

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 リスキ ファリス ヒダーヤト

地震時の地盤の液状化の発生とそれに伴う地盤変位量は、地震動特性、対象地盤の土質・密度、地下水環境、および地表面勾配などの影響を受ける。過去の地震により発生した液状化に伴う地盤変位（側方流動量）は、一般的に数m～10mオーダーであり、主に堤防の堤体や河川・沿岸部の護岸背面地盤において発生している。一方、2018年インドネシア・スラウェシ地震では、震源地に近い都市 Palu において、約 1~5%程度の非常に緩い斜面にもかかわらず大規模な地盤流動が発生し、流動距離は数百m～1km以上にも及んだ。その発生メカニズムは現時点では明確ではないが、当該地盤・地形の特徴から、地震動により被圧帯水層から表層へ大量の地下水が供給された可能性が原因の一つとして考えられている。

そこで本研究では、傾斜地盤を考慮した応力状態において、供試体が外部からの水の供給を受けて液状化・流動に至る挙動に及ぼす諸要因を明らかにすることを目的とし、系統的な三軸試験と中空ねじりせん断試験を実施した。

本論文の主な内容と成果を以下に示す。

第一章では、スラウェシ地震による Palu での被害を含む、既往地震によって引き起こされた流動的地盤崩壊に関する被災事例について詳細に取りまとめると共に、液状化した砂質土の側方流動に焦点を当てた模型実験、室内土質試験に基づく既往研究を整理し、本研究の目的・意義を示している。

第二章では、本研究の実験試料である豊浦砂、DLクレイ、カオリンクレイ、および Palu の流動箇所採取した原位置試料の物理特性と、使用した試験機（三軸試験装置・中空ねじりせん断試験装置）の詳細を示した。また、試験に用いた各計測装置（ロードセル・圧力計・変位計等）の校正結果も示している。本研究では三軸試験、中空ねじり試験共に、せん断応力一定条件で **back pressure** の増加により有効応力を低下させ、静的に液状化を発生させる特殊な実験を実施している（以下、静的液状化流動試験）。ここでは、その制御方法を含む実験の手順も記述した。

第三章では、実験において供試体に作用する各種応力・ひずみの定義について、その導出方法と合わせて示している。特に中空ねじり試験では、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り、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。

第四章では、三軸試験機によって実施した静的液状化流動試験結果を取りまとめている。供試体の初期相対密度を約 25~70%とし、約 1~15%の地盤の傾斜を考慮した初期偏差応力を与えている。実験結果より、初期相対密度によらず、有効応力の値があらかじめ非排水単調載荷試験で求めていた変相線（**phase transformation line**）に達すると体積膨張を伴うせ

せん断変位が増加し、限界状態線（critical state line）に近づくとせん断変形が止まらず流動破壊に至る傾向が確認された。また、流動破壊に至るまでの体積膨張量（正のダイレイタンス）は、供試体密度に依存し、最終的な密度状態は Verdugo and Ishihara (1996)が示した平均有効主応力と間隙比の関係における限界状態線に漸近することが確認された。この傾向は初期偏差応力の値によらないことから、Palu の被災事例のように非常に緩い斜面でも流動崩壊が発生することを示唆する結果となった。

第五章では、第四章で示した実験結果に基づき、流動破壊時のせん断ひずみ速度に着目した考察を示している。応力-ひずみ関係の分析より、流動時の平均的なひずみ速度は、初期偏差応力（即ち地盤の傾斜角）と正の相関があることが示された。また、豊浦砂のケースでは、供試体密度が大きいほど流動時のひずみ速度も大きくなる傾向が確認された。本実験で表現する事象の範囲は、土粒子同士が接している状態（流動の初期段階）であると解釈しているが、この範囲においては吸水により正のダイレイタンス傾向を強く示す密な供試体の方が、せん断ひずみが生じやすく、ひずみ速度も大きくなった可能性が考えられる。一方、細粒分を含む供試体では、供試体密度が大きいほど流動時のひずみ速度は低下する傾向が確認された。この理由は現時点では明らかではないが、当該試料の透水性と単調載荷時におけるダイレイタンス特性を分析することで説明できる可能性がある。

第六章では、中空ねじり載荷装置による静的液状化流動試験の結果を示した。実験供試体は、豊浦砂および Palu の流動被災地から採取した原位置試料である。流動に至るまでのせん断ひずみ・体積ひずみの発達傾向は、三軸試験結果と同様の傾向を示した。また、中空ねじり試験では、地下水の流入は下方から生じるという原地盤の状態を模擬した実験も実施しているが、その吸水条件の違いが実験結果に及ぼす影響は小さいことが確認された。一方、せん断ひずみが 30%程度を超える領域では、供試体が振動を伴って突然収縮し、メンブレン内部で砂粒子が再堆積するような事象が確認された。この理由は現時点では明確ではないが、せん断ひずみと間隙水の増加により土粒子間力が小さくなり、供試体形状を保てなくなった可能性が考えられる。

第七章では、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、被災事例を基に、大規模な地盤流動を生じさせるメカニズムに言及し、流動時の地盤変形特性に及ぼす諸要因を、困難かつ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。