

本論文は Cyclic simple shear tests using stacked-rings on multiple liquefaction properties of sands (砂の複数回液状化特性に関する積層リングを用いた繰返し単純せん断試験) と題した英文の論文である。

2011年東北地方太平洋沖地震では広域多所で液状化が発生した。被災地における今後の対策を検討するうえで、過去に液状化履歴を受けた地盤の液状化特性を把握する必要がある。しかしながら、従来の室内土質試験では何度も液状化を繰り返すと供試体の断面形状が徐々に変化してしまうため、その影響が比較的少ない2回目までの液状化特性を評価するに留まっていた。

以上の背景のもとで、本研究では、供試体の断面形状が変わらないように新開発した多層リング単純せん断試験装置を用いて、豊浦砂の定体積繰返しねじり試験と一次元再圧縮試験の組み合わせを同一供試体に対して複数回実施することで液状化履歴に伴う特性変化を計測し、その結果を分析している。試験の大部分は乾燥状態の供試体に対して実施しているが、体積を一定に保ったまま繰返しねじりせん断を行うと徐々に鉛直応力が減少し、最終的にはほぼゼロの状態に至って飽和砂の液状化挙動と類似した応力ひずみ関係が得られるため、本研究ではこれを液状化試験として取り扱っている。その結果、供試体の飽和過程を省略できることになり、試験時間を大幅に短縮することを可能としている。

第一章では、研究の背景と既往の関連研究を整理して記述したうえで本研究の目的を設定し、論文全体の構成について説明している。

第二章では、試験装置を構成する部材と、試験材料と試験方法の詳細、および計測装置の校正結果について記述している。

第三章では、多層リング単純せん断試験における計測結果から応力とひずみを算定する方法について記述している。

第四章では、試験装置の改良過程を記述している。この試験装置では、供試体と接するリング側面で鉛直方向の摩擦抵抗が発揮されるため、供試体に作用する鉛直応力の鉛直方向分布が一定値にならないという構造上の制約を有する。当初は31層のリングを用いていたが、供試体底部に作用する鉛直応力は上面に作用する値の5%以下と著しく小さいことが判明したため、リングを11層に減らして摩擦の影響を低減させている。一方で、リングを8層、5層まで減らしてしまうと、発揮される摩擦の大きさが液状化履歴に応じて変化してしまうことを見出している。これらの結果に基づいて、11層のリングを標準的な試験条件として設定し、リングに特殊コーティングを施すことで摩擦をさらに低減できたことを示している。

第五章では、せん断ひずみ振幅の最大値を変えて実施した複数回液状化試験の結果をまとめて記述している。ひずみ振幅が大きいほうが、液状化履歴を受けてもその後の液状化強度が増加しにくく、同一の相対密度で初めて液状化させる場合よりも強度が小さいことを見出している。さらに、試験中の各リングの回転状況の画像解析を実施して局所的なせん断ひずみの鉛直方向分布を求め、前述したひずみ振幅が大きい場合のほうが、せん断ひずみの局所化が進行していることを明らかにしている。これは、局所的に緩んだ状態となっていることを示唆しており、そのために液状化強度が増加しにくいと考えられることを示している。

第六章では、誘導異方性が試験結果に及ぼす影響について記述している。前章までの試験結果は、各液状化試験の後にせん断ひずみをゼロに戻していたが、実際の水平地盤ではせん断応力がゼロに戻り、せん断ひずみは必ずしもゼロには戻らない。そこで、後者の状況を再現した複数回液状化試験を実施した結果、せん断ひずみをゼロに戻した場合と比較すると液状化強度が増加しにくく、液状化時の応力ひずみ関係も非対称となって異方性を示すことを明らかにしている。さらに、せん断ひずみをゼロに戻さないことで、その後の繰返し載荷時のダイラタンシー特性にも異方性が現れることを見出している。

第七章では、液状化に至る過程で供試体が塑性変形することで吸収したエネルギー量を算定し、ひずみ振幅の絶対値を足し合わせた累積ひずみとの関係を分析している。ダイラタンシー挙動が収縮側から膨張側に転じる変相線を越えるまでの過程で吸収したエネルギーが大きくなるほど、その次の液状化過程での強度が増加し、逆に変相線を越えた後の過程で吸収したエネルギーが大きくなるほど、液状化強度が減少することを見出している。

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。

以上をまとめると、本研究では、豊浦砂の複数回液状化特性に及ぼすせん断ひずみ振幅と誘導異方性の影響を独創的な室内土質試験により明らかにするとともに、異なる液状化履歴の影響をエネルギー的な観点から整理する手法を提示して試験結果の統一的な解釈に成功している。このことは地盤工学の進歩への重要な貢献である。よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。