101422

Abstract

杭支持盛土は、高速道路の拡幅工事で広く採用されている。新旧の盛土の間には、しばしば大きな差圧沈下が発生する。これまでの研究では、拡幅地盤の異なる部分間の相互作用メカニズムは明らかにされていない。本研究では、軟弱地盤上に杭支持盛土によって拡幅された路盤について、一連の遠心模型実験を実施した。その結果，杭支持盛土によって拡幅された下層地盤の変位に及ぼす旧盛土と杭の影響を，変位の実測結果に基づいて解析した．堤防の変位は主に鉛直下向きであり，基本的には軟弱地盤の変形に起因する．旧堤防は，軟弱地盤基盤の鉛直変位を斜面面方向に順に増減させながら再配分している．杭は堤防の上方で支持効果を発揮し、軟弱地盤の上下動を制限する。杭は、杭の本数が増えるにつれて拡大する一定の領域内で軟弱地盤の変形に影響を与える。杭の影響領域の境界は、深さが増すにつれて地盤軸に向かって移動する。軟弱地盤の鉛直変形は，杭影響領域において深さ方向にほぼ直線的に分布するピークを示す。

杭の本数が増えるにつれて、このような線形分布の垂直度は、まず垂直から斜面に変化し、その後垂直に戻る。

Introduction

近年の交通量の急増に伴い、老朽化した高速道路の拡張がますます必要とされている。高速道路拡張プロジェクトの品質と安全性の保証に対する要求は、ますます顕著になっている。拡幅盛土は、拡幅部分下の土質基盤の過度な沈下を引き起こし（Han et al., 2007）、旧盛土と拡幅盛土の間に差圧沈下を生じさせ、深刻な舗装ひび割れを引き起こす可能性がある（Zhao and Cao, 2013）。問題をさらに悪化させているのは、高速道路の敷地にしばしば分布する軟弱土の基盤である（Mi et al.） 軟弱地盤は、圧縮性が高く、含水率が高く、透水性が弱く、せん断強度が低いため、盛土に沿ってより大きな差圧沈下を引き起こす（Mendozaら、2022；Zhouら、2021）。この結果、タイのバンコク-チョンブリ間の新高速道路のいくつかの区間で、堤防の破壊と舗装のひび割れが発生した（Balasubramaniam, 2021）。さらに、カナダの4車線高速道路のSt.Stephen堤防は、基盤地盤が主に海洋粘土からなる軟弱地盤であったため、決壊した（Badarinath and El Naggar, 2021）。

軟弱地盤が多い中国広東省において、新しい盛土を両側に継ぎ足して拡幅した後の広山高速道路の舗装面に、多くの縦断亀裂と部分的な落差が発生した（Yu et al.） 堤防の拡幅工事における異なる沈下量を解決するために、堤防の荷重を軽減する（Neto and Rodrigues, 2021）、軟弱地盤の圧密を促進する（Indraratna et al. 例えば、深層混合壁式地盤改良とセメント混合砂利の組み合わせは、盛土の変形を低減し、軟弱地盤を丸くするために使用された（渡辺ら、2016）。格子状補強材は、三次元試験と数値シミュレーションの結果に基づいて、新旧路盤間の荷重応力拡散を調整することが証明された（Shen et al., 2021）。英国における典型的な高速道路拡幅や軟弱地盤上の高速道路新設計画における地盤改良の経験は、数多く議論されている（Serridge and Synac, 2007）。これらの技術のうち、杭支持堤防は、変形が小さく、施工が容易で、経済的価値が高く、安定性に優れ、さまざまな地質条件に適用できるという優れた利点があるため、オランダ（Leeら、2021年）、インドの沿岸地域（Gandhi、2016年）、中国の珠江デルタ（Guら、2020年）などの高水路建設で広く採用されている（Tambouraら、2022年；Doiら、2022年）

イラク南部の杭で補強された地盤の現地調査のデータから、粘性土の支持力が 70％増加することが示された（Hameedi et al.、2021）。広州の軟弱地盤における杭支持堤防の現地調査では、堤防の鉛直変形が杭の端部境界付近で最大になることがわかった（Yi and Liu, 2022）。多くの事例研究が、杭が効果的に盛土の荷重を分担できることを証明している（Zhao et al., 2019; Liu et al., 2007）。しかし，荷重と杭の間の距離は，荷重分担に対する杭の効果に大きく影響する（Chen et al., 2008; Li et al., 2019）。

杭は一般に新しい堤防の下だけに配置されるため、新しい堤防と古い堤防の間には大きな差分沈下がある（Pham and Dias, 2021; Han and Gabr, 2002）。そのため、杭効果を含む杭支持堤防の差分変形メカニズムやルールは、設計に不可欠であり、実験的および数値的アプローチによって研究されてきた。盛土下の杭の性能は、伸長-曲げ、曲げ、曲げ-圧縮、圧縮の 4 つのゾーンに分けることができる (Ma et al., 2021)。

混合破壊は主に単杭で発生し，杭の表面粗さと地盤の非排水せん断強度が大きくなるにつれて，地盤の 移動による影響面積が大きくなることを示す（Bauer ら，2016；Xie ら，2017）。これまでの研究では，杭と周辺地盤の挙動に焦点が当てられてきたが，軟弱地盤基盤上の杭支持拡幅盛土における異なる部分間の相互作用メカニズム，例えば，新旧盛土間の変形適合則，杭と地盤の相互効果などについては明らかにされていない。

このような相互作用メカニズムが堤体表面の差圧沈下に対して重要であることから，本研究では，軟弱地盤上に杭支持堤を築造して拡幅した下層地盤について，一連の遠心模型実験を実施した．本研究の目的は以下の通りである．(1)新しい盛土による下層地盤の応答と変形分布を観察すること，(2)新しい盛土による変形に及ぼす古い盛土の影響を分析すること，(3)新しい盛土による下層地盤の変形に及ぼす杭の影響を説明すること，(4)軟弱地盤基盤の変形特性に及ぼす杭配置の影響則を明らかにすること。

Conclusion

杭支持盛土によって軟弱地盤上に拡幅された下層地盤について，一連の遠心模型実験を実施した．(1)盛土の変位は，基本的には下部の軟弱地盤の変形によって誘発され，主に鉛直下方に変位する．(1)盛土の変位は基本的に下部の軟弱地盤の変形に起因し、主に鉛直下方に変位する。土基盤の水平変位は、一般に、斜面面に向かう方向に沿って、地盤軸方向への変位から斜面面方向への変位へと変化する。

古い盛土は、新しい盛土による軟弱地盤基盤の鉛直変形に大きな影響を及ぼし、斜面面に向かう方向に沿って順に鉛直変位が増減する。旧盛土の影響により、軟弱地盤の水平変位は減少し、そのピークとゼロ点は地盤軸方向に移動する。

杭は堤体を上方から支持し、軟弱地盤の鉛直方向の移動を制限する。支持効果は、杭の本数を増やすことで強化される。杭の効果により、新しい堤防の斜面表面への水平方向の配置が増加する。

杭は、杭の本数が増えるにつれて拡大する一定の領域内で、軟弱地盤基盤の鉛直変形に影響を与える。杭の影響範囲の境界線は，ほぼ斜めの線であり，深さの増加とともに地盤軸に向かって移動する。軟弱地盤基盤の鉛直変形は，杭影響領域内で深さ方向にほぼ直線的に分布するピークを示す。杭の本数が増えるにつれて，このような線形分布の鉛直度は，まず鉛直から斜面に変化し，その後鉛直に戻る。遠心分離機の大きさの制限から、無筋の場合、側壁とモデルとの間の水平幅が十分に大きくない可能性があることに注意すべきである。したがって、関連する結論を実務に直接適用する場合には、慎重に検討する必要がある。

101407

Abstract

ジェットグラウチング杭は、低コストで施工が容易であることから、建築やインフラ工学の地盤補強に広く採用されている。しかし、この基礎処理工法は、既設高速鉄道の横変位への悪影響が懸念されるため、中国の高速鉄道関連工事では採用が認められていない。そこで、中程度の透水性を有する深部軟弱地盤において、ジェットグラウチング杭を既設高速鉄道橋梁から離して施工する場合の妥当な施工距離を見出すために、ジェットグラウチング杭が周辺地盤および隣接する高速鉄道橋梁の変形に及ぼす影響について、実験室および現場での一連の試験を実施した。建設現場の地質学的特性と軟弱地盤の力学的特性について、現地試験と室内試験を用いて深く調査した。杭打ちによる周辺地盤の横変位と隣接する高速鉄道橋の変位をモニタリングした。その結果、深部の軟弱地盤では、ジェットグラウチング杭の影響範囲は杭長の約1.75～1.85倍であることがわかった。既設高速鉄道橋からのジェットグラウチング杭の限界距離は、杭長の2倍以上でなければならない。

Introduction

典型的な深部軟弱地盤地域における高速鉄道インフラの建設後の沈下要件に対応するため、中国南東部では土工の代わりに高架橋が広く採用されている。高速鉄道橋梁の設置基準は、通過する列車の運行安全性と乗客の乗り心地を保証するため、非常に厳しい（上下方向および左右方向のたわみ2mm、中華人民共和国国家鉄路総局、2017年；中華人民共和国国家鉄路総局、2021年）ため、高速鉄道橋梁近辺の建設にもっと注意を払う必要がある。中国南東部では軟弱粘土の感受性と圧縮性が比較的高いため、この地域の建設工事は他の地域よりも周辺地盤に大きな撹乱と変形を引き起こす。特に、高速鉄道橋梁の周辺に設置される高圧ジェットグラウチングコラムに当てはまる。杭打ちによって周囲の軟弱地盤に高い横圧がかかると、地盤の骨格が大きく乱れ、その結果、地盤や隣接する構造物が変位する。高速鉄道橋の深杭基礎の場合、杭打ちによって誘発される高い横圧は、杭の横変位、橋脚の傾斜、深杭基礎の支持力の急激な低下を直接引き起こす可能性がある。このようにして、高速鉄道橋の変位基準を満たすことができなくなる。また、ジェットグラウチング杭は、高速鉄道の通常の保護区間（軌道中心から30m）では使用できない。しかし、ジェットグラウチング杭と既存の高速鉄道インフラとの間の臨界距離はどの程度なのでしょうか？また、特殊な地質条件、例えば中国南東部の中程度の感度を持つ構造用軟弱粘土地盤では、高速鉄道の正規化防護領域はジェットグラウチング杭に利用可能なのだろうか？これらの疑問に答えるためには、ジェットグラウチング杭が周辺の軟弱粘土や構造物に与える影響を研究する必要がある。

ジェットグラウチング処理は、費用対効果や施工上の利便性が高いことから、建築物や交通インフラの基礎補強に広く採用されている（Bayesteh and Sabermahani, 2020; Njock et al., 2018a,b; Adsero, 2008; Tornaghi and Pettinaroli, 2012）。この工法では、回転する掘削ロッドの先端に近いノズルからグラウチングスラリーを高圧・高速で土中に送り込み、土の骨格を破壊してソイルセメント構造を生成する（Burke, 2012; Kimpritis, 2013）。ジェットグラウチングのパラメータと周囲の土質特性は、杭の直径と支持力に大きな影響を及ぼすため（Croce and Flora, 2000; Malinin et al., 2010; Pavlovic and Dedic, 2010; Kimpritis, 2013; Tinoco et al., 2014b; Ni and Cheng, 2014; Karahan and Sivrikaya, 2018）、土とジェットグラウトの相互作用を調査するために多くの研究が行われてきた（Modoni et al、 2006; Nikbakhtan and Osanloo, 2009; Flora et al., 2013; Shen et al., 2013c; Rafi and Stille, 2014; Mohajerani et al., 2015; Modoni et al., 2016; Wang et al., 2016; Borges and Goncalves, 2016; Karahan and Sivrikaya, 2018; Giuseppe et al., 2019; Li et al., 2019; Bayesteh and Sabermahani, 2020; Shen et al., 2021）。

研究アプローチは主に、原位置試験や室内試験に基づく理論的・実証的分析に集中している（Carnevale et al., 2012; Erkan and Tan, 2016; He et al., 2016, 2017; Modoni et al., 2019; Nguyen et al., 2020; Shen et al., 2013b; Tinoco et al., 2014a; Xu et al., 2006; Adsero, 2008）。杭打ちプロセスにおいて、高い注入圧力が周辺地盤の変位に大きな影響を及ぼすことは、世界中で広く観察されている（Wong and Poh, 2000; Poh and Wong, 2001; Tiwari and Kumawat, 2014; Chepurnova, 2014）。例えば、Poh and Wong (2001)は、シンガポールの軟弱な海洋粘土地帯で、隣接する大量高速輸送鉄道の駅と高架橋の変形に対するジェットグラウチングの影響をモニターした。彼らのケースでは、ジェットグラウチングゾーンと高架橋の間の距離は一定であり、両者の間にあるダイアフラム壁の変形隔離効果は無視できないため、自然地盤における既存の高架橋から離れたジェットグラウチング補強材の臨界適用距離を把握することはできない。さらに、隣接する構造物のグラウチングによる変形には、建設現場ごとに異なる地質特性や土質特性が重要な役割を果たす。シンガポールの軟弱な海洋粘土での工学的経験は、中国南東部の深部軟弱地盤地域での工学的実践には十分ではない。ジェットグラウチングによる地盤変位を評価するための既存の解析モデルは、主に空洞膨張理論に基づいて確立された（Cao et al., 2001; EI-Kelesh et al.） 異なる空洞形状、土の適切なタイ、荷重条件、境界条件が、異なる解析モデルで考慮された（Pournaghiazarら、2013；Zhouら、2014；Liら、2016；Vrakas、2016；Zhouら、2016a；Liuら、2017；Shenら、2017；Chengら、2018；dos Santosら、2019；Wangら、2020；Zhouら、2022）。実際の杭打ち事例でより複雑な荷重と境界条件を考慮するために、半解析モデル（Zhou et al., 2016b; Su and Yang, 2019）と数値モデル（Wang et al., 2010; ）が開発され、これらは基本的に実験室試験結果（Au et al., 2006,2007; Wang et al., 2010）と現場計測データ（Wang et al., 2013）を採用して検証された。ジェットグラウチング杭によって誘発される周辺地盤の変位を緩和するために、いくつかの新しいジェットグラウチング装置とそれに対応する技術が提案された（Shen et al.） 既存の解析モデルや半解析モデルは、計算が複雑なため、主に単一杭のケースに焦点を当てていた。その結果、杭群の重ね合わせ効果を反映することができない。グループ杭のシミュレーションのための数値モデルは利用可能であるが、調査精度は、地盤構成モデルおよび対応するパラメータの精度に依存する。コンピュータと人工知能の技術的発展に伴い、特に水圧噴出による地盤変位の複雑な地盤問題を 予測するために、機械学習が採用されている（Njock et al, 2021, 2023; Shen et al, 2021）。しかし、この手法の精度は高品質のデータソースに依存している。原位置試験が最も効果的な方法であることに変わりはない。この 10 年間で、鉄道が関与する工事の問題点が調査される機会が増えている（Shan et al., 2018; Zhang et al., 2019; Liu et al., 2020; Shan et al., 2021; Zhou et al., 2023）。しかし、ジェットグラウチング杭の事例に関する出版物は、鉄道関連プロジェクトにおけるこの技術の特殊性のため、ほとんど見つけることができない。ジェットグラウチングに起因する地盤変位に関する既存の原位置測定データをそのまま採用することはできない。したがって、中国南東部の典型的な軟弱地盤地域で、既存の高速鉄道橋梁とジェットグラウチング杭群との間の臨界距離を追求するためには、周辺地盤の杭による変位特性に関する原位置試験を実施するとともに、土質試験所の土質試験を実施する必要がある。

第2節では、杭打ち現場の軟弱地盤の地質学的特性および力学的特性について、室内試験（載荷試験、標準貫入試験など）および室内試験（せん断試験、三軸試験など）を用いて調査した、 第3節では、一軸圧縮試験と三軸試験を用いて、泥土粘土の構造特性を詳細に検討する。第4節では、工学的な地質学と土質特性に基づいて、杭による周辺土の変位と高速鉄道橋の変位に関する一連の原位置試験を実施する。最後に、実地試験データに基づいて、中国南東部の典型的な軟弱地盤地域における既存の高速鉄道橋と高圧ジェットグラウチング杭群との間の臨界距離を推奨する。

Conclusion

中国南東部の深部軟弱地盤における高速鉄道の安全性を確保するため、高圧ジェットグラウチング杭の施工が周辺地盤の変位や隣接する高速鉄道橋梁の変形特性に及ぼす影響を総合的に調査した。杭打ちエリアの軟弱地盤の地質学的特性および力学的特性は、一連の原位置試験および室内試験を利用して調査されている。単一杭と集団杭による周辺地盤と橋脚の変位をモニターした。3つの結論が導き出された：

圧密圧力が土の動的感性に及ぼす影響は，排水条件と圧密応力経路に関係する。非排水条件下では，圧密圧力が高くなるにつれて動的感度は明らかに低下するが，圧密圧力が高くなるにつれて動的感度はわずかに上昇する。圧密圧力が低ければ低いほど，圧密応力経路が土の動的感性に及ぼす影響がより大きくなる。排水条件下での土の動的感受性は，非排水条件下でのそれよりも小さい。圧密圧力が小さいほど，感受性の差は大きくなる。

中国南東部の泥質粘土層の厚さが 10～12 m の深部軟弱地盤地域では、高圧ジェットグラウチング杭 1 本の臨界影響距離は、所定の施工パラメータを用いた場合、杭長の 50 ～ 80 % の範囲にある。

中国南東部の典型的な軟弱地盤地域におけるグループ化した高圧ジェットグラウチング杭の臨界影響距離は、杭長の 175 %から 185 %の範囲にある。グループ杭の列数は臨界距離にほとんど影響しない。

中国南東部の構造用軟弱粘土地帯では、既存の高速鉄道の近傍に建設する場合、通常の保護距離（30m）はジェットグラウチング杭では使用できない。既存の高速鉄道からのジェットグラウチング杭の限界距離は、杭長の2倍以上でなければならない。

異なる地層の原位置試験結果は、粘土の感度が高いほど周辺地盤の変位が大きくなることを示しているが、地盤の感度とジェットグラウチングによる周辺地盤の変位との間の合理的な定量的関係を確立することはまだ非常に困難である。土質感度は室内試験スケールでの土質構造特性を表す基準であり、周辺地盤や隣接構造物の横変位はマクロな工学スケールでの地層の特性を反映するものである。ジェットグラウチングによる地盤や構造物の変位は、地層プロフィール、空間的に変化する土質特性、差応力分布など、さまざまな問題によって大きく影響を受ける可能性がある。実験室スケールの特性評価と工学スケールの応答との間の合理的なクロススケールの関係を確立することは、次のステップの研究の高度な目標である。

101443

Abstract

この寄稿では、乾燥および水抜き条件下での三軸せん断試験における弾性波速度（Vp および Vs）の特性について検討する。異なる粒子形態（すなわち、粒子形状および表面粗さ）を有する試験材料の試料を、3つの戦略、すなわち、同様の初期ボイド比（e0）、相対密度（Dr0）、およびサイドタッピング数（Nt）の下で事前に準備した。微小ひずみ範囲におけるe0と閉じ込めr0の関数としての弾性波速度、すなわちV ¼ aðB e0ð r0 1kPa Þbについては、aは角度の大きい材料や表面が滑らかな材料ほど大きくなり、bとBは粒子の角度が大きくなるにつれて、またはサーフェスが滑らかになるにつれて小さくなることがわかった。三軸せん断では、Vp は初期に増加し、その後緩やかに減少する傾向がみられたが、Vs は初期に増加し、その後顕著な減少を示した後、所定の材料の e0 に関係なく、せん断によって収束した。VpとVsの絶対値に対する粒子形態の影響は、剪断時に複雑であることが判明した。一方、波動比（Vp/Vs）は、同じ形状でも粗い条件下で一貫して大きかった。重要なことは、波動比（Vp/Vs）が粒子形態とよく相関することがわかったことである。より角ばった材料や粗い表面は、各材料の応力と密度の条件で正規化したVp/Vs比がより大きく、これはさらに、文献の微視的な証拠を参照すると、より高度な織物異方性を示している。

Introduction

弾性波速度，すなわち圧縮波速度とせん断波速度（Vp と Vs）は，小ひずみでの試料弾性率の推定（Jovicˇic´ et al.，1996），液状化ポテンシャルの定量化（Andrus et al.，2004），飽和状態の評価（Zhang et al.） また，共振柱（RC）法（Drnevich et al., 1978; Khan et al., 2008），ベンダーエレメント（BE）法（Shirley and Hampton, 1978; Yang and Gu, 2013），ディスクトランスデューサー（DT）法（Suwal and Kuwano, 2013; Li et al., 2022a）などの試験技術や，圧電リングアクチュエーター技術（P-RAT）法（Karray et al. 一方、弾性波フィールド物理学では、現場での微小ひずみ剛性や弾性率を評価するために、主にダウンホールやクロスホールの物理学的手法を用いてS波探査を行っている（Clayton, 2011）。地球に関する知識を得るために使用される従来の地球物理学的試験の他にも、波動伝播は他の惑星の表面トポロジーや地下環境を探索するために使用されている（例えば、小野寺ら、2021年）。材料工学では、超音波プロービングは、メタマテリアルの動的応答（周波数バンドギャップ）の研究を促進する。

波動伝播は、岩石、セメント、クラッキングビーズなど、他の工学材料で発生するひずみの局在化の研究にも適用されている（例えば、Weaver et al.） 弾性波が応力と密度に依存する等方的な状態において、材料特性の影響を評価するための実験的研究が実施されており、以下の式で示されている： b V ¼afðe0Þ r0 1kPa f e0 ð Þ¼B e0 V ¼B1þB2e0 ð1 Þ ð2 Þ ð3 ここで、a と b は外部要因に関係なく材料特性に関連する実験的に決定された定数である。r' は平均有効応力、f(e0) は Hardin and Richart (1963) が提案した速度 (V) を相関させるためのボイド比関数で、B はボイド比補正剤として定義されている。あるr'に対して(V, e0)データの線形ベストフィット直線は式(3)で表され、得られたB1とB2の値を用いてB=B1/B2を計算する。これとは対照的に、f(e0)の別の形、すなわちe0 dを適用した研究者もいる（Jamiolkowski et al.）式（1）および（2）に導入された3つの定数（a、b、B）は、粒子径（Yang and Gu, 2013; Dutta et al., 2019）、粒度分布の均一性（Cu）（Wichtmann and Triantafyllidis, 2013）、粒子形状や表面粗さなどの粒子形態学（Cho et al., 2006; Altuhafi et al., 2016; Otsubo and O'Sullivan, 2018）などの粒子特性に大きく影響される。Choら（2006）は、過去の研究からの膨大なデータを要約し、土壌粒子の角度が大きくなるにつれて、aが増加し、bが減少することを発見した。Sarkarら（2022）は、波速相関への適合性を確認するために、様々な形状パラメータを適用した。彼らは基本的にChoら(2006)によって報告されたものと一貫した傾向を発見した。しかし、Liu and Yang (2018)は、粒子形状は異なるが中央粒径(D50)とCuは同一の材料を用いて一連の実験を行った。彼らは、Choら(2006)と比較して、パーティクル形状によるaとbについて矛盾した傾向を発見した。彼らは、Choら(2006)が提供したデータベースは、小ひずみ剛性の結果に大きく影響することが証明されたCuの影響を扱っていないと主張した(Wichtmann and Triantafyllidis, 2013)。

一方、式(2)に関して、Hardin and Richart (1963)は、丸い形状の材料ではB = 2.17、より不規則な形状の材料ではB = 2.97と報告している。一方、Otsubo and O'Sullivan（2018）とDutta et al.（2020）は、表面が滑らかな球状のガラスビーズについてせん断波速度測定を行い、それぞれ1.28と1.44のB値を得た。粒子形態がa,b,Bの決定をより複雑にし、弾性波特性の把握を困難にすることが明らかである。

粒状試料が応力異方性と塑性変形を経験した場合のVpとVsの変化を検討した研究はほとんどありません。理論的には、嵩弾性率とせん断弾性率の計算に使用されるVpとVsの方程式は、媒体が応力異方性を示さないと仮定した場合にのみ適用可能です。Styler and Howie (2014)は、三軸試験中の連続せん断波速度測定を実施し、Vsが最初は増加するが、その後軸方向応力の増加とともに減少することを発見した。したがって、式（1）で示される応力に対する指数関数的な関係はもはや成り立たない。Dutta ら（2020）は、試料が膨張し始める軸ひずみと、乾燥および水抜き三軸圧縮下で Vs のピ ーク値を示す軸ひずみとの間に整合性があることを発見し、土の骨格が波速度に強く影響することを示 した。Kaviani-Hamedaniら（2021）は，式（1）および式（2）を用いて，地盤の軸ひず みが波速度に与える影響が大きいことを明らかにした。(1) が適用されるのは、粒子が大きく再配列し、接触ネットワークが崩壊する前だけである。離散要素モデリング（DEM）を用いて、波速と地盤のミクロ力学的なファブリック（ファブリックの異方性や 協調数など）との関連を明らかにする試みが行われた（Li et al. このような観点から，載荷過程を通じて波速測定を継続的に行うことで，土壌の微細構造を明らかにする巨視的な尺度として，いつでも十分な波速データを得ることができる。この寄稿では、三軸荷重の間、ディスクトランスデューサ（DT）を用いて弾性波速度測定を行った。試験材料とそれに伴う三軸負荷プロセスは、Li et al. 最初の研究課題は、実験結果に基づいて検討される： 粒子形態は、載荷過程における小さなひずみから大きなひずみまでの Vp と Vs の変動にどのように影響するのか？このため、等方性状態における弾性波速度の特性を、形状および粗さパラメータと定量的に相関させる。Liら(2024)に詳述されているように、初期充填密度、すなわち初期ボイド比(e0)、初期相対密度(Dr0)、またはタッピング数(Nt)の影響を排除する戦略を用いて、より大きなひずみまで三軸荷重をかけたときの弾性波速度の変化も調べた。第二の研究課題は、Li et al： 弾性波速度の変遷は、粒子形態の影響を考慮すると、どのように土のミクロスコピックな洞察力を反映できるのか？この目的のために、Liら,(2021a)を再検討し、マクロな波速度データとDEMシミュレーションによって調査されたミクロな土壌ファブリックを関連付ける。

Conclusion

本寄稿では、微小ひずみから大ひずみまでの粒状材料の弾性波速度に及ぼす粒子形態の影響について検討した。第一に、等トロ定数（a,b,B）を定量化し、粒子形状および表面粗さパラメータと関連付けた。次に、単調三軸圧縮中の弾性波速度測定を連続的に行った。初期充填密度の影響を排除するため、試料を同じ初期ボイド比(e0)、相対密度(Dr0)、または所定のタッピング数(Nt)の調製方法に分類した。最後に，Li et al. 実験結果と関連する解析によると，以下のような結論が得られた：

材料定数a、b、Bは粒子形状に影響され、より角ばった材料ではaは小さく、b、Bは大きくなる。材料定数a、b、Bは粒子形状に影響され、より角ばった材料ではaはより小さく、bとBはより大きくなります。粗面変形ガラスビーズ(RDGB)のB値を除き、表面粗さが大きくなるとaは減少し、bとBは増加します。

ある材料について、Vpは軸方向ひずみ(ea)によって急激に増加し、さらにせん断が進むと緩やかに減少する。これとは対照的に、Vsは初期に増加し、その後eaとともに減少し、最終的にはe0に関係なく収束する傾向があります。この収束傾向は、Vs-(r01 r03)0.5平面でも観察される。波動比(Vp/Vs)は、eaとともに大きく増加し、eaに対して安定する傾向がある。Vp/Vsの値が等方性状態での値と比較されることは、剪断と応力異方性の開始を示している。

丸みを帯びた素材では、剪断開始時にVpがより急激に増加し、Vsが急速に低下する。角のある材料は、Vpがより緩やかに増加し、Vsの収束が遅れる。しかし、粒子形態がVpとVsの絶対値に及ぼす影響は複雑である。Vp/Vsは、同じe0、Dr0またはNtで一貫して観察される表面粗さの増加に伴って増加することがより注目される。

正規化されたVp/Vsの変動は、全体的な規則性（OR）の増加とともに減少し、より角張った材料がより大きなVp/Vs値を示すことを示している。一方、正規化Vp/Vsの増加傾向は、より粗い条件下でも見られる。Liら(2021a)を再検討すると、Vp/Vsは、接触法線という観点から、織物異方性に及ぼす粒子形態の影響を反映する指標として機能することができ、より角ばった材料は、与えられた応力状態および充填密度に対して、より顕著な織物異方性を示すことが明らかになる。このミクロからマクロへのつながりは、マクロな尺度として弾性波を用いることで、ミクロメカニカルな土壌構造を予測する可能性を提供する。

101423

Abstract

エネルギー効率比の高い脈動直流(PDC)の電気浸透補強メカニズムに基づき、定直流(CDC)とPDCの2種類の電圧負荷を用いて、異なる電位勾配下でのPDC電気浸透排水量の計算方法を検証した。実験室試験により排水重量と排水電流を求め、エネルギー効率比、土壌抵抗率、接触抵抗を算出した。初期電位勾配を考慮して、各試験グループのエネルギー消費量を分析した。その結果、同じ電位勾配のもとでは、PDCとCDCの土壌抵抗率と電気浸透排水量に大きな差はないが、接触抵抗に大きな差があり、PDC試験群では電流強度が低く、エネルギー効率比が高いことがわかった。PDCの電気浸透排液速度の式を係数lで記述し、エネルギー効率比対電位勾配曲線を計算したところ、実験結果とよく一致した。PDCの電気浸透がCDCに比べてエネルギー消費量が少ない理由を、電気浸透の排水メカニズムの観点から説明した。

Introduction

軟弱地盤の処理方法として普及している電気浸透法は、電極を土中に挿入して電界を印加する。このプロセスは、排水と圧密を促進し、最終的に軟弱地盤の強度を高める。電気浸透現象は、1809年にロシアの学者Reussによって実験室で発見されていたが、Casagrande（1949）が1934年にアルミニウム電極を用いた軟弱粘土の電気浸透試験を行い、1939年に鉄道基礎の掘削に電気浸透現象を適用して初めて、電気浸透現象が地盤工学の分野に本格的に導入された。従来の排水圧密工法と比較して、電気浸透工法は、工期の短縮、基礎の不安定化のリスクの低減、機器の設置が容易であるなどの利点がある。これらの利点により、電気浸透圧法は、高含水率・低透水性を特徴とする軟弱粘性土の処理に特に有効である。さらに、近年、電気浸透に関する理論的・応用的研究が活発に進められている。

電気浸透法では、一般に定直流（CDC）という電圧負荷形式が用いられ、Uは負荷電圧、tは負荷時間である。図1(a)のCDCのほか、図1(b)の間欠通電、図1(c)の段階的電圧加算、図1(d)の極性反転など、さまざまな電圧負荷形態がある。間欠通電電圧負荷法は、適切な間欠比が採用される限り（Taoetal.,2014）、熱浸透流の持続時間の延長、電極腐食の緩和、エネルギー消費量の減少（Mohamedelhassan and Shang,2001;Fuetal.,2018;Liuetal.,2020a,2020b）という明確な利点を提供する。 ステップ・バイ・ステップ電圧付加負荷法は、電気浸透中に発生する電圧降下を効果的に緩和し、電気浸透プロセスの排水効率を高めることができる（Liuetal.2014;Liu etal.2020a,2020b;Yangetal.2020;Yuanetal.2020）。電気浸透における交流（AC）の利用は、電極の反転を可能にする。1999年、Yoshidaetal. (Yoshidaetal.,1999)は、交流の周波数を1Hzに下げて比較実験的研究を行い、治療効果を直流(DC)のそれと比較した。

しかし、実用上の制約から、これ以上周波数を下げることは困難であることが判明した。

そのため、ほとんどの研究者は、科学研究や工学的用途の両方で、土壌に一定 の排水方向を確立するDC、特に定直流（CDC）を選択している。沿岸地域では、洋上風力と潮汐エネルギーが広く利用されている。風力発電システムと水力発電システムの両方が、磁気誘導線の切断を伴う発電プロセスによって交流電力を生成する。 CDCは通常、交流電力を整流部品とフィルタリング部品を通して変換することで得られる。交流電 力は、フィルタリング部品がない場合、整流され、パルス直流電流（PDC）に変換される。 Zhuang(2021)は、この問題に対処するため、複数の低出力直流電源を採用し、各電源にそれぞれの制御シス テムを組み合わせて、膨張した軟弱粘土の領域で現場処理を行った。 現在の技術的能力をもってすれば、洋上風力や潮力によって発生する電気エネル ギーからPDCを利用し、沿岸地域の広大な軟弱粘土地域を処理することは、十分に実現可能であり、現実的 である。

さらに、PDC 電源の利用は、高出力直流電源装置の部品選択とヘッドバ ンスメントに新たな視点を提供し、電気浸透の応用分野における低出力直流電源装 置の制約から解放される(Siyaretal.,2020)。 さらに、パルス電流と脈動電流は、そのユニークな電気化学的特性により、直流電流に比べて動電学的浄化効果が著しく向上している(Xuetal.,2019;Wenetal.,2022)。それにもかかわらず、土壌中のPDC電気浸透の排水補強メカニズムに関する研究は目立って少ない。電位勾配と電極間隔は、同じ電圧負荷形式の下での電気浸透排水力の効果に直接影響する（Liand Gong, 2012;Xieetal. 本研究では、軟弱地盤内の電気浸透圧における排水補強メカニズムおよび電気エネルギー消費の程度を調査するために、2つの電圧負荷方法を用いて、電気浸透圧の測定を行っている：電位勾配を主要変数として、CDC および 100HzPDC を実施した。試験中の排水、電流強度、土壌抵抗、接触抵抗のデータ収集に続いて、開始電位勾配を考慮した土壌電気浸透のエネルギー消費分析が実施される（Xie et al.） この解析は、現場での河川シルトの大規模処理のための運転メカニズムを理解し、高エネルギー効率比（EER）と高出力電源装置を開発するための参考資料となる。

Conclusion

電位勾配を変化させたCDCとPDCという2種類の電圧負荷条件下で土壌の電気浸透圧排水補強試験を実施し、その後、排水重量、電流、消費エネルギーのデータを取得した結果、総合的に分析すると以下のような結論が得られた。

(1)初期電位勾配を考慮したエネルギー効率比の式は実験データとよく一致する。(2)電気浸透過程では、接触抵抗の大きさは電流の増加とともに指数関数的に減少する。 したがって、PDCの接触抵抗は電気浸透系の電流強度の変化に伴って変動する。計算により、電位勾配が同じ場合、PDCの1サイクル中の平均接触抵抗はCDCの4.55倍であることが判明した。(3)PDCのテント電流の排水特性について、PDCの排水率式にその係数を取り入れることで、より実環境に近づける調整を行った。さらに、PDCのエネルギー効率比式を導出した。フィッティングの結果、PDCの電圧が1サイクルで最低電圧まで低下しても、土壌の電気浸透圧排水量は最大排水量の30％に達することが確認された。(4) CDCとPDCのエネルギー効率比曲線は、電位勾配の増加に伴い、初期に増加し、その後減少する。この特定のケースでは、PDCはより高い接触抵抗を有し、その結果、電気浸透過程中の電気エネルギー消費速度が遅くなる。同時に、電気浸透圧排液速度は著しく低下することなく、その排水特性の恩恵を受ける。したがって、そのエネルギー効率比はCDCを上回る。

101409

Abstract

本研究では、ポアソン比が一定および一定でない場合に、作用応力条件下で鉛直面を有する補強土壁の鉄筋に作用する最大動員荷重Tmaxに及ぼす影響を解析的および数値的に検討した。この評価は、補強材の剛性、壁の高さ、裏込めの摩擦角、締固めによる応力など、さまざまな制御因子を考慮して行われる。解析手順と数値モデルは、作業応力条件下で計測された大規模なジオシンセティック補強土壁のデータに対して検証された。本研究で評価した主要因を考慮すると、ポアソン比を考慮するアプローチよりも、補強剛性の影響が支配的であることが示された。一定のポアソン比と可変のポアソン比を用いて計算されたTmaxの値の間には、最大で約20％の差が得られた。このことは、実用的な観点からは、運用条件下でのTmaxの決定には、一定のポアソン比を利用する、より単純なアプローチを採用することが適切であることを示唆している。

Introduction

複合材料としての補強土構造物の性能は、土と補強材の相互作用に依存し、補強材に沿って動員される荷重の値を決定する（Abramento and Whittle, 1993）。最大補強荷重 Tmax を計算するための従来の設計手法は、限界平衡（LE） 手法に基づいている（例えば、米国では AASHTO（2020）、英国では BS 8006 [BSI, 2010]）。例えばAASHTOの簡易法では、ジオシンセティック補強土（GRS）壁ではピーク土強度が完全に動員されると仮定されている。これらの手法の主な利点は簡便性である。とはいえ、補強材や地盤の変形、締固め、場合によっては凝集力の影響を無視するなど、いくつかの重大な欠点がある（Mirmoradi and Ehrlich, 2015a）。作業応力条件下でのTmax値を予測するためのこれらの方法の限界は、いくつかの研究で示されている（例えば、Rowe and Ho, 1993, 1998; Liu and Won, 2009; Han and Leshchinsky, 2010; Mirmoradi and Ehrlich, 2016; Jiang et al.）

上記の欠点を克服するために、運用条件下での壁の補強荷重予測を改善するための作業応力設計法が開発されてきた（例えば、Ehrlich and Mitchell, 1994; Liu and Won, 2014; Liu, 2015, 2016; Ehrlich and Mirmoradi, 著者らが提案した方法は、Duncanetal. (1980). Tmaxの計算においてポアソン比を考慮するアプローチに関して、本書で紹介されている研究は、2つのグループに大別することができる。第一のグループは定数を仮定しており(Ehrlich andMitchell, 1994;EhrlichandMirmoradi, 2016)、第二のグループは非定数のポアソン比を考慮している(Liu, 2016)。とはいえ、補強土壁（RSW）の性能を支配する多様な主要因を考慮した、これら2つのアプローチの比較はまだ行われていない、 Liu(2016)は、解析法を用いて、特にGRS壁については、静水圧に基づく一定ポアソン比の仮定が適切でない可能性を指摘している。文献によれば、RSWの性能は非常に複雑であり、様々な要因の影響を受けている（例えば、Suzuki et al, 2018; Yazdandoust, 2018; Sharma and Prashant, 2023; Jayanandan and Viswanadham, 2023）。主な要因は、高さ、締固め誘発応力（CIS）、補強材の剛性と間隔、フェーシングの剛性と傾斜、つま先抵抗、荷重条件、裏込め土の特性などである。 これらの要因はそれぞれ個別に評価されるべきものであるが、RSWの挙動を十分に理解するためには、それらの複合的な影響を考慮することが必要である。背面土のポアソン比を考慮するアプローチは、上記の制御要因と組み合わせて、補強構造物の性能についてまだ適切に対処されていない。本論文では，解析的手法と数値モデリングを用いて，土のポアソン比が一定である場合と一定でない場合，および鉄筋の剛性，壁高，裏込め摩擦角，CIS などの主要因が異なる場合の RSW の Tmax の算出に及ぼす影響を評価した．また，解析的手法と数値モデリング の結果を，Tmax の決定に一定のポアソン比を考慮した EM-2016 設計手法と比較した．

Conclusion

動員最大補強荷重Tmaxに対する一定および非一定のポアソン比の影響を数値的および解析的に評価した。提案した解析法は、Liu（2016）の方法に基づくものであり、計算において一定および非一定のポアソン比を考慮することが可能である。さらに、補強剛性、壁高さ、裏込め摩擦角、CISを含むさまざまな主要因子との組み合わせでポアソン比を考慮するアプローチの影響を評価するために、有限差分法（FDM）プログラムFLACを採用した。本研究の主な成果は以下の通りである：

本研究で評価したさまざまな制御因子を考慮すると、ポアソン比を考慮するアプローチよりも、補強剛性の影響が支配的であった。その結果、一般に、ポアソン比を一定にした場合と可変にした場合のTmaxの最大値の差は約20%であった。従来の高分子補強材の剛性では、一定のポアソン比を考慮した解析手法と EM-2016 法が、測定された最大補強荷重と数値計算された最大補強荷重をより良く予測した。さらに、補強剛性を増加させると、計算で可変ポアソン比を使用する提案手法の予測性が向上する。このことは、本研究で使用した中間的な補強剛性で強調された。この場合、一定のポアソン比を考慮するとTmaxが過小評価された。高い補強剛性の場合、ポアソン比を考慮するために使用される仮定に関係なく、すべての手順が静止状態である上限値に近づくため、異なる手順はより類似した結果を提供する。高い補強剛性の場合、FLACによる決定値は、垂直応力の計算にMeyerhof(1955)の方法を採用した解析手法によってよりよく表された。これは、計算で使用した摩擦角にも依存し、摩擦角が小さいほど、説明した挙動が大きくなる。与えられた補強材の剛性と CIS に対して、一定のポアソン比を考慮した解析法は、荷重が主に締固めによって誘発される応力によって制御される締固め影響深度より上に配置された補強層について、数値的に決定された Tmax 値をより正確に表現した。しかし、この深さ以下では、手法の予測能力は、補強材の剛性とCISの複合的な影響に依存する。要約すると、今回の研究における様々な要因の分析から、実用的な観点からは、一定のポアソン比を考慮した文献（例えば、EhrlichとMitchell、1994）に見られるより単純なアプローチを採用することが、作業応力条件下でのTmaxの計算に適している可能性があることが示唆された。

101403

Abstractko

高含水粘土はせん断強度が低く、圧縮性が高いため、建設資材として使用する際に大きな問題に直面する。天日乾燥や化学薬品による安定化などのプロセスによって、これらの粘土の運搬や再利用の際に直面する問題を解決することができる。しかし、自然脱水は時間のかかるプロセスであり、化学的安定化は周辺環境の水素イオン指数（pH）の上昇につながる可能性がある。したがって、本研究の目的は、グリーン材料と副産物材料、具体的には竹チップとフライアッシュという、費用対効果が高く環境に優しい材料を組み合わせて、高含水粘土の性能を向上させることである。これまでの研究では、安定剤の吸水・保水性能に基づいて粘土の性能向上を目的とした混合物の設計は試みられていない。本研究では、各安定剤1gが吸収・保持した水の質量である吸水・保水率（Wab）を、真空吸引下でろ過により未吸収・未保持の水を除去して測定した。竹チップとフライアッシュで別々に処理した粘土について一連のコーン指数試験を実施し、コーン指数（qc）、Wab、安定剤の添加量（Ast）の間に相関関係があることを実証した。ハイブリッド処理粘土に使用される各安定剤の積（Wab/100）（Ast/100）の和として定義されるパラメータbに基づき、複合材料に2種類の安定剤を使用したハイブリッド処理粘土の新しい混合設計が提案された。ハイブリッド処理粘土で実施したコーン指数試験の結果から，提案した混合設計は，目標とするqcを達成するために必要な各安定剤の一定量の組み合わせを，最小限の誤差で予測できることが示された。pH測定試験の結果から、提案した混合設計によって製造されたハイブリッド処理粘土は、フライアッシュ処理粘土よりも環境に優しいことが示された。さらに、ハイブリッド処理した粘土の理論最大CO2固定能力を評価し、CO2固定材料としての可能性を評価した。

Introduction

地盤工学において重要な天然材料の一つである粘土は、その強度が低く、高含水率での圧縮性が高いため、その利用は制限されてきた（Kitazume and Hayano, 2007; Zhang et al.） 高含水粘土は、地下インフラ建設プロジェクトや港湾・水路の浚渫工事など、さまざまな分野でサープラスとして発生する。これらの粘土が液体や泥状である場合、発生現場から処理や再利用が可能な場所まで運搬することは困難である（加藤他、2005；鍋島知久、2009；林・間地、2010）。しかし、この方法は時間がかかり、広い面積を必要とする。従来のセメントや石灰ベースの安定剤による化学的安定化は、よく知られた代替方法である（Bhattacharja et al.） しかし、この方法は、アルカリ溶出によるpHの上昇など、隣接環境の変化につながる可能性がある（Imai et al.） 石灰やセメントの製造自体にも、かなりの量のCO2が排出されるなどの問題がある（Marland et al., 1989; Cement Sustainability Initiative (CSI)/ European Cement Research Academy (ECRA), 2017; Technology Roadmap for ''Transition Finance" in Cement Sector, 2022）。現在、研究者は従来の化学安定剤に代わる持続可能な安定剤の開発に取り組んでいる。ペーパースラッジ（PS）灰（望月、2016；Mavroulıdouら、2017；Tabassumら、2022；Djandjiemeら、2022）、フライアッシュ（LoとWardani、2002；Horpibulsukら、2013；KafodyaとOkonta、2018）、バイオマスアッシュ（VichanとRachan、2013）、鉄鋼スラグ（Kangら、 フライアッシュは、発電所における微粉炭燃焼の結果生じる、細かく砕かれた残渣または副産物である。フライアッシュの性質は、焼成条件や石炭源によって異なる。2016年のフライアッシュの世界総生産量は11億4300万トンで、平均利用率は約60%であった（Jin et al.） フライアッシュは、セメント製造、レンガ製造、堤防や埋め戻し、農業など様々な産業で使用されている。フライアッシュにはCaOが含まれており、水の存在下でセメント化プロセスを生成することができる（Horpibulsukら、2013；Simatupangら、2020）。フライアッシュは粘土の強度と透水性を向上させることができる（Sharma and Singh, 2013）。竹はイネ科の熱帯・亜熱帯の樹木状の草で、さまざまな用途がある。多くの産業の原料、木炭の製造、住宅、製紙、工芸品、燃料などに利用されている。放置された竹林は、周囲の環境や森林に入り込んで成長すると問題になることがある（Kanayama and Kawamura, 2019; Koga et al.） この問題を克服するために、竹林の伐採は日常的な作業となっており、大量の廃棄物を生み出している。これまでの研究では、軟弱地盤を改良するために、チップ、繊維、フレークなどの竹の要素を利用することが強調されてきた。高含水比の浚渫粘土は竹チップとセメントと混合され、竹チップの主な役割は余剰水を吸収・保持することであり（Koga et al. このことから、竹チップのみで処理した場合、土壌の耐久性に懸念があることがわかる。しかし、前述したように、セメントの使用には、高アルカリ性や二酸化炭素の排出といった問題もある。

以上のデータから、この研究の焦点はフライアッシュと竹チップを組み合わせることにあった。フライアッシュは弱アルカリ性で、セメントに比べ固化性は劣るが、粘土の強度と耐久性を向上させることが期待される。しかし、粘土に対するフライアッシュと竹チップの複合効果はまだ検討されていない。また、複合材料に安定剤を使用する場合、処理粘土の配合設計は一般に複雑で手間がかかるが、この問題を解決するための努力はほとんどなされていない。そこで本研究では、竹チップとフライアッシュで処理した粘土について、安定剤の吸水性と保水性に基づく混合設計の方法を検討した。また、混合設計により得られたハイブリッド処理粘土の環境特性についても検討した。竹チップの吸水性と保水性を評価する試みは、いくつかの研究者によってなされている。佐藤ら（2014）によるそのような試みのひとつは、竹チップを大きなティーバッグのようなネットで包み、ネットバッグを24時間水に浸した後、ネットバッグ内の表面乾燥サンプルの重量を測定して吸水・保水能力を測定するというものであった。

IsmantiとYasufuku（2017）による別の研究では、竹チップの吸水性と保水性が、定容積シリンダーを用いて短い養生期間（90分まで）で測定された。金山・川村（2019）の研究では、蒸留水を満たしたビーカーに乾燥竹1gを加えて撹拌した。分間または1440分間吸水させた後、試料を漏斗に注いで余剰水を除去し、その後、バンブーの質量を測定した。吸水および保水能力について調査された安定剤のもう1つの例は、フライアッシュに類似したペーパースラッジ（PS）灰である。Katoら(2005)は、PS灰を一定量の水と混合した計量シリンダーを使用して、PS灰の吸水・保水能力を測定した。PS灰は吸水・保水しながら、時間の経過とともにシリンダーの底に沈殿した。その後、PS灰の吸水容量と保水容量が体積関係を用いて測定された。Phanら（2021, 2022）は、振動ふるいを用いてPS灰の吸水・保水能力を測定する方法を開発した。この方法では、PS灰を水に浸し、密閉状態で規定の養生期間養生した後、53lmのステンレス製ふるいにかけた。

未吸収・未保持の水は、電子シェーカーで振動を与えて除去した。一方、Kassaら(2023)は吸引ろ過を用いて廃棄物系安定剤の吸水性と保水性を評価した。吸引ろ過では、廃棄物系安定剤粒子を失うことなく、廃棄物系安定剤から未吸収・未保持の水のほとんどを除去した。上記の研究に従い、本研究では真空吸引ろ過によりフライアッシュと竹チップの吸水・保水能力を測定した。その後，竹チップとフライアッシュで別々に処理した粘土について一連のコーン指数試験を行い，コーン指数と吸水・保水能力との相関関係を調べた。さらに、各ステアビライザーの吸水・保水能力と安定剤添加率に基づいて新しい混合設計を提案した。この混合設計は，目標とするコーン指数を有するハイブリッド処理粘土を製造するために必要な，さまざまな安定剤の配合割合を予測するのに役立つ可能性がある。提案した混合設計の適用性について議論した。さらに、ハイブリッド処理した粘土のpHと理論上の最大CO2固定能力を評価した。実験方法と結果の詳細をここに示す。

Conclusion

本研究では、竹チップとフライアッシュを混合した粘土の新しい混合設計を検討し、これらの安定剤の吸水能と保水能に基づいた。また、新たな混合設計に従って調製したハイブリッド処理粘土の理論上の最大CO2固定能力についても評価した：

1)竹チップとフライアッシュの吸水・保水率Wab（各安定剤1gが吸水・保水した水の量と定義）は、吸引ろ過法を用いて測定することに成功した。その結果、竹チップの吸水率は、フライアッシュの吸水率よりも大幅に高いことがわかった。フライアッシュの場合、硬化期間によるWabへの有意な影響は見られなかった。一方、蛍光X線分析では、フライアッシュ中のCaOが水和反応によってフライアッシュのWabに寄与している可能性が示された。

2) 竹チップとフライアッシュでそれぞれ処理した粘土で行ったコーン指数試験は、WabとAstの両方がqcに大きな影響を与えることを示唆している。竹チップは、フライアッシュと比較して、2つの固 定剤の中でWabが高く、より高いqcを示した。しかし、b＝（Wab/100）（Ast/100）と定義されるbを導入することで、2種類の安定剤間のqcの差がかなり減少した。そこで，2種類の安定剤を複合的に使用したハイブリッド処理粘土の混合設計が提案された。提案した混合設計では，bはハイブリッド処理粘土の前処理に使用した各安定剤のbの合計と定義した。ハイブリッド処理粘土のコーン指数試験の結果から，提案した混合設計は，目標qcに到達するために添加する必要のある各安定剤の量の組み合わせを，最小限の偏差で予測できることが示された。精度を上げるためには、様々な粘土と安定剤を用いた更なる研究が必要である。

3) 測定された含水率(w)は，さまざまな種類の安定剤について，処理された粘土のqcを一意に決定することはできなかった。これは，土壌試料を100±5℃の乾燥炉に入れると，安定剤によって物理的または化学的に保持された水が除去されるためである。そのため、測定された含水量は、安定剤に拘束された水を液体ではなく固体とみなして修正された。その結果，ハイブリッド処理した粘土のqcと修正含水率（w\*）の関係は，竹チップやフライアッシュで処理した粘土と同様の関係になったが，ハイブリッド処理した粘土のqcとwの関係は，いずれの処理した粘土とも一致しなかった。したがって、粘土の特性を評価する際には、処理粘土中の自由水と拘束水を適切に分離することが重要である。

4) pH 試験の結果から，提案した混合設計に基づいて調製したハイブリッド処理粘土はアルカリ溶出の可能性を低減できることが示唆された。フライアッシュ処理クレー中のCaO、Al2O3、SiO2の量が多いほど、ハイブリッド処理クレーよりもアルカリ溶出が多くなった。さらに，フライアッシュ中のCa成分の炭酸化が，養生期間の経過に伴うpHの低下に寄与した可能性がある。竹チップ中の炭素濃度とフライアッシュの酸化物組成から、ハイブリッド処理粘土の理論的な最大CO2固定能力の評価を試みた。ハイブリッド処理粘土の竹チップによるCO2固定量の推定には、2006年IPCCガイドラインの2019年改良版の考え方を参考にした。ハイブリッド処理粘土の耐久性は竹チップ処理粘土よりも高いと予想されるが、適用後100年間に分解・排出される炭素量は不明である。したがって、本研究では、土壌に添加された竹チップに含まれる炭素量のみを用いており、理論上の最大CO2固定量とみなすことができる。その結果、理論上の最大CO2固定量は、qcの増加とともに増加することが示された。さらに、ハイブリッド処理した粘土の理論的最大CO2固定量は、炭酸化によって増加させることができたが、qcが高くなるとその寄与は小さくなった。

101437

Abstract

粒子の形状は土の力学的挙動に影響するため、地盤工学で注目されるパラメータである。形状は主に、形状、角度、粗さによって表される。形状は全体的な縦横比、角度はエッジとコーナーの鋭さ、粗さは表面の小さな凹凸を表す。この研究では、砂粒子の形状と角度の特徴付けを探求した。その結果、焦点変動顕微鏡の原理を従来の複合顕微鏡に導入することで、粒子の側面像を観察することなく、60 lmという小さな粒子の高さを測定できることがわかった。この方法の頑健性は、6つの異なる供給源から採取した砂サイズの粒子を用いて実証された。重要なことは、この手順で使用する複合顕微鏡は、多くの土壌研究所で利用可能であるということである。フォーカスの変化を用いて測定した高さは、粒子の形状を評価するために使用した。これまでの研究の仮定に反して、形状は与えられた土質と狭い粒径範囲内で大きく変化した。角度性に関しては、粒子形態と「楕円度」として知られる角度性指標との間に系統的な相関関係がある。さらに、楕円度は角張った粒子と丸みを帯びた粒子を区別するには十分であるが、亜丸みを帯びた粒子とよく丸みを帯びた粒子を区別することはできない。

Introduction

粒子形状は土の力学的特性に大きな影響を及ぼすため、地盤工学技術者の関心の的となっている（Holtz and Kovacs, 1981; Cho et al., 2006; Clayton et al., 2009; Shin and Santamarina, 2013）。粒子形状を3つの独立した側面（形状、角度、粗さ）で表現するのが一般的である。形状は全体的な縦横比を表し、角度は角とエッジの鋭さを特徴付け、粗さは表面の質感を指す（Barret, 1980; Cho et al.） 本研究では、砂粒の形状を3次元（3D）特性化できる新しい手法の有効性を拡大し、角度を定量化するために既存の「楕円度」パラメータの使用を検討する。形状の記述子は、理想的には粒子の3次元的性質を考慮すべきである。そのためには、粒子の最短寸法（S）、中間寸法（I）、最長寸法（L）を測定する必要がある（Blott and Pye, 2008）。S、I、Lは、複数の形状パラメータを算出し（例えばWentworth, 1922; Zingg, 1935; Krumbein, 1941; Corey, 1949; Aschenbrenner, 1956; Sneed and Folk, 1958; Dobkins and Folk, 1970; Clayton et al. この粒子形状の3D特性化は、3D形状が機械的挙動に影響するため、地盤工学エンジニアに関連している。例えば、かさばる粒子は平らな粒子とは異なる挙動を示す（Clayton et al.） 砂サイズの粒子の場合、その寸法が小さいため、マイクロスコープを使用して粒子径を測定する必要がある。マイクロスコープで観察した砂サイズの粒子の平面図から、寸法S、I、Lの長さを推定するアプローチはいくつかある（BlottandPye,2008）。 しかし、視線と平行な粒子の「高さ」は観察者から隠されているため、平面像で直接測定することはできません。高さを直接測定するためには、粒子を回転させ、側面像で観察する必要があります（Claytonetal. 概念的には単純だが、これは比較的時間のかかるプロセスであり、あまり実行されない。実際、粒子の3次元形状を捕捉することの実際的な難しさから、複数の2次元（2D）形状記述子が開発されてきた（Wadell, 1933; Riley, 1941; Pye andPye, 1943; Choetal.） 2次元形状記述子を力学的挙動に相関させることに成功したにもかかわらず（Cho et al., 2006）、粒子の3次元形状を説明できる方法を開発する努力は続いている。例えば、レーザースキャンは、砂利サイズの粒子の粒子形状を再現することに成功している（Lee et al., 2007;Mgangira et al., 2013;Sun et al., 2014;Nie et al., 2018;Cruz Matı´asetal.）

しかし、解像度の限界から、この技術は砂サイズの粒子には適用できない。マイクロコンピューテッド・トモグラフィ（lCT）は、砂サイズの粒子の形状をうまく特徴付けることができる強力な技術である（Fonsecaet al., 2012;Alshibli et al., 2014;Zhaoetal.,2015;ZhouandWang,2016;Yuetal. 粒子の3次元形状を考慮する他の方法は、平面図、質量、および粒子の形状に関する仮定に基づいて高さを推定する(例えば、Kwan etal.,1999;Claytonetal.,2009) 。 これらの方法は、一度に複数の粒子を検査できるという利点があるが、その欠点は、試料内の潜在的な変動性を反映しない単一の平均形状の指標を生成することである。 さらに、予備的な結果では、焦点変動顕微鏡法は砂粒径粒子の3D形状特性評価に役立つ可能性が示唆されている（Edey et al. )。焦点変動顕微鏡法は、光学システムの限られた被写界深度(DoF)を利用し、視線と平行な距離を測定する。

DoFとは、「被写体面の両側において、被写体の像のシャープネスを検出できるほど損なうことなく被写体を移動させることができる空間の軸方向の深さ」(ISO,2020)のことである。 特殊な焦点変動顕微鏡のDoFは非常に小さいため、マイクロメートルやナノメートルの範囲の表面凹凸を検出することができる（Scherr, 2007; Danzl et al、 2009; Jumelle et al., 2017）。白金滓の測定から、従来の化合物顕微鏡は特殊な焦点変動装置よりもDoFが大きいにもかかわらず、そのDoFはまだ十分に小さいため、焦点変動顕微鏡の原理を利用して、横方向から直接観察することなく520lmを超える粒子高を測定することが可能であることが示されている（Edeyet al、 しかし、520lmより小さな粒子高については、焦点変位のアプローチは検証されていない。 Wadell(1932)が提唱した真円度指数(R)は、粒子の2次元投影に基づくものであり、真円度評 価を迅速に行うために開発された視覚的比較指標(Krumbein, 1941; Powers, 1953; Krumbein and Sloss, 1963; Cho et al、 2006; Blott and Pye, 2008; ASTM, 2017）。

真円度Rの定義では、「角」とは、曲率の直径がDicを超えない特徴である（Wadell, 1932）。式(1)で定義される真円度Rは、粒子の形状に依存しない。これはBlott and Pye (2008)によって強調され、完全な円がR = 1をもたらす一方で、両端が半円で構成される長方形もR = 1をもたらすと指摘した。逆に、正12角形は、そのすべての形が円によく似ているが、角の曲率Di =0の直径を持つため、R = 0となる。これまでの研究者は、Wadellの真円度の計算には時間がかかり、角の位置と曲率の主観的な判断によって妨げられる可能性があると指摘している（Janoo, 1998; Blott and Pye, 2008; Le Pen et al.） これらの異論を克服するために、Wadellの真円度に代わるより単純なパラメータとして楕円度（E）が提案された（Le Pen et al.）

Wadellの真円度と同様に、楕円度も粒子の2D投影に基づいており、P0は粒子の外周、Peは粒子の2D投影の面積に等しい面積（A）と、粒子外周上の2点を結びその重心を通る最も長い直線の長さの半分に等しい長半径（a）を持つ楕円の外周と定義される。Le Penら(2013)は、粒子の外形が楕円状になるにつれて、Eが最大値1に近づくことを指摘している。逆に、Pe << P0となるような非常にギザギザの輪郭を持つ粒子では、Eは原理的にゼロに近づくことができます。楕円の周囲長Peの閉形式は存在しないため、Le Penら（2013）は、Ramanujan（1914）によって提唱された式（3）で示される近似式を用いた。本論文は、砂サイズの粒子の形状と角度の特徴付けに以下のように貢献する。我々は、以前520 lm(Eddeyら、2019)と小さい粒子高さを測定するために使用された焦点変動顕微鏡法の能力を探求する。

Conclusion

この研究では、パウンド顕微鏡の限られた被写界深度を利用し、横方向から観察することなく粒子の高さを測定する焦点変動法の検証を拡張した。その結果、粒子の高さを測定することで、6種類の砂サイズの物質の形状を定量的に評価することができた。この手順は、地盤工学の研究者や実務家の多くが利用できる簡単な道具（基本的にはコムポンド顕微鏡とダイヤルインジケータ）に頼っている。この手順は、粒子を角柱状の土台に固定するために接着剤や磁気吸引力を使って検証された。さらに、角度を評価するために以前に提案された「楕円度」パラメータの適合性も検討した。その結果、以下の結論が得られた：

a. a. 粒子高さが60～1200 lmの間で変化する場合、焦点変動手順から推定される粒子高さと、側面図で直接測定された粒子高さの間には優れた一致がある。粒子高測定値は不偏であり、4.6 lmの標準偏差を持つ誤差分布を示す。誤差と粒子高さの間に系統的な相関はない。相対誤差は全測定値の98%で5%未満でした。誤差を最小化するために、焦点変動プロセ スは可能な限り大きな倍率で実施すべきである。

6つの異なるソースからの砂様材料の粒子高さの測定に成功したことは、焦点変化法がさまざまな種類の砂に適用できるほど十分に堅牢であることを証明しています。

同じ種類の砂の粒子間では、形状比S/I、I/L、S/Lに大きなばらつきがあります。このばらつきは、同じサイズの粒子を考慮しても残ります。この結果は、以前の研究で採用された仮定と矛盾しています。本明細書で検討された砂は、粒子形態と粒子サイズとの間の相関関係を示さなかった。

粒子の輪郭の全体的な形は、その楕円度 E に影響を与えます。 粒子の輪郭の高さと幅の比が 10 を超えると、Wadell の真円度 R の値が大きく異なる粒子は、非常によく似た E の値を生成することができます。RとEはどちらも角度の指標ですが、これら2つのパラメータは一意に相関していません。

原理的には E は 0 から 1 の間で変化しますが、実験結果は 0.84 E 1 でした。これらの測定には、これらの値が異常に高く見える可能性のある非常に角張った粒子が含まれていました。ワデルの真円度 R と楕円度 E はどちらも、主に丸みを帯びた粒子と主に角のある粒子を区別することができました。しかし、丸みを帯びた粒子と丸みを帯びた粒子を区別することができたのはRだけでした。