

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630219

研究課題名(和文) 船積み鉄鉱粉の液状化メカニズムと発生条件に関する地盤工学的研究

研究課題名(英文) Geotechnical study on liquefaction mechanism of iron ore fines heap and its triggering condition

研究代表者

古関 潤一 (Koseki, Junichi)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30272511

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：粒径数mm未満の鉄鉱粉(粉鉱石サイズの鉄鉱石)の船舶貨物輸送中に生じる液状化現象を対象として、その詳細なメカニズムと発生条件を解明するために、地盤工学的な手法を用いた研究を行った。まず、鉄鉱粉の室内試験を系統的に実施し、水分の保持・移動特性と液状化特性を明らかにするとともに、一般的な地盤材料の特性との比較を行った。次に、これらの結果を反映させた数値解析を実施し、輸送中の水分分布の変化特性と船体動揺時の応答特性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In order to study the liquefaction mechanism of iron ore fines heap during maritime transportation and to reveal its triggering condition, investigations were executed from a geotechnical point of view. First, a series of laboratory tests were conducted on iron ore fines to evaluate their water retention properties and liquefaction characteristics. Second, based on the laboratory test results, numerical analyses were made on the change of the water content distribution of the iron ore fines heap during maritime transportation and its response under severe rocking motions of the vessel.

研究分野：地盤工学

キーワード：液状化 鉄鉱粉 地盤工学 船舶工学 海上安全

1. 研究開始当初の背景

(1) 多様な分野で活用されている各種鉄鋼の材料となる鉄鉱石を、日本は毎年1億トン以上輸入している。鉄鉱石の安定的な供給を維持するうえで、鉄鉱山から積み出し港までの陸上輸送過程に加えて、その後の海上輸送過程までも含めた安全性を確保することが重要な課題となっている。

(2) 海上輸送時の事故例として、2009年にはインドの港で鉄鉱石を積載した2隻の貨物船が転覆、沈没した。この原因として、積荷の鉄鉱粉が液状化したことが考えられている。しかし、積荷条件等の詳細な状況が不明であるために、どのようにして液状化が生じたのか、また、液状化の発生が船体の安定性にどのような影響を及ぼしたのか等のメカニズムは明らかになっていない。

(3) 鉄鉱石はその粒径により塊鉱石、粉鉱石、微粉鉱石に分類され、鉱山でペレットに加工される微粉鉱石以外はそのまま出荷される。これらは、国際海事機関(IMO)が定める国際海上固体ばら積み貨物規則(IMSBCコード)で「液状化の可能性のある貨物」として分類され、船積時の含水量が運送許容水分値(TML)を超えないようにすることが求められている。しかし、このTMLは船積時の条件を規定するものであり、その後の輸送中の水分分布の変化の影響を考慮せずに設定している点において、危険側の評価となっている可能性がある。また、船体動揺時に積荷全体がどのように応答するかも不明であるため、これらの特性を反映した積荷管理手法も確立されていない。

(4) 一方で、土質力学と地盤工学の分野では、地震時の砂地盤の液状化対策として、不飽和化工法および地下水位低下工法に関する研究が近年活発に行われている。その一環として、不飽和砂質土の三軸液状化試験が実施され、土の飽和度と粒度が液状化特性に及ぼす影響が明らかになってきている。

2. 研究の目的

(1) 鉄鉱粉の室内試験を系統的に実施し、水分の保持・移動特性と液状化特性を明らかにする。

(2) これらの結果を反映させた数値解析を実施し、輸送中の水分分布の変化特性と船体動揺時の応答特性を明らかにする。

(3) 以上の成果に基づいて実挙動の逆解析と管理手法に関する試算を行い、船体の安定性を保持できる合理的な積荷管理手法を提案する。

3. 研究の方法

(1) 船積みした後の輸送中での長期的な乾

燥・湿潤過程を想定して、比較的低いサクシジョンレベルにおける水分特性曲線を計測する。

(2) 鉄鉱粉の非排水繰返し三軸試験を実施して、異なるサクシジョンレベルにおける不飽和状態での液状化強度特性を、飽和状態での特性と比較する。

(3) 日本への鉄鉱粉輸送に使用される輸送船規模を想定したうえで、その積荷としての鉄鉱粉をモデル化し、(1)で計測した水分の保持・移動特性を考慮した不飽和浸透解析を実施する。長期間の海上郵送中に積荷内の水分分布がどのように変化するかを評価する。

(4) 海上郵送中に積荷内の水分分布が変化した状態で、荒天等による過大な船体動揺が生じた場合を想定し、既存の地震時応答解析手法を拡張して適用することにより、積荷がどのように応答するかを評価する。

(5) さまざまな密度および拘束圧下での飽和した鉄鉱粉の非排水三軸圧縮試験を系統的に実施して、単調載荷で定常状態に至って大変形が生じる条件を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 100kPa以下の比較的低いサクシジョンレベルにおいて計測した鉄鉱粉の乾燥過程における水分特性曲線を図1に示す。セラミックディスクを用いた従来法による結果と、多孔質膜を用いた試験装置を新たに開発して用いた結果を合わせて示したが、1kPa以上のサクシジョンレベルでは、両者の結果はほぼ一致していることがわかる。従来法では計測に数か月単位の多大な時間を要するが、新たに開発した試験法では試験時間を大幅に短縮することが可能となった。また、1kPa以下の計測結果に相違が見られる理由として、従来法による計測結果がまだ最終値に至っていないことが考えられる。さらに、図1中には異なる初期空隙比で準備した複数の試験体の結果も示したが、重量含水比を縦軸にとって整理した水分特性曲線は、数kPa以上のサクシジョンレベルでは初期空隙比にあまり依存しないこともわかった。

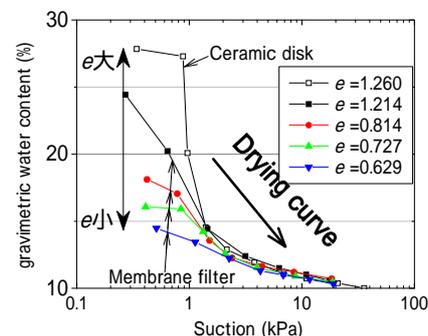


図1 試験法と初期空隙比の違いが鉄鉱粉の乾燥過程での水分特性曲線に及ぼす影響

(2)

異なる密度（締固め度 D_c ）で実施した飽和状態にある鉄鉱粉の三軸液状化強度曲線を図 2 に示す。密度が高まるほど、液状化強度が増加しており、一般的な地盤材料と同様な傾向が得られた。

同一の密度で飽和状態と不飽和状態にある鉄鉱粉の三軸液状化強度曲線の比較を図 3 に示す。不飽和状態のほうが液状化強度が高まる傾向が得られ、これも一般的な地盤材料と同様であった。

飽和状態に対する不飽和状態での液状化強度の増加率（LRR）を統一的に整理した結果を図 4 に示す。図の横軸の指標 R_v は、液状化に伴って有効拘束圧が初期値の 10%まで低下する際の「膨潤挙動に起因する体積ひずみ」で、「不飽和状態にある鉄鉱粉の間隙空気が圧縮されることに起因する体積ひずみ」を正規化した指標で、本研究において新たに導入したものである。図 4 中には一般的な地盤材料として豊浦砂と稲城砂を用いた場合の三軸液状化試験結果も合わせて示したが、この指標 R_v を用いることによって、不飽和状態における液状化強度の増加率との関係として、材料の種類や初期密度によらずほぼ一意的な関係が得られることがわかる。

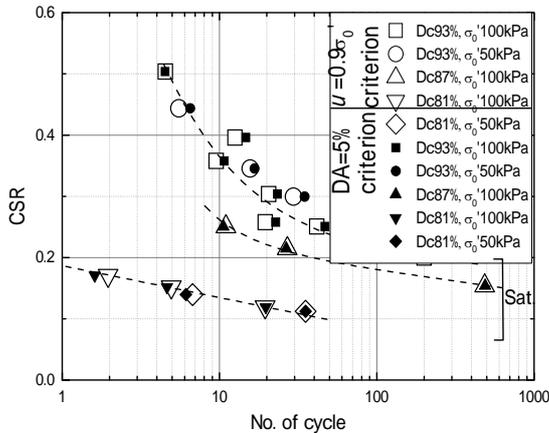


図 2 異なる締固め度 D_c で実施した飽和状態にある鉄鉱粉の三軸液状化強度曲線

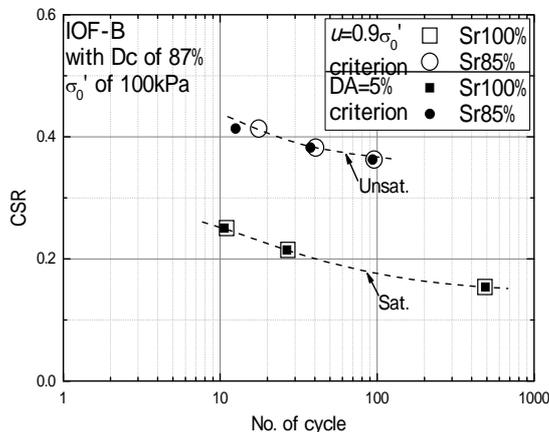


図 3 同一の密度で飽和状態と不飽和状態にある鉄鉱粉の三軸液状化強度曲線の比較

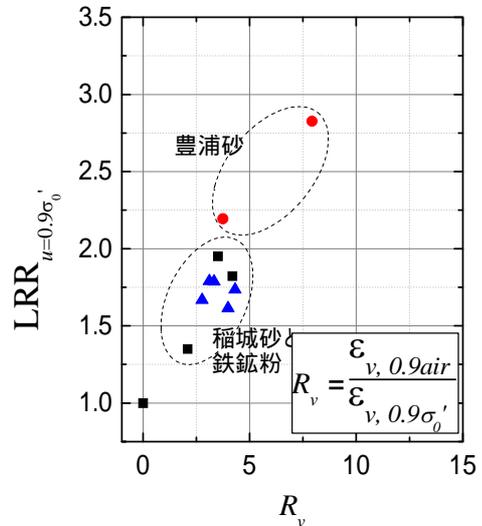


図 4 不飽和状態にある鉄鉱粉・豊浦砂・稲城砂の三軸液状化強度曲線の飽和状態からの増加率 LRR と指標 R_v の関係

(3) 前述した水分特性曲線の計測結果を用いて図 5 に示す積荷状態に対する不飽和浸透解析を行い、400 時間以上を経過してほぼ定常状態となった際に積荷底部に出現する飽和領域の高さ H を算定した結果を図 6 に示す。図 6 の横軸は飽和度 S_r の初期値であるが、この値が 60%を上回ると、 H が徐々に増加して液状化危険度が高まる傾向が得られた。

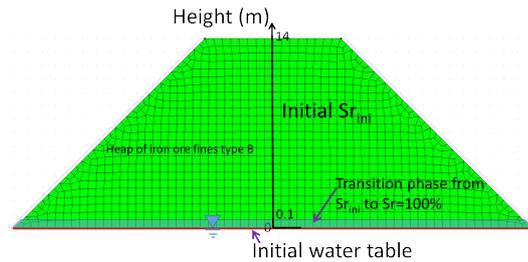


図 5 不飽和浸透解析に用いた鉄鉱粉の実規模積荷モデル

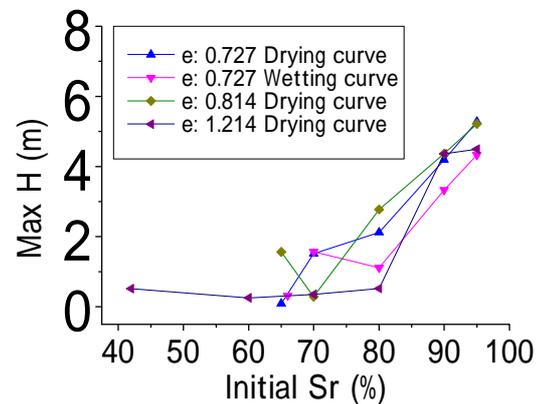


図 6 定常状態における飽和領域の高さ H と飽和度 S_r の初期値の関係

(4) 前述した不飽和浸透解析結果に基づいて積荷内の水分分布が変化した状態を想定し、荒天等による過大な船体動揺が生じた場

合の挙動を、既存の地震時応答解析手法を拡張して計算した結果の例を図7に示す。この例では、ローリング傾斜角 30 度の動揺を 17 回与えることで積荷の天端が約 2m 沈下し、積荷内の平均骨格応力減少比（過剰間隙水圧比）は、積荷の天端からのり面にかけて大きくなり、不飽和領域においても液状化に近い現象が生じ得ることがわかった。一方で、傾斜角が 20 度の場合には、100 回の動揺を与えても沈下はわずかであり、積荷が大きく変形するうえでは限界となるローリング条件があることもわかった。

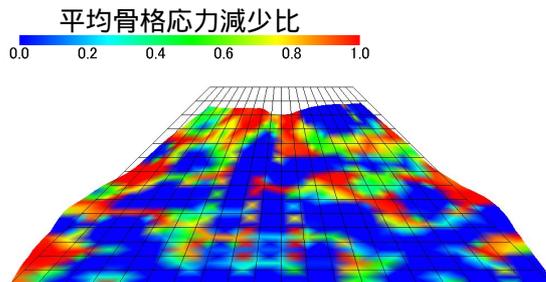


図7 飽和領域の高さが 2m で傾斜角 30 度の動揺を 17 回与えた場合の解析結果の例

(5) さまざまな密度および拘束圧下での飽和した鉄鉱粉の非排水三軸圧縮試験を系統的に実施して、同様な粒度分布を有するが通常の地盤材料である珪砂の試験結果と比較した結果を図8に示す。同一の間隙比で比較した場合には鉄鉱粉は珪砂よりも小さい拘束圧で定常状態に至ることを明らかにした。さらに、このような定常状態が生じる密度・応力条件と、船積み状態での初期密度・応力状態を比較することで、流動的な大変形が生じる可能性の有無を評価できることを示した。また、試験前後の鉄鉱粉試料の粒度分析結果を比較することにより、高い拘束圧で試験を行った場合ほど著しい粒子破砕が生じており、前述した力学挙動に影響を及ぼしていることがわかった。

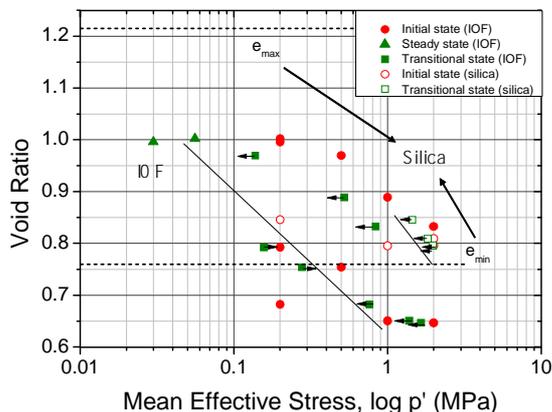


図8 非排水三軸圧縮試験による鉄鉱粉 (IOF) と珪砂 (Silica) の限界状態線 (図中の実線) の比較

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

古閑潤一, 王海龍, 佐藤剛司, 宮下千花: 飽和・不飽和状態にある鉄鉱粉と砂質土の繰返し三軸試験, 生産研究, 66(6), 569-572, 2014.11

〔学会発表〕(計 5 件)

Wang, H., Koseki, J., Sato, T. and Tan Tian, J.: Experimental evaluation of liquefaction resistance of unsaturated sandy soils, Deformation Characteristics of Geomaterials, Buenos Aires (Argentina), 2015 年 11 月 18 日

Wang, H., Koseki, J., Sato, T. and Miyashita, Y.: Geotechnical properties of a type of iron ore fines, Proc. of 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 福岡国際会議場 (福岡県福岡市), 2015 年 11 月 9 日

Wang, H., Koseki, J. and Miyashita, Y.: A new index to evaluate liquefaction resistance of partially saturated sandy soils, 第 50 回地盤工学研究発表会, 北海道科学大学 (北海道札幌市), 2015 年 9 月 3 日

松丸貴樹, 古閑潤一, 王海龍: 船積み鉄鉱石の液状化に関する不飽和浸透 - 変形連成解析, 第 50 回地盤工学研究発表会, 北海道科学大学 (北海道札幌市), 2015 年 9 月 3 日

Wang, H., Koseki, J. and Nishimura, T.: SWCC measurement of two types of iron ores, Proc. of the 6th International Conference on unsaturated soils, Sydney (Australia), 2014 年 7 月 2 日 ~ 4 日

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:

国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6．研究組織

(1)研究代表者

古関 潤一 (KOSEKI, Junichi)
東京大学・工学系研究科・教授
研究者番号：30272511

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

蔡 飛 (CAI, Fei)
群馬大学・理工学研究員・助教
研究者番号：20312902

宮下 千花 (MIYASHITA, Yukika)
東京大学・生産技術研究所・技術職員
研究者番号： 20396914