翻訳

101411

abstract

横荷重を受ける杭の問題に対して最も広く用いられている解析法は、ウィンクラーばね法である。研究者は、p-y 曲線の非線形定式化を提案しているが、地盤の非線形性の寄与は十分に研究されていない。現在のアプローチの主な欠点は、p-y 式で単一の剛性を使用していることである。本研究では，土の非線形性の程度がよりよく統合されている小ひずみ剛性を持つ圧力依存性硬化土モデル（HS-Smallモデル）を採用して，横荷重杭問題を調査する．検証されたモデルを用いて，様々な杭と土の特性に対するパラメトリック解析を行った．数値解析結果に基づき，単調荷重下における杭の挙動について新たなモデルを提案した．このモデルには，初期剛性，極限地盤抵抗，非線形度のパラメータが含まれている．提案モデルの妥当性は、遠心分離機と文献にある2つの実地試験のシミュレーションによって実証された。提案モデルは地盤の非線形性を正確に考慮し、横変位の推定を大幅に改善した。

Introduction

横荷重を受ける単杭の挙動は、広範囲にわたって研究されてきた。弾性理論を用いた解析解（Poulos, 1971, Kuhlemeyer, 1979）や有限要素解析（Baguelin et al, 1977, Banerjee and Davies, 1978, Randolph, 1981）が発表されている。しかし、土壌の挙動は非線形性が高いため、土壌を線形弾性材料とみなした初期の研究には限界があった。そのため、3次元（3D）有限要素法は、地盤の非線形性を考慮するように拡張された（Brown and Shie, 1991）が、実用的な設計提案はなされていない（Reese and Van Impe, 2000）。地盤反力法は，横方向荷重を受ける杭の問題に対して，土壌は離散的なウィンクラーばねで表される。このアプローチは土の連続性を無視しますが、横荷重の抵抗-変位（p-y）曲線を用いて非線形の挙動を考慮することができます。連続体アプローチは優れているが、離散ウィンクラースプリングを用いた土のモデリングは、特に複雑な土-杭-構造物の相互作用問題を扱う地盤／構造エンジニアにとって有利である。砂地盤の静的荷重に対する p-y 関係の最初の提案は、Terzaghi (1955) によって推奨された線形関係であった。

ムスタング島で実施されたフルスケールの実地試験 (Cox et al., 1974) に基づき、複数の研究者が非線形関係 (Reese et al., 1974, Murchison and O'Neill, 1984, API, 2007) を提案している。Scott (1981) は、遠心分離機の試験結果に基づき、単純なバイリニア関係を提案した。有限要素解析法は、研究者（Pender, 1993, Burd et al., 2020, Thieken et al., 2015, Sørensen, 2012, Wang et al., 2022, Bouzid, 2021）により、砂のp-y曲線に関する新しい方程式を開発した。コーン貫入試験（CPT）の結果に基づく p-y 曲線の数値的な導出が、小口径および大口径の杭について提案された（Suryasentana and Lehane, 2014, Murphy et al.） Kondner（1963）の双曲線応力-ひずみ曲線は、Georgiadisら（1992）によって、実験的に得られたp-y曲線をキャプチャするために実装された。最近のいくつかの研究でも、凝集性のない地盤のp-y曲線に双曲線モデルが用いられている（Papadopoulou and Comodromos, 2014, Lim and Jeong, 2018, Lu et al., 2021, Zhou et al.） 最も頻繁に利用されているp-y曲線の関係はAPI(2007)によるもので、これはReeseら(1974)の研究に基づくものである。

しかし、多くの研究者が、高い初期剛性に関する現在の実務の欠点を指摘している（Murchison and O'Neill, 1984, Finn, 2005, Choi et al., 2016, Rahmani et al.） API（2007）における初期剛性の過大評価は、従来、杭基礎の設計が強度ベースであったため、研究者によって無視されていた。しかし、杭は強度要件を満たすだけでなく、土-杭-構造システムの性能基準を満たすように設計されなければならない。性能評価には、杭と構造物の変位を推定することが必要であり、p-y 曲線の剛性パラメータ の選択は、これらの変位を予測する上で重要な役割を果たす。例えば、Georgiadis ら（1992）は、Terzaghi の推奨値（Terzaghi, 1955）を地盤反力係数として採用したが、その値は Reese ら（1974）が提案した値よりも 2～3 倍低かった。この低い剛性を選択した根拠は、遠心分離機試験で観察された横方向の地盤沈下と一致させるためであった。剛性を過大評価すると、所定の横荷重に対する横変位が過小評価され、設計が安全でなくなる可能性がある。API(2007)の初期剛性の問題を克服するために、いくつかの研究者によって双曲線モデルが提案されましたが、地盤の非線形性と剛性の劣化に正確に対処することはできませんでした。

現在のアプローチの主な欠点は、単一の剛性パラメータに依存していることであり、p-y 曲線の真の非線形挙動を正確に特徴付けるには不十分である。したがって、設計アプローチが容量ベースから性能ベースへと移行する中で、杭や構造物の配置をより正確に予測するためには、現行のp-y曲線アプローチを改善する必要がある。本研究の焦点は、凝集性の低い地盤における杭のための新しい p-y モデルを提案することである。横方向荷重を受ける杭の問題を，FLAC3D（Itasca Consulting Group, 2019）の有限差分法を用いて，小ひずみ剛性を持つハーデ ィング土モデル（HS-Small Model）を用いて数値的に検討した．p-y曲線を特徴付けるために修正双曲線モデルを提案した。提案されたモデルには、元の双曲線モデルで特徴的な初期剛性と極限地盤抵抗に加えて、非線形性の程度を考慮するための2つの追加パラメータが含まれている。提案された修正双曲線モデルは、土の非線形性をp-y定式化にうまく組み込むことができ、その結果、杭と構造物の応答をより正確に予測することができる。

101426

Abstract

粘土上に杭打ちラフト基礎（PRF）を設計する場合、基礎の時間依存性挙動を理解することが不可欠である。しかし、この問題にはほとんど関心が払われていない。本研究では、物理模型実験に基づき、杭配置の異なる杭式ラフト基礎の長期挙動を示す。実験では、異なる鉛直荷重レベル下での長期的な基礎挙動を観察するために、同じ正方形のいかだでありながら杭の本数が異なる3つの基礎モデルを試験した。実験期間中、載荷荷重、PRF沈下量、杭に沿った軸力、およびラフト基礎下の間隙水圧（PWP）を注意深く測定した。その結果、適用荷重が対応する杭群の支持力よりも小さい場合には、杭は適用荷重を支持し、基礎の沈下を抑制するのに有効であった。荷重が大きくなると、ラフトは荷重の増加部分をかなりの割合で分担した。載荷荷重のレベルは、いかだと杭の間だけでなく、杭間の荷重分担にも影響した。隅杭は、中央杭と比較して、小さな載荷荷重では大きな荷重を負担したが、大きな載荷荷重では小さな荷重を負担した。

また、ラフトと杭の荷重分担のばらつきにより、杭の配置や作用荷重のレベルが、長期載荷試験における地盤強度の分布に影響し、その大きさと影響領域の深さの両方が変化した。

Introduction

パイルド・ラフト基礎（PRF）は、経済的な基礎形式として長い間認識されてきた。このタイプの基礎では、いかだが剛性と支持力のかなりの部分を提供することができ、一方、杭は基礎の沈下と差圧沈下を減少させる重要な要素であることは、多くの過去の報告で示されている。したがって、粘土上の PRF を設計する場合、最初の主要な問題は、基礎の変位を制御し、ラフトと杭の間の合理的な荷重分担を同時に達成するために、杭をどのように最適に配置するかということである。

自重の重い高層構造物が凝集性地盤に建設されることが多くなったため、このような地盤における PRF の性能について、様々な側面から集中的に研究されてきた。杭を沈下低減材として使用する点については、初期の研究から、Burland ら（1977）は、「沈下量を許容レベルまで低減させるためには、何本の杭が必要か」、「杭をラフトのどの領域に設置すべきか」という重要な問題を強調している。Randolph（1994）は、いかだの中心部の下に少数の杭群のみを設置することで、差動沈下を最小限に抑えることができると報告した。その後、Randolph (1994)の考え方は、堀越・Randolph (1996)によって遠心模型実験を通じて再確認された。彼らは、ラフト中央部に小さな杭群を設置するだけでも、杭に伝達される荷重がかなり小さいにもかかわらず、ラフトの差圧沈下を大幅に低減できることを指摘した。最近，Bhartiya ら（2022）は，過圧密比の異なる粘土質地盤における矩形杭ラフトの時間依存沈下をシミュレーショ ンするために数値方程式を用いる可能性について包括的な研究を行い，予備設計段階では，数値方程式を 用いて PRF の時間依存沈下を推定できることを示した。

PRFの荷重分担挙動と支持力に関して、Cooke（1986）は、杭の本数と間隔が、同じ安全率で荷重を受けた場合のPRFの荷重分担挙動にどのような影響を与えるかを評価するために、異なる杭配置による一連の小規模実験を行った。Cooke（1986）は、PRFの荷重分担に影響を与える2つの主な要因、すなわち（i）適用荷重の大きさと（ii）構造物-基礎システムの剛性を指摘した。Leeら(2014)は、正規化非線形荷重-沈下関係に基づいて、軟弱および硬い粘土上のPRFにおける全適用荷重apに対する杭が負担する荷重の比率を提案し、遠心載荷試験による結果を比較検討した。彼らは、(i)apは基礎の沈下量が増加するにつれて減少し、(ii)apの減少率は対応する未杭ラフトと群杭の間の支持力比に依存することを示した。MaliとSingh（2018）は、3次元有限要素法を用いて、硬い粘土中のPRFの挙動を調査した。彼らは、杭の間隔が特定の値まで増加すると、基礎の差沈下は減少し、その後増加することを示した。

山下ら（1994）は、硬い粘土の上で高層建物を支持する PRF の挙動を観察し、杭が担 う荷重が支間部の建物荷重に占める割合は、建設終了段階で 49％であったと報告している。Abdel-Fattah and Hemada (2014)は、軟弱粘土上にクリープ杭で支持された PRF の事例研究を通じて、杭の長さ、杭間隔、地盤の状態に応じて、超構造物からの荷重の約 30～60％が、ラフト接触圧を通じてラフトベースの下の土に伝達されることを証明した。他の研究では、Hemsley (2000) と Leung ら (2010) が、PRF としてファウンダ ーションが機能する場合、ラフトは建設荷重の半分まで運ぶことができ、その平均値は 36%であった。

最近では、杭の本数、杭の大きさ、杭の間隔、およびラフトの大きさ、土の性質、杭とラフトの相互作用などの他の要因が、PRF の沈下と荷重分担の挙動にどのように影響するかをより深く調査するために、数値的、実験的、現地測定法などのさまざまな方法による一連の包括的な研究が行われている

一般に、粘土地盤におけるPRFの挙動については多くの側面から研究が行われているが、その多くは全荷重の作用が終了するまでの挙動（短期的挙動）のみを対象としている。粘土地盤におけるPRFの長期挙動に関する研究は，特に実験的なものでは比較的少ない。しかし、飽和粘土地盤にPRFを適用した場合、施工荷重下で圧密過程が生じる可能性があり、時間の経過とともに基礎の沈下量が増加し、ラフトと杭、さらには杭間の荷重分担の割合が変化する可能性がある。したがって、粘性土のPRFを設計する際には、時間依存沈下を抑制し、基礎の荷重分担挙動を理解することが不可欠である。したがって、本研究の主な目的のひとつは、飽和粘土質地盤上の異なる鉛直荷重レベル下における、異なる杭配置のPRFの長期挙動を、小規模な物理模型実験を用いて調査することである。特に、杭配置が基礎沈下量に及ぼす影響、長期載荷試験におけるラフトと杭の荷重分担、杭間の荷重分担に着目した。さらに、杭配置が地盤強度に及ぼす影響も本研究の目的である。

Conclusion

本研究では，小規模な物理モデリングを通じて，飽和粘土上における杭数の異なる PRF モデルの長期挙動を調査した．実験から得られた主な知見と示唆は以下の通りである：

1) 荷重Pが小さいとき(P PPG,ult.)は、杭が荷重を支持し、基礎の沈下を抑制する主要な要素であった。P＞PPG,ult.）では，ラフトが支持荷重の大きな割合を占め，特に荷重増加期において基礎の沈下を抑制した。

2)大きな載荷荷重(P>PPG,ult.)では，PRF は荷重増加期よりもむしろ一次圧密期に設定された。

3) 荷重の程度は，筏と杭の間の荷重分担，および個々の杭の間の荷重分担に影響した。杭が支持する荷重の割合は，作用荷重が増加するにつれて減少した。角杭は，中央杭と比較して，小さな荷重レベルでは大きな荷重を支持したが，大きな荷重レベルでは小さな荷重を支持した。

4) 隅杭と端杭の軸抵抗は，小さな荷重レベル（P＜PPG，ult）から動員され，中央杭のそれは大きな荷重レベル（P＞PG，ult）で動員された。

5) 長期載荷試験における杭の配置と載荷荷重の大きさは，地盤の強度分布に影響し，cuの増加の大きさと載荷試験による影響を受ける領域の深さの両方に影響を与えた．また，載荷試験後，ラフト中央部のcuがラフト端部のcuより大きくなり，杭間の荷重分担が変化した。

101444

Abstract

世界中で発生した少なくとも28の地震の事例から、液状化が礫質地盤（自然堆積物および人工埋立地盤の両方）で発生する可能性があり、大きな地盤変形を誘発し、土木インフラに深刻な被害をもたらすことが示されている。しかし，礫質地盤の液状化ポテンシャルと繰返しひずみ蓄積特性の評価は，地盤地震工学における大きな課題である．この重要な課題に対する新たな有用な知見を提供するために，砂が支配的な微細構造を有しながら，礫の含有率（GC）と相対密度（Dr）を変化させることによって異なる充填状態（すなわち，土粒の配置）を有する砂礫混合土（SGM）に対して，応力制御非排水繰返し三軸試験を実施した．実験の結果、GCとDrの両方がSGMの繰返し抵抗比（CRR）にわずかな影響（GCとDrが低い場合）から有意な影響（GCとDrが高い場合）を及ぼすことが確認されたが、GCとDrの影響を一緒に考慮する必要性が浮き彫りになった。この観点から、等価ボイド比(efðeq)や等価相対密度(Dr f(eq))などの状態パラメータを用いることが、充填状態にかかわらず砂主体のSGMに固有の相関を与えることから、CRRに対するGCとDrの複合効果を記述するのに適したアプローチであることがわかった。

Introduction

歴史的に、礫質土壌（均一な礫、礫質砂、砂質礫など）は透水係数が高いため、きれいな砂よりも液状化しにくいと考えられてきた（Abbaszadeh, 2018）。しかし、礫質土壌の液状化については、自然堆積物でも人工堆積物でも、大地震の際に報告された、注目すべき、十分に文書化された液状化の事例がいくつかある（表1）。 図1の粒度分布曲線が示すように、液状化した礫質土壌は、一般的に、礫、砂、シルトのよく勾配した混合物からなる（Dhakal et al.、2022）。液状化礫質土の粒径は、細砂利から粗砂利（すなわち20～60mm）、さらにはコブ（60mm）にまで及ぶ。自然堆積物（図1a）でも人工堆積物（図1b）でも、細粒分は最大で30%である。しかし、一般に、液状化した礫質土の大部分は、砂と礫のよく勾配した混合物で、礫の含有率（GC）は5 %から85 %以上である（図1）；本研究では、GCはNZS4402.2.8.1（1986）に従って、直径2 mmの粒の質量割合を考慮して定義する。礫質土壌では、細粒分（すなわち、 さらに、透水性の緩い礫層の上に透水性の高い土 層が存在すると、地震時に礫質地盤で湧水が発生し、液状化現象が発生する可能性がある（Caoetal.2011）

液状化の引き金や影響を評価するために、実験室や現場ベースの半経験的な液状化評価法が数多く利用できる。しかし、現在のところ、Dr の概念をきれいな砂以外の土砂（例えば、シルト、シ ルティサンド、礫質砂、砂質砂）に適用することは困難である、 シルト、シルト質砂、礫質砂、砂質礫など）には適用が困難であり、 指数ボイド比（emaxandemin）を決定する標準的な手順では、局所的なDraは利用できない（Cubrinovski,2019）、 (Cubrinovski,2019)。混合土壌に砂や砂利の画分が存在する場合、そのような土壌の特性は、粒径、粒子形状、粒度分布などの様々な材料特性に依存する(Cubrinovski and Ishihara, 2002)。 SPT や CPT に基づく液状化トリガー相関式などの浸透抵抗相関式は、砂の影響を考慮し て更新されているが(Boulanger and Idriss, 2014)、砂に基づく浸透抵抗相関式は、大粒径の礫の影響が 顕著であるため、砂質土の斜交地盤の評価には不適切であることが判明している(LinandChang,2002)（Rollinsetal. ).

砂質土中の礫の存在は、土の強度、浸透性、および液状化抵抗性に重大な影響を及ぼし、土の粒度や充填状態の影響に影響することが示されている（KokushoandTanaka,1994; Tanaka et al.） 砂礫混合土（SGM）は、混合土に含まれる異なる土質要素の割合や役割によっ て、砂から礫まで様々な挙動を示すことがある（Kokusho and Tanaka, 1994）。 これは，砂質シルト混合物の非排水挙動にファインズがどのように影響するか（Thevanayagametal,2002）と同様 に，SGM のミクロ力学的構造（砂が支配的か礫が支配的か）が変化するためである。） 耐震設計において礫質土の液状化ポテンシャルを評価することは重要であるにもかかわらず、 礫質土の非排水強度は、その密度や粒度分布に関してあまり検討されていない(Kokushoetal,2004) 。 したがって，液状化の発生とその影響をより的確に把握し，その結果，国土や構造物に耐え られないような被害を軽減するためには，砂礫混合土の材料特性評価と液状化評価が不可欠である(Cubrinovskietal,2019)。

これまでの実験室研究では、礫質土壌の耐液化性は清浄な砂と同程度に低い可能性があることが示されている、 (2004;LinandChang,2002;XenakiandAthanasopoulos,2008)とGC (Evans and Zhou, 1995; LinandChang, 2002)である。しかし、礫質土の耐地盤圧性に及ぼすGCの影響については、結論が出ておらず、あるいは矛盾する知見がある。例えば，Amini and Chakravrty（2003）は，Dr=50%でGCが0%から70%の間で変化するSGM供試体について，繰返し抵抗比（CRR）が0.2から0.25とほぼ同じ値であったと報告している。同様に，Hubler（2017）は，Dr=47%でGCが0%から100%の間で変化するpeagraveland Ottowasとmixturesの供試体のCRRを示した。液状化した礫質土壌の粒度分布曲線。A.Pokhreletal. SoilsandFoundations64(2024)101444 3 A. Pokhrel et al. Pokhrel et al. Soils and Foundations 64 (2024) 101444 は、0.08 から 0.1 の範囲で変化している。代わりに，Evans and Zhou（1995）は，Dr = 40 %のSGMのCRRは，GCが0 %から60 %まで増加するにつれて，0.15から0.32まで増加することを指摘している。同様に、Lin and Chang (2002)とChen et al. (2018a)も、GCの増加に伴いCRRが増加することを見出したが、Toyota and Takada (2019)は、CRRに対するGCの影響はGC = 20 %までは軽微であり、GC = 50 %までは礫のパー ティクルの形状やサイズによっては軽微から有意であると結論づけた。

このような矛盾した結果の原因は、混合物の微細構造が砂粒子と砂利粒子の粒度比によって異なるため、混合物中の粒子の粒界接触が異なることにある。砂粒子が礫粒子間の利用可能な空隙を完全に埋め尽くすと（これは通常、砂の含有率が20～40％のときに起こる（Cubrinovski and Ishihara, 2002））、礫粒子は砂粒子の力連鎖ネットワークに参加するかしないかにかかわらず分散する（Thevanayagam, 2007）。上述した研究のほとんどは、ギャップ勾配土壌（Amini and Chakravrty, 2003; Evans and Zhou, 1995; Hubler, 2017; Toyota and Takada, 2019）、または貧〜良勾配土壌（Kokusho et al., 2004; Lin and Chang, 2002; Xenaki and Athanasopoulos, 2008; Hubler et al., 2017）を対象としており、混合物中の礫粒子の活性ゾーンと不活性ゾーンは見落とされている。したがって、一貫した指標パラメータを用いて、GCを変化させたSGMの非排水繰返し挙動を系統的に比較することが必要である。また，これらの状態指標を適切に使用する前に，混合物中の砂利粒子の活性ゾーンと不活性ゾーンを特定する必要がある。

Xenaki and Athanasopoulos (2008) は、CRR は Dr に強く影響され、その影響は繰返し応力比 (CSR) が高く、Dr が低いほど顕著であることを示唆した。国所ら (2004) は、様々な粒度分布の再成形礫質土の CRR は、粒子勾配よりも Dr に大きく依存することを見出し、CRR を一意に定義する適切な状態指標として Dr を使用できることを示唆した。しかし，土中の砂や礫の割合が少ないと，応力-ひずみ応答は変わらないが，空隙比が減少する（すなわち，Drが増加する）傾向がある（Rahman and Lo, 2007）。したがって，液状化抵抗性を評価するための基準パラメータとしてDrを採用することは，砂と礫の混合物では問題がある可能性がある（Cubrinovski, 2019）。これは，砂とシルトの混合物の場合に類似している。このような混合物では，砂の非排水挙動に対する微粉の影響をより適切に評価し定量化するために，異なる状態指標（すなわち，空隙比，相対密度，骨格空隙比，等価空隙比）が使用されてきた（Rahman et al.）

砂質-シルト混合物に関する体系的な研究の結果（Mohammadi and Qadimi, 2015; Porcino et al., 2021; Porcino and Diano, 2017; Thevanayagam, 2007）から、砂質-シルト混合物の液状化抵抗性に対する微粉含有量と Dr の複合効果は、骨格空隙比（Thevanayagam, 1998）や等価空隙比（Thevanayagam et al.） Chang ら（2014）は、骨格空隙比の概念を用いることで、隙間粒状化した SGM は、混合物中にあらかじめ含まれている砂利の量によって、砂状、砂利状、および遷移混合物に分類できることを発見した。しかし，骨格空隙比を用いることは，礫が支配的な微細構造の力連鎖ネットワークにおける砂粒子の参加や，砂が支配的な微細構造における礫粒子の影響を無視するものであり，混合土の力学的挙動を記述するのに必ずしも十分ではない可能性がある（Thevanayagam, 2000）。砂が支配的な微細構造における礫粒子の積極的な参加と非活動的な参加を定義するゾーンは，充填状態に影響され，その充填状態は勾配特性，emaxとemin，大域空隙比（e），混合土の粒子不均衡比に依存する。

したがって，等価空隙比の選択は，2.1 節と 2.2 節で説明したように，混合物中の充填状態 と優勢な砂質画分または粗粒画分に基づくべきである。せん断波速度特性 (Thevanayagam, 2007; Cheng et al., 2023) および小ひずみせん断弾性率特性 (Pokhrel and Chiaro, 2023) に対する GC と Dr の複合効果を捉える等価空隙比概念の適合性は、SGM について確認されているが、SGM の CRR に対する使用はまだ試みられていない。さらに、SGMに関する先行研究の大半は、ギャップ勾配材料に限定されている。微細構造が支配的な砂-シルト混合物，すなわち本研究で用いたSGMの砂支配帯に類似するものであっても，シルトの液状化抵抗性に及ぼす砂分率の影響を説明するために等価空隙比の概念を用いるには限界があった。したがって，SGM に対する GC の影響の理解を深め，統一的な比較手段を用いた場合に GC が非排水応答に一貫した影響を及ぼすことを示すためには，異なる粒度特性を有する土質について，実験室での追加的なシス テム研究が不可欠である。

以上の背景を踏まえ，本研究の目的は，(i)礫質地盤の液状化抵抗性に及ぼすGCとDrの影響について，細砂から細～中礫までの砂主体のSGMに焦点を当て，拡張したデータセットを提供すること，(ii)様々な指標特性を用いて，GCの異なるSGMの液状化抵抗性を系統的に比較し，粒界状態概念に基づくSGMの液状化評価のフレームワークの適用性を検証することである。

Conclusion

砂礫混合土の液状化特性と抵抗力に及ぼす粒度含有率（GC）と密度状態（比重Dr）の複合効果をより明確に把握するため、砂が支配的な微細構造を有しながら充填状態（粒度配置）が異なる4種類の砂礫混合土（SGM）を選定し、非排水繰返し試験を実施した、 次に、粒間状態の概念を用い、SGM の液状化特性と抵抗性に及ぼす GC と Dront の複合的な影響を記述することの適合性を評価した。この実験的研究から次のような結論を得た。

SGMのCRRは、GCとDrの両方が増加するにつれて増加する。しかし、GCとDrの効果は、試料のGCとDrの量によっては、わずかなものであり、有意なものではないであろう。これは、両者がともにSGMの充填状態に影響を及ぼすからである。 -粒界状態の概念、具体的には、骨格のボイド比（ef ）と比較した場合の等価ボイド比（ef ）eq は、SGMの液状化抵抗性を表すGCとDrの効果を分類するのに適切な指標であることがわかった。このことは、SGMの力連鎖ネットワークに礫粒子が関与していることを無視すべきではないことを意味する。この点に関して、著者らは、ミクロ力学的研究（DEM数値シミュレーションやCTx-ray調査など）を利用することで、このテーマについて有用な知見を得ることができると考えている。

同様に、等価相対密度(Drfðeq)もSGMの液状化ポテンシャルを一意に表現する適切な指標パラメータであることがわかった。

同じ材料であっても，異なる調製方法（例えば，乾式プルビエーション，湿式タンピング，水沈降）で調製された再構成供試体や原位置非撹乱供試体は，通常，異なる織物／構造を有しており，その液状化抵抗性は異なると予想される。異なるファブリック／構造を持つSGMの液状化抵抗性をより深く理解するために、著者らは、新しい水沈降法（ニュージーランドの典型的な堆積環境）で作製した供試体について、並行して一連の繰返し非排水三軸試験を実施するとともに、SGMの湿式タンピング（本研究で調査）と水沈降（継続研究）のせん断波速度特性を評価している。また、せん断波速度と等価空隙比を組み合わせることで、異なる地層・構造を持つSGMの液状化抵抗性を評価する独自の枠組みを構築している。このような継続的な研究の結果は、いずれ別の場所で発表する予定である。

101427

Abstract

粘土質土の保水挙動は通常ヒステレティックな現象を示すが、これはインクボトル効果、湿潤・乾燥過程における接触角の違い、巻き込まれた空気などに起因する。膨張性土壌の場合、湿潤と乾燥の過程で、通常、微細構造の著しい変化が観察される。本論文では、中国産の無傷の膨張性粘土であるマイル粘土について、保水性のヒステレティック現象に及ぼす微細構造の変化の影響を調べた。Mile粘土の保水曲線は全吸水範囲において得られた。Mile粘土の湿潤および乾燥経路に沿った微細構造の変化は、水銀圧入ポロシメトリー試験から得られた細孔径分布によって特徴付けられた。試験の結果、40kPaから15MPaの吸引範囲で強いヒステレティック現象が観察された。このヒステレティック現象は、主に、同程度の水分比の湿潤経路と乾燥経路で、スペックイメンの微細構造が異なることに起因していた。高い吸引力では、吸着メカニズムが主に保水性に寄与するため、同程度の水分比の試料では、最大充填入口孔径が異なっていても、対応する吸引力は互いに同程度であった。低い吸引力では、主湿潤経路上の試験片が完全に乾燥した履歴状態にあるため、主湿潤経路上と乾燥経路上の試験片で、同程度の水分比でわずかに異なる孔径分布が観察された。

Introduction

膨張性地盤は、乾燥-湿潤サイクルの間に体積が大きく変化する特性を持つ高塑性粘土である。この激しい体積変化は、その上にある地盤構造物、例えば鉄道の路盤の不 均一な沈下や盛り上がりをしばしば引き起こし、これらの構造物の安定性に深刻な影響を及ぼし、これらの構造物の長期的な供 用性能の低下につながる。この問題を克服するためには、膨張性土の水理機械的挙動を理解することが不可欠である。変形挙動（Yuan et al., 2019, 2021）、強度挙動（Li et al., 2019; Lu et al., 2009; Xu et al., 2011）、水流挙動（Chen et al., 2014; Jiang et al., 2018）はすべてそれと強く相関しているため、重要な部分はその土-水滞留挙動を理解することである。エクスパンシブソイルの土壌水特性については、多くの研究がなされている（Liu et al., 2016; Menaceur et al., 2016; Monroy et al., 2010; Romero et al., 1999）。

通常、土壌の保水曲線には、湿潤-乾燥経路に沿って明らかなヒステリシス現象が観察され、乾燥曲線は湿潤曲線の上に位置する（Sadeghi & Nasiri, 2021; Sun D., Zhang, 2013; Sun et al.） このヒステレティック現象について、研究者たちは主に、大きな空洞が狭い連結部で連結された不均一な細孔構造によって引き起こされるインクボトル効果（Romeroら、1999；Yuanら、2022）と、乾燥および湿潤プロセス中の異なるコンタクト角度（Fredlundら、2012）の2つの理由に起因している。

さらに、湿潤過程での空気の巻き込み、乾燥・湿潤過程での土壌構造の変化、土壌の老化効果も、ヒステレティック現象につながるという研究結果もある（Likos & Lu, 2004; Pham et al.）

ヒステレティック現象のため、土壌の保水曲線は2つの曲線で表されなけれ ばならない。保水ヒステリシス効果を定量的に評価するために、多くの研究が行われてきた（Li, 2005; Pedroso & Williams, 2010; Wei & Dewoolkar, 2006; Zhou, 2013）。例えば、Wei ら（2006）は内部変数による毛細管ヒステリシス効果を考慮したモデルを提案し、熱力学と境界面理論を用いて土壌-水特性曲線の単純なヒステリシスモデルを確立した。(2013)は、土-水のヒステリシス特性を再現するために、接触角依存モデルのインクリメンタルな形式を提案し、Pedroso & Williams (2010)は、曲線微分方程式などを導入して、土-水特性曲線のヒステリシス効果を予測する簡単な方法を提案した。

要約すると、前述の方法は主に経験的モデル（Feng & Fredlund, 1999; Nimmo, 1992; Scott, 1983）または領域モデル（Flynn et al.） これらのモデルは通常、理想化された仮定に基づいている。例えば、Nimmo（1992）は、ヒステリシスを起こさない細孔空間の割合は細孔サイズに依存しないと仮定した。Fredlund (2012)は、間隙水分布はウェットパスに依存しないと仮定した。そして、主要な湿潤経路で囲まれた領域内の水理学的ヒステリシス挙動の記述は、吸引曲線と乾燥曲線であり、主にデータフィッティング手法の理論に基づいており、通常は現象論的な性質を持っている。確率論的多孔質モデル（Rojas et al., 2013）、3次元間隙ネットワークモデル（Xiao et al., 2009）、水銀圧入ポロシメトリー結果（Li and Zhang, 2009）など、さまざまな手法に基づいて土壌の細孔径分布を考慮することで、保水ヒステリシス現象を考慮することもできる。しかし、特に膨張性粘性土の場合、乾燥・湿潤過程で土の間隙構造が大きく変化するため、実際の状況は理論的な想定よりも複雑になる可能性がある（Cuisinier & Laloui, 2004; Koliji et al., 2006; Simms & Yanful, 2001, 2002; Yuan et al., 2016, 2019, 2021）。

土の体積変化が激しいと、理論モデルによる保水ヒステリシスの特性予測が難しくなる。前述の研究の大半は、主に圧縮または再構成された膨張性粘土（Monroy et al., 2010; Romero et al., 1999; Sadeghi & Nasiri, 2021; Sun et al., 2014; Yuan et al. Zhou (2010) や Wang (2022)が述べているように、無傷の膨張性粘土は通常、構造用粘土の典型であり、対応する水理学的・力学的挙動は、圧縮・再構成された膨張性粘土とは大きく異なる。膨張性粘性土の上に敷設される地盤構造物の性能を評価するためには、無傷の膨張性粘性土の保水挙動を理解することも非常に重要である。

しかし、膨張性粘性土のヒステリシス現象を考慮した間隙構造の変化に関する実験的研究は比較的少なく、間隙構造の変化が土-水保持曲線に及ぼす影響に関する報告も少ない。そこで本研究では，中国産の無傷の膨張性土の1つであるマイル粘性土について乾燥・湿潤試験を行った。全吸水範囲における土壌保水曲線を求めた。この試験で観察された強い保水ヒステリシス現象を理解するために、水銀圧入ポロシメトリー試験を実施した。湿潤と乾燥の主要経路に沿った無傷のMile粘土の細孔径分布の変化を徹底的に2研究し、主にミクロ構造的側面からのヒステリシス挙動の説明に焦点を当てた。

Conclusion

本論文では，無傷の膨張性粘土であるマイル粘土の保水特性について，主要な湿潤・乾燥経路に沿ったマイル粘土の土壌保水曲線の決定を通して研究した。吸引力が40kPaから15MPaの間で強いヒステレティック現象が観察された。水銀圧入ポロシメトリー(MIP)試験は、この強いヒステレティック保水現象をさらに説明するために行われた。その結果、毛細管現象がマイル粘土の保水挙動の主な原因である場合、ヒステレティック現象が観察された。このヒステレティック現象は、主に、同じような水分比の湿潤経路と乾燥経路に沿った試料の微細構造の違いに起因していた。高い吸引力では、吸着メカニズムが主に保水性に寄与するため、同程度の水分比の試料では、最大充填入口孔径が異なっていても、対応する吸引力は互いに同程度であった。より低い吸引力では、主湿潤経路上の試験片が完全に乾燥した履歴状態にあるため、主湿潤経路上と乾燥経路上の試験片で、同程度の水分比でわずかに異なる孔径分布が観察された。

101439

Abstract

地震は一般に1回の本震とそれに続く余震からなる。本震後の余震が地表構造物に及ぼす影響については広く研究されているが、地下構造物に関する同様の研究はほとんど報告されていない。地下空間開発の急速な進展に伴い、液状化による地下構造物の浮き上がりに対する対策は、本震だけでなくその後の余震に対しても機能するよう、その頑健性を検討する必要がある。本論文では、本震-余震のシーケンスによる従来型マンホールの隆起挙動について検討した。その結果，本震時に液状化した地盤では，余震時にマンホールが脆弱化することがわかった．このため、マンホールの自重増加や側壁の粗面化など、これまでに提案されているいくつかの対策について、本研究では遠心力モデルを用いて検討した。その結果、本震では有効であったものの、余震ではほとんど効果がなかった。一方、マンホールの底面自重を増加させることによりマンホールの浮き上がりを軽減する工法は、本震よりも余震で優れた効果を示し、今後の減災設計への応用が期待される。

Introduction

地震活動が活発な地域では、大地震に強い余震が伴うことが一般的である（Ruiz-Garcı´a, 2012）。余震は、本震で生き残った地表構造物を崩壊させる可能性があり、このような本震-余震シーケンスの地表構造物への影響について広範な研究が行われている（Nazari et al.） 一方、1999年の集集地震（Wang et al、 2003, Tobita et al., 2011）、2011年の東日本大震災（Hyodo et al., 2014）、2010年から2011年にかけてのカンタベリー地震（Carter et al., 2014）などで証明されている。地震によって液状化した地盤における地下構造物の破壊には独自のメカニズムがある。

その主な原因は、地下構造物の見かけ密度が周辺地盤に比べて低いため、構造物底部に作用する側壁摩擦が著しく低下し、浸透力が上昇することである（Chian and Madabhushi, 2012, Nakao et al, 2022, Ko et al, 2023）。この問題に対処するため、Tpracticeでは、構造物の改変を目的としたいくつかの修復策が提案され、試みられている。

例えば、Koseki etal. (1997)、飛田etal. (2011)、Kangetal. (2012)は、地震時の上向きの力に対抗する力を増加させるために、マンホールの自重を増加させることを提案した。また、ZhangandChian (2019)は、マンホールの側壁の粗さを大きくすることを提案している。さらに、ZhangandChian(2021)は、マンホール底部の透水性を高めることによってマンホールの浮き上がりを抑制するための別の一連の対策を導入し、セントリフュージョンモデリングを用いて検証した。

地上構造物に関する研究の進展とは対照的に、余震後の地下ライフラインの浮き上がりに対するテーマ対策の有効性については、文献上ほとんど報告されていない。これは、歴史上、地下施設が経験した損害の割合が地上構造物よりも低く、本震によるライフラインの損害に焦点が当てられることがほとんどであったことが一因である（Hashashetal. しかし、このような修復方法が実際に採用されるようになってきているため、これらの重要なライフラインが適切に機能するためには、その後の地震に対する堅牢性を検証する必要がある。

この研究ギャップを埋めるため、本研究では、遠心模型を用いて、本震-余震のシーケンスにおける従来型マンホールの隆起挙動を把握することを目的とした。本研究では、2回の成功地震時にマンホールに作用する構成力に関する包括的な調査を実施した。 さらに、自重の増加、側壁の粗さの増加、基盤の開口部を利用した基盤の透水性の向上など、余震時の修復対策の頑健性を検討した。本研究で得られた知見は，今後の適用において，これらの対策が余震時にどのような効果を発揮するかについて示唆を与えるものである

Conclusion

本研究では、遠心力モデリングを用いて、本震-余震のシーケンスによる液状化に起因するマンホール隆起に対する既存の一連の修復対策の頑健性を検討した。主な結論を以下にまとめる：

1.地震の揺れの間、本震は地下水位と地盤沈下を引き起こす。このような変化により、本震を免れたマンホールは、その後の余震に直面したとき、地下水位以上の浮力の増大と側壁摩擦の減少により、より脆弱になる。

2.マンホールの側壁の粗面化によってもたらされる付加的な摩擦は、本震では有効であったにもかかわらず、余震では本震の動揺によって粒子のロックアップ効果が失われるために維持されず、したがって粗面化されたマンホールは本震-余震のシーケンスでかなりの隆起を受ける。したがって、マンホールの側壁を粗くすることは、実用的な設計では推奨されない。

3. 3.マンホールの自重を増加させ、マンホールの寿命を延ばしたが、その後の余震では地下水位の上昇により効果が得られない可能性がある。図17 滑沢な透水杭で処理されたマンホールに作用する構成力 図18.本震余震時のマンホール内の貯水高さ 図19.本震余震時のマンホール内水位上昇図．Z.Zhang,S.C.Chian SoilsandFoundations 64(2024)101439 12 Z. Zhang, S.C. Chian Soils and Foundations 64 (2024) 101439 したがって，実際の余震時の隆起破壊を回避するためには，自重のさらなる増加を考慮する必要がある。

4. 4.マンホール内への通水が可能な透水杭を用いたマンホール底盤の透水性向上工法は，本震，後震のいずれにおいてもマンホールの浮き上がりに対して良好な抵抗性を示した．したがって、液状化によるマンホールの浮き上がりを改善するための有望な対策となり得る。以上の結論にはいくつかの限界がある。第一に，本震後も液状化可能な緩い砂の場合にのみ適用可能である。第二に，本震と余震の間隔は，本震で発生した過剰間隙水圧の消散に十分である。

101442

Abstract

土壌水の状態は、表層破壊の発生に影響するため、適切に評価されるべきである。表層崩壊が発生する前に早期に警告を発することができるようにするためには、現場計測データと数値シミュレーションを結びつけたデジタルツインシステムを構築する必要がある。本研究では、2つのケーススタディから、体積含水比の実測データに基づく浸透流解析モデルの事後分布を推定するためのマージングパーティクルフィルタ（MPF）法の適用性について議論する。最初のケーススタディでは、異なる土質の3つの斜面（分解花崗岩、風化泥岩、火砕流堆積物）から得られたデータに基づいて、不飽和土の透水特性に関するパラメータの事後分布を推定した。シミュレーション結果は、降水量データのみを推定浸透流解析モデルに入力した生データとよく一致した。2つ目のケーススタディでは、不飽和土の透水特性と排水境界条件のパラメータを用いて浸透流解析モデルを推定し、その適用性について検討した。シミュレーション結果は、地下水の挙動を把握するのに十分な精度で現地計測データを再現した。このことから、MPFを用いることにより、原位置土の不均一性や不確実性を考慮した浸透解析モデルのパラメータの事後分布を推定することができる。

Introduction

豪雨による地すべり災害は世界各地で発生し、大きな被害や土構造物の崩壊を引き起こしている。日本では毎年、局地的な集中豪雨によって多くの地表崩壊が発生するが、そのほとんどは深さ約1～2m、長さ・幅ともに30m未満のものである。斜面が多い日本では、表層崩壊の危険性が高い斜面すべてに構造物対策を施すことは非現実的である。そのため、表層崩壊のリスクをリアルタイムで適切に評価し、表層崩壊が発生する前に早期に警告を発することができる非構造物対策システムの整備が望まれている。表層崩壊の発生には斜面内の土壌水状態が影響するため、原位置斜面の体積含水率、間隙水圧、地下水位などの土壌水状態をモニタリングする研究（Godt et al. ワイヤレスセンサネットワークシステムを用いることで、原位置法面の土壌水状態をリアルタイムで遠隔計測することができる。しかし、現場計測だけでは、適切な非構造物対策システムを構築するには不十分である。これは、現地計測システムは過去の降雨データを収集することはできるが、計測データだけでは将来の集中豪雨時の土壌水状況を予測することが難しいためである。

降雨時の土壌水状態を予測するためには数値シミュレーションが必要であり、原位置で測定された土壌水状態を適切にシミュレートできるシミュレーションモデルを開発する必要がある。逆解析は、現場計測データを用いて原位置の物質パラメータを同定するための有効な手法である。センシング技術やコンピュータ処理の発達に伴い、不飽和土の透水特性パラメータを特定するための逆解析に関する様々な研究（Qanza et al. しかし、これらの研究（Amini et al., 2020; Bahrami et al., 2020; Liu et al., 2021）のほとんどは、数値実験や室内試験のデータを適用してパラメータを特定している。対照的に、フィールド測定データを用いて逆解析を行った研究（Qanza et al. しかし、原位置土壌の不均質性や不確実性を考慮すると、逆解析手法は確率的にパラメータを推定する必要がある。Liuら(2022)は、逐次ベイズ更新法を用いて、現場計測データと数値シミュレーションを結びつけた斜面デジタルツインを開発するための実用的なフレームワークを提案した。

ベイズ法は、原位置土壌の非遺伝性や不確実性を考慮し、非土壌の透水特性パラメータを推定する。データ同化法は、実測データに基づく数値シミュレーションモデルを修正することによって開発された逆解析手法である。データ同化法は気象学や海洋学で応用されており、4D-VAR（Talagrand and Courtier, 1987）、アンサンブルカルマンフィルタ（Evensen, 1994）、パーティクルフィルタ（PF）（Gordon et al. これらのデータ同化手法は、ベイズの定理を用いて、パラメータ、境界条件、初期条件などのシミュレーションモデルの状態を確率分布として推定します。沈下量の計測データに基づく弾塑性構成モデル（Shuku et al. しかし、PFではアンサンブルの退化の可能性がある。PFでは、システムの確率分布はパーティクルと呼ばれる多数の実測値を用いて近似され、各パーティクルの集合はアンサンブルと呼ばれます。

アンサンブルの退化とは、いくつかの特定の粒子が大量に複製され、データ同化の性能が低下する現象のことである。アンサンブルの退化が起こると、確率分布は意図した広がりを表現する能力を失い、効果的な状態推定が損なわれる。最終的に、すべての粒子が単一の粒子タイプに収束すると、それ以上のデータ同化は不可能になります。アンサンブルの退化は、十分な数の粒子を使用することで回避できます。しかし、粒子数を増やすことは計算コストの増加につながります。そこで、縮退を緩和しながらデータ同化を行うためのアルゴリズムがいくつか提案されている。地盤工学におけるアンサンブルの縮退を扱った研究としては、Shuku et al.(2013)やYoshida et al.(2020)が有名である。本論文では、アンサンブルの縮退を抑制できるデータ同化手法の一種であるMPFに着目し、その実装の容易さを考慮した。

本研究では、浸透流解析モデルの事後分布を推定するためのMPFの適用性について、体積含水比の実測データに基づく浸透流解析モデルの同化にMPFを用いた2つの事例を用いて考察する。最初のケーススタディでは、異なる土質の3つの斜面（分解花崗岩、風化泥岩、火砕流堆積物）から得られた体積含水比の現地測定データに基づいて、不飽和土の透水特性のパラメータの事後分布を推定した。次に、推定された事後分布を用いたモンテカルロシミュレーションを行い、生の豪雨データを入力した場合のテストデータに対する推定分布の再現性を調べた。2つ目のケーススタディでは、データ同化手法の適用性を確認するために、不飽和土の透水特性と排水境界条件のパラメータを含む浸透流解析モデルを開発した。本研究では、体積含水比の実測データに基づく地下水位の変動も再現できるモデルパラメータの事後分布の推定を試みた。

Conclusion

本研究では、浸透流解析モデルのパラメータの事後分布を推定するためのMPFの適用性について、体積含水比実測データに基づく浸透流解析モデルのデータ同化にMPFを用いた2つのケーススタディを通して検討した。本研究で得られた知見は以下のとおりである。

(1)最初のケーススタディでは、異なる土質の3つの斜面（分解花崗岩、風化泥岩、火砕流堆積物）から得られた体積含水比の現地計測データに基づいて、不飽和土の透水特性のパラメータの事後分布を推定した。次に，推定された前立 体分布を用いてモンテカルロシミュレーションを実施し，生 の重雨土砂データを入力した場合の土砂データの推定分布 の再現性について検討した．異なる土質の3斜面におけるシミュレーション結果は、データ同化に用いた学習項、および降水量データのみを入力したテストデータとよく一致した。これらの結果は、MPFによる不飽和土の水理特性パラメータのデータ同化が、様々なタイプの土が存在する様々な斜面に適用できることを示している。

(2)本第2次研究では、不飽和土の透水特性や排水境界条件などのパラメータを含む浸透流解析モデルの推定を行った。そして、データ同化法の適用性を判断した。その結果、1次元モデル計算の主要条件である境界条件として浸透係数bを導入し、不飽和浸透と飽和地下水の挙動をシミュレートしたところ、体積含水比の時間変化だけでは予測できない地下水挙動を得るのに十分な精度の現地観測データが得られた。

(3)MPFは、現場計測データに基づく現場土壌の不均質性と不確実性を考慮した浸透分析モデルの後分布を推定するために利用可能な手法であった。

101438

Abstract

高さ300mまでの濾過尾鉱処分（乾式スタッキング）は、より安全で既存の地形をより小さくする必要があるため、大規模な貯水池でのスラリー尾鉱貯蔵に関連する欠点を克服するための代替手段である。そうであっても、高層ドライスタッキング鉱滓施設を安全に設計するためには、広い範囲の拘束圧における濃縮・脱水物質の応答を理解することが不可欠である。したがって、本研究では、三軸試験を通じて、圧縮された鉄鉱石鉱滓の力学的挙動を評価する。一連の圧縮・伸長排水・非排水三軸試験は、起こりうる粒子破壊の発生と影響を確認するために、広範囲の拘束圧（r´3は75～8,000kPa）で実施した。また、乾燥単位体積重量が異なる試験片を用いて試験を行ったため、圧縮による初期密度の影響も評価した。結果は臨界状態土質力学に照らして分析され、m：log p´平面に曲線状の臨界状態線が存在することが示された。小粒子の破壊が発生し、表面粗さの減少、アスペリティの破壊、粒子の角度の減少に関連している可能性がある。さらに、最も低い閉じ込めレベルでせん断された最も緩い試料では、静的な液状化の傾向が観察された。

Introduction

鉱滓は、鉱石の採掘と加工の残滓であり、主に砕石微粉末、化学物質、水で構成されている（Kossoff他、2014；Xiaolong他、2021）。この微細な懸濁物質の混合物は通常、広大な貯水池である鉱滓ダムに流し込まれる。図1に模式的に描かれたこのような構造物は、貯留スペースの需要が増加するにつれて徐々に拡張することができる。嵩上げダムは、堆積した鉱滓の上に設置されるケースもあり、これは上流建設方式を特徴付ける（Consoli etal., 2022）。それにもかかわらず、鉱滓がほとんど飽和していない状態になると、このような構造物の運転と維持に伴うリスクが高まる（IslamandMurakami, 2021; VianadaFonseca et al., 2022; Yao et al.） 濾過された鉱滓処分（ドライスタッキング）は、貯水池での従来の鉱滓のスラリー処分に関する問題を克服するための代替案として考えられている（Gomes et al.、2016）。基本的に、鉱滓は真空圧搾や機械的圧搾濾過によって不飽和状態にされ、湿った砂やシルト質の砂のような状態になる（LupoandHall,2010）。このような状態であれば、資材は積み重ねられ、大きな山に圧縮される。このため、廃棄に必要な陸上費用が削減されると同時に、鉱滓の沈殿と同時に陸上の埋め立てが実施できるため、操業コストの削減も期待できる(Davies, 2011)。それでもなお、ドライスタッキング尾鉱施設の設計と操業には、締固めフィルの性能の理解が不可欠である。

しかし、鉱滓の研究は、主に、低圧のゆるやかで飽和した条件下での鉱滓の機械的反応に焦点が当てられており、そのほとんどは液状化感受性を評価することに向けられている。このような条件は、通常、従来の鉱滓貯留施設、例えばラムスで見られる。鉄鉱石鉱滓の砕屑性と異方性の性質は、異なる圧縮条件（本書で取り上げるもの）と拘束圧を考慮して、その反応（K圧密、ダイラタンシー、伸長試験など）に影響を及ぼす。これらのトピックは、特に鉄鉱石鉱滓を対象としたこれまでの研究では十分に理解されていなかった。事前に送られた研究は、通常は積み重ねの解決策で見られる代替処分方法の条件に向けられている。通常報告されている以外の状態での鉱滓の評価、特に乾式積み重ね施設における高密度条件下および高圧下での鉱滓の処分に焦点を当てることも、この研究の新規性である。

したがって、本研究では、広範囲の有効拘束圧（75～8,000 kPaの範囲にあるp´0）にわたって実施した圧縮伸長水切り試験（CID）および非排水三軸試験（CIUおよびCKU）を通じて、圧縮鉄鉱石鉱滓の機械的応答を評価する。指定された有効拘束圧の範囲は、現場での用途で想定される応力レベルでの材料挙動を評価するために選択された。積層杭の高さは 300 m を超えると予想されるため、幅広い有効拘束圧を採用した。また，供試体を異なる初期空隙比（e0）になるように締め固め，締固めの影響も調査した．

地盤挙動の状態制御に関する Jefferies (2022)による考察が利用された。また、鉱山鉱滓がこれらの杭内で経験する複雑な荷重条件を反映し、従来とは異なる応力経路下での材料の応答に関する理解を深めるために、相補的な三軸伸長試験も実施した。臨界状態線が変化し、液状化しやすくなる可能性があるという観点から、粒子破損の影響を評価することも研究の一側面であった。得られた結果の包括的な分析を通じて、本研究は鉄鉱石鉱滓の力学的応答に関する知識を広げることを目的としている

Conclusion

圧密段階で使用された K 値にかかわらず、初期の最も緩い供試体は、低レベルの拘束下でせん断された場合、静的液状化に対して高い感受性を示している。

このことは、鉄鉱石鉱滓の乾式積み重ね、特に浅い深さでの積み重ねには、このようなコンパシティーの採用は適さないことを示している；

最も密度の高い試料は、平均応力レベルが高くても、せん断したときに膨張傾向を示したため、静的液状化に対する感受性を示さなかった。

最も密度の高い試料が臨界状態に達していないにもかかわらず、鉄鉱石鉱滓には独特の湾曲した臨界状態線が存在するように見える。つまり、これらの高密度試料は、剪断が終了した時点で、フィットした線に向かっていた。しかし、この点を明らかにするためには、さらなる研究が必要であると言わざるを得ない。

頂部応力比（gmax）は最大ダイラタンシー（Dmin）に比例しており、強度のピークが材料のダイラタンシー傾向と関連していることを示している。これは純摩擦材料の典型である。さらに、最も拡張した試験片では、より高い状態パラメータ値（弾性率）が報告されており、ある時点で限界状態に達するには、より高い拡張率が必要であることを示している。

この結果は、鉄鉱石鉱滓の乾式積み重ねが可能であることを示すものであり、三軸試験を通じて、高い拘束圧においても異常な反応が観察されなかったことから、本原稿の重要性と新規性が浮き彫りになった；

- 本論文で研究した応力範囲では、せん断後に確認された粒子の破壊の程度は小さく、測定された挙動に強い影響は示さなかった；

- 三軸延伸試験を行った試験片では、この応力経路が課す荷重条件がより厳しいため、臨界状態応力比（M）が大幅に低いことが観察された。しかし、得られた臨界状態摩擦角（/cs´）は、伸長と圧縮の三軸応力経路で同程度であり、伸長経路の値がわずかに高かった（三軸伸長で35.8、三軸圧縮で34.6）。