

本論文は Evaluation of Liquefaction Potential of Partially Saturated Heap of Iron Ore Fines during Maritime Transportation (部分飽和条件下における船積み鉄鉱粉の液状化ポテンシャルの評価) と題した英文の論文である。

鉄鉱粉は鉄製品の原料として日本にも大量に輸入されているが、2009年には鉄鉱粉を輸送中の船舶2隻が転覆する事故が発生した。この原因として船積み鉄鉱粉の液状化が考えられたため、国際海事機関は2010年から2013年にかけて調査を実施し、積み込み時の含水比管理等についての基準の見直しを行った。しかしながら、積み込み後の鉄鉱粉が長期間に及ぶ海上輸送過程においてどのような含水状態の変化を示し、さらに荒天で船が大きく動揺した際にどのような挙動を示すかは十分には明らかになっていない。

以上の背景のもとで、本研究では、鉄鉱粉の上記挙動に関わる地盤工学的な特性として保水性・透水性・液状化特性に着目した検討を実施している。これらの特性を高精度な室内土質試験で計測したうえで、その結果を反映させた浸透解析と動的応答解析を行い、船積み鉄鉱粉の液状化ポテンシャルを評価している。

第一章では、研究の背景と既往の検討状況を整理して記述したうえで本研究の目的を設定している。

第二章では、保水性と液状化特性の計測に用いた試験装置の詳細を記述している。

第三章では、試験に用いた材料として2種類の鉄鉱粉と、これらとの比較用に用いた計4種類の地盤材料について、粒度・比重等の物理特性の計測結果と、電子顕微鏡を用いた構成粒子の観察結果を記述している。鉄鉱粉は粒子自体が微細な空隙構造を有している点が一般の地盤材料とは異なる点を明らかにしている。

第四章では、保水性と透水性の計測結果を記述している。保水性試験では、間隙空気圧と間隙水圧の差として定義されるサクションが増加するほど水分含有量が低下する特性が、数kPa以上のサクションの範囲では鉄鉱粉の初期間隙比の違いによらずほぼ同様な傾向を示すことを見出している。また、間隙水圧の測定に多孔質の薄膜を用いた試験方法を適用することで、セラミック材料を用いる従来の方法と比較して飛躍的に試験時間を短縮できることを示している。さらに、透水試験では、不飽和状態での鉄鉱粉の透水係数が、飽和状態と比較して約1/100に低下することを明らかにしている。

第五章では、三軸試験装置を用いた液状化特性の計測結果を、圧密膨潤試験・非排水単調載荷試験等の関連試験結果と合わせて記述している。不飽和状態での鉄鉱粉の液状化強度は飽和状態よりも増加するが、その増加傾向は従来の研究で細粒分の少ない細砂について得られていた傾向とは異なることを見出し、不飽和状態での液状化中の間隙空気圧の増加に起因する体積圧縮特性と有効応力の低下に起因する体積膨張特性を同時に考慮することで、一般的な地盤材料も含めた不飽和状態での液状化強度の増加率を統一的に解釈できることを明らかにしている。また、鉄鉱粉の密度を高めることで液状化強度が著しく増加し、非排水単調載荷時の挙動も大きく改善されることを見出している。さらに、不飽和状態で三軸液状化試験を実施する際には、平均主応力が一定となるように軸応力と同時にセル圧力も制御して、三軸伸張側での破壊が先行しないようにする必要があることを示している。

第六章では、台形形状に船積みされた鉄鉱粉を対象とした浸透解析の結果を記述している。保水性と透水性は第四章で記述した試験結果に基づいて設定し、積み込み時の含水状態と間隙比が異なる条件下において、長期輸送中の含水状態がどのように変化し、積荷の下部に飽和領域がどのように出現するかを明らかにしている。

第七章では、台形形状に船積みされた鉄鉱粉が長期輸送後の荒天時に船舶のロッキング挙動に起因する繰返し荷重を受ける場合を想定した動的解析結果を記述している。第五章で記述した飽和・不飽和状態での液状化試験結果と第六章で記述した浸透解析結果に基づいて積荷内での液状化強度特性の分布を設定し、最大30度までの繰返し傾斜荷重を受けた場合の過剰間隙水圧等の発生状況を明らかにしている。その結果として、上部に残る不飽和領域の透水性と液状化特性を適切に考慮しないと、荒天時の液状化ポテンシャルを危険側に評価してしまう可能性があることを示している。

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、鉄鉱粉の保水性・透水性・液状化特性を系統的な室内土質試験により明らかにするとともに、これらの試験結果を用いた数値解析を実施することにより、船積み鉄鉱粉の長期輸送過程における含水状態の変化挙動と荒天時の液状化ポテンシャルの評価が可能であることを示している。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。