

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 ムハマッド ウマル

社会基盤施設や一般構造物の耐震設計において、地盤の非排水強度・変形特性の検討は非常に重要である。特に液状化を伴う場合は、地震動により地盤の変形が大きく蓄積されるため、それに伴うピーク強度・残留強度の低下が懸念される。しかし、これまでの研究では、上記のせん断ひずみ (damage strain) がその後の地盤の強度・変形特性に及ぼす影響を系統的にまとめた例は少ない。この理由の一つとして、従来の室内土質試験機で計測できるひずみレベルでは当該事象を計測することが困難であることが挙げられる。

そこで本研究では、豊浦砂を対象として、せん断ひずみを 100% 以上まで計測可能な中型中空ねじりせん断試験機を用い、供試体密度や初期せん断応力、および繰返し応力振幅などをパラメータとした非排水ねじりせん断試験を系統的に行い、繰返しせん断による damage strain がその後の地盤の強度・変形特性に及ぼす影響を精緻に検討した。

本論文の主な内容と成果を以下に示す。

第一章では、地震に起因する地盤流動・斜面崩壊に関する既往事例として、San Fernando dam (米国・カリフォルニア) と藤沼ダム (福島県) についてその詳細を取りまとめると共に、液状化した砂質土の変形特性に関する既往研究を整理し、本研究の目的・意義を示している。

第二章では、本研究の実験試料 (豊浦砂) の物理特性と試験機 (中型中空ねじりせん断試験機) の詳細を示した。本研究では通常よりも大きなひずみレベルでの強度・変形特性を対象としているため、メンブレン張力補正は重要な課題であるが、ここでは水供試体で計測したせん断応力を用いた補正法についても記述している。また、第三章以降に述べられる実験の手順を記述した。

第三章では、大変形に至る非排水単調せん断試験結果を取りまとめている。供試体の相対密度は 19~72% である。実験結果より、相対密度の増加と共に有効応力経路に現れる quasi-steady-state は右上に移動し、ピークせん断強度と残留強度が増加する傾向が示されている。特に相対密度が 23% 以下の供試体では、負のダイレイタンスに起因する流動的挙動が確認されたが、せん断ひずみが 60% に達すると剛性が回復しせん断応力が増加する傾向が確認された。

第四章では、繰返しせん断ひずみ (damage strain) がその後の供試体のせん断強度に及ぼす影響を検討している。ここでは、所定の密度に調整された供試体に対し、等方圧密後に非排水条件下で応力振幅一定の繰返しせん断を行うことで様々な大きさの damage strain を与え、その後単調せん断試験を行っている。実験結果より、damage strain が大きくなると単調載荷時のピーク強度は低下すること、およびその傾向は供試体密度・初期繰返し載荷時の繰返し応力比・圧密応力を変化させても確認できることが示された。また、大ひずみ

レベルでは供試体の変形に顕著な局所化が現れることが確認された。

本章では、上記と同様の実験を、斜面内の応力状態を考慮して初期せん断応力を与えた条件でも実施している。初期せん断応力の影響により、初期繰返しせん断時のせん断応力の下限值は常に正となる条件（non reversal stress condition）にもなり得るが、繰返しせん断応力比に寄らず damage strain が大きくなると単調載荷時のピーク強度は低下するという、等方圧密時と同様の結果が確認された。

第五章では、変形の局所化と非排水強度の関係について検討している。繰返しせん断に伴い液状化した供試体では大きなせん断変位が生じるが、非排水条件下ではせん断変位がある程度大きくなると正のダイレイタンスにより有効応力が増加し、せん断剛性が回復する。また、その過程における供試体の変形は、一様な変形モードから局所化を伴うモードに移行する。ここでは供試体高さ一定条件下でのせん断試験を単純せん断（simple shear）と考え、せん断ひずみの増加に伴い変化する軸差応力から供試体の変形局所化を推定した。また、damage strain と局所化が発生する時点のせん断強度、および残留強度との間に良い相関があることを示した。

第六章では、供試体の変形を画像解析により可視化することを試みた。これまでの検討により、供試体の変形モードと強度特性との間に密接な関係があると考えられることから、本章では3次元デジタル画像相関法（3D DIC）を適用して、damage strain を受けた供試体の単調せん断時の挙動を調べた。これにより、せん断試験中に供試体に生じるひずみが一様な状態から徐々に局所化し、大ひずみレベルではせん断層に沿って変形する過程が精度良く表現できた。また、ロードセルで計測される供試体全体のせん断応力の変化との関係が明確に示された。

第七章では、第五章で定式化された damage strain とせん断強度の低下傾向の関係を利用し、東日本大震災で被災した藤沼ダムの変形解析を New mark-D 法により実施した。堤体に生じた実際の変位は明確ではないため、本解析で事象を検証することはできないが、本研究による精緻な実験結果に基づいて実施した解析により、従来手法と比較してより確からしい堤体の変位を示すことができた。

第八章では、本研究で得られた結論をまとめ、今後の課題を整理している。

以上、地震時における液状化に伴う地盤・土構造物の安定性・流動性評価に関し、これまで実験的に困難であった大ひずみレベルにおける地盤の強度特性に及ぼすせん断ひずみ（damage strain）の影響を、系統的な実験により科学的に示し得た意義は大きく、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。