

一面せん断試験による砂質土の 圧縮指数の決定

三隅 浩二* 古川 大嗣** 野村 将平***

Determination of Compression Index for Sandy Soil
by Box Shear Test

Koji MISUMI*, Taiji FURUKAWA** and Syohei NOMURA***

The determination procedure of sandy soil's compression index is proposed newly 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 Toyoura standard sand.

Keywords : compression index, box shear test, dilatancy, Toyoura standard sand

1. はじめに

1.1 研究の概要

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、土要素のひずみの発生量に関わる重要なパラメータ圧縮指数 λ を決定するユニークな方法^{1) 2)}を提案する。そして、豊浦標準砂の一面せん断試験結果より圧縮指数 λ を決定して提案方法の有効性を確かめる。

1.2 研究の特色

一面せん断試験は最も古くから行われている直接せん断試験であり、土のせん断強度を見積もるために必要な強度定数(粘着力 c と内部摩擦角 ϕ)を求めることを目的として実施されている。一面せん断試験は排水条件の制御が難しく三軸せん断試験に劣るが、三軸せん断試験に比べて試験が簡単である、試料が少なくすむ、圧密時間が短く

2014年8月12日受理

* 海洋土木工学専攻

** 鹿児島市役所

*** 博士前期課程海洋土木工学専攻

て排水せん断が容易であるなどの実用的な利点がある。また、土の供試体は通常の2次元の平面変形問題と相似な挙動をし、ダイレイタンスーが明確に観察できるので、三軸せん断試験に比べて力学的に優れた特長を有し、せん断現象の基本的な理解に欠かせない試験である³⁾。

本研究では、上記のように本来強度定数 c 、 ϕ を求めるための一面せん断試験を砂質土の圧縮指数 λ を決定するために利用する。圧縮指数 λ はその名の通り、土の圧縮特性を表す土質パラメータなのだが、砂質土の場合、標準圧密試験や三軸せん断試験装置による等方圧縮試験などの圧縮試験で決定することは、非常に大きな圧力が必要になるので難しい。実は、この圧縮指数 λ は土がせん断変形を被る時に発揮される土質パラメータなので、三軸せん断試験や一面せん断試験などのせん断試験結果から決定することの方が望ましい。

ただし、今回ここで提案する圧縮指数 λ の決定法は、鉛直応力と体積比の異なる一連のせん断試験結果が必要である。精度を高めるため、不均質なピーク強度以降の試験データは使用せず、供試体が均質だと見なすことのできるせん断初期の試験データを利用する。試料に豊浦標準砂を用いるが、供試体はすべて不飽和状態である。供試体作製時に飽和度は調整することができるので今回4ケースの飽和度における圧縮指数 λ を求めている。飽和度100%の場合（飽和土）の圧縮指数 λ は不飽和土の圧縮指数 λ の値を利用して外挿法により推定している。

2. 一面せん断試験による圧縮指数 λ の決定の考え方

一面せん断試験の場合、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⁴⁾。

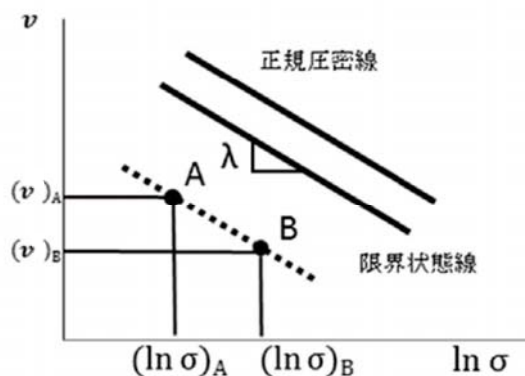


図1 $v \sim \ln \sigma$ 関係概略図

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なのだが、土の過圧密の程度を表す状態量であることがわかっている⁵⁾。実際、砂質土の状態は通常限界状態線の下に位置するが、 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。

例えば、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くなっている。過圧密の程度が等しいということは、せん断に伴って発生する体積変化（すなわちダイレイタンスー挙動）が等しいということである。そこで、本研究では、圧縮指数 λ の決定にダイレイタンスー挙動が等しいこのA—B線を利用する。

以上の考え方に基づき、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^{1) 2)}。今回は供試体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で砂質土の圧縮指数 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、 $(y_{max})_A = (y_{max})_B$ ならば $(v_\lambda)_A = (v_\lambda)_B$ と考えて、 $(v)_A + \lambda (\ln \sigma)_A = (v)_B + \lambda (\ln \sigma)_B$ 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 λ を決定する式、式 (1) が得られる。

$$\lambda = \frac{(v)_B - (v)_A}{(\ln \sigma)_A - (\ln \sigma)_B} \quad \dots (1)$$

3. 飽和度の異なる砂質土の圧縮指数 λ の決定

3.1 一面せん断試験の概要

上述したように、今回用いた試料は、地盤工学の分野において各種土質試験の標準的な砂として研究に用いられている豊浦標準砂³⁾を使用している。図2に豊浦標準砂の粒径加積曲線を示す。豊浦標準砂の土粒子の密度は 2.64 g/cm^3 、最大間隙比は $e_{max} = 0.97$ 、最小間隙比は $e_{min} = 0.62$ 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 $S_r = 10\%$ 、 $S_r = 30\%$ 、 $S_r = 50\%$ 、 $S_r = 70\%$ 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。

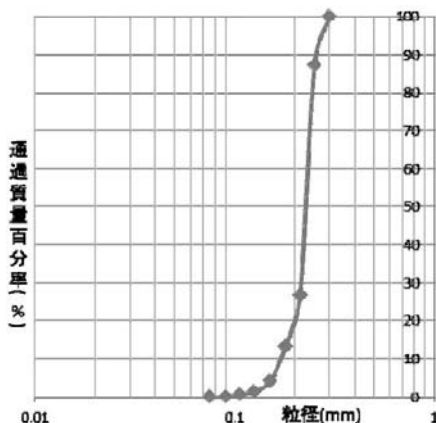


図2 豊浦砂の粒径加積曲線

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 $\sigma = 200 \text{ kPa}$ と $\sigma = 400 \text{ kPa}$ の2ケースで試験を行った。図3は今回使用した一面せん断試験の概略図である。図4はせん断箱の拡大図を示している⁶⁾。

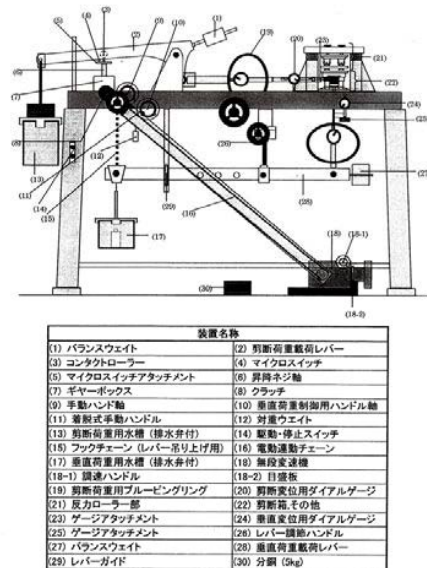


図3 一面せん断試験装置の概略図

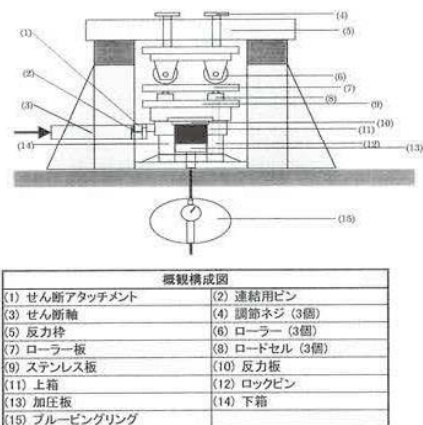


図4 せん断箱の拡大図

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6 cm、高さ2 cm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 $P =$

σA (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5-1と図5-2は飽和度10%、鉛直応力200kPaの場合の応力比 τ/σ ~せん断変位 x 関係と鉛直変位 y ~せん断変位 x 関係の試験結果を示す。図5-3と図5-4は飽和度10%、鉛直応力400kPaのときの応力比 τ/σ ~せん断変位 x 関係と鉛直変位 y ~せん断変位 x 関係の試験結果である。同様に、図6-1~図6-4は飽和度30%の場合、図7-1~図7-4は飽和度50%の場合、図8-1~図8-4は飽和度70%の場合の試験結果を示している。

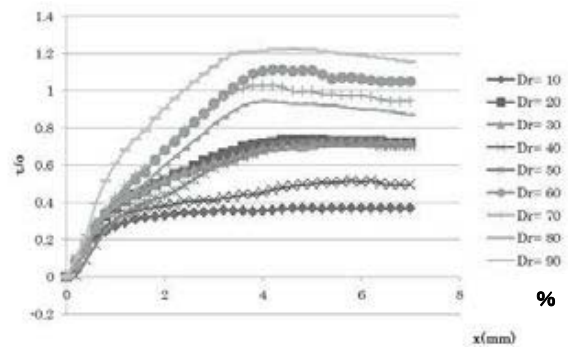


図5-3 $\tau/\sigma \sim x$ 関係(400kPa, Sr=10%)

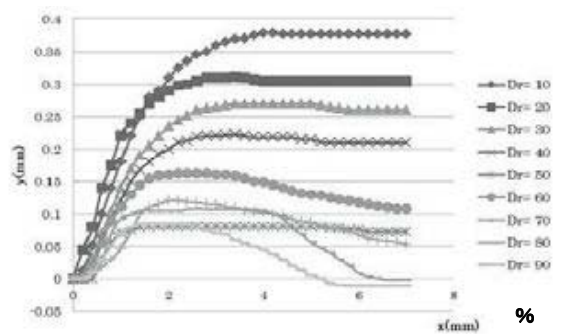


図5-4 $y \sim x$ 関係(400kPa, Sr=10%)

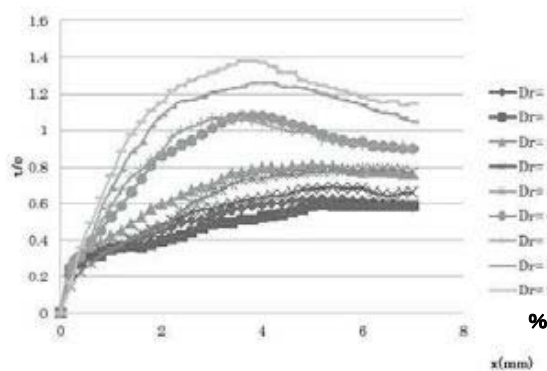


図5-1 $\tau/\sigma \sim x$ 関係(200kPa, Sr=10%)

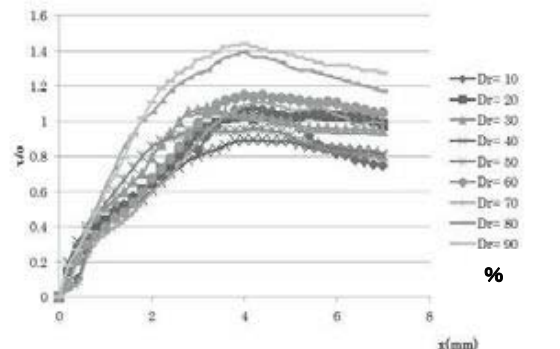


図6-1 $\tau/\sigma \sim x$ 関係(200kPa, Sr=30%)

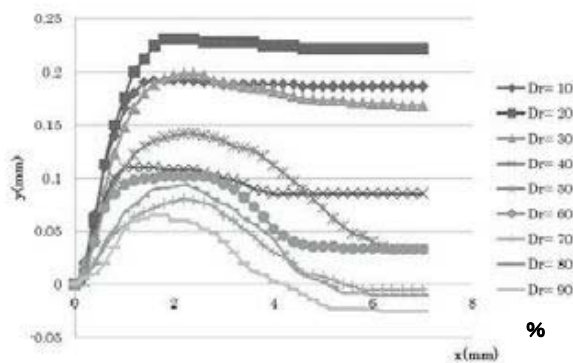


図5-2 $y \sim x$ 関係(200kPa, Sr=10%)

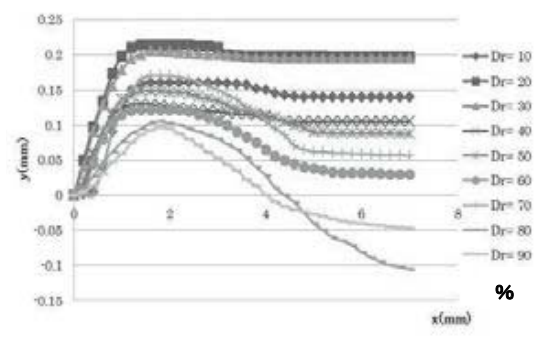


図6-2 $y \sim x$ 関係(200kPa, Sr=30%)

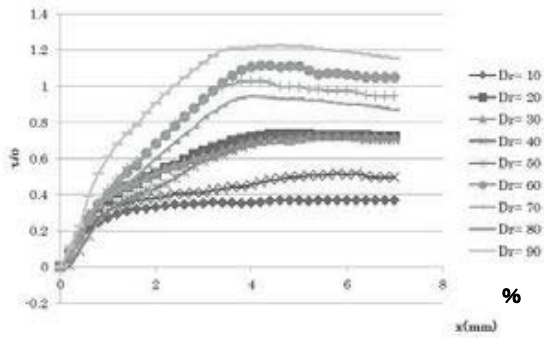


図 6-3 $\tau / \sigma \sim x$ 関係 (400kPa, $S_r=30\%$)

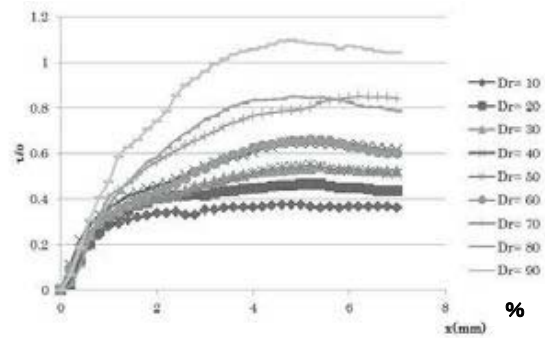


図 7-3 $\tau / \sigma \sim x$ 関係 (400kPa, $S_r=50\%$)

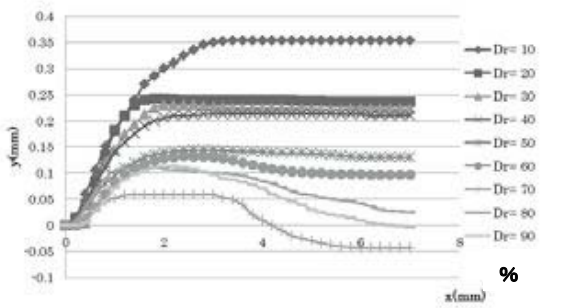


図 6-4 $y \sim x$ 関係 (400kPa, $S_r=30\%$)

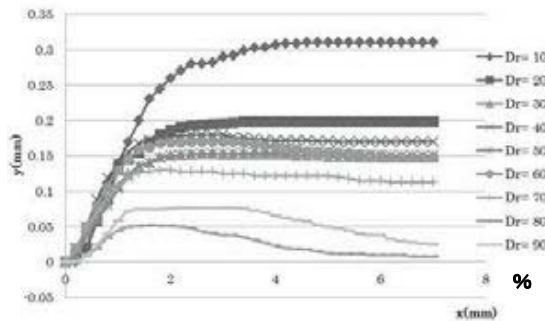


図 7-4 $y \sim x$ 関係 (400kPa, $S_r=50\%$)

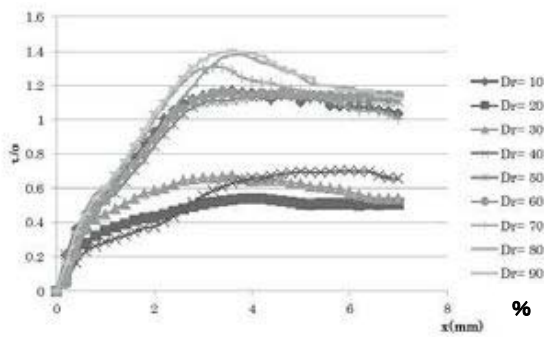


図 7-1 $\tau / \sigma \sim x$ 関係 (200kPa, $S_r=50\%$)

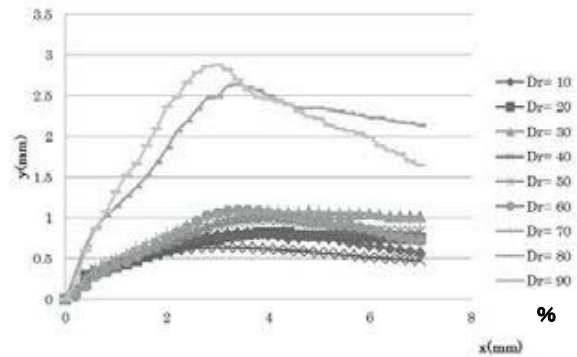


図 8-1 $\tau / \sigma \sim x$ 関係 (200kPa, $S_r=70\%$)

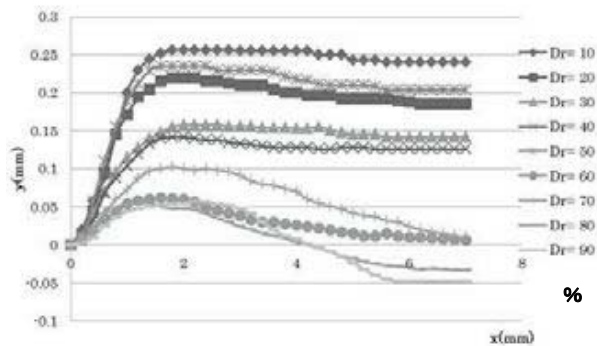


図 7-2 $y \sim x$ 関係 (200kPa, $S_r=50\%$)

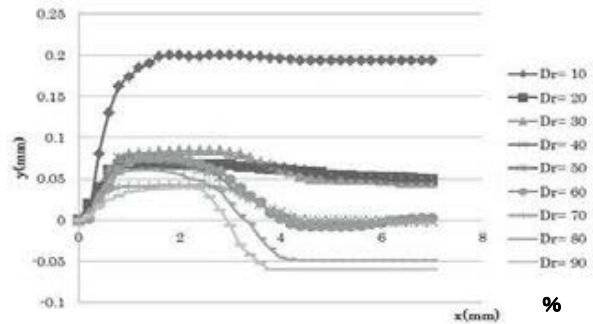


図 8-2 $y \sim x$ 関係 (200kPa, $S_r=70\%$)

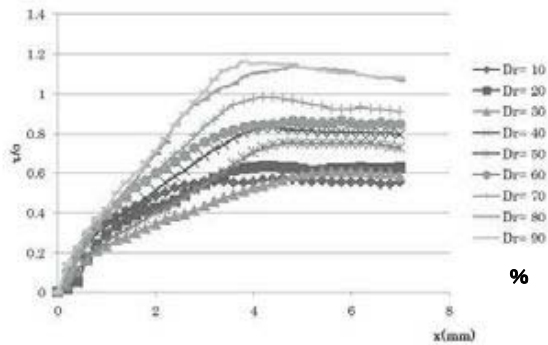


図 8-3 $\tau / \sigma \sim x$ 関係 (400kPa, Sr=70%)

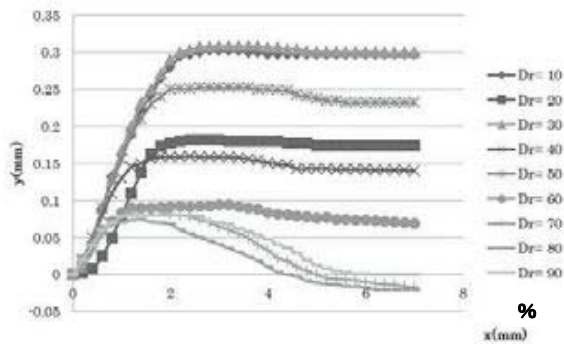


図 8-4 $y \sim x$ 関係 (400kPa, Sr=70%)

3.2 豊浦標準砂の圧縮指数 λ の決定

圧縮指数 λ はせん断時における鉛直変位 y やせん断変位 x の発生量を決める塑性理論の硬化則に関わる重要なパラメータである。前述したように、この圧縮指数 λ を過圧密の程度 ($v_\lambda = v + \lambda \ln \sigma$) の等しい 2 組の体積比 $(v)_A$, $(v)_B$ と鉛直応力 σ_A , σ_B の値を用いて式(1)より決定することができる。ただし、今回は、供試体が圧縮から膨張に転ずる時点の v , σ の代わりに、せん断開始時の体積比 v_0 , 垂直応力 σ_0 (定圧なので $\sigma = \sigma_0 = \text{const.}$) を採用した式(2)を用いて圧縮指数 λ の決定を試みた。

$$\lambda = \frac{(v_0)_B - (v_0)_A}{(\ln \sigma_0)_A - (\ln \sigma_0)_B} \quad \dots (2)$$

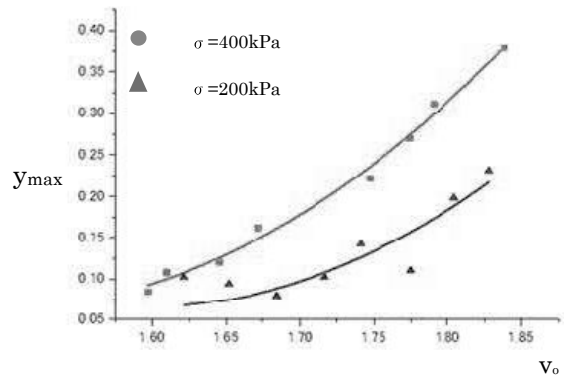


図 9-1 Sr=10%の時の $y_{\max} \sim v_0$ 関係

図 9-1 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ときまでに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。■が $\sigma_A = 200$ kPa, □が $\sigma_B = 400$ kPa の結果であり、それぞれに非線形最少二乗法⁷⁾を適用して、互いに平行な曲線の式をあてはめている。なお、これらの曲線の隔たりが $(v_0)_A - (v_0)_B$ となっている。

カーブフィッティングの手順は以下の通りである。まず、 $\sigma_B = 400$ 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 a, b, c を決定する。

$$y_{\max} = av_0^2 + bv_0 + c \quad \dots (3)$$

次に、得られたパラメータ $a = 0.07009$, $b = -0.24978$, $c = 0.22323$ を用いて、 $\sigma_A = 200$ 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 $d = 0.09488$ を決定した。

$$y_{\max} = a(v_0 - d)^2 + b(v_0 - d) + c \quad \dots (4)$$

実は、パラメータ d は式(3)と式(4)の隔たりであり、 $d = (v_0)_B - (v_0)_A$ である。以上の結果より式(2)を用いて、 $\lambda = 0.137$ を決定することができた。

図 9-2, 図 9-3, 図 9-4 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。

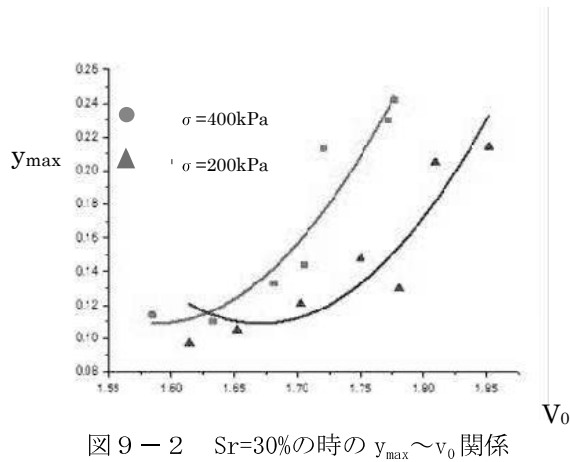


図9-2 Sr=30%の時の $y_{max} \sim V_0$ 関係

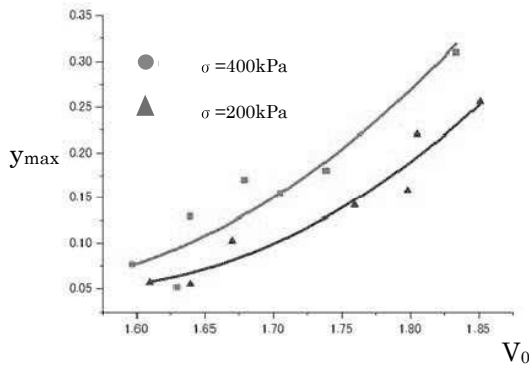


図9-3 Sr=50%の時の $y_{max} \sim V_0$ 関係

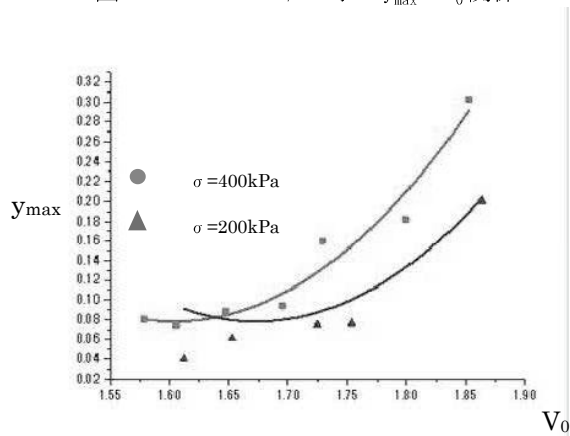


図9-4 Sr=70%の時の $y_{max} \sim V_0$ 関係

表1 フィッティングパラメータのまとめ

Sr	a	b	c	d
10%	0.07009	-0.24978	0.22323	0.09488
30%	0.04716	-0.17045	0.15887	0.08306
50%	0.04526	-0.1586	0.14315	0.06232
70%	0.05648	-0.19854	0.18546	0.0686

3.3 圧縮指数 λ と飽和度 S_r の関係

結局, $S_r=10\%$ のとき $\lambda=0.137$, $S_r=30\%$ のとき $\lambda=0.120$, $S_r=50\%$ のとき $\lambda=0.090$, $S_r=70\%$ のとき $\lambda=0.099$ を決定することができた。

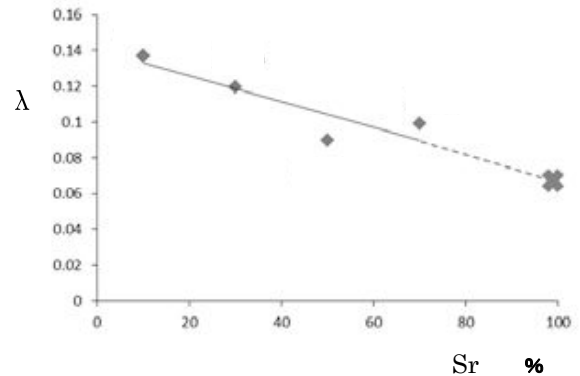


図10 $\lambda \sim S_r$ 関係

図10は圧縮指数 λ と飽和度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 の値が減少していることがわかる。 $S_r=80\%$ 以上は供試体の設置時に供試体が所定の寸法を満たさないため、または供試体からの水漏れが発生したため試験を実施することができなかった。そこで、 $S_r=80\%$ 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、 $S_r=80\%$ 以上の圧縮指数 λ を外挿法により推定した。すなわち、線形最小二乗法により、図10に示す直線(式(5))が求められた。

$$\lambda = -0.0007S_r + 0.1403 \quad (5)$$

式(5)により $S_r=80\%$ 以上の圧縮指数 λ の値を推定することができる。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豊浦標準砂の圧縮指数を求めている⁸⁾。今回の一面せん断試験で得られた飽和度 $S_r=100\%$ のときの推定値 $\lambda=0.070$ は、この三軸せん断試験で得られた値 $\lambda=0.062$ に比較的近く興味深い結果となっている。

4. まとめ

1. 砂質土の圧縮指数 λ は標準圧密試験装置などの圧縮試験で決定することは難しい。そこで、鉛直応力 σ と体積比 v の異なる一連の一面せん断試験結果を用いて実施するユニークな砂質土の圧縮指数 λ の決定法を提案した。一面せん断試験は本来せん断強度パラメータ(粘着力 c , 内部摩擦角 ϕ)を求めるための試験なのだが、今回は、砂質土の圧縮指数 λ を決定することに利用している。
2. 砂質土の圧縮指数 λ の決定では、ピーク強度時の試験データは用いず、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を用いる。すなわち、せん断中に供試体が圧縮から膨張に転ずる所の最大圧縮鉛直変位 y_{max} をせん断開始時の体積比 v_0 , 垂直応力 σ_0 で整理して圧縮指数 λ の決定を試みた。
3. 今回は、供試体が圧縮から膨張に転ずる時点の v , σ の代わりに、せん断開始時の体積比 v_0 , 垂直応力 σ_0 を採用した式(2)を用いて圧縮指数 λ の決定を試みた。提案方法は一面せん断試験結果への実験公式の当てはめにより実施することができる。なお、非線形最少二乗法によるカーブフィッティングにより、精度の向上を試みている。
4. 本研究では、豊浦標準砂の一面せん断試験実施して合計75本分の実験データを得ることができた²⁾。この実験データに提案手法を適用することにより、4ケースの飽和度 S_r (10%, 30%, 50%, 70%)に対して豊浦標準砂の圧縮指数 λ を決定することができた。
5. 飽和度 $S_r=80\%$ 以上の供試体は設置時に問題があるため試験を実施することができなかった。そこで、得られた4ケースの圧縮指数 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、飽和度 $S_r=80\%$ 以上の圧縮指数 λ を推定することができた。

6. 一面せん断試験で得られた飽和度 $S_r=100\%$ のときの圧縮指数 λ の推定値と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 の値が比較的近いことから、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、徳満絵莉香氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 古川大嗣, 定圧一面せん断試験による豊浦砂のせん断挙動の考察, 平成23年度卒業論文, (2012).
- 2) 徳満絵莉香, 一面せん断試験による豊浦砂の圧縮指数の決定に関する研究, 平成24年度卒業論文, (2013).
- 3) 地盤工学会地盤工学用語辞典改訂編集委員会, 地盤工学用語辞典, 社団法人地盤工学会, p.109, pp.167-168 (2006).
- 4) A. Schofield and P. Wroth, Critical State Soil Mechanics, McGRAW-Hill Publishing Company Limited, pp.89-166 (1968).
- 5) 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).
- 6) 株式会社丸東製作所, 一面剪断試験機(三笠式)SG-83, (1978).
- 7) 株式会社ライトストーン, ORIGINユーザーマニュアル, (2002)
- 8) 野村将平, 三軸せん断試験より得られるしらすと豊浦砂の圧縮指数・膨潤指数の比較, 平成24年度卒業論文, (2013).