



せん断強度に基づく飽和度変化に起因する硬化特性 の定量的評価

有井, 拓也
林, 啓太
橘, 伸也
飯塚, 敦

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 24:18-24

(Issue Date)

2020-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/81013252>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81013252>



せん断強度に基づく 飽和度変化に起因する硬化特性の定量的評価

Strength-based approach

for estimating the degree of hardening of unsaturated soils

有井 拓也¹⁾

Takuya Arai

林 啓太²⁾

Keita Hayashi

橘 伸也³⁾

Shinya Tachibana

飯塚 敦⁴⁾

Atsushi Iizuka

概要: 不飽和土の弾塑性構成モデルを構築する際, 硬化特性を硬化則として立式することが重要となる. 本研究では, せん断試験で計測されたせん断強度に基づいて, 硬化特性を定量的に評価する方法を提案する. この方法においては, サクションが未知であっても良いため, 比較的容易に硬化特性を類推することができる. また, この方法を用いて, 本研究ではいくつかの一軸圧縮試験の結果から, 硬化の度合いを示す比の推定式を定式化した.

キーワード: 不飽和土, 構成式, せん断強度

1. 研究背景及び目的

土は不飽和化に伴って圧密降伏応力が増大し, 降伏曲面が拡大する. 不飽和土の弾塑性構成モデルを構築する際には, この硬化特性を硬化則として立式することが重要となる. このためには, 一般的にはサクションの計測・制御を伴う圧縮試験を実施し, 不飽和状態における圧縮特性を把握する. それに対して, 本研究では, せん断試験で計測されたせん断強度に基づいて, 硬化特性を定量的に評価する方法を提案する. この方法は, 限界状態時の間隙比が異なる複数のせん断試験の結果を必要とするが, サクションが未知であっても良いため, 比較的容易に硬化特性を類推することができる.

2. せん断強度に基づき硬化特性を評価する考え方

不飽和状態下の土は飽和状態下の土に比べて, 同じ有効応力状態においてより高間隙な状態を保持でき

ることが知られている． $e - \ln p'$ 平面上においては，図 1 に示すように，不飽和化するほど平均有効応力が大きい側（右側）に正規圧密曲線が位置することになる．したがって，剛性が高い弾性状態と見做すことができる領域が拡大することになる．この表現方法は様々である．大野ら¹⁾は，正規圧密曲線の勾配である圧縮指数 λ が飽和度に関わらず一定と見做して，正規圧密曲線の位置を有効飽和度に対して規定する硬化則を立式し，弾塑性構成モデルを提案している．この場合，正規圧密曲線群は互いに平行する．一方で，Zhou ら²⁾のモデルのように，飽和度あるいはサクシヨンの関数として圧縮指数を定式化する，非平行型のモデルも存在する．不飽和化による正規圧密曲線の位置と勾配 λ の変化を把握するためには，体積変化，含水量変化，さらにサクシヨンの制御・計測を伴う圧縮試験を複数条件で実施する必要があり，多機能の試験装置を要する．また，サクシヨンと飽和度を結びつける水分特性曲線も既知でなければならない．これに替えて，せん断強度から比較的容易に硬化特性を類推する方法を以下に記す．

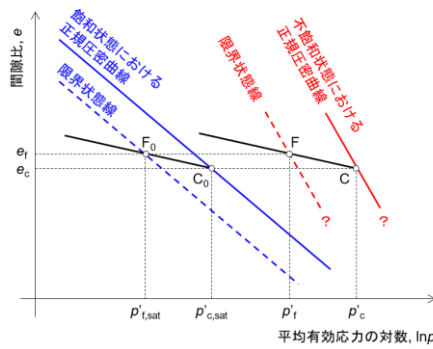


図 1 $e - \ln p'$ 平面における正規圧密曲線と限界状態線の関係

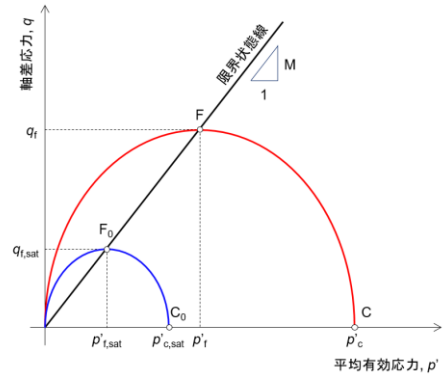


図 2 $p' - q$ 平面における限界状態線と降伏曲面

大野ら¹⁾に倣って，不飽和化による圧密降伏応力の増大，あるいは，降伏曲面の拡大を，ある間隙比 e_c に対する圧密降伏応力の比 ξ によって表わすことを考える． ξ は，

$$\xi = \xi(S_r) = \frac{p'_c(S_r)}{p'_{c,sat}} \quad (1)$$

と表される．ここに， $p'_{c,sat}$ は飽和状態における圧密降伏応力， p'_c は任意の不飽和状態の圧密降伏応力であり， ξ は飽和度 S_r の関数になる． ξ をせん断強度から評価するために，本研究では以下の 3 つの仮定を設ける．

第一に，図 2 のように $p' - q$ 平面上において，状態に依らず限界状態線が原点を通る直線として唯一に描けると仮定する．この仮定は，例えば Nuth ら³⁾の解釈と同じものである．Nuth らは，不飽和状態の限界状態を示す応力点が，飽和状態における限界状態線の付近に存在することを，せん断試験の結果から示している．

第二に，どの状態にあっても，図 1 のように $e - \ln p'$ 平面上において，正規圧密曲線と限界状態線が平行であると仮定する．この仮定は，例えば Zhang ら⁴⁾と同様の解釈である．

第三に，図 2 のように $p' - q$ 平面上において，降伏曲面の形状が不変であり，相似形を保つと仮定する．この仮定は，河井ら⁵⁾が行った非排水三軸圧縮試験の結果に整合する．河井らは，せん断過程において降伏曲面とひずみ増分ベクトルが常に直交しながら，降伏曲面が相似的に拡大することをせん断試験の結果から確認している．

これらの仮定を総合すると，図 1 と図 2 の幾何学的な関係より，

$$\xi = \xi(S_r) = \frac{p'_c(S_r)}{p'_{c,sat}} = \frac{p'_f(S_r)}{p'_{f,sat}} = \frac{q_f(S_r)}{q_{f,sat}} \quad (2)$$

となる。ここに、 $q_{f,sat}$ は飽和状態におけるせん断強度、 $q_f(S_r)$ は不飽和状態におけるせん断強度である。すなわち、同一の限界状態時の間隙比 $e_f (\neq e_c)$ に対して得られる飽和状態でのせん断強度と不飽和状態のせん断強度の比を求めることが、比 ξ を評価することと等価になる。

なお、せん断強度の比から ξ を求める際、限界状態時の間隙比を揃えれば、どのようなせん断試験の結果を用いても良い。なぜなら、限界状態における間隙比と飽和度が同じ土は、正規圧密・過圧密に関わらず、得られるせん断強度が同じとなるからである。本研究では、一軸圧縮試験の結果を用いている。

3. 一軸圧縮強度を用いた比 ξ の定量的評価

(1) 評価の前提条件

この章では、まず、2章で説明した考え方にに基づき、常田ら⁹⁾による一軸圧縮試験の結果に基づいて ξ を求めた後、 ξ を飽和度と間隙比の関数として定式化する。さらに、定式化した ξ の推定式が、Chaeら⁸⁾の一軸圧縮試験の結果に整合しているか確認する。

なお、一軸圧縮試験中に間隙比、飽和度が変化しないとみなす。理由は以下の通りである。一軸圧縮試験は非排気・非排水条件下で実施するので、含水比が一定である。さらに、圧縮中の体積変化を無視するという前提がある。したがって、間隙比と飽和度が一定となるのである⁹⁾。

この仮定を踏まえて、 ξ を定式化する際には、初期乾燥密度から導出した初期間隙比の値を限界状態時の間隙比の値として用い、初期飽和度の値を限界状態時の飽和度の値として用いる。なお、Chaeらはせん断開始から限界状態に至るまでの間隙比変化を測定しているが、本研究で対象とする供試体の間隙比変化は、殆どの場合 0.01 から 0.03 の間に収まっていた。そこで、Chaeらの実験結果においても、間隙比変化を無視できるものとする。

(2) 常田らの一軸圧縮試験結果に基づく ξ の定式化

常田らは、乾燥密度が一定となるように、すなわち間隙比が一定となるように DL クレー及びカオリンを締固めて、供試体を作成した。DL クレーの土粒子密度は 2.650g/cm³、液性限界は NP である。カオリンの土粒子密度は 2.679g/cm³、液性限界は 73.1% である。DL クレーの乾燥密度は 1.560g/cm³、1.482g/cm³、1.326g/cm³ の 3 系列であり、カオリンの乾燥密度は 1.266g/cm³、1.043g/cm³ の 2 系列である。また、各系列の供試体の飽和度は、20%、40%、60%、80%、85%、90%、95% の 7 種類である。これらの条件を持つ供試体について一軸圧縮試験を行った結果を、図 3、図 4 に示す。ただし、供試体成形が不可能であったケース、及び飽和度 0%、100% のケースの一軸圧縮強度は省かれていたので、外挿した結果を記載している。飽和度が 80% 以上の領域と 80% 以下の領域で一軸圧縮強度の減少の割合が異なっているため、飽和度が 80% 以上の一軸圧縮強度を推定するときは、飽和度が 80% 以上の $q_u - S_r$ 関係を単回帰分析し、飽和度が 80% 以下の一軸圧縮強度を推定するときは、飽和度が 80% 以下の $q_u - S_r$ 関係を単回帰分析した。

図 3、図 4 より、間隙比に関わらず、飽和度の増加に伴い一軸圧縮強度が単調減少する傾向が認められる。また、飽和度が同じであれば、間隙比の増加に伴い一軸圧縮強度が減少している。

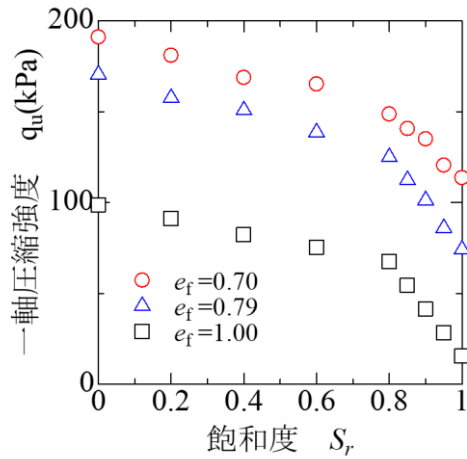


図3 常田らの一軸圧縮試験の結果(DLクレー)

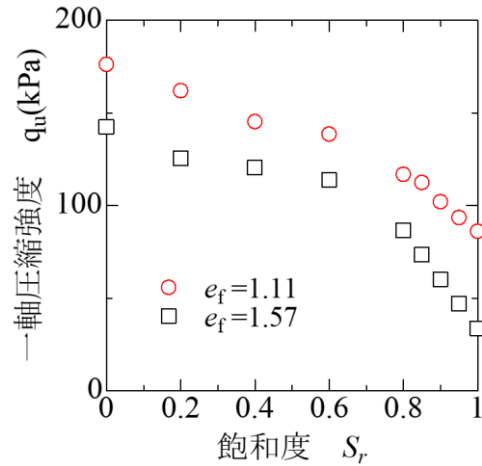


図4 常田らの一軸圧縮試験の結果(カオリン)

図3, 図4の結果をもとに, 式(2)を用いて ξ を計算した結果を, 図5と図6にプロットする. 図から分かるように, どちらの試料についても, 飽和度の減少に伴って ξ が単調増加する傾向を示している. また, 間隙比が大きいほど ξ が大きくなっている. これらのことは, 不飽和化するほど強度が大きくなり, 飽和状態の強度に対する強度比として ξ を見れば, 高間隙であるほどその傾向が強くなることを意味する. また, 降伏応力の比として ξ を見ると, 同じ飽和度であっても高間隙であるほど ξ が大きくなるため, $e - \ln p'$ 平面上における飽和度一定の正規圧密曲線群は互いに平行ではなく, 密になるほど曲線間の間隔が狭くなるような配置になることを示唆している.

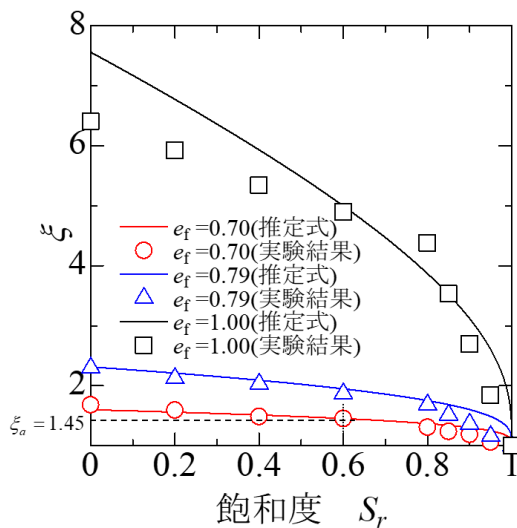


図5 $\xi - S_r$ 関係(常田らのDLクレー)

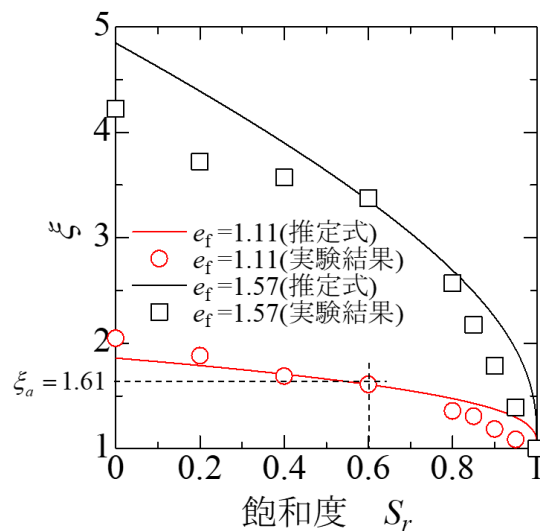


図6 $\xi - S_r$ 関係(常田らのカオリン)

プロットとして得られた ξ の傾向を基に, ξ の推定式を次式のように, 限界状態時の間隙比 e_f と飽和度 S_r の関数として提案する.

$$\xi = \xi(S_r, e_f) = \exp \left[\left(\frac{1 - S_r}{1 - S_{ra}} \right)^n \ln \left\{ \left(\frac{e_f}{e_a} \right)^m (\xi_a - 1) + 1 \right\} \right] \quad (3)$$

ただし、 S_{ra} は基準飽和度、 e_a は基準間隙比であり、 $S_r = S_{ra}$ かつ $e_f = e_a$ のときの ξ の値 ξ_a を与えなければならない。基準飽和度は、実験結果が数多く存在する領域内に設定する。例えば常田らの実験であれば、全てのケースで実験結果が存在する $S_r = 0.6$ を基準飽和度に設定する。 n は飽和度についての感度を、 m は間隙比についての感度を調整するフィッティングパラメータである。式(3)は、基準間隙比における $\xi - S_r$ 関係が既知であるとき、限界状態時の間隙比 e_f における $\xi - S_r$ 関係を推定できることを意味している。

図5と図6に、式(3)より決定した ξ を実線で示す。DL クレーに対しては $(e_a, \xi_a) = (0.70, 1.45)$ 、 $(n, m) = (0.25, 6.1)$ 、カオリンに対しては $(e_a, \xi_a) = (1.11, 1.61)$ 、 $(n, m) = (0.29, 3.9)$ のパラメータセットを用いている。基準間隙比とした間隙比に対するフィッティングは勿論のこと、他の間隙比についても良好に表現することができている。また、高飽和度領域においては ξ の値をやや大きめに評価しているものの、広範囲の間隙比、飽和度状態で試験結果から得られた ξ をよく表現できている。

(3) ξ の推定式の Chae らの一軸圧縮試験への適用

この節では、前節で定式化した式(3)が、Chae らが実施した DL クレーの一軸圧縮試験の結果に整合するかを確認する。

Chae らは、土粒子密度 2.68 g/cm^3 、液性限界が NP の DL クレーを締固めて供試体を作成し、一軸圧縮試験を実施した。この試験では、乾燥密度が一定となるように、すなわち間隙比が一定となるように供試体を作成されている。その乾燥密度は 1.250 g/cm^3 、 1.330 g/cm^3 、 1.405 g/cm^3 の3系列である。この3系列の供試体の一軸圧縮試験の結果を図7に示す。ただし、全ての領域の $q_u - S_r$ 関係を単回帰分析することにより、飽和度 0% 及び 100% の時の一軸圧縮強度を外挿している。図7より、間隙比に関わらず、飽和度の増加に伴い一軸圧縮強度が減少する傾向が認められる。また、間隙比の増加に伴い一軸圧縮強度が減少する傾向が認められる。これらの傾向は、常田らの実験結果の傾向と同じである。

また、図7の結果をもとに、式(2)を用いて ξ を計算した結果を、図8にプロットする。図8より、飽和度の減少に伴って ξ がおおむね単調増加する傾向を示している。また、間隙比が大きいほど ξ が大きくなっている。これらの傾向も、常田らの実験結果から得られた ξ の傾向と同じである。

さらに、式(3)より決定した ξ を図8に実線で示す。用いたパラメータセットは、 $(e_a, \xi_a) = (1.02, 1.80)$ 、 $(n, m) = (0.67, 3.8)$ である。 $e_f = 1.02$ の系列の実験データが多く、推定の際に誤差が少なくなると考えられるため、基準間隙比は $e_a = 1.02$ とした。また、基準飽和度は $S_{ra} = 0.43$ である。図8から、式(3)を用いることによって、飽和度の減少に伴い ξ が単調増加する傾向、及び間隙比が大きいほど ξ が大きくなる傾向を、Chae らの実験に対してもおおむね表現できていると言える。

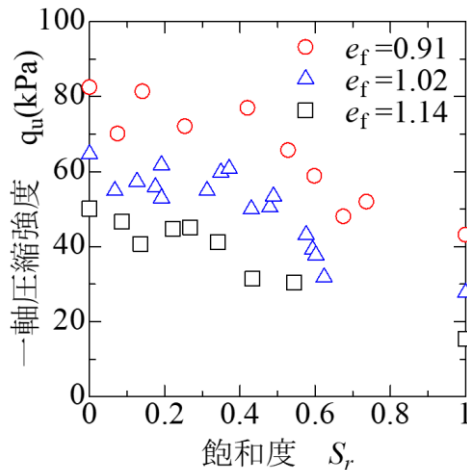


図7 Chaeらの一軸圧縮試験の結果(DLクレー)

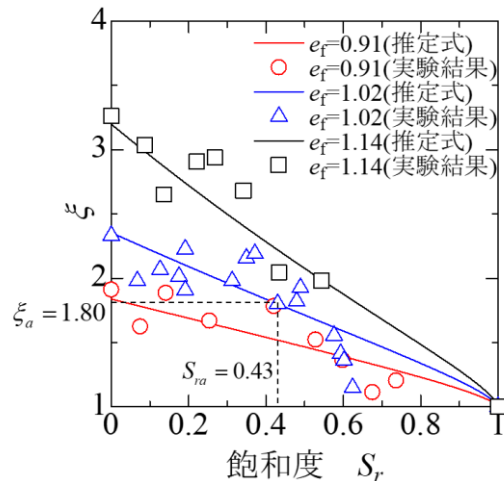


図8 ξ - S_r 関係 (ChaeらのDLクレー)

4. まとめ

本研究ではサクシヨンの計測・制御を伴わないせん断試験の結果を用いて、不飽和土の硬化特性を定量的に評価する方法を説明した。この方法は、不飽和状態における圧密降伏応力の比 ξ がせん断強度の比と等しい、という考え方を根拠としている。今後は、サクシヨンの計測・制御を伴う圧縮試験から得られる正規圧密曲線との比較から、この方法の妥当性を検証する必要がある。

また、本研究では一軸圧縮試験の結果から ξ の推定式を定式化した。今後は、三軸圧縮試験といった他のせん断試験も対象としながら、 ξ の推定式について考察する必要がある。

参考文献

- 1) 大野慎太郎, 河井克之, 橘伸也: 有効飽和度を剛性に関する状態量とした不飽和土の弾塑性構成モデル, 土木学会論文集 C, Vol.63 No.4, pp.1132-1141, 2007.
- 2) Zhou, AN., Sheng, D., Sloan, and Gens, A.: Interpretation of unsaturated soil behaviour in the stress - Saturation space, I: Volume change and water retention behaviour, *Comput. Geotech.* Vol. 43, pp. 178-187, 2012.
- 3) Nuth, M. and Laloui, L.: Effective stress concept in unsaturated soils: Clarification and validation of a unified framework, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.32, pp. 771-801, 2008.
- 4) Zhang, F. and Ikariya, T.: A new model for unsaturated soil using skeleton stress and degree of saturation as state variables, *Soils Foundations*, Vol. 51, No. 1, pp. 67-81, 2011.
- 5) 河井克之, 軽部大蔵, 嘉戸善胤, 加藤正司: 不飽和土の非排水三軸圧縮試験における変形強度特性および水分特性, 土木学会論文集, No.715/III-60, pp. 287-296, 2002.
- 6) 常田亮, 亀井健史: 締固めた土の一軸圧縮試験結果に及ぼす飽和度の影響, 長野高等専門学校紀要・第28号, pp. 63-73, 1994.
- 7) 常田亮, 亀井健史: 飽和度の違いがカオリンの一軸圧縮試験結果に及ぼす影響, 長野高等専門学校紀要・第29号, pp. 37-46, 1995.
- 8) Chae, J., Kim, B., Park, S., and Kato, S.: Effect of Suction on Unconfined Compressive Strength in Partly Saturated Soils, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 14, pp. 281-290, 2010.
- 9) 社団法人地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説, 丸善出版, 2009.

著者: 1) 有井拓也, 神戸大学工学部市民工学科, 学生; 2) 林啓太, 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻, 学生; 3) 橘伸也, 神戸大学都市安全研究センター, 講師; 4) 飯塚敦, 神戸大学都市安全研究センター, 教授

Strength-based approach for estimating the degree of hardening of unsaturated soils

Takuya Arii
Keita Hayashi
Shinya Tachibana
Atsushi Iizuka

Abstract

A description of the hardening characteristics is a key to formulating the constitutive model for unsaturated soils. This paper proposes a method to estimate the degree of hardening due to changes in the degree of saturation on the analogy of the shear strength measured in the shear test. The proposed method has an advantage of estimating the hardening characteristics due to saturation changes of the material with comparative ease because it does not require the measurement of suction. In this paper, the degree of hardening was estimated using the results of uniaxial compression test on several materials and was then formulated as a function of degree of saturation and void ratio.

©2020 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.