

不飽和土の水分特性曲線と締固め曲線の関係

Relation between soil-water characteristic curve and soil compaction curve

宇都洋一*・宮本裕二**・荒木功平***・酒匂一成****・北村良介*****
Yoichi UTO, Yuji MIYAMOTO, Kohei ARAKI, Kazunari SAKO, Ryosuke KITAMURA

* 鹿児島大学大学院理工学研究科システム情報工学専攻 (〒890-0065 鹿児島市郡元1-21-40)

** 工博 鹿児島県企画課世界文化遺産登録推進室 (〒890-8577 鹿児島市鴨池新町10-1)

*** 工博 株式会社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)

**** 工博 立命館グローバル・イノベーション研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

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

英文要約

The soil compaction test on the secondary Shirasu (Sendai River Shirasu) was carried out to obtain the compaction curve. Then KITA-ARA model was applied to determine the degree of saturation at the residual and pseudo-saturated states. Finally the soil-water characteristic curve was calculated by using KITA-SAKO model and compared with that obtained from the water retention test on the secondary Shirasu (Sendai River Shirasu). It is found that the method proposed in this paper was promising and convenient to obtain the degree of saturation in residual and pseudo-saturated states without the water retention test which requires more time and skill than the soil compaction test.

Key Words: soil-water characteristic curve, compaction curve, unsaturated soil

1. はじめに

不飽和土の力学挙動を解析するためには、不飽和土の保水・透水・透気・圧縮・せん断・熱伝導挙動を定量的に評価する必要がある。これらの挙動を定量的に評価するためには、実験的・理論的研究を相互補完的に行われなければならない。北村ら¹⁾²⁾³⁾は、最近20年余にわたって研究し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、不飽和土を含む土質力学の体系化を目指した試みを行っている。不飽和土の保水・透水挙動は水分特性曲線、不飽和・飽和透水係数～体積含水率（含水比、飽和度、サクション）関係によって定量的な評価が可能となる。そこで、酒匂・北村⁴⁾は、粒度試験等の物理試験のみ

からこれらの関係を求ることを可能とした数値力学モデル（KITA-SAKOモデル）を提案している。また、荒木・北村³⁾は、水分特性曲線における残留飽和度・擬似飽和度を不飽和土の圧縮・せん断特性を反映した締固め曲線から求める手法を提案している（KITA-ARAモデル）。

本論文では、川内川しらすを試料とした締固め試験と保水性試験を行い、不飽和土の水分特性曲線と締固め曲線の関係について考察を加え、北村ら¹⁾²⁾³⁾が提案している数値力学モデルの一つであるKITA-ARAモデルの妥当性を検討している。

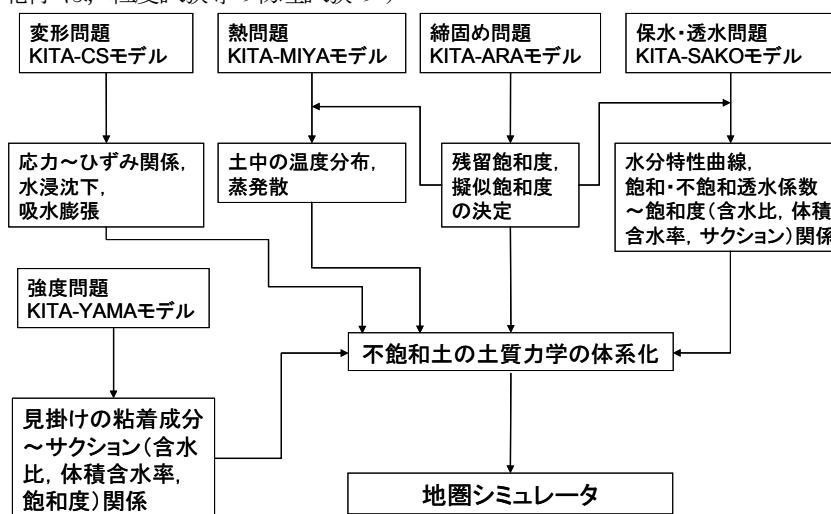


図-1 北村モデルの構成

2. 北村らの数値力学モデル

図-1は、不飽和土の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¹⁾。本論文では図-1に示されたKITA-ARAモデルを適用することによって残留飽和度と擬似飽和度を決定し、それらをKITA-SAKOモデルの入力パラメータとすることによって水分特性曲線を導き、土質試験結果との比較・検討を行っている。

2.1 KITA-ARAモデル³⁾

図-2は異なる締固めエネルギーEc(Ec1<Ec2)で得られる締固め曲線とそれに対応する含水比と間隙比の関係を示した模式図である。締固めエネルギーEcが大きいほど、最大乾燥密度ρ_{dmax}が大きくなり、最適含水比w_{opt}が小さくなる。間隙比eは、最適含水比で最小値をとり、その値はEcが大きいほど、小さくなる。

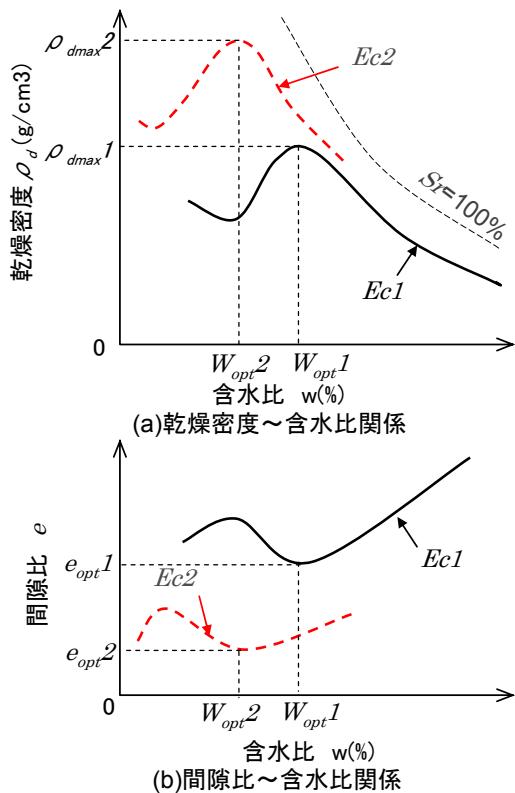


図-2 締固め曲線とそれに対応する含水比と間隙比の関係

不飽和土を構成する間隙水の化学ポテンシャル(エネルギー)は圧力と関係づけられ、不飽和土中の間隙水の化学ポテンシャルはサクションによって表現できる^{3,4)}。一方、表-1⁵⁾に示すように突固めによる土の締固め試験では締固めエネルギーによって突固め方法が分類される。締固めエネルギー一定のもとでの締固め試験では、含水比と間隙比が図-2(b)のようになる。したがって、保水性試験から得られる間隙比～サクション～含水比関係と、締固め試験から得られる乾燥密度～締固めエネルギー～含水比関係について考察することは有用である。

表-1 突固めによる土の締固め試験方法の種類⁵⁾

突固め方法の呼称	ランマー質量(kg)	モールド内径(cm)	突固め層数	1層当たりの突固め回数	許容最大粒径(mm)
A	2.5	10	3	25	19
B	2.5	15	3	55	37.5
C	4.5	10	5	25	19
D	4.5	15	5	55	19
E	4.5	15	3	92	37.5

試料の準備方法及び使用方法の組み合わせ	試料の準備方法及び使用方法
組み合わせの呼称	試料の準備方法及び使用方法
a	乾燥法で繰り返し法
b	乾燥法で非繰り返し法
c	湿潤法で非繰り返し法

図-3はこれらの関係を三次元で示した締固め曲面(含水比w～乾燥密度ρ_d～締固めエネルギーEc関係)である。締固め曲面をある一定のEcで投影したものが締固め曲線となる。締固めエネルギーは式(1)のように2つのエネルギーに分けられる。

$$Ec = Es + Epw \quad (1)$$

ここに、Es: 土粒子骨格構造の再配列に費やされるエネルギー
Epw: 間隙水の化学ポテンシャル(サクションを与えるために費やされるエネルギー)

KITA-ARAモデルは図-3に示された締固め曲面から式(1)のEpwを定量的に評価すること目的とした数値モデルである。

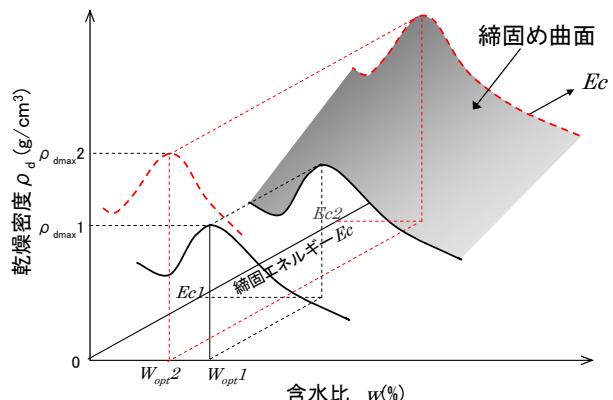


図-3 締固め曲面(含水比w～乾燥密度ρ_d～締固めエネルギーEc関係)

締固め曲線から各状態での飽和度が計算され、飽和度～含水比関係を得ることができる。図-4は、そのようにして得られた飽和度～含水比関係(図-4の点線、以下、Sr～w曲線)の模式図である。Sr～w曲線を正規分布の累積分布関数で近似すると、飽和度～含水比関係は、最小飽和度Sr_{min}(残留飽和度に対応)と最大飽和度Sr_{max}(擬似飽和度に対応)が存在し、最適含水比w_{opt}が変曲点となる。最小飽和度Sr_{min}に対応する最小含水比をw_{min}、最適

含水比 w_{opt} に対応する最適飽和度を $S_{r_{opt}}$ 、さらに、原点から引かれた直線 ($S_r = C_u w$) が $S_r \sim w$ 曲線に接する点での飽和度、含水比をそれぞれ S_{r_u} 、 w_u と表記する。図-4 には原点と点 $(w_{min}, S_{r_{min}})$ を通る直線 ($S_r = C_1 w$)、原点と点 $(w_{opt}, S_{r_{opt}})$ を通る直線 ($S_r = C_{opt} w$)、点 $(w_{opt}, S_{r_{opt}})$ と点 (w_u, S_{r_u}) を通る直線 ($S_r = C_1 w - S_{r_{min}}$) も示されている。ここで、 C_1 は締固め曲線の乾燥密度～含水比関係上における極小値と極大値を通る飽和度～含水比関係における傾きを表している。

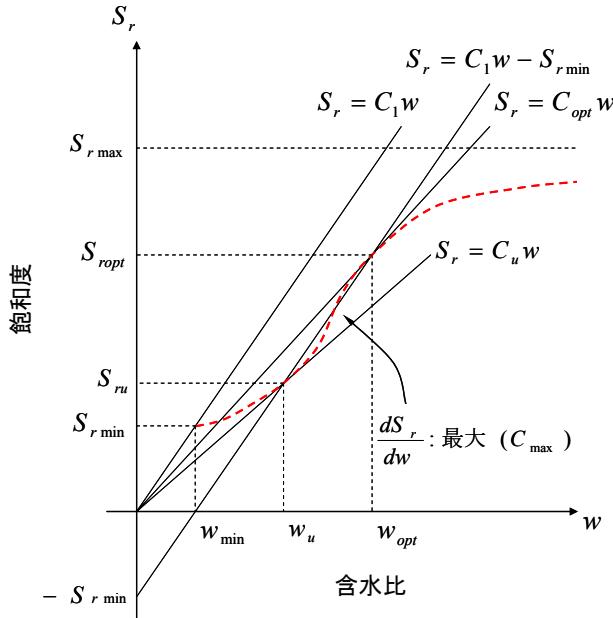


図-4 飽和度～含水比関係とモデルパラメータ

図-5 は、これらのパラメータの締固め曲線上での関係を示している。 $S_r \sim w$ 曲線で示された累積分布関数を密度関数に変換すると、図-6 のような正規分布（飽和度増分／含水比増分 (dS_r/dw) ～含水比 w 関係）が得られる。

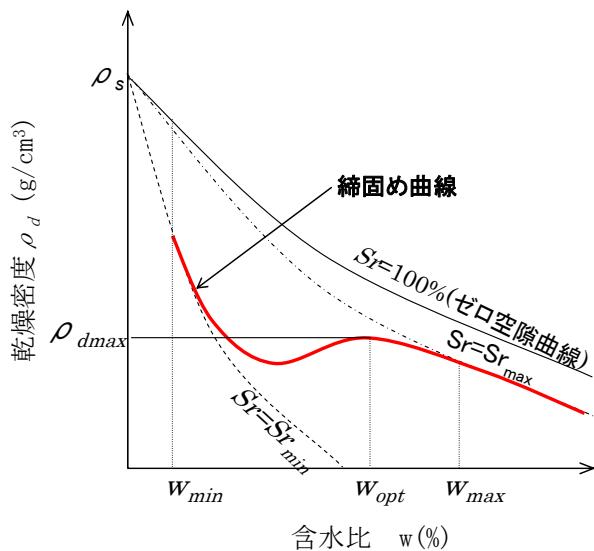


図-5 締固め曲線とモデルパラメータ

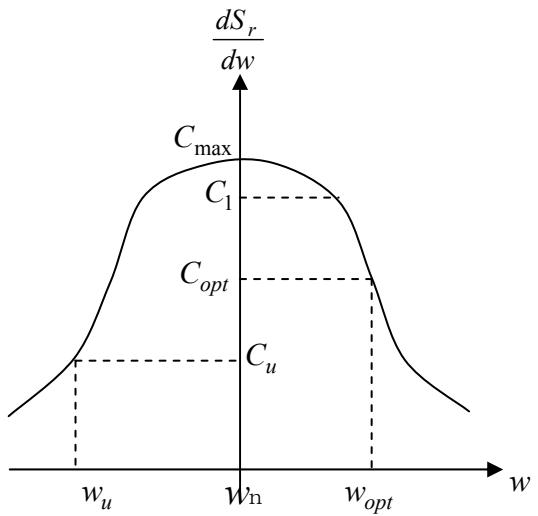


図-6 飽和度増分/含水比増分 (dS_r/dw) ～含水比 w 関係とモデルパラメータ

これらのパラメータは式(2)～式(5)によって求められる。

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

$$\sigma = \frac{e_m \rho_w}{\sqrt{2\pi} K \rho_s} \quad (3)$$

$$K = \frac{1}{S_{r_{max}} - S_{r_{min}}} \quad (4)$$

$$S_{r_{min}} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(\frac{1}{e_1} - \frac{\rho_{dmax}}{\rho_s - \rho_{dmax}} \right) w_{opt} \quad (5)$$

ここに、
 $f_{ND}(w)$ ：正規分布の確率密度関数,
 w_m ：図-6 に示される含水比の平均値,
 $S_{r_{min}}$ ：最小飽和度,
 $S_{r_{max}}$ ：最大飽和度,
 e ： $f_{ND}(w)$ 最大に対応する間隙比,
 ρ_w ：水の密度,
 ρ_s ：土粒子の密度,
 ρ_{dmax} ：最大乾燥密度,
 ρ_d ：乾燥密度,
 w_{opt} ：最適含水比。

したがって、締固め曲線は密度関数を用いて式(6)で表される。

$$\rho_d = \frac{\rho_s}{1 + \int_0^w f_{ND}(w) dw + K S_{r_{min}}} \quad (6)$$

式(6)を土の乾燥密度 ρ_d と含水比 w で表すと式(7)となる。

$$\rho_d = \frac{\rho_w}{\rho_w / \rho_s + w / S_r} \quad (7)$$

突固め試験結果において、締固め曲線に併記されるゼロ空隙曲線は、式(7)の飽和度 $S_r=100\%$ としたものであり式(8)となる。

$$\rho_{dsat} = \frac{\rho_w}{\rho_w / \rho_s + w / 100} \quad (8)$$

図-7 は突固めによる土の締固め試験データから残留飽和度、擬似飽和度を求める手順を示したフローチャートである。ここに、 e_1 は式(9)で定義される間隙比である。

$$e_1 = \rho_s / (C_1 \cdot \rho_w) \quad (9)$$

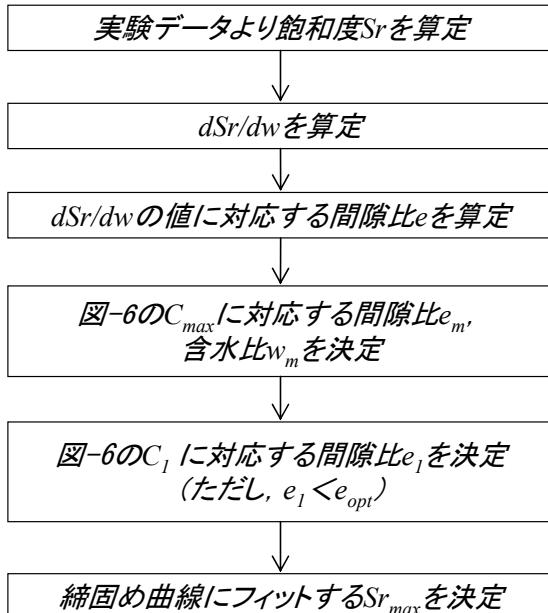
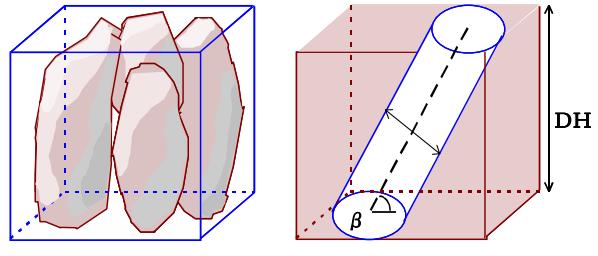


図-7 残留飽和度、擬似飽和度を求める手順

2.2 KITA-SAKO モデル²⁾

図-8 (a)は数個の土粒子からなる土塊の微小要素を示したものであり、KITA-SAKO モデルでは微小要素を図-8 (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分け、いくらかの力学的及び確率論的考察を加えることによって、式(10)～式(13)に示す土塊の間隙比 e 、含水比 w 、サクション～含水比関係($s \sim w$ 関係:水分特性曲線)、不飽和・飽和透水係数～含水比関係($k_w \sim w$ 関係)を導いてきている。



(a)土塊の微小要素 (b)KITA-SAKO モデル

図-8 KITA-SAKO モデルにおける土塊のモデル化

$$e = \int_0^\infty \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{V_p}{V_e - V_p} \cdot P_d(D) \cdot P_c(\beta) d\beta dD \quad (10)$$

$$w = \frac{\rho_w}{\rho_s} \int_0^d \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{V_p}{V_e - V_p} \cdot P_d(D) \cdot P_c(\beta) d\beta dD \quad (11)$$

$$s = \gamma_w \cdot h_c = \frac{4 \cdot T_s \cdot \cos \alpha}{d} \quad (12)$$

$$k_w = \int_0^d \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\pi \gamma_w D^3 \sin \beta}{128 \cdot \mu_w (D / \sin \beta + DH / \tan \beta)} P_d(D) \cdot P_c(\beta) d\beta dD \quad (13)$$

ここで、 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

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。

本論文では、図-4、図-5、図-6 に示した Sr_{max} 、 Sr_{min} を KITA-SAKO モデルでの擬似飽和度と残留飽和度の入力パラメータとして用いている。

3. 川内川しらすへの適用

3.1 試料、土質試験結果、計算結果

試料は、鹿児島県薩摩川内市内の川内川河川堤防(旧堤)から採取した二次しらすである。図-9 に粒径加積曲線、表-2 に物理試験より得られた結果を示している。図-10、表-3 に突固めによる土の締固め試験結果を示している。

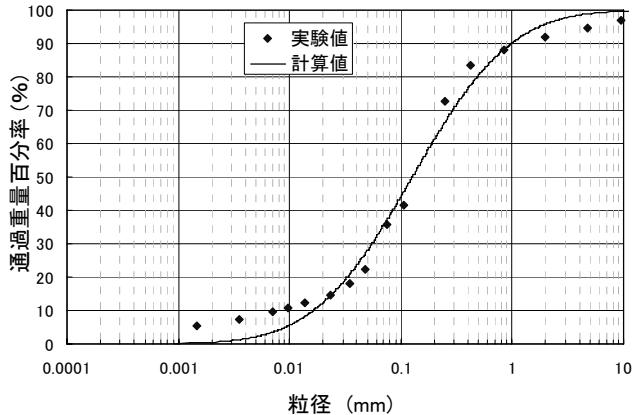


図-9 川内川しらすの粒径加積曲線

表-2 川内川しらすの物理特性

土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.407	
自然含水比 W_n (%)	24.7	
粒度試験 結果	礫分 (%)	8.4
	砂分 (%)	57.0
	シルト分 (%)	27.7
	粘土分 (%)	6.9
	D50 (mm)	0.1760
	D20 (mm)	0.0246
	地盤材料の分類	礫混り細粒分質砂

表-3 突固めによる土の締固め試験結果

	A-c	B-c	C-c	D-c	E-c
$\rho_{d\max}$	1.253	1.275	1.361	1.344	1.324
w_{opt}	26.4	26.1	20.0	24.5	24.7
e_{opt}	0.921	0.888	0.769	0.791	0.818

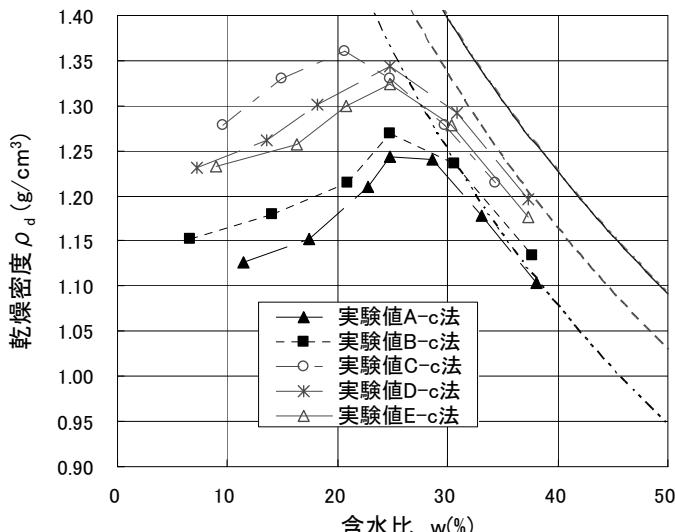


図-10 突固めによる土の締固め試験結果

図-10には、実験値に式(7), 式(8)より求めた Sr_{max} 曲線、ゼロ空隙曲線を併記している。図-10より、 Sr_{max} は、A-c 法において最小値 (78%) となり、E-c 法で最大値 (90%) となり、大きな締固めエネルギー E_c を与えることにより、同じ含水比でもより間隙が小さくなり、大きな ρ_{dmax} が得られること、含水比が増加すると、 Sr_{max} 曲線に沿って ρ_d は低下することから、締固めエネルギー E_c が大きいほど締固め曲線は Sr_{max} 曲線に沿って左上方に位置し、 ρ_{dmax} が増加、 w_{opt} が低下する。

図-11は、図-10、表-3より得られる最適含水比に対応する間隙比 e_{opt} と締固めエネルギー E_c の関係である。図-11より、 E_c が大きくなると e_{opt} が小さくなること、ランマ一の質量が締固めエネルギー (圧力) に大きく影響するが、層数や突固め回数の影響は少ないことがわかる。

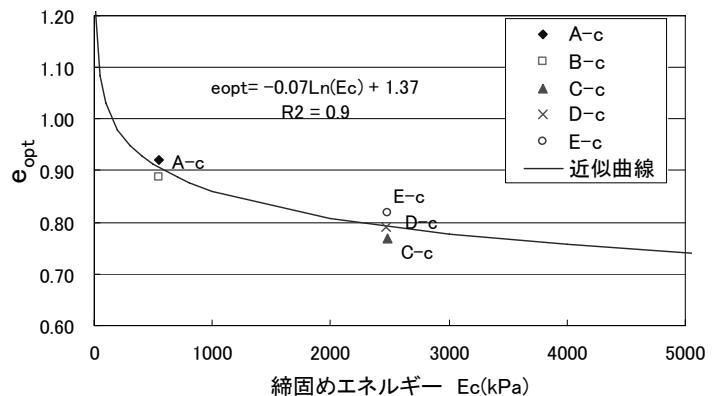


図-11 締固めエネルギー E_c ～最適間隙比 e_{opt} 関係

KITA-ARA モデルの入力パラメータは表-4に示されている。表-4中の e_m は図-6に示した平均含水比 w_m に対する間隙比である。

表-4 KITA-ARA モデルの入力パラメータ

試験方法	A-c	B-c	C-c	D-c	E-c
Sr_{max} (%)	78.0	82.0	85.0	90.0	86.0
w_m (%)	21.5	18.0	14.5	17.0	18.0
e_m	0.61	0.70	0.66	0.63	0.65
e_l	0.67	0.78	0.72	0.70	0.67

KITA-ARA モデルによる締固め曲線の計算結果と実験結果の比較を図-12に示す。図-12より実験値、計算値に近い値を示しており、KITA-ARA モデルが、しらすの締固め曲線を定量的に評価できることがわかる。

図-13はB-c法による締固め曲線を抽出し、 Sr_{min} 曲線を併記したものである。計算結果より $Sr_{max}=82\%$ 、 $Sr_{min}=10\%$ となった。

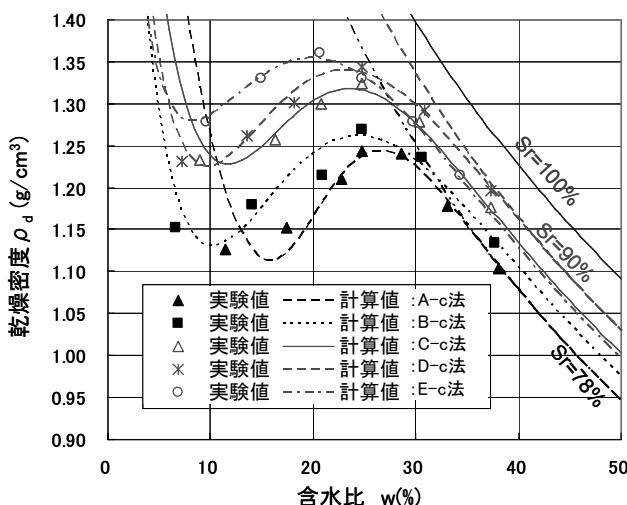


図-12 KITA-ARA モデルによる計算結果と土質試験結果の比較

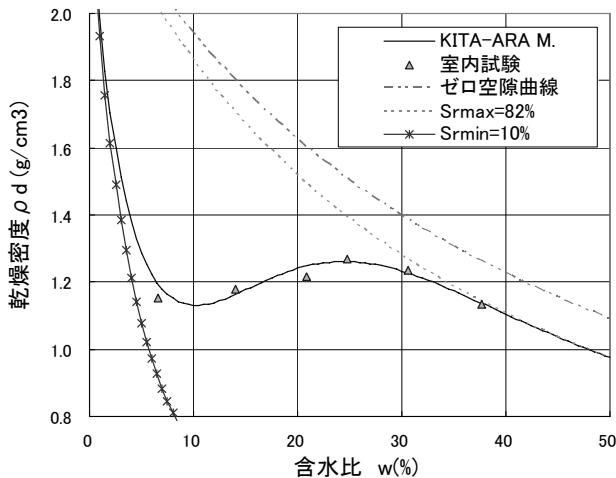


図-13 B-c 法による締固め曲線と Sr_{max} 曲線, Sr_{min} 曲線

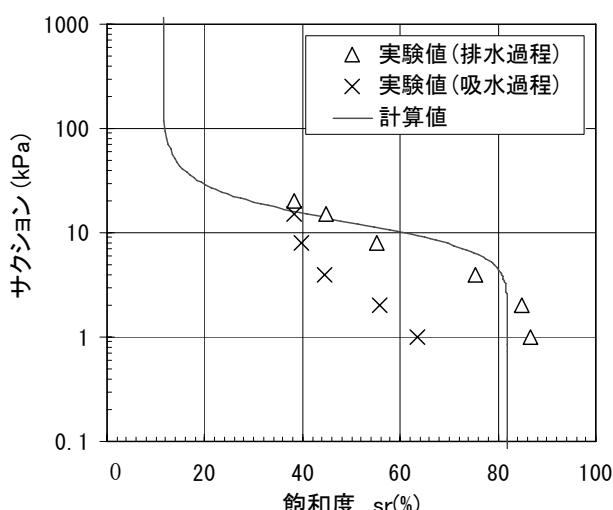


図-14 水分特性曲線

図-14 は KITA-SAKO モデルによる計算結果と保水性試験(排水過程・吸水過程)による実験結果である。ここで、擬似飽和度、残留飽和度は KITA-ARA モデルの Sr_{max} , Sr_{min} を用いている。計算結果は、実験結果の排水過程と近似している。ただし、 Sr_{max} , Sr_{min} について、差異が認められることから、今後、KITA-ARA モデルの残留飽和度、擬似飽和度の算定について、実験的・理論的に明らかにする必要があるが、KITA-SAKO モデルにより、しらすの水分特性曲線(排水過程)が定量的に評価できる可能性があることを示唆している。吸水過程についても、今後、ヒステリシスを考慮した研究を進める必要がある。

4. おわりに

本論文では、締固め曲線と水分特性曲線の関係を明らかにし、突固めによる土の締固め試験データから KITA-ARA モデルと KITA-SAKO モデルを介して水分特性曲線を導くことを試みた。水分特性曲線を得るために行われる保水性試験は時間を要する。一方、突固めによる土の締固め試験は従来から広く行われてきており、試験に要する時間・労力は保水性試験に比べて少ない。従って、不飽和・飽和浸透流解析に必要な水分特性曲線、不飽和・飽和透水係数・飽和度(体積含水率、含水比、サクション)関係を粒度試験と締固め試験から求められる本手法は工学的にも有用であると考える。

突固めによる土の締固め試験における締固めエネルギーは、土粒子骨格の再配列と間隙水の化学ポテンシャルに費やされると仮定した。このことを実験的・理論的に明らかにし、KITA-CS モデルにおけるエネルギー曲面を締固めエネルギー、化学ポテンシャル(サクション)と関連づけ、簡単な物理試験(締固め試験、粒度試験)から定量的に評価することができるようになることが今後の課題である。

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) 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)。
- 2) 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.
- 3) 荒木功平、北村良介：不飽和土の締固め曲線と水分特性曲線の関係、第50回地盤工学シンポジウム、pp.83-90, 2005.
- 4) 西村拓: 2.1.1 土中水のポテンシャルとサクション、不飽和地盤の挙動と評価、pp.11-14, 2004.
- 5) (社) 地盤工学会編: 土質試験の方法と解説- 第1回改訂版-, pp. 252-255, 2000.

(2009年4月9日 受付)