

土粒子破碎を伴う地盤材料の圧縮性の評価について Evaluation of Compressibility of Geomaterials with Soil Particle Breakage

瀬戸内 秀規 (琉球大・農)
Hideki SETOUCHI, University of the Ryukyus
E-mail: setouchi@agr.u-ryukyu.ac.jp

The large compressibility with particle breakage of Ryukyu limestone sands is predicted by the power rule of logarithm void gradient. It is revealed that the different compressibility from initial void ratio is evaluated in the material constants ζ of the power rule, and the different compressibility from particle strength is evaluated in the hardening/softening coefficient \underline{K}_0 of the power rule.

1. はじめに

南西諸島には土粒子破碎性地盤である石灰質堆積物が広く分布している。このような地盤を構造物の支持層として有効に活用するためには、その応力-ひずみ関係を合理的に記述できる評価手法が必要である。

本研究では、琉球石灰岩砕屑材料の粒径および粒度（粒径幅）を調整した材料の一次元圧縮試験を行い、対数間隙勾配のべき乗則¹⁾に基づいてその圧縮性のメカニズムの評価を検討した。本研究では、圧縮方向を負符号とする。

2. 土粒子破碎を伴わない圧縮性

対数間隙勾配のべき乗則における体積ひずみ ε_v の定義を次式に示す。

$$\varepsilon_v = \ln \frac{V_v}{V_{v0}} = \ln \frac{e}{e_0} \quad (1)$$

ここに、 V_v : 土の間隙体積、 e : 間隙比、 V_{v0} , e_0 : 初期間隙体積、初期間隙比である。

対数間隙勾配のべき乗則とは、Fig.1 のマーカーに示すように体積ひずみ ε_v の勾配 $\Delta\varepsilon_v/\Delta\sigma$ あるいは対数間隙の勾配が $\Delta \ln e/\Delta\sigma$ が圧縮応力 σ に対してべき乗則に従うという現象論的則性である。この則性は次式で与えることができる。

$$\frac{\Delta\varepsilon_v}{\Delta\sigma} = \frac{\Delta \ln e}{\Delta\sigma} \rightarrow \frac{d\varepsilon_v}{d\sigma} = \frac{(-\sigma)^n}{K^{n+1}} \quad (2)$$

ここに、 K : 硬化係数で圧縮の定量を記述するパラメータ、フック則の縦弾性係数と同じ役割を担う。単位は σ と同じ。 n : 硬化指数で圧縮の定性を記述する材料定数である。Fig.1 の実線は式(2)による予測である。用いた n と K を図中に示す。式(2)は実測の圧縮性を良好に予測する。

3. 土粒子破碎を伴う圧縮性

Fig.2 は、Fig.1 の圧縮応力 σ の 10 倍を作用させたときの圧縮性である。図のように、高圧域になると単調べき乗則に従わず $\Delta\varepsilon_v/\Delta\sigma$ が小さくなる圧縮硬化から $\Delta\varepsilon_v/\Delta\sigma$ が大きくなる圧縮軟化に転じる。この軟化現象は土粒子破碎によって土粒子構造が一度に崩壊することが要因である。そこで、次式のように単調べき乗則から土粒子構造の崩壊成分 ε_v^c を加算した多様べき乗則に拡張する。

$$\frac{d\varepsilon_v}{d\sigma} = \frac{d\varepsilon_v^c}{d\sigma} + \frac{d\varepsilon_v^p}{d\sigma} = \frac{(-\sigma)^{n^c}}{(K^c)^{n^c+1}} + \frac{(-\sigma)^{n^p}}{(K^p)^{n^p+1}} \quad (3)$$

ここに、 $(^c)$: 土粒子破碎による土粒子構造の崩壊成分、 $(^p)$: 土粒子間相対変位による土粒子構造の塑性変位成分である。

式(3)は、Fig.2 の実線のように土粒子構造崩壊成分の軟化指数 n^c を正にとることで圧縮硬化から軟化に転じる圧縮特性を良好に予測する。

4. 土粒子構造の低位化を伴う圧縮性

Fig.3 は、豊浦珪砂より粒子の破碎強度が低い琉球石灰岩砕屑材料の結果である。圧縮軟化の後、再び硬化に転じることが分かる。再硬化する要因は、土粒子構造の崩壊 ε_v^c や塑性変位 ε_v^p による不可逆な体積ひずみ ε_v^i によって土粒子構造が徐々に失われ岩石化するためと考えられる。Fig.1 の予測のように、硬化係数 K は同じ材料でも間隙比（密度）に依存するパラメータである。不可逆体積ひずみが進行すると密度は増す。そこで、次式のように不可逆体積ひずみ ε_v^i と同期させた硬軟化係数 K を導入する。

$$K^\alpha(t) = \frac{\underline{K}_0^\alpha}{\exp\left\{\zeta^\alpha(\tilde{\varepsilon}_{v0}^i + \varepsilon_v^i(t - \Delta t))\right\}}, \quad (4)$$

$$\tilde{\varepsilon}_{v0}^i = \ln \frac{e_0}{e_0}, \quad \varepsilon_v^i = \varepsilon_v^c + \varepsilon_v^p, \quad \alpha = c, p.$$

ここに、 e_0 : 初期間隙比の基準値、 \underline{K}_0 : e_0 における硬軟化係数、 ζ : ε_v^i による硬軟化係数 K の増加率を制御する材料定数、 $\tilde{\varepsilon}_{v0}^i$: e_0 に対する初期不可逆体積ひずみ、 t : 時間である。次式は、可逆体積ひずみである土粒子構造の弾性成分 ε_v^e を加算して一般化した対数間隙勾配のべき乗則である。

$$\frac{d\varepsilon_v}{d\sigma} = \frac{d\varepsilon_v^c}{d\sigma} + \frac{d\varepsilon_v^p}{d\sigma} + \frac{d\varepsilon_v^e}{d\sigma} = \frac{(-\sigma)^{n^c}}{\{K^c(\varepsilon_v^i)\}^{n^c+1}} + \frac{(-\sigma)^{n^p}}{\{K^p(\varepsilon_v^i)\}^{n^p+1}} + \frac{(-\sigma)^{n^e}}{\{K^e(\varepsilon_v^i)\}^{n^e+1}}, \quad (5)$$

$$K^\alpha(t) = \frac{\underline{K}_0^\alpha}{\exp\left\{\zeta^\alpha(\tilde{\varepsilon}_{v0}^i + \varepsilon_v^i(t - \Delta t))\right\}}, \quad \alpha = c, p, e.$$

ここに、 $(^e)$: 土粒子構造の弾性成分である。

材料定数を Fig.5 中に示す。Fig.3 の実線から不可逆体積ひずみと同期させた硬軟化係数によって軟化から再硬化に転じる圧縮特性が予測できる。

Fig.4 および Fig.5 に、硬軟係数 \underline{K}_0^c , \underline{K}_0^p と土粒子径および土粒子径幅の関係をそれぞれ示す。3 つの体積ひずみ成分 ε_v^c , ε_v^p , ε_v^e の材料定数 n , ζ は土粒子径、土粒子径幅の影響を受けなかった。 \underline{K}_0^c は、平均粒径（粒径幅）が大きくなると小さく（大きく）なる一定の傾向にある。一方、 \underline{K}_0^p は \underline{K}_0^c と対照的な応答を示した。

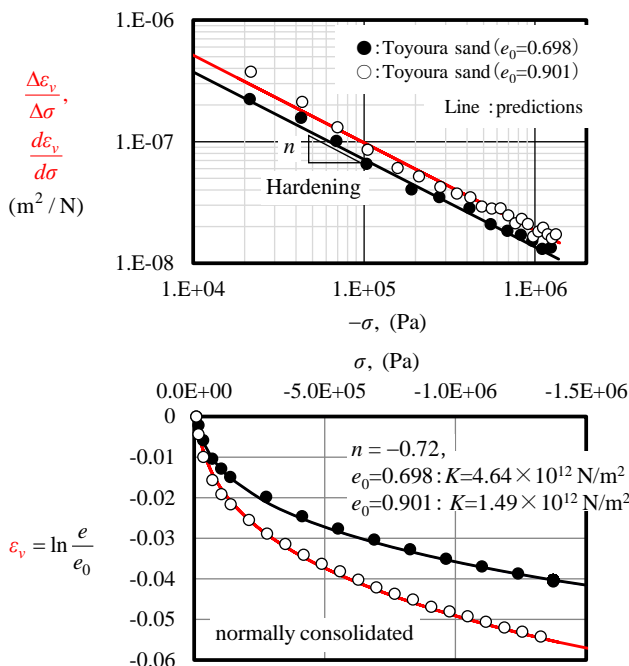


Fig.1 One-dimensional compression properties

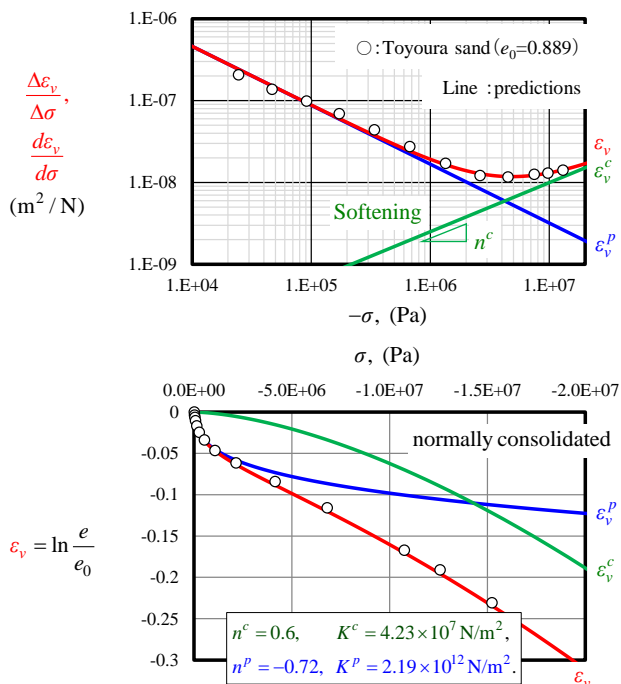


Fig.2 One-dimensional compression properties under high pressure

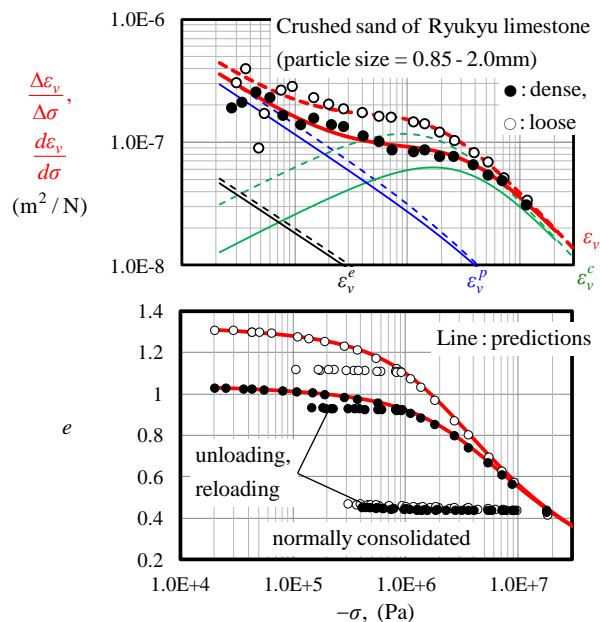


Fig.3 One-dimensional compression properties with the degradation of soil structure

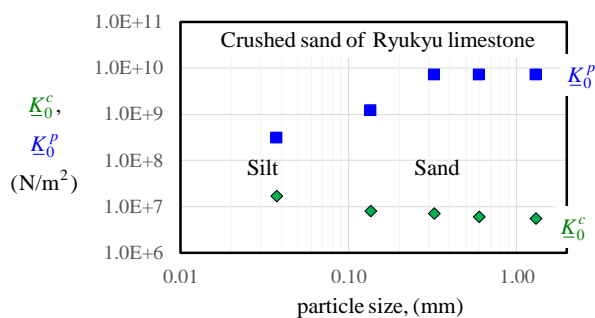


Fig.4 Relationships of particle size and hardening/softening coefficients \underline{K}_0

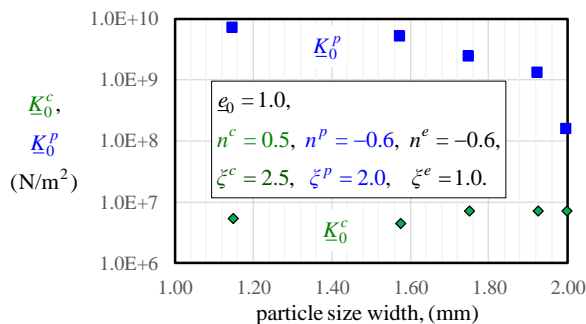


Fig.5 Relationships of particle size width and hardening/softening coefficients \underline{K}_0

5. まとめ

対数間隙勾配のべき乗則について以下の知見を得た。
 ・3つの体積ひずみ成分 ε_v^c , ε_v^p , ε_v^e の材料定数 ζ によって、初期間比 e_0 の異なる圧縮性を評価できる。また、土粒子破碎によって生じる著し土粒子構造の低位化を伴う圧縮性を評価できる。
 ・土粒子破碎強度が異なる圧縮性は、硬軟化係数 \underline{K}_0^c , \underline{K}_0^p によって評価できる。

・対数間隙勾配のべき乗則を構成する材料定数を分析することで、土粒子破碎を伴う大きな圧縮性のメカニズムを分析できる。

参考文献

- 1) 瀬戸内秀規：一次元圧縮下正規圧密砂の応力-ひずみ構成則，土木学会論文集 A2 (応用力学)，Vol.71, No.2, pp.I_399-I_410, 2015.