現場から、補完的な再分析を行った。

杭の動的・静的試験を実施した陸上・沿岸の3つの現場から、補完的な再解析を行った。直径0.3～3.5mの開端鋼管杭を（主に密な）砂地に打設した場合、すべての杭で顕著なセットアップが生じ、それは最初の2～10日間に最も活発であることが示された。すべての杭は、打設後20～30日で同様の結果を示した。しかし、大口径の洋上杭の動的試験では、30日後にはそれ以上のセットアップが見られなくなる一方、陸上／沿岸の小口径杭では、さらに顕著な容量の増加が続いている。

CPTに基づく設計手法と信号照合から推定される軸方向シャフトの容量を比較することで、設計手法の性能に関する洞察が得られる。杭の直径が大きくなるにつれて長期的な杭シャフトのセットアップが減少する傾向が確認され、主に杭と砂の界面で軸方向荷重の下で発生する直径依存性の拘束ダイラタンシーに起因するものと考えられる。

Introduction

打込み式オープンエンド鋼管杭は、何千もの海洋構造物やその他の構造物を支えており、その軸方向容量を確実に予測することは、安全で経済的な設計を保証する上で中心的な役割を果たします。統計的に有意な杭試験データベースに対するキャリブレーションは、ICP-05、UWA05、Unified 法（Jardine and Chow, 1996; Jardine et al., 2005; Lehane et al., 2005; Yang et al.） 砂地盤の軸方向容量は時間とともに成長することがよく知られているが（Jardine et al., 2006; Gavin et al., 2015）、設計指針はICP-050sデータベースに適用される25日平均や統一データベースの14日中央値を超える経年条件についてはまだカバーしていない。また、校正データベースの母集団のため、CPT手法の沖合条件への適用も疑問視されている。統一データベースの、砂地に打設された開管鋼管杭（主に陸上）に対する 29 件の高品質試験のうち、外径 D が 0.81 m を超えるものは 1 件のみであった。対照的に、軸方向に荷重がかかる海洋杭は、直径が 3.5 m を超える場合がある。直径が1mを超える洋上杭の静的試験は、例外的な状況であれば可能であることが証明された(Barbosaetal,2015) 。 しかし、杭にストレインゲージと加速度計を取り付 け、走行試験とその後の打撃試験を実施すれば、よく特性化された現場で重要な知見が得られる可能性がある。 PileAgeing（PAGE）JointIndus tryProject（JIP）は、Schanalysesを適用して、陸上で駆動される大型オフショア杭の新しい動的特性データセットを作成した。PAGEは、オフショアの25の高品質な初期打設終了（EoID）ケースと初期打設開始（BoR）ケー スを調査し、それぞれの杭の地盤特性、動的試験、打設記録を厳密に検討した後、一貫したシ ステム軸能力と動的試験の解析を適用した。 沖合での事例を補完するために、陸上のいくつかの現場で行われた開放端鋼管杭の 衝撃試験と単調静的試験の再解析を行い、動的試験と静的試験の傾向の比較を容易にした。

Conclusion

PAGEJIPは、25本の大型オフショア杭のデータセットを構築し、厳格な品質保証基準を適用した。

(これらのケースに加え、開放型鋼管杭で動的衝撃試験と静的試験が実施された近海・沿岸試験の再解析も実施した。長期的なオフショアと近海の経年変化の傾向から、主に以下の4つの結論が得られた：

1.直径0.45mから2mの杭を用いた静的および動的試験では、杭の直径によって減少する設定要因によって、比較可能な老朽化容量の傾向が示された。2.直径3.4mまでの大型のオフショアパイルによる動的試験でも、初期の経年変化傾向はほぼ同様であり、打設後20～30日でシャフト容量は約2倍になる。

3.大口径の沖合杭が示す長期的な傾向は、打設後30日以上の小口径の沿岸杭が示す傾向とは大きく異なっている。沖合で打設された直径1mを超える杭は、追加的な打設がほとんどないように見えるが、小口径の沿岸杭は、静的・動的な試験を行った結果、シャフト容量が翌年にかけて著しく増加している。

4.杭の早期老化挙動について、潜在的なメカニズムが提案されている。このプロセスが長期的な耐力に及ぼす影響は、ICP-05 法または統一軸方向耐荷力法の連成式に代入された Dr の値を再検討することで明らかになる。

PAGE動力学試験による解析は、大型開口鋼管海洋杭の地盤容量が時間とともにどのように変化するのかについて、唯一公開されている概要である。

この結果は、沖合杭の基礎軸力 容量の予測や評価にとって重要な意味を持つ。より長期間の経年変化を伴う大規模な 試験を実施するか、十分な大きさのハンマーを用いて経年変化した杭を動的 に再打撃する追加的な解析を実施することで、PAGE 解析を補完し、より信頼性の高い場の経年変化傾向を確立する唯一の 手段となる。

101421

Abstract

u-p定式化に基づく動的土-水連成解析は、透水性の高い地盤には適用できず、数値計算が不安定になる。本研究では、u-p定式化自体の理論解は透水係数によらず無条件収束を示すことを示した。このことは、不安定性は数値的なものであり、時間的に離散化された系で観測されることを示唆している。第一に、u-p定式化の線形化された支配方程式は、Full定式化と同様に、一次元条件下で減衰波動方程式に還元されることが証明された。次に、u-p定式化の理論解を導出し、その無条件収束性を確認した。次に、u-p理論解の本質的な特徴、すなわち、透水係数の過小評価、圧縮波速度の過大評価、正荷重印加に対する負の間隙水圧の発生について説明し、Full定式化の理論解と比較した。

Introduction

混合理論（Fillunger, 1936; Biot, 1941, 1962）に基づく動的な土-水連成解析の多くは、u-p定式化（Zienkiewicz et al. これは、土壌骨格に対する間隙水の相対加速度は、土壌骨格の加速度（すなわち、静的間隙水浸透）に比べて無視できるほど小さいと仮定している。したがって、間隙水の動的な運動は支配方程式から排除することができ、未知変数の数を減らすことができる。しかし、対象となる土の透水係数が高い場合には、解析が発散して失敗する傾向がある。

これは、間隙水の動的な運動が無視されるためである (Noda et al., 2008)。これはu-p定式化の事実上の限界のひとつである。

これを克服するためには、土-水連成問題のためのオリジナルの支配方程式を解く必要があり、その方法は通常、完全定式化、特にu-w-p for mulation（以下、''Full''と呼ぶ）と呼ばれる。野田・豊田(2019)は、土の骨格に対する間隙水の有限変形と相対対流を考慮したFullベースの土-水連成解析を開発した。一次元土柱におけるFull解の特徴とその理論解に関する議論は、豊田・野田(2021)に含まれている。本論文の目的は、u-pの不安定性が''理論的"『ではなく、』『数値的"』に過ぎないことを強調することである。

つまり, u-pの不安定性は, u-pの離散化された系で観察することができ, u-pの理論解は無条件収束を示す.

本研究では，瞬時荷重条件下での飽和弾性土柱 の1次元無限小変形を想定している。

u-pの理論解については、Zienkiewiczら(1980)が周期的荷重条件下での弾性土層の一次元解を導いている。Verruijt(2009)は、端部に正弦波荷重を加えることで、半無限柱の解を提案した。しかし、彼らは周期解を仮定し、定常波伝播について論じた。そのため、彼らの解は過渡的な収束/発散を扱うことができなかった。

定常波の伝播を対象としたVerruijtの同じ仮定のもとでの導出は、Biot(1956)による完全(u-U-p)定式化、およびMadsen(1978)と山本ら(1978)による海面波荷重の適用を考慮した静的定式化で解かれている。また,離散化された支配方程式の安定性に関しては,Kato(1995)が,u-p支配方程式を時間に対して1自由度と仮定して常微分方程式に簡略化し,Routh-Hurwitzの安定基準(Routh, 1877； Hurwitz,1895)を用いて,ニューマークb法を用いた同時離散再帰方程式の安定性基準を導出した.この安定性基準は,u-pの安定性が透水係数-時間増分比k/Dtによって制御されることを示している. 加藤(1995)は、スペクトル半径、すなわち再帰式の固有値の最大値が1を超えたときに不安定性が生じるとみなした。

Nodaetal.(2008)は、時空間離散化された土壌-水連成方程式からu-p計算の可能性を推定するための閾値を、その物理的意味に着目して導出した（時間離散化にはWilsonのh法を使用）。

また，この閾値は，離散化された土-水連成方程式の係数ch1 iが負になる，すなわちk/Dtが一定以上になると，u-p計算が発散して失敗し，非論理的な現象（例えば，土の骨格の体積圧縮を伴う負の過剰間隙水圧）を引き起こすことを示唆している。これに対応して，u-p 解と完全解との不一致は，u-p ベースの計算の精度不足を意味することが，Zienkiewicz et al. (2002)によっても報告されている。しかし、この不安定性が元の支配方程式に内在するものなのか、それとも単に

数値的なものなのかは不明である。そこで本研究では、瞬時荷重に対する周期解を仮定せずに理論解を導出したところ、理論解が無条件に収束することが明らかになった。これにより、u-p定式化の仮定による不安定性は、離散化された支配方程式にのみ現れることが明らかになった。第2章では、u-p/Full 支配方程式を示し、無条件安定性を示す理論解を導出する。第3章では、u-p解の特徴を議論し、Full解と比較する。最後に、第4章では、飽和弾性土柱に関する本研究の結論を、2.1節と2.2節にそれぞれ示す。参考のため、静的解をセクション 2.3 に示す。定式化間の関係を表1にまとめる

Conclusion

u-pの理論解が無条件に収束することが示されたのは、デフォーメーションが無限小であり、線形弾性土の骨格を仮定したためであり、u-pの不安定性は時間的に離散化された系においてのみ観察され、u-p自体の本質的な性質ではないことが示唆された。言い換えれば、数値的不安定性は明確に区別され、理論解が無条件に収束することを示している。理論解の導出は1次元であったが、多次元においても無条件収束が確保されており、S波の伝播は間隙水圧の変動に影響を与えないことを示している（付録A1）。Full解と比較したu-p解の特徴として，a)変位の減衰が強い（透水係数の過小評価），b)地盤骨格の圧縮波の伝播速度が速い（波速度の過大評価），c)正荷重の作用に対して間隙水圧が負（直感的には非論理的），が初期に確認された。2.1ではいくつかの仮定を導入した。有限変形の影響，土粒子や間隙水の圧縮性，不均一な物質分布，その他初期条件や境界条件を考慮する必要がある。u-pの数値不安定性とFullの無条件数値安定性については、今後の研究で時間的に離散化された系について議論する予定である。

101410

Abstract

メキシコの旧テクスココ湖周辺は、含水率が高く圧縮性の高い軟弱なラクストリン粘土層が特徴である。この地域には新空港の建設が計画されており、土壌の安定化が必要である。地盤改良の選択肢の1つとして、垂直ドレインを通して土壌に真空を適用する真空プレロードシステムの使用がある。本研究では、2つの真空技術の導入による水理機械特性の改善を評価する。2016年に、サーチャージ予圧と垂直ドレインを備えた2つの試験堤防を建設し、1つの堤防ではドレン・ツー・ドレイン工法を、もう1つの堤防では気密膜工法を用いて真空を適用した。試験堤体に6ヶ月間印加した真空圧の平均は、ドレン・ツー・ドレン工法で58kPa、気密膜工法で63kPawであった。特性の向上は、2つの技術間で異なっていた。気密膜工法では、含水率が50％、空隙率が46％まで低下した。一方、ドレン・ツー・ドレン工法では、含水率は15％、空隙率は13％まで低下した。両試験堤防の中央部において、異なる観察方法を用いて推定された圧密度は86%から88%であった。

Introduction

改良技術を用いた地盤の安定化は、差圧沈下や崩壊など、インフラの構造的・地質学的に許容できない挙動を防ぐことができる。タイ・バンコク空港の建設（Bergado et al., 2002;Lam et al., 2015）、日本の関西空港（古土井, 2010）および羽田空港の拡張工事（渡辺・野口, 2011; 北爪, 2012）、シンガポールの空港の拡張工事（渡辺・北爪, 2012）など、真空施工の有無にかかわらず、プレローディングおよびバーチカルドレーン技術を使用したプロジェクトにおける現場、実験室、および数値調査。

Noguchi、2011；Kitazume、2012）、シンガポールのチャンギ空港（Chu et al.、2009；Arulrajah et al.、2013；Bo et al.、2015）、イタリアのポルトポーレにおける熱電発電所プロジェクト（Hegg et al.、1983）、鉱業関連プロジェクト（Ngo et al.、2020）などが、軟弱地盤の改良のための実行可能な選択肢として、これらの技術を発見している。粘土質地盤のような軟弱地盤の改良は、掘削材とバーチカルドレーン（PL-PVD）を用いたプレローディングの技術によって圧密プロセスを促進することで得られる。さらに、プレローディングのための掘削材が高価であったり、建設現場に不足している場合には、真空プレローディングとバーチカルドレーン（VPL- PVDs）が実行可能な代替案となる（Lo´pezAcosta et al., 2019, Bergado et al.）

VPLは、適用される最大圧力が現場の大気圧に対応する土壌技術である。一般に、土壌に真空を適用するために2つの技術が使用される（Long et al., 2015; Zhu et al. ドレン・ツー・ドレイン（DtD）工法では、自然地盤上の透水性材料の層に浸漬されたフレキシブルな水平パイプを通して、プレハブ垂直ドレイン（PVD）に真空圧（VP）が直接加えられる（Zheng et al.） 真空は間隙水圧を低下させることで土の圧密効果を誘発し、それによって有効応力を増加させる。気密メンブレン（A-MEM）技術では、水平ドレインを通して、A-MEM の下の限られた領域に VP を適用する。

A-MEM。平面ひずみ条件（2D）において有限要素法（FEM）を用いてPL-PVDとVPL-PVDの挙動を解析するためには、鉛直ドレンの効率（形状、排出能力、スミア効果、排水条件）と使用する予圧の種類を表す等価特性を使用する必要がある。

そこで、本報告書では、PL-PVDや真空圧を用いたDtD技術やA-MEM技術について、圧密の程度、土の水理特性の変化、数値モデルによるパラメトリック解析、改良前後の応力状態の把握を通じて、その有効性を明らかにすることを目的とした。上記を踏まえ、各工法の限界を分析し、実務技術者への提言を行う。

改良技術（DtDおよびA-MEM）は、旧Texcoco湖の低支持力を有する圧縮性の高い軟弱な湖沼地盤を用いた2つの試験堤防（TE）で評価された。これらの試験堤防は、ニューメキシコ国際空港（NAIM、Nuevo Aeropuerto Internacional de Me´xico）の滑走路建設のための、さまざまな基礎工法を検討するための一連の試験の一部であった。これらのTEは、メキシコのメキシコ州で初めて建設されたもので、真空施工の前後に土壌探査キャンペーンが実施された。その上、この研究の興味は、これらの技術が海抜2227メートル（m.a.s.l.）で実施されたことである。海抜の軟弱地盤に真空を適用したいくつかの経験では、70～95kPa の VP を使用して 85 %を超える圧密度 U を達成している（Indraratna et al. 2つのTEの性能は、フィールドデータを通じて1年間（建設段階、真空印加6カ月間、観察2カ月間を含む）観察され、数値モデリングによる面内ひずみ条件で分析された。

Conclusion

本研究では、標高2227mに位置する旧テクスココ湖の異常な土壌の水 力学的特性の変化を評価した。

その上に、非常に圧縮性の高い軟弱地盤を改良するために2つのTE（VPL-PVDシステム真空技術）が建設された。そのうちの1つは、DtD技術を用いた真空応用TEであり、もう1つは真空応用TEである。

を用いたTEと、A-MEMを用いたTEである。

両技術（DtDおよびA-MEM）で発生するVPの大きさは調査地の気圧に依存する。各工法で発生する沈下と圧密の程度は、主に土層の圧縮性特性（空隙比、透水係数、圧密前応力）に依存する。

そうしないと、配水管の過度の変形によってシステムの効率が損なわれる可能性がある。

DtD技術による差圧沈下の低減は、堤防を異なるゾーンに分割し、中央ゾーンにはより低いVPを供給し、中央ゾーンにはより高いVPを供給することによって達成される。

A-MEM技術による差圧沈下の低減は、VPを1つのゾーンに分散させることで、中央ゾーンと側方ゾーンで鉛直排水管の間隔を異ならせることで達成できる。真空技術による地盤改良は、差圧沈下を防止する目的で、真空を適用した後に得られる圧密前の応力が、最終的な構造物が建設された後の有効応力よりも（安全マージンをもって）大きくなることを考慮して設計されるべきである。数値モデリングと観測手法の適用により、DtD堤防の予想最終沈下量はA-MEM堤防よりも低いことが示された。- 深さによる改良土の性質の変化の減少は、主に、垂直ドレインに存在するVPの減少（三角分布）と、TEによって伝達される荷重による応力分布によるものである。

101402

Abstract

杭の支持力は同じ敷地内でも異なる。本研究は、杭の貫入技術が支持力のばらつきに及ぼす影響について理解を深めることを目的とする。本研究では，83 本のジャッキイン試験杭のデータを用いて，杭頭，杭底，杭軸における貫入抵抗力のばらつきを調べた。半分散は水平距離が長くなるにつれて大きくなるため，5mの範囲の半分散に注目し，その誤差を杭打ち工法による誤差と定義した。解析の結果，誤差は対数正規確率分布に従い，頭部と基部の貫入抵抗の変動係数（COV）は10％程度であるが，引抜抵抗のCOVは5～25％の幅で大きく変動している。杭工事の技量によるばらつきは、貫入運動、速度、土質の違いによる差はほとんど見られなかった。

Introduction

同一敷地内における杭の支持力のばらつきは古くから報告されており（Skempton, 1959; Kay,1976など）、杭基礎の設計にとって重要である。Evangelistaら(1978)は，6つの場所における打込み杭の支持力のばらつきと，地盤のばらつきの影響について調査した。同じ場所での載荷試験の報告例が多数ある。

同じサイトでの荷重試験の報告例は，その後も数多くある（例えば，松本ら，1998；水谷，2015）。表 1 に各プロジェクトの概要と変動係数（COV）を示す。サンプル数は異なるが、COVは4 %から30 %と大きなばらつきがある。地球統計学的研究では、同一サイト内のばらつきが調査されているが、これらの調査は主に空間的なばらつきに焦点を当てている（例：Fenton and Griffiths, 2007; Klammler et al.） 空間的なばらつきに加えて、杭打ちプロセスも杭の性能に影響を与える（Zarrabi and Eslami, 2016）。支持力に対する杭の施工効果は，過剰間隙水圧の変化や，杭と土の界面における摩擦疲労の観点から評価されてきた（White et al.，2005；Gavin et al.，2008など）が，ひずみ経路法（SPM，Baligh，1985）と空洞膨張理論の両方が，杭の施工によって土がどのように変形し，応力とひずみが変化するかを評価するのに役立っている。

しかし、杭打ち作業をコントロールしても、正確に同じ杭を打つことは難しく、その結果、支持力にばらつきが生じる。杭打ちの出来栄えによるばらつきは、構造設計の安全性を損なう可能性がある。特に以下のシナリオでは、これらのばらつきを考慮することが重要である： 1. 構造物の床の勾配を評価する場合。これは、設計における隣接する杭間の差動沈下を示唆する。ばらつきの存在により、より大きな安全マージンが必要となる場合がある。Klammlerら（2013）とFaraoneら（2021）は、ばらつきを導入した、 (2021) は，Phoon and Kulhawy (1999a, 1999b) の地盤調査における測定誤差のばらつきを参考に，杭基礎の軸抵抗の全ばらつきに施工上のばらつきを導入し，COV を 10％未満と仮定した。杭ごとのばらつきは再現性と呼ばれ，同じ杭を同じ施工者が同じ工法で同じ場所に施工しているにもかかわ らず，同じ現場内に存在する。

管理杭施工時の不確かさ（以下、杭打ち誤差）を把握するためには、同一敷地内の多数の杭の支持力を観測する必要があるが、一般的には困難である。その不確かさは、杭の打ち方、杭の種類、地盤の種類、抵抗力の比、貫入深さなど多くの要因に依存する可能性があり、さらに困難である。油圧で杭を貫入させる方法であるジャッキングは、簡便に抵抗を測定するのに有利である。貫入速度が低く，Finnie 係数（Finnie and Randolph, 1994; Lenie and Randolph, 1994）が小さい場合， ジャッキング抵抗は，静的支持力と概ね一致するはずである。

Randolph, 1994; Lehane et al., 2009)が低くなるような貫入速度であれば、静的支持力と概ね一致するはずである。筆者らの知る限りでは，場所打ち杭の空間解析に関する報告はほとんどない。本論文では，制御された杭施工のもとで，隣接する鋼管杭の圧入抵抗のばらつきを定量的に理解するために，圧入抵抗のサイト内ばらつきから空間的ばらつきを除去する。第 2 節では，杭の支持力の不確実性に関する理論を，地球統計学に従って整理する。ここでは、5m以内の近傍杭の貫入抵抗力の差に着目し、これを杭打ち誤差と考える。第3節では，小口径鋼管杭を用いた試験の方法を示す．第3節では，小口径鋼管杭を用いた試験方法について述べる．

を測定した。第4節では、載荷試験の結果を示す。ここでは，載荷試験において ジャッキング抵抗が極限支持力とほぼ等しいことを確認し，ジャッキング抵抗を用いて杭の誤差を解析すること が妥当であると判断する．第5節では、貫入試験と引抜試験の結果を示す。貫入時の軸抵抗の変動は引抜抵抗の変動よりも大きいため、軸抵抗は測定誤差を含むと判断し、軸抵抗の代わりに引抜抵抗を用いている。説明データ解析を行い、距離が長くなるにつれて測定差が大きくなることを確認し、確率分布を確認する。対数正規分布を仮定し、地盤条件や貫入条件が変動に与える影響を確認する。第 6 節では、杭打ち誤差が何に起因するのかを考察し、貫入試験に関する先行研究との比較を行う。

Conclusion

空間分析には、計83本の計測付きジャッキ杭が使用された。杭は3つの試験フィールドで異なる種類の打設方法により設置され、圧入時、載荷時、引抜き時の貫入抵抗が測定された。貫入終局抵抗と載荷試験時の終局耐力には明確な相関があることから，貫入抵抗のばらつきは終局耐力のばらつきの良い指標と考えることができる。5mの範囲にある杭同士を十分に近接した杭とみなし，十分に管理された杭施工のもとでの貫入抵抗のばらつきを，計測誤差を無視した杭施工の技量による誤差（杭打ち誤差と呼ぶ）と定義する。その結果，次のような結果が得られた：

先行研究における杭容量のサイト内ばらつきを表 1 にまとめた。COV は 4 % から 30 % の範囲であったが，これは''サイト内''の定義によるものと考えられる。

貫入抵抗力の半分散は，距離が長くなるにつれて大きくなるが，これは地盤統計学で説明できる。ほとんどの場合，杭の位置を考慮せず，すべてのデータを使用した場合よりも，杭のペアを 5 m 以内に限定した場合の方が，貫入抵抗の COV は小さかった。このことは、適用した方法が杭打ち誤差の推定に適していることを示唆している。

杭打ち誤差は，各試験条件において対数正規分布によく適合した。

杭頭抵抗と底面抵抗の杭打ち誤差の COV は約 10%である。これは，貫入条件を制御しなかった最悪のケース（TE-C-MH と TE-C-P-H の差）よりも十分に小さい。この値は、杭の支持力とコーン貫入抵抗の先行研究で報告されたより小さな COV に匹敵する。

軸抵抗の代替となる引き抜き抵抗の杭打ち誤差の COV は，10％未満と 20％未満に二分された。

TE サイトの載荷試験では，1 本の杭の初期剛性が他の杭よりも極端に小さかった。これは品質管理によるものと推定される。一方、終局耐力にはほとんど影響しなかった。異常値を除外すると，初期から終局までの杭頭抵抗の COV はほぼ一定になる。

よく管理されていれば，土質，貫入運動，貫入速度の違いによる杭打ち誤差の明確な差は観察されなかった。