

平成 22 年 5 月 21 日現在

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20760317
 研究課題名 (和文) 破砕性砂および粒度の異なる非破砕性砂が示す弾塑性挙動の統一的記述
 研究課題名 (英文) Unified description of elasto-plastic behaviors of crushable and uncrushable soils with different grain size
 研究代表者
 山田 正太郎 (YAMADA SHOTARO)
 福岡大学・工学部・助教
 研究者番号：70346815

研究成果の概要 (和文) : 土を連続体として近似するマクロな立場から、破砕性材料および粒度の異なる非破砕性材料の弾塑性力学挙動について研究を行った。はじめに、系統的な実験から粒子破砕が生じることで、限界状態線が低下することや、顕著な塑性変形が生じることを明らかにした。続いて、これらの実験結果をもとに、粒子破砕の影響を考慮することができる弾塑性構成式を開発し、その適用性の高さを示した。

研究成果の概要 (英文) : The study on elasto-plastic behaviors of crushable and uncrushable soils with different grain size from the standpoint of continuum mechanics was conducted. Firstly, systematic experimental studies revealed that particle crushing induces decrease of the critical state line and remarkable plastic deformation. Additionally, elasto-plastic constitutive model was developed based on the experimental results, and applicability of the model was demonstrated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2009 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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：土質力学

1. 研究開始当初の背景

粒子破砕に関する既往の研究は、そのほとんどが粒子個々の破砕に着目するミクロな視点で行われたもの(例えば McDowell, et al. (1998))で、これらミクロな視点に立った実験の成果は個別要素法などに利用されてきた(例えば Cheng, et al. (2003))。一方で、

Asaoka, et al.(2002)はカムクレイモデルをベースに骨格構造(構造・過圧密・異方性)の働きを記述可能な弾塑性構成式(上・下負荷面カムクレイモデル; SYS Cam-clay model)を開発し、自然堆積した粘土から砂までのあらゆる土の弾塑性挙動を統一的に記述することに成功している。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ、本研究では、現象が例えミクロであっても、あくまでも土を連続体として近似するマクロな視点で破碎性材料の実験を行い、粒子破碎の影響を考慮した弾塑性構成式を開発することを目指した。また、一般の砂の力学挙動が、非常に粒子破碎が生じにくい土として、同一の構成式で统一的に再現されることを目指した。

3. 研究の方法

上記の研究目的を達成するために、「A. 室内実験」と「B. 構成式の開発およびシミュレーション」を行った。それぞれの研究を進める上で、具体的に以下のような方法をとった。

A. 室内要素実験（三軸試験および一次元圧縮試験）

A-1 砂の力学挙動に与える粒子破碎の影響の把握

A-2 非破碎性砂の力学挙動に与える粒度分布の影響の把握

B. 構成式の開発およびシミュレーション

B-1 破碎性を考慮した構成式の開発

B-2 破碎性材料の力学挙動のシミュレーション

B-3 粒度の異なる非破碎性材料の力学挙動のシミュレーション

4. 研究成果

(1) 破碎性材料および非破碎性材料の限界状態

図-1 は非破碎性材料として位置づけられる豊浦砂の非排水せん断挙動を表している。異なる拘束圧において、すべての実験で密度が等しくなるように供試体を作製した上で、非排水せん断を行った。その結果、限界状態では、同一のせん断応力を示していることが図-1 から分かる。この実験結果は、非破碎性材料に限界状態が存在することの一つの証明となっている。

この実験事実を踏まえて、破碎性材料にも限界状態が存在し得るか調べた。破碎性材料として、スラグおよび沖縄砂を用いて実験を行った。沖縄砂は、珊瑚類、貝殻などを多く含んでおり粒子破碎を生じやすいため、天然の破碎性材料として用いた。一方、スラグは人工的な材料であるが、粒子がガラス質であり、容易に粒子破碎するので、模擬的な破碎性材料として用いた。図-2 と 3 は、それぞれスラグと沖縄砂に対して行った図-1 に対応する実験である。いずれの結果においても、最終的に同

じ軸差応力を示していることから、破碎性材料にも限界状態が存在することが分かった。

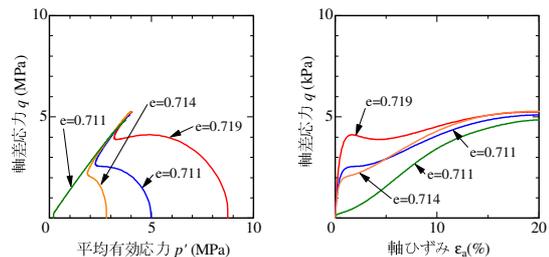


図-1 非排水せん断試験結果（豊浦砂）

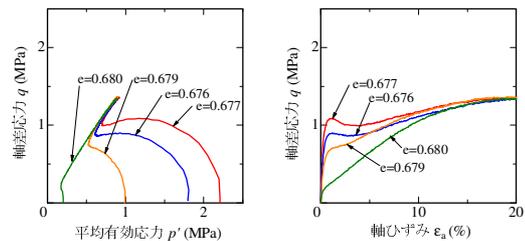


図-2 非排水せん断試験結果（スラグ）

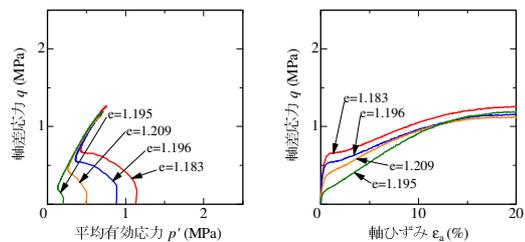
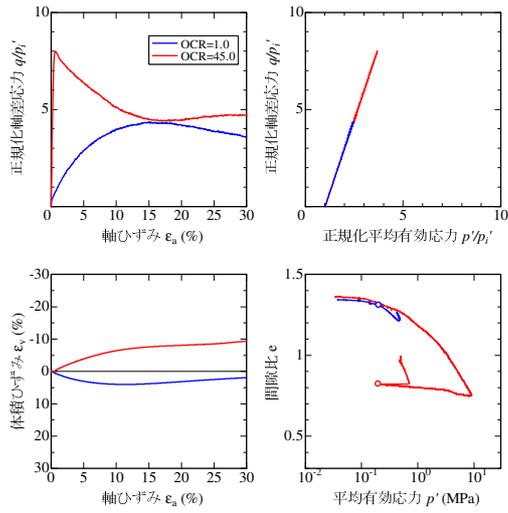


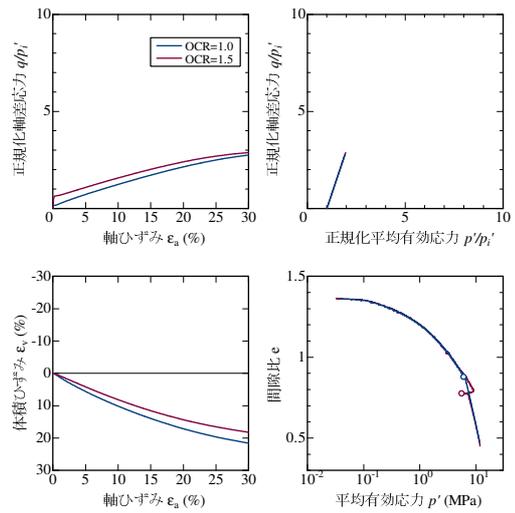
図-3 非排水せん断試験結果（沖縄砂）

(2) 破碎性材料の排水せん断挙動と破碎に伴う限界状態線の低下

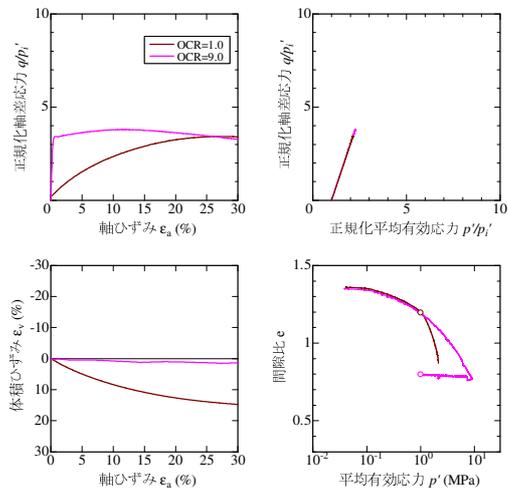
破碎性材料の弾塑性力学挙動の基本的な性質を把握するために、高压三軸試験装置（最大セル圧 10MPa）を用いて実験を行った。図-4 は、沖縄砂に対し、異なる拘束圧下で排水せん断試験を行った結果である。この実験では、過圧密履歴を与えることで、過破碎状態にした土の弾塑性挙動についても調べた。実験結果より、拘束圧を上げて破碎が顕著に生じる状況になると、顕著な塑性変形を生じることが分かる。また、過圧密履歴を与えることで過破碎状態にある土よりも、そのような履歴を与えない土の方が完全塑性状態に移りにくいように見えることから、顕著な塑性変形は破碎の影響であることがより確かなこととして理解できる。



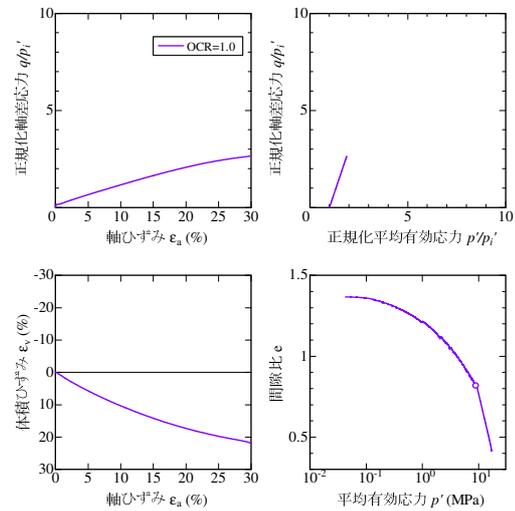
(a) 拘束圧 $p_i' = 0.2\text{MPa}$



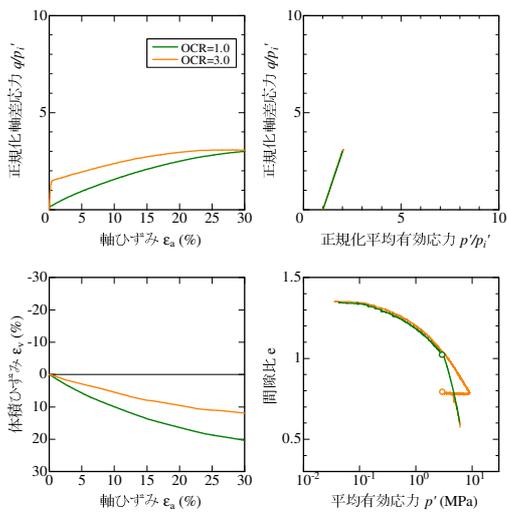
(d) 拘束圧 $p_i' = 6.0\text{MPa}$



(b) 拘束圧 $p_i' = 1.0\text{MPa}$



(e) 拘束圧 $p_i' = 9.0\text{MPa}$



(c) 拘束圧 $p_i' = 3.0\text{MPa}$

図-4 沖縄砂の排水せん断試験結果

Cheng, Y.P.らは、破碎性砂の限界状態について、個別要素法(DEM)を用いて調べること、粒子破碎が生じると限界状態線が低下することを指摘している。Cheng, Y.P.らによる解析と本実験の限界状態線について比較した。図-5にCheng, Y.P.らによる解析結果を示す。この図は、一旦大きな荷重を掛けることで予め顕著な粒子破碎を生じさせておいた供試体の限界状態線(Series3)が過圧密履歴を与えない供試体(Series1 と 2)の限界状態線よりも下側に位置することを示すことで、粒子破碎が生じると限界状態線が低下することを説明している。図-6に本実験で得られたせん断終了時の平均有効応力と空隙比の関係を示す。実験結果からも解析結果と同様に粒子破碎が生じると限界状態線が低下する様子が伺える。

このようにして、粒子破碎が生じることで、顕著な粒子破碎が生じることで、破碎に伴って限界状態線が低下することを示した。

(3) 粒子破碎を考慮した弾塑性構成式の開発と適用性の確認

本研究では、骨格構造（構造・過圧密・異方性）の働きを記述可能な弾塑性構成式（上・下負荷面カムクレイモデル；SYS Cam-clay model）をベースに、粒子破碎の影響を考慮可能な弾塑性構成式を開発した。

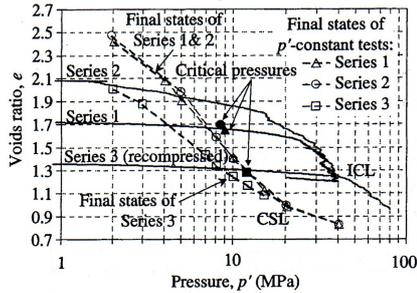


図-5 せん断終了時の平均有効応力と間隙比の関係 (DEM による解析結果)

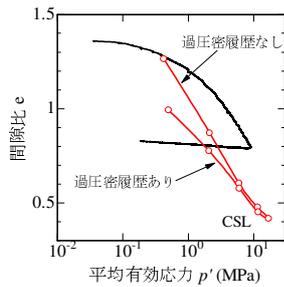
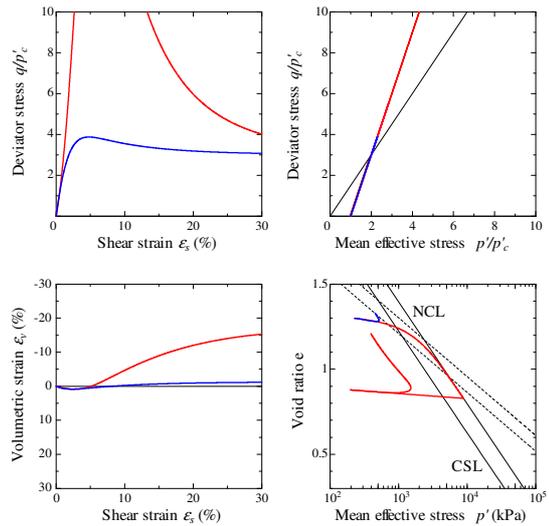


図-6 せん断終了時の平均有効応力と間隙比の関係 (実験結果)

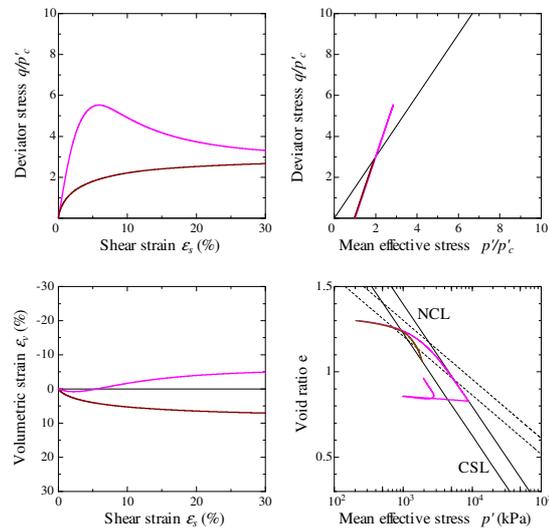
このモデルでは、新たに「過破碎」概念を取り入れることで、粒子破碎の影響を記述している。図-7 に開発した弾塑性構成式による、破碎性材料の数値シミュレーション結果を示す。

図-4 の破碎性材料の実験結果と比較することで、このモデルが破碎の影響を適切に表現できていることが分かる。具体的には、過圧密履歴を受けたものと、過圧密履歴を受けていないもので、異なる限界状態に達していることや、完全塑性状態に達しにくい特徴を上手く表現できている。このような点から、開発した構成式の適用性の高さが示されている。

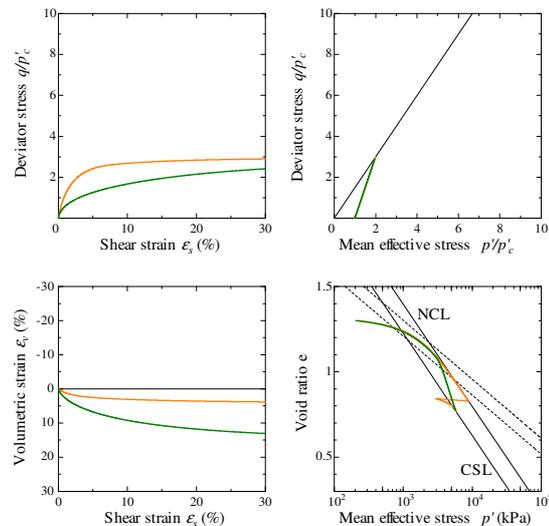
なお、この構成式は、材料の初期状態を超過破碎状態に取ることで、実質的に SYS-Cam clay model に帰着する。このような観点から、破碎性材料と非破碎性材料の力学挙動をひとつの弾塑性構成式で、統一的に記述することができたとはいえる。破碎性材料と非破碎性



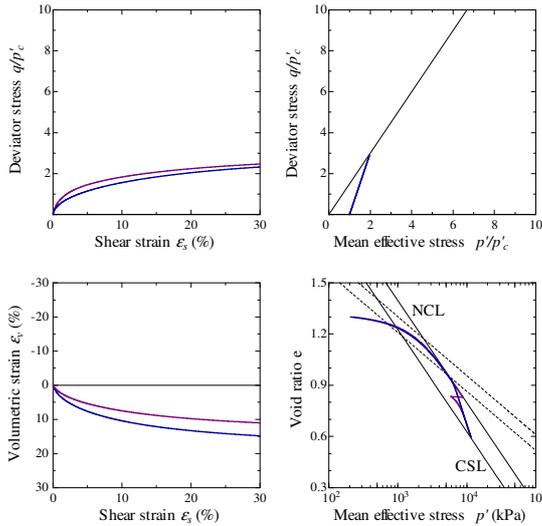
(a) 拘束圧 $p_i' = 0.2 \text{ MPa}$



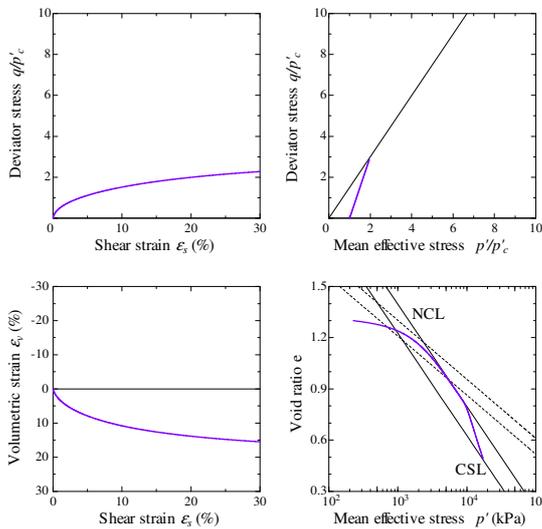
(b) 拘束圧 $p_i' = 1.0 \text{ MPa}$



(c) 拘束圧 $p_i' = 3.0 \text{ MPa}$



(d) 拘束圧 $p'_i = 6.0\text{MPa}$



(e) 拘束圧 $p'_i = 9.0\text{MPa}$

図-7 開発した弾塑性構成式の排水せん断応答

材料を分離することのない構成式は国の内外を問わず初めてのものである。今後は、この構成式を搭載した変形解析によって、破砕性材料が引き起こす様々な工学的問題が解かれるものと期待できる。

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 6 件)

- ① 宗石和樹, 山田正太郎, 佐藤研一: カーボネイト砂の圧縮およびせん断挙動と粒子破砕, 第 45 回地盤工学研究発表会講演概要集, 2010, 印刷中. (査読無)

- ② 宗石和樹, 山田正太郎, 佐藤研一: 過圧密履歴を受けたカーボネイト砂がせん断中に示す粒子破砕, 第 62 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 2010, 印刷中. (査読無)
- ③ 宗石和樹, 山田正太郎, 佐藤研一: カーボネイト砂の圧縮およびせん断挙動と粒子破砕, 平成 21 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, 2010, pp.467-468. (査読無)
- ④ 東城彰浩, 山田正太郎, 佐藤研一: 粒子破砕が砂質土の限界状態に及ぼす影響に関する実験的研究, 平成 20 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, 2009, pp.399-400. (査読無)
- ⑤ 東城彰浩, 山田正太郎, 佐藤研一: 過圧密履歴を受けた破砕性砂の排水せん断挙動と限界状態, 第 44 回地盤工学研究発表会講演概要集, 2009, pp.313-314. (査読無)
- ⑥ Yamada, S. and Sato, K.: Effects of particle crushing of mechanical behavior of sand, Proc. of the BGA International Conference on Foundations, 2008, pp.1773-1783. (査読有)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 正太郎 (YAMADA SHOTARO)
 福岡大学・工学部・助教
 研究者番号: 70346815

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: