

鳥取砂丘砂の等方圧縮特性
— ゴム膜貫入量および圧縮指数の応力・間隙比依存性 —Isotropic Compression Behavior of Tottori Dune Sand
— Stress and Initial Void Ratio Dependences of Membrane Penetration and Compression Index —

清水正喜* (SHIMIZU Masayoshi)

岩成敬介** (IWANARI Keisuke)

土の体積変化挙動を把握する上で等方圧縮試験は重要な基礎的試験の一つである。本ノートでは、鳥取砂丘砂に対して行った等方圧縮試験とゴム膜貫入量試験の結果に基づいて、圧縮指数の応力依存性とゴム膜貫入量の非弾性的挙動を考察し、(1) 圧縮指数は、正規・過圧密領域を問わず、処女載荷および再載荷過程において応力の増加と共に増加し、除荷過程において変化が小さく、密な試料ではほとんど一定になる；(2) ゴム膜貫入特性は、処女載荷過程とその他の過程によって異なる、等の結論を得た。

キーワード：砂，圧縮指数，ゴム膜貫入 D5

1. 序論

地盤内で起こる様々な現象を理解したり、その現象のメカニズムを追求するために、数値解析手法が盛んに利用されるようになった。数値シミュレーションは、実験では実現できない条件も再現でき、その重要性は益々増大すると思われる。数値シミュレーションを実行するときには、対象とする土に最も適した構成モデルを構築あるいは選択し、その構成モデルにおいて用いるべきパラメータを決定することになる。モデルの選択とパラメータの決定は、地盤工学の実務における主要課題の一つである。

著者らは、鳥取砂丘地域の砂を用いて、種々の工学的問題を解明するためにモデル実験を行ってきたが、それと並行して、鳥取砂丘砂の力学的性質の把握に努めてきた^{2), 3)}。特に、鳥取砂丘砂の挙動に対する弾塑性構成モデルの適用性を調べてきた。本文で呈示し、考察する実験結果は、そのような大きな目的に対して行ってきた研究成果の一部である。

土のような粒状体では、応力の偏差成分の変化によって体積変化、即ちダイレタンス Δv_v が生じる。組合せ応力下において生じる体積変化を、ダイレタンスとそうでない部分の重ね合わせで評価する。ダイレタンスは、平均垂直応力(有効応力)を一定にして偏差応力を変化させる試験(σ_v 一定試験)によって直接求めることができる。しかし、実際的には、例えば三軸試験においては、セル圧を一定にして平均垂直応力も偏差応力も変化させる試験(側圧一定試験)と、偏差応力を変化させない等方圧縮試験を行い、側圧一定試験で生じた体積変化 Δv から等方圧縮試験で生じた体積変化 Δv_c をひいて、ダイレタンス Δv_v を評価する方法が採られることが多い。

* 鳥取大学工学部土木工学科助教授，**同学科技官

S 本研究は鳥取大学工学部研究報告に英文で発表されたもの¹⁾の1部である。

このように、等方圧縮試験は、等方応力の変化によって生じる体積変化を評価するためだけでなく、ダイレクシーを評価するためにも行われ、重要な基礎的試験の一つである。等方応力下での土の体積変化挙動は、間隙比 e と平均垂直応力 σ_v の対数との関係（いわゆる $e - \log \sigma_v$ 関係）の直線性を仮定することによって評価されることが多い。しかし、とくに砂の場合、 $e - \log \sigma_v$ 関係は必ずしも直線的でなく、圧縮指数は σ_v によって変化し、また、その変化の様子は処女載荷・除荷等の載荷条件によって異なることが知られている。

等方圧縮試験では、セル圧は一定でなく変化する。砂のような粗粒土では、供試体を覆うゴム膜の貫入量がセル圧の変化と共に変化するので、ゴム膜の貫入量を求めて、測定された体積変化量を補正する必要がある。ゴム膜貫入量を求める方法がいくつか提案されている^{4), 5), 6), 7)}。ゴム膜貫入の補正に際して、通常、ゴム膜は弾性的であると仮定されている。しかし、過去の研究⁵⁾からも推察出来るように、ゴム膜貫入の現象はヒステリシスをもち、貫入量は、載荷、除荷、再載荷などの載荷履歴に依存する可能性がある。

本ノートの目的は、鳥取砂丘で採取した比較的粗い砂に対して行った等方圧縮試験と付随して行ったゴム膜貫入量試験の結果に基づいて、ゴム膜貫入は必ずしも弾性的でなく、処女載荷・除荷等の載荷過程によってその特性が変わること、圧縮指数は各載荷過程において応力に依存することを示すことである。また、これらの特性に対する初期間隙比の影響についても考察する。

2. 試料

本研究で用いた試料は、鳥取砂丘地域で採取した砂（鳥取砂丘砂という）である。図1に、土粒子の密度、最大及び最小間隙比および粒度分布を示す。平均粒径が0.5 mmと粗い砂である。なお、試験に先立って不純物を水で洗い乾燥させた。

3. 実験

ゴム膜貫入量を調べるための試験と等方圧縮試験を行った。実験にはすべてNGI製三軸圧縮試験機を用いた。

3. 1 供試体の作製

煮沸により試料を十分脱気させ、脱気水を満たしたモールド（内径5 cm）にスプーンで注いだ。所定の間隙比になるようにモールドを軽くたたいた。たたかないとき相対密度が約30%になった。

試料をモールドごと冷蔵庫で徐々に凍結し、直径5 cm、高さ12 cmの供試体を作製した。三軸セルに設置し、ゴム膜をかぶせた状態で融解させた。融解中は20 kPaのセル圧を作用させた。

3. 2 ゴム膜貫入量試験

ゴム膜貫入量試験をRoscoeら⁵⁾の方法で行った。即ち、直径が供試体の直径より小さい円柱の金属棒を供試体中央に入れて等方応力で圧縮した。直径が8, 15, 30 mmの3種類の鉄製の棒を使用した。供試体の直径は三軸試験の供試体と同じく5 cmである。この試験は、相対密度 $D_r = 30, 40, 80\%$ の供試体で行った。尚、用いたゴム膜はラテックス製で厚さ0.2 mmである。劣化していないものを使用した。

3. 3 等方圧縮試験

等方圧縮試験を、側圧を20から500 kPaに変えて行った。載荷、除荷、再載荷（場合によってはさらに、再除荷、再再載荷）の載荷サイクルを与えた。 D_r が30, 40, 80%の供試体で行った。

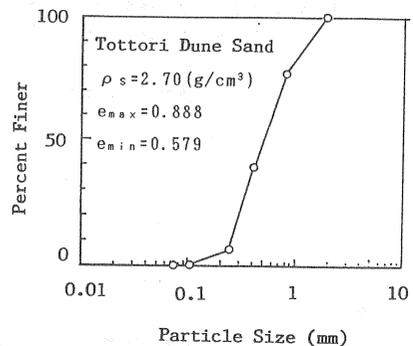


図1：試料の粒度分布と物理的性質

4. 結果と考察

4. 1 ゴム膜貫入特性

図2は、ゴム膜貫入量試験の結果の1例で、供試体からの排水量 Δv を側圧に対してプロットしている。ただし、排水量は処女載荷過程における側圧 20 kPaのときを基準としている。同様の結果が、他の条件においても得られた。

図3は、3種類の金属棒に対する、砂の占める正味の水平断面積 A_s と単位ゴム膜面積当りの排水量 ($\Delta v / A_H$ 、ここに A_H は供試体と接している部分のゴム膜面積) を側圧をパラメータにして表したものである。両者の関係は、側圧の同じ値に対して、1本の直線で表せ、 A_s が0のときの排水量、即ちゴム膜貫入量 Δv_{HP} を外挿によって求めることができる。

上記の方法で決定したゴム膜貫入量 Δv_{HP} を側圧 σ_r の対数に対してプロットすると図4が得られる。 Δv_{HP} と $\log \sigma_r$ の関係はほぼ直線的であるが、プロット全体はかなりばらついている。このばらつきは、従来の研究^{5), 6)}においては無視されている。しかし、詳細に見ると、処女載荷過程とそれ以外の過程で異なった傾向がみられる。処女載荷過程では、 Δv_{HP} の定義から $\sigma_r = 20$ kPaのとき $\Delta v_{HP} = 0$ であるのに対し、それ以外の過程では、 $\sigma_r = 20$ kPaのときに Δv_{HP} は0でない。また、傾きも、処女載荷過程とそれ以外の過程で異なっている。

図5は、このような観察に基づいて、 Δv_{HP} と、各載荷過程における 20 kPaでのゴム膜貫入量 Δv_{HP0} との差をとって、 $\log \sigma_r$ に対してプロットしたものである。処女載荷過程とそれ以外の過程との間の違いが明瞭になっている。図5の関係を式で表すと

$$\Delta v_{HP} - \Delta v_{HP0} = K \log (\sigma_r / \sigma_{r0}) \quad (1)$$

ここに、 σ_{r0} は基準の圧力で、今の場合 20 kPa である。K は図5の直線の傾きに相当し、処女載荷過程であるか、そうでないかによって異なった値をとる。

図6は、相対密度 80% のときのゴム膜貫入特性を示したものである。図5と比較して、同じ傾向が読み取れるが、詳細にみると、K の値は処女載荷過程ではほぼ同

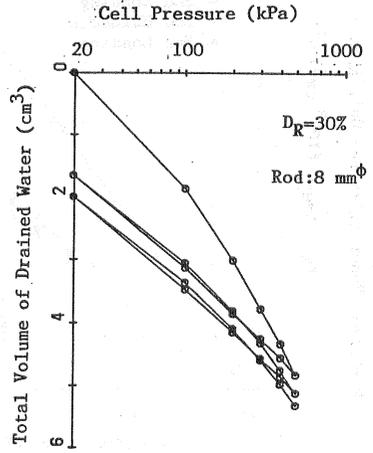


図2：ゴム膜貫入量試験結果の1例 (緩詰め；金属棒直径8mm)

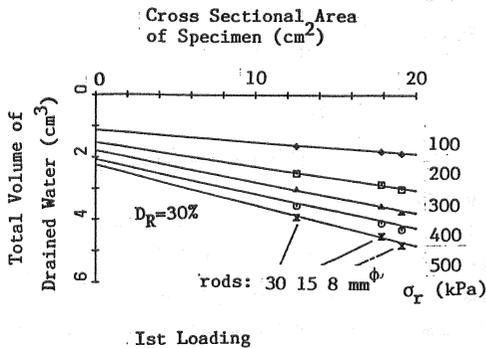


図3：総排水量と供試体の正味の断面積の関係

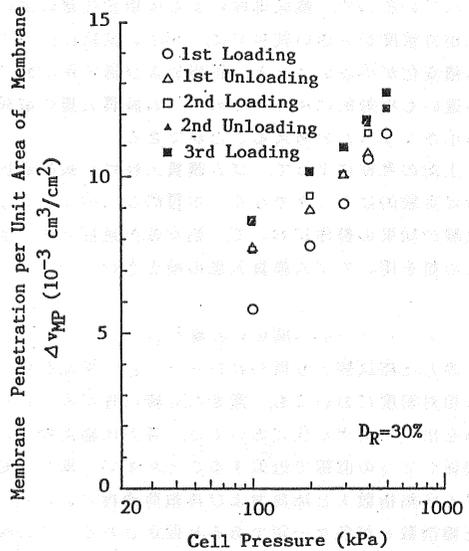


図4：ゴム膜単位面積当りのゴム膜貫入量と側圧の関係

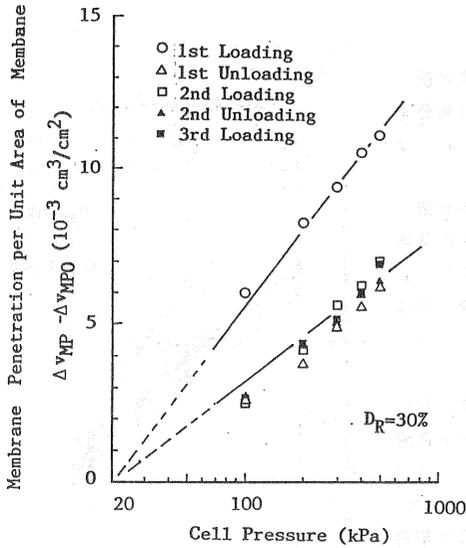


図5：ゴム膜単位面積当りの貫入量と側圧の関係 (緩詰め)

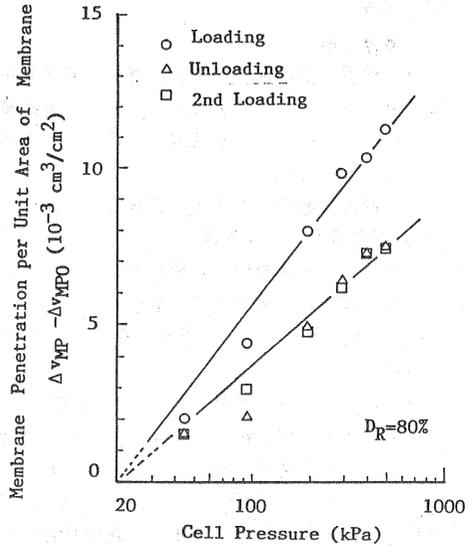


図6：ゴム膜単位面積当りの貫入量と側圧の関係 (密詰め)

じであるが、それ以外の過程で図5におけるより大きな値になり、結果として、処女載荷過程とそれ以外の過程との違いがわずかに小さくなっている。

ゴム膜貫入量と側圧の関係が載荷の過程によって異なることがわかった。これは、除荷・再載荷過程では、処女載荷によって生じた比較的大きな体積変化によってゴム膜の状態が処女載荷前の状態と異なったものになったためと思われる。また、正規圧密状態と過圧密状態では粒子配列に違いがあるはずであり、これも反映していると考えられる。ここで用いたゴム膜貫入測定方法では、供試体中心に入れたロッドのため軸方向の変形が拘束されているので、載荷過程による体積変化量の違いは、半径方向の変形の違いに起因している。

相対密度が大きい試料では、小さい試料に比べて、処女載荷時の体積変化が小さいことと、正規および過圧密状態における粒子配列の違いも相対的に小さいため、ゴム膜貫入量の載荷過程による違いも小さくなったと考えることができる。

上記の考察によって、ゴム膜貫入特性が載荷過程によって異なるのは実験的ばらつきでなく、本質的なものであると考え、等方圧縮試験の結果の整理において、処女載荷過程とその他の過程で異なるKの値を用いてゴム膜貫入量の補正を行った。

4. 2 e - log σ_n関係の非線形性

等方圧縮試験より得られたe - log σ_n関係を図7に示す。いずれの相対密度においても、顕著な非線形性がみられる。弾塑性構成関係を用いたモデル化においては、等方圧縮過程におけるe - ln σ_n関係を2つの直線で近似することが多い。即ち、処女圧縮過程における圧縮指数λと除荷および再載荷過程における、過圧密領域での圧縮指数κが各々一定であると仮定される。この仮定はモデルを簡単にするという効果があるが、図7から明らかなように、圧縮指数

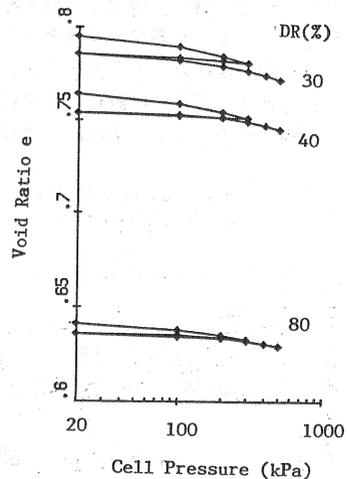


図7：等方圧縮試験の結果；間隙比と側圧(対数)の関係

は正規圧密領域あるいは過圧密領域に限っても一定ではない。圧縮指数の応力依存性と、初期間隙比依存性について考察する。

正規、過圧密を問わず、圧縮指数を λ で表し、次式で定義する：

$$\lambda = -de / d \ln \sigma_m \quad (2)$$

ある状態1から別の状態2に変化したとき、式(2)の微分を差分で表して

$$\lambda = - (e_1 - e_2) / \ln (\sigma_{m1} / \sigma_{m2}) \quad (3)$$

図8は式(3)で求めた λ を状態1と2の平均応力 $(\sigma_{m1} + \sigma_{m2}) / 2$ に対してプロットしたものである。いずれの初期間隙比においても、 λ は平均応力の関数であり、その関数形は載荷過程に依存することがわかる。処女載荷過程では平均応力の増加と共に λ が増加し、再載荷過程でも応力の増加と共に λ は増加するが、先行応力付近から処女載荷過程の λ の値に漸近している。除荷過程においては、 λ の変化は他の過程に比べて小さいことがわかり、とくに密な試料ではほとんど一定値をとる。

5. 結論

単に設計のためにとどまらず、土の挙動の把握のための数値解析の重要性が増している。有限要素法などの数値解析を行う上で対象土の力学挙動を的確に表現できる構成モデルを用いる必要がある。弾塑性の概念を用いた様々な構成モデルが提案されているが、その多くは、等方応力のもとで圧縮指数が一定であると仮定されている。

本ノートでは、鳥取砂丘砂に対して行った等方圧縮試験とゴム膜貫入量試験の結果に基づいて、圧縮指数の応力依存性とゴム膜貫入量の非弾性的挙動を考察した。主な結論を列挙する：

(1) 圧縮指数は、正規・過圧密領域を問わず、処女載荷および再載荷過程で応力の増加と共に増加し、除荷過程では変化は小さく、密な試料ではほとんど一定になる。

(2) ゴム膜貫入特性は、処女載荷過程とその他の過程によって異なる。

構成関係のモデル化に際して、ここで示したような、 $e - \log \sigma_m$ 関係の非線形性は、現在までのところあまり考慮されていないが、将来、より高度なシミュレーションを行う上で重要になると考えられる。

謝辞

実験に協力していただいた、鳥取大学卒業生、福田博氏(日特建設㈱)、平岩竜彦氏(日本工営㈱)および岡田茂氏(㈱佐伯建設工業)に謝意を表す。

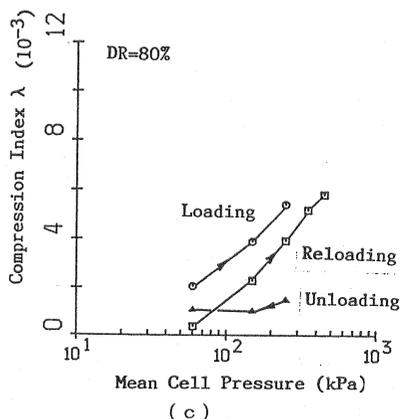
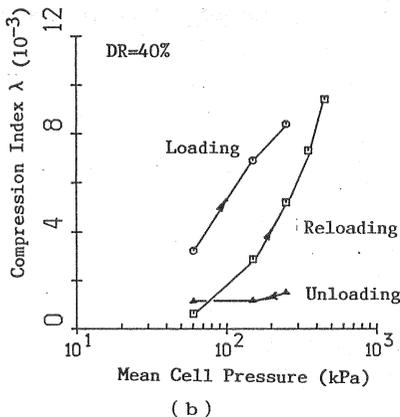
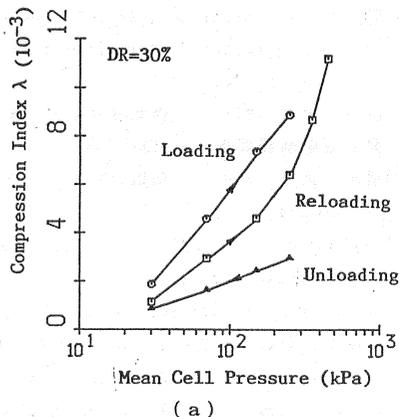


図8：圧縮指数と側圧の関係：(a) $D_r = 30\%$ ；(b) $D_r = 40\%$ ；(c) $D_r = 80\%$

参考文献

- 1) Shimizu, M., Iwanari, K., Okada, S. and Hiraiwa, T. (1990): "Evaluation of mechanical parameters in terms of void ratio for Tottori Dune Sand", Reports of Faculty of Engineering, Tottori University, Vol. 21, No. 1, pp.157-168
- 2) 清水・平岩 (1989): "弾塑性構成式の鳥取砂丘砂への適用性について", 第41回土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集, pp.264-265
- 3) 清水・岡田 (1990): "鳥取砂丘砂の力学特性", 第42回土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集, pp.268-269
- 4) Newland, P.L. and Alley, B.H. (1959): "Volume change in drained triaxial tests on granular materials", Geotechnique, Vol. 9, pp.174-182
- 5) Roscoe, K.H., Schofield, A.N. and Thurairajah, A. (1963): "An evaluation of test data for selecting a yield criterion for soils", ASTM, STP No.361, pp.111-128
- 6) Fridman, S., Zeitlen, J.G. and Alpan, I. (1973): "The membrane effect in triaxial testing on granular soils", Journal of Testing and Evaluations, Vol.1, No.1, pp.37-41
- 7) Vaid, Y.P. and Negussery, D. (1984): "A critical assessment of membrane penetration in the triaxial test", Journal of Testing and Evaluation, ASTM, Vol.7, No.2, pp.70-76