

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 8月 23日現在

機関番号：13901  
 研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2011 ～ 2012  
 課題番号：23760443  
 研究課題名（和文）再液化現象の諸特性の実験的把握と骨格構造概念に基づくその数値的再現  
 研究課題名（英文）Experimental understanding of some properties of reliquefaction and numerical reproduce of it based on skeleton structure concept  
 研究代表者  
 山田 正太郎（YAMADA SHOTARO）  
 名古屋大学・工学研究科・准教授  
 研究者番号：70346815

## 研究成果の概要（和文）：

三軸試験装置と中空ねじりせん断試験装置を用いた系統的な実験によって、液化化中に誘導異方性が目まぐるしく変化していることを示した。また、液化化終了時に異方性が発達した状態にあると、再液化化抵抗が著しく低くなることを示した。さらに、粒子形状が丸みを帯びた試料では、異方性の変動が生じやすいために、再液化化抵抗が低い状態にある可能性が高くなることを示した。実験結果を参考に、SYS Cam-clay model に超弾性構成式を適用すると共に、過圧密の解消速度を平均有効応力に依存させることでサイクリックモビリティの定性的記述に成功した。

## 研究成果の概要（英文）：

The following results were obtained by means of systematic triaxial shear tests and hollow cylindrical torsional shear tests. (1) Continuous and orderly changes in anisotropy are repeated with dizzying rapidity during liquefaction. (2) The higher the level of developed anisotropy at the end of liquefaction, the lower the reliquefaction resistance. (3) The sands that have round shape are easy to liquefy because their anisotropy is easy to develop.

Based on experimental results, qualitative description of cyclic mobility succeeded by means of adaptation of hyper elastic constitutive model to SYS Cam-clay model and giving a new evolution law of overconsolidation that depends on mean effective stress.

## 交付決定額

(金額単位：円)

|       | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|-------|-----------|---------|-----------|
| 交付決定額 | 3,300,000 | 990,000 | 4,290,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：液化化，再液化化，骨格構造，誘導異方性，粒度，粒子形状，弾塑性力学

## 1. 研究開始当初の背景

一度液化化が生じると、その後排水を伴って地盤は密になるため、液化化前よりも液化化しにくくなるはずである。このような密度にだけ着目した単純な論理に対し、Finn et al. (1970)は液化化履歴を受けることで、液化化前よりもかえって液化化しやすくなる場合があることを実験的に示した。この研究を皮切りに再液化化に関する数々の研究がな

されてきたが、近年に至るまでなぜ液化化抵抗が減少し得るのか、明確な結論が得られていなかった。

このような状況の中で、研究代表者は、三軸試験装置を用いた繰返し非排水せん断試験によって、液化化および再液化化現象によって、誘導異方性が重要な役割を果たすことを示す実験データを得ていた。本研究では、この実験成果をより補強する実験データを

得るとともに、再液化現象の諸特性について把握することを狙うこととした。

また、近年において、土骨格の弾塑性構成式に目覚ましい発展があった。それは、練返し正規圧密土の弾塑性力学挙動を記述するCam-clay modelに骨格構造概念を取り入れることによって達成された(Asaoka et al., 2002)。しかし、その構成式をもってしても、液化時のサイクリックモビリティの記述は困難な状況にあった。本研究では、実験的研究で得られた知見を基に、サイクリックモビリティの記述を試みることにした。

## 2. 研究の目的

本研究課題は実験的研究と数値解析的研究で構成される。それぞれに対する目的を以下に示す。

### (1) 実験的研究の目的

- ・ 液化履歴に伴う液化抵抗の増減メカニズムを誘導異方性に着目して明らかにする
- ・ 再液化しやすい試料の物理的特徴を見極めると共に、試料によって再液化のし易さが異なる理由を上記メカニズムを踏まえて明らかにする

### (2) 解析的研究の目的

- ・ 実験結果に基づいて、液化中に生じる誘導異方性の変動が合理的に表現できる弾塑性構成式を構築する

## 3. 研究の方法

実験的研究と数値的研究のそれぞれに対して、以下のような研究方法をとった。

### (1) 実験的研究

#### ① 液化履歴を受けた硅砂の単調および繰返し非排水せん断試験

三軸試験装置を用いて硅砂に液化履歴を与えた上で、単調および繰返し非排水せん断を行った。液化試験の停止位置を変化させることで、液化中に生じる異方性の変動の様子と、液化終了時の異方性の発達状態が再液化抵抗に与える影響について示した。この成果をより一般的なものとするために、中空ねじり試験装置を用いて、初期異方性の発達方向と主応力方向の関係が液化抵抗に与える影響についても調べた。

#### ② 種々の試料を用いた再液化実験

数種類の試料を用意して、再液化のしやすさを比較した。特に、粒度と粒子形状を影響因子として取り上げ、どのような特徴を持った砂質土が再液化を引き起こしやすいか系統的な実験によって見極めた。各試料の異方性の発達のしやすさが、再液化のしやすさを左右することを予想し、再液化の観点から、実際に液化しやすい土とはどのような土であるか考察することを試みた。

### (2) 数値的研究

## ① SYS Cam-clay model における異方性の合理的な発展則の考案

実験結果を元に、液化中に生じる異方性の変動が適切に表現できる弾塑性構成式の構築を目指した。これは、骨格構造(構造・過圧密・異方性)の変化を記述可能な弾塑性構成式SYS Cam-clay modelの異方性の発展則を見直すという方法で成し遂げることを目指した。また、実験結果では、除荷時に等方線形弾性体では表現が難しい挙動が現れるため、超弾性体の適用などによってサイクリックモビリティの記述の再現性を試みた。

## 4. 研究成果

以下に本研究で得られた主要な成果について記述する。

### (1) 液化履歴に伴う液化抵抗の増減メカニズムの解明

三軸試験装置およびを用いた繰返し非排水せん断試験および単調非排水せん断試験により、液化中の誘導異方性の変動の様子と液化終了時の異方性の発達状態が再液化挙動に与える影響について調べた。また、中空ねじり試験装置を用いて、より一般的な応力状態において誘導異方性が液化抵抗に与える影響について調べた。その結果、以下のような結論を得た。

#### ① 液化履歴がその後の応力誘導異方性の発達程度に及ぼす影響

液化中は異方性が連続的かつ規則的な変化をめまぐるしく繰り返す。このため、液化終了時点では異方性は様々な発達状態にあり、しかもその異方性は排水後も消えずに残る。(図 1, 2)

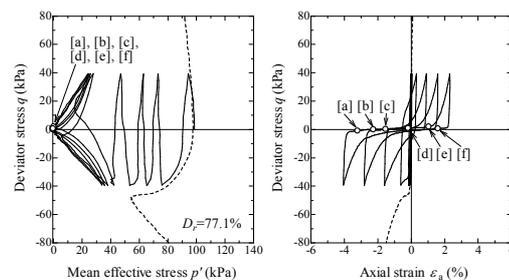


図 1 豊浦砂の液化挙動と液化試験の停止位置

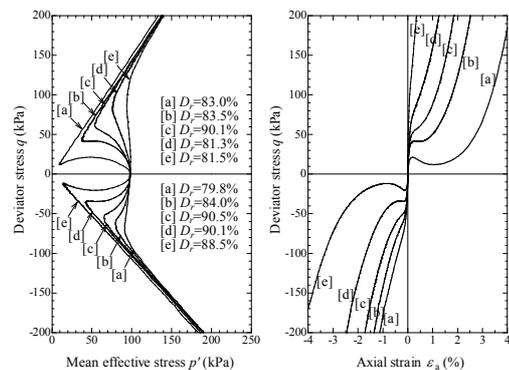


図2 液状化履歴を受けた豊浦砂の単調せん断挙動

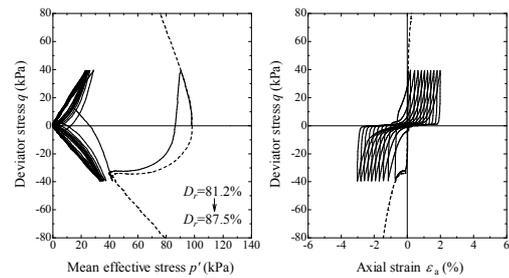
② 液状化中に発達した異方性が再液状化挙動に与える影響

異方性が発達しているほど、ある方向にせん断した際によりゆるい砂に似た挙動を示すため、液状化しやすい。

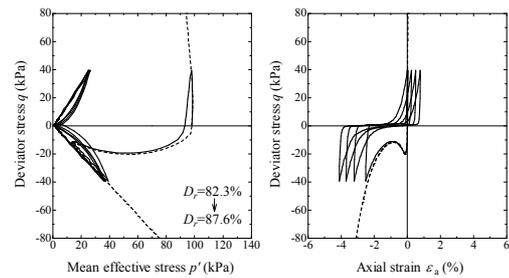
液状化履歴を受けることで液状化前よりも異方性が顕著に発達する場合には、密度が増加しているにもかかわらずあるせん断方向では極端にゆるい砂に似た挙動を示すようになるため、液状化抵抗は著しく低くなる。逆に、液状化履歴を受けることで液状化前よりも異方性が顕著に低位化する場合には、いずれの方向にせん断しても非常にゆるい砂に似た挙動を示さなくなるため、液状化後の排水時に生じる密度増加だけでは説明がつかないほどに液状化抵抗は高くなる。(図3)

③ 一般応力状態において、異方性が液状化抵抗に与える影響

異方性の主軸と応力の主軸が一致しないような状況においても上記のことは成り立つ。初期異方性に対しては、堆積面内に最大主応力軸が存在するような方向にせん断された際に過剰水圧が大きく上昇する。(図4)

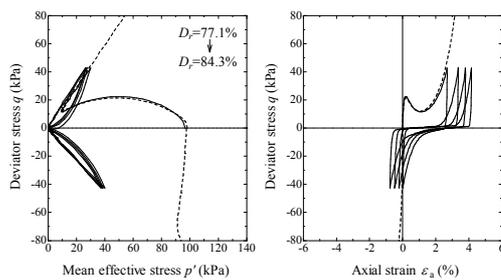


(d) 図1の[d]で液状化試験を停止した場合

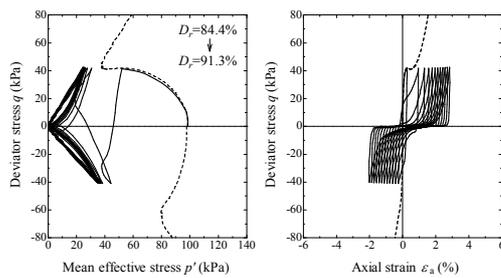


(e) 図1の[e]で液状化試験を停止した場合

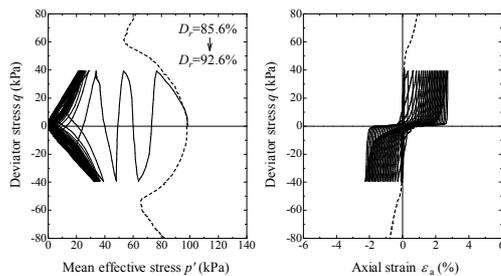
図3 豊浦砂の再液状化挙動



(a) 図1の[a]で液状化試験を停止した場合



(b) 図1の[b]で液状化試験を停止した場合



(c) 図1の[c]で液状化試験を停止した場合

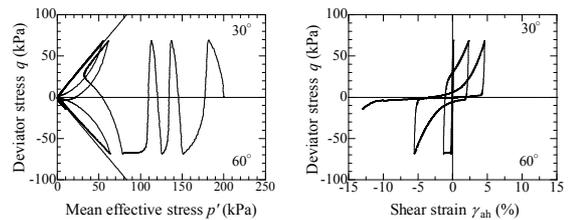


図4 主応力方向が液状化挙動に与える影響

(2) 再液状化現象の諸特性の把握

種類の異なる砂質土を用いて、液状化実験および再液状化実験を行うことにより、試料によって再液状化のし易さに差異が現れることを示した。また、そのような差異が、試料の物理的特徴および力学的特徴とどのように関係づけられるか実験的に調べた。その結果、以下のような結論を得た。

① 密度の違いが液状化および再液状化挙動に与える影響

液状化履歴を受けた際、初期にゆるい砂では、液状化後の排水に伴って密度が増す影響が素直に現れて、液状化抵抗は増す傾向にある。一方で、初期に密な砂では、液状化履歴に伴い異方性が高位に発達する影響が密度が増す影響に勝って液状化抵抗が低くなる現象が容易に生じうる。

このため、液状化履歴を受けていない場合、ゆるい状態にあるほど液状化抵抗が低いのに対し、液状化履歴を受けた場合は、ゆるい

状態にあるほど液状化抵抗が低くなるとは限らない。

液状化抵抗にとっては、異方性が密度をも凌ぎ得る重要な因子であるのに対し、液状化中の変形にとっては密度がより重要な因子である。

液状化抵抗の低下現象は液状化履歴を受ける前の状態において液状化抵抗が高く、液状化後の排水量の少ない密な砂で生じやすい現象であると言える。

② 粒度組成および粒子形状の違いが再液状化挙動に与える影響

同じ砂質土でも、異方性の発達しやすい試料としにくい試料があり (図 1,2 と図 5,6 の比較)、異方性の発達しやすい試料では、液状化終了時の異方性の発達状態に応じて液状化抵抗が著しく増減するのに対し、異方性の発達しにくい試料では液状化抵抗の多少の増減はあるもののさほど変化しない。このため、液状化のしやすさに大きな違いがなくとも、再液状化のしやすさには大きな違いが生じる。(図 7)

異方性の発達しやすい試料では、著しく低い再液状化抵抗を示し得るのに対し、異方性の発達しにくい試料では、著しく低い再液状化抵抗を示し得ない。

異方性の発達のしやすさにとっては粒度よりも粒子形状の影響が支配的であり、意外にも角がある試料よりも、角がない試料の方が異方性が高位に発達する。このことから、角がない試料では、液状化履歴を受けることで液状化抵抗が激しく増減する。

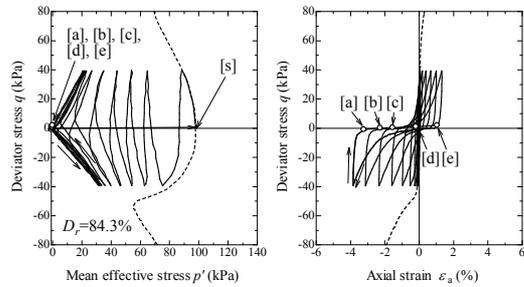


図 5 筑紫沖積砂の液状化挙動

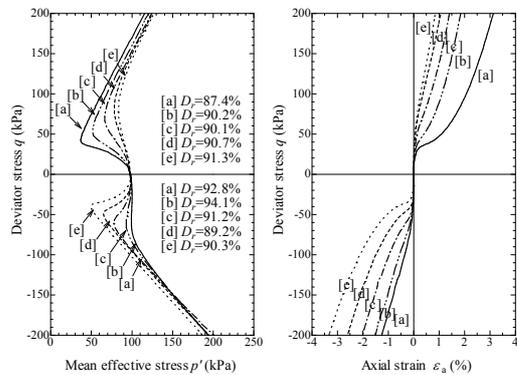
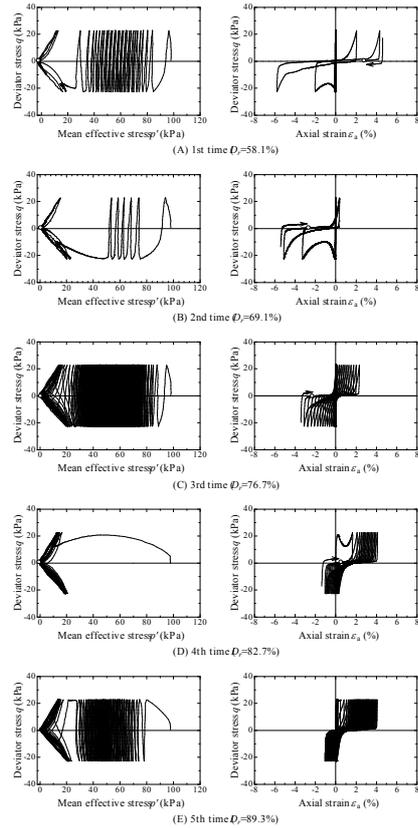
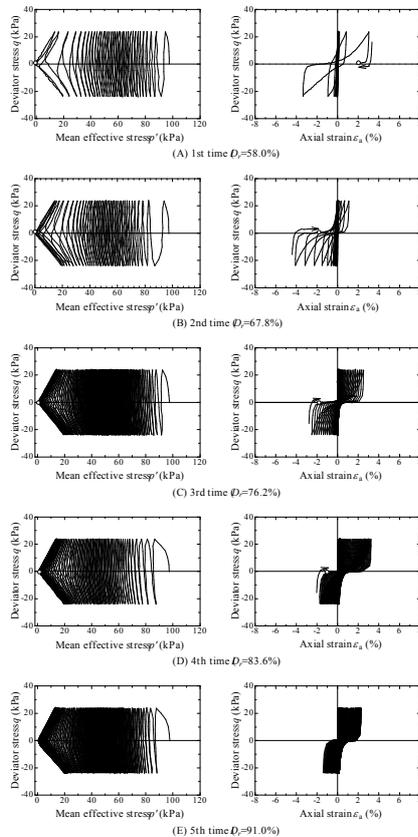


図 6 液状化履歴を受けた筑紫沖積砂の単調せん断挙動



(a) 豊浦砂



(b) 筑紫沖積砂

図 7 再液状化実験

(3) 弾塑性構成式によるサイクリックモビリティの記述

骨格構造概念の働きを記述する弾塑性構成式 SYS Cam-clay model を改良することによりサイクリックモビリティ挙動を概ね再現できるようにした (図 8)。改良のポイントの第一点は超弾性構成式の適用にある。実験において繰返し非排水せん断の除荷時に平均有効応力の減少を伴うことに着目し、そのような性質を持った超弾性構成式の適用を図った。その結果、サイクリックモビリティを描いている最中に有効応力パスが応力空間の原点に近づく挙動を再現することができた。また、応力空間の原点付近に応力状態があるときに、剛性が著しく低下することから、このような状態では過圧密の解消が遅くなるように過圧密の発展則を与えた。また、このような改良によって、原点付近で塑性変形が生じるようになり、同状態において構造の劣化と異方性の変動が生じやすくなった。これらのことがメカニズムとなって、サイクリックモビリティ中にひずみが徐々に進展してゆく挙動が再現できるようになった。定量的な再現にはさらなる改良が必要ではあるが、サイクリックモビリティの定性的記述ができるようになった。

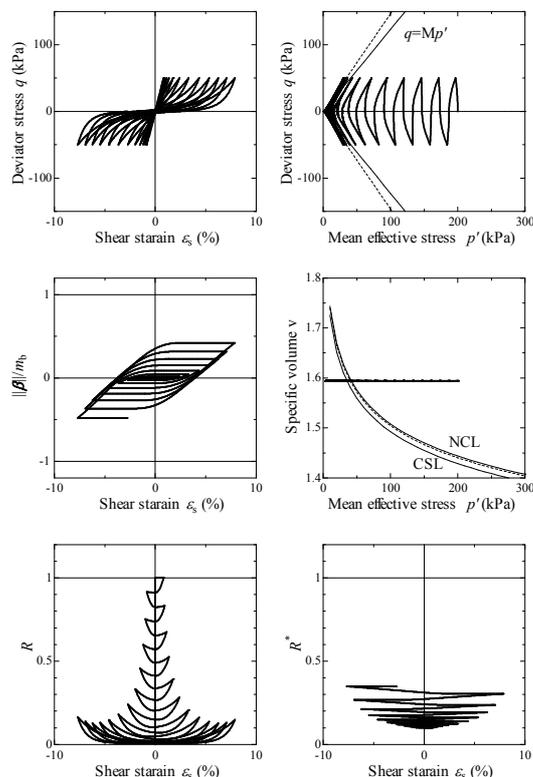


図 8 改良した弾塑性構成式によるサイクリックモビリティの記述

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 0 件)

[学会発表] (計 5 件)

[学会発表] (計 5 件)

(1) 村上孝弥, 中井健太郎, 中野正樹, 野田利弘, 山田正太郎, 浅岡 顕: 厚く堆積した浦安市沖積粘性土層における深度方向の物理・力学特性の違い, 第 48 回地盤工学研究発表会, 2013. 7. 23-25, 富山国際会議場.

(2) 岡田麻希, 山田正太郎, 中野正樹, 野田利弘, 中空ねじりせん断試験結果に与える供試体寸法の影響, 第 48 回地盤工学研究発表会, 2013. 7. 23-25, 富山国際会議場.

(3) 中井健太郎, 中野正樹, 野田利弘, 山田正太郎, 村上孝弥, 浅岡 顕: 浦安市の地盤から採取された沖積粘性土の力学特性の把握, 第 47 回地盤工学研究発表会, 2012. 7. 14-16, 八戸工業大学.

(4) 岡田麻希, 山田正太郎, 野田利弘, 中野正樹, 中空ねじりせん断試験装置を用いた砂の液状化に及ぼす初期異方性の影響に関する基礎的研究, 第 24 回 中部地盤工学シンポジウム, 2012. 8. 7, 名城大学.

(5) Yamada, S., Takamori, T. and Sato, K., Effects of ease of development of anisotropy on reliquefaction resistance, 14th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2011. 5. 23-27, Hong Kong Poly University, Hong Kong, China.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田正太郎 (YAMADA SHOTARO)

名古屋大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 70346815

(2)研究分担者  
研究分担者なし

(3)連携研究者  
連携研究者なし

(4)研究協力者  
中野正樹 (NAKANO MASAKI)  
名古屋大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：00252263

野田利弘 (NODA TOSHIHIRO)  
名古屋大学・減災連携研究センター・教授  
研究者番号：80262872