「構造」を考慮した不飽和土の構成モデルと水分特性曲線モデルの提案

平　田　昌　史[*1]　　大　塚　悠　大[*1]
石　黒　　健[*1]

要　　旨

不飽和土で生じる「コラプス」現象は，土が飽和する過程でせん断剛性が低下することで引き起こされる現象であり，不飽和土が有する嵩張った「構造」が崩れることで体積が減少する現象である．また，不飽和締固め土では，締固め時の含水比や飽和度の違いが締固め後の透水性に影響を与えるため，同じ間隙比でも透水係数が異なることが知られている．このような透水性の違いは締固めの際に生じる間隙構造の違いであると考えられ，不飽和土の剛性や透水性は「構造」の影響を強く受けていると考えられる．そこで本研究では，既往の不飽和土の構成モデルに「構造」を考慮したモデルを提案するとともに，この「構造」変化に伴う水分特性曲線モデルを提案する．これにより，構成モデルと同じ「塑性論」の枠組みで水分特性曲線モデルを取り扱うことが可能となり，従来の変形解析で生じていた初期状態設定時の問題や計算上の不具合は，計算スキーム自体が変わることによって一気に解決することが予想される．

キーワード　不飽和土／骨格構造／構成モデル／水分特性曲線

目　　次

1．はじめに
2．圧密試験による不飽和土の「構造」検討
3．「構造」を考慮した不飽和構成モデル
4．「構造」を考慮した水分特性曲線モデル
5．おわりに

PROPOSAL OF A CONSTITUTIVE MODEL AND A WATER CHARACTERISTIC CURVE MODEL FOR UNSATURATED SOILS CONSIDERING "STRUCTURE"

Masafumi　HIRATA　　**Yudai　OHTSUKA**
Takeshi　ISHIGURO

Synopsis:
The "collapse" phenomenon in unsaturated soils is triggered by a reduction in shear stiffness upon saturation, resulting in a volume decrease as the soil's bulky "structure" collapses. Furthermore, in compacted unsaturated soils, variations in water content or degree of saturation during compaction affect post-compaction permeability; consequently, soils with identical void ratios can exhibit different hydraulic conductivity values. Such differences in permeability are attributed to variations in the pore structure formed during compaction, suggesting that the stiffness and permeability of unsaturated soils are strongly influenced by this "structure." Therefore, this study proposes a constitutive model for unsaturated soils that explicitly accounts for "structure," alongside a corresponding water characteristic curve model that incorporates structural changes. This approach enables the water characteristic curve model to be treated within the same "plasticity theory" framework as the constitutive model; it is anticipated that this shift in the computational scheme will simultaneously resolve issues regarding initial state settings and computational errors encountered in conventional deformation analyses.

＊1 本店　ICI 総合センター ICI テクノロジーセンター 地盤グループ

1. はじめに

不飽和土では，浸水して飽和する際に体積が減少する「コラプス」と呼ばれる現象が生じる．「コラプス」は，飽和した際に土のせん断剛性が低下することで引き起こされる現象であり，不飽和土が有する嵩張った「骨格構造（以下，構造と称する）」[1]が崩れることで，体積が減少する現象であると捉えることができる．このことから，不飽和土の剛性は「構造」の影響を受けていると考えられる．また，不飽和締固め土では，締固め時の含水比や飽和度の違いが締固め後の透水性に影響を与えるため，同じ間隙比でも透水係数が異なることが知られている．既往の研究 [2),3),4)]によると，このような透水性の違いは締固めの際に生じる間隙構造の違いであると考えられており，例えば杉井ら [5),6)]は，締固め時の飽和度による透水性の違いを間隙径分布の違いで整理している．土の間隙は，土粒子同士の間に生じる隙間であるため，間隙構造や間隙径分布とは土粒子同士で形成される「構造」と言い換えることができる．つまり，不飽和土の透水性も「構造」の影響を強く受けていると考えられる．従って，不飽和土の構成モデルを考える際には，土の「構造」といった概念を取り入れ，飽和度によってこの「構造」がどのように変化するのかを考慮することが，不飽和土の挙動を表現する上で必要である．

一方，不飽和土に働くサクションとは，土の間隙で生じる毛管現象であり，その値は間隙構造によって変化する．つまり，吸水・排水履歴によってヒステリシスを描く飽和度～サクション関係（水分特性曲線）も，土の「構造」の変化と密接に関係していると考えられる．しかしながら，現行の不飽和土の数値解析等では，水分特性曲線は「構造」を考慮しない独立した形でモデル化 [7),8)]されている．このため，構成モデルとの間で初期値や材料パラメータの設定が合致しない場合，計算が発散する可能性が生じてしまう．特に，吸水・排水履歴に依存する水分特性曲線の初期状態は，吸水なのか排水なのかの判断が困難であるとともに，構成モデルとは独立で計算されることから齟齬も生じやすい．従って，水分特性曲線モデルに対しても「構造」を取り入れた定式化が必要であると考えられる．

以上のことから，本研究では不飽和土の構成モデルに「構造」を考慮した新たな構成モデルを提案する．ここでは，不飽和土に対して圧密試験を実施することで吸水時に残留する「構造」について確認するとともに，吸水・排水過程での「構造」の変化をモデル化し，不飽和土の構成モデルに組み込んだ．また，水分特性曲線モデルに対しても「構造」の概念を取り入れた新たなモデルを提案する．吸水・排水過程でヒステリシスを描く水分特性曲線の挙動を，「構造」の変化によりヒステリシスを描く水分特性曲線モデルとして定式化する．これにより，水分特性曲線モデルは不飽和土の構成モデルと連動した挙動を示すことになる．本報告では，実施した圧密試験結果や構成モデルの導出方法，水分特性曲線モデルの定式化について紹介する．

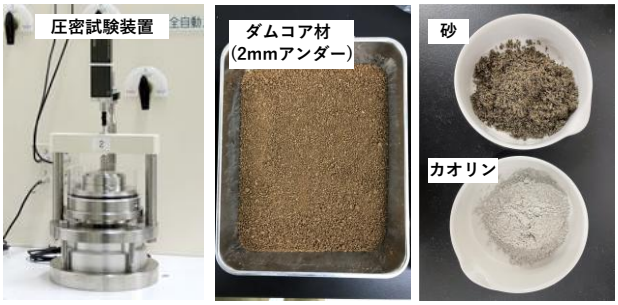


写真-1　圧密試験装置と試料

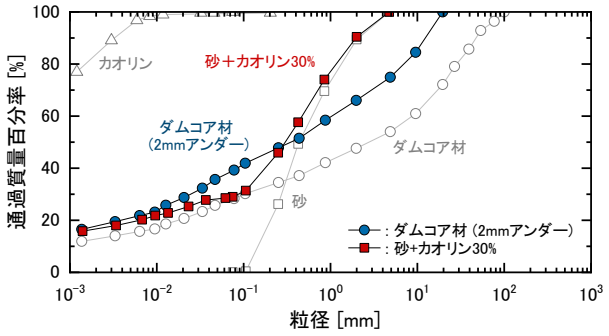


図-1　使用した試料の粒径加積曲線

2. 圧密試験による不飽和土の「構造」検討

2.1 不飽和～飽和圧密試験の概要

不飽和締固め土では，締固め時の含水比や飽和度の違いが締固め後の飽和透水係数に影響を与えるため，同じ間隙比でも透水係数が異なることが知られている．既往の研究 [2),3),4)]によると，このような透水性の違いは締固めの際に生じる間隙構造（もしくは「構造」）の違いであると考えられている．一方，不飽和の締固め土を飽和させた場合，「コラプス」により不飽和土が有する「構造」が崩れると考えられるが，先に述べたように飽和後の透水係数に違いが生じるということは，飽和後も「構造」が残留していることが予想される．そこで，不飽和の締固め土に対して飽和させた状態での圧密試験を実施することにより，飽和後の「構造」についての検討を行った [9)]．ここでは，圧密試験装置を用いて不飽和土を圧縮（締固め）した後に除荷，通水飽和させ再び圧密する連続した試験を実施した．使用した土試料は，2mm アンダーに調整したダムのコア材 [10)]（ρ_s=2.795g/cm^3）と，購入砂（青森県三沢産）にカオリンを重量比で 30%配合した中間土 [11)]（ρ_s=2.711g/cm^3）の 2 種である．含水比調整したこれらの試料（コア材が約 24.0%，砂＋カオリンが約 8.0%）を，圧密容器内に所定の高さ・乾燥密度になるように詰めて圧縮を行う（不飽和の圧縮過程）．今回の試験ではこの圧縮応力を 320kPa，640kPa，1280kPa の 3 ケースとした．圧縮した供試体は 10kPa まで除荷した後，圧密容器内で供試体下部からゆっくり通水を行い飽和させる

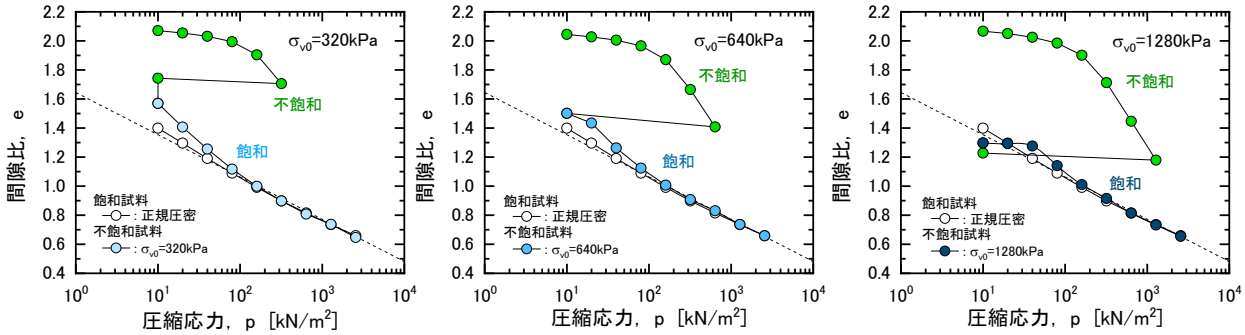


図-2　不飽和圧縮～通水飽和～飽和圧密過程の$e\sim\log p$関係（ダムコア材）

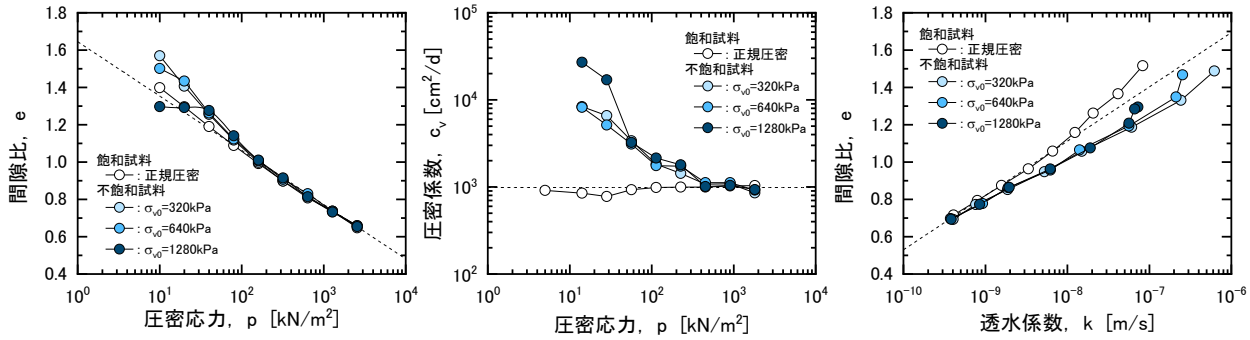


図-3　飽和圧密過程における$e\sim\log p$関係，圧密係数C_vの変化，$e\sim\log k$関係の比較（ダムコア材）

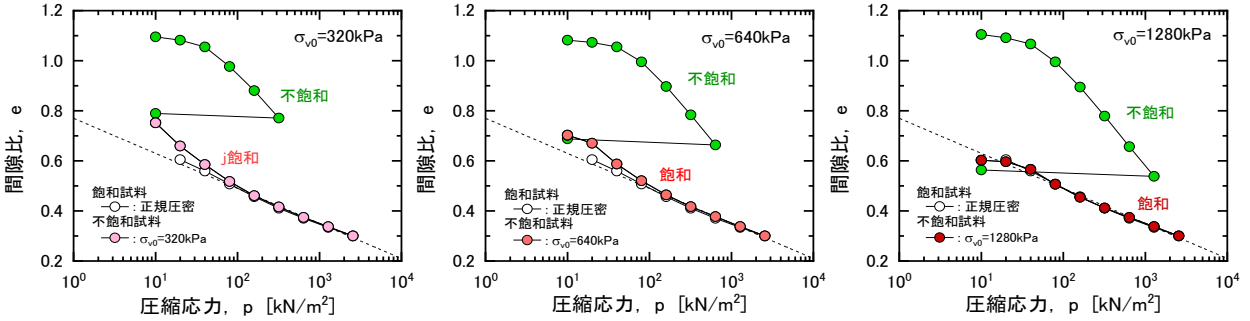


図-4　不飽和圧縮～通水飽和～飽和圧密過程の$e\sim\log p$関係（砂＋カオリン 30%）

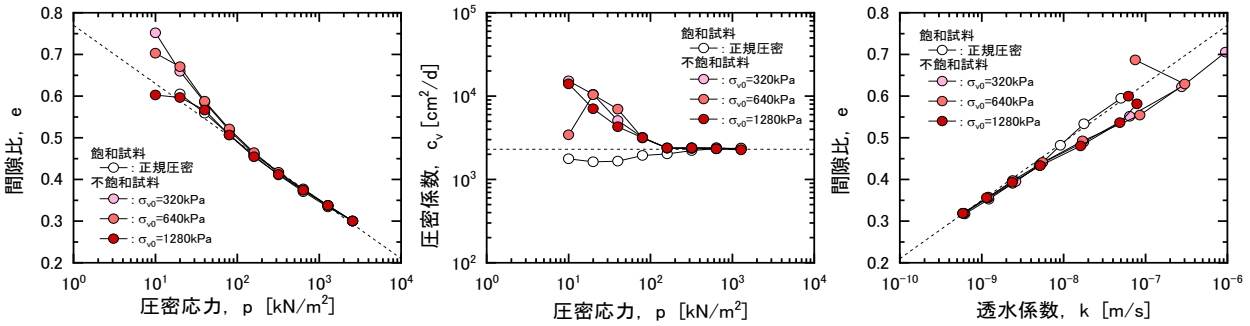


図-5　飽和圧密過程における$e\sim\log p$関係，圧密係数C_vの変化，$e\sim\log k$関係の比較（砂＋カオリン 30%）

（通水飽和過程）．飽和後，段階載荷による圧密試験（飽和圧密過程）を実施することで，土の構造や透水性について考察した．**写真-1** に使用した圧密試験装置と試料，**図-1** に試料の粒径加積曲線を示す．

2.2 圧密試験結果と考察

図-2 および**図-4** は，不飽和圧縮（締固め）～通水飽和～飽和圧密の全過程における間隙比～圧縮圧力（$e\sim\log p$）関係を表したグラフである．なお，比較のためにスラリー状にした試料（飽和・正規状態）で実施した圧密試験結果も白丸で示している．不飽和状態における圧縮（締固め）過程を見ると，$e\sim\log p$関係は飽和土の正規圧密ラインよりもかなり右側に位置していることがわかる．これは圧縮応力がサクションの影響も含んでいるためである．不飽和の土を所定の圧縮応力を与え締固めた後，10kPa まで除荷して通水飽和させる．この通水飽和過程を見ると，圧縮応力 320kPa で締固めたケースでは，通水飽和の際に間隙比が減少しコラプス沈下が発生している．

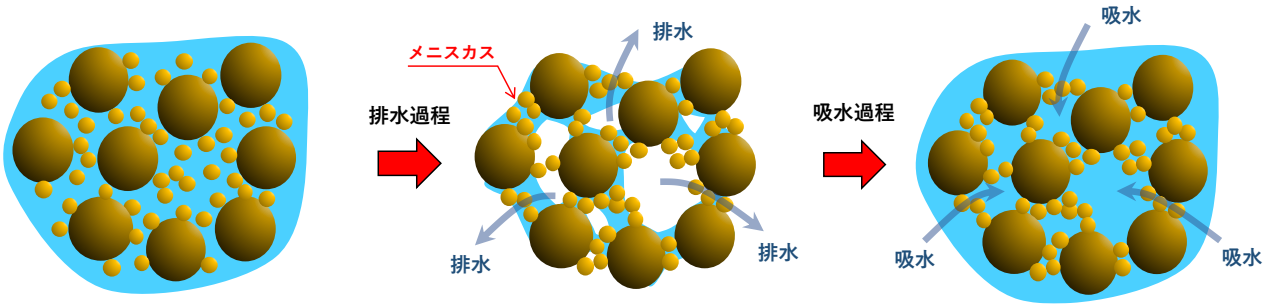


図-6　本研究で想定する排水・吸水による土粒子骨格構造の形成プロセス

これに対して，640kPa のケースでは，通水飽和時の間隙比にはほとんど変化はなく，1280kPa のケースでは逆に間隙比が大きくなり膨張している．通水飽和過程では，サクションが消失して有効応力は除荷方向に働くため，間隙比は増加（体積膨張）するが，飽和正規圧密ラインよりも右側に突出した位置では除荷による膨張量を超えた「構造」の劣化が生じるため，コラプス沈下が卓越し体積が減少すると考えられる．その後の飽和圧密過程を見ると，$e\sim\log p$関係は飽和正規圧密ラインより若干右側に突出し見かけ上の先行圧密応力が増加，剛性が高くなっていることが確認できる．このことから，通水飽和によりコラプス沈下が生じた後でも土の「構造」が残留していると判断できる．

図-3 および**図-5** は，飽和圧密過程における試験結果を抜き出し，$e\sim\log p$関係，圧密係数C_vの変化，間隙比～透水係数（$e\sim\log k$）関係を抜粋し比較したグラフである．先に述べたように，$e\sim\log p$関係を見ると飽和後も「構造」が残留しており，その残留した「構造」は不飽和圧縮応力 320～1280kPa の 3 ケースでほぼ同じ線上にある．このことから，不飽和土が飽和した際の残留構造量は材料固有であると推測される（但し，今回実施した試験ケースだけでは特定する事は出来ておらず，今後様々なケースの試験を実施する必要がある）．圧密係数C_vのグラフを見ると，飽和正規圧密ラインより右側に突出した位置のプロットから算出される圧密係数C_vは，飽和正規圧密（城丸プロット）の値より大きくなっている．$e\sim\log k$関係を見ると，圧密係数C_vの増加に伴い透水係数kも大きくなるため，同じ間隙比で比較すると，「構造」がある場合の透水係数はかなり大きくなっていることがわかる．

以上のように，不飽和土では通水飽和時にコラプスによる「構造」の劣化が生じ強度は低下するものの，飽和状態に至っても「構造」は残ることがわかった．また，この「構造」が土の強度だけではなく，透水係数にも影響していることも確認できた．

3.　「構造」を考慮した不飽和構成モデル

3.1 不飽和土における「構造」の変化

先に述べた不飽和～飽和の圧密試験の結果などから，不飽和土は「構造」の影響を強く受けており，飽和した後もその影響が残ることがわかった．しかしながら，現行の変形解析等に用いている構成モデルでは，このような「構造」による影響は考慮されていない．そこで，これまでの知見を基に，吸水・排水過程による「構造」の形成プロセスを**図-6** のように想定した [12]．この図に示すように，初期状態として「構造」を有していない飽和状態の土を仮定する．この飽和土を排水すると，内部の間隙水はバルク水から徐々に排水され不飽和化し，土粒子間でメニスカスが形成されていく．この時，排水され空隙となった位置にあった土の微粒子は，空気中に留まることはできないため，表面張力（サクション）によりメニスカスに引き寄せられ，これにより「構造」が徐々に形成されていく．この不飽和土に対して吸水により再飽和させると，メニスカスに引き寄せられていた土粒子は元の位置には移動しないため，不飽和状態で形成された「構造」は飽和後も残留することになる．**図-6** に示したこのような「構造」の形成プロセスについては，著者らが実施している顕微鏡画像解析結果 [13]などからも十分妥当な想定であると判断している．

3.2 「構造」を考慮した不飽和構成モデルの提案

図-6 に示した吸水・排水過程での「構造」の形成プロセスを，不飽和土の構成モデルに導入する．ここでは，大野ら [14]による Se-Hardening モデルを対象として「構造」を考慮する．Se-Hardening モデルの降伏関数fは，以下のように表される．

$$f = \mathrm{M}D\ln\frac{p'}{\xi\cdot p_0'} + D\eta^* - \varepsilon_v^p = 0$$
$$\xi = exp[(1-S_{re})^n \ln a] \qquad [1]$$

Mは限界応力比，Dはダイレイタンシー係数，p'は平均有効主応力，p_0'は先行時の平均有効主応力，η^*は一般化した応力比，ε_v^pは塑性体積ひずみである．また，ξは飽和度による剛性増加を表す関数であり，nおよびaは関数ξのフィッティングパラメータである．また，式中のS_{re}は有効飽和度であり，

$$S_{re} = \frac{S_r - S_{rc}}{1 - S_{rc}} \qquad [2]$$

と表される．S_{rc}は限界飽和度である．式[1]に示すように，この Se-Hardening モデルは飽和度の関数ξによって関口・太田モデル [15]の正規降伏曲面の大きさが変化するモデル

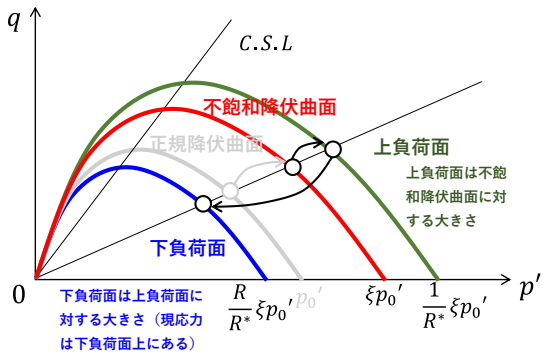


図-7　「構造」を考慮した不飽和土の降伏曲面

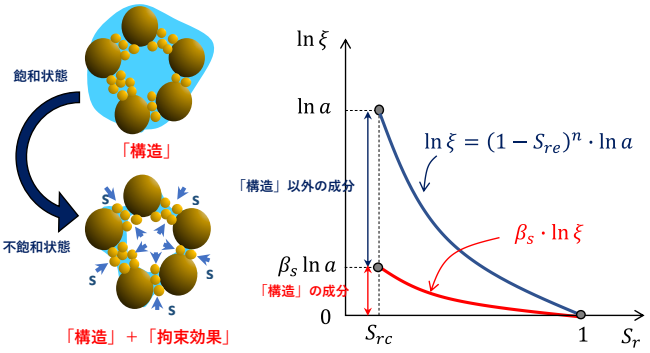


図-8　不飽和状態における剛性への影響要因と関数ξにおける構造成分

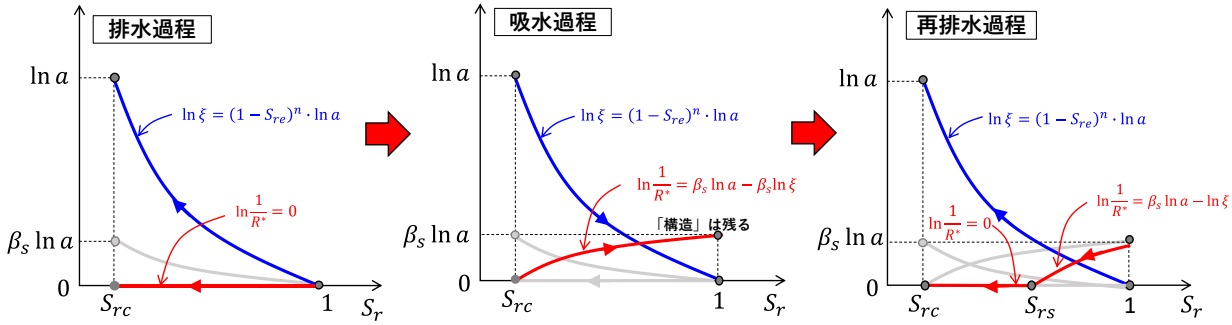


図-9　排水過程・吸水過程における上負荷面相似比R^*の変化

である．このモデルに Asaoka ら [16]が提案する上負荷面モデルを導入することで「構造」を考慮する．なお，上負荷面モデルは「構造」による剛性変化を正規降伏曲面と相似の上負荷面で表したモデルであるため，Se-Hardening モデルと相性が良く，導入も容易である．ちなみに，上負荷面を考慮する際には同時に Hashiguchi[17]による下負荷面も導入する必要がある．式[1]に上負荷面相似比R^*および下負荷面相似比Rを導入して次のように表す．

$$f = \mathrm{M}D\ln\frac{R^*\cdot p'}{\xi\cdot R\cdot {p_0}'} + D\eta^* - \varepsilon_v^p = 0 \qquad [3]$$

$$\dot{R} = -\frac{m}{D}\ln R\cdot\|\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p\|,\quad \dot{R}^* = \frac{R^*}{D}\left(1-R^{*m^*}\right)\|\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p\|$$

$\dot{R}$と$\dot{R}^*$は下負荷面と上負荷面の発展則であり，mとm^*は下負荷面と上負荷面のパラメータ，$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p$は塑性ひずみ速度である．**図-7** は，この式[3]に示した上負荷面・下負荷面を導入した Se-Hardening モデルの模式図である．この図に示すように，正規降伏曲面から飽和度による剛性増加された不飽和降伏曲面，そこに構造が考慮された上負荷面，過圧密を表す下負荷面が規定される．なお，ここで考慮しなければならないのは，飽和度による剛性増加関数ξには「構造」による剛性増加も含まれていることである．つまり，式[3]に示した式のみでは上負荷面による「構造」と関数ξによる「構造」が重複してしまう．そこで，飽和度による剛性増加を表す関数ξに含まれる「構造」成分の比率をβ_s（$0<\beta_s<1$）として次のように表す．

$$\ln\xi = \beta_s\cdot\ln\xi + (1-\beta_s)\cdot\ln\xi \qquad [4]$$

右辺第 1 項が「構造」による成分，第 2 項が拘束効果等の「構造」以外による成分であり，図示すると**図-8** のようになる．ちなみに「構造」以外の成分としては，例えばメニスカスに引き寄せられた土粒子がサクションにより動きが拘束される効果，いわゆるプレストレスの様な効果等が考えられる（**図-8** 参照）．式[4]により関数ξから抜き出した「構造」の成分は，飽和度に対して土が有する「構造」の下限値であると考え，これを超えた分の「構造」を上負荷面相似比R^*とすることで，「構造」の重複を回避する．この前提のもと，吸水過程・排水過程における「構造」の形成プロセスが**図-6** に従うと考え，上負荷面相似比R^*の変化を**図-9** のように仮定する．この図に示したように，排水過程で生じた「構造」は，吸水過程でも残留して上負荷面相似比R^*へと転換される．また，「構造」が残った状態での排水過程では，飽和度による強度増加が「構造」による強度増加を上回るまで

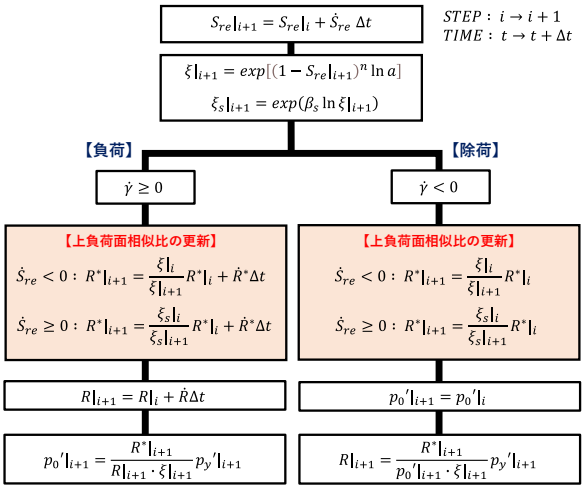


図-10　「構造」を考慮した負荷判定フロー

「構造」が劣化していく．このように考えると，上負荷面相似比R^*の変化は**図-9** に示すようなヒステリシスを描くことになり，これに伴い不飽和土の剛性も吸水・排水過程においてヒステリシスを描くことになる．上負荷面相似比R^*の変化を次式に示す．

$$\begin{aligned} &\text{排水：} \ln(1/R^*) = 0 \\ &\text{吸水：} \ln(1/R^*) = \beta_s \cdot \ln a - \beta_s \cdot \ln \xi \\ &\text{再排水：} \ln(1/R^*) = \beta_s \cdot \ln a - \ln \xi \end{aligned} \quad [5]$$

なお，このような吸水・排水過程の上負荷面相似比R^*の変化については，式[3]や式[4]に示した構成モデルで考慮することはできないため，数値計算等では負荷判定にて考慮することになる．**図-10** は，「構造」を考慮した負荷判定フローの一例である．ちなみに，この負荷判定フローは数値計算への適用を意識しており，式[5]を増分系（i→i+1）で記述し直している．この図に示したように，負荷・除荷および吸水・排水を判定し，飽和度S_rや関数ξ，下負荷面相似比Rや上負荷面相似比R^*，先行圧縮応力p_0'を更新することで，**図-9** に示した「構造」の挙動が表現可能となる．

4. 「構造」を考慮した水分特性曲線モデル

4.1 水分法を用いた間隙径分布とサクションの関係

不飽和の締固め土では，締固め時の飽和度の違いが締固め後の透水性に影響を与えるため，同じ間隙比でも透水係数が異なる．杉井ら [5),6)]は，この要因として飽和度の異なる土では間隙径分布に違いがあることを示しており，この間隙径分布の誘導に水分特性曲線から推定する「水分法」[18)]を用いている．「水分法」は土壌物理学において古くから用いられてきた手法であり，**図-11** に示すような間隙径を細い毛管の束と仮定し，その管径に対する毛管上昇高の考え方を用いることで間隙径分布を求めることができる．**図-11** に示した毛管束モデルを任意の高さで切断した時，毛管径がd_mから$d_m + d$の間にある毛管が占める断面積dA_vが，毛管束の全断面積Aに対する割合を次のように表す．

$$\frac{dA_v}{A} = f(x) \cdot dx, \qquad x = d_m \quad [6]$$

$f(x)$は毛管径の分布密度関数である．この式より，任意の切断面における毛管束の間隙率（面積率）nは，

$$n = \int_{A_{v,min}}^{A_{v,max}} \frac{dA_v}{A} = \int_{d_{m,min}}^{d_{m,max}} f(x) \cdot dx \quad [7]$$

と表される．ここで，$d_{m,max}$および$d_{m,min}$は任意断面に含まれる最大・最小の毛管径であり，$A_{v,max}$および$A_{v,min}$はこの毛管径に対応した断面積である．一方，この任意断面において毛管径$d_{m,i}$まで水で満たされていると考えた場合，その体積含水率θは次のように表される．

$$\theta = \int_{d_{m,min}}^{d_{m,i}} f(x) \cdot dx, \qquad f(x) = \frac{d\theta}{dx} \quad [8]$$

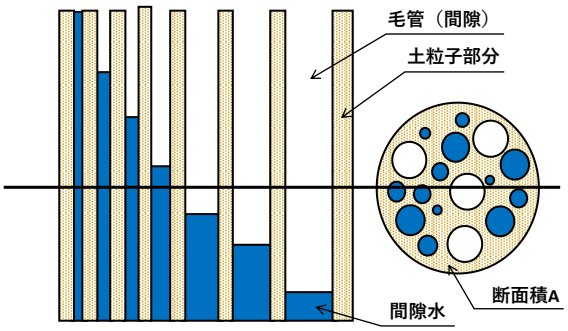


図-11 「水分法」における毛管束モデル [18)]

ところで，毛管径d_mについては毛管上昇高さ，即ちサクションh_pから次式により算出することができる．

$$d_m = \frac{4\sigma_w}{\rho_w \cdot g \cdot h_p} \cdot 10^4 \quad [9]$$

σ_wは水の表面張力，gは重力加速度，ρ_wは水の密度である．この式[9]を微分して次のように置く．

$$d(d_m) = dx = -\frac{4\sigma_w}{\rho_w g {h_p}^2} \cdot 10^4 \cdot dh_p = -\frac{d_m}{h_p} dh_p \quad [10]$$

この式[10]を式[8]に代入すると，次式が求められる．

$$f(x) = \frac{dh_p}{dx} \cdot \frac{d\theta}{dh_p} = -\frac{4\sigma_w}{\rho_w g {d_m}^2} \cdot 10^4 \cdot \frac{d\theta}{dh_p} \quad [11]$$

ここで，θ～h_p関係で表される土の水分特性曲線，例えば次式に示す VG model[8)] をこの式[11]に代入することで，間隙径（毛管径）の分布密度関数$f(x)$が求められる．

$$S_{re} = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \cdot 10^2 = \frac{1}{\left\{1 + \left(\alpha \cdot h_p\right)^{n^*}\right\}^m} \cdot 10^2 \quad [12]$$

S_{re}は有効飽和度，θ_rは残留体積含水率，θ_sは飽和体積含水率，α，m，n^*は材料パラメータである．ちなみに，水分特性曲線を飽和度S_rとの関係で表す場合，式[7]に示した間隙率nと式[8]に示した体積含有率θから，次式のように飽和度S_rを表すことができるため，これを用いて式[11]の分布密度関数$f(x)$を表せばよい．

$$S_r = \frac{\theta}{n} \quad [13]$$

以上のように，「水分法」では水分特性曲線から間隙径分布を求めることができるため，水分特性曲線と間隙径分布は 1:1 の関係であることがわかる．そこで，この「水分法」に対して逆関係を考えることにより，間隙径（毛管径）の分布から水分特性曲線（飽和度～サクション関係）を誘導する．締固め土の間隙径d_mの対数をx_iとし，その分布密度関数$f(x_i)$が次のような正規分布で表されると仮定する．

$$f(x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} exp\left(-\frac{(x_i - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad x_i = \log_{10} d_m \quad [14]$$

μが間隙径の対数x_iの平均，σが標準偏差である．この正規分布の累積関数は飽和度S_rを表しており，次式のよう

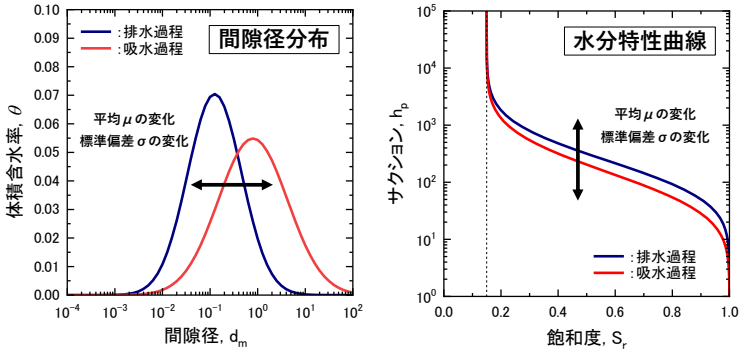


図-12　間隙径分布モデルと水分特性曲線

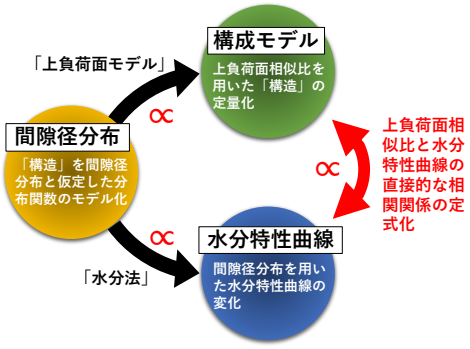


図-13　間隙径分布～構成モデル～水分特性曲線の相関

に求められる．

$$S_{r,i} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\infty}^{x_i} exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dx \qquad [15]$$

この式[15]に対し誤差関数を用いて，

$$S_{r,i} = \frac{1}{2}\left\{1 + erf\left(\frac{x_i - \mu}{\sqrt{2}\sigma}\right)\right\} \qquad [16]$$

と表す．さらに，この式[15]を間隙径の対数x_iについて次のように整理する．

$$x_i = \log_{10} d_m = \sqrt{2}\sigma \cdot erf^{-1}(2S_{r,i} - 1) + \mu \qquad [17]$$

一方，式[9]に示した間隙径（毛管径）～サクション関係に対して，両辺を自然対数として次のように表す．

$$\ln d_m = \ln\frac{C}{h_p}, \quad C = \frac{4\sigma_w}{\rho_w g} \cdot 10^4 \qquad [18]$$

この式[18]を式[17]に代入することで，S_r～h_p関係で表される水分特性曲線が以下のように求められる．

$$h_p = exp\left[-\frac{2.303}{C}\{\sqrt{2}\sigma \cdot erf^{-1}(2S_{r,i} - 1) + \mu\}\right] \qquad [19]$$

この式に示したように，S_r～h_p関係（水分特性曲線）は正規分布で仮定した間隙径分布関数$f(x_i)$の平均μおよび標準偏差σから決定されることがわかる．水分特性曲線は，吸水・排水過程においてヒステリシスを描くため，**図-12**に示すように間隙径分布形状（平均μおよび標準偏差σ）は，吸水過程と排水過程で異なることがわかる．

4.2 「構造」を考慮した水分特性曲線モデルの提案

先に述べたように，水分法によると水分特性曲線のヒステリシスは，間隙径分布の変化により生じる現象であることがわかった．この間隙径分布は，間隙を形成する土粒子の配置，つまり「構造」に置き換えることができるため，不飽和土の「構造」による強度増加も，間隙径分布の変化によって生じると考えられ，構成モデルと水分特性曲線モデルは**図-13**に示すように間隙径分布を介して連動する．しかしながら，従来の不飽和土の数値解析では水分特性曲線モデルは構成モデルとは独立したモデルとして設定されているため，計算で不具合が生じるケースが散見される．そこで，構成モデルと連動した水分特性曲線モデルについて検討してみる[19]．

図-13に示したように，間隙径分布モデルを定義し，この変化により構成モデルの「構造」や水分特性曲線が変動するモデルを構築すれば，構成モデルと水分特性曲線が連動したモデルとなる．しかしながら，間隙径分布は式[14]に示すような正規分布ではなく複雑な形状をしていると考えられるため，式[19]に示した水分特性曲線の形状とは必ずしも一致しない．また，間隙径分布と「構造」を表す上負荷面相似比との相関性も定式化するのが困難である．そこで，間隙径分布を介さず，構成モデルと直接連動するような水分特性曲線モデルを提案する．ここでは，著者らが使用している土／水／空気連成有限要素解析プログラム（DACSAR-i）[20]を想定し，水分特性曲線の関数に杉井・宇野[21]が提案する以下の式を用いる．

$$S_{re} = \frac{1}{1 + exp(A^* + B^* \ln s)} \qquad [20]$$

S_{re}は式[2]に示した有効飽和度，sはサクション，A^*およびB^*は曲線を規定する材料定数である．ここで，材料定数A^*，B^*が排水過程と吸水過程でそれぞれA_DとB_D，A_WとB_Wで定義されるとする．この時の上負荷面相似比R^*は，**図-9**を参照して次のように表される．

$$\begin{aligned} &A^* = A_D,\ B^* = B_D \ \Leftrightarrow\ \ln(1/R^*) = 0 \\ &A^* = A_W,\ B^* = B_W \ \Leftrightarrow\ \ln(1/R^*) = \beta_s(\ln a - \ln \xi) \end{aligned} \qquad [21]$$

上式で示すような排水過程および吸水過程の条件を定義すると，上負荷面相似比R^*と水分特性曲線は**図-14**に示す相関性を持つことになる．ここで，式[20]に示した水分特性曲線が，排水過程と吸水過程の間で変動すると考え，材料定数A^*，B^*を次のように置く．

$$\begin{aligned} A^* &= A_D + \chi(A_W - A_D) \\ B^* &= B_D + \chi(B_W - B_D) \end{aligned} \qquad [22]$$

式中のχは上負荷面相似比R^*の関数であり，排水過程では$\chi = 0$，吸水過程では$\chi = 1$となる．ここでは，この条件を満たす単純な関数として，式[5]に示す条件を用いて次のような関数を定義した．

$$\chi = \left[\frac{\ln(1/R^*)}{\beta_s(\ln a - \ln \xi)}\right]^{m_\xi} \qquad [23]$$

m_ξはフィッティングパラメータである．**図-15**は，この

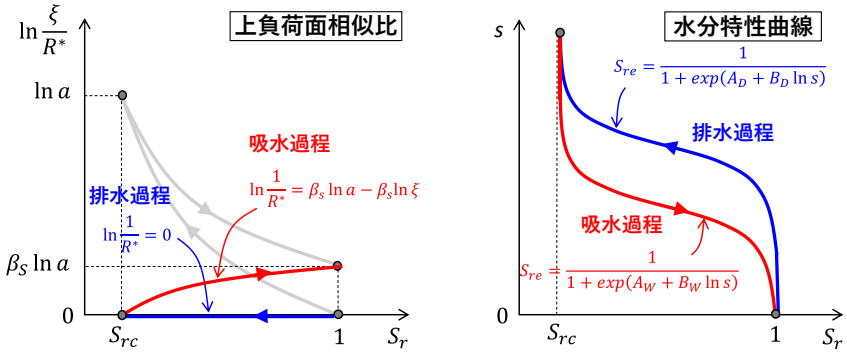


図-14　吸水・排水過程における上負荷面相似比と水分特性曲線

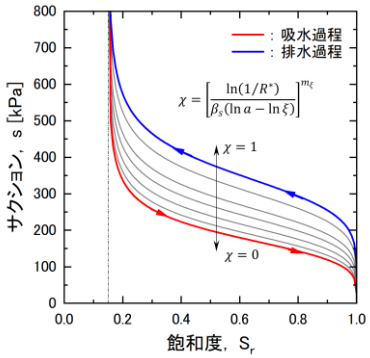


図-15　関数Cによる水分特性曲線の変化

関数χを用いて式[19]に示した水分特性曲線の移動を表したグラフである．上負荷面相似比R^*の変化により関数χの変化し，水分特性曲線が吸水過程と排水過程の間で変化する様子が伺える．

4.3 水分特性曲線の計算事例

提案する水分特性曲線モデルの検証として，吸水・排水過程を繰り返す不飽和土の実験結果の再現計算を行った．ここでは菊本ら[22]の検証を参考に，**表-1** に示す次の 3 種類の材料を対象とした．uniform glass beads[23]は粒径 180μm の均一な球形ガラスビーズの集合体，aggregated glass beads[23]は粒径が 200μm 程度になるように焼結させたガラスビーズ粉末，white silica sand[24]は粒径 0.074～0.297mm 程度の珪砂である．計算に用いた各材料のパラメータを**表-1** に示す．計算では，入力として飽和度S_rを与え，これによって変化する上負荷面相似比R^*とサクションs（水分特性曲線）を算出した．なお，簡易計算であるため構成モデルの関数ξのパラメータは各材料共通とし，サクション変化による負荷・除荷での「構造」変化については考慮していない．

図-16 および**図-17** は，uniform glass beads と aggregated glass beads の計算結果である．ここでは，吸水過程から排水過程へ移行するケースと，排水過程から吸水過程へ移行するケースの 2 つを計算している．各計算結果の上負荷面相似比R^*のグラフを見ると，吸水・排水過程に伴い上負荷面相似比R^*がヒステリシスを描いていることがわかる．また，これに伴い水分特性曲線もヒステリシスを描いており，実際の試験結果[23]とも十分一致していることが伺える．**図-18** は，white silica sand の計算結果である．ここでは，吸水過程と排水過程を繰り返し与えるサイクリックな計算を行っている．先ほどと同様に，各計算結果の上負荷面相似比R^*は，吸水・排水過程の繰り返しの伴いヒステリシスを描いていることがわかる．また，水分特性曲線は実際の試験結果[24]とも十分一致しており，提案したモデルの有用性が伺える．

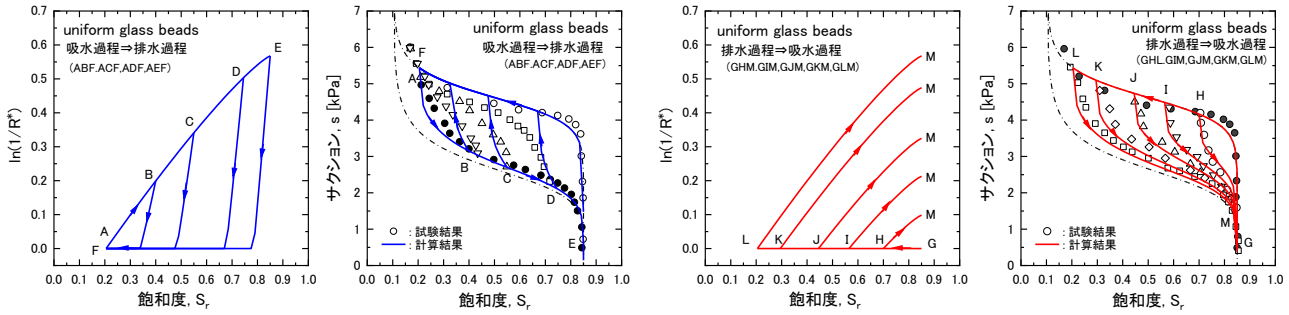
5. おわりに

本研究では，不飽和土の構成モデルや水分特性曲線モデルに対して，「構造」を考慮した新たなモデルを提案した．不飽和土の構成モデルでは，吸水過程で残留する「構造」に対して上負荷面モデルを導入することで，吸水・排水過程での強度変化を表現した．また，水分特性曲線モデルについては，構成モデルの「構造」を表す上負荷面相似比と連動してサクションが変化するモデルとした．提案したこれらモデルの最大の特徴は，吸水・排水過程といった履歴に依らず，状態量（間隙比や間隙径分布）である「構造」によって水分特性曲線のサクションが一意に決まる点にあり，土の状態量を塑性ポテンシャルとする不飽和土の構成モデルと同じ「塑性論」の枠組みの中で水分特性曲線モデルも取り扱うことができる点にある．これにより，水分特性曲線は従来のような入力値として構成モデルに与えるものではなくなり，構成モデルの負荷・除荷の過程によって得られる結果の 1 つとなる．

以上のことから，今回提案するモデルを変形解析等に組み込む場合，従来の計算手法から計算スキーム自体が大きく変わることになる．特に初期状態の設定では，水分特性曲線が吸水過程もしくは排水過程どちらにあるのかを判断し，構成モデルの初期状態や応力状態のバランスを考えて初期サクションを要素毎に設定する必要があったため，複雑な入力条件が必要となり計算上の不具合も生じ易かったが，これらの問題は計算スキームの変更により一気に解決することが予想される．また，本報告で紹介した圧密試験のような，吸水・排水過程で残留する「構造」の影響等に見られる実際の不飽和挙動も計算可能となる．今後は，提案する構成モデルと水分特性曲線モデルを変形解析プログラムに実装し，検証を進めていく予定である．

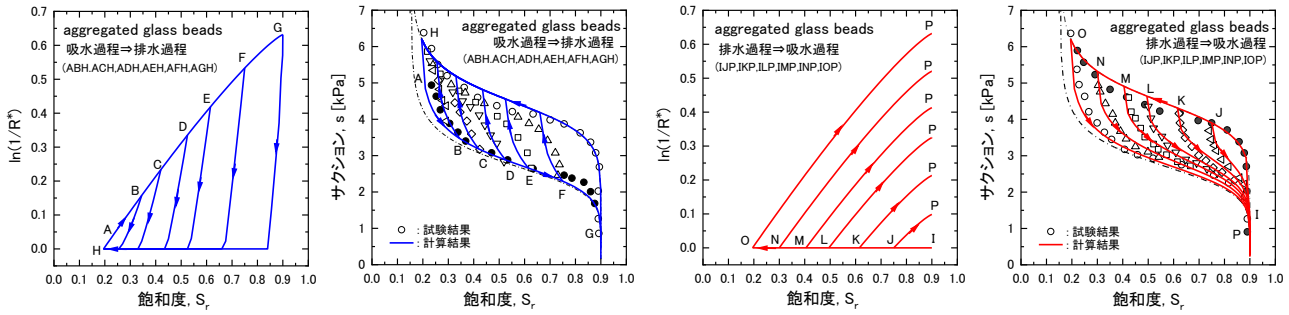
表-1　計算に用いたパラメータ一覧

			uniform glass beads	aggregated glass beads	white silica sand
剛性増加関数ξ	フィッティングパラメータ	n	1.2		
		a	30.0		
	「構造」を有する割合	β_s	0.2		
水分特性曲線	排水過程	A_D	-18.5	-13.5	-11.5
		B_D	12.0	8.9	4.7
	吸水過程	A_W	-6.0	-6.5	-3.7
		B_W	6.0	6.3	2.5
	フィッティングパラメータ	m_ξ	0.2	0.3	0.2



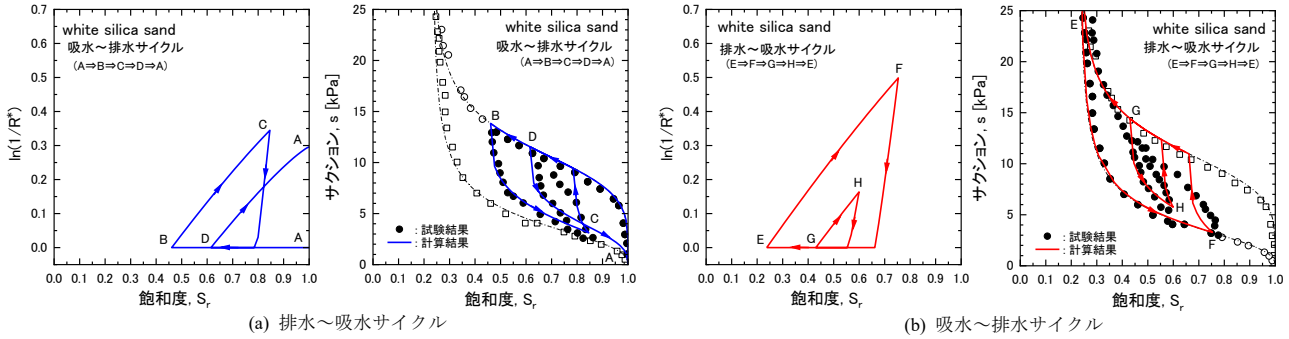
(a) 吸水過程⇒排水過程　　(b) 排水過程⇒吸水過程

図-16　吸水・排水過程を伴う水分特性曲線と計算結果の比較（uniform glass beads）[23)]



(a) 吸水過程⇒排水過程　　(b) 排水過程⇒吸水過程

図-17　吸水・排水過程を伴う水分特性曲線と計算結果の比較（aggregated glass beads）[23)]



(a) 排水～吸水サイクル　　(b) 吸水～排水サイクル

図-18　サイクリックな吸水・排水過程を伴う水分特性曲線と計算結果の比較（white silica sand）[24)]

謝辞：本研究に対してご助言，ご指導いただいた中央大学の太田秀樹教授，飯塚敦教授，神戸大学の竹山智英教授に感謝いたします．

参考文献

1) 三笠正人：土の力学における構造の概念の定義について，第 17 回土木学会年次学術講演会，pp.43-48, 1962.
2) Tatsuoka F.: Compaction Characteristics and Physical Properties of Compacted Soils Controlled by the Degree of Saturation, *Deformation Characteristics of Geomaterials*, IOS Press, pp.40-76, 2015.
3) Watabe Y., Leroueil S. and Le Bihan J-P.: Influence of compaction conditions on the pore-size distribution and saturated hydraulic conductivity of a glacial till, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.37, Issue.6, pp.1184-1194, 2000.
4) Alonso EE, Pinyol NM, Gens A.: Compacted soil behavior: initial state, structure and constitutive modeling. *Géotechnique*, 63(6), pp.463–478, 2013.
5) 杉井俊夫，野川敦史，古川泰之：締固め時の含水比が透水係数に及ぼす間隙構造，第 78 回土木学会年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-247，2023.
6) 杉井俊夫，朱発瑜，末松知奈：有効応力から「粒子有効力」へ間隙比から「間隙径分布」へ，地盤工学会誌，第 66 巻，第 7 号，pp.14-17, 2018.
7) Brooks, R.H., and Corey, A.T.: Properties of porous media affecting fluid flow, *J. Irrig. Drainage Div.*, ASCE Proc.72(IR2), pp.61-88, 1964.
8) van Genuchten, M.Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Soc. Am. J.*, 44, pp.892-898, 1980.
9) 大塚悠大，平田昌史，石黒健：圧密試験装置を用いた不飽和締固め土の飽和透水性評価，第 59 回地盤工学研究発表会，No.24-7-2-02，2024.
10) 平田昌史，石黒健，飯塚敦，太田秀樹：等体積一面せん断試験を用いた不飽和パラメータの推定手法の検討，第 56 回地盤工学研究発表会，No.12-3-1-03，

2021.
11) 石黒健，大塚悠大，平田昌史，岩田将英，大河原正文，太田征志，広中良和：ベントナイト混合土の遮水性発現メカニズムに関する検討（その 1） 締固め時の乾燥密度と飽和度が飽和透水係数に及ぼす影響，土木学会第 78 回年次学術講演会，III-460，2023.
12) 平田昌史，大塚悠大，石黒健，太田秀樹，飯塚敦，竹山智英：「構造」を考慮した不飽和土の構成モデルと水分特性曲線モデル(その 1)～「構造」を考慮した不飽和土の構成モデルの提案～，第 60 回地盤工学研究発表会，No.24-9-4-03，2025.
13) 大塚悠大，平田昌史，石黒健，岩田将英，大河原正文，太田征志，広中良和：ベントナイト混合土の遮水性発現メカニズムに関する検討(その 3)～ベントナイト混合試験と一面せん断試験～，第 78 回土木学会年次学術講演会，III-462，2023.
14) 大野進太郎，河井克之，橘伸也：有効飽和度を剛性に関する状態量とした不飽和土の弾塑性構成モデル，土木学会論文集 C，Vol.63，No.4，pp.1132-1141，2007.
15) Sekiguchi, H. and Ohta, H.: Induced anisotropy and time dependency in clays, Constitutive Equation of Soils, *Proc. Specialty Session 9, 9th Int. Conf. Soil Mech. & Found. Engrg.*, Tokyo, pp.306-315, 1977.
16) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T.: Superloading yield surface concept for highly structured soil behavior, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.2, pp.99-110, 2000.
17) Hashiguchi, K.: Subloading surface model in unconventional plasticity, *Int. J. Solids Structures*, Vol.25, pp.917-945, 1989.
18) 宇野尚雄，神谷浩二，田中宏蕗：「空気圧入法」と「水分法」による砂の間隙径分布，土木学会論文集，No.603/III-44，pp.35-44，1998.
19) 飯塚敦，太田秀樹，平田昌史，大塚悠大，石黒健，竹山智英：「構造」を考慮した不飽和土の構成モデルと水分特性曲線モデル(その 2)～水分特性曲線モデルの提案～，第 60 回地盤工学研究発表会，No.24-9-4-04，2025.
20) Takeyama, T., Tachibana, S. and Fukukawa, A.: A finite element method to describe the cyclic behavior of saturated soil, *International Journal of Material Science & Engineering*, Vol.2(1), 2015.
21) 杉井俊夫，宇野尚雄：新しい水分特性曲線のモデル化について，土木学会第 50 回年次学術講演会概要集，pp.130-131，1995.
22) 菊本統，京川裕之，中井照夫：サクション履歴・間隙比・温度の影響を考慮した水分特性曲線モデル，応用力学論文集，Vol.12，pp.343-352，2009.
23) Topp G.C. and Miller E.E.: Hysteretic moisture characteristics and hydraulic conductivities for grass-bead media, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.30*, pp.156-162, 1966.
24) Huang H.C., Tan Y.C., Liu C.W. and Chen C.H.: A novel hysteresis model in unsaturated soil, *Hydrological Processes* 19, pp.1653-1665, 2005.