101406

Abstract

によって提示された圧縮係数と透水係数に関連する二重非線形圧密構成式に基づき、本論文では、一次元非線形圧密の近似閉形式を導出する。MesriとRokhsar(1974)によって提示された圧縮係数と透水係数に関連する二重非線形圧密構成式に基づき、連続排水境界条件を取り入れた任意層地盤の一次元非線形圧密の近似閉形式を導出した。

この近似閉形式解を導出した。近似閉形式解は

近似閉形式解は境界条件の均質化と固有関数法によって得られる。この近似解と連続排水境界条件の合理性を検証するために、モデル試験を実施した。

近似解と本研究で用いた連続排水条件の合理性を正当化するためにモデル試験を行った。また、計算結果を簡略化した解析解

また、簡略化した解析解法や有限差分法から得られた結果と比較した。パラメトリック研究は、様々なパラメータが圧密プロセスに与える影響を調査するために実施した。

パラメトリック研究が行われた。最も重要な知見は，Nq の影響が，Cc

Cc=Ck > 1 の場合と Cc=Ck < 1 の場合で全く異なる。Cc=Ck > 1の場合、Nqの増加は圧密化に対して悪影響を示す。

ーションに悪影響を与えるが、Cc=Ck < 1 の場合は正になる。ここで導き出された近似解は、二重非線形圧密問題に対する厳密な解析的アプローチを提供する。

この近似解は、任意の層状地盤の二重非線形圧密問題に対する厳密な解析的アプローチを提供し、将来の高度な数値解析アプローチの比較と検証のための効果的なベンチマークを提供する。

Introduction

圧密による沈下は、鉄道、空港、地下駐車場などの地上・地下インフラの安全性にとって非常に重要である（Deb and Behera, 2019; Castro and Sagaseta,2009; Indraratna et al, 2013）。大きな圧密沈下は、これらの施設に不可逆的な損傷を与える可能性がある。したがって、地盤の圧密は、地盤工学において常に重要な分野である（Walker et al.） Terzaghi (1925)は、一次元環境下での過剰間隙水圧の消散を研究することで、土の圧密理論の基礎を築いた。この枠組みの下で、後続の研究者たちは一次元圧密理論をさらに発展させ、層状地盤の特性を考慮するようになった。

Chenら, 2005; Fazeliら, 2018）、圧密過程の非線形性（Arnodら, 1996； Li and Xie, 2013; Kim et al., 2021a）、様々な排水境界条件（Cai et al. 境界条件（Cai et al., 2007）などである。

Terzaghi(1925)が用いた、空隙率、圧縮性係数、および透水性係数が時間に依存しない定数であるという単純化は、工学的慣行と矛盾するというコンセンサスが得られている。

時間非依存定数であるというTerzaghi(1925)の単純化は、工学的慣行と矛盾している。少なくとも，空隙比と透水係数は圧密中に常に変化する（Chai et al.） Davis and Raymond (1965) は，圧縮性係数と透水性係数は深度や圧密時間によって変化し，自重応力は一定であるという仮定に基づき，空隙比と有効応力 (e lgr0) の関係を導入した。その後、謝ら（1996, 2002）は、時間依存荷重下における単層または二層地盤の一次元非線形圧密の解析解を示した。Liuら（2018）は、熱効果と二次圧密を考慮した非線形圧密を解析している。Hu ら（2019）は、微分求積法 を用いた層状地盤の非線形圧密解析を行っている。の非線形圧密解析に微分求積法を採用した。を用いた非線形圧密解析を行った。） Zong ら(2020)は、二重層基礎の非線形圧密について検討した。の非線形圧密について検討した。

上記の研究の多くでは、解析解の導出を容易にするために、圧密中に圧密係数が不変であるという単純化が採用されている（Nguyen and Kim, 2019; Nguyen, 2021）。しかし、真の非線形圧密では、浸透係数が変化するだけでなく、圧密係数も変化する（いわゆる二重非線形性）(Berenice et al., 2017;Garcı´a-Ros et al., 2019)。これを考慮するために、Mesri andRokhsar (1974) は、ween lgr0 と e lgkv の関係を提案し、この構成方程式を採用して有限差分法で非線形圧密問題を解いた。その後，e lgkv と e lgr0 の両対数非線形モデルを採用して，構造化粘土の非線形圧密過程をシミュレートする半解析解が導かれている（Hu et al.） 同じ仮定で，Geng ら（2006）と Kim ら（2020）は，台形，長方形，三角形の繰返し荷重下での単層飽和粘土の一次元圧密を研究した。Lee ら（2020）は，2 次元圧密理論に非線形関係を導入し，2 次元軸対称非線形圧密を解析する数値モデル（Axi-SELCON）を構築した．軸対称非線形圧密を解析する数値モデル（Axi-SELCON）を構築した。

Wangら（2021）は、飽和および不飽和ベントナイトの非線形法線圧密線を記述する弾塑性構成モデルを提案した。

上記の研究はすべて、Terzaghiによって利用された、地表面の排水境界が初期の時点で完全に浸透している（過剰間隙水圧はゼロとみなされる）という古典的な仮定を利用している。

この古典的な仮定は、地表面の過剰間隙水圧をサーチャージ荷重と等しくすることを強制する排水境界条件と、過剰間隙水圧をゼロとすることを要求する初期境界条件との間に矛盾を生じさせる。その結果、地盤の過剰間隙水圧が不連続となり、実務にそぐわない。この問題を解決するために、Gray (1945) は排水障害境界を提案した。Schiffman and Stein (1970)は、さらにこれを発展させ、透水係数と圧縮係数が圧密中に交互に変化することを考慮した。最近では、Crump 法により、排水阻害境界を有する層状不飽和土の一次元粘弾性圧密を解析する半解析解が得られている (Zhou et al., 2021)。排水阻害境界条件の大きな欠点は、複雑な数学的導出と数値的反復を伴うことである。

その結果、研究提案にしか適用できず、実用的なエンジニアリングにはほとんど普及できない。Mei and Chen (2013)は、このような問題への取り組み効率を向上させるために、境界条件と初期条件の矛盾を緩和できるように、境界が時間依存性を持つ連続排水境界を提案した。Liu and Lei (2013)は、連続排水条件に基づいて、ラプラス変換と行列変換の手法により、土の粘弾性圧密過程を研究した。Wuら(2018)は、線形サーチャージ荷重による2層地盤の圧密を解析的に求めた。Yangら(2021)はさらにランプサーチャージ荷重によって誘起される圧密を調査した。Zhouら(2017)とWangら(2017)は、不飽和土の一次元圧密に対して連続排水境界を相次いで導入し、半解析解を得た。同じ枠組みのもとで，Wu ら（2022）は，杭打ち前の一次元圧密理論と杭打ち後の二次元圧密理論を統合し，堤内地盤の圧密によって誘起される負の周面摩擦の発達を調査した。

有限要素法や有限差分法を通じて、多くの研究が層状土壌の非線形締固めを調査してきました。しかし、その優れた特性から、数値解よりも解析解が必要とされています。例えば、高い効率性、数学的な単純さ、アルゴリズムの安定性、そして多目的な適応性などが挙げられます（Zhang et al., 2022a, 2022b; Liu et al., 2023）。ただし、締固めの二重非線形性（空隙比と有効応力の間の非線形性および空隙比と透水係数の間の非線形性）は、厳密な解析解において大きな困難をもたらします。これまでほとんどの非線形偏微分方程式（PDEs）は解析的に解くことができませんでした。解析解を持つのは限られた非線形PDEsのみであり、それらは特殊関数に分類されており、グリーン関数、ベッセル関数、超幾何関数などが含まれます。特定の地盤工学的問題の解析解を導出するために、最も効率的な方法は、元のPDEsを既知の解析解を持つ形式に数学的に変換することです。この目標を達成するために、積分変換、変数分離、ポテンシャル関数の分解など、多くの数学的手法が開発されています。したがって、この論文では、連続排水境界を組み込んだ層状土壌の非線形締固めの近似的ながらも正確な解析解が導出されています。この解析解は、実験結果や有限差分法から得られた結果と比較することで検証されています。この解の提案は、現場で層状基礎の締固めを予測するための便利なアプローチを提供しています。

Conclusion

本稿では、1次元のモデリングを容易にするために、近似的な閉形式解を導出する。

近似的な閉形式解を導出した。

この論文では、任意の層状土の一次元非線形圧密のモデリングを容易にする、近似的な閉形式解を導出する。この

この閉形式解法は、地盤の圧密性、透水性、およびその関係の非線形性を考慮したものである。

の非線形性を考慮する。

を考慮したものである。

実測結果との比較、簡略化された解答、および有限差分法を通して

テーマとした実測結果との比較、簡易解答、限定差分法を通して、提案した解法の正しさを検証した。

を検証した。

パラメトリック分析によって、Nqの影響がCc=Ck>1のときと

Cc=Ck>1のときとCc=Ck<1のときがある。

Nqの影響は最終的な有効応力

Cc=Ck<1の場合、Nqの影響は土内部の最終有効応力に現れる。Nqの増加は，最終有効応力

Nqの増加は，より大きな最終有効応力を意味し，圧密がより速く，より徹底的であることを示す。

しかし，Cc=Ck>1 のとき

しかし，Cc=Ck>1 になると，Nq の影響は，土の全体的な透水性

しかし，Cc=Ck>1 になると，Nq の影響が土の全体的な透水性に支配的な影響を及ぼすようになる。したがって

Nqの増加は圧密速度に悪影響を及ぼす。

したがって，Nq の増加は圧密速度に悪影響を及ぼす。

の比は，圧密速度に一貫した影響を与える。

圧密速度に一貫した影響を与える。詳細には、比が小さいほど圧密速度は速くなる、

この論文で確立した任意層状土モデル

は、透水係数が小さいほど圧密が速くなる。

を組み込んだものである。

初期モーメントにおける間隙水圧の不連続性に対処するため

初期モーメントにおける間隙水圧の不連続性に対処するために、コンティニュアス排水拘束条件を組み込んでいる。

連続ドラ

連続的な排水境界条件のパラメータ r が 1000 に達すると、連続的な

連続的排水境界条件となる。

テルツァギ排水境界条件となる。

間隙水圧の明らかな不連続性が観察される。

が観察される。提案したモデルは

を満たす小ひずみ圧密問題に適用できる。

に適用できる。

を満たすほとんどの小ひずみ圧密問題に適用できる。

の予圧条件を満足するほとんどの小ひずみ圧密問題に適用できる。しかし，土の骨格の変形が

土の骨格の変形が小ひずみ条件から高ひずみ条件へ移行する場合

浚渫船による盛土や新たに埋立を行った場所を含む。

を含む)、提案したモデルは適用できなくなる。

が適用できなくなる。

提案されたモデルの適用性は、浚渫土の埋立地や新たに埋立られた地

地盤におけるサーチャージ荷重が特に小さくなるにつれて

このような状況では

の曲線が半対数ではなく双曲線になる（Wei, 1982）。

になる（Wei, 1993）。数値計算に比べ

非線形固結問題の解法として一般的な数値的アプローチに比べ

近似閉

近似閉形式解法は、妥当な精度と優れた効率

を有しており、地盤技術者に受け入れられやすい。

地盤工学技術者

101411

Abstract

円形ヘリコイド杭(CH杭)は、過去10年間に開発された優れた軸方向支持特性を持つ特殊形状の杭であり、その杭と地盤の相互作用の問題は非平面ひずみを持ち、非軸対称です。オイラー・ラグランジュ連成法(CEL)を適用し、CH杭の未排水粘土への設置、軸方向圧縮、引き抜き荷重の全工程をシミュレーションし、杭と地盤の相互作用を評価し、その場試験結果によりCELモデルの精度を検証しました。CH杭の表面は、底面、外面、内面に分けられ、内面には圧縮面と引き抜き面があります。設置と耐圧の全プロセスにおけるCH杭とそのさまざまなタイプの表面の軸力とモーメントの変化が明らかになり、さまざまな表面の反力とモーメントの杭の総抵抗に対する相対的な寄与が評価されました。CH杭打設後および極限状態下における杭周囲の地盤および杭-地盤界面の応力分布特性を求め、施設および耐設の全工程における内面の力状態を解析した。

Introduction

問題を単純化するために、特殊形状の杭に関する現在の研究作業では、杭と地盤の相互作用問題を平面ひずみ問題または軸対称問題に変換することは一般的な現象です。円筒形杭や長方形杭と同様に、断面が対称な特殊形状の杭に対して、杭と地盤の相互作用問題を平面ひずみ問題または軸対称問題として直接扱うことができるのは理にかなっています。

例えば、テーパー杭(Kodikara et al., 2006;Khan et al., 2008)、拡大基礎杭(Sheng et al., 2008;Yang and Qiu, 2020)、結節性杭(Hirai, 2016;Zhou et al., 2017)とXCC杭(Zhou et al., 2018)は平面ひずみ問題と見なされ、テーパー杭(Kodikara et al., 2006;Khan等、2008年;Wang et al., 2021)、拡大ベース杭(Sheng et al., 2008;Yang and Qiu, 2020)および結節杭(Hirai, 2016;Zhou et al., 2017)は軸対称問題とされています。断面または縦断面が非対称の特殊形状の杭の場合、杭と土壌の相互作用を平面ひずみ問題または軸対称問題に変換するために、杭構造を単純化する必要があります。

たとえば、らせん状の杭(Rawat and Gupta、2017; AlwalanandElNaggar,2020)およびスクリューシャフトパイル(Chen etal.,2018,2020)は、平面歪み問題、およびヘリカルパイルに変換されます(Rawat andGupta、2017;Perez et al., 2018;Motamedinia et al., 2019;アルワラナンド・エル・ナガー、2020年;Ho et al., 2021)とねじ軸杭(Chenetal.,2018,2020)は、軸対称問題に変換されます。

円形ヘリコイドパイル(CHpile)は、図1aに示すように、過去10年間に開発された新しいタイプの特殊形状のパイルで、製造技術ニクソフトウジョンまたは鋳造によって制約され、円形ヘリコイド構造を形成する必要があり、Cパイルは通常、長さ5mを超えません。その結果、太陽光発電用ブラケットのミニタイプショートパイル基礎として主に利用されており、高速道路の付属設備、低高さの風力タービンタワー、送電タワーなど、さまざまな構造物の支持にも使用できます。杭打ちの練習の最も重要な利点は、建設中の杭ジャッキ荷重よりも高い圧力と引き抜き軸受能力を提供できる優れた軸軸受性能です。CH杭の幾何学的構造は、円状ヘリコイドの微分幾何学に類似しており、円筒形座標系の円筒形ヘリコイドのパラメータ方程式は式に示されています。(1).円形ヘリコイドとCパイルの角度は、ねじり角またはピッチ径比で表すことができ、空間直交座標下でのこれら2つのパラメータの関係を図1に示す。1bおよび式。(3).

CH杭砂土の間には高リン線形接触モードがあり、杭土系の相互作用には非面ひずみと非軸対称特性があります。杭の幾何学的特性に応じて構造、その表面は異なるタイプに分けられ、各表面の外部法線は異なる方向を持っています(図2)。1つの底面の外側の法線方向(Bot。と2つの外側の面(Out.1とOut.2)は、それぞれ軸方向に対して平行および垂直です。内側のサーフェスは、2つの圧縮サーフェス(Com.1とCom.2)と2つのプルアウトサーフェス(Pul.1とPul.2)に分かれています。ただし、杭軸の両側の位置、外部法線方向は軸方向に垂直でも平行でもなく、軸方向の長さの1つのピッチ内の任意の点間の外部法線方向は異なります。追加、atapileの内側の特定の点、隣接する圧縮面の外側の法線方向は、引き抜き面の反対側にあります。

モデルテストまたは平面ひずみまたは軸対称の対称特性を使用した解析方法は、杭と土壌の相互作用の問題を研究するために使用することはできません。したがって、数値調査アプローチは、杭と土壌の相互作用を分析するための最良の選択であるように思われます。インザカレント大変形有限要素法(LDFE)の手法であるオイラー・ラグランジュ連成法(CEL)は、任意のラグランジュ・オイラー(ALE)適応メッシング法や小ひずみによるリメッシュおよび補間法(RITSS)法よりも、より複雑な形状の境界値問題に適しています(Wang et al., 2015)。

現在、建設におけるCH杭の杭ジャッキ効果とベアリングメカニズムは明らかにされておらず、CH杭の研究はまだ初期段階にあり、既存の理論的成果は工学的実践の適用要件に大きく遅れをとっています(Wang et al., 2022)。そこで、本研究では、CH杭の原位置試験を、一般的に使用されているソフトウェアABAQUSで復元し、未排水粘土へのCH杭の設置と耐圧の全工程をCEL法に基づいてシミュレーションした。杭とそのさまざまな表面の軸力とモーメントの変化、杭と土壌の界面の応力状態、杭周辺の地盤応力場の分布特性、内面の力の状態など、プロセス全体における杭と地盤の相互作用の問題を分析します。CH杭に関するこの研究の結果は、特に排水されていない飽和粘土条件に適用できることを強調することが重要です。対照的に、Wang et al.(2022)は、砂などのダイラタンシー挙動が顕著に観察される土壌条件下でのCH杭の支持性能を研究しています

Conclusion

ABAQUS ソフトウェアを使用して，CH 杭の 2 回の原位置試験を実施し，CEL 法を用いて，CH 杭の 設置プロセスと軸方向荷重のシミュレーションを行った．杭頂部の反力とモーメントのシミュレーション値は，試験結果とよく一致した．

試験結果とよく一致した。また，CH 杭の設置後および終局限界状態における杭周辺地盤および杭-地盤界面の応力分布特性を把握し，全過程における圧縮面および引抜き面の力状態を解析した．

施工の過程で、杭上面と各表面にかかる軸方向反力とモーメントは、打込み深さの増加とともに直線的に増加する。杭の圧入抵抗力は主に内面によって与えられるが，圧入面に対する反力の影響は，引抜き面に対する反力の影響とは逆になる。

杭の圧入抵抗力は主に内面によって与えられるが，圧縮面に対する反力の影響は，引抜き面に対する反力の影響とは逆である。圧縮面に作用する全軸力は杭打設の障害となり，引抜面に作用する全軸力は杭打設に役立つ。さらに，引抜き面に作用する全軸力は，施工中のCH杭の回転を妨げるが，圧縮面に作用する全軸力は，CH杭の回転を助ける。これは主に、内側表面の接触応力の影響によるものである。ねじれ角が 45 の CH 杭の場合，その内面にかかる接触圧力によって発生する軸方向反力とモーメントは，摩擦応力によって発生するものより著しく大きい。

据付終了時に比べて、軸圧縮荷重の過程で、底面と外面の軸反力はほとんど変化せず、引抜き面の軸反力は急激に減少し、圧縮面の軸反力は減少する。

圧縮面の軸方向反力は著しく増加する。これは主に，軸方向圧縮荷重の過程で，CH 杭の圧縮面は杭の周囲の土を圧迫し続け，引抜き面は設置終了時に接触する土から徐々に離れていくためである。したがって，圧縮面側の地盤の応力は増加し，引抜き面側の地盤の応力は減少し，杭と地盤の相互作用はほとんど圧縮面で発生する。したがって，軸圧縮極限状態では，極限圧縮支持力の大部分は圧縮面の軸方向反力によってもたらされ，摩擦応力よりも接触圧の影響が顕著となる。

設置終了時と比較して，軸方向引抜き荷重の過程では，外周面の軸方向反力は変化せず，底 面と圧縮面の軸方向反力は急激に減少し，引抜き面の軸方向反力は大幅に増加する。つまり，CH 杭の引抜面は，杭の周囲の土を圧迫し続け，その圧縮面は杭から徐々に離れていく。

すなわち，CH 杭の引抜面は，杭の周囲の土を圧迫し続け，その圧縮面は，杭と接する 土壌から徐々に離れ，その結果，引抜面側の土の応力は増加し，圧縮面側の土の応力は減少する。軸方向引抜極限状態では、引抜極限支持力は主に引抜面に作用する軸方向反力によってもたらされ、その大部分は接触圧の作用によって発生し、残りは摩擦応力によるものである。

CH杭の極限圧縮耐力と極限引抜耐力は、最大杭ジャッキ抵抗よりもかなり高く、CH杭が優れた軸方向耐力を持つことを示している。さらに，載荷時に杭頂部に大きな軸トルクが発生した。圧縮極限状態および引抜き極限状態におけるトルクは、施工過程における最大施工トルクよりも明らかに高く、このことは、CH杭がねじり支持力にも優れていることを示している。

101412

Abstract

2.5次元有限要素モデル(2.5D FEM)に基づき、地震荷重と高速鉄道荷重の組合せによる地盤振動の検討を行った。これを基に、2つの動的荷重が複合的に作用した場合の地盤振動に及ぼす地盤種別と震度の影響を解析した。その結果，地盤の硬さが大きい場合には，地盤の硬さが地盤振動に与える影響は小さいことがわかった．ピーク地盤変位(PGD)は、合成荷重による軌道中心の地盤振動変位を予測するための合理的な震度指標であり、硬い地盤ほど精度が高い。このような観点から、地震荷重と高速列車荷重の組合せによる地盤振動を推定するために、等価せん断波速度とPGDに基づく予測式を提案した。数値実験結果との比較により予測式の信頼性を検証した結果、予測式は様々な立地条件や地震現象に適用可能であることが示された。また、先行研究と比較して、地震時の高速列車荷重による地盤振動を予測するための有効な手段を提供することが示された。

Introduction

高速鉄道は、その効率的な輸送能力により、多くの国で急速に発展してきた。実際、高速鉄道網とその周辺地域は、地震の多い地域に位置していることが多い。

そのため、潜在的な地震災害が高速鉄道の安全運行に深刻な脅威を与えている。

たとえば、2004年の新潟地震では、新幹線の脱線事故が発生した（Ashford & Kawamata, 2006）。現在、高速列車の発着間隔は徐々に短くなっており、列車走行中に地震が発生する可能性は以前よりも高まっている（Gaoet al.） そのため、脱線事故を推定するためには、地震荷重と高速列車荷重が複合的に作用した場合の地盤振動を合理的に予測する手法が必要である。いくつかの先行研究では の動的応答が議論されている（松浦）。が議論されている（Matsuura, 1998； Luo, 2005; Tanabe et al., 2008, 2017）。

その結果、地震荷重特性が脱線に大きく影響することがわかった。これを基に、地震時の高速鉄道の脱線メカニズムや安全運行条件が研究され（Ling et al., 2012; Xiao et al. しかし、上記の研究では、複合荷重下での土の動的挙動にはほとんど注意が払われていない。

地盤振動に及ぼす下層土の影響を把握するため、Gaoら（2021）により、地震時の盛土上を走行する列車の脱線シミュレーションのために時間領域3次元有限要素法が開発されたが、これは地盤の非線形挙動と地震荷重特性を考慮していなかった。実際、地盤の非線形挙動は、高速列車荷重（Gao et al., 2012, 2014, 2018）や地震（Darragh & Shakal, 1991; Yang & Yan, 2009; Chen et al., 2011; Adampira & Derakhshandi, 2020; Song et al.） 本研究では、地震荷重と高速鉄道荷重の組み合わせによる層状地盤振動を計算した。 これに基づき、複合荷重による地盤振動に及ぼす立地区分と震度の影響をそれぞれ検討した。地盤震度 地盤の振動を評価するのに適した震度 をパラメータ感度解析により検討した。 を検討した。最後に，鉛直地盤振動の最大値を予測する経験的関係式 線路中心における鉛直地盤振動変位（GVDmax）の最大値を を予測するための経験的関係を提案した。地盤の等価せん断波速度とピーク地盤変位(PGD) 地盤の等価せん断波速度と入力地震動のピーク地盤変位(PGD) を用いた。この予測関係の信頼性は、数値計算結果との比較により検証した。数値実験結果や先行研究結果との比較を通じて また，数値実験結果や先行研究結果との比較により，予測関係の信頼性を検証した．

Conclusion

(1)地震荷重と高速列車荷重の複合荷重による軌道中心部の地盤振動変位は、地盤剛性の増加とともに減少するが、地盤剛性が地盤振動に及ぼす影響は、下層土の硬さが大きい場合には小さい。

(2)PGDは、複合荷重下における軌道中心の地盤振動変位を予測するための最も妥当な震度指標であり、硬い地盤ほど精度が高い。

(3)本研究で提案した等価せん断波速度とPGDに基づく予測式は、地震時の高速列車荷重による地盤振動を推定するための有効な手段を提供することが判明し、異なる立地条件や地震現象に対して良好な適用性を有することが実証された。

101408(意味不明)

Abstract

本論文では、炭酸塩砂上の浅層基礎の沈下予測手順について述べるが、珪質砂にも十分に適用可能であり、有効である。実用的な目的のために、中密度および高密度の粒状土の上に載る浅い基礎の設計は、通常、沈下を許容値に制限することに支配される。したがって、基礎の沈下量を予測することは重要であるが、標準的な実務では、直接測定することが本質的に困難であるため、必然的に土の圧縮性（または弾性係数）の間接的な決定に基づいている（したがって、保守的であることが多い）。非線形の土の挙動を組み込んだ数値解析は、静的荷重下で砂の上にある所定の形状と剛性の浅い基礎の予想される全沈下量と差分沈下量を計算するための好ましい方法であるかもしれないが、本論文で説明する方法は、等価線形弾性に基づく簡略化された簡便な方法である。この方法では、i) せん断波速度から得られる小ひずみ時の弾性土の剛性プロファイルE0(z)を変形性の主要な測定値として使用し、ii) 剛性の非線形性を考慮するために、ひずみの大きさの関数としての弾性率の減少E(e)を使用する。

適用されるフーチング荷重が土の初期剛性に及ぼす有益な効果も考慮されている。この方法は、人工島を形成するために炭酸塩砂で作られた水硬性盛土の締固めをチェックするための現場ツールとして開発されたが、その応用は他の自然および人為的粗粒材料にも拡張可能である。

Introduction

従来の埋め立てや地盤改良の受け入れ基準は、貫入抵抗やせん断波速度の規定されたプロファイルに基づいている。

これは主に次の問題に関連している：相対密度に基づく受入基準を適用することの概念的および実際的な難しさ。

特に砕けやすい石灰質砂（Hamidi et al. 特定の試験方法を参照することで、この問題を名目上克服できたとしても、水位以下の（締固められた）盛土の現場密度を直接測定することが不可能である限り、このような基準を干拓地に直接適用することは不可能である。

石灰質砂の静的浸透探傷試験（CPT/CPTU）および動的浸透探傷試験（SPT/DP）に基づく受入基準を適用する際の概念的および実際的な難しさ。

石灰質砂における静的貫入試験（CPT/CPTU）および動的貫入試験（SPT/DP） に基づく受入基準を適用することは、概念的にも実際的にも困難である。

特に、試験で動員される応力レベルが、実際の応力レベル（通常、はるかに低い）に比べて比較的高いためである。このため、貫入抵抗と相対密度との間の標準的な相関関係の使用は、特定の 較正なしには適用できない（Giretti et al.） を定義することの概念的および実際的な難しさである。

相対密度や貫入抵抗のようなプロキシや中間的なパラメー タによって要求される性能の達成を保証することを目的とする受入基準の 定義は、概念的かつ実際的な難しさがある。

目標性能そのものを規定するのではなく、相対密度や浸透抵抗のようなプロキシや中間パラメータによって要求性能の達成を保証することを目的とする受入基準を定義することは、概念的にも実際的にも困難である。

このような困難があるにもかかわらず、受入基準を定義する従来のアプローチは、適用が単純であると認識され、性能に基づく受入基準を直接適用するための標準化された手順を定義することが困難であると推定されるため、しばしば維持されている。が維持されることが多い。したがって、土地の埋め立てと地盤改良について、性能に基づく受入基準を策定し、改良された土地の病害が定められた基準に適合しているかどうかを評価する、簡単で標準化された手順を採用することが望ましい。これは、直接かつ確実に測定可能な、関連する物理的パラメータに基づいて行われるべきである。管理パラメータは、石灰質砂の典型的な特徴である、高い圧縮性と変化しやすい粒子破砕に関連する潜在的な誤差の影響を受けるべきではない。一例として、静的荷重に対する性能要件の定義には、浅い基礎の支持力と最大許容沈下量、盛り土と基礎地盤の長期沈下とクリープ、基礎荷重下での沈下とクリープを含めることができる。このような観点から、本論文で述べるように、等価線形弾性と盛土中のせん断波速度Vsの測定プロファイルに基づいて、所定の形状と剛性を持つ浅層基礎の予想される全沈下と差分沈下を評価するための専用の手順が開発された。

BerardiとLancellotta（1991）は、地盤の非線形性を考慮する最も初期の手法の1つを提案した。

土の剛性は補正されたSPT打撃回数から導き出され、計算された相対ひずみレベルに応じて変化する。Lehane and Fahey (2002)による方法では、軸方向ひずみが増加するにつれて小ひずみヤング係数を減少させることで、地盤剛性のひずみ依存性を考慮している。Stokoeら（2013）は、フーチングの沈下量を推定するために、市販のFEMプログラムに動的非線形地盤挙動と現地地震試験を実装したアプローチを提案している。ここで提案されたアプローチによると、与えられた基礎形状について影響深さHs（すなわち、荷重を受けた基礎の影響を受ける最大土深さ）が決定されると、Hs内の鉛直応力増分がBoussinesq簡易解法を用いて計算されます。

解を使用して計算します。この応力増分を考慮して、初期の小ひずみ剛性を調整します。影響深度内では、土がサブレイヤーに分割され、各サブレイヤーにおける鉛直ひずみが、ブシネスク応力増分と応力正規化弾性率を用いて計算されます。各サブレイヤーのひずみが累積されてフーチングベースの沈下量が得られるまで、ひずみが計算され、弾性率が繰り返し調整される。

この方法は、日常的な工学実務で使用できる。

沈下量に影響するすべての物理的プロセスをとらえ、入力パラメータの決定も比較的容易である。この方法は、人工島を形成するために使用される炭酸塩砂からなる水硬性盛土の地盤処理を迅速に評価するツールとして開発された。例えば、地盤改良の要件として、ある荷重の下で特定の大きさのフーチングが50mm以上沈下してはならないというものがある場合、品質管理は、処理された地盤におけるせん断波速度の測定と、ここに示した方法に基づく関連計算で構成される。

Conclusion

中密度から高密度の粒状地盤上の浅い基礎の支配的な設計基準は、通常、支持力よりも沈下量に関連している。そのため

のため、日常的な沈下量の推定は、原位置の貫入抵抗との経験的な相関関係を用いて行われている。

本論文では、土の非線形挙動を考慮し、原位置試験から得られるせん断波速度を変形能の測定値として使用することで、与えられた形状と剛性を持つ浅層基礎の予想される全沈下と差分沈下を評価する簡素で迅速な手順を示す。この方法は等価線形弾性に基づいており、適用されるフーチング荷重の有益な効果を考慮して、ヤング係数を応力の関数として変化させる。非線形性は、ひずみの大きさの関数としての弾性係数の減少を通して考慮される。

本手法は、炭酸塩砂からなる水硬性盛土の地盤処理を評価するためのツールとして開発されたものである。この方法は、プロジェクトの仕様や、盛土全体の相対密度の最小目標値の達成を保証することを目的とした貫入抵抗やせん断波速度の規定プロファイルではなく、静的な操作荷重下での締固め盛土の性能に基づく埋め立ての受入基準の観点から開発されたものであるが、圧縮性が高く変化しやすく、粒子が破砕されやすいという特徴を持つ炭酸塩砂の場合には適用が困難である。 ここに示した手順は、提案した方法によって予測されたフーチングの沈下と、遠心分離機で実施した荷重沈下試験の結果との満足のいく比較によって検証された。実際の基礎について十分に文書化された事例との比較によるさらなる検証が推奨され、さらなる研究の対象となる。

101425

Abstract

セメントや石灰による軟弱地盤の改良は、その強度や変形特性を高めるために一般的に行われている。しかし、海水中ではマグネシウム塩がカルシウムの溶出を促進するため、セメント・石灰処理土の特性が劣化する。本研究では、含水率、セメント添加量、養生時間を変えたセメント処理土試料を高濃度Mg水溶液に浸漬した後の一軸圧縮強度の変化を調べた。その後，熱重量-示差熱分析と走査型電子顕微鏡を用いて，セメント処理土の劣化に伴う水和物組成の変化から強度低下のメカニズムを明らかにした。その結果、セメント処理土はMg水溶液に浸漬後、強度の80%以上が低下した。

また，初期条件が劣化土の強度に強く影響し，セメント添加量が多く，養生時間が長い試料ほど高い強度が観察された。さらに、劣化土にはケイ酸カルシウム水和物（C-S-H）やエトリンガイトが存在せず、ケイ酸マグネシウム水和物（M-SH）の存在を示唆した。

したがって、海水環境下でのセメント処理土の強度低下は、C-S-HからM-S-Hへの変質が原因であると推定された。

C-S-HからM-S-Hへの変化によるものであると推定された。

Introduction

土にセメントや石灰を加えて混練し、地盤の強度を高める固化工法は、軟弱地盤の主要な改良工法として広く用いられている。

セメントの水和生成物によるセメンテーション効果とポゾラン反応によって地盤強度が向上する（Afrin, 2017）。セメント・石灰処理土の強度は、これらの化学反応の進行に伴って上昇する。

この方法には、以下のような利点がある。

地盤の強度と変形特性を迅速かつ効果的に改善できる。また、固化材の添加量を調整することで、強度の向上を調節することもできる。近年、この工法は、建設機械や改良技術の高度化により、大規模な地盤改良に広く採用されるようになった（渡部、野口

(Watabe and Noguchi, 2011; Tatsuoka, 2010; Tanget al., 2001)。

固化処理工法にはいくつかの利点があるが、環境によっては土の性質が劣化する可能性があるため、長期的な耐久性に懸念がある。

セメント・石灰固化処理土が長期間地盤に暴露されると、周辺土壌との境界付近のCa濃度が低下し、その結果、強度や針入度抵抗性が低下する。

が低下し、多孔質構造になる（高橋ら、2018；池上ら、2005）。

酸性雨の影響に関する先行研究では、硫酸と硝酸がセメント・石灰処理土からの腐食を促進し、強度を大幅に低下させることが報告されている（Du al.

が促進され、強度が大幅に低下することが報告されている（Du et al.、2012；Kamon et al.、1996）。

セメント・石灰処理土の劣化は、海水環境でのCa溶出によって著しく促進される。

しかし、この現象は、内部膨張圧に起因する硫酸塩攻撃とは全く異なる。先行研究では

海水に暴露されたセメント処理土の劣化進行について、針貫入試験やコーン貫入試験を用いて調査した結果、劣化範囲は海水と接触している表面から内側に向かって徐々に拡大することがわかった（Siregar et al.、2019；Pham et al.、2017；Yang et al.、2016；Hara et al.、2014）。また、海水濃度の増加やセメント含有量の減少に伴い、劣化速度が増加することがわかった。さらに、海水浸漬後に固化土の透水性と圧縮性が増加した（Jin et al., 2019; Hara et al., 2015）。

石灰処理土層の海水暴露による軟化は、建設後約20年経過した河川堤防の基礎部で観察されている（Hara et al.

年後に観察されている（Hara et al., 2008）。マグネシウム塩（MgCl2とMgSO4）は、海水の塩分濃度の約15％を占めるが、セメント・ゴム系材料の劣化の主な原因である。

セメント・石灰処理土壌を劣化させる主な原因である（Hara et al.） 処理土中の水酸化カルシウム（Ca(OH)2）は、塩化マグネシウム（MgCl2）や硫酸マグネシウム（MgSO2）と反応する。

硫酸マグネシウム（MgSO4）と以下のように反応する：

MgCl2 + Ca(OH)2 →Mg(OH)2 + CaCl2

MgSO4 + Ca(OH)2 →Mg(OH)2 + CaSO42H2O

これらの反応は、Ca(OH)2をCaCl2とCaSO4に変換する。さらに、Mg(OH)の沈殿により、処理土壌のpHは低下する。

Mg(OH)2が析出するためである。したがって、海水との接触による固化処理土の劣化は、Mg塩によるCa溶出の促進が原因である。最近

微生物によるセメント固化処理土の劣化抑制技術が研究されている（三原・畑、2017）。

海水に曝された固化処理土の劣化については、劣化速度、Ca溶出メカニズム、劣化軽減技術など、これまでの研究で検討されているが、その詳細は不明である、

劣化速度、Ca溶出メカニズム、劣化軽減技術などに関する研究はあるが、地盤強度の変化やそのメカニズムに関する詳細は報告されていない。

本研究では、Mg水溶液暴露後のセメント固化処理土の圧縮強度に及ぼす含水比、セメント量、養生時間などの諸要因の影響について検討した。熱重量示差熱分析(TG-DTA)および走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて、海水環境下におけるセメント水和物の組成変化と土の強度低下のメカニズムを明らかにした。

Conclusion

本研究では、Mg水溶液に浸漬したセメント処理土の強度変化について、セメント添加量と養生時間を変化させて検討した。また、機器分析を用いてセメント処理土の強度低下メカニズムを明らかにした。主な結論は以下の通りである：

1)Mg水溶液に浸漬したセメント処理土は，セメントに由来するCa成分のほとんどを溶出した。しかし，浸漬後のMg濃度は有意に増加した。

2)セメント処理土の一軸圧縮強さはMg水溶液浸漬後著しく低下した。強度低下率は，本研究の条件下で82.0 %から95.5 %であった。

3)Mg溶液に浸漬する前と後の試験片の一軸圧縮強さには強い相関があった。また，強度低下は含水比が高いほど大きかった。

4)Mg水溶液に浸漬したセメント処理土の強度低下は，比較的結合力の弱いC-S-HからM-S-H

に変化したためと考えられる。

本研究では，作製した供試体の含水比が液性限界を超えていた。したがって，このような状態は，セメント処理土が劣化したときに強度の著しい低下を引き起こしたと考えられる。

そのため，セメント処理土が劣化したときに強度が著しく低下したと考えられる。さらに、海水の代用として高濃度のMg水溶液を用い、供試体の劣化を促進させた。

したがって、実際の現場条件下でわずか数ヶ月で著しい劣化が起こるとは考えにくい。

101405

Abstract

熱伝導率などの土壌の熱特性を適切に評価することは、熱伝達やエネルギー効率設計を左右するため、地中熱利用ヒートポンプシステムの設計において特に重要である。熱伝導率の推定には複数の方法を用いることができますが、異なる（あるいは同じ）方法を用いた場合、測定値に大きなばらつきが生じることがしばしば報告されています。この研究では、過渡条件下で試験した基準砂の熱伝導率および熱接触コンダクタンスに関する詳細な研究を行い、加熱時間、飽和度、土壌密度、温度、熱流束強度など、いくつかの要因が熱伝導率に及ぼす影響を分析した。

および熱流束強度などのいくつかの要因が、乾燥状態または完全飽和状態の熱伝導率測定に及ぼす影響を分析した。測定誤差や不均質性の影響を避けるため、締固め比の異なる3つの試料のみを用意し、異なる制御変数（温度、試験時間、注入熱流束）の下で、乾燥状態および完全飽和状態で系統的に試験を行った。

線源解法に基づく2つの解析手法を用いて、土壌の熱伝導率を推定し、プローブと土壌の熱接触コンダクタンスを評価した。

熱伝導率と土壌状態および試験変数との間に有意な関係が得られ、規格で通常推奨されている加熱時間よりも長い加熱時間が明らかに必要であることが浮き彫りになった。最後に、本研究では、測定した温度値を用いてプローブと土壌の熱接触コンダクタンスを決定し、土壌の熱伝導率推定における関連性を示した。

Introduction

地中熱源ヒートポンプシステム（GSHP）は、従来の空調システムに代わるクリーンで再生可能かつ持続可能な代替手段である（例えば、Low et al；

Vienken et al.） GSHPは、気候変動がもたらす課題に立ち向かう方法として報告されており、CO2排出量と化石燃料依存度の削減に貢献することができる。

Jocic´ら、2020；Ahmedら、2022）。

GSHPの効率は、一次回路で発生する熱伝達に大きく依存する。

例えば、ボアホール熱交換器（BHE）、エネルギー杭、擁壁、地下スラブ、トンネルライニングなどの熱活性化構造要素などである（Sipio and Bertermann, Nov 2017など）。

土壌中の熱伝達は、伝導、対流、放射という3つの主要なメカニズムによって駆動される。対流と伝導は、流体（液体または気体）や固体

と固体では、それぞれ対流と伝導が支配的である。輻射は媒体を必要としない（Yun and Santamarina, 2007）。GSHP、すなわち閉ループ・システムでは、伝導が圧倒的に優位なメカニズムである（Brandl, 2006など）。しかし、対流による熱交換も一次 回路に関連することがある。例えば、透水係数が105ms1 を超える飽和土壌で、土壌の細孔内に大きな水流がある場合などである。GSHPの適切な設計とエネルギー効率の評価には、土壌の熱特性の評価が不可欠である。

熱伝導率 k (Wm1K1)は、最も重要な土壌特性であり、地熱システムにおける熱伝導プロセスを解析する上で重要な役割を果たす(e.g.

Nam et al., 2015; Deng et al., 2020)。この特性は、物質の熱伝導能力を決定する。フーリエの法則によれば、伝導による熱伝達率に関係する、

q（Wm2）と、土壌の単位面積に生じる温度勾配$T との関係である：

q= -λ∇T

土壌の熱伝導率には、いくつかの要因が影響する。三相媒体である土壌の熱伝導率は、固体粒 子、空気、水の熱伝導率に依存する、

土の熱伝導率は、固体粒、空気、水の熱伝導率、 それらの体積分率、粒子形状、および空間的配置に依存 する。さらに、水と空気（熱伝導率が低い）の熱伝導率が大きく異なるため、kは飽和度Sr（Farouki, 1981; Abu-Hamdeh and Reeder, 2000; Dong et al.

土壌の熱伝導率は、原位置熱応答試験（TRT）（Franco and Conti, 2020など）または室内試験（Witte et al.） 実地測定の主な利点は、実際のスケール条件、土壌地質学的条件、空間的不均質性、地下水質などを考慮した大量の土壌を対象とすることである。

土壌の熱伝導率に直接影響する空間的不均質性や地下水の流れを考慮することができることである（Low et al.） in situ TRT

の方法は文献にいくつか報告されているが、そのほとんどは（BHE）内で加熱流体を循環させる手順に基づくものである（Zhang et al.） 熱負荷を知ることによって

BHEに注入または排出される熱負荷を知ることで、入口と出口で発生する温度変化から、平均ベースで地盤の熱伝導率とBHEの熱抵抗を推定することができる（Casasso and Sethi, 2014）。

現場測定では、主に機器と地上の接続配管が適切に断熱されていなかったり、配管の長さが最小化されていなかったりすると、熱損失に関する誤差が大きくなる可能性がある。さらに、TRTデータを解釈するために使用される手法も誤差の原因となる可能性がある。

熱伝導率の過大評価につながる可能性がある（Signorelli et al.）

実験室試験は、定常法（絶対法、比較カットバー法など）と過渡法（針プローブ法、過渡計画線源法など）の2つに大別できる。

(針プローブ法、トランジェント・プランソース法、オプティカル・スキャニング法など）。前者では、定常状態の熱流束が確立され、温度は時間と共に変化しない。

一方、後者ではその逆が起こる（Zhao et al.）

実験室法は、迅速（特に過渡法）かつ安価であることに加え、熱伝導率試験に関わる主な変数をより適切に制御することができます。

とはいえ、試験される土壌の体積ははるかに小さいため、現場TRTのボアホールスケールと比較すると、代表的な値は得られない（例えば、Low et al, 2014; Vieo et al, 2016）。

ら、2014；Vieiraら、2017；Łukawskaら、2020）。

しかし、試料の乱れ、再構築、水の移動といった側面は、熱伝導率測定に影響を及ぼす可能性が高い。

文献レビューに基づき、Lowら（2014）とVieiraら（2017）は、熱伝導率の原位置値は実験室由来値よりも系統的に大きいことを報告している。

実験室由来の値よりも大きいことを報告している。これらの不一致は、主に試料が十分に密閉されていなかったり、すぐに試験されなかったりした場合の含水率の低下と試料の乱れに起因すると考えられる。

異なる実験室試験を比較した場合にも、相違が観察される。定常状態の実験室試験は、通常、より長時間に及び、熱損失を避けるためにより多くの準備を必要とする。

このような試験の期間が長いため、水の移動が試験土の不均質性の一因となり、熱伝導率の測定値に食い違いが生じる可能性があります。実験室での過渡試験では、加熱が数分間しか続かないため、この特徴を防止または低減することができる。しかし、同じカテゴリの過渡的な実験室法でも不一致が観察された。

例えば、ニードル・プローブ法では、プローブを設置するためにニードルを挿入したり穴を開けたりした後の土壌の攪乱に起因する誤差がある。これらの誤差は

トランジェント・プラン・ソース法では、針の挿入や事前の穴あけは必要ない。逆に、ラインソース法（ニードル・プローブ）は、粒径が細かい場合に有利である。

本研究では、土壌の熱伝導率とプローブと土壌の熱接触コンダクタンスを推定するために、過渡熱プローブ法を用いた。熱接触コンダクタンスは試験結果に影響し、試験条件を理想的な連続熱線源とは異なるものにすることを考慮し、媒体とプローブ間の熱接触コンダクタンスに特別な注意を払った。熱接触抵抗は、接触界面を横切る熱伝達が発生するときに使用されるカーネルの熱特性である。この熱的特性は、熱エネルギー交換、ひいては熱供給システム全体のエネルギー性能と効率に影響するため、浅い地熱システムにおける熱伝達プロセスを解析する際に考慮されるべきである(Xianet al., 2018)。

温度差は 2 つの界面間の熱接触抵抗によって生じる。界面で生じる温度降下と熱流束の比は熱接触抵抗を与え、その逆数は熱接触コンダクタンスhc（Wm2.K1）として知られ、DT cは接触界面における温度降下である（Zhao et al.）

熱接触コンダクタンスhcは、様々な用途において、またBHEやエネルギー杭の設計や解析においても不可欠な要素である。GSHPの性能向上は

GSHPの性能向上は、コンダクタンスが高い（熱抵抗値が低い）ことによ ってもたらされる。

コスト削減につながる。熱接触コンダクタンスは、表面の粗さ、うねり、平坦性に加え、接触圧力、間隙物質、およびそれらの熱伝導率に依存する。

Douら（2016）によって、熱接触コンダクタンスは界面温度の上昇とともに増加することが報告されている。しかし、この増加は、表面粗さが低い試験片よりも高い試験片の方が速かった。TRT試験における熱抵抗に関する研究はいくつかあるが、実験室試験に関しては、この側面は一般に無視されている。

加熱時間間隔と熱接触コンダクタンスを考慮したサーマルプローブ法の解析に関する研究は、文献上ほとんど見あたらなかった（ほとんどがプランソース法で考慮されている）。Goodhew and Griffiths (2004)による研究では、Microsoft Excelのソルバールーチンを使用して、複数の試料に設置したサーマルプローブからのデータを解析しています。

ルーチンを用いて解析した。プローブと試料の熱コンダクタンスは、開始時刻と終了時刻を指定して適切な時間間隔を選択することで推定した。

この研究では、時間対数による温度上昇の線形回帰を得るために、600秒のオーダーでより大きな時間間隔とより高い初期時間を推奨している。しかし、いくつかの材料ではこの挙動は確認できなかった。

別の研究でも、加熱時間を長くすることを推奨している（例えば300秒）。

Lowら、2014）。

本研究では、過渡熱プローブ法を用いた、基準不適格土（フォンテーヌブロー砂）の熱伝導率測定を紹介する。乾燥状態および完全飽和状態の両方における不均質性に関連する差異を可能な限り排除するため、同じサンプルで系統的な一連の試験を実施した。針と土壌サンプルの接触界面における熱伝導率を考慮した。土壌の熱伝導率と熱接触コンダクタンスの、土壌の状態（締固めと飽和度

度）および試験制御変数（温度、加熱時間、注入熱流束）への依存性も分析した。

土壌とステンレス鋼プローブの熱接触コンダクタンスの決定には、解析的な過渡解に基づく2つの方法が用いられた。

1つ目の方法は、ln tに対してプロットされた土壌温度上昇に依存し、2つ目の方法は、ln tの導関数に対してプロットされた温度上昇の導関数に依存する。

を検査するよりも、微分値がほぼ一定である場所を決定する方がより厳密であるためである。数値シミュレーションを行い、2つのアプローチの結果を検証した。

本論文の新規性は以下の点にある：

1.飽和度、密度、温度を完全に制御した条件下で、不均質要因をすべて排除して、導電率に及ぼす試験パラメーターの影響を定量化した。

2. 導電率の決定について、解析的、数値的に詳細に分析し、試験曲線の導関数に基づく解析による定量化を提案する。

3. コンダクタンスを定量化し、そのサンプルの状態条件と試験パラメーターへの依存性を調べる。

4. 各条件と変数の影響を個別にテストした、

これにより、各条件の影響を分離し、熱伝導率の結果を各パラメーターの変化の直接的な出力とみなすことが可能になった。

5. 加熱時間が土壌伝導率の計算値に及ぼす影響の分析。

Conclusion

本論文では、フォンテーヌブロー砂の土壌熱伝導率と熱接触コンダクタンスを過渡条件下で測定した詳細な研究を紹介する。

従来の解析解法に基づく2つの方法論が示されている。その理由は、熱伝導率を測定することなく、熱伝導率の結果を得ることができるからである。

時間間隔を決定する必要がなく、恣意性を排除できるためである。

この研究の革新性は、土壌の状態（乾燥または飽和）によって異なる加熱時間が必要であることを示した点にある。乾燥状態の土壌の熱伝導率を測定するには、メーカーが推奨する時間よりも長い加熱時間が必要であり、一方、飽和状態の試料では、短い加熱時間で十分である。本研究の主な成果の1つは、制御変数の影響をそれぞれ分離して試験したことである。不均一性を避けるため、同じ試料を温度制御された環境で試験した。

これにより、熱伝導率の結果を各パラメーターの変化の直接的な出力として考慮することが可能になりました。

今回の調査から、以下の点が結論付けられた：

土壌の熱伝導率の結果には、加熱時間の影響が顕著に表れ、加熱時間わずか100秒のk値は、主に乾燥状態で過小評価された。したがって、より正確な結果を得るためには、土壌の熱伝導率を過小評価しないように、製造業者が推奨する加熱時間よりも長い加熱時間が必要である。ただし、土壌の熱伝導率の推定に及ぼす外部境界の影響を避けるため、加熱時間は特定の値を超えてはならない；

- 飽和状態では、熱伝導率が高いため、温度上昇が低くなり、より短時間で安定した値が得られる。

飽和状態では，熱伝導率が高いため，温度上昇が少なく，熱接触抵抗の影響を克服するために必要な時間が短いため，より早期に安定した値が得られる；

- 土壌の熱伝導率の決定には，温度と熱流束強度の影響が大きい。これは，空気中や空隙中の水分の対流に起因するものである。

これは，空隙中の空気や水の対流，および／または固体粒子の弾性膨張に起因する；

- 予想されたように，試験変数が土の熱伝導率に大きな影響を与える。すなわち，飽和の程度，次に土の空隙率である。

熱接触コンダクタンス

- 熱プローブを用いた実験室での土壌の熱伝導率測定において，熱接触コンダクタンスを考慮することは，正確な測定と熱試験の正確な再現のために極めて重要であることが示された；

- 熱接触hcの結果は、定常状態に近づかないか、より多くの時間を必要とする乾燥した砂試料において、より大きな不一致を示した。一方、飽和砂試料では、定常状態に達するのが早いため

定常状態に早く到達するため、熱接触コンダクタンスが安定し、不一致が減少する；

101424

Abstract

鉄道などのインフラに使用される堤防の浸水は、浸透によって引き起こされる微粒子の移動によって、斜面の持続的な弱体化を引き起こす可能性がある。実験室での実験では、輸送用堤防の建設に使用されるものと同じ性質を持つ粒状土のサンプルに内部浸食を誘発し、サンプル内およびサンプルからの粒子の移動がせん断波速度、強度、剛性、透水性の変化をどのように引き起こすかを評価した。水平ベンダーエレメントを使用して測定したせん断波速度の変化は、最初のサンプル質量の1%までの微粒子の除去で最大19%まで観察された。せん断波速度の変化は、浸透によって誘発された粒子移動の間の浸透性変化の発生を特定するための指標であることがわかった。測定された透水性の変化の中央値は、微粒子を15%含む試料で+5%、30%含む試料で34%であった。直接観測された最大の透水係数とせん断波速度の変化は、浸透の初期段階で発生した。試料から除去された物質の質量とピーク摩擦角の間には負の相関関係が観察された。浸透後、土壌は二重の剛性挙動を示した。

剛性と強度の変化は、微粒子の再分布と間隙の開口によるものと考えられた。この結果は、洪水や浸透の影響を受けた土工のモニタリングに示唆を与えるものである。というのも、それに伴う微粒子の再分布が斜面の特性に大きな変化をもたらす可能性があるからである。

Introduction

洪水による輸送堤防の破壊は比較的一般的であり（例：Tsubaki et al., 2017、Polemio and Lollino, 2011）、いくつかの致命的な問題に関連している（Mossa, 2007）。輸送堤防は洪水貯留のために設計されていないことが多いが、リニアインフラの堤防の背後で洪水が 発生するのは、堤防が斜面の基部に沿って、あるいは全域の氾濫原を横断して、流出水の障壁として機能 する可能性があるためである（Mossa, 2007, Bennett, 1884 など）。気候変動の下で極端な降雨現象や洪水の増加が予想される中（Field 他、2012 年、Tabari、2020 年）、斜面形成材料の特性に及ぼす洪水の影響を理解し、洪水に対する堤防の回復力を高めることは、特にインフラが老朽化している地域において、ますます重要になる。浸透は材料の強度に影響を与えるため、中長期的な堤防の安定性に影響を与える（Sato and Kuwano, 2016）。強度と地盤挙動の変化に加えて、堤防全体のせん断弾性率の特徴的な変化は、鉄道インフラに高速列車が動的荷重を加えた際に、局所的な不安定性を引き起こす可能性がある。

高速鉄道が世界的に拡大し、異常気象や洪水が増加すると予想されることから（Dodman et al., 2022, Field et al., 2012）、資産の全寿命にわたって堤防の安定性に影響を与える可能性のあるプロセスを理解することが重要である。洪水は、堤防に沿った水頭の発達を促進し、その結果、堤防を通過する浸透流を促進 する可能性がある。浸透流に起因する不安定化は、すべりや内部侵食に起因する脆弱化によって破壊を引き起こす可能性があり（Polemio and Lollino, 2011）、このプロセスはインフラ工学にとって重要である。堤防周辺の洪水時および洪水後の浸透プロセスに関連する地盤工学的危険性を検討した研究は、ほとん どない。堤防の破壊は洪水直後には発生しないかもしれず、浸透に起因するプロセスによって 弱体化が生じ、それが後に引き金となる可能性があるためである（Johnston et al.、2021）。したがって、特に浸透過程によって内部侵食が発生した場合、洪水後の斜面の強度、剛 性、および挙動の変化を把握できるようにすることが重要である。

内部侵食には主に3つのタイプがある。i) サフォージョンとサフュージョン、ii) ソイルパイピングと後方侵食、iii) 接触侵食である（Bonelli et al.） ここでは、目に見える劣化を伴わずに堤防の特性を変化させることができることから、主にサフォージョンとサフュージョンに注目する。サフォージョンとは、それぞれ体積変化を伴う、あるいは伴わない浸透流による土壌微粒子の侵食である（Fannin and Slangen, 2014）。サフォジオンやサフォージョンの影響を受けやすい材料は、内部的に不安定であると言われている。微粒子の除去（洗い流し）に続いて、強度、空隙率、小ひずみ剛性、透水性などの土質特性に変化が生じることが示されている（Kellyら、2012、Chang and Zhang、2011、Parekh、2016）。内部安定基準は、粒度分布に基づいて土壌の内部安定性を評価するために使用できる（Kenney and Lau, 1985, Kenney and Lau, 1986）。一般的に使用される安定基準を表1に示す。土壌や土工がサフォージョンやサフュージョンの影響を受けやすいためには、細粒粒子が粗粒粒子間のマトリックスの間隙を通過しなければならない。

また、微粉が粗粒粒子間の空隙を埋め、微粉の負荷を引き起こし、粒子の移動を妨げることがないように、細粒粒子の割合が十分に低くなければならない（Wan and Fell, 2008）。

Chang and Zhang (2013)は、よく勾配が付けられた土壌と隙間勾配が付けられた土壌で微粉負荷が発生するためには、それぞれ約 20 %と約 35 %の含水率が必要であることを示した。内部侵食は、微粒子の移動を引き起こすのに十分な強さの浸透力が試料または斜面を横切って水勾配が誘発される場合に発生する可能性がある（Wan and Fell, 2008）。三軸試験（例：Chang and Zhang, 2011, Sato and Kuwano, 2016, Luo et al., 2013）では、内部侵食による粒子損失後のせん断時に、サンプルのピーク強度が低下し、収縮土の挙動が発現することが示されている。さらに、洗い出しが始まるとサンプルの透水係数が初期に上昇し、その後、基底部の土の孔が詰まると透水係数が低下することが示されている（Chang and Zhang, 2011, Ke and Takahashi, 2014, Fannin and Moffat, 2006）。サンプルの上流域では、微粒子の損失が大きい。実験室環境でのモデル堤防の表面波モニタリングでは、浸透による堤防の特性の劣化が示されており、表面波速度の最大30%までの低下は、間隙水圧の上昇と有効応力の低下に起因している

現場環境では、表面波速度の季節変動が測定され、堤防の飽和度と間隙水圧の変動に起因している（Gunn et al.） 水分に制御された土壌特性の短期的な変動に加えて、材料特性の永続的な変化を理解することが重要である。例えば、浸透によって誘発される粒子の移動によって引き起こされ、土工の劣化を引き起こす可能性が高い（Sato and Kuwano, 2016）。粒子損失に伴う土の剛性とせん断波速度（Vs）の変化を評価する研究は限られている。実験室規模の試験では、間隙流体中に微粒子が存在すると、ガラスビーズで構成された土壌の大粒子の接点に微粒子が堆積するため、サンプルの剛性が増加することが示されている（Alramahi et al.） ベン ダー要素は、局所的な有効応力の変化に伴う Vs の変化を特定するために使用されており（Parekh, 2016）、内部浸食の代用とし て使用された塩微粉の溶解後には、Vs が最大 26 %（Truong et al. しかし、内部浸食を受けた試料のVsの変化を評価した研究は知らない。浸透力を受ける粒状盛土材料の強度、せん断波速度、透水係数がどのように変化するかを、盛土建設で使用される典型的な2種類の微粉含有量について試験することを目的とした。特に、間隙からの微粉の除去、微粉の再堆積と下流への蓄積、およびサンプルからの微粉の除去によって、内部の微粉の移動がサンプルのせん断波速度、剛性、透水性および強度にどの程度の変化をもたらすかを明らかにしようとした。我々は、洪水シミュレーションにおいて、より大きな水頭で、より長い時間、これらのプロセスが促進されるかどうかを評価することを目的とした。この評価を裏付けるために、浸透流中のマイクロ地震学的手法を用いて試料の Vs の変化と流出土砂の質量を測定した。

Conclusion

水平ベンダー要素測定を用いて、浸透流による粒状地盤の透水性と剛性の変化を三軸環境で測定した。その結果、S波速度の変化と透水係数の変化には、合計で1 %の材料除去が関係しており、最大で20 %まで変化することがわかった。試料からの微粒子損失の増加は、摩擦角の減少を引き起こすことが示された。浸透後のせん断では、サンプルは主にひずみ硬化挙動を示すことが示された。しかし、二重の硬さが観察され、これは粒子間接触部での微粒子の沈着による土壌の密集ゾーンの形成に起因するものであった。実験期間中、大部分のサンプルで正味の透水性の低下が観察された。これらの変化は、洪水やその他の原因による斜面からの浸透が、土工や斜面を不安定な方向へ動かす可能性が大きいことを示している。材料特性の変化と損失は、初期の浸透段階で最大となることがわかった。微粒子の含有率が15%と30%のサンプルの間で観察された物性変化の大きさにはほとんど差がなかったが、微粒子の含有率が高いサンプルは、より緩やかな挙動変化を示した。せん断波速度の変化は、試料内の内部侵食の発生をモニターするのに適した指標であると思われる。せん断波速度の変化は、粒状土が浸透流にさらされ、粒子の移動が発生したときの試料の透水性の変化と一致することが分かっている。しかし、現段階では、せん断波速度の変化と透水係数の変化との間の決定的な経験的関係は特定されていない。単一のせん断波速度モニタリング・ポイントを用いた試験では、試料の特性挙動におけるマス・スケールの変化の方向、大きさ、および原因を完全に定量化するVs測定値を得ることはできない。したがって、浸透中の試料の挙動を完全に定量化できるように、より高分解能のベンダーエレメントアレイを用いた試験をさらに実施することを推奨する。