

一面せん断試験による特殊土しらすの 圧縮指数の決定

三隅 浩二* 古川 大嗣**

Determination of Compression Index for Local Soil Shirasu
by Box Shear Test

Koji MISUMI* and Taiji FURUKAWA**

The determination procedure of sandy soil's compression index is proposed in this paper. At first, a series of box shear test datum are obtained under constant perpendicular 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 compressive displacements and initial specific volumes. The validity of this method is confirmed by applying to local soil Shirasu. And the relation between Shirasu's compression index and degree of saturation is made clear for the first time.

Keywords : compression index, box shear test, dilatancy, local soil Shirasu, degree of saturation

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。

そこで、本研究では、鉛直応力と初期体積比の異

なる一連の一面せん断試験を実施して、圧縮指数 λ を決定することを試みる。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定める重要な力学パラメータである。今回は、しらすの一面せん断試験結果より圧縮指数 λ を決定して、不飽和度 S_r との関係を明らかにしている。

2. 一面せん断試験による圧縮指数 λ の決定の考え方

土質材料の正規圧密線と限界状態線はそれぞれ図-1 に示すように $v \sim \ln \sigma$ 空間において直線で表すことができる。ここに、 v は体積比 ($v = 1 + e$, e : 間隙比), σ は鉛直応力である。正規圧密線と

2015年8月11日受理

* 海洋土木工学専攻

** 鹿児島市役所

限界状態線は互いに平行でその傾きを圧縮指数と呼び、記号 λ で表す¹⁾。

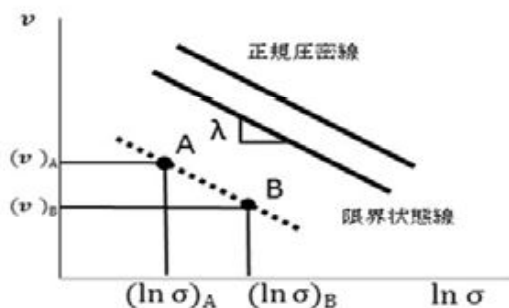


図-1 $v \sim \ln \sigma$ 関係概略図

さて、 $v \sim \ln \sigma$ 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 $v = v_\lambda - \lambda \ln \sigma$ は無数に引くことができる。ここに v_λ ($v_\lambda = v + \lambda \ln \sigma$) はこれらの直線の位置を表すパラメータであり、土質材料の過圧密の程度を表す状態量である²⁾。一般に、砂質土のせん断開始時点の状態は限界状態線の下方に位置し、 v_λ の値が小さければ小さいほど過圧密の程度が大きくなっている。

図-1において、点Aと点Bは圧縮指数 λ の傾きを持つ同一の直線上にあり、両者は v_λ の値が等しく、過圧密の程度が同程度である。過圧密の程度が同程度であれば、せん断に伴って発生する体積変化(ダイレイタンシー挙動)も同等である²⁾。そこで、本研究では、圧縮指数 λ の決定にダイレイタンシー挙動が同等なこのA-B線を利用する。以上の考え方にに基づき、一連の一面せん断試験の試験データ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⁾。

今、せん断開始時点の鉛直応力 σ_0 (定圧なので $\sigma = \sigma_0 = \text{const.}$)、体積比を v_0 、過圧密の程度を表す状態量を $v_{\lambda 0}$ ($v_{\lambda 0} = v_0 + \lambda \ln \sigma_0$)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点のダイレイタンシーに着目して、圧縮指数 λ を決定する。この方法はせん断の前半に発生する圧縮時の最大鉛直変位 y_{max} に着目して、 $(y_{\text{max}})_A = (y_{\text{max}})_B$ ならば $(v_{\lambda 0})_A = (v_{\lambda 0})_B$ と考えて、 $(v_0)_A + \lambda (\ln \sigma_0)_A = (v_0)_B + \lambda (\ln \sigma_0)_B$ の関係式より、せん断中に発揮される圧縮指数 λ を決定する。この関係式を λ で整理すると、結局、式(1)が得られる。

$$\lambda = \frac{(v_0)_A - (v_0)_B}{(\ln \sigma_0)_B - (\ln \sigma_0)_A} \quad (1)$$

3. 飽和度の異なるしらすの圧縮指数 λ の決定

3.1 一面せん断試験の概要

今回用いた試料は、鹿児島県に広く分布するしらすを使用している。しらすの土粒子の密度 ρ_s は 2.42 g/cm^3 、最大間隙比は $e_{\text{max}} = 1.76$ 、最小間隙比は $e_{\text{min}} = 0.998$ である。供試体の飽和度と相対密度は、供試体作製時に調整することができる。今回は、飽和度 $S_r = 10\%, 30\%, 50\%, 70\%$ の4ケースについて、各々相対密度 $D_r = 10\% \sim 90\%$ の9段階に変化させて試験を行った。粒度分布を統一するため、ふるい分け試験では、 $850 \mu\text{m}$ を通過し $425 \mu\text{m}$ 、 $250 \mu\text{m}$ 、 $106 \mu\text{m}$ 、 $75 \mu\text{m}$ の各ふるいに残る試料の割合を一定にして供試体を作製した。この試料の割合は質量の割合であり、 $425 \mu\text{m}$ ふるいに23%、 $250 \mu\text{m}$ ふるいに24%、 $106 \mu\text{m}$ ふるいに38%、 $75 \mu\text{m}$ ふるいに15%残留するように決めている。

一面せん断試験は定圧一面せん断試験を実施した。鉛直応力 σ は $\sigma = \sigma_0 = 200 \text{ kPa}$ と $\sigma = \sigma_0 = 400 \text{ kPa}$ の2ケースで試験を行った。図-2は今回使用した一面せん断試験の概略図である。図-3はせん断箱の拡大図を示している。

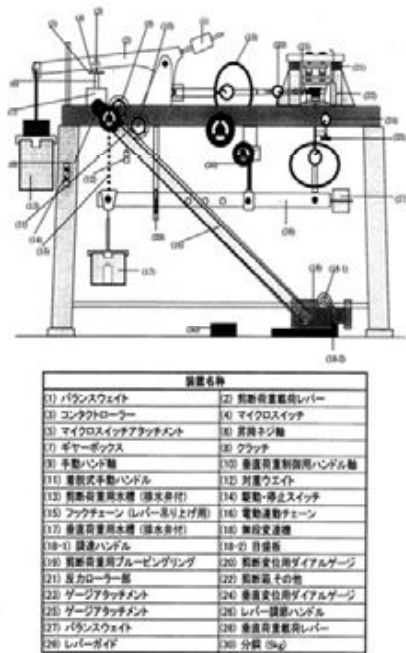


図2 一面せん断試験装置の概略図

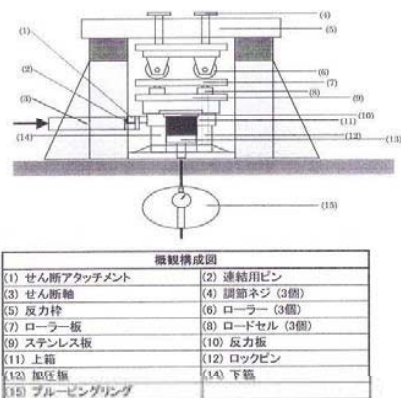


図-3 せん断箱の拡大図

定圧一面せん断試験の手順は以下の通りである。まず、直径6cm、高さ2cmの円筒形になるように、締固め法を用いて供試体を設置した。供試体を設置したのち、鉛直荷重用水槽に分銅を乗せ、ハンドルを回して加圧版を押し上げ、供試体に鉛直応力 $P = \sigma_0 A$ (τ :せん断応力, A :供試体の断面積)

を加えた。このとき、载荷後の供試体の圧縮量からせん断開始時点の体積比 v_0 を求めることができる。次に、1分間に0.2mmの速度でせん断変位 x を与えた。せん断変位増分 Δx が0.2mmの間隔で鉛直変位 y 、せん断力 $T = \tau A$ (τ :せん断応力) を記録し、せん断変位 x が7.0mmになった時点で試験を終了した。図-4-1と図-4-2は飽和度10%、鉛直応力200kPaの場合の応力比 $\tau / \sigma \sim$ せん断変位 x 関係と鉛直変位 $y \sim$ せん断変位 x 関係の試験結果を示す。図-4-3と図-4-4は飽和度10%、鉛直応力400kPaのときの応力比 $\tau / \sigma \sim$ せん断変位 x 関係と鉛直変位 $y \sim$ せん断変位 x 関係の試験結果である。同様に、図-5-1～図-5-4は飽和度30%の場合、図-6-1～図-6-4は飽和度50%の場合、図-7-1～図-7-4は飽和度70%の場合の試験結果を示している。

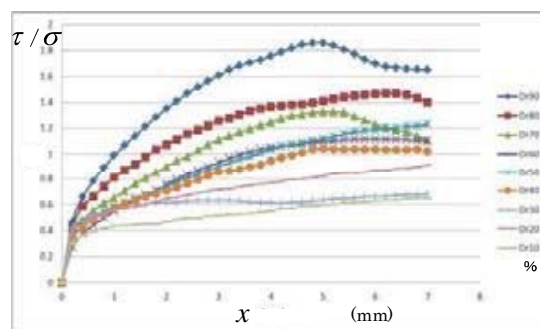


図-4-1 $\tau / \sigma \sim x$ 関係 (200kPa, $S_r = 10\%$)

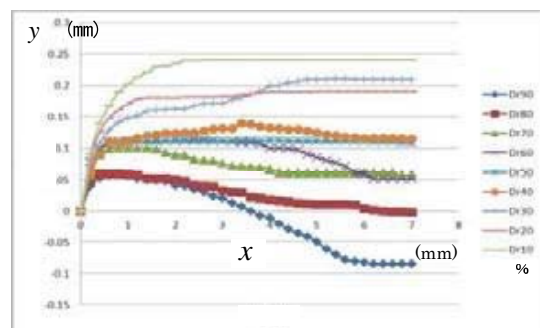


図-4-2 $y \sim x$ 関係 (200kPa, $S_r = 10\%$)

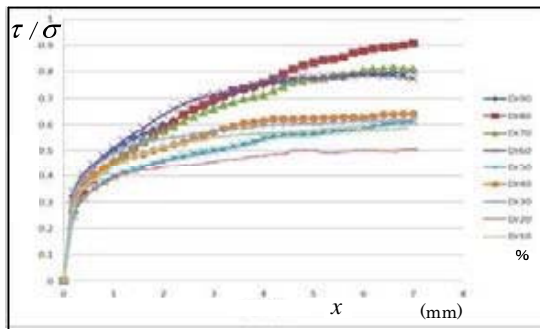


図-4-3 $\tau/\sigma \sim x$ 関係 (400kPa, $S_r = 10\%$)

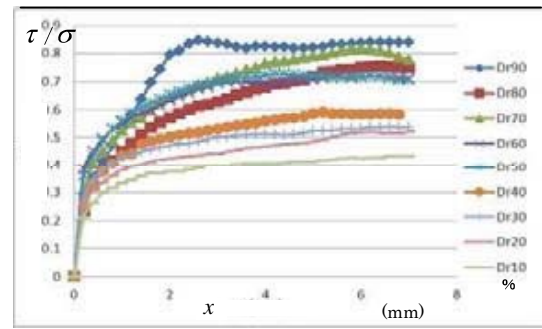


図-5-3 $\tau/\sigma \sim x$ 関係 (400kPa, $S_r = 30\%$)

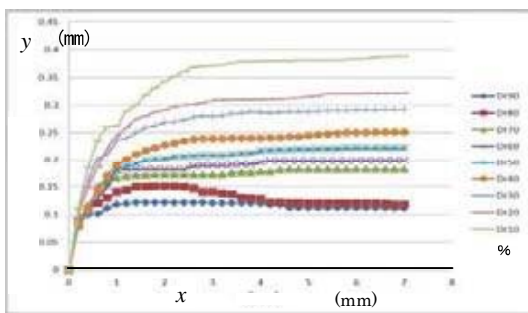


図-4-4 $y \sim x$ 関係 (400kPa, $S_r = 10\%$)

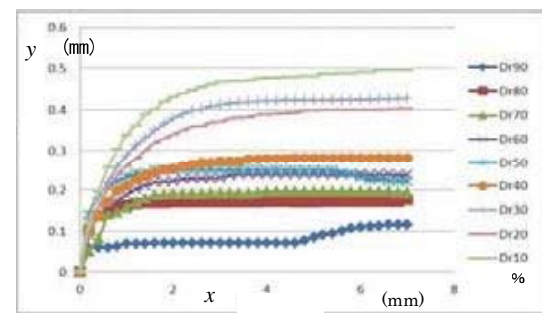


図-5-4 $y \sim x$ 関係 (400kPa, $S_r = 30\%$)

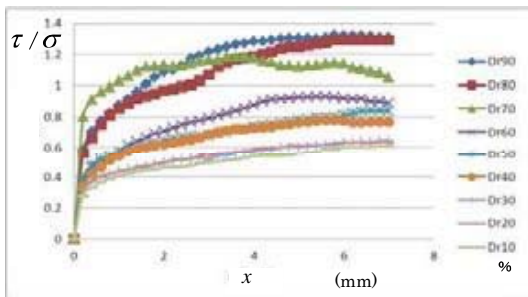


図-5-1 $\tau/\sigma \sim x$ 関係 (200kPa, $S_r = 30\%$)

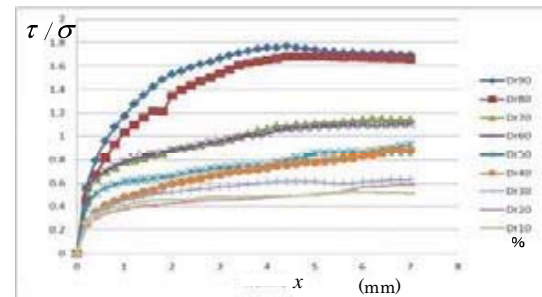


図-6-1 $\tau/\sigma \sim x$ 関係 (200kPa, $S_r = 50\%$)

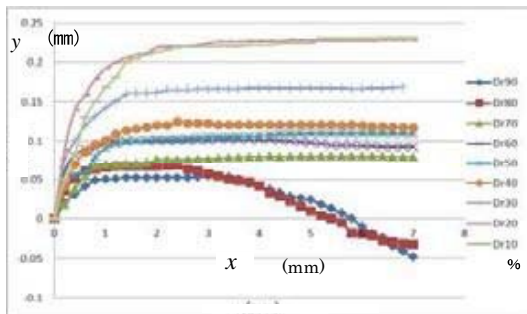


図-5-2 $y \sim x$ 関係 (200kPa, $S_r = 30\%$)

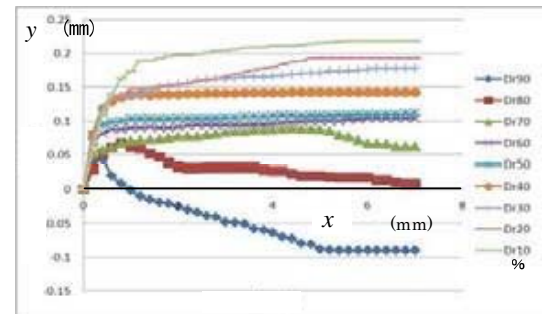


図-6-2 $y \sim x$ 関係 (200kPa, $S_r = 50\%$)

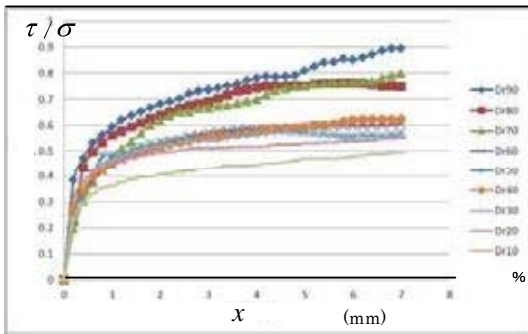


図-6-3 $\tau/\sigma \sim x$ 関係(400kPa, $S_r = 50\%$)

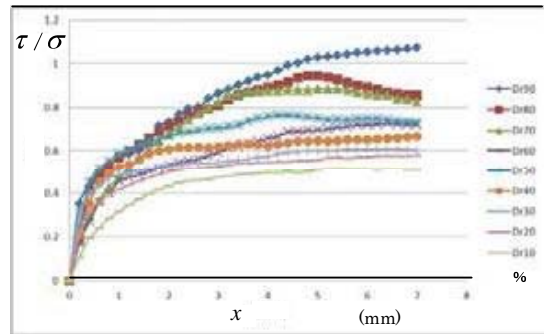


図-7-3 $\tau/\sigma \sim x$ 関係(400kPa, $S_r = 70\%$)

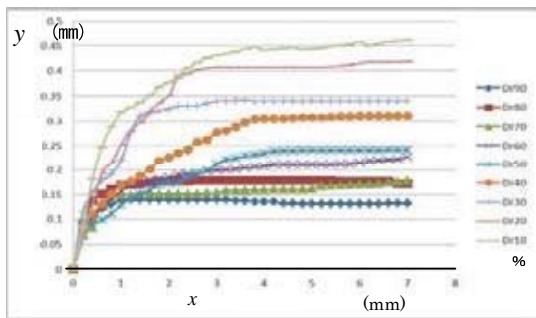


図-6-4 $y \sim x$ 関係(400kPa, $S_r = 50\%$)

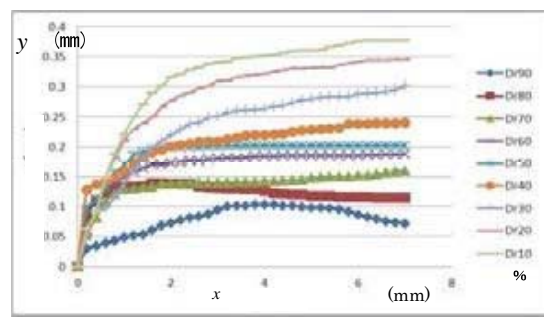


図-7-4 $y \sim x$ 関係(400kPa, $S_r = 70\%$)

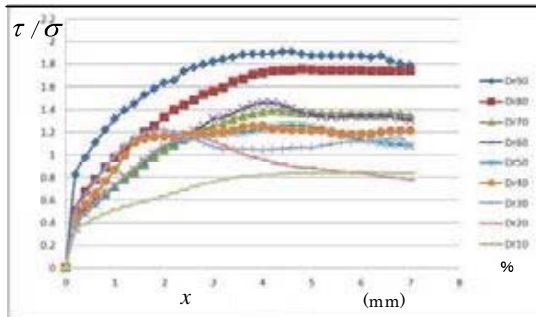


図-7-1 $\tau/\sigma \sim x$ 関係(200kPa, $S_r = 70\%$)

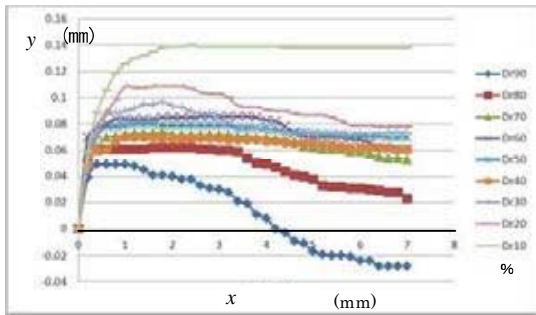


図-7-2 $y \sim x$ 関係(200kPa, $S_r = 70\%$)

3.2 しらすの圧縮指数 λ の決定

圧縮指数 λ はせん断時における土要素の体積ひずみやせん断ひずみの発生量を決める塑性理論の硬化則に関わる重要な力学パラメータである。前述したように、この圧縮指数 λ を過圧密の程度 $v_{\lambda 0}$ ($v_{\lambda 0} = v_0 + \lambda \ln \sigma_0$) の等しい2組の体積比 (v_0)_A, (v_0)_B と鉛直応力 (σ_0)_A, (σ_0)_B の値を用いて式(1)より決定することができる。

図-8-1は飽和度が10%の場合において、供試体が圧縮から膨張に転ずる時まで生じた最大の圧縮鉛直変位 y_{\max} とせん断開始時の体積比 v_0 の関係を示している。下側の曲線が (σ_0)_A = 200 kPa, 上側の曲線が (σ_0)_B = 400 kPaの結果であり、それぞれに非線形最小二乗法を適用して、互いに平行な曲線を当てはめている。なお、これらの曲線の隔たりが式(1)の右辺の (v_0)_A - (v_0)_B となっている。

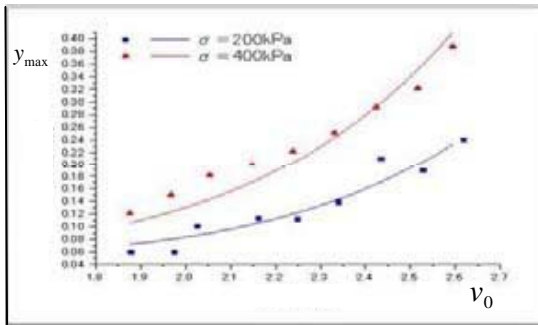


図-8-1 $S_r = 10\%$ の時の $y_{\max} \sim v_0$ 関係

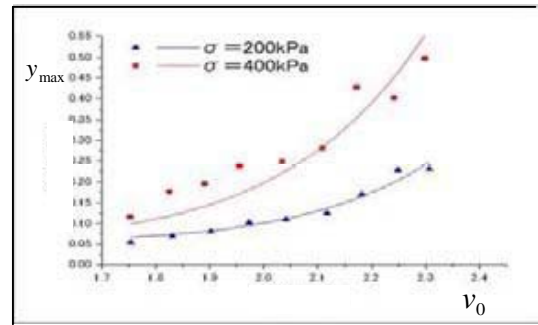


図-8-2 $S_r = 30\%$ の時の $y_{\max} \sim v_0$ 関係

曲線の当てはめの手順は以下の通りである. まず, 飽和度が10%の試験結果の中から y_{\max} の最小値を選んで式(2)中の c を決定した. 次に, $(\sigma_0)_A = 200$ kPaの結果に実験公式(2)を当てはめて, 式(2)中のパラメータ a , b を決定した.

$$\varepsilon_{v_{\max}} = av_0^b + c \quad (2)$$

最後に, 得られたパラメータ $a = 0.00019$, $b = 7.18297$, $c = 0.059$ を用いて, $(\sigma_0)_B = 400$ kPaの結果に実験公式(3)を当てはめて, 式(3)中のパラメータ $d = 0.26329$ を決定した.

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

実は, パラメータ d は式(3)と式(4)の隔たりであり, $d = (v_0)_A - (v_0)_B$ である. 以上の結果より式(1)を用いて $\lambda = 0.380$ を決定することができた.

図-8-2, 図-8-3, 図-8-4は, 飽和度が30%, 50%, 70%の場合について, 同様にして圧縮指数 λ の決定を試みた結果である. 表-1にそれぞれの飽和度におけるフィッティングパラメータのまとめを示す.

表-1 フィッティングパラメータのまとめ

Sr(%)	a	b	c	d
10	0.00019	7.18297	0.059	0.26329
30	0.00005	9.90299	0.054	0.23535
50	0.00027	8.99478	0.042	0.22309
70	0.00001	14.53086	0.049	0.20796

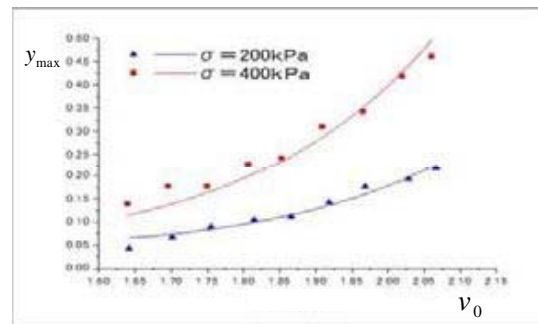


図-8-3 $S_r = 50\%$ の時の $y_{\max} \sim v_0$ 関係

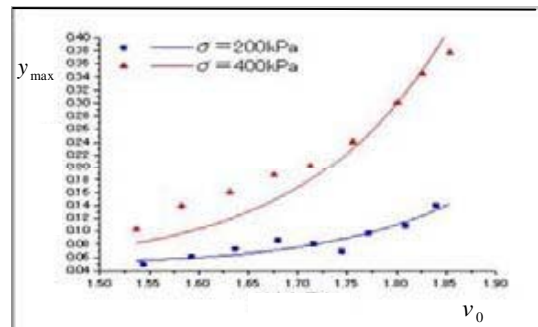


図-8-4 $S_r = 70\%$ の時の $y_{\max} \sim v_0$ 関係

3.3 圧縮指数 λ と飽和度 S_r の関係

結局, $S_r = 10\%$ のとき $\lambda = 0.380$, $S_r = 30\%$ のとき $\lambda = 0.340$, $S_r = 50\%$ のとき $\lambda = 0.322$, $S_r = 70\%$ のとき $\lambda = 0.300$ を決定することができた.

図-9は圧縮指数 λ と飽和度 S_r の関係を表している. この図より, 飽和度 S_r の値が増加するにつ

れて圧縮指数 λ の値が次第に減少していることがわかる。

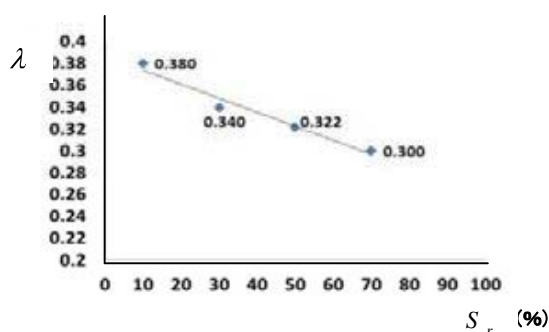


図-9 $\lambda \sim S_r$ 関係

そこで、 $S_r = 70\%$ 以下の飽和度で求められた $\lambda \sim S_r$ 関係に線形最小二乗法を適用して、飽和度 S_r が 70% より大きい時の圧縮指数 λ を外挿法により推定することを試みた。すなわち、線形最小二乗法による直線の当てはめにより、図-9に示す直線(式(4))を求めることができた。

$$\lambda = -0.0013 S_r + 0.3867 \quad (4)$$

本研究室では飽和度をできるだけ100%に近づけた供試体による三軸せん断試験を別途実施して、しらすの圧縮指数 λ を求めている⁹⁾。今回の一面せん断試験の結果から得られた式(4)による飽和度 $S_r = 100\%$ の時の推定値 $\lambda = 0.257$ は、三軸せん断試験で得られた値 $\lambda = 0.253$ に非常に近い。この事より、式(1)～式(4)に基づく圧縮指数 λ の決定法の有効性を確認することができる。

4. まとめ

1. 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結果、すなわち、せん断中に供試体が圧縮から膨張に転ずる時の最大鉛直変位 y_{\max} をせん断開始時の体積比 v_0 、垂直応力 σ_0 で整理することにより、過圧密の程度の同等な v_0 の隔たりを求め、式(1)より、し

らすの圧縮指数 λ を決定することができた。

2. 今回は、4 ケースの飽和度 S_r (10% , 30% , 50% , 70%)に対してしらすの圧縮指数 λ を決定することができた。また、得られた圧縮指数 λ と飽和度 S_r の関係を直線近似して外挿することにより、 70% より大きい飽和度 S_r の圧縮指数 λ を推定する式、式(4)を得ることができた。
3. 一面せん断試験結果から得られた推定式による飽和度 $S_r = 100\%$ のときの圧縮指数 λ の推定値が、飽和度をできるだけ100%に近づけた供試体による三軸せん断試験より得られた圧縮指数 λ の値に非常に近いことから、提案方法の有効性を確認することができた。

謝辞

本研究に協力して頂いた海洋土木工学科の卒業生、藺田祐希氏に感謝致します。

参考文献

- 1) A. Schofield and P. Wroth, Critical State Soil Mechanics, McGRAW-Hill Publishing Company Limited, pp.89-166 (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.184-291 (1978).
- 3) 三隅浩二, 古川大嗣, 野村将和, 一面せん断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. 9-16 (2014).
- 4) 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).

