

土粒子破碎を伴う地盤材料の圧縮性の評価について

琉球大学 農学部 瀬戸内 秀規

今後の地盤構造物の性能照査型設計法への移行に伴い、安全性、使用性、耐久性などの要求性能の評価を支援できる高度な数値解析技術が増々重要になってきている。本研究はせん断帯における土粒子破碎によるせん断強度の低下を記述できるCam-clayモデルに基づく弾塑性モデルの拡張を対象としている。このためには、まず土粒子破碎効果を記述する地盤材料の硬化則が必要である。

一方、著者は「圧縮応力 σ に対して対数間隙勾配 $\Delta \ln e / \Delta \sigma$ がべき乗則に従う」という圧縮式を提案している。本概念は、広範の応力領域の圧縮性を合理的に精度よく予測できることが実験的に実証されている。また、Cam-clayモデルの硬化則に対する適用性も確認できている。

本研究では、対数間隙勾配のべき乗則を、土粒子破碎項を加算した多様べき乗則に拡張するとともに実測との照合によりその妥当性を検証する。また、本圧縮式の材料定数の力学的意味合いを整備する観点から、土粒子径、土粒子径幅が異なる圧縮特性と材料定数の相関関係を明らかにする。

対数間隙ひずみ ε_v の定義式： $\varepsilon_v = \ln \frac{V_v}{V_{v0}} = \ln \frac{e}{e_0}$

V_v ：土の間隙体積， e ：間隙比， V_{v0} および e_0 ：初期圧縮応力 $\sigma=\sigma_0$ のときの初期間隙体積および初期間隙比。

土粒子破碎が生じない圧縮性

Fig.1(a)は、正規圧密の豊浦珪砂の一次元圧縮結果です。図のように地盤材料の圧縮性は、圧縮応力 σ の増加に伴い体積ひずみ ε_v の増分 $|\Delta \varepsilon_v|$ が徐々に減少する**圧縮硬化**を示します。Fig.1(b)は、応力 σ に対する対数間隙勾配 $\Delta \varepsilon_v / \Delta \sigma$ の変化の様子を両対数で示したものです。Fig.1(b)のように、対数間隙勾配 $\Delta \varepsilon_v / \Delta \sigma$ は応力 σ に対して**べき乗則**に従うことが分かります。これを定式化すると次式で記述できます。

$$\frac{d\varepsilon_v}{d\sigma} = \frac{(-\sigma)^n}{K^{n+1}}, \quad \sigma < 0, \quad -1 < n < 0, \quad K > 0$$

積分 $\Rightarrow \varepsilon_v = -\frac{(-\sigma)^{n+1}}{(n+1)K^{n+1}}$

n ：圧縮の**定性**を記述する硬化指数， K ：圧縮の定量を記述する硬化係数

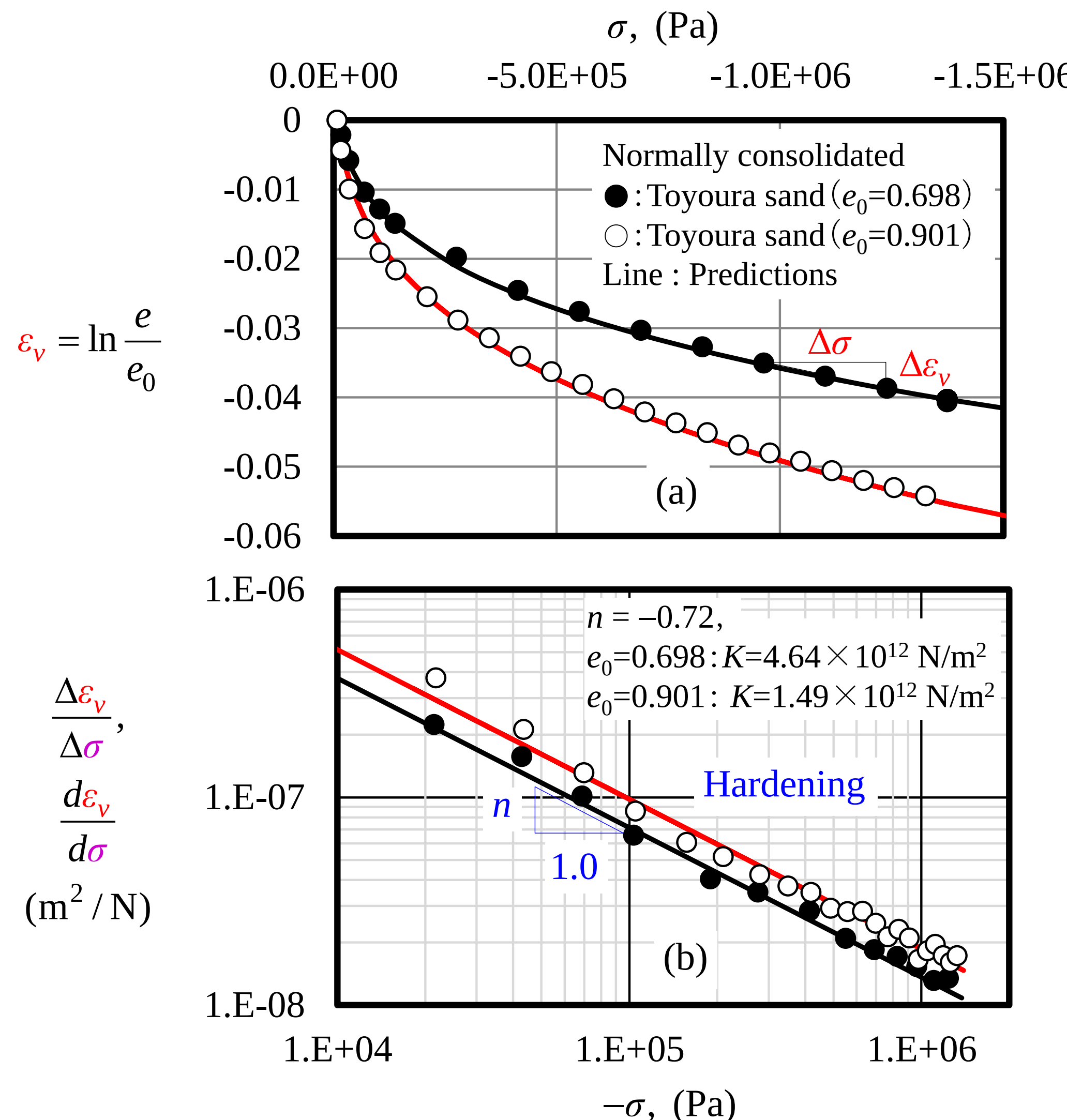


Fig.1 One-dimensional compression properties

土粒子破碎が生じる圧縮性

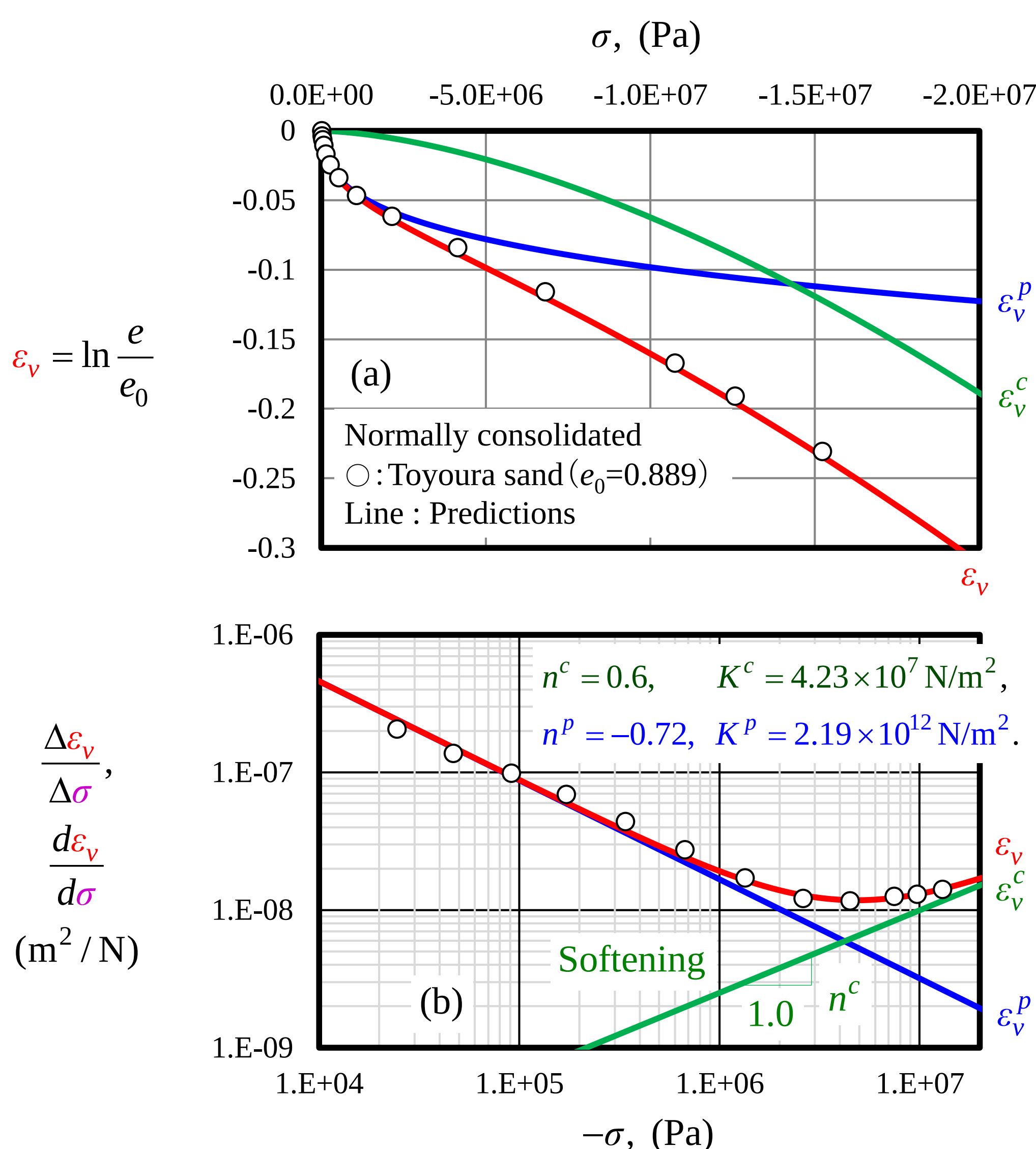


Fig.2 One-dimensional compression properties under high pressure

Fig.2(a)は、Fig.1の圧縮応力 σ の10倍を作用させたときの豊浦珪砂の圧縮性である。Fig.2(b)のように高圧域になると対数間隙勾配 $\Delta \varepsilon_v / \Delta \sigma$ は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。

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

()^c：土粒子破碎による土粒子構造の崩壊成分，
()^p：土粒子間相対すべり変位による土粒子構造の塑性変位成分

Fig.3は、豊浦珪砂より土粒子の破碎強度が低い琉球石灰岩碎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 の蓄積によって土粒子構造が消失し岩石化するためと考えられる。Fig.1の予測の**硬化係数** K のように、**硬化係数** K は同じ材料でも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**不可逆な体積ひずみ** ε_v^i と同期させた**硬軟化係数** K を導入する。

$$K^\alpha(t) = \frac{K_0^\alpha}{\exp\left\{\zeta^\alpha(\tilde{\varepsilon}_{v0}^i + \varepsilon_v^i(t - \Delta t))\right\}}, \quad \tilde{\varepsilon}_{v0}^i = \ln \frac{e_0}{e_0}, \quad \varepsilon_v^i = \varepsilon_v^c + \varepsilon_v^p, \quad \alpha = c, p.$$

e_0 ：初期間隙比の基準値， K_0 ： e_0 における硬軟化係数の基準値， 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。

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。

$$\frac{d\varepsilon_v}{d\sigma} = \frac{d\varepsilon_v^c}{d\sigma} + \frac{d\varepsilon_v^p}{d\sigma} + \frac{d\varepsilon_v^e}{d\sigma} = \frac{(-\sigma)^{n^c}}{(K^c)^{n^c+1}} + \frac{(-\sigma)^{n^p}}{(K^p)^{n^p+1}} + \frac{(-\sigma)^{n^e}}{(K^e)^{n^e+1}}, \quad K^\alpha(t) = \frac{K_0^\alpha}{\exp\left\{\zeta^\alpha(\tilde{\varepsilon}_{v0}^i + \varepsilon_v^i(t - \Delta t))\right\}}, \quad \alpha = c, p, e.$$

Normally consolidated Ryukyu limestone sand
(particle size = 0.85 - 2.0mm) ●： $e_0 = 1.03$, ○： $e_0 = 1.31$

Material constants

$e_0 = 1.0$, $n^c = 0.5$, $n^p = -0.6$, $n^e = -0.6$,
 $\zeta^c = 2.5$, $\zeta^p = 2.0$, $\zeta^e = 1.0$

Line: Predictions 対数間隙勾配のべき乗則は、初期間隙比の異なる圧縮性を同一の材料定数で予測できる。

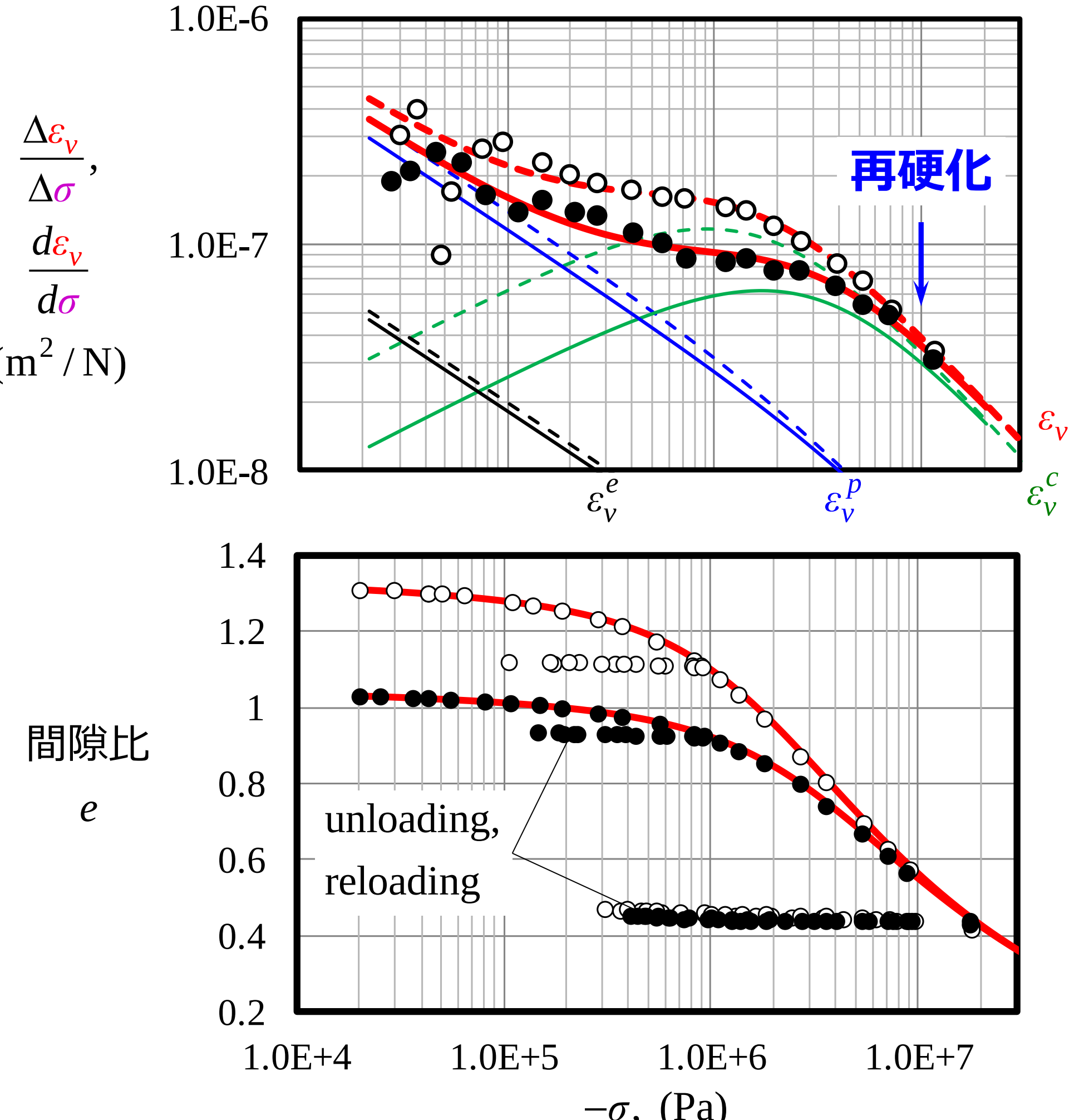


Fig.3 One-dimensional compression properties with the degradation of soil structure



Photo 1 Tested Ryukyu limestone materials



Photo 2 Compressed material

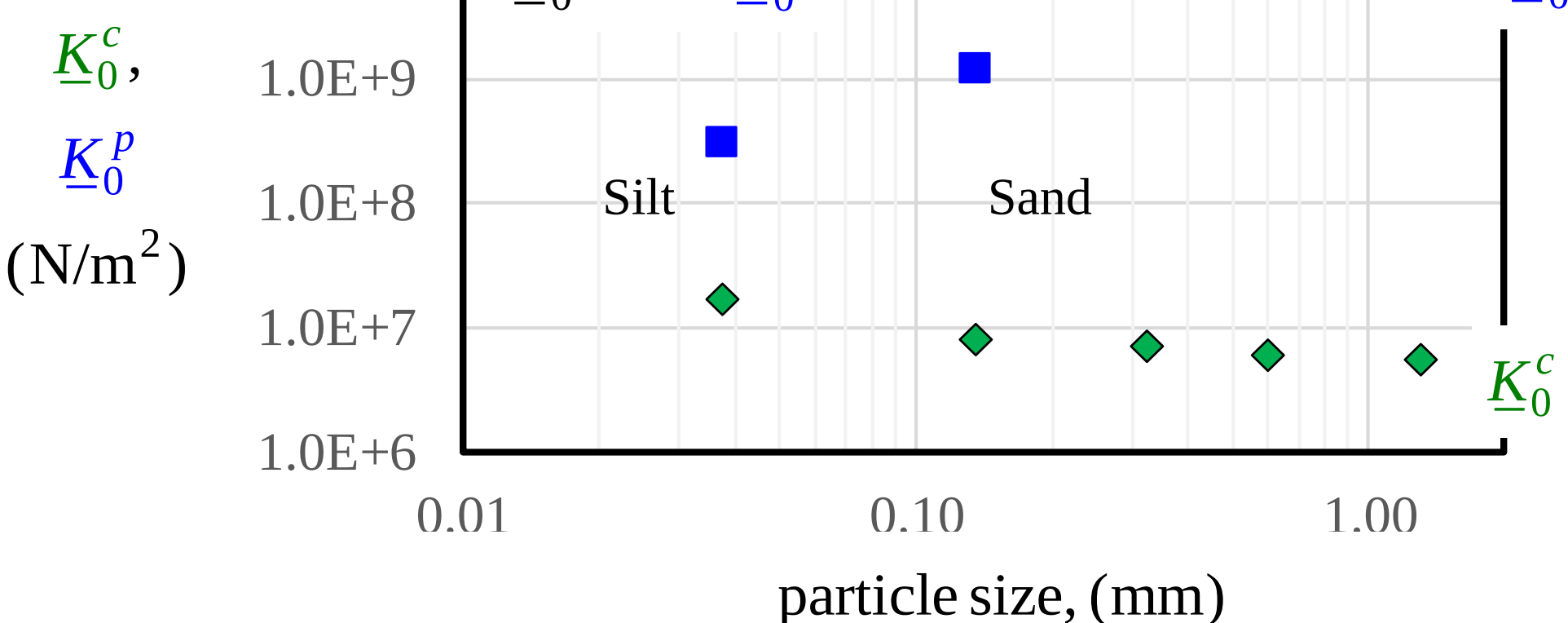


Fig.4 Hardening/softening coefficients K_0 for particle size

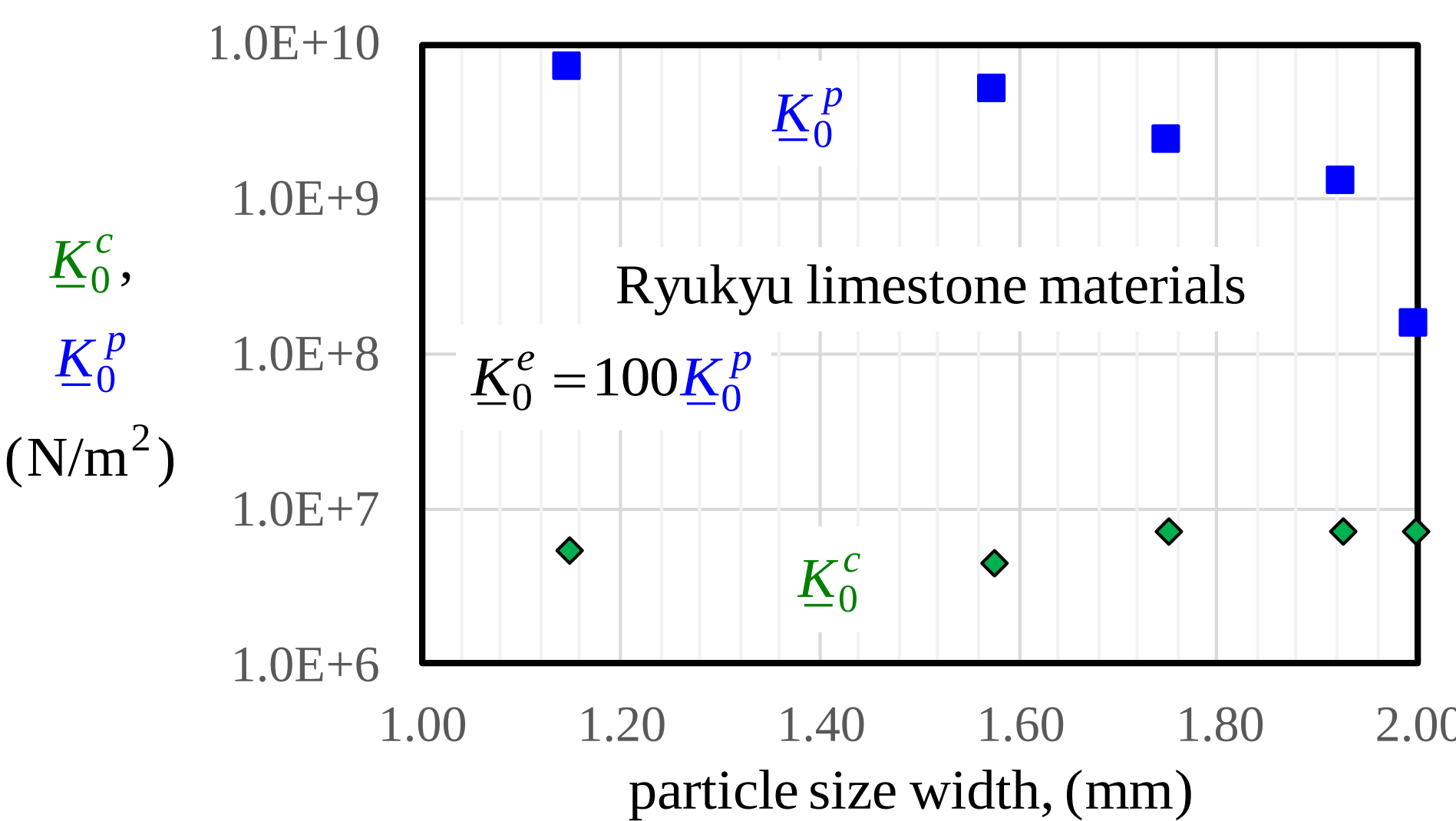


Fig.5 Hardening/softening coefficients K_0 for particle size width

土粒子径（Photo 1），**土粒子径幅**の異なる琉球石灰岩碎屑材料の圧縮性は、それぞれ**硬化指数** n ， ζ 一定の条件で予測できた。Fig.4, 5は、その予測に用いた硬・軟化係数の基準値 K_0 である。

以上のことから、鉱物組成および生成過程が同じ材料の圧縮性は、材料定数 K_0 によって次のように評価できる。

シルトのような土粒子径が小さい材料は、
・「土粒子間の相対すべりが生じ易くなる」と考えられるが、これは**硬化係数** K_0^p を小さくすることで予測できる。
・「土粒子破碎による土粒子構造の崩壊が生じ難くなる」と考えられる、これは**軟化係数** K_0^c を大きくすることで予測できる。

土粒子径幅が狭くなると、
・「土粒子間の相対すべりが生じ難くなる」と考えられるが、これは**硬化係数** K_0^p を大きくすることで予測できる。
・「土粒子破碎による土粒子構造の崩壊が生じ易くなる」と考えられるが、これは**軟化係数** K_0^c を小さくすることで予測できる。