

三軸せん断試験による豊浦砂としらすの 圧縮指数の決定

三隅 浩二* 野村 将平**

Determination of Compression Index for Toyoura Sand and Shirasu
by Triaxial Compression Test

Koji MISUMI* and Syohei NOMURA**

The determination procedure of sandy soil's compression index is proposed in this paper. At first, a series of triaxial compression test datum are obtained under constant mean normal stress condition. Secondly, this method is carried out by fitting some equations to sandy soil's shearing behaviors (i.e., dilatancy behaviors). Finally, sandy soil's compression index is obtained by relationship between maximum positive volumetric strains and initial specific volumes. The validity of this method is confirmed by applying to Toyoura sand and local soil Shirasu. And the differences of these soils' compression index are made clear by comparison with their values.

Keywords : compression index, triaxial compression test, dilatancy, Toyoura sand, Shirasu

1. はじめに

地盤の変形・破壊予測を行うためには、事前に地盤を構成する土質材料の弾塑性パラメータを正しく評価しておくことが必要である。有限要素法による予測結果は用いたパラメータの数値に大きく依存し、従って、予測の精度はどのようにしてそれらのパラメータを決めたのかに大きく左右される。

圧縮指数 λ は土要素の体積ひずみやせん断ひずみの発生量を決める重要な力学パラメータである。そこで、本研究では、拘束圧と初期体積比の異なる一連の三軸せん断試験を実施して、圧縮指数 λ を精度よく決定することを試みる。今回は、豊浦砂としらすの三軸せん断試験結果より圧縮指数 λ を決定して、比較検討を行っている。

2. 三軸せん断試験による圧縮指数 λ の決定の考え方

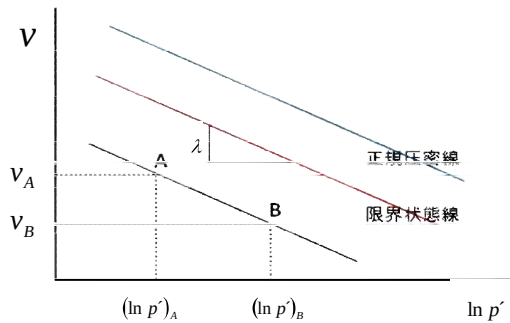
図-1 に示すように土質材料の正規圧密線と限界状態線はそれぞれ $v = N - \lambda \ln p'$, $v = \Gamma -$

2015年8月11日受理

* 海洋土木工学専攻

** 博士前期課程海洋土木工学専攻修了

$\lambda \ln p'$ と表される¹⁾．ここに， v は体積比 ($v=1+e$ ， e : 間隙比)， p' は平均有効主応力であり， N と Γ はそれぞれ $v \sim \ln p'$ 空間における正規圧密線と限界状態線の位置を決めるパラメータである． $v \sim \ln p'$ 空間では正規圧密線と限界状態線は互いに平行でその傾きを圧縮指数 λ と呼んでいる．



図－1 $v \sim \ln p'$ 関係概略図

さて， $v \sim \ln p'$ 空間において正規圧密線や限界状態線と同じ傾きを持つ直線，式(1)は無数に引くことができる²⁾．

$$v = v_\lambda - \lambda \ln p' \quad (1)$$

ここに， v_λ ($v_\lambda = v + \lambda \ln p'$) はこれらの直線の位置を表すパラメータであり，土の過圧密の程度を表す状態量である．砂質土の状態は，通常，限界状態線の下 ($v_\lambda < \Gamma$) に位置することが多いが， v_λ の値が小さければ小さいほど過圧密の程度は大きい．

図－1 において，点 A と点 B は同じ圧縮指数 λ の傾きを持つ直線上にあり，両者は v_λ の値が等しい，すなわち，過圧密の程度が等しい．過圧密の程度が等しければ，せん断に伴って発生する体積変化（ダイレイタンス挙動）も等しくなることがわかっている²⁾．そこで，本研究では，圧縮指数 λ の決定にダイレイタンス挙動が等しい

この A－B 線を利用する．

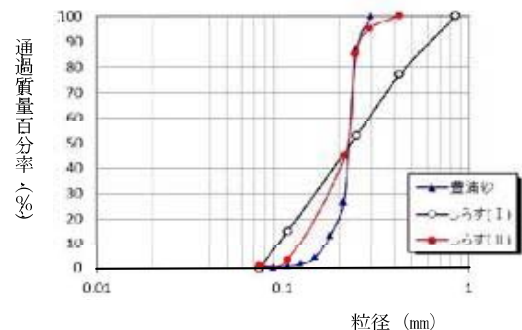
以上の考え方にに基づき，一連の三軸せん断試験の試験結果より砂質土の圧縮指数 λ を決定する方法を提案してきている^{3), 4)}．今，せん断開始時点の拘束圧を p_0' ，体積比を v_0 ，過圧密の程度を表す状態量を $v_{\lambda 0}$ ($v_{\lambda 0} = v_0 + \lambda \ln p_0'$) で表すことにする．今回は，供試体の応力とひずみの状態が比較的均質な状況で圧縮指数 λ を決定するため，供試体がせん断中に圧縮から膨張に転ずる時のダイレイタンスに着目して，圧縮指数 λ を決定する．すなわち，せん断の前半に発生する圧縮時の最大体積ひずみ $\varepsilon_{v \max}$ に着目し， $(\varepsilon_{v \max})_A = (\varepsilon_{v \max})_B$ ならば $(v_{\lambda 0})_A = (v_{\lambda 0})_B$ と考えて， $(v_0 + \lambda \ln p_0')_A = (v_0 + \lambda \ln p_0')_B$ を変形して得た式(2)より圧縮指数 λ を決定する．

$$\lambda = \frac{(v_0)_A - (v_0)_B}{(\ln p_0')_B - (\ln p_0')_A} \quad (2)$$

3. 豊浦砂としらすの三軸せん断試験結果

3.1 試料の概要

試料には，市販されている豊浦砂と鹿児島県垂水市で採取された地山しらすを用いた．地山しらすは，850 μm ふるいを通過し 75 μm ふるいに残留したものをしらす(I)，豊浦砂の粒度分布に近づけたものをしらす(II)とした．図－2 は今回用いた



図－2 試料の粒径加積曲線

試料の粒径加積曲線を示す。しらす(I)は良配合、しらす(II)は貧配合となっている。表-1には今回用いた試料の土粒子の密度、最大間隙比、最小間隙比を示す。三軸供試体は試料を水中落下させてモールドに堆積したものを凍結して作製した。

表-1 試料の物理的性質

	豊浦砂	しらす(I)	しらす(II)
密度(g/cm ³)	2.64	2.42	2.39
最大間隙比	0.992	1.76	1.73
最小間隙比	0.632	0.998	0.783

3. 2 豊浦砂の三軸せん断試験結果

図-3, 図-4 は, 拘束圧一定排水三軸せん断試験より得られた豊浦砂の試験結果を示す。図-3 (a) と (b) は, 拘束圧 p_0' が49.0kPaの時の応力比 η' ~せん断ひずみ ε_s 関係と体積ひずみ ε_v ~せん断ひずみ ε_s 関係を示す。一方, 図4-(a) と (b) は, 拘束圧 p_0' が98.1kPaの時の応力比 η' ~せん断ひずみ ε_s 関係と体積ひずみ ε_v ~せん断ひずみ ε_s 関係を示す。

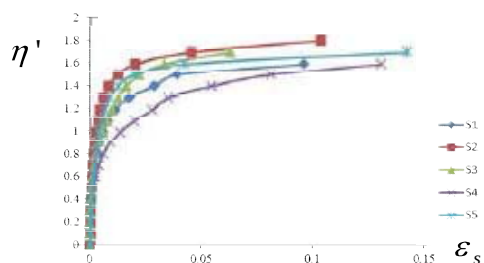


図-3 (a) 豊浦砂の $\eta' \sim \varepsilon_s$ 関係 ($p_0' = 49.0$ kPa)

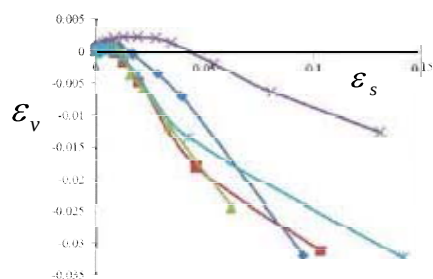


図-3 (b) 豊浦砂の $\varepsilon_v \sim \varepsilon_s$ 関係 ($p_0' = 49.0$ kPa)

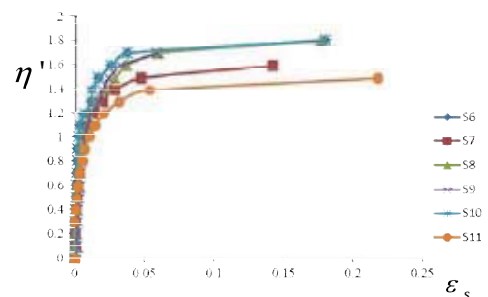


図-4 (a) 豊浦砂の $\eta' \sim \varepsilon_s$ 関係 ($p_0' = 98.1$ kPa)

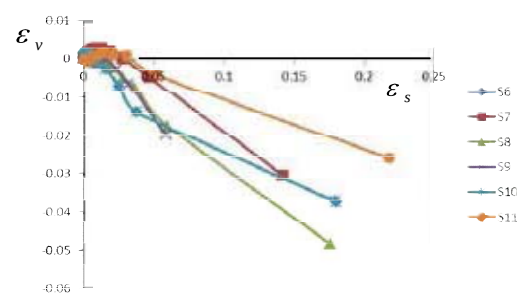


図-4 (b) 豊浦砂の $\varepsilon_v \sim \varepsilon_s$ 関係 ($p_0' = 98.1$ kPa)

3. 3 しらす(I)の三軸せん断試験結果

図-5, 図-6 は, 拘束圧一定排水三軸せん断試験より得られたしらす(I)の試験結果を示す。図5-(a) と (b) は, 拘束圧 p_0' が49.0kPaの時の応力比 η' ~せん断ひずみ ε_s 関係と体積ひずみ ε_v ~せん断ひずみ ε_s 関係を示す。一方, 図-6 (a) と (b) は, 拘束圧 p_0' が98.1kPaの時の応力比 η' ~せん断ひずみ ε_s 関係と体積ひずみ ε_v ~せん断ひずみ ε_s 関係を示す。

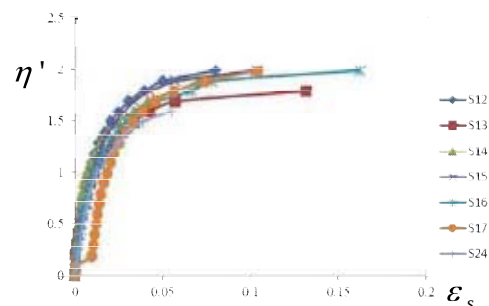


図-5 (a) しらす(I)の $\eta' \sim \varepsilon_s$ 関係 ($p_0' = 49.0$ kPa)

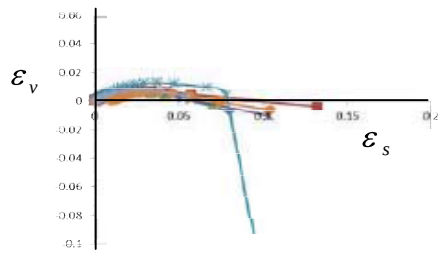


図-5 (b) しらす(I)の $\varepsilon_v \sim \varepsilon_s$ 関係 ($p'_0 = 49.0 \text{ kPa}$)

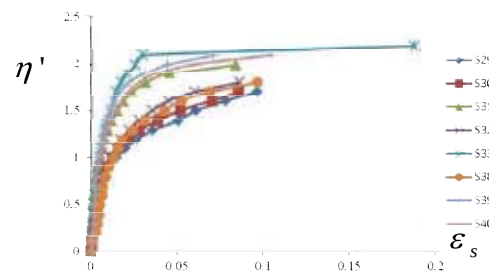


図-7 (a) しらす(II)の $\eta' \sim \varepsilon_s$ 関係 ($p'_0 = 49.0 \text{ kPa}$)

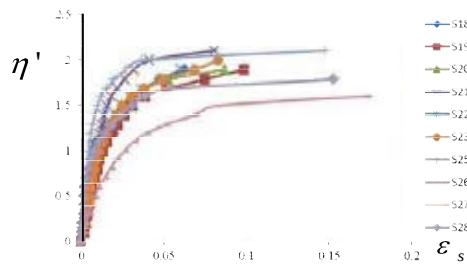


図-6 (a) しらす(I)の $\eta' \sim \varepsilon_s$ 関係 ($p'_0 = 98.1 \text{ kPa}$)

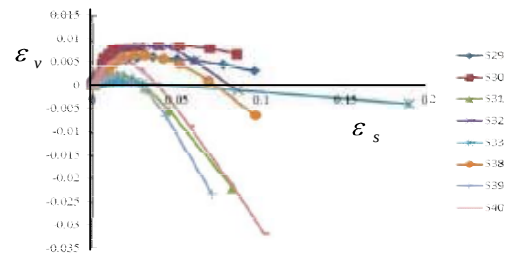


図-7 (b) しらす(II)の $\varepsilon_v \sim \varepsilon_s$ 関係 ($p'_0 = 49.0 \text{ kPa}$)

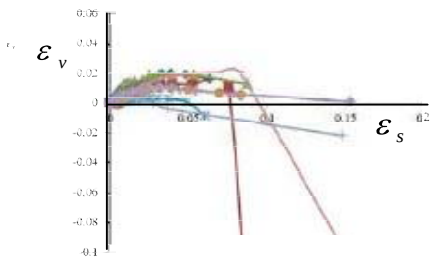


図-6 (b) しらす(I)の $\varepsilon_v \sim \varepsilon_s$ 関係 ($p'_0 = 98.1 \text{ kPa}$)

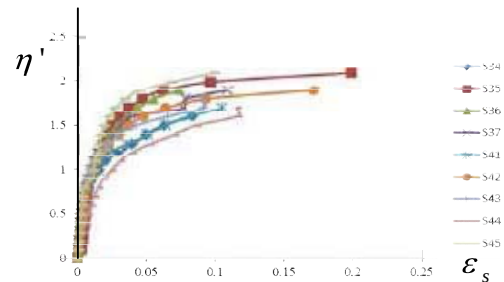


図-8 (a) しらす(II)の $\eta' \sim \varepsilon_s$ 関係 ($p'_0 = 98.1 \text{ kPa}$)

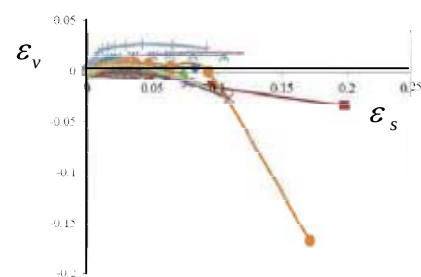


図-8 (b) しらす(II)の $\varepsilon_v \sim \varepsilon_s$ 関係 ($p'_0 = 98.1 \text{ kPa}$)

3. 4 しらす(II)の三軸せん断試験結果

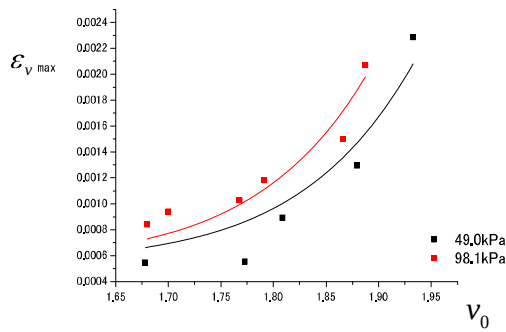
図-7, 図-8は, 拘束圧一定排水三軸せん断試験より得られたしらす(II)の試験結果を示す. 図-7 (a)と(b)は, 拘束圧 p'_0 が49.0kPaの時の応力比 η' ~せん断ひずみ ε_s 関係と体積ひずみ ε_v ~せん断ひずみ ε_s 関係を示す. 一方, 図-8 (a)と(b)は, 拘束圧 p'_0 が98.1kPaの時の応力比 η' ~せん断ひずみ ε_s 関係と体積ひずみ ε_v ~せん断ひずみ ε_s 関係を示す.

なお, 図-2~図-8に示す拘束圧一定三軸せん断試験結果(S1~S45)の詳細は, 参考文献5)にまとめられている.

4. 豊浦砂としらすの圧縮指数 λ の決定

図-9は, 豊浦砂の $\varepsilon_{v \max} \sim v_0$ 関係を示す. $\varepsilon_{v \max}$ は三軸供試体が圧縮から膨張に転ずる時まで

じた最大の体積ひずみ、 v_0 はせん断開始時の体積比である．図中の 2 つの曲線は，拘束圧 p_0' が 49.0kPa の時と拘束圧 p_0' が 98.1kPa の時の試験結果に実験公式を当てはめたものである．下方に位置する曲線が拘束圧 49.0kPa の時，上方に位置する曲線が拘束圧 98.1kPa の時に得られた実験公式を示しており，両者は互いに平行であり，これらの曲線の隔たりが，式 (2) の左辺の分子 $(v_0)_A - (v_0)_B$ となっている．



図－9 豊浦砂の $\varepsilon_{v \max} \sim v_0$ 関係

実験公式の当てはめの手順は以下の通りである．まず， $(p_0')_B = 98.1\text{kPa}$ の結果に実験公式 (3) を当てはめる．ただし，式 (3) 中のパラメータ c の値は，図－9 中の試験結果の中で一番小さい $\varepsilon_{v \max}$ の値 ($c = 0.000545$) を採用した．結局，非線形最小二乗法を利用して式 (3) を当てはめることにより， $a = 9.14 \times 10^{-9}$ ， $b = 18.25922$ が得られた．

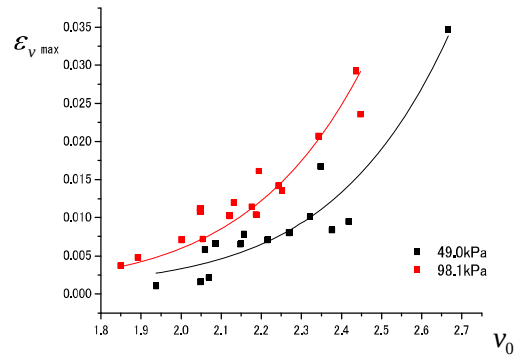
$$\varepsilon_{v \max} = a v_0^b + c \quad (3)$$

次に， $(p_0')_A = 49.0\text{kPa}$ の結果に実験公式 (4) を当てはめて，式 (4) 中のパラメータ $d = -0.03781$ を決定した．ここでは，式 (4) 中のパラメータ a ， b ， c の値は式 (3) と同じ値を用いている．先に述べた通り， $-d$ は式 (3) と式 (4) の示す曲線の隔たりであり， $-d = (v_0)_A - (v_0)_B$ である．以上の実験公式の当てはめの結果を用いて，式 (2) より，豊浦砂の圧縮指数 $\lambda = 0.055$ を決定することがで

きた．

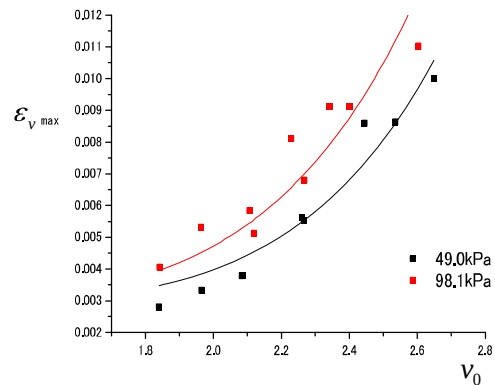
$$\varepsilon_{v \max} = a(v_0 - d)^b + c \quad (4)$$

図－10，図－11 は，しらす(I)としらす(II)の $\varepsilon_{v \max} \sim v_0$ 関係を示す．豊浦砂の場合と同様に図－10，図－11 の試験結果にも実験公式を当てはめている．いずれの場合も図－9 と同様に，下方に位置する曲線が拘束圧 49.0kPa の時，上方に位置する曲線が拘束圧 98.1kPa の時に得られた実験公式を示している．



図－10 しらす(I)の $\varepsilon_{v \max} \sim v_0$ 関係

図－10 の試験結果に実験公式を当てはめた結果， $a = 1.66 \times 10^{-6}$ ， $b = 10.05044$ ， $c = 0.00215$ ， $d = -0.17553$ が得られ，式 (2) より結局，しらす(I)の圧縮指数 $\lambda = 0.253$ を決定することができた．



図－11 しらす(II)の $\varepsilon_{v \max} \sim v_0$ 関係

図－1 1 の試験結果に実験公式を当てはめた結果、 $a = 0.00001$ ， $b = 6.7264$ ， $c = 0.002802$ ， $d = -0.14744$ が得られ、式(2)より、しらす(Ⅱ)の圧縮指数 $\lambda = 0.213$ を決定することができた。

以上の結果をまとめると、豊浦砂より $\lambda = 0.055$ ，しらす(Ⅰ)より $\lambda = 0.253$ ，しらす(Ⅱ)より $\lambda = 0.213$ が得られた。

豊浦砂としらす(Ⅰ)を比較すると、豊浦砂よりもしらす(Ⅰ)の方が圧縮指数 λ の値が 5 倍弱大きい。実験結果を見てわかるように、しらす(Ⅰ)は、豊浦砂と比べると、体積が圧縮している時の体積ひずみの発生量が一桁程度大きい。そのことが得られた圧縮指数 λ の値に反映されたものと考えられる。

しらす(Ⅱ)と豊浦砂は、粒度分布がほぼ等しいにもかかわらず圧縮指数 λ の値に大きな隔たりがあった。すなわち、豊浦砂よりもしらす(Ⅰ)の方が 4 倍弱大きい。これは粒子形状の違いとしらすの粒子破碎によるものと考えられる。

粒度分布の異なるしらす(Ⅰ)としらす(Ⅱ)にも得られた圧縮指数 λ の値に違いが認められた。すなわち、良配合のしらす(Ⅰ)の方が、貧配合のしらす(Ⅱ)よりも 2 割程度大きい。

以上の研究成果は、地山で採取されたしらすを有効利用する際の一情報として役立てることができ。

5. まとめ

1. 拘束圧 p_0' と体積比 v_0 の異なる一連の拘束圧一定排水三軸せん断試験の結果を用いて、過圧密の程度の等しい v_0 の隔たりを求め、式(2)より、豊浦砂と粒度分布の異なる 2 種類のしらすの圧縮指数 λ を決定することができた。
2. 供試体の応力とひずみの状態が均質だと思われるせん断初期の試験データ $\varepsilon_{v \max}$ に着目し

ていること、非線形最小二乗法を駆使していることから、精度よく圧縮指数 λ の値を決定することができた。

3. 豊浦砂より $\lambda = 0.055$ ，しらす(Ⅰ)より $\lambda = 0.253$ ，しらす(Ⅱ)より $\lambda = 0.213$ が得られた。すなわち、しらす(Ⅰ)，しらす(Ⅱ)，豊浦砂の順に圧縮指数 λ の値が大きかった。
4. 豊浦砂としらす(Ⅰ)の圧縮指数 λ の比較より、豊浦砂よりもしらす(Ⅰ)の方が圧縮指数 λ の値が 5 倍弱大きいことがわかった。
5. 豊浦砂としらす(Ⅱ)の圧縮指数 λ の比較より、粒度分布を揃えたにも拘らず、豊浦砂よりもしらす(Ⅱ)の方が圧縮指数 λ の値が 4 倍弱大きいことがわかった。
6. しらす(Ⅰ)としらす(Ⅱ)の圧縮指数 λ の比較より、貧配合のしらす(Ⅱ)よりも良配合のしらす(Ⅰ)の方が圧縮指数 λ の値が 2 割程度大きいことがわかった。

参考文献

- 1) A. Schofield and P. Wroth, Critical State Soil Mechanics, McGRAW-Hill Publishing Company Limited, pp.124-127 (1968).
- 2) J. H. Atkinson and P. L. Bransby, The Mechanics of Soils, An Introduction to Critical State Soil Mechanics, McGRAW-Hill Book Company Limited, pp.235-262 (1978).
- 3) 三隅浩二，土質材料の評価方法，特許第 4691663 号 (2011)。
- 4) 三隅浩二，野村将和，疋田達郎，三軸圧縮試験による砂質土の圧縮指数の決定，鹿児島大学工学部研究報告，第 56 号，pp. 1-8 (2014)。
- 5) 野村将和，最小二乗法を駆使した砂質土のせん断試験データ解析，鹿児島大学平成 26 年度修士論文 (2015)。