

不飽和土のコラプス挙動のモデル化

Model for Collapsing Behavior of Unsaturated Soil

下川大介*・荒木功平**・肥山浩樹***・酒匂一成****・北村良介*****

Daisuke Shimokawa, Kohei Araki, Hiroki Hiyama, Kazunari Sako and Ryosuke Kitamura

*正会員 工修 川崎地質(株)(元鹿児島大学大学院)(〒108-8337 東京都港区三田 2-11-15)

**正会員 工博 (株)ダイヤコンサルタント(〒331-8638 さいたま市北区吉野町 2-272-3)

***農博 鹿児島大学農学部准教授(〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-24)

****正会員 工博 立命館大学グローバル・イノベーション研究機構(〒525-8577 草津市野路東 1-1-1)

*****正会員 工博 鹿児島大学大学院理工学研究科教授(〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-40)

The one-dimensional compression test on Shirasu (volcanic soil) and residual soil was carried out to investigate the collapsing behavior of unsaturated soils. Then the numerical simulation was performed by using KITA-CS model which was proposed Araki & Kitamura. The simulation results were compared with those obtained from soil test and discussed. It is found that KITA-CS model is promising to predict the collapsing behavior of unsaturated soil.

Key Words: collapse, unsaturated soil, numerical model

キーワード: コラプス, 不飽和土, 数値力学モデル

1. はじめに

不飽和土に特徴的な力学挙動の一つとして水浸沈下(コラプス)が挙げられる。不飽和土の有効応力の定義、現場での地盤沈下等と関連し、不飽和土のコラプス現象の解析、予測に関する研究が行われてきている^{1), 2), 3), 4)}。水浸沈下(コラプス)という巨視的な現象は土粒子の不連続な挙動(落ち込み)の総和と見なすことができる。一方、北村ら⁵⁾は、最近 20 年余に行ってきた不飽和土の力学挙動に関する実験的・理論的研究の成果を取りまとめ、不飽和土質力学の体系化を目指した試みを行っている。荒木・酒匂・北村⁶⁾は、不飽和土の圧縮・せん断挙動に関するモデル化を提案している(KITA-CS モデル)。

酒匂・北村⁸⁾は不飽和土の保水・透水挙動に関するモデルを提案している(KITA-SAKO モデル)。

本論文では、霧島市溝辺町のしらす、鹿児島県大島郡喜界町の赤土を試料とし、圧縮過程で含水比を急激に変化させる一次元圧縮試験(水浸沈下試験)を行い、北村らが提案している数値力学モデルの一つである KITA-CS モデルの妥当性を検討している。そして、北村らが提案している数値力学モ

デルの一つである KITA-CS モデルをコラプス現象の解析に適用し、物理的意味の明確なパラメータ(落ち込み率)を用いてコラプス現象を表現できることを明らかにしている。

2. 北村らの数値力学モデル

図-1 は、不飽和土質力学の体系化を目指した北村モデルの構成を示している⁵⁾。本論文では、図に示された KITA-CS モデルを適用することによって不飽和土の一

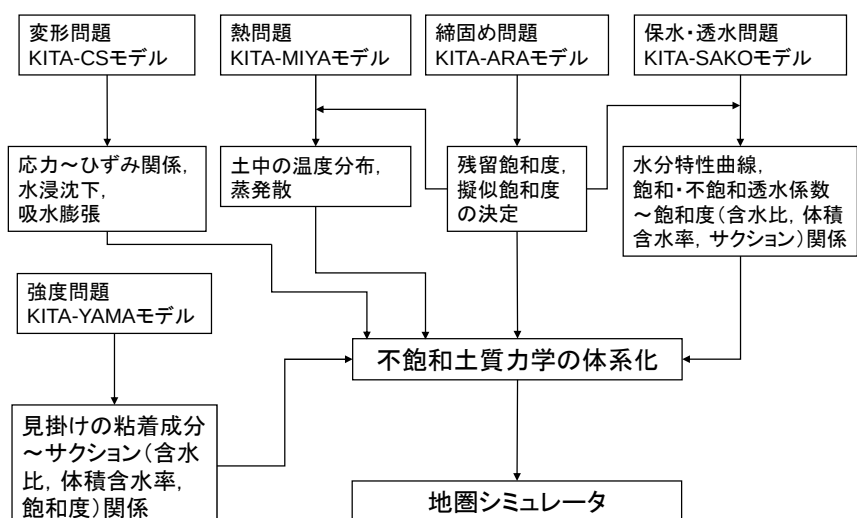


図-1 北村モデルの構成

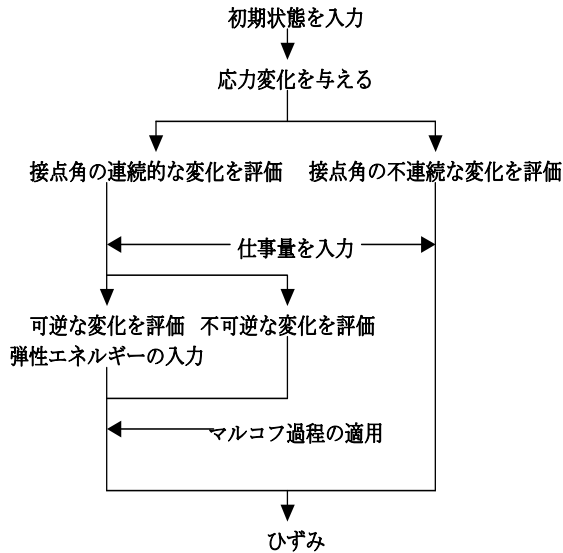


図-2 KITA-CS モデルのフローチャート

次元圧縮過程での水浸沈下挙動をシミュレートし、土質試験結果との比較・検討を行っている。

2.1 KITA-CS モデル

KITA-CS モデルでは、粒子接点での接平面の法線が直交座標軸となす角を $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ とし、 $(\beta_1, \beta_2, \beta_3)$ を接点角と定義し、確率変数としている（但し、独立な確率変数は (β_1, β_2) ）^{6), 7)}。

図-2 に KITA-CS モデルのフローチャートを示す。KITA-CS モデルでは、圧縮・せん断過程で生じる巨視的な変形は土粒子レベルで考えた時、土粒子接点での接点角の変化（連続的な挙動）と粒子接点の消滅・発生をインテグレート（Integrate）したものと考えている。すなわち、粒状体になされた仕事量を土粒子レベルでの接点角の変化と接点の消滅・発生に必要なエネルギー（仕事量）の総和に等しいとすることによって、応力の変化（粒状体になされた仕事量）からひずみが誘導され、応力～ひずみ関係が得られる。接点の消滅・発生は、次節で説明する落ち込み率によって評価する。

(1) エネルギー曲面

KITA-CS モデルでは、粒状体の圧縮・せん断挙動を解析するために粒状体になされた単位体積当りの仕事 W （エネルギー）を物理量として用いている。式(1), (2) は圧縮過程、せん断過程における仕事量 W ～合応力 $(\sigma_m^2 + \tau_{oct}^2)$ 関係を表したものである。

$$\log_{10} W = a_c + d_c \cdot \log_{10} (\sigma_m^2 + \tau_{oct}^2) \quad (1)$$

$$\log_{10} W = a_s + d_s \cdot \log_{10} (\sigma_m^2 + \tau_{oct}^2) \quad (2)$$

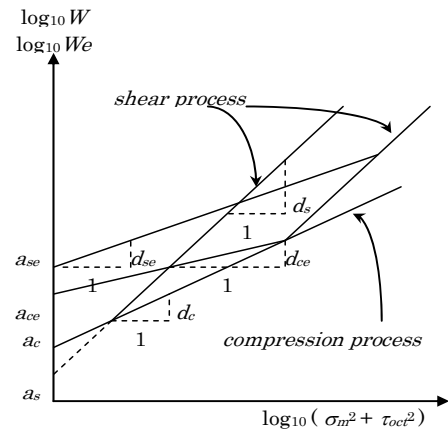


図-3 エネルギー曲面

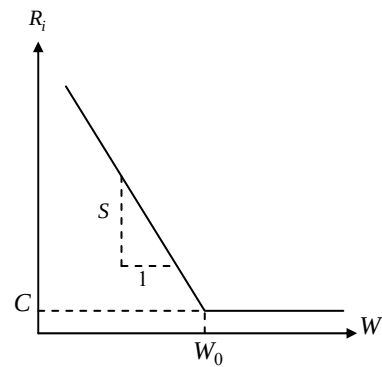


図-4 落ち込み率～仕事量関係

図-4 は、等方圧縮を含む応力比一定圧縮では、応力比に依存せず、傾きが一定 (d_c) となる直線となり、せん断へ移行すると傾きの異なる (d_s) 直線へと移行することを示している。圧縮・せん断繰返し載荷過程では傾きがそれぞれ d_{ce}, d_{se} なる直線上をたどる。これらの4つの傾きがエネルギー曲面を規定するパラメータとなる。これらのパラメータは、たとえば、等方圧縮・側圧一定圧縮せん断試験より得られる圧縮・せん断過程での応力～ひずみ関係の初期接線勾配、粒状体になされた仕事量から求められる。言い換えれば、これらのパラメータを求めるためには等方圧縮・側圧一定圧縮せん断試験を少なくとも1回行わなければならない。

(2) 落ち込み率

一般の粒状体は形状、大きさの不規則な粒子の集合体であり、変形過程において粒子接点が消滅・発生する現象（北村はこのような現象を落ち込み、割り込みと称している）が複雑に絡み合っており、巨視的に計測が可能な体積変化となって表れると考えられる。北村らはこのような粒子の不連続な運動を評価するため、落ち込み率 R_i を導入し、圧縮過程では落ち込み率 R_i と単位体積あたりの仕事量 W の間に式(3), 式(4)に示すような関係があることを実験的に明らかにした⁸⁾。

$$0 < W < W_0 \text{ のとき, } R_i = S \cdot (W_0 - W) + C \quad (3)$$

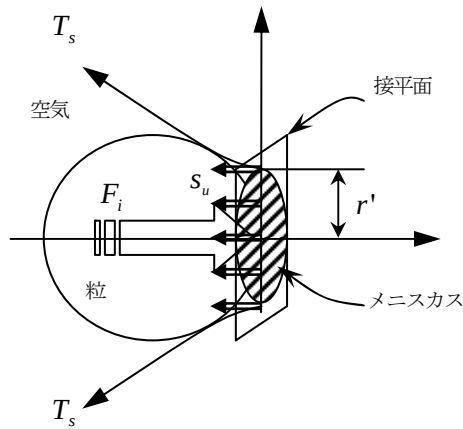
$$W > W_0 \text{ のとき, } R_i = C \quad (\text{一定}) \quad (4)$$

図4は式(3), 式(4)の関係を模式的に示したものである。式(3), 式(4)には2つのパラメータ W_0 , S , C が含まれる。これらのパラメータは上述のエネルギー曲面を規定するパラメータを求めるための三軸試験データによって決めることができる。また, 諸戸のエントロピー⁹⁾を導入することによって三軸試験データより合理的にこれらのパラメータを求める試みを行っている⁷⁾。

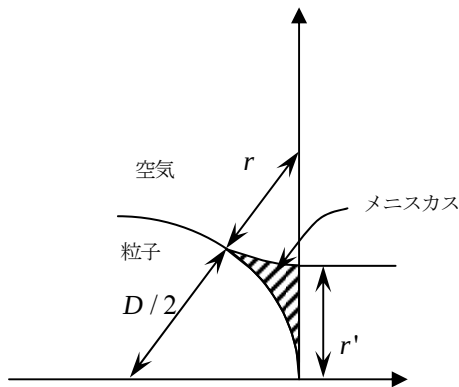
(3) メニスカスによる粒子間力

不飽和粒状体の内部では, 土粒子間にある空気と水の境界にメニスカスが形成される。そして, 間隙水圧 u_w が間隙空気圧 u_a より小さくなっている。

不飽和状態にある土粒子間には, 図-5(a)に示すように接平面上の半径 r' の円周部分に表面張力 T_s が働いており, 斜線部分に, サクシオン s_u が働いている。そのときの合力を F_i とする。



(a) 土粒子とメニスカスによる接平面



(b) 土粒子とメニスカスの幾何学的関係

図-5 土粒子とメニスカス

$$F_i = 2\pi r' T_s + \pi r'^2 s_u \quad (5)$$

土粒子 (粒径 D) により形成されるメニスカスは図-5(b)なる幾何学的関係から, メニスカスの曲率半径 r を用いて r' が求まる。

$$r' = \sqrt{(r + D/2)^2 - (D/2)^2} - r \quad (6)$$

また, r は式(7)により定義されることから, F_i は式(8)により求めることができる。

$$r = 2T_s / s_u \quad (7)$$

$$F_i = \frac{2T_s \cdot \pi (\sqrt{2T_s + s_u} < D > - \sqrt{2T_s}) \sqrt{2T_s + s_u} < D >}{s_u} \quad (8)$$

ここに, $<D>$ は平均粒径を表しており, 球形の粒子を平均的な粒子径と考えられる。

(4) 一次元圧縮過程への適用

図-6は, KITA-CS を一次元圧縮過程に適用した時の計算手順を示したフローチャートである。軸圧を増加させ, 側方ひずみが計算される。次に側方ひずみがゼロとなるように側圧を繰り返し変化させる。軸圧を変化させるごとにこの過程を繰り返すと圧縮曲線が得られる。

2.2 KITA-SAKO モデル¹⁰⁾

コラプス現象は, 水浸によって不飽和土のサクシオンが低下することによって生じるものと考えられる。KITA-SAKO モデルはサクシオンと含水比の関係を定量的に評価できるモデルであり, ここでは KITA-SAKO モデルを適用する。

KITA-SAKO モデルでは, 間隙部分を管径 D , 傾き θ の円管に, 土粒子実質部分を円管以外の不透水部分に分け, 力学のおよび確率論的考察を加えることによって, 間隙比 e , 含水比 w , サクシオン s_u , 不飽和・飽和透水係数 k が次式のように算出される。

$$e = \int_0^\infty \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{V_p}{V_e - V_p} \cdot P_d(D) \cdot P_c(\theta) d\theta dD \quad (9)$$

$$w = \frac{\rho_w}{\rho_s} \int_0^\infty \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{V_p}{V_e - V_p} \cdot P_d(D) \cdot P_c(\theta) d\theta dD \quad (10)$$

$$s_u = \gamma_w \cdot h_c = \frac{4 \cdot T_s \cdot \cos \alpha}{d} \quad (11)$$

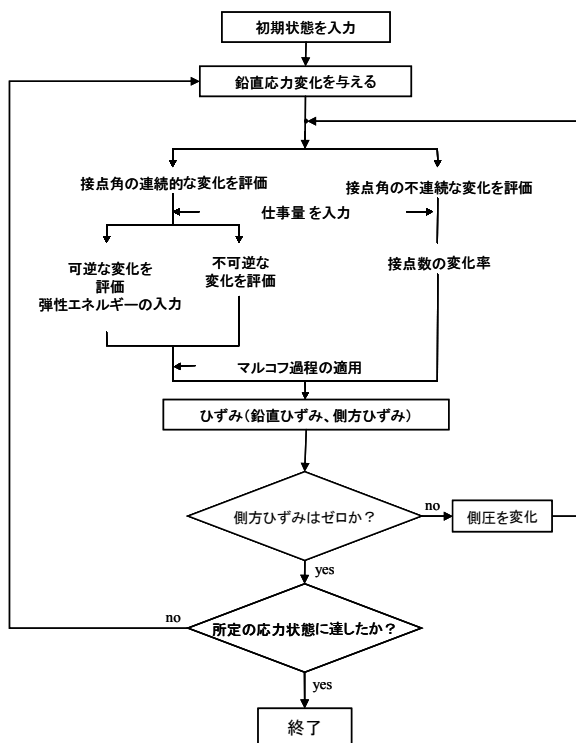


図-6 一次元圧縮のフローチャート

表-1 赤土の物理特性

試料	赤土
土粒子密度 ρ_s [g/cm ³]	2.72
塑性限界 [%]	31.7
液性限界 [%]	62.8
塑性指数 [%]	31.1
透水係数 [cm/sec]	1.66×10^{-3}

表-2 しらすの物理特性

試料	しらす
土粒子密度 ρ_s [g/cm ³]	2.451
自然含水比 [%]	20.2
湿潤密度 ρ_t [g/cm ³]	1.19
乾燥密度 ρ_d [g/cm ³]	1.00

$$k = \int_0^d \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\pi \cdot \gamma_w \cdot D^3 \cdot \sin \theta}{128 \mu_w (D/\sin \theta + D_h/\tan \theta)} P_d(D) P_c(\theta) d\theta dD \quad (12)$$

ここに、 V_p ：円管の体積、 D_h ：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、
 $P_c(\theta)$ ：円管の傾き θ 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、
 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。

3. 水浸沈下挙動への適用

3.1 実験試料

実験に用いた試料は、奄美諸島の喜界島で採取した赤土と霧島市溝辺町で採取したしらすである。表-1 に赤

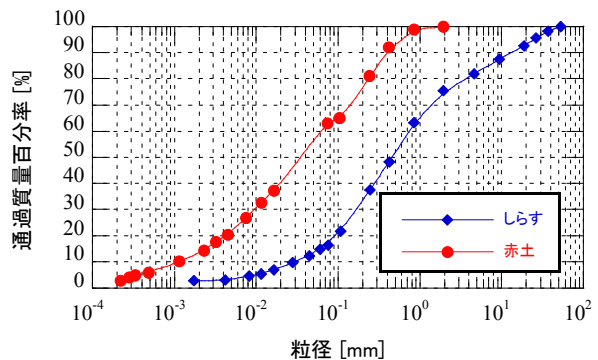


図-7 粒径加積曲線

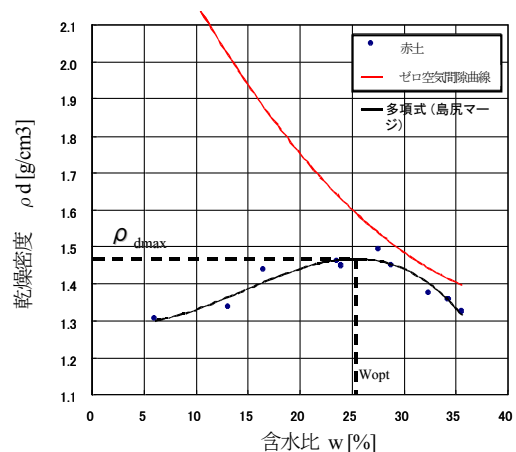


図-8 赤土の締固め曲線

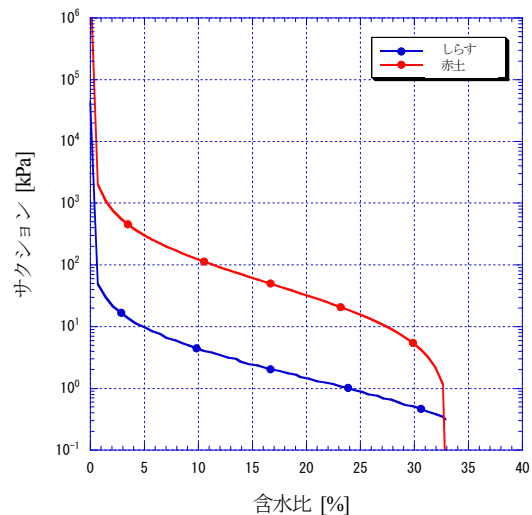


図-9 水分特性曲線

土の物理特性、表-2 にしらすの物理特性、図-7 に粒度試験から得られた粒径加積曲線、図-8 に赤土の締め固め試験の結果を示す。物理試験より、赤土は高液性限界シルト、しらすは砂礫質細粒土に分類される。

3.2 水分特性曲線

図-9 は、KITA-SAKO モデル¹⁰⁾を用いて計算した赤土としらすの水分特性曲線の計算結果である。表-3 に計

算に用いた入力パラメータを示す。水の表面張力 T_s と粘性係数 μ_w は理科年表より得られる $T_s = 73.48 \times 10^{-3} \text{ N/m}$, $\mu_w = 1.138 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ を用いた。また、分割数を 360, 円管の傾き θ の確率密度関数の最低高さを $\zeta_c = 0.159$ とした。水分特性曲線の計算においては、実測値とのフィッティングを行っている。本論文では、この計算結果を用いて、圧縮試験の供試体を作製するときの含水比を決定した。

3.3 実験装置

図-10 に赤土の実験に用いた実験装置である不飽和土用一面せん断試験装置の概略図を示す。本試験装置では、間隙空気圧と間隙水圧を変化させることにより、サクションを制御することができる。サクションは間隙空気圧用レギュレータ及び間隙水圧用レギュレータを調整することにより制御を行った。しらすの水浸沈下試験は標準圧密試験装置を用いており、サクションの制御はしていない。

3.4 実験手順

赤土は自然乾燥させ、乾燥試料をロートを介してモールドに入れて作製した。作製中に粘土分が浮遊するようなことはなかった。供試体の寸法は直径 60 mm, 高さ 35 mm である。赤土の水浸沈下試験では、1.3 kPa (初期水浸土)、32 kPa, 89 kPa で水浸を行った。

初期水浸土では、供試体をセットした後、間隙水圧用のレギュレータにより供試体に水圧をかけ水浸させ、圧縮圧力の増分比をおよそ 1, 各段階での荷重時間は 1 時間とした。途中水浸土では、初期水浸土と同様に供試体をセットした後、不飽和状態で圧縮し、所定の圧縮圧力

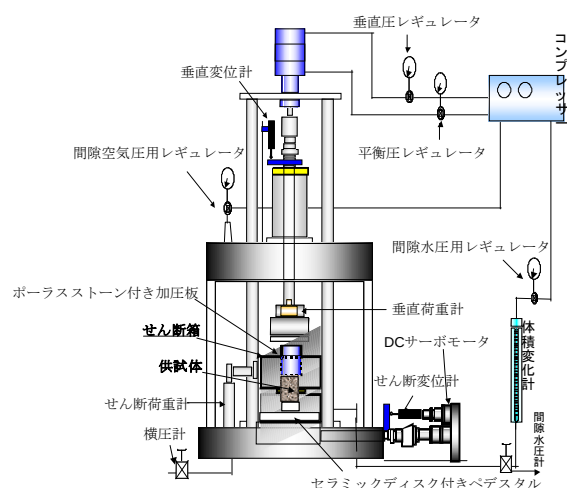


図-10 実験装置の概略図

に達したところで水浸させた。圧縮圧力の増分比, 荷重時間は初期水浸土と同じ条件で行った。

しらすは、自然乾燥させた後、2 mm ふるいを通過したものを用いている。供試体作成は含水比 20%に調整し、乾燥密度が 1.00 g/cm^3 になるように突固めて作製している。しらすの水浸沈下試験では、初期水浸土の他に 39.2, 314, 1260 kPa で水浸した。初期水浸土は 9.8 kPa の圧力で供試体と加圧板を密着させ、圧縮圧力の増分比を 1, 各荷重段階の荷重時間を 24 時間としている。また、その他の途中水浸土は初期水浸土と同様に供試体をセットし、不飽和状態で圧縮し、所定の荷重圧になったところで水浸させた。ただし、荷重時間は 1 時間とした。

3.5 実験結果・考察

図-11, 図-12 は、赤土の圧縮試験結果を示している。図中の三角のプロットが初期段階で水浸を行った試験の圧縮曲線, 丸いプロットが不飽和状態で圧縮し, 89 kPa で水浸を行った試験の圧縮曲線, ひし形のプロットが不飽和状態の圧縮曲線になる。図-13, 図-14 にしらすの圧縮試験結果を示す。しらすは 39.2 kPa, 314 kPa, 1260 kPa で水浸を行った。また, 図-15 に沈下量～圧縮圧力関係を示す。試験結果より, 以下のことがわかる。

- ① 不飽和土の圧縮曲線は初期水浸土の圧縮曲線より上方に位置している。
- ② 不飽和状態の供試体を水浸させるとコラプスを生じる。
- ③ 水浸後の圧縮曲線は初期水浸土の圧縮曲線に近づく。
- ④ 赤土に比べてしらすのコラプスによる沈下量 (間隙比の変化量) が小さい。

不飽和土ではメニスカスによる粒子間力が作用しており, 粒子間のせん断に対する摩擦抵抗力が生じている。

また, 初期水浸土の飽和度はほぼ 100%であり, メニスカスによる粒子間力がほとんど無い状態であるため,

表-3 間隙モデルに用いるパラメータ

試料		赤土	
土粒子の密度 [g/cm ³]		2.72	
水の表面張力 [N/m]（水温15℃）		73.48×10 ⁻³	
水の粘性係数 [Pa・s]（水温15℃）		1.138×10 ⁻³	
間隙比		1.55	
粒径加積曲線データ数		14	
水分特性曲線データ数		12	
通過質量百分率 [%]	粒径 [mm]	100.0	2.000
		95.9	0.850
		87.3	0.425
		79.7	0.250
		67.6	0.106
		66.7	0.075
		57.5	0.047
		55.0	0.330
		46.5	0.022
		41.4	0.013
		38.8	0.009
		35.9	0.006
		28.7	0.003
		23.9	0.001

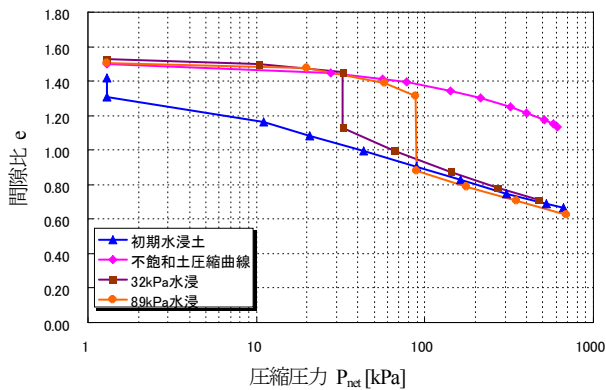


図-11 圧縮試験結果

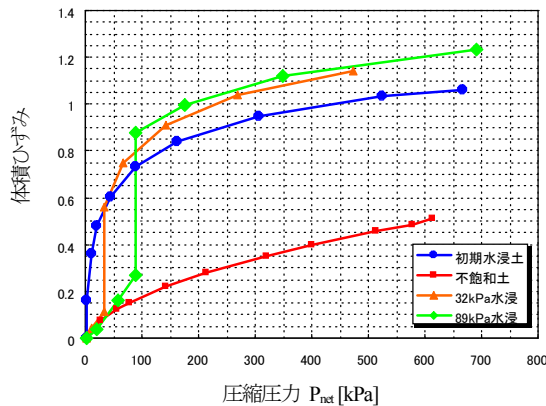


図-12 赤土の体積ひずみ～圧縮圧力関係

メニスカスによる粒子間力が働かず、せん断に対する摩擦抵抗力が小さくなる。よって、不飽和土は飽和土に比べ変形しにくく、圧縮曲線は初期水浸土の上方に位置している。不飽和土を水浸させることによりメニスカスによる粒子間力がなくなり、せん断に対する摩擦抵抗力が減少するためコラプスが生じる。

しらすの水浸による沈下量が赤土に比べて小さい理由として、赤土の実験ではサクションを制御しサクション一定の条件で圧縮試験を行っているが、しらすではサクションの制御できない標準圧密試験装置を用いて試験を行っていることが考えられる。すなわち、標準圧密試験装置を用いた試験では圧縮段階が進むにつれて飽和度が大きくなり、水浸時の粒子間力の減少量が小さく、沈下量が小さくなっていることが考えられる。

3.6 KITA-CS モデルの適用

本節では、室内土質実験により得られた赤土およびしらすの水浸沈下の挙動に対して 2.1 節で述べた KITA-CS モデルの適用を試みる。

(1) エネルギー曲面の算定

上述した実験結果より算出した赤土としらすのエネルギー曲面を図-16 に示す。今回の実験では、せん断過程を行わず圧縮過程のみを行っているため、エネルギー曲面は図のように 1 本の直線となっている。図より、赤土

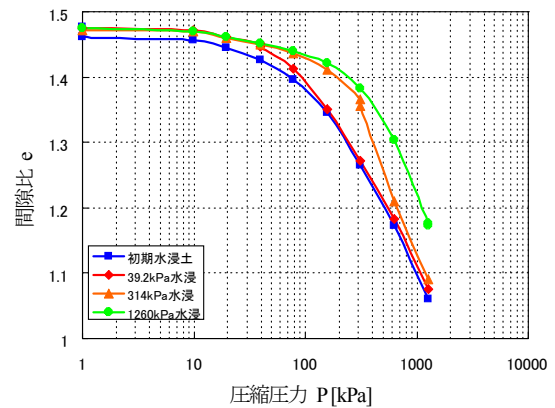


図-13 圧縮試験結果 (しらす)

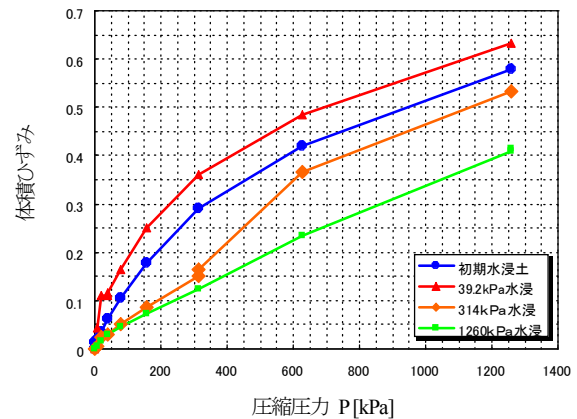


図-14 しらすの体積ひずみ～圧縮圧力関係

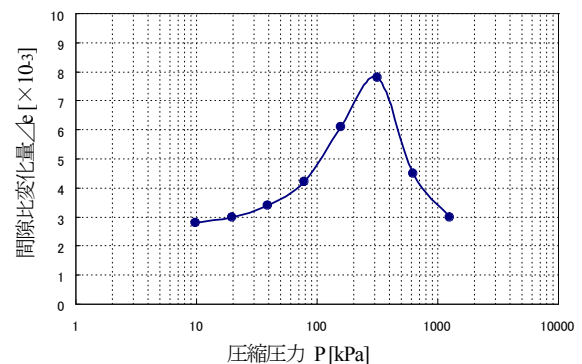


図-15 しらすの水浸による間隙比の変化量

では $a_c = -1.16$, $d_c = 1.05$, しらすでは, $a_c = -1.64$, $d_c = 1.71$ と求まる。

(2) 落ち込み率の算定

圧縮過程における落ち込み率と単位体積あたりの仕事量 W の関係式 (式(3), 式(4)) の妥当性を調べるため、初期水浸土の圧縮試験より得られた曲線にフィットするように 落ち込み率を計算した。得られた赤土としらすの落ち込み率～仕事量関係を図-17, 図-18 に示す。これらの図より、落ち込み率～仕事量関係が図4 のような関係にあることがわかる。

(3) メニスカスによる粒子間力の算定

式(8)から s_u の変化に対するメニスカスによる粒子間力 F_i の変化を示したものが図-19である。このとき、平均粒径はしらすを想定し0.21 mmとした。

図-19 よりメニスカスによる粒子間力 F_i は、 $s_u=0.1 \sim 1000$ kPaの範囲で変化しているが、大きく変化しているのは $s_u=1 \sim 100$ kPaの範囲であることがわかる。また、傾きは $s_u=10$ kPa 付近が最も大きい。同様な傾向が赤土についても得られているが、ここでは省略する。

(4) 一次元圧縮過程への適用

図-6のKITA-CSを一次元圧縮過程に適用した時の計算手順をもとに、赤土としらすの実験結果より求めたパラメータを用いて計算を行った。

表-4は、計算に用いた入力パラメータであり、図-20、図-21に計算結果を示す。図中の実線が計算結果、

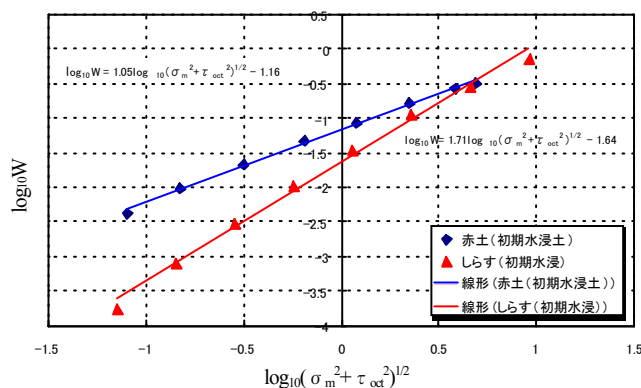


図-16 赤土、しらすのエネルギー曲面

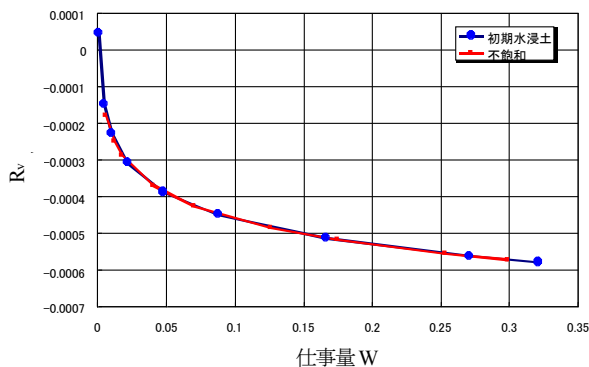


図-17 $R_v \sim$ エネルギー関係 (赤土)

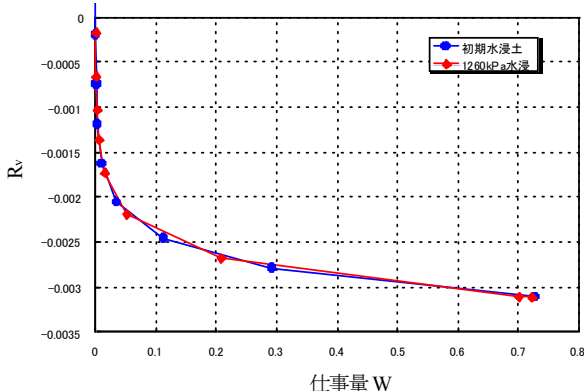


図-18 $R_v \sim$ エネルギー関係 (しらす)

プロットが実験結果となっている。初期水浸土に関して、計算結果と実験結果はほぼ一致している。また、不飽和状態の計算は初期水浸土と同じ入力パラメータを用い、間隙比、サクシジョンのみを変化させて行った。しらすの不飽和土の圧縮曲線は圧縮圧力が大きくなるにつれてずれが生じている。この理由として、しらすの水浸沈下試験は標準圧密試験装置を用いており、サクシジョンを制御

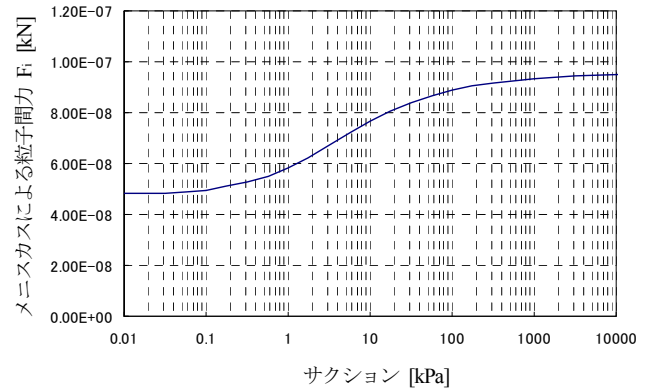


図-19 s_u の変化に対する F_i の変化

表-4 入力パラメータ

	試料名	赤土	しらす
初期間隙比	e_0	1.5	1.47
サクシジョン [kPa]	s_u	100	0
粒状体になされる仕事量を評価	a_c	-1.16	-1.64
	d_c	1.05	1.71
接点角の消滅・発生を評価	C	-5.3×10^{-3}	1.3×10^{-3}
	S	1.0×10^{-3}	1.61×10^{-1}
	W_0	1.0×10^{-2}	1.91×10^{-3}

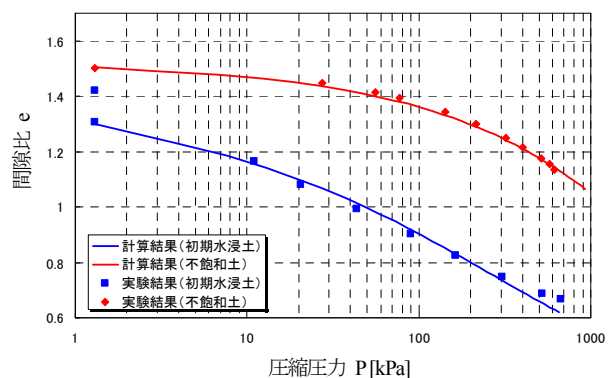


図-20 計算結果 (赤土)

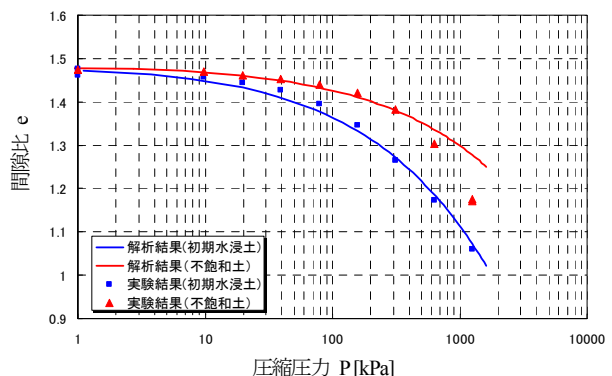


図-21 計算結果 (しらす)

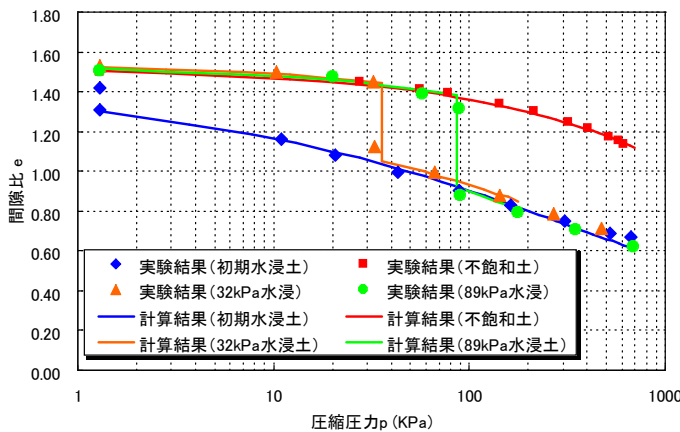


図-22 水浸沈下の計算（赤土）

していないことが考えられる。

(5) 水浸沈下の計算

図-22 に圧縮過程の途中で、落ち込み率を急激に変化させた場合の計算結果を示している。入力パラメータは、図-20 の一次元圧縮曲線の場合と同様の値を用いた。今回は、所定の圧縮圧力になったときに、急激に落ち込み率を増加させた（図-23）。落ち込み率の増加量は図-23 に示されるコラプス現象を良好に表現するために試行錯誤で求めた。

今後、落ち込み率（粒子接点数変化率）と水浸沈下（圧縮過程の途中でサクシジョンの変化）を関連させるための理論的・実験的研究を行い、これらを定量的に評価できる関係を導出しなければならない。

4. おわりに

本論文では、赤土を用いて不飽和土の圧縮特性に関する実験を行った。得られた結果は以下の通りである。

- ・ 不飽和土の圧縮曲線は、メニスカスによる粒子間力が働き、飽和土に比べ土粒子間のせん断に対する摩擦抵抗が大きいいため、飽和土の圧縮曲線よりも上方に位置している。
- ・ 一次元圧縮中に水浸させるとコラプスを生じ、水浸後、載荷圧を増加させると、圧縮曲線は初期水浸土の圧縮曲線に近づく。

また、KITA-CS モデルを一次元圧縮に適用させ、圧縮試験結果から入力パラメータを求め、計算を行った。結果は、以下の通りである。

- ・ 赤土、しらすの初期水浸土（サクシジョン 0kPa）の圧縮曲線は実験結果から求めたパラメータを用いることで計算結果は実験値と一致している。しかし、サクシジョンを変化させた場合の圧縮曲線は圧縮圧力が大きくなると、実験結果とずれる傾向がある。
- ・ KITA-CS モデルでは、不飽和土の水浸沈下挙動を落ち込み率によって評価できることが明らかになった。今後は、コラプス（サクシジョンの変化）と落ち込み

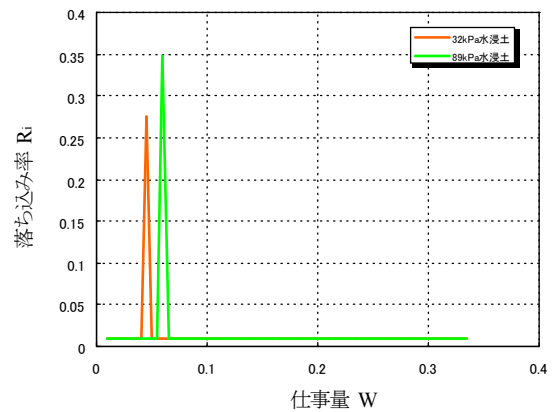


図-23 水浸沈下の計算に用いた
落ち込み率～仕事量関係

率を結びつけるための理論的・実験的研究を行い、これらを定量的に評価できる関係を導出しなければならない。

謝辞：本研究に対して科研費（基盤（A））の援助をいただいた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) Jennings, J. E. and Knight, K.: The additional settlement of foundations due to collapse of structure of sandy subsoil on wetting, Proc. 4th ICSMFE, Vol.1, pp.316-319, 1957.
- 2) Kohgo, Y., Asano, I. And Hayashida, Y.: An elastoplastic model for unsaturated rockfills and its simulation of laboratory tests, Soils and Foundations, Vol.47, No.5, pp.919-929, 2007.
- 3) Cardoso, R. and Alonso, E. E.: Degradation of compacted marls: A microstructural investigation, Soils and Foundations, Vol.49, No.3, pp.315-327, 2009.
- 4) Koliji, A., Lalloui, L. and Vulliet, L.: Behaviour of unsaturated aggregated soil in oedometric condition, Soils and Foundations, Vol.49, No.3, pp.369-380, 2009.
- 5) 北村良介, 酒匂一成, 荒木功平, 宮本裕二: 不飽和土の力学挙動のモデル化, 第 44 回地盤工学研究発表会, 2009 (投稿中).
- 6) 荒木功平, 酒匂一成, 北村良介: 不飽和土の変形挙動のモデル化, 応用力学論文集, Vol.6, pp.585-592, 2003.
- 7) 荒木功平, 酒匂一成, 北村良介: 粒状体の北村モデルにおける粒子接点の発生・消滅, 応用力学論文集, Vol.7, pp.737-746, 2004.
- 8) 北村良介: マルコフ過程を用いた粒状体の力学モデル, 科研費報告書 (No.60550355), 1987.
- 9) Moroto, N.: A new parameter to measure degree of shear deformation of granular material in triaxial compression test, Soils and Foundations, Vol.16, No.4, pp.1-10, 1976.
- 10) 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.

(2009 年 4 月 9 日 受付)