101398

Abstract

本論文の目的は、ゼロ価鉄（ZVI）とラピルスの粒状混合物からなる多層構成の透過性反応バリア（PRB）の効率を評価することである。後者はZVI粒子を分散させるために使用される火山性物質である。ZVIを高分散させると長期的な透水係数は向上するが、ZVIの量が少なくなるため反応性が著しく低下する可能性がある。この研究では、2層構成の2つの異なる組み合わせの性能を、長期カラム試験によって調べた。前処理層」と名付けた第1層は、厚さ4cm、容積比（ZVI/ラピルス）10：90または05：95で、第2層は容積比（ZVI/ラピルス）20：80であった。20:80のZVI/ラピルスのみを使用した単層構成をベンチマークとして使用した。3つの試験は、銅、ニッケル、亜鉛の多重汚染溶液を用いて実施された。試験の結果、単層構成では透水係数が早期に低下し、前処理層が存在するとPRBの寿命が68%延びた。10%のZVIを含む前処理層は、目詰まり現象を遅らせ、5%のZVIを含む層は、少なくとも2ヶ月間、23cmの厚さで、ニッケルで77.6%、銅と亜鉛で99%以上の除去効率と、正しい長期的な透水性挙動の両方を保証した。

Introduction

重金属による地下水汚染は、主に産業活動や管理されていない環境から排出される金属の毒性が高いため、生態系や人間の健康に大きな影響を与える。

重金属による地下水汚染は、生態系と人間の健康に重大な影響を及ぼす（Rajendran et al.） 今日、地下水の浄化には、その実施・運用時に温室効果ガスの排出を削減でき、水資源の飲用や農業利用を保証できる持続可能な技術の利用が求められている。透水性反応バリア（PRB）は、この問題の解決策となりうる。PRBは、帯水層内に反応性かつ浸透性の媒体を設置することで、エネルギーを投入することなく、自然の水勾配を利用して汚染プルームを遮断し、汚染物質の拡散を阻止する（Obiri-Nyarko et al.

ら、2020）。Singhら（2020）は、「マルチPRB」を、異なる反応性媒体で構成された2つ以上のバリア、または異なる層で構成された単一のバリアのシーケンスと定義しており、後者の構成は多層PRBとしても知られている（Leeetら、2010；Pawlukら、2019；Pawluk and Fronczyk,2015；Połon´skiら、2017；Xuら、2012；Yeら、

2019). 両構成は主に、異なる汚染物質に対して特定の除去メカニズムを活性化できる異なる材料を使用することによって、複雑な汚染に取り組むために提案された。

長寿命（すなわち、反応性媒体を交換することなく、バリアが浄化目標を達成することを保証する期間）は、

PRBにとって重要な要件であり、長期的に汚染を処理するために、反応性と浸透性の適切な特性を持つ1つまたは複数の反応性媒体を使用することによって達成できる。長寿命であれば、PRBの持続可能性が高まり、浄化中の反応性媒体の交換や廃棄に関連するコストや影響を避けることができる。PRBの持続可能性という観点からは、持続可能な生産プロセスや廃棄物から得られる、安価で入手しやすい材料の使用も望ましい（過剰なコストや長距離輸送を避ける）（Calabro` et al.） この文脈において、ゼロ価鉄（ZVI）は、さまざまなメーカーから供給され、実験室やフルスケールのPRBで世界的に知られ、使用されている汎用性の高い反応媒体であり、前述の要件をすべて満たしている（Fuら、2014；Makotaら、2017；Ullahら、2020a；Zhuら、2022）。この反応性媒体のフルスケールでの寿命が良好な例もあるが（Wilkin et al.、2014）、バリア透過性の大幅な低下が発生した例も数多くある（Henderson and Demond、2007）。この現象は、主に鉄酸化物や水酸化物の形成によるもので、膨張性の性質により、バリアの空隙率と透過性を低下させる（Caoet al.）

.ZVIを他の粒状媒体と混合することは、浸透性の低下を防ぐための確立された戦略である（Bilardiら、2020；Huら、2020；Moraciら、2017、2015；Ruhlら、2014）。砂や火山性物質（軽石など）のような混和剤の役割

(軽石、ラピルス、ゼオライトなど）の役割は、鉄粒子を分離し、目詰まり現象の原因となるZVI粒子の膨張に伴う凝集を防ぐことである（Huand Noubactep, 2019; Hu et al、 2022).鉄の腐食プロセスとその結果としての腐食生成物の形成は帯水層の特性（例えば地下水の化学組成や流速（Madaffari et al., 2017））に依存するため、ZVIの分散速度を先験的に確立することはできない。ZVI-PRBにおける目詰まりは、一般にバリアの入口部で発生する（ITRC, 2011）。

で発生する（ITRC, 2011; Phillips et al., 2010; Ullah et al.） この問題に対処するため、多層構成が文献で提案され、実規模PRBで実装された(Gavaskar et al., 2000; Li and Benson, 2010;Morrison, 2003)。多層構成は2層からなり、1層目は不活性物質（砂や砂利など）と混合したZVIを含み、2層目はZVIのみで構成されている。

第1層は、地下水を化学的に前処理することで、バリアの反応性ゾーンの透水性を維持することを目的としているため、前処理層または「犠牲的前処理ゾーン」（Li and Benson, 2010）と呼ばれている。

この構成の例として、米国ユタ州モンティチェロ（Morrison, 2003）では、反応 帯域の上流に厚さ 0.6 m の前処理帯（体積比で ZVI 13％、砂利 87％）が設置されている。

厚さ0.6 mの前処理ゾーン（体積比13 %のZVIと87 %の砂利）が、100 %のZVIからなる厚さ1.2 mの反応ゾーンと、処理水を帯水層に分配する機能を持つ砕石砂利からなる厚さ0.6 mの第3のゾーンの上流に設置されている。

を帯水層に分配する機能を持つ。現地調査では、100％ZVIゾーンの中央部で透水係数が最も低下したことが報告されている（Bartlett, 2005）。その多くは

この減少の多くは、炭酸カルシウムやその他の ZVI 腐食生成物の沈殿によるものであった（Li and Benson, 2010; Morrison, 2003）。

多層PRBは、米国デラウェア州ドーバー空軍基地にも設置され、前処理ゾーン（体積比で10％のZVIと90％の粗砂、厚さ0.6m）がZVI反応ゾーンに先行している。モンティセロのサイトと同様、出口ゾーンは100％の粗砂で構成されている。前処理ゾーンは、反応ゾーンへの酸素の侵入を制限するために設置され、18ヶ月後のモニタリングで、反応セルに入る前に酸素が枯渇することが確認された。このことは、実際の反応性ゾーンの上流に前処理ゾーンを組み込むことで、バリアの寿命が向上する可能性があることを示している（Gavaskar et al.、2000）。

LiとBenson（2010）は、地下水流動モデルMODFLOWと反応性輸送モデルRT3Dを用いて、前処理層の効率を数値的に研究した。

前処理層の目的は、地下水が反応帯に流入する前に、pHと酸化還元による二次鉱物形成を促進する帯域を形成することである。

著者らが得た結果によると、前処理層を設けても、鉄腐食に反応して反応帯内で二次鉱物（Fe(OH)2など）が形成されるため、空隙率の低下は完全には解消されない。

上述の原位置での経験とモデル化研究によって、前処理ゾーンが目詰まり現象の発生を排除しないことが明らかになった、

著者らによれば、この側面はより深く研究されるべきである。従って、ここで多層構成として示され、異なる程度の粒状混合物によって構成される

鉄の分散度が異なることを特徴とする粒状混合物で構成される構成について、著者らの知見によれば、この構成はまだ科学文献で研究されていないため、本論文で検討した。

科学文献ではまだ研究されていないからである。この構成の根拠は、汚染負荷が高いか酸素が存在すると鉄の腐食が進み、したがって目詰まり現象のリスクが高まる可能性があるバリアの第一層で、鉄の分散度を高めることにある（Bilardi et al.,2019）。このゾーンでは、二次鉱物と鉄腐食生成物の形成が促進され、目詰まり現象が回避されるはずである。一方、第2層ではZVIの分散度が低いため、地下水の流れに必要な透水性を確保しつつ、反応性の点でバリアがより長持ちするはずである。

を確保することができる。本論文では、異なるZVI/ラピルス混合物を用いた2層構造の性能を、カラム試験により検討した。ラピルスが選ばれたのは、安価で世界中で広く入手でき、適度な吸着容量があるためである（Bilardi et al.

Bilardiら、2020）。厚さ4cmの第1層（前処理層）では、体積比（V.R.）ZVI：ラピルス＝10：90（B列）または05：95（C列）を採用し、第2層では体積比20：80の混合物を使用した。20:80のZVI/ラピルス混合物（カラムA）による単層構成がベンチマークとして使用されている。3つのカラム試験の結果を、銅、ニッケル、亜鉛の多重汚染水溶液に対する透水係数と規格化された汚染物質濃度の経時変化とバリア厚さによる変化で比較した。この組成は

を代表するものである。ニッケルは低濃度でも有毒であり、ニッケルと亜鉛の除去は銅の存在によって悪影響を受けるため、除去が困難で複雑であることから、深刻なシナリオを反映している（Bilardi et al.）

Conclusion

この研究では、ZVIとラピルスの粒状混合物からなる2層からなるPRB構成の挙動を研究した。ZVI粒子がより広く分散している''前処理層''と名付けられた第1層の目的は、目詰まり現象を回避することである。そこで

この多層構成の有効性を探るため、3つのカラム試験を行った。2つのカラムに、ZVI/ラピルス粒状混合物からなる厚さ4cmの初期層を体積比10:90（カラムB）または5:95（カラムC）で充填し、体積比が20:80に等しい第2層を充填した。20:80のZVI/ラピルス混合物の単層を充填した第3のカラムをベンチマークとして使用した（カラムA）。カラムには銅、ニッケル、亜鉛の多重汚染溶液を浸透させた。カラムAは、カラムの入口部から透水係数が急速に低下し（400時間後に1桁の低下）、2層目まで伝播した（1600時間後に1桁の低下）ため、寿命が最も短くなった。1500時間後には、カラムBの第1層でも1桁の透水係数の低下が観察された。

カラムBとCの寿命はニッケル除去に関連しており、これら2つのカラムでは、前処理層の存在によってPRBの寿命がカラムAと比較して68%増加した。

3つのカラムでは、銅と亜鉛はニッケルよりも長い期間除去された。

ニッケルよりも長い期間除去され、破過時間は一般的にバリア厚さとともに増加した。ニッケルについては、カラムA、B、Cでそれぞれ13cm、18cm、23cmのPRB厚みが最適であることが確認された。この場合、反応媒体の厚さを増やしても、汚染物質の大幅な除去にはならなかった。

破過時間が反応媒体の厚さによって直線的に増加し、透水係数が時間とともに一定になる場合、PRBの厚さを増加させることによってPRBの寿命を延ばすことができる。この場合、本研究で提案したように、原位置条件（処理水量とPRBに流入する流量）に応じてPRBの厚さを設定するための設計曲線を描くことができる。

カラム入口から採取したZVI/ラピルス粒状混合物の反応表面のSEM-EDX分析により、台形結晶または球根状の銅の存在、スポンジ状の性質を持つ鉄腐食生成物の存在、鉄腐食生成物の中に取り込まれた可能性の高いニッケルと亜鉛の存在が明らかになった。

101392

Abstract

本書は、筆者が共同研究者とともに執筆し、Soils & Foundations誌および関連出版物に掲載された論文の総説である。論文の内容は，凝集性土や砂質土の構成モデル，三相物質の支配方程式，地盤や地質材料の挙動解析など，ジオメカニクスの実験的・理論的側面に関するものである．具体的には、有効応力、骨格応力、粘性土・砂質土・軟岩の構成モデル、材料の不安定性、ひずみの局所化、圧密、支持力、掘削問題、多相地盤材料の支配方程式、液状化、不飽和土、浸透-変形連成解析、ガスハイドレート含有土、内部侵食、マテリアルポイント法（MPM）、地盤材料のX線CTなどである。

Introduction

本報告書は、岡文雄が共同研究者とともに執筆し、Soils & Foundations誌および関連出版物に掲載された論文のセルフレビューである。内容

論文の内容は、粘性土・砂質土の構成モデル、三相物質の支配方程式、地盤・地質材料の挙動解析の3つに分けられる。有効応力、骨格応力、粘性土・砂質土・軟岩の構成モデル、材料の不安定性、ひずみの局在化、圧密、支持力、掘削問題、三相物質の支配方程式、地盤・地質材料の挙動解析などである、

圧密、支持力、掘削問題、多相地質材料の支配方程式、液状化、不飽和土、浸透-変形連成解析、マテリアル・ポイント法（MPM）、ガスハイドレート含有土、内部侵食、地質材料のX線CTなどである。

Conclusion

この総説の内容は、構成モデル、混相土の支配方程式を含む解析手法、地盤材料への応用の3つのカテゴリーに分けられる。粘土質土については、弾塑性モデル、繰返し非弾性モデル、ひずみ軟化モデルが提案された。弾塑性モデルは，Perzyna型の過応力モデルと非弾性体積ひずみを硬化パラメータとするCam-Clay型の弾塑性モデルを基に開発した．次に，ひずみに対する圧密降伏応力の劣化を考慮した加速クリープ挙動を含むようにモデルを拡張した。砂質土に対しては，線形Pragerのモデルを一般化した非線形運動硬化理論を採用した繰返し弾塑性モデルを提案した。また、変形応力テンソルを採用し、構造応力および電流応力による異方性モデルを導出した。弾塑性および弾粘塑性モデルは、応力履歴に基づいて開発された。

モデルは、軟岩や凍結砂のような地盤材料の強いひずみ軟化挙動を記述するために、応力履歴テンソルに基づいて開発された。これらのモデルは、非弾性ひずみが現在の応力ではなく応力-履歴テンソルに依存するという点で非常にユニークである。さらに、局所解を示すひずみ勾配依存モデルも提案された。

二相および三相ジオマテリアルの支配方程式を提案した。基本的なポイントは、有効応力と骨格応力である。ビオ型多孔質材料理論

Biot型多孔質材料理論を再考し、熱力学的定式化に基づき、多相材料のBiot定数を用いた有効応力と骨格応力を提案した。最後に、混相土の支配方程式を論理的に定式化し、有限要素法（FEM）と物質点法（MPM）を用いた数値有限変形解析法を提案した。これにより、不飽和地盤の厳密な解析が可能となった。また、三相間の物質交換を考慮することにより、気水解離や内部侵食による地盤の挙動を解析することが可能となった。この構成モデルを用いて、圧密、液状化、掘削、支持力問題をFEMやMPMなどの数値解析手法により数値的に解いた。

や MPM などの数値解析手法を用いた。粘土供試体の厚さの影響については、網干のデータを用いて解くことに成功した。ひずみの局所化問題に関する実験的および数値的研究を行った。

を行った。せん断帯と圧縮帯の数値シミュレーションに成功した。液状化の数値シミュレーションにより，液状化に伴う地盤や構造物の変形を考慮することが可能となった．

数値液状化解析によって得られる新しい液状化リスク指標（LRI）を提案した。

を提案した。三相連成解析法を用いて，不飽和土堤防の浸透-変形連成解析をオーバーフローの影響を含めて行った．

地盤材料に関する多くの重要な実験的研究が行われた。粘性土の三軸圧縮試験をひずみ速度を変えて実施した。特に、非排水試験前に間隙水圧が上昇する等方的緩和挙動が観察され、土が平衡状態にないことが示された。さらに，ひずみ速度を段階的に変化させた

ひずみ速度試験によって検証した。高品質の試料を採取するために、新しいラバル型の大型サンプラーを開発し、軟らかいクイッククレイに適用した。このサンプラーを用いて、異なる角度で採取した粘土について、東大阪粘土の構造異方性の挙動を確認した。軟弱堆積硬質土の締固めバンドを観察した。

を画像解析により観察した。不飽和砂質土について、空気管路の特殊な遮断技術を用いた完全非排水試験を新たに実施した。X線CTを用いて、せん断バンディングに伴う粒子挙動と三相挙動を観察した。また、ガスハイドレートの解離に伴う変形挙動を特殊高圧チャンバーを用いて観察した。

101374

Abstract

珪藻土は単細胞の藻類の化石であり、世界中で見つけることができる。本論文では、珪藻土混合物の動的特性および圧縮特性に対する珪藻の形状効果を研究する。様々な形状と分類を持つ6つの珪藻土サンプルの物理的特性を示す。これら6つの試料のうち、粒度分布の類似した3つの珪藻土をカオリンと混合し、機械的特性（すなわち、小さなひずみから大きなひずみまでのせん断弾性率と減衰比）を分析した。その結果、純粋なカオリン試料と比較して、珪藻のフラストレートは混合物の圧縮性を高め、最大せん断弾性率を低下させた。さらに、珪藻の形状は正規化せん断弾性率劣化曲線と減衰比に影響を与えた。全体として、珪藻土の存在は土壌のエネルギー消散能力を低下させる。この研究は、機械的特性を分析する際に、混合土壌中の珪藻の形状を区別することの重要性を証明した。

Introduction

動的せん断弾性率と減衰比は、一般にサイト効果と呼ばれる地震時の水平地層における地震波の増幅を解析するための重要なパラメータである。地震サイト効果は、1985年のメキシコシティMichoacan地震で証明された(Singh et al., 1988)。震源地は太平洋沿岸（メキシコシティから数百キロ）に位置し、減衰が大きくメキシコシティに到達した。しかし、地震の揺れは、せん断波が土壌堆積物を横切ったときに著しく増幅され、甚大な被害をもたらした。

メキシコシティ盆地での高い増幅は、せん断ひずみを加えたときに堆積物の高可塑性土壌が受けるせん断弾性率の劣化が減少したためと説明された（Vucetic & Dobry,1991）。メキシコシティ盆地では、せん断弾性係数の劣化が少なく、強い増幅が起こる理由の1つとして、圧縮性を高める珪藻の存在が確認された（Dı´az-Rodrı´guez, 2003）。

珪藻は単細胞の藻類で、特に植物プランクトンであり、湖沼や沿岸地帯のような水生生態系で生育する。珪藻は強力なシリカの殻（フラストゥール）を持ち、捕食者から細胞を機械的に保護する役割を果たす（Hamm et al.） いくつかの珪藻土微化石堆積物は世界中で発見されており、メキシコ、チリ、コロンビア、日本などの火山活動が活発な国々で頻繁に発見されている（Dı´az-Rodrı´guez, 2003; Shiwakoti et al., 2002; Caniupan et al., 2009; Caicedo et al., 2018, Mendoza et al.） それらの珪藻土堆積物は、珪藻土フラストュールと砂や粘土などの自然土壌からなる（Arenaldi-Perisic et al.）

珪藻土混合物は、現在いくつかの著者によって研究されているトピックである（Dı´az-Rodrı´guez, 2003; Shiwakoti et al、 2018; Arenaldi-Perisic et al., 2019; Dı´az-Rodrı´guez, 2013; Caicedo et al., 2019a; Caicedo et al., 2019b; Sonyok & Bandini, 2019; Ovalle & Arenaldi-Perisic, 2020, Mendoza et al. 2022）。これらの研究は、珪藻土混合土壌が標準的な土壌材料として挙動しないことを示している。珪藻土粒子は、粒度分布によってシルト質土壌に分類される。珪藻土は高い透水性を示すが、Casagrande試験法によれば非塑性土である。珪藻土の相互作用は含水量に影響され、その含水量はフラストレート形状に依存する（Caicedo et al.） 珪藻土の種類は200,000種以上あり、そのフラストレーションの形状は様々である（Guiry (2012)）が、粒子形状が土壌の力学的挙動に及ぼす影響に着目した研究はほとんどない。

本研究では、カオリンと6種類の珪藻土の混合物を用いて、粒子形状が力学特性と圧縮特性に及ぼす影響を分析する。粒子形状により、3つの珪藻土グループが定義された。これらのグループは粒度分布は類似しているが、形状は異なっている。その後、選択した珪藻土をカオリンクレーと混合した。

最後に、混合土を圧密し、ねじりせん断レオメータで試験して、せん断弾性率の劣化と減衰曲線を評価した。

その結果、珪藻の存在によってせん断弾性率の劣化曲線が変化し、地震時の地震波増幅に影響を与えることが明らかになった。

本稿は以下のように構成されている： 第2節では、純粋な材料としての珪藻土とカオリンを個別に特性評価し、この特性評価から、粒径が類似し、形状の異なる3種類の珪藻土をカオリンと珪藻土の混合物として選択した。第3節では、カオリンと珪藻土の混合物の圧縮性を評価し、最後に第4節では、動的荷重下における混合物の応答について述べる。

Conclusion

本研究では、異なる産地の珪藻土試料を異なる割合でカオリンクレーと混合し、その混合物を圧縮性、せん断弾性率や減衰比などの動的特性の観点から分析した。

珪藻土と粘土の混合物の圧縮性に関しては、多結晶体や複合材料に対して提案された最大・最小境界値を用いて混合物の力学的挙動を分析できる可能性があることが、本研究の心強い結果のひとつである。

一方、カオリン＋珪藻土混合物では、規格化せん断弾性率の劣化曲線がより大きなひずみに向かってシフトしていることが示された。

この挙動は、細粒材料における塑性指数の増加に類似している。この効果は、珪藻土の含有量が高いほど顕著である。とはいえ、粒子の形状は正規化せん断弾性率の劣化曲線に影響を与える。例えば、棒状の粒子（すなわち、円柱およびペンネート形状）は、フレーク-円板形状の曲線とは著しく異なる同様の規格化劣化曲線を示した。

減衰は、正規化せん断弾性率の劣化と同じ挙動を示した。実際、カオリンと珪藻土の混合物では、位相角曲線もひずみが大きくなる方向にシフトしており、この挙動は珪藻土の含有量が多いほど顕著である。また、棒状混合物の位相角曲線は、フレーク状混合物の曲線よりもひずみが大きい場合の位相角の増分が小さかった。

最大せん断弾性率に関しては、珪藻土含有量の増加に伴って減少した。その減少比は、カオリン珪藻土の割合が異なる棒状混合物ではさまざまであった。しかし、フレーク状混合物では、カオリンと珪藻土の割合が異なっても減少比はほぼ一定であった。このような減少は、最大せん断弾性率とボイド比の関係式を用いて説明することができる。この場合、混合物のせん断弾性率の減少は、細長い珪藻粒子では単一の曲線で記述できるが、円盤状の珪藻では記述できない。この研究により、珪藻の形状が混合土の力学特性に及ぼす影響が示された。その結果、土壌中の珪藻土の存在とその形状は、特定の場所における珪藻のフラストレーションに応じて、異なる地震サイト応答を発生させる可能性がある。最後に、この研究の本質的な結論は、土壌中の珪藻の存在が地震時のサイト効果に強く影響し、地震動の増幅を増大させるということである。

101404

Abstract

調整土の透水係数は、粗粒土における土圧平衡（EPB）トンネル掘削に最も必要な特性の一つである。発泡調整土の透水係数に及ぼす水頭の影響を調べるために透水試験を行った。発泡砂の初期透水係数は水頭とともに増加し，安定透水係数と初期安定期間は減少した．一方、初期透水係数を推定するための新しい解析モデルを提案した。このモデルでは、異なる水圧下での泡のボイド比と泡の有効径を計算することにより、初期透水係数に対する水頭の影響を組み込んだ。実験結果は解析解とほぼ一致し、提案した計算手法の優れた性能を示している。さらに、泡の収縮と進化から、水頭が泡調整砂の透水係数に与える物理的メカニズムについて考察した。

Introduction

EPBシールド機は、その卓越した適応性と経済性により、都市トンネルで広く採用されている（Chen et al.） シールド掘進機が水位以下の砂質土壌で稼働する場合、水の噴出が頻繁に発生するため、掘削切羽の安定性に影響する。

掘削切羽の安定性に影響を及ぼす（Psomas, 2001; Ling et al.,2022）。吐水が掘削土の透水係数と密接な関係があることはよく知られている（Peila, 2014; Zhenget al.） 透水係数が過度に大きい場合、高圧の水が砂粒間の空隙から制御不能に漏出し、スクリューコンベヤの出口から噴出する可能性がある（Zhuら、2004；Lietら、2022）。掘削した土壌の透水性を低下させるために、発泡スチロールを土壌室に注入するのが一般的である（Zhou and Yang, 2020; Langmaack and Lee, 2016）。一般的に

一般に、発泡処理した砂の透水係数は、少なくとも 90 分間、10 5 m/s 未満に保たれる必要がある（Borio and Peila, 2010; Budach and Thewes, 2015）。

発泡調整砂の透水係数は、多くの実験室試験によって研究されてきた（Quebaud et al., 1998; Borio and Peila, 2010; Kim et al.,2019）。彼らはいずれも、発泡砂の透水係数が未調整の砂に比べて劇的に低下することを発見している。発泡砂の透水係数は、砂質土の間隙に充填された発泡体によって決定され(Bezuijenetal,1999)、Foam Injection Ratio (FIR)に大きく影響される(BorioandPeila,2010)。Bezuijen (2013)は、混合土の発泡膨張比(FERm)が混合土の透水係数と明確な関係があることを明らかにした。Huetal.(2020)は、初期透水係数が水勾配とともに増加することを指摘している。(2020)は、砂中の加圧ベントナイトスラリーの拡散距離が最初に急激に増加し、その後は基本的に変化しないことを見出した。この現象は

この現象は、粘性侵入の時間スケールとフィルターケーキ形成の時間スケールの比に依存する（Talmon et al.）

しかし、水頭が泡調整砂の透水係数に及ぼす影響についてはほとんど注目されておらず、透水係数を変化させる水頭のメカニズムはまだ明らかになっていない。

土壌の透水係数を推定するための計算法は数多く提案されている(Hazen,1893;Wiebengaetal., 1970;Terzaghi etal., 1996;Nagy,2011;OnurandShakoor,2015) 。特に、HazenモデルとTerzaghimodelは、最も広く使用されている2つのモデルである。両モデルの共通点は、有効粒径（d10）が地盤材料の透水性に影響を与える重要な要因であるということである（Hazen,1893;Odong,2007）。

それにもかかわらず、発泡条件下での透水性を予測しようとする努力はほとんどなされていない。

Bezuijen(2006)は、Blake Kozenyの公式を導入して、発泡砂の透水係数を算出しようとした。同様に、Wang ら(2020a,b)は、純粋な泡の浸透理論に基づく計算モデルを提案している。また、Liuら(2019)は、発泡調整後の地下水湧水量を迅速に推定する解析式を導出している。しかし、これらのモデルでは、水頭が透水係数に及ぼす影響を考慮していない。

係数への影響を考慮していない。

発泡調整砂の透水係数を把握することは、噴出水の発生を回避するために不可欠である。

発泡砂の透水係数は発泡気泡と砂の骨格の性質によって決まり、発泡気泡の物理的状態は浸透過程における水頭の影響を大きく受ける。発泡砂の透水特性に及ぼす水頭の影響を調べるため、様々なd10;sとFIRを持つ発泡砂の大規模透水試験を実施した。さらに、発泡砂の初期透水係数を推定するための新しい解析モデルを提案した。

Conclusion

発泡調整砂の透水性に及ぼす水頭の影響を一連の透水試験により調べた。一方、初期透水係数を推定するための新しい解析モデルを提案した。このモデルでは、初期透水係数に及ぼす水頭の影響を組み込んでいる。

このモデルでは、異なる水圧下での泡のボイド比と泡の有効径を計算することにより、初期透水係数に対する水頭の影響を組み込んだ。以下の結論が導かれる：

(1) 水頭は発泡砂の透水係数に大きな影響を与える。(1)初期透水係数は水頭とともに増加するが、安定透水係数は減少し、初期安定期間が短くなる。

また、相対的に高い水頭条件下では、発泡砂の初期安定期間は存在しない。

(2)d10;sが大きくなるにつれて，発泡砂の透水係数は水頭に対して敏感になり，初期安定期間の変化幅は小さくなる。逆に，FIRが大きくなると，発泡調整砂の透水係数と水頭との関係が鋭敏でなくなり，初期安定期間の変化幅が大きくなる。

(3)解析的手法によって計算された発泡砂の初期透水係数は実験結果とよく一致し、提案した計算モデルが非常に適していることを示している。

外部荷重を受ける試験片では透水係数が小さくなり、安定期の期間が長くなることが予想される。外部荷重が発泡砂の透水係数にどのような影響を与えるか、発泡気泡の収縮と変形から明らかにするため、さらなる研究が計画されている。また、間隙水圧と有効応力との間の変態関係についても調査する予定である。また、ペネトロメータの改造により、水圧は高いが水勾配は低いという試験条件を作り出すことにも重点を置いて研究を進める予定である。

101400

Abstract

2010年から2011年にかけて発生したカンタベリー地震で液状化の被害が大きかったクライストチャーチで採取された清浄砂とシルト質砂について、部分飽和土の液状化抵抗性を実験的に調べた。クライストチャーチ堆積物におけるP波速度（Vp）の包括的な現地測定に基づく原位置での飽和状態の評価と併せて、完全飽和と部分飽和の砂とシルト質砂の試験片に対して一連の繰返し非排水試験を実施した。スケンプトンのB値とP波速度は、実験室での部分飽和の尺度として比較的に用いられた。試験結果から，B値-Vpの関係から，Vpは，B値が閾値に達するまで，B値とともに着実に増加し，それを超えると，Vpは完全飽和を示す値，すなわちVp1600m/sのまま変化しないことが示された。一般に，試験された砂とシルト質砂の液状化抵抗性は，B値またはVpの減少，すなわち飽和度の減少に伴って増加する。さらに，試験結果は，液状化抵抗性の有意な増加が観察されない閾値B値とVpの存在を示唆している。この閾値B値とVpは，土質と適用される拘束応力に依存することがわかった。部分飽和が液状化強度に及ぼす影響は，飽和の程度を示す指標としてVpを用いた場合，砂とシルト質砂で異なる。砂の液状化強度は，Vp の減少に伴って漸増するが，シルト質砂の液状化強度は，Vp の減少に伴って漸増する。一般に，試験した土の液状化強度と公表されているデータとの間には良い一致が見られたが，きれいな砂と比較してシルト質の砂の挙動には明確な特徴が見られた。

Introduction

2010年から2011年にかけてのカンタベリー地震では、クライストチャーチ東部近郊で広範な液状化が発生し、建物、橋、埋設インフラ、土地に大きな影響を与えた（Cubrinovski and Green, 2010; Cubrinovski et al.） 被災地では一様に高い地震需要があったにもかかわらず，液状化現象は，深刻なものから液状化現象が顕在化しないものまで，幅広い範囲で観察された。

このように液状化現象が市全域で大きく異なる理由を調査するため，55 の事例サイトについて，詳細な現地調査，室内試験，簡易および高度な液状化解析を含む包括的な研究が実施された。Cubrinovskiら(2019)は，液状化の顕在化の程度にかかわらず，ほぼすべてのサイトで，地下水位直下と地表面下2～3mに液状化抵抗力の低い臨界層が存在することを発見した。したがって、浅い批判層の応答の支配的な影響に基づく単純化された解析（すなわち、Boulanger & Idriss, 2016）は、観測された応答の多様性を説明することができず、その結果、予測されたとおりの結果が得られたサイトもあれば、単純化された手法で予測された結果よりも良い、あるいは悪い結果が得られたサイトもあった。特に，クライストチャーチの多くの地点で，簡易評価による液状化の過大予測が見られた（Cubrinovski et al.）

55地点の特性評価において、部分飽和および完全飽和土壌の位置は、Coxet al.(2018)によって開発されたダイレクトプッシュクロスホール技術を用いて得られたP波速度(Vp)の詳細なプロファイルから推定され、Vp>1500m/sは完全飽和を示すと仮定した。プロフィールの分析において、サイトは飽和特性に関連して2つのカテゴリーに分けられる：地下水位から1m以内に完全飽和が記録されているサイトと、地下水位よりかなり深いところで部分飽和に遭遇するサイトである。この2つのカテゴリーを、Brown and Weeber (1992)に基づいてクライストチャーチの地質単位を示した地図上にまとめたのが図1である。クライストチャーチ東部の地点は、一般的に水位に近いところで飽和しており、堆積物の上部10mの全深度にわたって、液状化しやすい土壌（土壌挙動タイプ指数Ic 2.6）の垂直方向に連続した堆積物で構成されていた。

これとは対照的に、クライストチャーチの西側と南側では、液状化しやすい土壌と液状化しにくい土壌が層状に堆積しており、水位よりかなり深い部分飽和が推定された。なお、液状化しやすい土壌（Ic 2.6）と液状化しにくい土壌（Ic > 2.6）を区別するために、主に土壌挙動タイプ指数 Ic（Robertson and Wride, 1998）が用いられた。このような Ic の使用は，CPT に基づく最新の液状化評価手法では一般的である。

図2には，液状化しやすい土壌が垂直に連続して堆積している場所と，層間堆積物がある場所の両方について，異なる土壌のVpの特徴的な値を水位下の深さに対してプロットしている。この図から明らかなように、クライストチャーチの堆積物では、かなりの深さで部分的に飽和しているのが、層間の土壌プロファイルの一般的な特徴である。層間堆積物の液状化しやすい土壌層は、一般的にシルト質の砂で構成されているのに対し、垂直方向に連続した土壌分布の液状化しやすい土壌は、主にきれいな砂であることに注意すべきである。層間堆積物の部分的な飽和は自然発生的なものであり、季節的な変動ではなく、歴史的な沼沢層と関連していると考えられる。

Beyzaeiら、2018）。一連の有効応力解析を通じて、Cubrinovski

ら（2019）は、クライストチャーチの多くの地点で観察された応答は、堆積物全体における液状化の発生と地表面における液状化の深刻さを支配する層間相互作用とシステム応答効果の影響を考慮することによって適切に説明できることを実証することができた。彼らは

より深い地盤の液状化や軟化による基盤分離効果、動的応答相互作用、層間の急激な水の流れによる拡散効果、非液状化地殻の存在、前述の部分飽和の影響など、地盤の液状化抵抗性を高める要因など、多くの重要な相互作用を特定した。

Cubrinovskiら（2019）は，詳細な有効応力非線形力学解析に基づき，液状化抵抗を20～30％増加させることで，層間堆積物であるクライストチャーチの浅い深さでの液状化の誘発を防ぎ，その結果，地表に厚い非液状化地殻が形成され，液状化の表面顕在化を抑制することに寄与することを示した。

このように、本論文で紹介する研究は、部分的な液状化の影響をより厳密に定量化する試みである。

クライストチャーチの関連地盤の液状化抵抗性に対する部分飽和の影響を，より厳密に定量化する試みである。

この研究の結果を用いて，Ntritsos と Cubrinovski (2024)は，層間堆積物の浅い液状化しやすい層では，部分飽和の効果が強震時の液状化の誘発を防ぐのに十分なほど大きいことを示した。彼らはまた，液状化応答全体に対する部分飽和の影響は，堆積物の全体的な（シス テム）応答との関連で考慮する必要があること，そのような影響は，垂直方向に連続する堆積物 と層間堆積物では重要性が異なることを示した。有効応力非線形動的解析の結果は、本稿の範囲外である。

Conclusion

クライストチャーチ産の砂とシルト質砂の液状化抵抗性に及ぼす部分飽和の影響について，相対密度 Dr =55% 60%，有効応力 p00 = 100 kPa で一連の非排水三軸繰返し載荷試験を実施し，シルト質砂の供試体については p00 = 40 kPa で数回の追加試験を実施した。この試験で得られた主な結果を以下に要約する。

a) 試験結果は、砂とシルト質砂のB値Vp関係に共通した傾向を示しており、約1600m/sまでのVpの安定した上昇と、閾値B値（Btr）までのB値の上昇を示している。Btrは砂で約0.5～0.65、シルト質砂で0.6～0.7である。BtrからB=1.0までの範囲で、Vpは1600m/sのまま変化しない。このことは、VpとB値が飽和のレベルについてわずかに異なる推定値を提供することを示唆している。

これは、それぞれ測定された試験片のやや局所的な応答特性（Vp）とより大域的な応答特性（B値）による違いを反映していると思われる。

b) 部分飽和が砂とシルト質砂の繰返し強さに及ぼす影響は，B値を飽和レベルの尺度として用いた場合にも同様である。B値＜0.1の部分飽和土の繰返し強度は，完全飽和土のそれぞれの強度の約1.5倍である。

c) 完全飽和砂（Vp > 1500 m/s）に対して，Vp 1000 m/sでは液状化抵抗がわずかに増加し，Vp < 750 m/sではより顕著に増加する。シルト質砂では，Vpが1500 m/sから800 m/sに減少しても，概ね同程度の液状化抵抗の増加が観察された。しかし，Vp＜800m/sのとき，液状化強度の急激な増加がシルト質砂で観察された。

d) 部分的に飽和した砂の繰返し強度は，400～750 m/sの低いVp値では，完全に飽和した土の約1.2～1.45倍であった。シルト質砂では，Vp 750 m/sにおいて，繰返し強度は完全飽和シルト質砂の約1.5倍であった。

e) 一般に，試験したクライストチャーチ土の経験的 CRR-Vp 関係は，他の発表データとよく一致し ていたが，シルト質砂の Vp 750 m/s での CRR の急激な上昇を除いては，シルトの挙動に関す る他の研究と同様の傾向を示していた。この違いは、シルト質の堆積物ではより低いレベルの飽和がより一般的であるため、現場堆積物の耐液性に対して重要な意味を持つ可能性がある。従って、他のシルト質砂の追加試験が必要である。

したがって、CRR Vp の経験的関係のこの特性を調べるには、他のシルト質砂の追加試 験が必要である。

f) 一般に，試験された砂とシルト質砂の液状化抵抗性は，B 値が低下するにつれて，あるいは飽和度 が低下するにつれて増加する。しかし，砂ではB値が約0.8～1.0，シルト質砂では0.40～1.0の範囲では，液状化抵抗の感度は低い。砂，シルト質砂ともに，B値が0.12以下になったときのみ，液状化抵抗力の有意な増加が観察された。それ以外では，B値が1.0から0.3に低下したときに，液状化抵抗のわずかな増加が見られる。

部分飽和土の液状化抵抗が増加する主なメカニズムは，完全飽和土の飽和度が少し低下した場合でも，流動相の体積弾性率が大幅に低下することに起因する。流動相の体積弾性率のこのような大きな減少は，各載荷サイクル中の過剰間隙水圧の増加率を減少させ，多くの載荷サイクルにわたる累積効果は，結果として液状化抵抗の増加をもたらす。液状化抵抗力の増加は，非線形性が高く，評価における飽和の程度を定量化するために使用されるパラメータ（すなわち，Sr，B値またはVp）および考慮される特定の土に強く依存する。本研究は、Vpに基づいて評価した場合、清浄砂とシルト質砂のサイクリ強度に対する部分飽和の影響に重要な違いがあることを明らかにした。さらに，野外の堆積物の液状化評価では，液状化する堆積物で生じる様々な相互作用メカニズムやシステム応答効果とともに，部分飽和の影響を同時に考慮することが重要である（例えば，Cubrinovski et al.） この文脈で、本研究では、水位下の部分飽和帯で遭遇した2つのクライストチャーチの土壌（砂とシ ルティサンド）について、実験室で部分飽和の効果を定量化した。一方、補完的な研究（Ntritsos and Cubrinovski, 2024）では、非線形動的解析によって、これらの部分飽和の効果が、異なるタイプの液状化性堆積物（垂直連続堆積物と層間堆積物など）の液状化反応に与える影響が大きく異なることが示された。本研究では、液状化事例としてよく知られている特定の地盤や堆積物の特性を考慮し、液状化応答に対する部分飽和の影響を包括的に評価することを目的としている。

101380

Abstract

本論文では、土質斜面の信頼性・安全性評価を行うための確率論的シミュレーションと適応的クリギングメタモデルに基づく反復的アプローチを提案する。サポートポイントを適応的に選択するための2つの新しいルールを提案し、エントロピー学習関数と極限状態関数によって定義される破壊領域への近さを考慮する。さらに、局所レベルでのクロスバリデーションにより計算された二乗平均平方根誤差と平均絶対百分率誤差に基づく停止基準を提案し、不確実性が関連する領域に焦点を当てる。最後に、サポート点の選択ルールと誤差測定基準を、失敗確率が低、中、高の2つのベンチマーク問題で実装する。(2)新たな局所誤差メトリックに基づく停止基準、(3)故障確率の異なる大きさにわたる挙動に関する洞察、(4)サポート点の総数を大幅に削減する新たな選択ルール。提案されたスキームは、サポートポイントを計算する

この結果、実務家にとって魅力的なツールとなる。

Introduction

不確実性の定量化は、地盤の固有のばらつきや、その特性を正確に決定することの難しさから、ジオテクニカルな問題において極めて重要である(Zhao et al., 2021; Huang et al., 2020; Liu and Cheng 2016)。ジオテクニカルな問題の中でも、斜面の安定性は、アースフィルダムやロックフィルダム、堤防、斜面、テーリング堆積物などの構造物における主要な懸念事項である。これらの問題では、安全率（FoS）の概念に基づく設計戦略を採用するのが一般的である。

これは、現在のせん断強度を最大許容値と比較することによって斜面の安定性を評価するものである。しかし、FoSは決定論的な指標であり、不確実性を明示的に考慮していない（Ching et al.） この限界は、保守的で主観的なパラメータや設計で処理されるのが一般的で、例えば、許容最小FoS（荷重条件に応じて1.1から1.5の範囲（ANCOLD, 2012））を課すが、問題の不確実性の程度に関係なく不変である（Ching et al.） このような主観性の影響を評価することはできない。さらに、過去の経験に基づくと、その安全性を確保することは不可能である（El-Ramly et al., 2002）。

FoSに対するモデルパラメータの不確実性の影響を評価するために、例えば一次信頼性法（FORM）や二次信頼性法（SORM）、モンテカルロシミュレーション（MCS）などを採用する戦略がいくつか提案されている（Ji and Low, 2012; Liu and Cheng, 2016）。しかし、FORMとSORMは、有限要素法／差分法に基づく数値地盤モデルを用いた斜面安定解析の特徴である、非線形性が高く陰解法的な性能関数を扱う場合には限界がある（Li and Yang, 2019; Luo et al.） 一方、MCSは概念的に単純であり、不偏推定が可能であるが、高精度を得るためには多数のシミュレーションが必要である（Liu and Cheng, 2018; Yi et al., 2015）。この計算労力は、失敗確率が小さいケースや計算集約的な決定論的モデルでは、法外なものになる可能性がある（Guo and Dias, 2019）。モンテカルロ・シミュレーション（MCS）の計算負担を軽減するために、一般的な戦略は、メタモデルとしても知られる代理モデルを採用することである。これらの簡略化されたモデルは、高忠実度モデルで生成された入出力ペアのデータベース（サポートポイント）で学習することにより、システムの入出力関係を捉える。ここで、好ましいサロゲート・モデルは、Krigingに対応する。なぜなら、Krigingは、新しい入力に対する出力予測だけでなく、その分散も提供するからである。この戦略の利点は、サロゲートモデルが必要とするサポートポイントの数が、MCSが必要とするシミュレーションの数よりもはるかに少ないという前提に基づいている。初期の研究では、斜面の安定性解析にKrigingメタモデルを導入し、Krigingが他の方法論と比較してより正確な破壊確率の予測をもたらすことを実証した（Zhang et al.）

研究者たちはまた、テイラー・クリギング（Liu et al., 2017）や多項式カオス・クリギング（Pan et al., 2021）に基づく他のメタモデルのバリエーションも探求してきた。しかし、最も有望な技術は、能動学習クリギング（ALK）（Huang et al. ALKの中核は、以前に訓練されたメタモデルに基づいて、新しいサポート点を繰り返し選択することである。そして、学習関数を用いて、Krigingの性能が不十分な領域を特定する。通常、学習空間全体のKriging分散を評価する。しかし、最近の技術では、学習関数の使用とMCSで使用されるサンプルを組み合わせることで、前回学習したクリギングの性能が不十分な領域や、不確実なパラメータが集中している領域において、メタモデルの忠実度を向上させている（Wen et al.、2016; Huang et al.、2016; Pedroni and Zio、2017; Yang et al.、2018; Zhang et al、

2019). この戦略は局所適応学習とも呼ばれ、特に信頼性解析に関連している。このような進歩にもかかわらず、斜面の安定性問題に対するこれらの局所適応技術の研究は非常に限られている。例えば、グオとディアス（Guo and Dias, 2019）は（Echard et al., 2011）により提案された能動的学習関数を使用し、安全または故障領域として誤判定される確率が最も高い領域に新しいサンプルを追加している；あるいは、よく知られたエントロピー学習関数を準モンテカルロシミュレーションと組み合わせて使用するリウら（Liu and Cheng, 2018）。

これらの研究では、異なるサロゲート・モデリング戦略、適応スキーム、学習関数、サンプリング技法が比較され、それぞれの選択の利点が強調されている。しかし、適応的手法の中には、標準的なKrigingメタモデルと比較して、精度や効率を低下させるものがあることも報告されている（Huang et al.、2021）。ここで、問題の一部は、適応メタモデルに固有のランダムな特性を考慮しない一般的な決定に関するものであり、単一の実現に基づく比較や分析につながる（Xiao et al.） この意味で、(1)新しいサポートポイントに対する適切な学習関数の選択、(2)異なる学習関数間の公正な比較、(3)異なる大きさの失敗確率にわたる学習関数の振る舞い、(4)停止基準として使用される異なるエラーメトリクスの効果、に対するロバストな洞察を得る必要がある。

本論文では、強度低減法に基づく高忠実度モデルで学習され、商用ソフトウェアで実施された革新的な局所適応クリギングを紹介する。その効率を探るために、よく知られたエントロピー関数

(LiuとCheng, 2018)、(Echard et al., 2011)に基づく学習関数、およびエントロピー関数と極限状態関数によって定義される故障領域への近さを考慮した2つの新しい学習関数を含む。本研究の具体的な貢献は、(Liu and Cheng, 2018)によって提案された適応スキームを、新しいサポートポイント選択ルールと明確に定義された停止基準を含めることによって強化することに焦点を当てており、その結果、追加されるサポートポイントの総数を大幅に削減することに成功している。解析と結果は、選択規則が同じサポート点から開始するように制約された、相当数のリアライゼーションの平均に基づいている；したがって、違いは、MCSやサポート点の初期分布ではなく、各選択規則のランダム性によってのみ生じる。さらに、局所レベルでのクロスバリデーションで計算された二乗平均平方根誤差と平均絶対百分率誤差に基づく停止基準を提案し、不確実性が関係する領域に焦点を当てる。サポート点の選択ルールと異なるエラーメトリクスは、失敗確率が低、中、高の2つのベンチマーク問題で実装される。(1)他の標準的な代替案と比較してサポート点の総数を大幅に削減する新しい選択ルールの提案、(2)新しい局所誤差メトリックに基づく停止基準の導入、(3)相当数の実測に基づく他の戦略との公正な比較を行うための2つのベンチマーク問題の実装、(4)失敗確率の大きさの違いによる挙動の洞察。本論文の構成は以下の通りである。まず、斜面の安定性に関する一般的な信頼性の枠組みを提供する。次に、適応クリギングメタモデルに基づく計算手順について述べる。最後に、提案されたアプローチを2つの例で説明する。この例では、市販のソフトウェアによる強度低減法（SRM）解析から支持点を求めた。

Conclusion

適応クリギングに基づく斜面の安定性信頼性のための効率的なフレームワークを示す。まず、適応クリギングモデルを支持点選択ルールに従って順次学習させる。次に、このモデルを代用モデルとしてモンテカルロシミュレーションを行い、土質斜面の破壊確率を予測する。提案されたスキームは、エントロピーおよび/または破壊限界状態関数に基づく3つの異なる新しい選択ルールを提案することによって、以前の方法（Liu and Cheng (2018)によって提案された(Liu and Cheng, 2018)）を強化し、任意の所望のFoSの破壊確率を予測することができる。提案されたアプローチの核心は、限界状態関数に近い領域でリサンプリングプロセスを確立することに対応し、これは後で新しいサポートポイントを選択するために使用される。新しいサポート点が限界状態関数に近いため、メタモデルは故障確率の計算にとってより重要な領域の精度を向上させる。その結果、(Liu and Cheng, 2018)で提案された適応戦略と比較して計算量が削減され、例1では、ルール1が故障確率に到達するために25点と24点を使用するのに対して、ルール4は閾値Hthresh ¼ 1:0とHthresh ¼ 1:4に対してそれぞれ15点と13点しか使用しない場合、サポート点が最大40%減少する。

ワンアウト・クロスバリデーションに基づく停止基準、二乗平均平方根誤差と平均絶対パーセンテージ誤差の採用、PFの収束についても議論する。最後に、誤差を計算するための局所領域が提案され、不確実なモデルパラメータを記述するために採用されたPDFを標準ガウス空間に変換することによって定義される。この変換により

L2ノルムを用いて、局所的クロスバリデーション手法のサポート点を識別することができる。すべての分析は、研究された各選択規則に固有のランダム性を考慮し、相当数の実測の平均に対して行われる。 次に、提案するフレームワークの性能を、異なる土質と破壊確率レベルを持つ2つの土壌斜面の例で説明する。FoSに対する2つの異なる最小閾値が、これらの2つの例で研究された。提案された3つの選択ルールと(Liu and Cheng, 2018)で提示された戦略が比較のために採用された。比較は、選択規則が同じ支持点とMCSの同じサンプル集合を共有する、リアライゼーションの平均に関して行われる。結果として得られた故障確率は、高忠実度モデルに基づくモンテカルロ・シミュレーションで検証され、故障確率が高い事例ではルール2と3を除くすべてのケースで同様の予測を示した。しかし、ルール2と3が示したパフォーマンスの低さは、選択ルールそのものに関係している。これらのルールは極限状態関数の近くにサポート点を割り当てるが、極限状態関数はPFが高いので主要故障領域を定義する。その結果、故障領域（モンテカルロ・シミュレーションに関連する領域）は、選択ルールによって限界状態関数に押しやられるため、わずかなサポート点しか含まず、メタモデルは精度を失います。この状況は、故障領域が小さいため故障確率が低い場合に意味を失い、限界状態関数に近いサポート点が故障領域のかなりの部分をカバーすることになります。にもかかわらず、ルール4は、提示された選択ルールと事例全体で最高の性能を示し、より少ないサポート点でPFの適切な近似を得ることができた。(2)故障確率が高い場合は、ルール4を選択する。(3)クロスバリデーションに基づく大域誤差と局所誤差の追跡は、メタモデルの挙動に関する重要な洞察を提供する。最終的に、提案されたフレームワークは、高忠実度モデルや不確実なパラメータの確率的記述に制限されない。したがって

この研究は特定の地盤工学的アプリケーションに焦点を当てた、 フレームワークは他の地盤工学的問題にも拡張可能である。問題にも拡張可能である。したがって、提案したフレームワークは一般的に 土斜面の信頼性解析を少ない計算量で行うための魅力的なアプローチである。土の斜面の信頼性解析を、より少ない となる。

101382

Abstract

保水試験や三軸試験などの要素試験は、不飽和土の初歩的な水理力学的挙動を調べるための効率的で広く用いられている方法である。最近の研究において、セラミックディスクや微多孔膜フィルター（MMフィルター）を用いた軸差法（ATT）による不飽和試験結果の食い違いが観察され、要素試験で見られる素挙動に誤解が潜んでいる可能性が指摘されている。本研究では、まず、不飽和完全分解花崗岩砂（日本では「真砂土」と呼ばれる）を供試体として、セラミックディスクおよびMMフィルターを用いた三軸試験を実施し、試験結果に対する手法の違いの影響を比較した。次に，土-水-空気連成有限要素-有限差分(FE-FD)法を用い，変形に依存する保水曲線(WRC)と新たに提案した不飽和/飽和構成モデルに基づき，供試体の変形が一様でないため，三軸試験を境界値問題(BVP)としてシミュレートした。排水・通気三軸試験の結果，マサドの応力-ひずみ関係は，どの手法を適用しても基本的に同じであるが，せん断段階での排水量や飽和の程度はかなり異なることがわかった。計算による平均応力-ひずみ関係は、基本的に試験と同様の傾向を再現した。また，セラミックディスクまたはMMフィルターを用いたATTが，せん断中の飽和度と試験片内の応力分布に大きく影響することが計算から示された。ATTを用いた不飽和三軸試験は，基本的にいわゆる要素試験ではなくBVPであることを強調しておく。

Introduction

不飽和土の力学的挙動は地盤工学において大きな関心事であり、飽和土のそれとは大きく異なる。不飽和地盤の強度や変形は、吸水量や飽和度の違いによって大きく左右され、豪雨時の浅層斜面崩壊のような自然災害につながることも少なくない。有限要素法を用いた数値シミュレーションは、不飽和土に関連する様々な地盤問題のメカニズムを理解するための有効な手法として広く採用されている。Liら（2017）は、有限要素法において修正弾塑性コン

有限要素-有限差分法において修正弾塑性モデルを採用し、海洋サイトにおける地震災害プロセスを記述することに成功した。Xieら(2021)は、DBLEAVES-Xという有限要素プログラムを用いて、不飽和状態の盛土材料の変位と加速度応答を再現した。さらに、斜面の安定性についてもよく研究されている。不飽和地盤における斜面の破壊は、Xiongら（2014）によってシミュレートされ、間隙水／空気圧の再現を通じて満足のいく精度で観察された。同様の手法は、Zhangら(2019)によって、漏水している地下パイプをシミュレートするために実装された。これらの研究では、不飽和地盤の構成モデル

不飽和土の構成モデルが提案され、飽和土と不飽和土の両方に対する要素試験によってその妥当性が検証された。これは、境界値問題における不飽和土の力学的挙動を理解する鍵となる。飽和土と比較して，不飽和土の定量的評価は

不飽和土の定量的評価は，飽和土に比べてはるかに複雑な水理・力学連成問題であるため，不飽和土の要素試験のモデリングや工学的問題への適用には限界がある。しかし、その重要性を無視することはできず、この分野の研究を充実させるための絶え間ない努力が必要である。

様々な応力経路下での不飽和土の挙動を調べるために、オードメーター試験や三軸試験などの要素試験が用いられてきた。不飽和土と飽和土の実験室試験における決定的な違いは、マトリックサクションの制御方法である。軸

Hilf（1956）によって提案された軸移動法（ATT）は、不飽和土の効果的な方法として広く採用されている。三軸試験装置の概略図。ATTの主な特徴は、一般にセラミックディスクによって空気と水を分離することである。セラミックディスクの高いエアエントリー値（AEV）により、様々な不飽和試験を実施する際に、間隙空気圧と間隙水圧を独立に制御することができるため、多くの研究者がその恩恵を受けてきた。

しかし、セラミックディスクの透水係数は約10 8 10 10 m/sである（Hong et al； Nishimura et al., 2012）であり、不飽和試験におけるディスクの厚さは約4 7 mmである。低い透水係数と厚い深さは、吸引の平衡に達するまでに耐えがたいほど長い時間を必要とする。このような許容できないほど長い期間、すなわち数週間にも及ぶ試験を避けるために、西村（2012）は不飽和三軸試験で微多孔膜フィルター（MMフィルター）を利用して吸引を制御した。MMフィルターの透水係数の測定値は、セラミックディスクの透水係数よりもわずかに大きいだけであったが（Hong et al、

2021; Wang et al., 2017）、MMフィルターの薄い厚みは、吸引の平衡に達する時間を大幅に短縮する。MMフィルターのAEVは500kPaまでと十分に高く（Hongら、2016）、不飽和試験におけるセラミックディスクの代替としての有効性を保証している。MMフィルターを代替とした試験時間の大幅な短縮は、多くの研究者によって報告されている。さらに、Wangら（2017）は、MMフィルターが小さな吸引の制御、および飽和度の増減において先進的であると述べている。

しかし，不飽和試験におけるセラミックディスクを用いた試験結果とMMフィルターを用いた試験結果の不一致は，保水試験（Hongら，2016）や三軸試験（Ishikawaら，2010）において報告されているが，試験結果の不一致のメカニズムは明らかにされていない。ATTを用いた試験結果に基づき、土の飽和／不飽和構成モデルを提案する目的で多くの研究が行われてきた。Zhang and Ikariya (2011)は、飽和度Srを状態変数として、保水曲線(WRC)と組み合わせた飽和/不飽和構成モデルを提案した。Xiongら（2021）は、WRCモデルに変形の影響を導入し、飽和／不飽和構成モデルに結合した。一方，要素試験は，土の挙動を調べたり，供試体の挙動が一様とみなされる構成モデルの材料パラメータを決定したりする上で，常に重要な役割を果たすと考えられている。しかし、Jinら（2010）の研究で指摘されているように、要素試験は現実の一様な挙動を表現できるものではないと考えるべきである。要素試験における供試体の初期欠陥と載荷キャップと供試体の間の摩擦は、通常、非一様な土の挙動を生み出す。例えば、Watanabe et al. (2009)の研究では、X線CT画像によって土の試験片に不均一なひずみ分布が観察された。野田と吉川（2015）は、不飽和土の2次元有限変形解析を行い、セラミックディスクやMMフィルターが試験結果に与える影響を考慮する必要性を強調した。その後、吉川と

Noda (2020)は、2次元軸対称メッシュを用い、MMフィルターを供試体下の台座に固定し、圧密過程とせん断過程を計算した。吉川ら(2021)は、2次元軸対称メッシュのMMフィルタをセラミックディスクに置き換え、圧密過程とせん断過程を計算した。

のメッシュをセラミックディスクに置き換え、FEM による計算結果を従来の三軸試験結果と比較した。

これらの計算結果は試験結果をある程度再現しており、三軸試験は初期／境界問題として考えるべきであり、シミュレーションにおいてセラミックディスクやMMフィルターの影響を無視すべきではないことを示している。とはいえ、セラミック・ディスクとMMフィルタの不一致が明確に示されたわけではない。本研究では、まず、セラミックディスクとMMフィルターを用いたATTによる三軸試験を、Masadoと呼ばれる完全に分解した花崗岩の試験片に対して実施した。次に，変形に依存するWRCを持つ適切な飽和/不飽和構成モデル

Xiongら(2021)によって提案された、変形に依存するWRCを含む適切な飽和/不飽和構成モデルを利用した。この構成モデルに基づき、土-水-空気連成有限要素法による数値試験を実施し、三軸試験中の土の水理学的・力学的挙動をシミュレートした。

最後に、シミュレーションの結果を試験の結果と比較し、ATTにおけるセラミックディスクとMMフィルターの使い分けを理解した。

Conclusion

本研究では、不飽和三軸試験により正土の水理-力学挙動を検討した。その結果、セラミックディスク/MMフィルターの影響と供試体の不均一な変形を検討するため、FE-FD法を用いた土-水-空気連成解析によりシミュレーションを行った。まず、不飽和正土の三軸試験において、セラミックディスク/MMフィルターを用いたATTをマトリックサクションの制御に利用した。次に，Xiong ら(2021)によって提案された不飽和/飽和構成モデルと変形依存 WRC モデルを結合し，土-水-空気連成 FEFD 法による数値シミュレーションを行い，要素試験を BVP とみなして三軸試験を模擬した．構成モデルおよび WRC モデルの材料パラメータは，Xiong ら（2021）の方法に基づいて決定した。最後に、計算結果を三軸試験結果と比較し、正土の水理機械特性を記述する構成モデルの性能を検証した。本研究の主な結論を以下に示す：

(1)セラミックディスクまたはMMフィルターを用いた三軸試験結果は，応力-ひずみ関係においてほとんど差がなかった。いずれの場合も、体積ひずみは圧縮から膨張へと変化した。しかし

しかし、2つの方法の間に大きな相違が生じたのは、主にSrの変化であった。セラミックディスクの場合のせん断時のドレン排出量は、MMフィルターの場合よりもはるかに大きかった。

(2)FE-FD計算から得られた正土の応力-ひずみ関係は、試験結果を適切に再現することができた。特定要素の強度と応力経路を比較することにより、セラミックディスクとMMフィルターの両方が、その近傍に位置する正堂要素の機械的挙動に大きな影響を与えることがわかった。セラミックディスクとMMフィルターの両方を用いた三軸試験において、供試体内の土の変形と強度の分布が不均一であったことから、いわゆる要素試験が初歩的な問題ではなく、BVPであることが証明された。

(3)FE-FD法を用いた計算では、セラミックディスク/MMフィルターを用いた供試体からの排水量の差を定性的には再現できたが、定量的には十分ではなかった。計算結果の不一致は、試験のそれよりもはるかに小さかった。この不一致の原因は、WRCの変形パラメータceが敏感に変化することに起因しており、正土の水理・力学挙動のシミュレーションは深く連成するため、正確な数値計算が困難であった。したがって，ceは不飽和土の挙動に大きく影響するため，圧縮・膨張状態でのceの決定については慎重に検討する必要がある．

(4)供試体中のサクションの分布は，せん断試験ではATTによらず概ね一様であったが，Srは両者とも偏在していた。セラミックディスク/MMフィルターのSr値が高いため，その近傍の要素の飽和度が著しく上昇し，低い飽和度は主に供試体の中央部に集中した。しかし、セラミックディスクの場合、MMフィルターの場合に比べて全体的に高い吸引力が観察され、その結果、せん断段階での排水量が大きくなった。MMフィルターを用いた場合の計算吸引力は、試験片に適用された所定の吸引力に近かったことを考慮すると、試験中の吸引力を制御する上で、MMフィルターはセラミックディスクよりも優れていると結論づけられる。

(5) 数値シミュレーションでは，本研究で実施した試験は素問題ではなく BVP であるが，数値シミュレー ションで計算された供試体の平均挙動は，要素挙動を反映すると仮定した三軸試験結果と基本的に同 じであり，セラミックディスク／MM フィルタを用いた ATT による三軸試験は，基本的に地盤材料の水理・ 力学的挙動の検証に利用できることが示された。