

不飽和土の粒子間力とサクシオンと有効応力の関係

Relations between inter-particle force, suction and effective stress of unsaturated soil

宮本裕二*・荒木功平**・酒匂一成***・阿部廣史****・北村良介*****

Yuji MIYAMOTO, Kohei ARAKI, Kazunari SAKO, Hirofumi ABE, Ryosuke KITAMURA

- * 工博 鹿児島県 始良・伊佐地域振興局建設部 (〒899-5212 鹿児島県始良郡加治木町諏訪町 12)
- ** 工博 株式会社ダイヤコンサルタント (〒101-0032 東京都千代田区岩本町 1-7-4)
- *** 工博 立命館大学 COE 推進機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)
- **** 工博 長野工業高等専門学校 (〒381-8550 長野市徳間 716)
- ***** 工博 鹿児島大学 工学部海洋土木工学科 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

The unsaturated soil is a heterogeneous and non-uniform material which is composed of solid-phase, liquid-phase and gas-phase, i.e., a multi-phase material. In this paper the relationship among inter-particle force, suction and Bishop's parameter χ in effective stress equation are derived based on Kitamura Model which is based on the mechanical & probabilistic consideration on the scale of particle size. Then the numerical experiments are carried out to obtain these relations and the discussion on the obtained results is done. It is found that the contribution of suction to inter-particle force at contact point depends on the grain-size distribution and void ratio of unsaturated soil.

Key Words: Inter-particle force, suction, Bishop's parameter χ , effective stress

1. はじめに

1948 年に出た数冊の土質力学の教科書は、透水、圧密、せん断を基本として、各々の理論に基づき説明されている。しかし、48 年型教科書による土質力学¹⁾は、透水、圧密、せん断の基礎となる理論に有機的なつながりはない。また、暗黙のうちに二相系、すなわち、飽和土を対象としている。一方、陸上の表層土は不飽和状態にあり、その力学的挙動は透水、圧密、せん断現象が複雑に絡み合っている。北村ら^{2),3),4)}、宮本ら⁵⁾、SAKO ら⁶⁾は土粒子レベルでの力学的・確率論的考察に基づいた数値力学モデル（以下、北村モデルと称する）を提案し、物理的意味の明確なモデルパラメータを用い、不飽和土の保水・浸透・圧縮・せん断挙動を有機的・統一的に解明することを目指している。

本論文では、不飽和土に特有な物理量であるサクシオン、ビショップ⁷⁾が提案した有効応力と北村モデルで用いられている粒子間力の関係を明らかにするとともに不飽和土の基本的な関係であるサクシオン・体積含水率関係、透水係数・体積含水率関係、透気係数・体積含水率関係を示し、若干の考察を加えている。

2. 北村モデルによるビショップのパラメータ χ の誘導

図-1 は北村モデルの一つである間隙モデル⁴⁾を示している。図-1(a)は数個の土粒子からなる土塊の一要素を示したものであり、

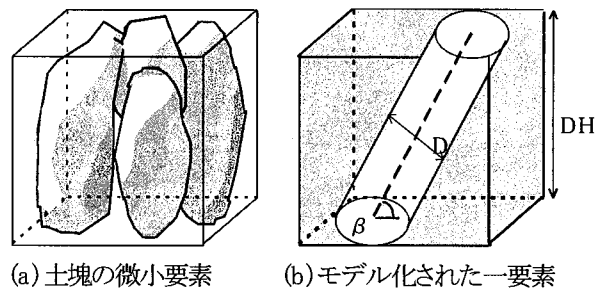


図-1 間隙モデル⁴⁾

これを図-1(b)のように間隙部分を管径 D 、傾き β の円管に、土粒子実質部分を円管以外の不透水部分にモデル化した。このようにモデル化されたものを間隙モデルと称している。間隙モデルを用い、いくつかの力学的及び確率論的考察を加えることによって、次式に示す土塊の間隙比 e 、体積含水率 θ （あるいは飽和度 S_r ）、サクシオン・体積含水率関係（ $s-\theta$ 関係：水分特性曲線）、不飽和・飽和透水（透気）係数・体積含水率関係（ $k_w-\theta$ 関係、 $k_a-\theta$ 関係）を求めることができる。

$$e = \int_0^\infty \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{V_p}{V_e - V_p} \cdot P_d(D) \cdot P_c(\beta) d\beta dD \quad (1)$$

$$\theta = \frac{e(d)}{1+e} = \frac{1}{1+e} \int_0^d \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{V_p}{V_e - V_p} \cdot P_d(D) \cdot P_c(\beta) d\beta dD \quad (2)$$

$$S_r = \frac{1}{e} \int_0^d \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{V_p}{V_e - V_p} \cdot P_d(D) \cdot P_c(\beta) d\beta dD \quad (3)$$

$$h_c = \frac{4 \cdot T_s \cdot \cos \alpha}{\gamma_w \cdot d} \quad (4)$$

$$s = \gamma_w \cdot h_c = \frac{4 \cdot T_s \cdot \cos \alpha}{d} \quad (5)$$

$$k_w = \int_0^d \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\pi \gamma_w D^3 \sin \beta}{128 \cdot \mu_w (D/\sin \beta + DH/\tan \beta)} P_d(D) \cdot P_c(\beta) d\beta dD \quad (6)$$

$$k_a = \int_0^d \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\pi \gamma_w D^3 \sin \beta}{128 \cdot \mu_a (D/\sin \beta + DH/\tan \beta)} P_d(D) \cdot P_c(\beta) d\beta dD \quad (7)$$

ここに、 V_p ：円管の体積、 DH ：素体積高さ

V_e ：素体積全体の体積

$P_d(D)$ ：管径 D の確率密度関数

$P_c(\beta)$ ：円管の傾き β の確率密度関数

h_c ：圧力水頭、 T_s ：表面張力

α ：毛細管と水の接触角

μ_w ：水の粘性係数、 μ_a ：空気粘性係数

γ_w ：水の単位体積重量

d ：間隙水を保持する円管の最大管径

式(5)で得られるサクシジョンの測定範囲は、約 1 MPa(相対湿度 99.26%)～10³ MPa(相対湿度 0%)である⁹⁾。農学分野では植物がしおれ始める状態に対して初期しおれ点(以下、しおれ点)という語が用いられる。そのときのサクシジョン(水頭表示)を h_{dry} (約 316cm=310kPa^{9),10)}とし、式(4)中の管径 d は、大気圧下で土から水を取り出すことのできる最小の管径 d_{dry} と仮定すると、次式のようになる。

$$d_{dry} = \frac{4 \cdot T_s \cdot \cos \alpha}{\gamma_w \cdot h_{dry}} \quad (8)$$

図-2(a)は、2粒子(粒径 D_s)の接点で生じた間隙水のメニスカス(メニスカス半径 r)を示している。図-2(a)中の A は接平面での断面積(添字 w ：水、 a ：空気、 AEV ：空気侵入値)を表している。この状態で間隙水の表面張力 T_s によって生じる粒子間力 F_i は次式のようになる。

$$F_i = 2\pi r' T_s + \pi r'^2 s \quad (9)$$

図-2(a)の幾何学的関係から r' は次式となる。

$$r' = \sqrt{(r + D_s/2)^2 - (D_s/2)^2} - r \quad (10)$$

メニスカス半径は表面張力とサクシジョンの釣り合い条件より式(11)と定義されることから、平均粒径 $\overline{D_s}$ から算定する粒子間力 $F_i(D_s)$ は次式となる。

$$r = 2T_s / s \quad (11)$$

$$F_i(D_s) = \frac{2T_s \cdot \pi \left(\sqrt{2T_s + s\overline{D_s}} - \sqrt{2T_s} \right) \sqrt{2T_s + s\overline{D_s}}}{s} \quad (12)$$

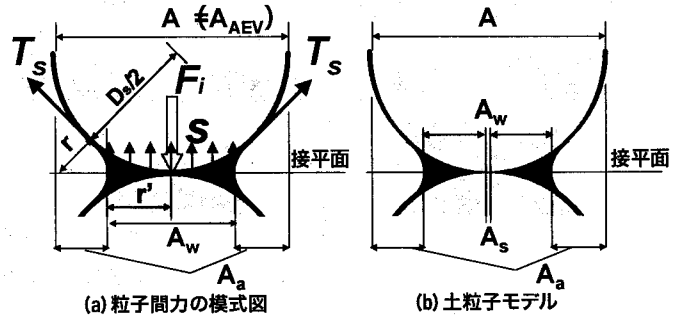


図-2 土粒子(粒子間力)のモデル化

一方、ビショップ⁷⁾の有効応力式は次式で示される。

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi (u_a - u_w) \quad (13)$$

ここに、 χ ：パラメータ、 u_a ：間隙空気圧、 u_w ：間隙水圧

ビショップの有効応力式において不飽和土のサクシジョンに起因する応力は式(13)の右辺第二項である。ここでは、第二項を η とすると次式となる。

$$\eta = \chi s = \chi (u_a - u_w) \quad (14)$$

ビショップの有効応力式を図-2(b)の土粒子モデルを用いて簡単に説明する。接平面における土粒子、間隙水、間隙空気それぞれの占める面積を A_s 、 A_w 、 A_a 、全体の面積を A とすると、力のつり合い条件より次式となる。

$$\begin{aligned} \sigma' A &= \sigma A - u_a A_a - u_w A_w \\ \sigma' &= \sigma - u_a \frac{A_a}{A} - u_w \frac{A_w}{A} \\ \sigma' &= \sigma - u_a \left(1 - \frac{A_s}{A} \right) + (u_a - u_w) \frac{A_w}{A} \end{aligned} \quad (15)$$

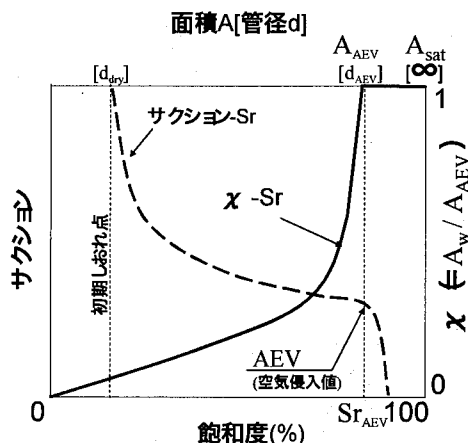
$A_s/A = a$ 、 $A_w/A = \chi$ とおけば次式となる。

$$\sigma' = \sigma - u_a(1-a) + \chi (u_a - u_w) \quad (16)$$

式(16)では実質的に $a=0$ と考えると式(13)と等しくなる。すなわち、ビショップのパラメータ χ は、面積比(= A_w/A)で定義されることがわかる。

図-3は、飽和度、AEVと間隙モデルによって導かれるビショップのパラメータ χ の関係を示した模式図である。間隙モデルによる χ の算定手順について以下に示す。

まず、間隙モデルの式(3)、式(5)から得られた水分特性曲線からAEVを算定する。AEVは飽和状態の土塊に空気が入り始める閾値のサクシジョンであり、AEVに対応する飽和度より大きな飽和度領域での間隙空気は気泡で存在している。つまり、サクシジョンが有効応力の変化に寄与しないと考え、飽和状態からサクシジョンがAEV値までの範囲(間隙モデルの積分範囲 d (AEV～ ∞))では $\chi=1$ と仮定する。このときの接平面では $A_s=0$ 、 $A_a=0$ とみなされるため、断面積 A は、 $A=A_w$ (AEV)と表すことができる。



ここで、間隙モデルでは接平面の面積を図-1(b)における円管の側面積で表すことができ、 A_w , A_{AEV} は、それぞれの飽和度に対応した管径 d を用いて計算することができる。そこで、間隙モデルを用いたビショップのパラメータ χ は次式で示される。

$$\chi = \frac{A_w}{A_{AEV}} = \frac{\int_0^d \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \pi D \cdot \frac{DH}{\sin \beta} \cdot P_d(D) \cdot P_c(\beta) d\beta dD}{\int_0^{d_{AEV}} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \pi D \cdot \frac{DH}{\sin \beta} \cdot P_d(D) \cdot P_c(\beta) d\beta dD} \quad (17)$$

ここに、 d_{AEV} : AEV における間隙水を保持する円管の最大管径

また、図-2(a)より、 $A_w = \pi r^2$ 、 $A_{AEF} = \pi D_s^2/4$ となり、 χ を用いた粒子間力 $F(\chi)$ は次式となる。

$$\chi = \frac{A_w}{A_{AEV}} = \frac{4r'^2}{D_c^2} \quad (18)$$

$$F_i(\chi) = \pi D_s T_s \sqrt{\chi} + \pi D_s^2 s \chi / 4 \quad (19)$$

荒木¹²⁾は締固め試験から得られたデータを入力パラメータとして締固め曲線をモデル化し、飽和度 S_r ~ 含水比 w 関係、増分比 (dS_r/dw) の関係に着目し、飽和度が 0 ~ 100% の値をとることから増分比の分布を確率密度関数とみなし、正規分布を仮定した。物理試験から得たいくつかのパラメータを入力値として締固め曲線を次式により導いてきている。

$$\frac{dS_r}{dw} = f_{ND}(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left\{ -\frac{(w - w_m)^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (20)$$

$$\sigma = \frac{e_m \rho_w}{\sqrt{2\pi K \rho_s}} \quad (21)$$

$$K = \frac{1}{S_{r \max} - S_{r \min}} \quad (22)$$

$$S_{r \min} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(\frac{1}{e_1} - \frac{\rho_{d \max}}{\rho_s - \rho_{d \max}} \right) w_{opt} \quad (23)$$

$$\rho_d = \frac{\rho_s}{1 + \frac{Kw \rho_s / \rho_w}{\int_0^w f_{ND}(w) dw + KS r_{\min}}} \quad (24)$$

ここに, $f_{ND}(w)$: 正規分布の確率密度関数

 w_m : 含水比に対する増分比の分布の平均値 $S_{r\min}$: 最小飽和度, $S_{r\max}$: 最大飽和度

$e: f_{ND}(w)$ 最大時の間隙比

 ρ_w : 水の密度, ρ_s : 土粒子密度

$\rho_{dm\max}$: 最大乾燥密度, ρ_d : 乾燥密度

w_{opt} : 最適含水比

図-3 に示した初期しおれ点は最小飽和度 $S_{r_{min}}$ 、 $S_{r_{AEV}}$ は最大飽和度 $S_{r_{max}}$ に対応している。

3. 数値計算結果と考察

数値計算に必要な入力パラメータは豊浦標準砂，鹿児島県内で採取したしらすの土質試験より求める。間隙モデルの入力パラメータである土粒子密度，間隙比を表-1，粒径加積曲線を図-4に示す。間隙モデルの計算は図-4の粒度試験結果を対数正規分布で回帰した計算曲線を用いる。締固め試験結果を表-2，締固め曲線の算定に必要なパラメータを表-3に示す。以下，室内土質試験結果を実験値，間隙モデル等による計算結果を計算値とする。表-1，図-4より，用いた試料の中央粒径 D_{s50} は 10^{-1} mm 程度であること，豊浦砂は粒径がほぼ均一で粒度配合が悪いこと，しらすの中ではしらす①が最も細粒分を多く含み間隙比が大きく，しらす③が最も細粒分が少なく，間隙比が小さいことがわかる。

表-1 物性値

試料	土粒子密度 [g/cm ³]	間隙比	採取地
豊浦砂	2.64	0.81	—
しらす①	2.615	1.456	鹿児島市松元町
しらす②	2.401	1.287	日置市伊集院町
しらす③	2.451	1.194	薩摩川内市

表-2 締固め試験結果 (しらす③)

$w_{opt}[\%]$	$\rho_{dmax} [g/cm^3]$	ϵ_{opt}
24.4	1.280	1.06

表-3 締固め曲線の入力パラメータ (しらす③)

e_l	e_m	$w_m[\%]$	$S_{rmax}[\%]$
0.81	0.81	18.5	100

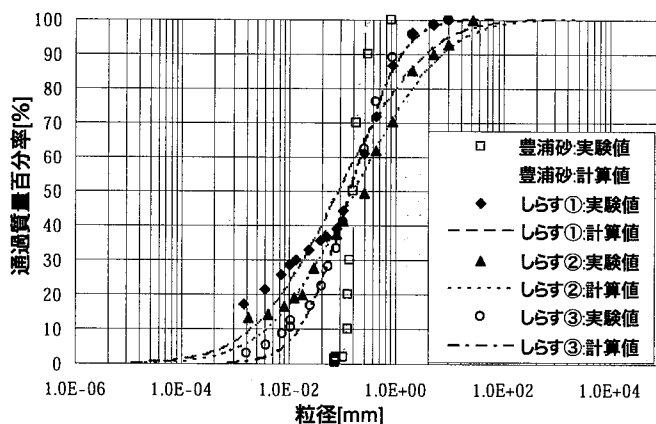


図-4 粒度試験結果

図-5 に水分特性曲線の実験値と計算値を示す。計算に用いた入力値は、表-1 と図-4、計算式は式(2)、式(5)である。計算された水分特性曲線は、実験結果を良好に表現できており、細粒分の多いしらす①の残留体積含水率(図-3 におけるしおれ点の飽和度に対応)が最も大きい。

図-6、図-7 に不飽和・飽和透水係数、不飽和透気係数の計算値と実験値を示す。計算に用いた入力値は、表-1 と図-4、計算式は式(2)、式(6)、式(7)である。図-6 に示す不飽和・飽和透水

係数は AEV より大きい体積含水率で計算値が急激に大きくなる。豊浦砂、しらす③の実験値と計算値を比較すると計算値が実験値より若干大きい値となった。図-7 に示す不飽和透気係数は AEV より大きい体積含水率では実験値、計算値とも急激に小さくなる傾向があり、空気の移動は制限される。一方、AEV より体積含水率が小さくなると計算された透気係数は一定値となる傾向がある。豊浦砂の場合、計算値が実験値より若干大きい値となっている。

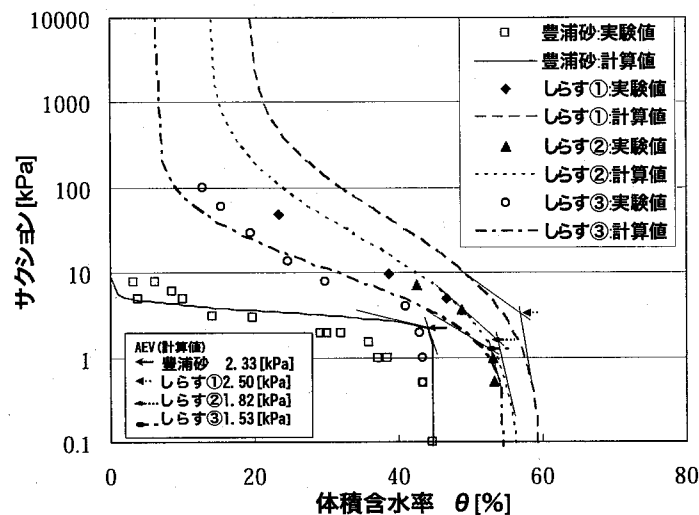


図-5 水分特性曲線(豊浦砂実験値:阿部¹³⁾)

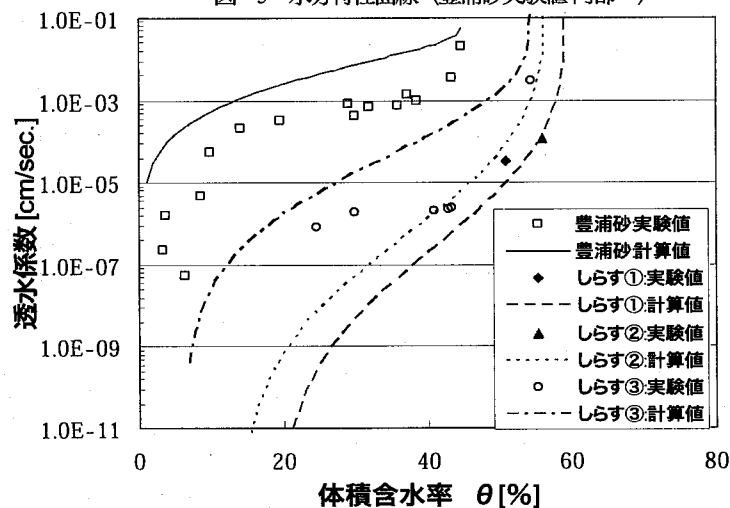


図-6 不飽和透水係(豊浦砂実験値:阿部¹³⁾)

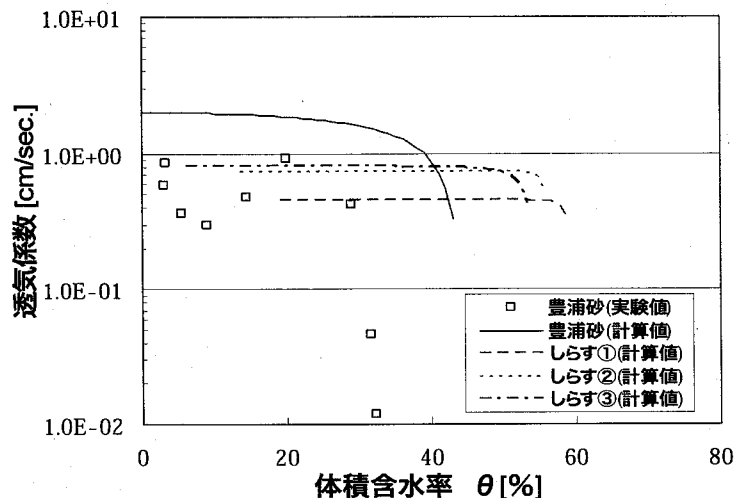


図-7 不飽和透気係数(豊浦砂実験値:阿部¹³⁾)

図-8は χ の計算値と豊浦砂の実験値を示している。計算に用いた入力値は、表-1と図-4、計算式は式(3)、式(17)である。実験値の χ は同じ条件で作られた供試体の飽和度の試験と不飽和土の試験で得られる破壊線の差から逆算して求められる。本論文の実験値はサクシオン一定三軸圧縮試験結果から求めている。豊浦砂は計算値と実験値が近い値となった。しらす①、②、③の計算値において残留飽和度からAEVに対応する飽和度領域での χ -飽和度曲線の勾配変化($d\chi/dS_r$)は、粒度配合が悪いほど小さいことがわかる。粒度配合のよいしらす①は飽和度が小さいうちは勾配が小さく、飽和度が大きくなるにつれて勾配が急になる傾向を示す。すべての試料において、AEVに対応する飽和度より高い領域では $\chi=1$ となる。粒度配合の悪い豊浦砂の χ -飽和度曲線は直線に近い結果が得られた。

図-9は η の計算値と豊浦砂の実験値である。計算に用いた入力値は、計算結果(図-5、図-8)、計算式は式(14)である。豊浦砂の計算曲線は低飽和度領域で実験値から少し離れているが、定性的な傾向を表現できている。本論文で提案している間隙モデルは残留飽和度の状態から飽和土までのすべての領域で η 値の計算が可能である。 η -飽和度曲線において η 値は極大値をもち、極大値に対応する飽和度は試料によって異なることがわかる。すなわち、粒度分布や締固め度に依存して異なる土粒子骨格構造、間隙径分布を反映し、同じ含水状態でもサクシオン(あるいは粒子間力)が異なり、さらにはサクシオンが有効応力に寄与する程度が異なることがわかる。また、しおれ点より低い飽和度領域では η はゼロとなり、有効応力にサクシオンは寄与しないこと、AEVに対応する飽和度より高い飽和度領域ではサクシオンが有効応力に寄与している。

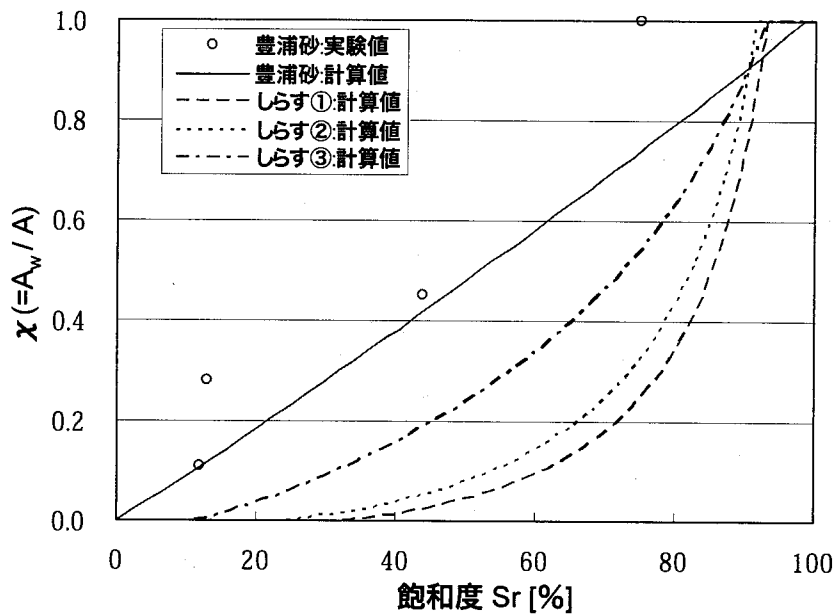


図-8 χ -飽和度の関係 (豊浦砂実験値:阿部¹³⁾)

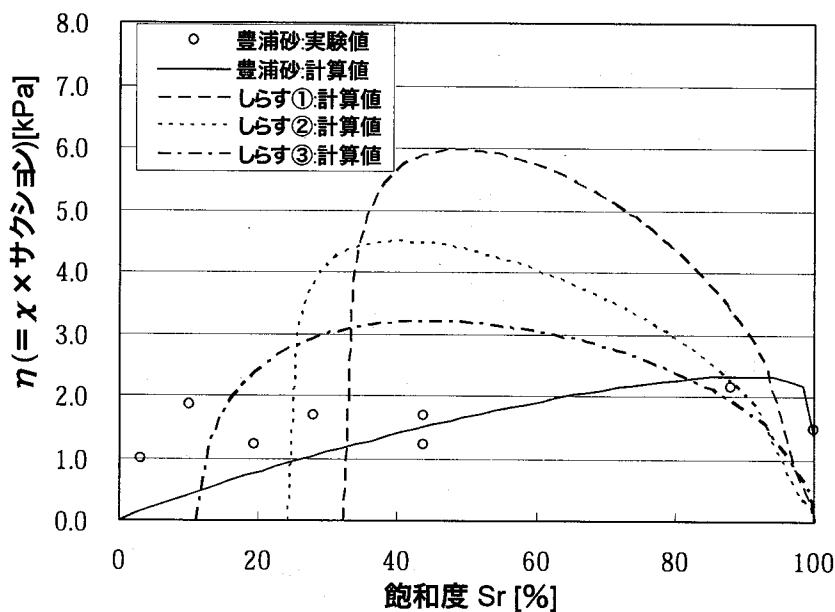


図-9 η -飽和度の関係 (豊浦砂実験値:阿部¹³⁾)

図-10 は $F_i(D_s)$ とサクシヨンの関係である。計算に用いた入力値は、計算結果 (図-5) と中央粒径 D_{s50} 、計算式は式(12)である。試料の中で D_{s50} が最も小さいしらす①の $F_i(D_s)$ -サクシオン曲線が小さくなる。豊浦砂としらす②は、 D_{s50} がほぼ等しいことから、 $F_i(D_s)$ 値も等しい結果となった。各試料ともサクシオン値が 500kPa 以上で $F_i(D_s)$ 値にほとんど変化がみられないのは、サクシヨンの増加により、式(9)第2項が D_{s50} に依存した一定値になるためである。すなわち、残留飽度以下の領域ではサクシオンが粒子間力に寄与する量は一定であることがわかる。

図-11 は $F_i(\chi)$ とサクシヨンの関係である。計算に用いた入力値は、計算結果 (図-5、図-8) と中央粒径 D_{s50} 、計算式は式(17)である。 $F_i(\chi)$ 値は D_{s50} が大きいほど値が大きい。 $F_i(\chi)$ -サクシオン曲線は、極大値をもち、試料によって $F_i(\chi)$ 値が極大となる飽和度が異なることがわかる。 $F_i(\chi)$ -サクシオン曲線は、極大値よりサクシオンが大きくなるにつれ、 $F_i(\chi)$ 値が小さくなる。これは、 χ 値が小さくなるためであり、 $F_i(D_s)$ -サクシオン曲線 (図-10) と異なる傾向を示した。また、 $F_i(\chi)$ -サクシオン曲線において AEV 値 (約 1~3kPa) で折れ点があるのは、サクシオン値が小さい領域では、 $\chi=1$ と仮定しているためである。

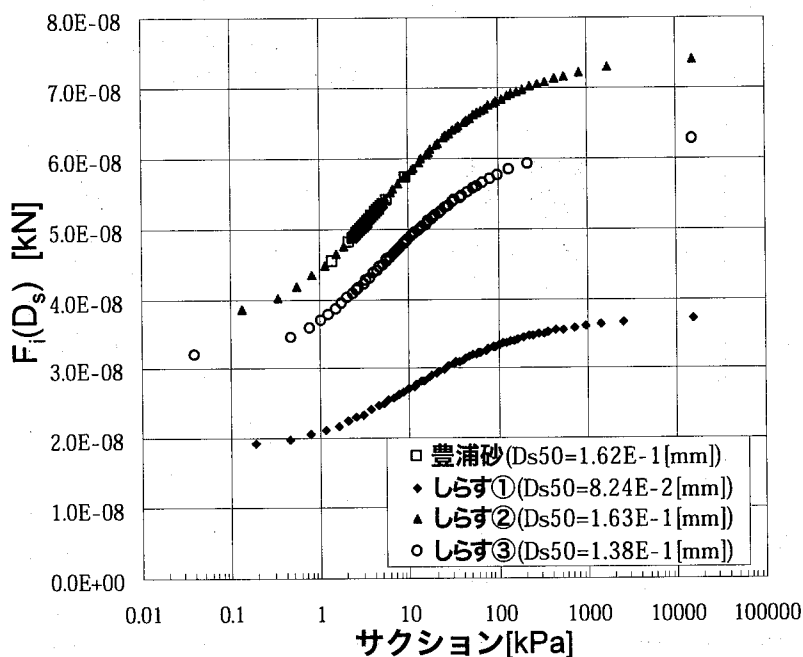


図-10 $F_i(D_s)$ -サクシヨンの関係 (計算値)

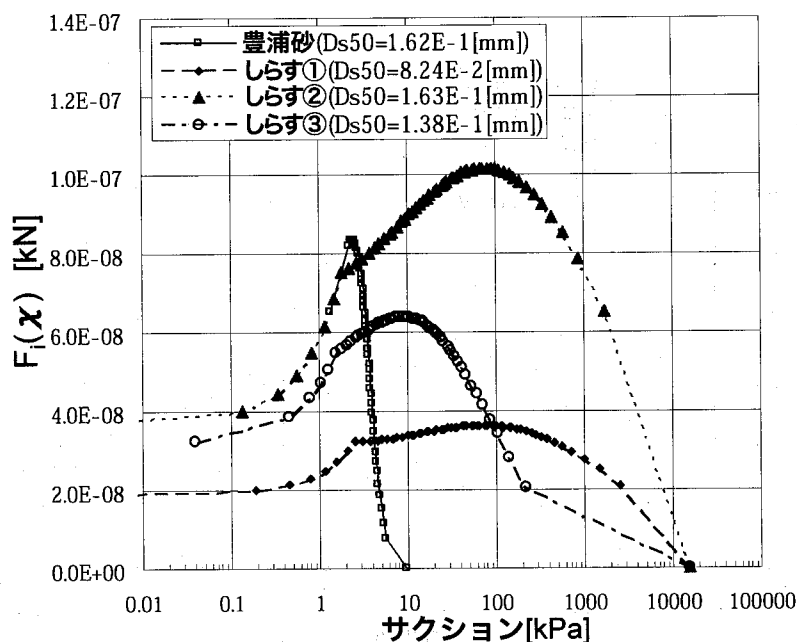


図-11 $F_i(\chi)$ -サクシヨンの関係 (計算値)

図-10 と図-11 はそれぞれ粒径とビショップのパラメータ χ の関数である粒子間力とサクシヨンの関係を示している。粒子間力はベクトル（一階テンソル）であり、サクシヨンは二階テンソルである。不飽和土では粒子間力を平均化した応力が粒子間力と線形な関係にないことを示唆している。このことを明らかにするため、 $F(\chi)$ と η の関係を図-12 に示す。各試料とも飽和度が 0%（乾燥土）では η 値は 0kPa、 $F(\chi)$ 値は 0kN となる。AEV より高飽和度領域で、 $F(\chi)$ 値は 0kN にならないのは、 $\chi=1$ 、サクシヨン値が 0kPa として式(19)に代入すると、次式となり粒径 D_s と表面張力の積である第 1 項の値が残るためである。また、 D_{s0} が大きいほど勾配 ($dF(\chi)/d\eta$) が大きいことがわかる。

$$F(\chi=1) = \pi D_s T_s \quad (19b)$$

ここに、入力条件 ($\chi=1$, $s=0$, すなわち、 $\eta=0$)

図-13 はしらす③の締固め試験結果（実験値、計算値）、及び η と含水比の関係の比較である。締固め曲線の計算に用いた入力値は、表-2 と表-3、計算式は式(20)～式(24)である。締固め曲線の計算値と実験値はほぼ等しく、極小値・極大値をもつことがわかる。また、締固め曲線と η が極大値を示すときの含水比がほぼ等しくなることがわかる。このことは、本実験で行った突固め条件で得られた最適含水比のサクシヨンが不飽和土の有効応力に最も寄与していることを示唆している。

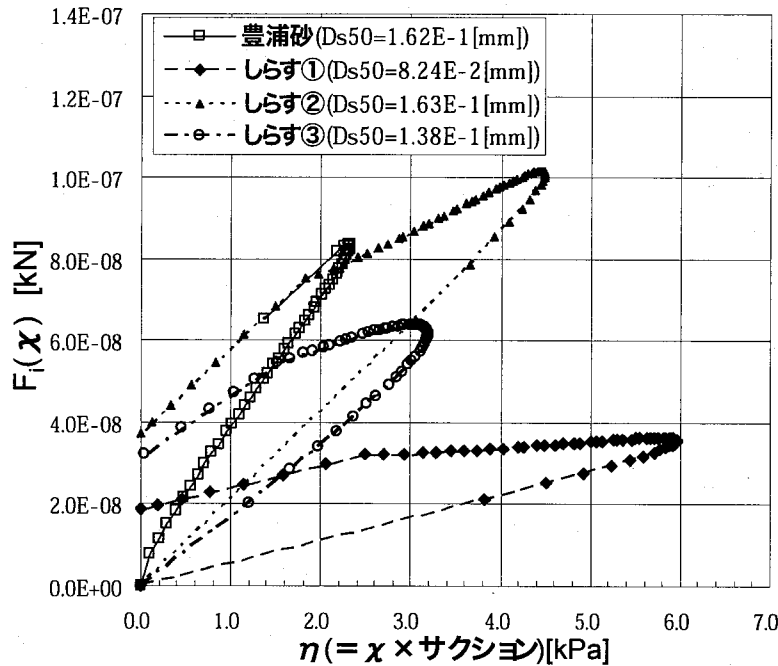


図 12 $F(\chi)$ — η の関係 (計算値)

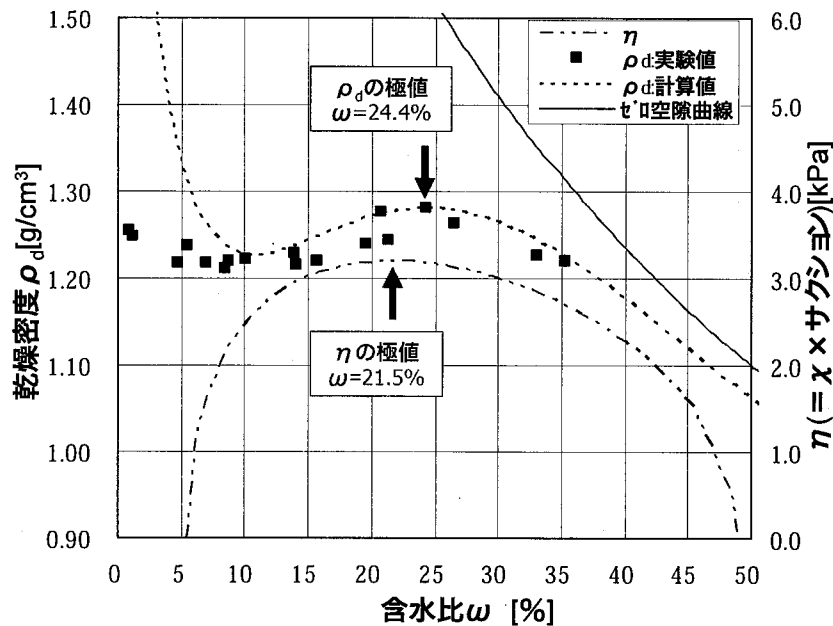


図-13 締固め曲線と η の関係 (しらす③)

4. おわりに

本論文では、間隙モデルを用いて不飽和土の水分保持特性・透気透水係数、サクシジョンの粒子間力への寄与する程度をビショッップのパラメータ χ , η より求め、モデルの適用性と若干の考察を行った。

得られた結果をまとめると次のようになる。

- ・ 豊浦砂やしらすなどの砂質土の水分保持曲線は、間隙モデルによって予測することが可能である。
- ・ 不飽和・飽和透水係数はしおれ点、AEV 付近で急激に値が変化し、不飽和透気係数は飽和度が高くなるほどゼロとなり、含水状態が低くなれば一定値となる。
- ・ 間隙モデルは χ 値, η 値の計算が可能である。 χ -飽和度曲線は土の配合により曲線の形状が異なる。 η -飽和度曲線において η 値は極大値をもち、極大値に対応する飽和度は試料によって異なる。同じ含水状態でもサクシジョンが有効応力に寄与する程度が異なる。
- ・ しらすは締固め曲線と η が極大値を示すときの含水比がほぼ等しくなり、最適含水比のサクシジョンが不飽和土の有効応力に最も寄与している。

間隙モデルは、土粒子骨格構造や間隙流体の存在形態を土粒子レベルから考察し、不飽和土の特徴であるサクシジョン・透水性・透気性を評価するには有用なモデルであると考えられる。その際、しおれ点と AEV に対応する含水状態が不飽和土の重要なパラメータとなることが明らかになった。不飽和土は不均質な不連続材料(三相系)であるということを出発点とした力学体系の構築が必要である。

謝辞：本研究に対して、「不飽和土の試験法・不飽和地盤の調査法の開発と不飽和土質力学の体系化」科研費基盤 (A) (代表：北村) の援助を受けた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 最上武雄：土質工学 30 年の歩み, 土と基礎, 27-10, pp. 3-8, 1979.
- 2) Ryosuke Kitamura; A mechanical model of particulate material based on stochastic process, Soils and Foundations, Vol.21, No.2, pp.64-72, 1981.
- 3) Ryosuke Kitamura; Analysis of deformation mechanism of particulate material at particle scale, Soils and Foundations, Vol.21, No.2, pp.85-98, 1981.
- 4) Kitamura, R., Fukuhara, S. and Uemura, K. : A numerical model for seepage through unsaturated soil, Soils and Foundations, Vol.38, No.4, pp.261-265, 1998.
- 5) 宮本裕二, 酒匂一成, 島田龍郎, 北村良介：不飽和シラス地盤での蒸発を考慮した伝熱・浸透挙動のモデル化, 土木学会応用力学論文集, Vol.5, pp.481-490, 2002.
- 6) K. Sako and R. Kitamura: A practical numerical model for seepage behavior of unsaturated soil, Soils and Foundations, Vol.46, No.5, pp.595-604, 2006.
- 7) Bishop, A.W. : The Measurement of Pore Water Pressure in the Triaxial Test, Pore Water Pressure and Suction in Soil, Butterworths, pp.38-46, 1960.
- 8) (社)地盤工学会：不飽和地盤の挙動と評価, pp.57-59, 2004.
- 9) 近藤純正：水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—, 朝倉書店, pp.188-192, 1994.
- 10) (社)地盤工学会：不飽和地盤の挙動と評価, pp.13-14, 2004.
- 11) 宮本裕二：熱を考慮した不飽和土の浸透特性に関する基礎的研究, 鹿児島大学学位申請論文, pp.131-143, 2001.
- 12) Kohei ARAKI and Ryosuke KITAMURA : Derivation of SWCC and Unsaturated Permeability Coefficient from Compaction Test based on Kitamura Model Proc. 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils (Unsat-Asia2007), 2007 (印刷中) .
- 13) 阿部廣史：不飽和土の力学特性の評価方法に関する実験的研究, 東京大学学位申請論文, pp.235-248, 1994.

(2007 年 4 月 12 日 受付)