

垂直応力の異なる一連の一面せん断試験 による不飽和砂の圧縮指数の決定

三隅 浩二* 白澤 航**

Determination of Compression Index for Unsaturated Sandy Soil
by a Series of Box Shear Tests with Different Normal Stress

Koji MISUMI* and Wataru SHIRASAWA**

The determination procedure of compression index for unsaturated sandy soil is proposed in this paper. At first, a series of box shear test datum with different normal stress are obtained. Secondly, this method is carried out by fitting some equations to shearing behaviors (i.e., dilatancy behaviors) of unsaturated sandy soil. Finally, compression index for unsaturated sandy soil is obtained by relationship between maximum compressive displacements and various values of normal stresses. The validity of this method is confirmed by applying to Toyoura standard sand.

Keywords : compression index, box shear test, unsaturated sandy soil, dilatancy

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、垂直応力の異なる一連の

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決める重要な力学パラメータである。今回は、飽和度 $S_r = 50\%$ の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 ($v = 1 + e$,

2016年9月7日受理

* 海洋土木工学専攻

** 南さつま市消防本部

e : 間隙比), σ は垂直応力である. 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⁾.

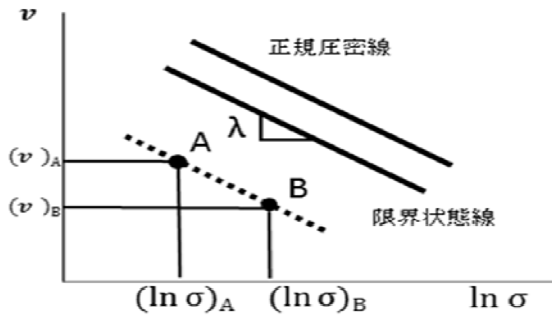


図-1 $v \sim \ln \sigma$ 関係概略図

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²⁾であり, 土質材料の過圧密の程度を表す状態量である. 一般に, 砂質土のせん断開始時点の状態は限界状態線よりも下方に位置していることが多いが, v_λ の値は小さければ小さいほど過圧密の程度が大きいことを意味している.

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, 過圧密の程度が同じである. 過圧密の程度が同じであれば, 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) も同じである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じこの $A-B$ 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, せん断開始時点の垂直応力を σ_0 (定圧なので $\sigma = \sigma_0 = const.$), 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側の最大垂直変位 y_{max} に着目して, $(y_{max})_A = (y_{max})_B$ 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. すなわち, この関係式を λ で整理して, λ を決定するための式, 式(1)を得ることができる.

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

3. 飽和度 50% の豊浦標準砂の圧縮指数 λ の決定

3.1 一面せん断試験の概要

今回試料には豊浦標準砂を使用している. 豊浦標準砂の土粒子の密度は $\rho_s = 2.64 \text{ g/cm}^3$, 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 S_r と相対密度 D_r は, 供試体作製時に調整することができる (付録参照). 今回は, 供試体設置時において, 飽和度 $S_r = 50\%$ とし, 緩詰め相対密度 $D_r = 10\%$ と密詰め $D_r = 90\%$ を採用して試験を行った. なお, 垂直応力 σ_0 は, 緩詰め密詰めともに $\sigma_0 = 25 \text{ kPa}, 50 \text{ kPa}, 100 \text{ kPa}, 150 \text{ kPa}, 200 \text{ kPa}, 250 \text{ kPa}, 300 \text{ kPa}, 350 \text{ kPa}, 400 \text{ kPa}$ の 9 ケースに対して定圧一面せん断試験を行った.

図-2 は今回使用した一面せん断試験装置の概略図である. 図-3 はせん断箱の拡大図を示している. 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, 垂直荷重用水槽に分銅を載せ, ハンドルを回して加圧版を押し上げ, 供試体に垂直荷重

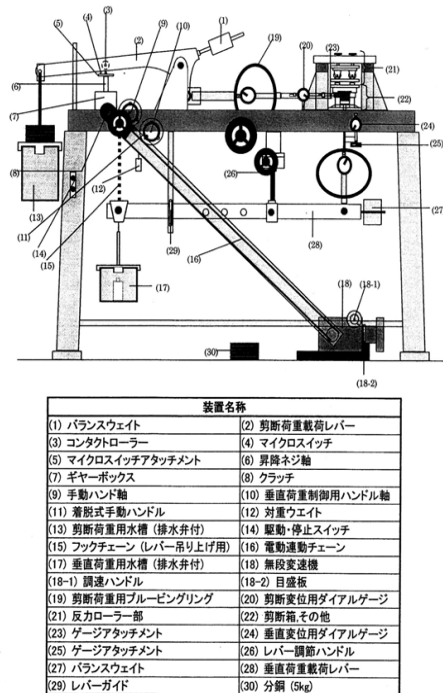


図2 一面せん断試験装置の概略図

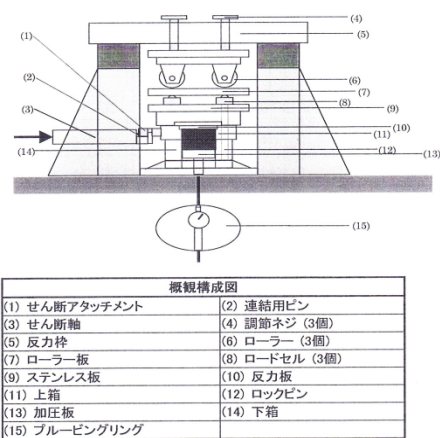


図-3 せん断箱の拡大図

$P = \sigma_0 A$ (σ_0 : 垂直応力, A : 供試体の断面積) を加えた. このとき, 載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) を測定し, せん断変位 x が7.0mmになった時点で試験を終了した.

3.2 定圧一面せん断試験の試験結果

図-4-1と図-4-2は, 飽和度 $S_r = 50\%$, 相対密度 $D_r = 10\%$ の不飽和砂の応力比 $\tau/\sigma \sim$ 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.

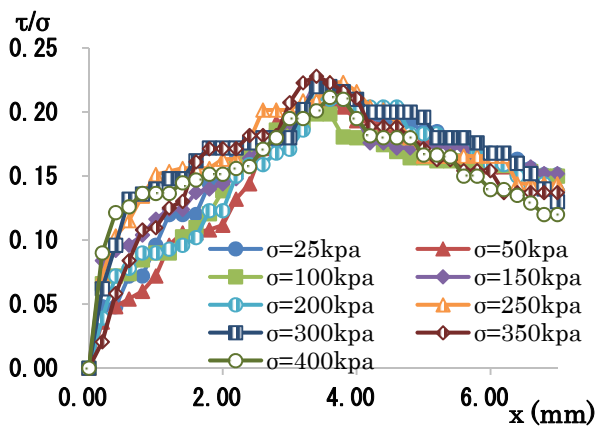


図-4-1 $\tau/\sigma \sim x$ 関係 ($S_r=50\%$ $D_r=10\%$)

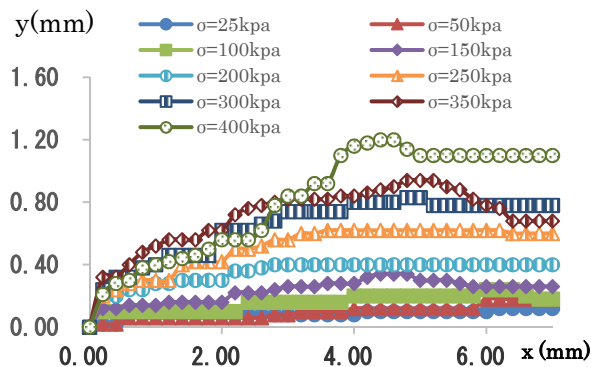


図-4-2 $y \sim x$ 関係 ($S_r=50\%$ $D_r=10\%$)

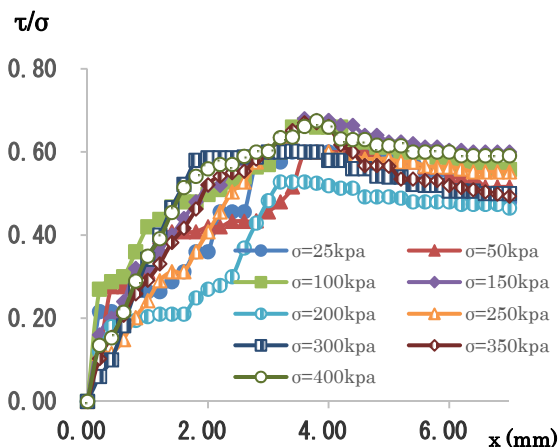


図-5-1 $\tau/\sigma \sim x$ 関係 ($S_r=50\%$ $D_r=90\%$)

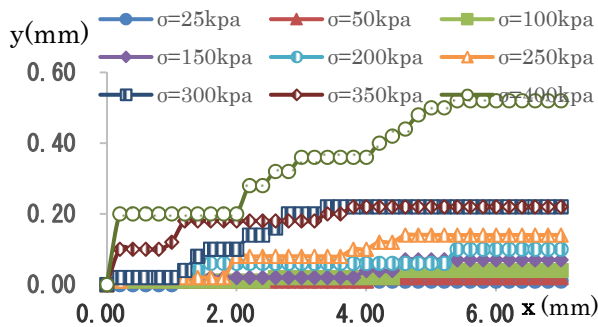


図-5-2 $y \sim x$ 関係 ($S_r=50\%$ $D_r=90\%$)

一方、図-5-1と図-5-2、は飽和度 $S_r = 50\%$ 、相対密度 $D_r = 90\%$ の不飽和砂の応力比 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。これらの図より、緩詰め相対密度 $D_r = 10\%$ の試験結果は、密詰め相対密度 $D_r = 90\%$ の試験結果と比べて、全体的に、応力比 τ/σ の値が小さいこと、圧縮側の鉛直変位 y の値が大きいたることが見て取れる。

3.3 不飽和砂の圧縮指数 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 $(\sigma_0)_A$ 、 $(\sigma_0)_B$ の値を用いて式(1)より決定することができる。

図-6は今回の試験によって得られた供試体が圧縮から膨張に転ずる時まで生じた圧縮側の最大垂直変位 y_{\max} と自然対数表示の垂直応力 $\ln \sigma_0$ の関係を示している。◆のプロットは供試体設置時において相対密度 $D_r = 10\%$ の緩詰め供試体の $y_{\max} \sim \ln \sigma_0$ 関係、■のプロットは相対密度 $D_r = 90\%$ の密詰め供試体の $y_{\max} \sim \ln \sigma_0$ 関係を示している。図-6より、緩詰めの方が密詰めよりも圧縮側の最大垂直変位 y_{\max} の値が全体的に大きいこと

が見て取れる。

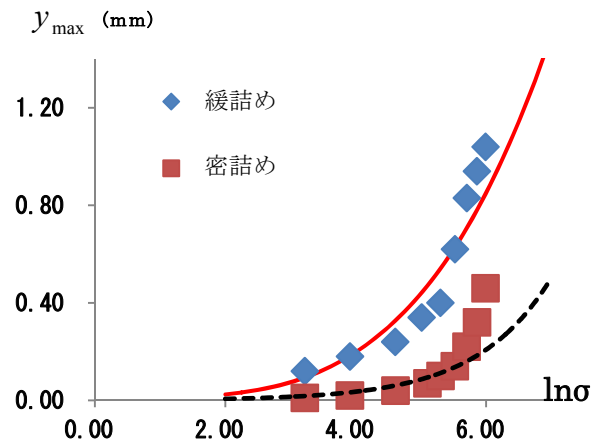


図-6 $y_{\max} \sim \ln \sigma_0$ 関係

図中の実践と波線は、緩詰めと密詰めデータのそれぞれに互いに平行な曲線を当てはめたものである。なお、これらの曲線の水平方向の隔たりが、式(1)の右辺の $(\ln \sigma_0)_B - (\ln \sigma_0)_A$ となっている。

曲線の当てはめの手順は以下の通りである。まず、今回得られた試験結果の中から y_{\max} の最小値を選んで式(2)中の $c = 0.010$ を決定した。次に、緩詰め $y_{\max} \sim \ln \sigma_0$ 関係に実験公式(2)を当てはめて、式(2)中のパラメータ $a = 0.0011$ 、 $b = 3.7051$ を決定した。

$$y_{\max} = a(\ln \sigma_0)^b + c \quad (2)$$

最後に、得られたパラメータ $a = 0.0011$ 、 $b = 3.7051$ 、 $c = 0.0100$ を用いて、密詰め $y_{\max} \sim \ln \sigma_0$ 関係に実験公式(3)を当てはめて、式(3)中のパラメータ $d = 1.8272$ を決定した。

$$y_{\max} = a(\ln \sigma_0 + d)^b + c \quad (3)$$

実は、パラメータ d は式(3)と式(4)の水平方向の隔たりであり、 $d = (\ln \sigma_0)_B - (\ln \sigma_0)_A$ である。

式(1)より圧縮指数 λ を決定するには、せん断開

始時の $(v_0)_A$ と $(v_0)_B$ の値が必要である。これらの値は、大きさの異なる9ケースの垂直応力を作用させるため、実のところ、各々の供試体で値がばらつく。そこで、まず、簡単のため、せん断開始時点の体積比の代わりに、一面せん断試験装置に供試体を設置した時点での体積比を採用してみる。すなわち、相対密度 $D_r = 10\%$ から得られる $v = 1.935$ を $(v_0)_A$ 、相対密度 $D_r = 90\%$ から得られる $v = 1.655$ を $(v_0)_B$ と見なして、式(1)を計算すると、

$$\lambda = \frac{(v_0)_A - (v_0)_B}{(\ln \sigma_0)_B - (\ln \sigma_0)_A} = \frac{1.935 - 1.655}{1.8272} = 0.153$$

となり、 $\lambda = 0.153$ を決定することができる。

次に、垂直応力の異なる9ケースのそれぞれの $(v_0)_A$ と $(v_0)_B$ の値を使って、圧縮指数 λ を求めた。表-1は、垂直応力の異なる9ケースにおけるせん断開始時の体積比 $(v_0)_A$ 、 $(v_0)_B$ とそれらの平均値、ならびに、それらをデータにして、式(1)を用いて求めた圧縮指数 λ の値を示している。

表-1 せん断開始時点の体積比 $(v_0)_A$ $(v_0)_B$ と圧縮指数 λ

垂直応力 σ_0 (kPa)	体積比 $(v_0)_A$	体積比 $(v_0)_B$	圧縮指数 λ
25	1.904	1.630	0.150
50	1.894	1.624	0.148
100	1.888	1.614	0.150
150	1.877	1.610	0.146
200	1.861	1.597	0.144
250	1.856	1.592	0.144
300	1.852	1.588	0.144
350	1.846	1.581	0.145
400	1.833	1.577	0.140
平均値	1.868	1.601	0.146

表-1より、緩詰め密詰めいずれの場合も垂直応力が増せばそれに伴い体積比の値が減少していることが分かる。緩詰め $(v_0)_A$ 密詰め $(v_0)_B$ い

ずれの場合も変化が大きく、先の相対密度 $D_r = 10\%$ から得られる $(v_0)_A = 1.935$ と相対密度 $D_r = 90\%$ から得られる $(v_0)_B = 1.655$ を用いて求めた $\lambda = 0.153$ の結果は、無視できない誤差を含んでいると考えることができる。結局、せん断開始時点の体積比 $(v_0)_A$ 、 $(v_0)_B$ の値のばらつきにより、圧縮指数 λ の値も0.140~0.150とばらつき、平均値は $\lambda = 0.146$ となった。

本研究室では、垂直応力に $(\sigma_0)_A = 200$ kPaと $(\sigma_0)_B = 400$ kPaを選んで、せん断初期の体積比 v_0 を種々に変えた一連の定圧一面せん断試験の結果より、飽和度50%のときの不飽和砂（豊浦標準砂）の圧縮指数 $\lambda = 0.090$ を得ている³⁾。今回の垂直応力の異なる一連の一面せん断試験の結果から得られた $\lambda = 0.153$ や $\lambda = 0.140 \sim 0.150$ は、この値に比べかなり大きい。垂直応力を載せることで体積比の値がかなり変化していることが原因であると考えられる。今後は、大きさの異なる垂直応力を作用させた上で、せん断開始時点の $(v_0)_A$ と $(v_0)_B$ を揃える方法を検討する必要がある。また、試験装置の精度の向上と試験者のスキルの改善が必要である。

4. まとめ

1. $v \sim \ln \sigma$ 空間 (v は体積比, σ は垂直応力)において、過圧密の程度と同じ $A-B$ 線を利用した一面せん断試験による圧縮指数 λ の決定法の考え方と圧縮指数 λ を決定するための式、式(1)を示した。
2. 飽和度 $S_r = 50\%$ とし、緩詰め $(v_0)_A$ の相対密度 $D_r = 10\%$ と密詰め $(v_0)_B$ の $D_r = 90\%$ の不飽和砂（豊浦標準砂）に対して、垂直応力 σ_0 を25 kPaから400 kPaまで9ケースに変えた一連の定圧一面せん断試験を実施して、試験結果を示して考察した。
3. 垂直応力の異なる一連の一面せん断試験の試験結果を用いて、不飽和砂の圧縮指数 λ を決定

する方法を具体的に示した。すなわち、圧縮から膨張に転ずるときの圧縮側の最大垂直変位 y_{\max} を自然対数表示の垂直応力 $\ln \sigma_0$ で整理することにより、過圧密の程度と同じ $A-B$ 線の水平方向の隔たり $(\ln \sigma_0)_B - (\ln \sigma_0)_A$ を求め、式(1)より、不飽和砂の圧縮指数 λ を決定する方法を提案した。

4. 緩詰めと密詰めの不飽和砂（豊浦標準砂）に対し、垂直応力の異なる一連の一面せん断試験の試験結果に、提案方法を適用して、式(1)により、飽和度50%のときの圧縮指数 λ を決定することができた。

謝辞

本研究に協力して頂いた海洋土木工学科4年の原拓也と二石充に感謝致します。

付録

飽和度 S_r と相対密度 D_r を調整した供試体の作製方法は以下の通りである。

一面せん断試験の供試体の寸法は、直径 $D = 6.00 \text{ cm}$ 、高さ $H = 2.00 \text{ cm}$ なので、供試体の体積は $V = H \pi D^2 / 4 = 56.52 \text{ cm}^3$ となる。

今回、相対密度 D_r は緩詰めの相対密度 $D_r = 10\%$ と密詰めの相対密度 $D_r = 90\%$ を採用している。そこで、まず、相対密度 D_r の公式を変形した次式より、間隙比 e を求めることができる。

$$e = e_{\max} - D_r (e_{\max} - e_{\min})$$

すなわち、 $e_{\max} = 0.97$ 、 $e_{\min} = 0.62$ なので、 $D_r = 10\%$ から $e = 0.935$ が、相対密度 $D_r = 90\%$ から $e = 0.655$ が得られる。

次に、間隙比 e の公式を変形した次式より、土粒子の体積 V_s を求めることができる。

$$V_s = V / (1+e)$$

すなわち、 $e = 0.935$ から $V_s = 29.21 \text{ cm}^3$ が、 $e = 0.655$ から $V_s = 34.15 \text{ cm}^3$ が得られる。

次に、豊浦標準砂の土粒子の密度は $\rho_s = 2.64 \text{ g/cm}^3$ なので、土粒子の質量 m_s を次式より求めることができる。

$$m_s = V_s \rho_s$$

すなわち、 $V_s = 29.21 \text{ cm}^3$ から $m_s = 77.11 \text{ g}$ が、 $V_s = 34.15$ から $m_s = 90.16 \text{ g}$ が得られる。

今回は、飽和度 S_r は $S_r = 50\%$ を採用している。そこで、飽和度 S_r の公式を変形した次式より、含水比 w を求めることができる。

$$w = e S_r \rho_w / \rho_s$$

すなわち、 $e = 0.935$ から $w = 17.71\%$ が、 $e = 0.655$ から $w = 12.41\%$ が得られる。

最後に、水の質量 m_w は次式より求めることができる。

$$m_w = w m_s$$

すなわち、 $w = 17.71\%$ と $m_s = 77.11 \text{ g}$ から $m_w = 13.66 \text{ g}$ が、 $w = 12.41\%$ と $m_s = 90.16 \text{ g}$ から $m_w = 11.19 \text{ g}$ が得られる。

上記で示された所定の質量の土粒子と水を用意して、均質になるまで容器内でよくかき混ぜ、最後に、締固め法によって素早くせん断箱に挿入した。

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) 三隅浩二, 古川大嗣, 一面せん断試験による特殊土しらすの圧縮指数の決定, 鹿児島大学工学部研究報告, 第57号, pp. 7-13 (2015).