

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月15日現在

機関番号：13903
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2010～2011
 課題番号：22760355
 研究課題名（和文） 粒度分布の変化とその影響を統一的に考慮した土の構成モデルの開発と応用
 研究課題名（英文） Development of a constitutive model for soils considering the effect of changing grading and its application to geotechnical problems
 研究代表者
 菊本 統 (KIKUMOTO MAMORU)
 名古屋工業大学・工学研究科・助教
 研究者番号：90508342

研究成果の概要（和文）：土粒子の破砕現象と粒度変化の影響を弾塑性モデルの中で簡単に記述する方法を開発するとともに、地盤工学的諸問題への応用を試みた。まず、応力変化や温度変化、乾湿繰返しに伴う破砕現象について既往文献の整理を行うとともに、粒度変化を考慮したモデルを定式化した。開発したモデルの妥当性は既往の室内要素試験の結果と別途、実施した低応力レベルで容易に破砕を生じる地盤材料（鉄鋼スラグ）の要素試験の再現解析により検証を行った。

研究成果の概要（英文）：A simple method describing the effect of changing particle size distribution due to particle crushing is developed and applied to some practical geotechnical engineering problems. Firstly, past experimental researches on the particle crushing phenomena of granular materials due to stress change, temperature change and drying and wetting cycles are reviewed, and an elasto-plastic constitutive model for soils considering the effect of changing grading is then developed based on them. Validity of the proposed model is consequently checked through the comparisons with the past experimental results and results of elementary tests on steel slugs which exhibit significant crushing under a relatively low stress levels.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

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，構成モデル，粒度分布，限界状態モデル，応用力学，粒子破砕，物理的風化現象，弾塑性力学

1. 研究開始当初の背景

実地盤で直面する工学的諸問題を検討するためには、実地盤の力学特性を精緻に記述できる土の構成モデルに基づいて応力・変形解析を行う必要がある。しかし、従来の土の

モデルは、主に室内試験で確認できる力学特性（例えば、密度や拘束圧、応力経路の影響）を記述できるレベルにまで開発されているものの、地盤材料が粒状性材料の集合であるという観点からの現象は必ずしも考慮でき

ていなかった。例えば、応力変化を受けて土粒子が破碎すると細流分が増加して、ピーク強度が大きく減少することが過去の実験的検討ではしばしば指摘されているし、長年にわたって浸透作用を受けたフィルダムでは、堤体の内部侵食により細粒分が流失して変形を生じたことも報告されている。このように粒度変化は土の強度・変形特性に大きく影響するにもかかわらず、内部侵食や粒子破碎による粒度変化の影響を統一的に説明できるモデルは開発されていないのが現状であった。

2. 研究の目的

粒度変化とその影響を記述できる土の新しいモデルの開発と応用を目的とする。モデルの定式化にあたっては、土の弾塑性モデルとして広く用いられている限界状態モデル（例えば、Cam clay モデル）をベースとして用い、本研究で開発するモデル化手法が既存の多くのモデルに適用できるよう留意する。また、粒度の発展則を様々な要因に対して拡張することで今後、細粒分の流失など他の現象を考慮できるよう、粒度を表す状態変数を媒介変数として用いる。

3. 研究の方法

既往の実験的検討のレビューと低応力レベルでも容易に粒子破碎を生じる鉄鋼スラグの室内要素試験を実施して、地盤材料の粒度変化について実測データを収集・整理するとともに、その結果を参考にして土の粒度を表す指標と粒度指標の発展則を規定した上で、粒度特性の違いを考慮していない従来のモデルを粒子破碎による粒度変化の影響も記述できるように拡張する。提案モデルの妥当性は既往の実験および本研究で実施する要素試験の結果との比較により検証する。また、提案モデルを用いた数値パラメトリックスタディにより、地盤材料の粒度特性の変化が地盤の変形・破壊挙動に及ぼす影響について考察を行う。

4. 研究成果

石灰質砂や火山灰土、海洋堆積土壌、製鉄副産物（鉄鋼スラグ等）は比較的低い拘束圧下で粒子破碎を生じることがよく知られている。また、粒子が比較的硬質な石英質砂などの土でも高い応力条件下では、特に異方的な応力を受ける際に粒子破碎を生じることが過去の実験的検討でしばしば指摘されている。既往の室内要素試験では、このような土粒子の破碎を生じると圧縮性を増すとともに、ピークせん断強度が低下することが確認されている。しかしながら、既往の地盤材料の構成モデルは土粒子の破碎現象と粒度変化の影響を必ずしも考慮していなかった。

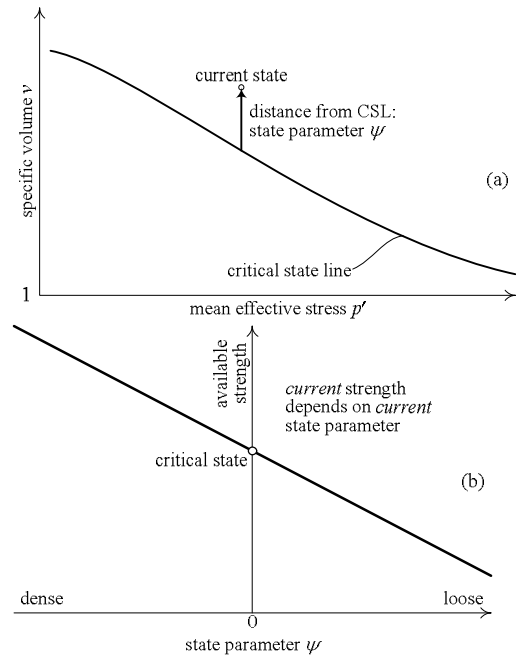


図-1 限界状態線と状態変数，強度の関係

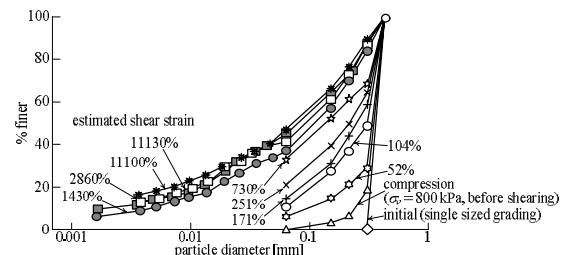


図-2 リングせん断試験における Dog's Bay 砂の粒度変化 (Coop et al. 2004)

本研究では粒度変化の影響を考慮しない既往の弾塑性モデル (Cam clay モデルに代表される限界状態モデル) をベースとして、粒度変化とその応力ひずみ特性への影響を簡単に記述する方法を開発した。提案手法は以下のようなアイデアに基づいている。

- 概念がシンプルで、既に広く用いられている限界状態モデル（ここでは Gajo & Muir Wood が提案した Severn-Trent sand モデルを用いた）をベースとする。このモデルでは、限界状態線（図-1(a)）を基準とする状態変数 ψ （現在の比体積と現応力下の限界状態線上の比体積の差）に応じてピーク強度を変化させており、密な土ほど高いせん断強度を与えている（図-1(b)）。
- 土の粒度分布と粒子破碎による粒度変化は、図-2 のように最大粒径をほとんど変えないまま細粒分が増加する。これを均一粒径と限界粒度を両極とする粒度指標 I_G と、0（均一粒度）から 1（限界粒度）に単調増加する I_G の発展則（図-3）に単純化する。粒子破碎現象について、 I_G の発展則は応力履歴の関数とし、圧縮とせん断の影響を統一的に考慮した Crushing surface

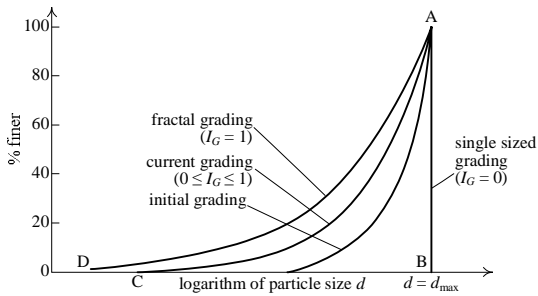


図-3 粒子破碎に伴う粒度変化と粒度指標

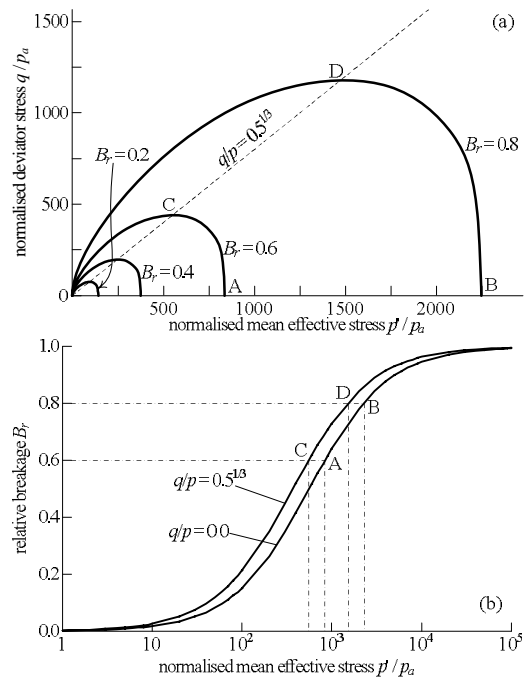


図-4 Hardin が提案した Relative breakage B_r と平均有効応力 p および偏差応力 q の関係 (a) 有効応力平面における B_r の等高線; (b) 平均有効応力および応力比と B_r の関係

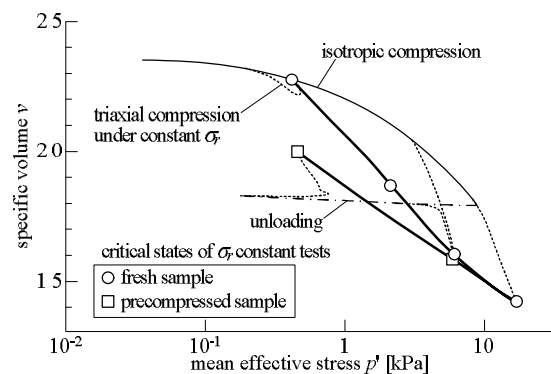


図-5 粒子破碎による限界状態の下降

の硬化と破碎を関係付ける。Crushing surface は Hardin が提案した実験式をベースとしている (図-4)。

- c) 従来、土をせん断して最終的に到達する限界状態は平均有効応力-比体積の関係でユニークな直線 (限界状態線) に定まると

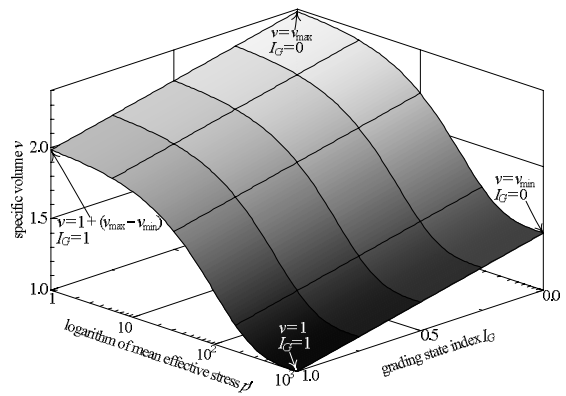


図-6 粒度について拡張した限界状態面

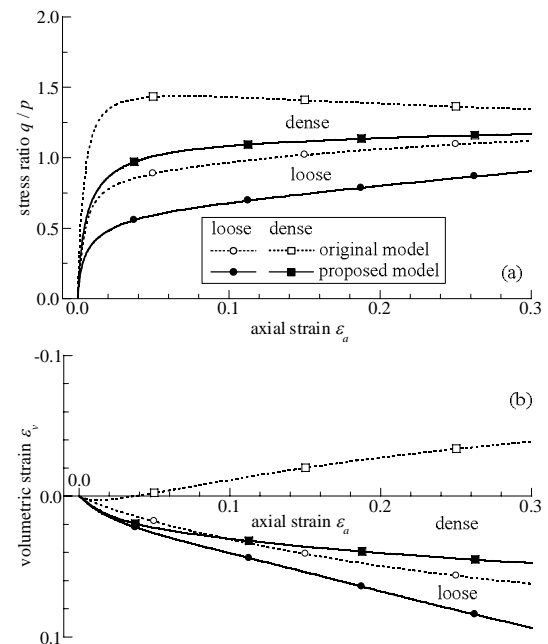


図-7 粒子破碎を考慮したモデルと破碎を考慮しない従来の限界状態モデルによる排水三軸試験のシミュレーション

- d) 考えられてきたが、粒度変化によって細粒分が増えると粒径の小さい粒子が空隙に落ち込んで圧縮性を増すことに起因して下降する (図-5)。これを端的に考慮するには、粒度変化の影響を考慮して粒度インデックス I_G について限界状態線を拡張した3次元の限界状態面 (図-6) を導入することでモデル化する。

- e) 粒子破碎により I_G が増加して CSL が下降すると、状態変数 ψ は増加する (土は相対的に緩くなる) ので、ピーク強度の減少も自動的に表現できる (図-7)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計5件)

- ① Nakai, T., Shahin, H. M., Kikumoto, M., Kyokawa, H., Zhang, F. and Farias, M. M. :

A simple and unified one-dimensional model to describe various characteristics of soils, *Soils and Foundations*, vol. 51, no. 6, pp.1129-1148, 2011 (査読有) .

- ② Nakai, T., Shahin, H. M., Kikumoto, M., Kyokawa, H., Zhang, F. and Farias, M. M. : A simple and unified three-dimensional model to describe various characteristics of soils, *Soils and Foundations*, vol. 51, no. 6, pp.1149-1168, 2011 (査読有) .
- ③ Kyokawa, H., Kikumoto, M., Nakai, T. and Shahin, H. M. : Simple modeling of stress-strain relation for unsaturated soil, *Experimental and Applied Modeling of Unsaturated Soils (Geotechnical Special Publication No.202)*, American Society of Civil Engineers, pp.17-25, 2010 (査読有) .
- ④ Kikumoto, M., Muir Wood, D. and Russell, A. : Particle crushing and deformation behaviour, *Soils and Foundations*, vol.50, no.4, pp.547-563, 2010 (査読有) .
- ⑤ 京川裕之, 菊本統, 中井照夫 : 修正応力を用いた等方硬化モデルによる誘導異方性の表現, *地盤工学ジャーナル*, vol.5, no.4, pp.533-544, 2010年 (査読有) .

[学会発表] (計6件)

- ① Kyokawa, H., Kikumoto, M. and Nakai, T. : A simple description of stress-strain and hydraulic behaviours of unsaturated soil, *Proc. of the 4th Sino-Japan Geotechnical Symposium*, Naha, Japan, pp.74-81, Mar. 13, 2010.
- ② Kyokawa, H., Kikumoto, M., Nakai, T. and Shahin, H.M. : Simple modeling of unsaturated soil, *Proc. of 5th international workshop in New Frontiers in Computational Geotechnics*, Brisbane Australia, pp.131-138, July 26, 2010.
- ③ Kikumoto, M., Kyokawa, H., Nakai, T. and Shahin, H. M. : A simple elasto-plastic model for unsaturated soils and interpretations of collapse and compaction behaviours, *Proc. of the 5th International Conf. on Unsaturated Soils (UNSAT 2010)*, Barcelona, Spain, pp.849-855, Sept. 7, 2010.
- ④ Kikumoto, M., Kyokawa, H., Nakai, T., Shahin, H. M., Tatematsu, K. and Koike, M. : Mechanical interpretation of compaction behaviour by an elastoplastic model for unsaturated soils, *Proc. of the Bangladesh geotechnical conference 2010 on Natural Hazards and Countermeasures in Geotechnical Engineering*, Dhaka, Bangladesh, pp.121-128, Nov. 4, 2010.
- ⑤ Russell, A.R., Einav, I., Muir Wood, D. and Kikumoto, M. : Using load distributions in

granular assemblies exhibiting particle crushing to study macroscopic mechanical properties, *Proc. of the 11th International Conf. of IACMAG (Computer Methods for Geomechanics: Frontiers and New Applications)*, Melbourne, Australia, pp.677-683, May 10, 2011.

- ⑥ Kikumoto, M., Kyokawa, H. and Nakai, T. : Simple modelling of stress-strain behaviour of unsaturated soils, *Proc. of 14th Asian Regional conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Hong Kong, China, 6 pages in DVD-ROM, May 23, 2011.

[その他]

ホームページ

(<http://www.cvg.ynu.ac.jp/G3/MamoruKikumoto/index.html>)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菊本 統 (KIKUMOTO MAMORU)

名古屋工業大学・工学研究科・助教

研究者番号 : 90508342