

不飽和土の1次元弾塑性モデル

名古屋工業大学 学生会員 京川 裕之
 名古屋工業大学 国際会員 菊本 統
 名古屋工業大学 国際会員 中井 照夫
 名古屋工業大学 国際会員 ホサイン シャヒン

1. はじめに

間隙が水で満たされていない不飽和土の力学応答や浸透挙動は複雑で、飽和した同じ土のそれとは大きく異なっている。しかし、土が不飽和であることは実地盤では特別なことではないので、その応力ひずみ特性や水理特性は適切に記述されねばならない。一般的に不飽和土中に存在する水は、粒子間に表面張力(サクション)を生み、粒子間のすべりを抑制させることが知られている。そして、表面張力の生成および消失が不飽和土の力学挙動に大きく影響する。

不飽和土の特徴的な挙動として、浸水時におけるコラプス挙動が広く知られている。図-1はJenningsらによって示された乾燥シルトの水浸時の土の圧縮挙動¹⁾である。図から、ある拘束圧下で緩い間隙を保持した不飽和土は、水浸とともに飽和試料と同様の圧密ラインへと圧縮する。これは、水浸に伴いメニスカス水が減少し、粒子間に作用する表面張力を消失することで、土がその間隙状態を保持できない不安定な状態となるためと考える。このようなコラプス挙動をはじめとした不飽和土の力学挙動を表現する構成モデルは、これまでにいくつか提案されており、その多く^{2),3),4),5)}は降伏面をサクション(または、水分特性曲線($s-S_r$ 関係)より求まる飽和度)の大きさに応じて、拡大/縮小させるようなモデルである。

一方、図-2は本田らが行ったカタルポクレーのサクション一定排気/排水標準圧密試験⁶⁾の結果を示す。横軸の有効応力は、次式で示すBishop⁷⁾が提案する有効応力式のパラメータ χ を飽和度 S_r とした拡張した有効応力式を用いる。

$$\sigma_{ij}^n = \sigma_{ij} - u_a \delta_{ij} + S_r (u_a - u_w) \delta_{ij} = \sigma_{ij}^{net} + S_r s \delta_{ij} \quad (1)$$

図-2の●プロットは初期水浸試料、○プロットはサクション73.5 kPa一定での不飽和試料の試験結果である。また不飽和試料の結果の各プロットの数字は、飽和度を示す。図からもわかるように、同じ拘束圧下において不飽和土は飽和土よりも緩い間隙を保持し、圧密曲線は常に飽和試料よりも上にある。しかしながら、圧密応力の増加に伴い土は大きく圧縮し、最終的には飽和試料に漸近していることがわかる。このとき、土の飽和度は圧縮量に応じて増加している。このことから、不飽和土の水分特性はサクションのみでなく、間隙比にも依存していること、さらに間隙変化に関しても内部の水

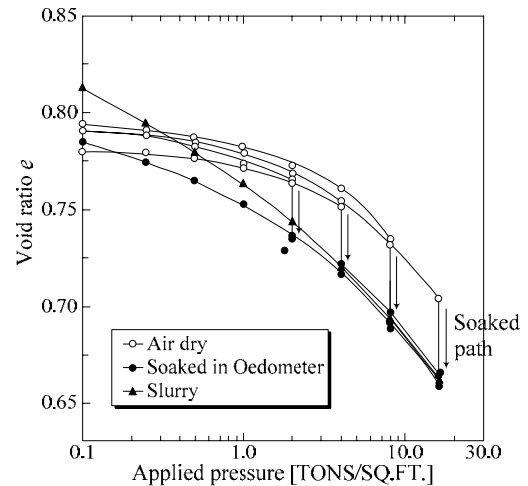


図-1 乾燥シルトの水浸時体積変化挙動-実測値¹⁾

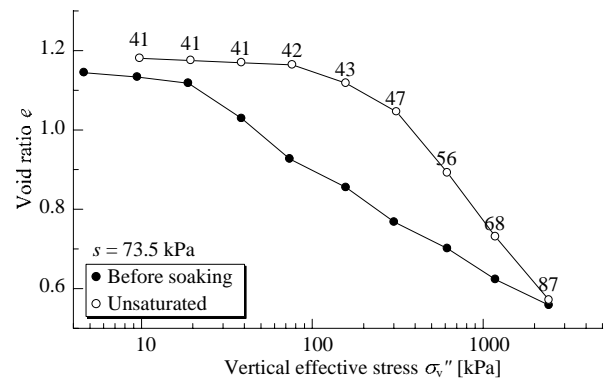


図-2 サクション一定排気/排水標準圧密試験-実測値(カタルポクレー)⁶⁾

分量が大きく影響していることが分かる。しかしながら、上述したような既往のモデルでは、サクションの大きさだけで降伏面の大きさ規定するためこのような影響を考慮することができない。また、降伏面を飽和度(あるいは水分量を表す他の数)の大きさで規定するモデルであっても、その変化がサクションで一意に決定される(たとえば一般的な水分特性曲線($s-S_r$ 関係)モデル)ならば、同様に圧密時の飽和度変化に伴った降伏面の縮小を適切に表現することができない。

本稿ではこのような不飽和の影響を、①正規状態ならびに限界状態を含めた間隙の飽和度による増減で表現する手法、②ヒステリシスおよび密度の影響を適切に考慮する水分特性曲線モデルを用いて表現する。これにより、提案モデルは、

不飽和土におけるサクシヨン-間隙比-飽和度を統一的に扱い、それぞれが力学挙動におよぼす影響を適切に考慮する。

なお本稿では構成モデルの定式化において、中井らが提案する地盤材料の諸特性を統一的にモデル化する手法⁸⁾に倣い、簡単な1次元(σ)問題として提案モデルの定式化を行う。また提案モデルは、不飽和土の典型的な要素試験についてパラメトリックスタディを行い、そのパフォーマンスを検証する。なお、文献に示すように、ここでの1次元モデルは修正応力 t_y の考え方をを用いて、容易に3次元モデルに拡張できる。

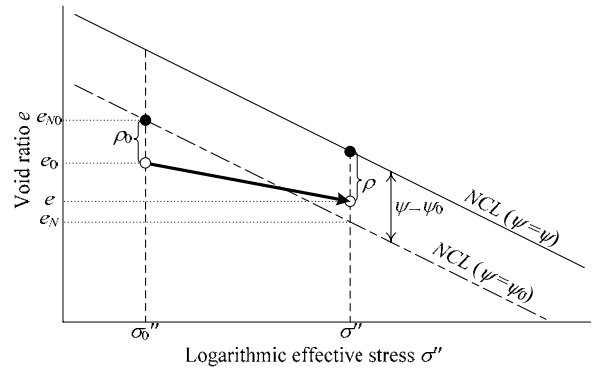


図-3 1次元提案モデル概要図⁸⁾

2. サクシヨン・飽和度・密度を統一的に考慮した不飽和土1次元弾塑性モデル

スラリー試料から圧密した(飽和)正規圧密土は、ある応力状態において飽和土が存在し得るもっとも緩い間隙状態を保持しているといえる。一方、不飽和土は、先に示した二つの実験結果からも分かるように、水の表面張力に起因する一種のボンディング効果によって、その挙動は同じ状態の飽和土よりも固く、飽和土よりも緩い間隙を維持する“嵩張り”を持った土になると考えられる。そして、この“嵩張り”は水浸ならびに間隙収縮に伴う飽和化によって消失する。以上より本稿では、飽和土の間隙比が存在可能な領域を定義する正規圧密線(NCL)が不飽和土の存在領域も規定できるとして、不飽和化に伴った“嵩張り”の発達/消散とともにNCLは上下方向にシフトしていると考え。以下に、この“嵩張り”の影響を構成モデルに導入する。

2.1 不飽和化に伴う“嵩張り”を考慮した不飽和土1次元弾塑性モデル概要

本稿では、式(1)で示した有効応力 σ' を用いて定式化を行う。Bishop⁷⁾は有効応力とは土の残留強度を一意に規定できる応力であると定義しており、限界状態の規定などにおける同有効応力の適用性はNuth⁹⁾らによって検討されている。定式化が簡便であることも含め、 χ を S_r とする σ' はある意味合理的で簡単に定義できる有効応力である。また軽部ら¹⁰⁾は、有効飽和度 S_{re} に基づいて式(1)と類似した有効応力を提案し、それを用いれば残留強度や応力比-ひずみ増分比関係が飽和度と同様に一義的に評価できると述べており、提案手法では必要に応じてこれらの有効応力を導入することも可能である。

中井らは、異方性以外の地盤材料の諸特性を統一的にモデル化する手法⁸⁾を提案しており、このようなNCLの移動量を状態変数 ψ として定義している。本稿では同手法に倣い、まず、図-3に示す簡単な1次元問題として提案モデルの定式化を行う。図中の ρ は、現在の間隙比と正規圧密線(NCL)からの距離で規定される密度の状態変数であり、 $\rho=0$ で正規圧密土(嵩張りによりその間隙比は変化する)、 $\rho>0$ は過圧密土(参照状態となるNCLを基準とする)を表す。いまここに、初期

状態I点($\sigma = \sigma_0, e = e_0$)からP点($\sigma = \sigma, e = e$)へ不飽和化を伴う载荷が生じたとする。このときの間隙比の変化量の塑性成分は、間隙比の総変化量($-\Delta e$)とその弾性成分(式(2))との差から式(3)で表わされる。

$$(-\Delta e)^e = \kappa \ln \frac{\sigma''}{\sigma_0''} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} (-\Delta e)^p &= (-\Delta e) - (-\Delta e)^e = \{(e_{N0} - e_N) - (\rho_0 - \rho)\} - (-\Delta e)^e \\ &= \lambda \ln \frac{\sigma''}{\sigma_0''} - (\rho_0 - \rho) - (\psi_0 - \psi) - \kappa \ln \frac{\sigma''}{\sigma_0''} \quad (3) \end{aligned}$$

式(2)の κ は膨潤指数、式(3)の λ は圧縮指数をそれぞれ表す。また、 ψ_0 は ψ の初期値であり、 $\psi_0 - \psi$ は“嵩張り”の変化量を表わす。そして、式(3)を応力関数 F と硬化パラメータ関数 H を用いた一般的な弾塑性論での降伏関数に次式に書き換えられる。

$$\begin{aligned} f &= F - \{H + (\rho_0 - \rho) + (\psi_0 - \psi)\} = 0 \\ \left(F &= (\lambda - \kappa) \ln \frac{\sigma''}{\sigma_0''}, H = (-\Delta e)^p \right) \quad (4) \end{aligned}$$

このとき、正規圧密線からの距離を表す状態変数(ρ)は、 ψ の値によっても変化する。つまり同じ間隙比であっても、 ψ が大きければ大きいほど、 ρ の値も大きくなり、土はより密な挙動を示す。言い換えれば、 ψ は土の状態を評価するための参照状態を移動させることとなる。

ここで不飽和化にともなう“嵩張り” ψ の関数形を規定する。既存の不飽和土構成モデルにおいて、不飽和を表すパラメータとして飽和度、サクシヨンまたはその双方を用いることが多い。提案モデルが表す“嵩張り”は、図-1, 2で示した実験結果より、飽和度の減少/増加に伴い、発達/消散することは明らかである。特に図-2の圧密試験の結果より、たとえサクシヨンが一定であったとしても、間隙の収縮による飽和度上昇に伴い、その影響は刻々と変化するため、提案モデルでは飽和度を不飽和土の力学特性を決定するパラメータとして用いる。ただし、モデル化に際し、飽和度は水分特性曲線モデルから算出するものであり、同モデルがサクシヨン-飽和度関係だけでなく、間隙比の影響を適切に考慮できる必要がある。以上のことから、

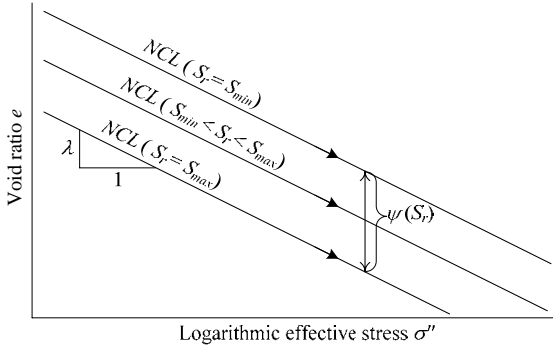


図-4 “嵩張り”(NCL 変化量) : $\psi(S_r)$

提案モデルは ψ を飽和度に対して単調な減少関数で簡単に与える(図-4)。

$$\psi(S_r) = l \cdot S_r \quad (5)$$

l は構成パラメータである。なおこの関数は、ヒステリシス(同一飽和度下において異なるサクシオン)などの影響を考慮する場合などには、 $\psi(S_r, s)$ などと変更することもできるが、本稿では飽和度に関する簡単な線形関数で与えた。そして適応条件 ($df=0$) より、

$$\begin{aligned} df &= dF - (dH - d\rho - d\psi) \\ &= (\lambda - \kappa) \ln \frac{d\sigma''}{\sigma''} - \{d(-e)^p - d\rho - d\psi\} = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

ρ の発展則は、塑性間隙比変化と単調な増加関数 $G(\rho)$ (ここでは $G(\rho) = a\rho$) を用いて次式で与える。

$$d\rho = -G(\rho) \cdot d(-e)^p = -a\rho \cdot d(-e)^p \quad (7)$$

a は構成パラメータである。その結果、塑性間隙比増分は式(5), (6), (7)より

$$d(-e)^p = \frac{(\lambda - \kappa) \frac{d\sigma''}{\sigma''} + \frac{d\psi}{dS_r} dS_r}{1 + G(\rho)} \quad (8)$$

と表わされ、全間隙比増分は弾性成分との和より、

$$\begin{aligned} d(-e) &= d(-e)^p + d(-e)^e \\ &= \left\{ \frac{\lambda - \kappa}{1 + G(\rho)} + \kappa \right\} \frac{d\sigma''}{\sigma''} + \frac{1}{1 + G(\rho)} \frac{d\psi}{dS_r} dS_r \end{aligned} \quad (9)$$

として求まる。また式(1)の増分を式(9)に代入して、塑性変形が生じる際の全間隙比増分は基底応力、サクシオン、飽和度を用いて次式で表わされる。

$$\begin{aligned} d(-e) &= \left\{ \frac{\lambda - \kappa}{1 + G(\rho)} + \kappa \right\} \frac{d\sigma^{net} + S_r \cdot ds}{\sigma''} \\ &+ \left[\left\{ \frac{\lambda - \kappa}{1 + G(\rho)} + \kappa \right\} \frac{s}{\sigma''} + \frac{1}{1 + G(\rho)} \frac{d\psi}{dS_r} \right] dS_r \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、式(9), (10)に用いられる飽和度の変化 dS_r は前述したように、間隙変化による影響を考慮するため、菊本ら¹¹⁾が提案する水分特性曲線モデルより算出する。なお、1次元問題での負荷基準は、塑性変形は圧縮側にしか生じない

という条件から、 $d(-e)^p$ の正負で判断する。

$$\begin{cases} d(-e) = d(-e)^p + d(-e)^e & \text{if } d(-e)^p > 0 \\ d(-e) = d(-e)^e & \text{if } d(-e)^p \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

2.2 サクシオン履歴・間隙比の影響を考慮した水分特性曲線モデル概要

水分特性曲線は吸水過程と排水過程では異なる経路を辿ってヒステリシス曲線を描くため、あるサクシオンに対して飽和度が一義的に定まらない。ただし、サクシオン履歴の影響を受けた土の水分保持特性(s, S_r)は、その乾湿両極を表現する主排水曲線と主吸水曲線(図-5)で囲まれた領域内を移動するので、吸水・排水の履歴(ヒステリシス特性)を反映する状態変数として、図-5に示す水分履歴パラメータ I_w を定義できる。

$$I_w = \frac{S_r - S_{rw}}{S_{rd} - S_{rw}} \quad (12)$$

ここに、 S_r は現在の飽和度、 S_{rb} , S_{rw} は現在のサクシオン下での主排水曲線($f_d=0$)および主吸水曲線($f_w=0$)上の飽和度であり、次式から得られる。提案手法は用いるベースとなる水分特性曲線モデルを問わないが、ここではとりあえず、van Genuchten¹²⁾のモデルを採用する。

$$\begin{aligned} f_d(S_r, s) &= S_{\min} + (S_{\max} - S_{\min}) \left\{ 1 + (\alpha s)^n \right\}^{-m} - S_r \\ &= F_d(s) - S_r = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} f_w(S_r, s) &= S_{\min} + (S_{\max} - S_{\min}) \left\{ 1 + (\beta s)^n \right\}^{-m} - S_r \\ &= F_w(s) - S_r = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

ここに、 S_{\max} および S_{\min} はそれぞれ最大・最小(残留)飽和度を表す。また、 n, m は主曲線の形状を決めるパラメータであり、 α, β は排水・吸水時の主曲線の違いを表すパラメータである。この I_w を用いて任意条件下にある水分保持特性(図-5)は、次式の関数で統一的に表すことができる。

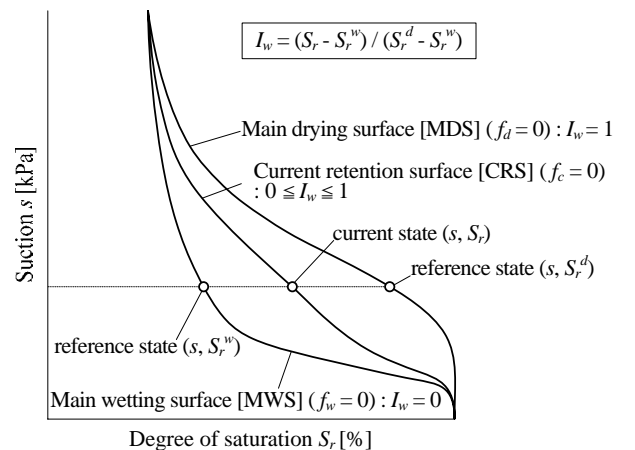


図-5 吸水・排水の履歴を反映する水分履歴パラメータ I_w と現在の水分特性を通る水分特性曲面 $f_c=0$

$$f_c(S_r, s, I_w) = I_w f_d(S_r, s) + (1 - I_w) f_w(S_r, s) \quad (15)$$

$$= I_w F_d(s) + (1 - I_w) F_w(s) - S_r = 0$$

上式の関数が与える状態面を **Current retention surface**[CRS]として定義する。図-5に示すように、任意の水分特性(s, S_r)は、常に CRS 上に位置する。式(15)は $I_w = 1$ のとき式(13)で表される主排水曲線に一致し、また $I_w = 0$ のときは式(14)の主吸水曲線と一致することが分かる。さらに $0 < I_w < 1$ のときは、保持特性は走査曲線上に位置することを表しており、排水および吸水時において I_w の値を 0 から 1 の間を滑らかに変化させることで、同モデルはヒステリシス(走査曲線)を記述する。

水分履歴パラメータ I_w の値は、排水過程 ($dS_r < 0$) では走査曲線に沿って主排水曲線に移動するため、単調増加して 1 に収束する。一方で、吸水過程 ($dS_r > 0$) では、主吸水曲線に移動するため、 I_w の値は単調減少して 0 に収束する。以上から、水分履歴パラメータ I_w の発展則の一つとして、式(15)に示す関係を用いる。

$$dI_w = h(I_w) dS_r = \begin{cases} -\xi(1-I_w)^3 dS_r, & \text{if } dS_r < 0 \\ -\xi I_w^3 dS_r, & \text{if } dS_r > 0 \end{cases} \quad (16)$$

$\xi (> 0)$ はヒステリシス特性を考慮するために唯一追加する材料パラメータであり、走査曲線の形状を決定する。地盤材料の水分保持特性 (s, S_r) は常に CRS 上に存在するため、適応条件として次式が求まる。

$$df_c = \frac{\partial f_c}{\partial S_r} dS_r + \frac{\partial f_c}{\partial s} ds + \frac{\partial f_c}{\partial I_w} dI_w = 0 \quad (17)$$

上式に式(16)を代入して、飽和度変化は以下で得られる。

$$dS_r = \frac{\frac{\partial f_c}{\partial s} ds}{1 + \frac{\partial f_c}{\partial I_w} h(I_w)} \quad (18)$$

式(18)により、如何なる条件下でも排水 / 吸水過程での I_w の発展則を規定すれば、飽和度の変化を算出できる。

次に、水分保持特性における間隙の影響について考える。過去の実験より、たとえサクシオンが一定でも土が圧縮して間隙比が減少するほど飽和度 S_r が増加すること(図-2)や、間隙比が小さくなるほど空気侵入値(飽和土に空気が入り始めるサクシオンの最小値)および水侵入値(乾燥土に水が入り始めるサクシオンの最大値)が増加すること¹³⁾が示されている。つまり、同じ土でも密であるほど同一サクシオン下でも飽和度が高く、同一飽和度に対してはサクシオンが大きくなる。このような実験事実より、次式で表される修正サクシオン s^* を定義する。

$$s^* = s \left(\frac{e}{e_{NC}} \right)^{\xi_e} \quad (19)$$

ξ_e は間隙比の影響を表すパラメータである。 e_{NC} は基準状態の間隙比を示す定数であり、基準状態($e = e_{NC}$)では、(19)

式の修正サクシオン s^* は通常のサクシオン s に一致する。

次に修正サクシオン s^* を前述のサクシオン履歴を考慮した水分特性曲線モデルに導入する。その際、式(15)のサクシオン s を修正サクシオン s^* に置き換え、

$$f_c(S_r, s^*, I_w) = I_w f_d(S_r, s^*) + (1 - I_w) f_w(S_r, s^*) \quad (20)$$

$$= I_w F_d(s^*) + (1 - I_w) F_w(s^*) - S_r = 0$$

式(17)と同様に適応条件から次式が求まる。

$$df_c = \frac{\partial f_c}{\partial S_r} dS_r + \frac{\partial f_c}{\partial s^*} ds^* + \frac{\partial f_c}{\partial I_w} dI_w = 0 \quad (21)$$

またこのとき、修正サクシオンはサクシオンと間隙比の関数であることから、その増分は次式により算出する。

$$ds^* = \frac{\partial s^*}{\partial s} ds + \frac{\partial s^*}{\partial e} de \quad (22)$$

式(21)に式(16)、(22)を代入し、サクシオン履歴および間隙比の影響を考慮した飽和度変化が求まる。

$$dS_r = \frac{\frac{\partial f_c}{\partial s^*} ds^*}{1 + \frac{\partial f_c}{\partial I_w} h(I_w)} = \frac{\frac{\partial f_c}{\partial s^*} \left(\frac{\partial s^*}{\partial s} ds + \frac{\partial s^*}{\partial e} de \right)}{1 + \frac{\partial f_c}{\partial I_w} h(I_w)} \quad (23)$$

上式で与えられる飽和度の変化 dS_r を式(10)に代入することで、サクシオン-飽和度-密度の影響を統一的に考慮する弾塑性 1 次元モデルの応力-間隙比(ひずみ)関係が求まる。

2.3 提案モデルの特徴と妥当性

提案モデルでは、不飽和化に伴う正規状態の変化を飽和度の関数 $\psi(S_r)$ を用いて“嵩張り”として表現した。一方でこのような不飽和化に伴う状態変化を、Kohgo²⁾は“等価間隙圧による降伏応力の変化”，Tamagnini³⁾は“飽和度に依存する降伏応力の変化”，Karube⁴⁾らは“サクシオンと含水状態の関数である C_m を用いた土の剛性変化”，Gallipoli ら⁵⁾は“サクシオンと飽和度の関数である capillary bonding によって規定される不飽和土の正規状態”として表現するが、どの手法も提案手法と同様に正規状態をシフトさせることと本質的に同じであり、特に Tamagnini, Karube, Gallipoli の手法は提案手法と同様に飽和度を状態パラメータに用いている。しかしながら、図-2に示したような圧密に伴う飽和土の増加を表現するためには、提案手法と同様に水分特性曲線において間隙の影響を適切に評価する必要がある。

また、図-6は Sivakumar の実験¹⁴⁾で示された限界状態線を同一サクシオンで整理し、各点での飽和度を記載したものである。実測値は、同一サクシオンでの限界状態線に必ずしも平行な関係はなく、サクシオンが大きいほどより緩い状態で限界状態を迎えることがわかる。またこのような結果は Cui ら¹⁵⁾の実験からも示されている。そして、各点での飽和度に着目すると、飽和度によって限界状態線が上方にシフトしている様子が確認でき、不飽和化に伴う“嵩張り”を飽

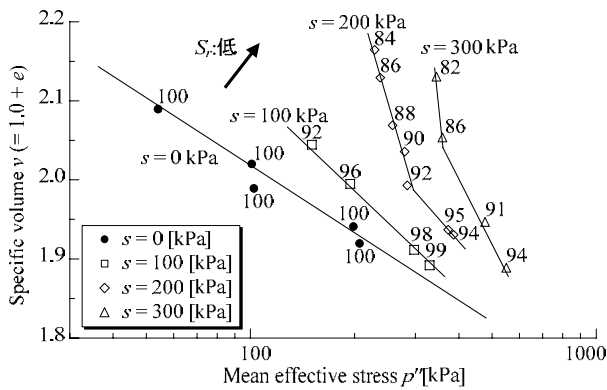


図-6 サクシオン一定三軸せん断試験での
限界状態線(CSL)¹²⁾

和度によって規定する提案手法は、正規状態ならびに限界状態に関して適当であるといえる。せん断挙動および限界状態を考慮した3次元モデルへの拡張は別報¹⁶⁾で報告するが、ここで説明する手法は、せん断強度増加、ダイレイタンス挙動の変化ならびに限界状態線のシフトも含めた不飽和土の応答特性を適切に表現することができる。

3. 提案モデルの検証 —パラメトリックスタディ—

提案モデルのパフォーマンスの検証のため、典型的な不飽和土の要素試験を対象としてパラメトリックスタディを行う。なお、以下の1次元解析は、全て一般応力下の等方応力状態の解析に対応する。解析に用いる構成パラメータは藤の森粘土を基本として設定し、表-1に構成モデルならびに水分特性曲線モデルのパラメータをまとめる。

図-7に水分特性曲線の実測値¹⁷⁾(○プロット)と解析値(実線)を示す。構成パラメータは実測値へのフィッティングにより設定した。また、解析値は繰返しサクシオン載荷過程に見られるヒステリシス挙動を適切に表現できることがわかる。

次に、所定のサクシオン($s = 49, 98, 196, 294$ kPa)載荷後、サクシオン一定に保ちながら基底応力を載荷する圧密試験の解析を行った。図-8に各応力経路を示す。また密度による挙動の差異を検討するため、解析では飽和正規圧密土($e_0 = 0.9, \sigma^{net} = 49$ kPa, $s = 0$ kPa)と飽和過圧密土($e_0 = 0.8, \sigma^{net} = 49$ kPa, $s = 0$ kPa)を想定した解析を行い、結果をそれぞれ図-9, 10に示す。図中の(a)は有効応力 $\sigma' (= \sigma^{net} + S_r s)$ —間隙比 e 関係、(b)は基底応力 $\sigma^{net} (= \sigma - u_a)$ —間隙比 e 関係、(c)は基底応力 σ^{net} —飽和度 S_r 関係である。図より、正規圧密土・過圧密土ともに初期サクシオンが大きいほど圧密初期において、剛性が高く土はより緩い間隙状態に至っていることが分かる。これは、サクシオンが大きいほど飽和度が低下し、式(5)に従い“嵩張り”が発達するからである。また過圧密土の方が正規圧密土に比べて同じサクシオンが作用しても間隙比の違いから飽和土の低下が小さい。そのため、その後の圧密挙動において“嵩張り”の影響が小さくなっている。さらに図-2で示した実測

表-1 1次元提案モデル構成パラメータ
水分特性曲線パラメータ

| Parameter of constitutive model (1D) | | |
|---|-------|--------------------------------------|
| λ | 0.104 | Compression Index |
| κ | 0.01 | Swelling Index |
| N | 0.83 | Void ratio under 98kPa |
| α | 100 | Effect of over consolidated |
| l | 5.0 | Effect of unsaturated |
| Parameter of Water retention curve based on van-Genuchten model | | |
| S_{min} | 10.0 | Minimum S_r |
| S_{max} | 100.0 | Maximum S_r |
| α | 0.03 | Position of main drying curve |
| β | 0.10 | Position of main wetting curve |
| m | 0.1 | Shape of main drying / wetting curve |
| n | 2.0 | Shape of main drying / wetting curve |
| ξ | 100 | Influence of suction histories |
| ξ_c | 5.0 | Influence of void ratio |

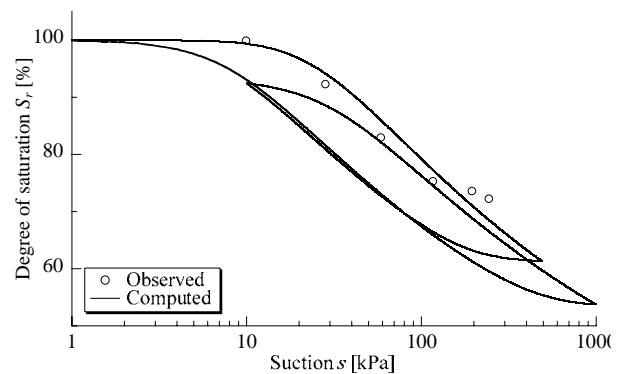


図-7 水分特性曲線(実測値・解析値)

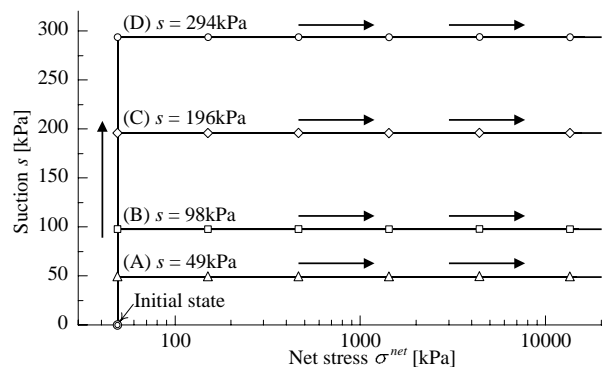


図-8 サクシオン一定圧密試験：応力経路

値と同様に、解析値は圧密応力の増加とともに間隙が密になり、その圧密挙動は正規圧密線に漸近している。これは正規・過圧密の両結果において(a), (b)図の間隙比の減少とともに、(c)図の飽和度が増加し、式(5)に従ってNCLが下方方向にシフトし、やがて飽和土のNCLに一致するためである。このように提案モデルは、実測値と同様のメカニズムで不飽和状態から飽和状態へと土が変化する様子を適切に表現できている。

次にサクシオン一定で圧密後のサクシオン除荷試験の解析結果を示す。解析では初期サクシオン 294 kPa 載荷後、サクシオン一定下で圧密し、その後各応力点($\sigma^{net} = 49, 294, 294, 588, 1017, 1960, 2940, 9800$ kPa)においてサクシオンを 0 kPa

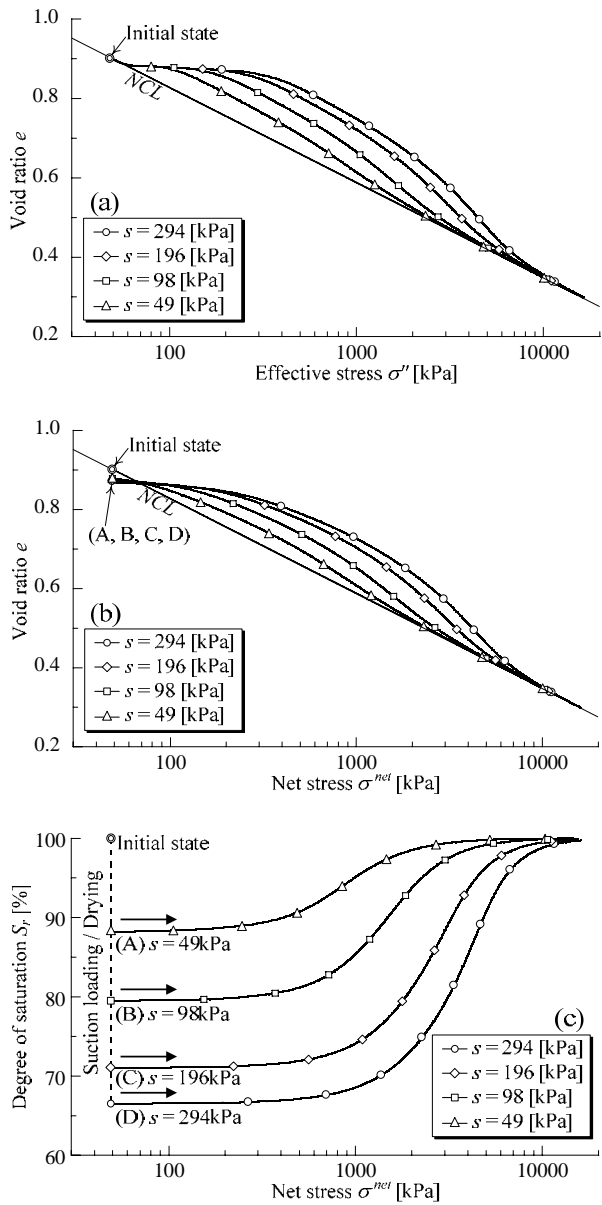


図-9 サクシオン一定圧密試験-解析値(初期正規圧密土)

まで除荷することで水浸(飽和度を上昇)させた。図-11 に応力経路を示す。解析は、さきほどと同条件の正規圧密土と過圧密土で行い、それぞれの結果を図-12, 13 にまとめる。また、それぞれの図の(a)は有効応力 σ'' -間隙比 e 関係、(b)は基底応力 σ^{net} -間隙比 e 関係、(c)にはサクシオン s -飽和度 S_r 関係($s = 294 \rightarrow 0$ kPa)を示す。(a), (b)図中の各プロットには、浸水前の飽和度を記載している。両結果の(b)図から提案モデルは、図-1 で示した実測値に見られるような水浸に伴う圧縮挙動(水浸コラプス)、最終的には飽和土のNCLに近づく様子を適切に表現できている。また前述した圧密試験の結果と同様に、圧密過程において飽和度が変化し、水浸(サクシオン減少)前の各点において飽和度ならびに“嵩張り”が異なるため、その後のコラプス量に差が生じていることがわかる。また(a)図から、提案モデルにおいて水浸コラプス挙動は、有効応力の減少にも関わらず、塑性体積圧縮が起こる軟化挙動として表現される。図-14 に正規圧密土・過圧密土での各点におけるサクシオン除荷時に生じた間隙変化量をプロット

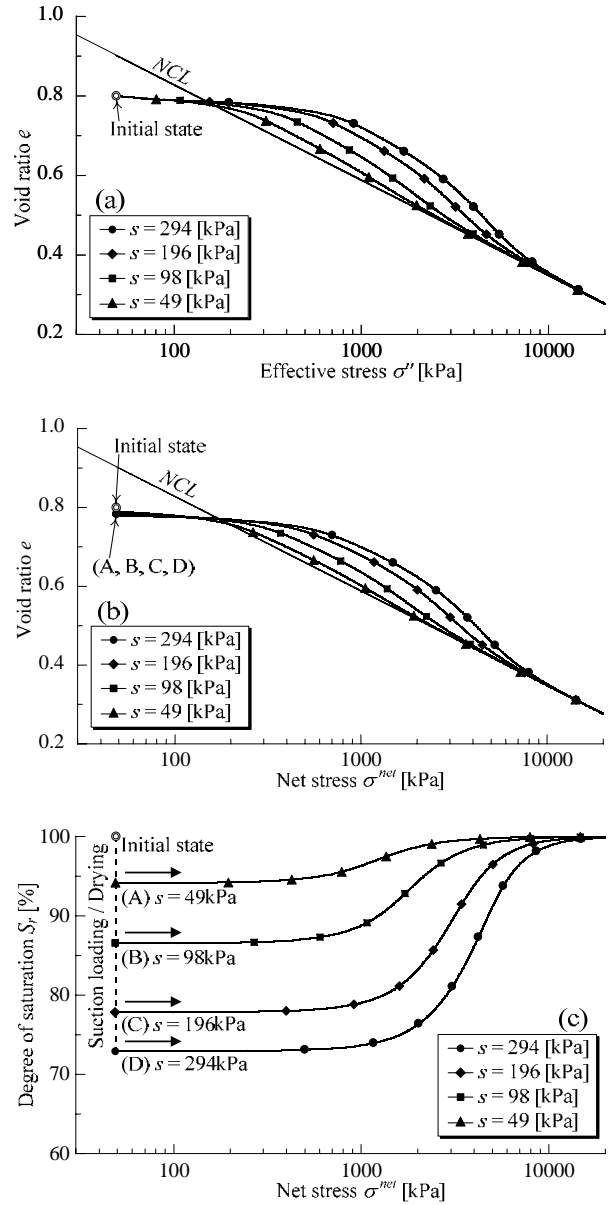


図-10 サクシオン一定圧密試験-解析値(初期過圧密圧密土)

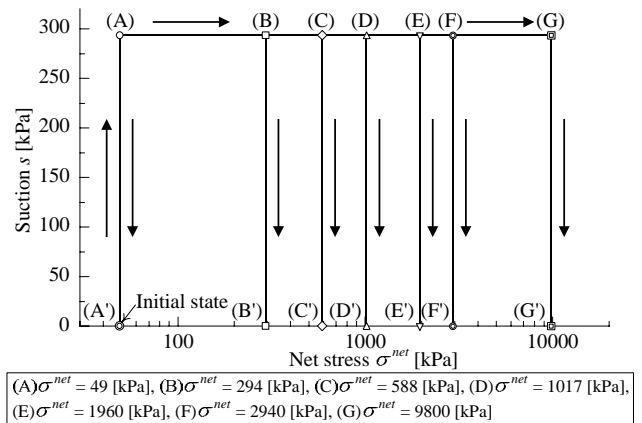


図-11 サクシオン除荷試験：応力経路

した。図から、初期間隙比の大きな正規圧密土は各応力点において、過圧密土よりも“嵩張り”が大きく、より緩い間隙状態を保持する。そのため、その後のコラプス時において、土はより大きく圧縮していることがわかる。加えて、過圧密領域(●プロット)では、コラプスは生じず膨張挙動を示して

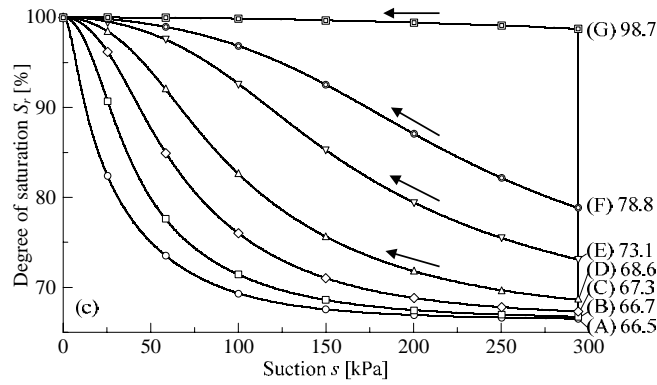
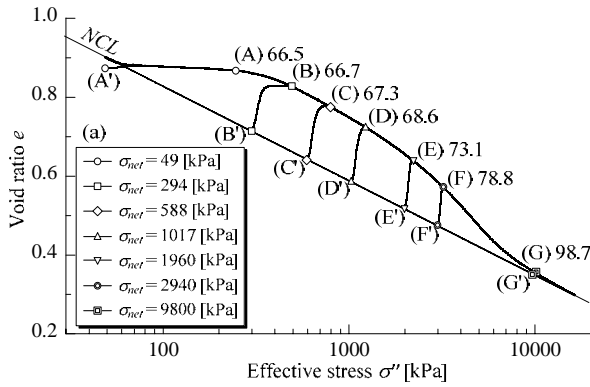
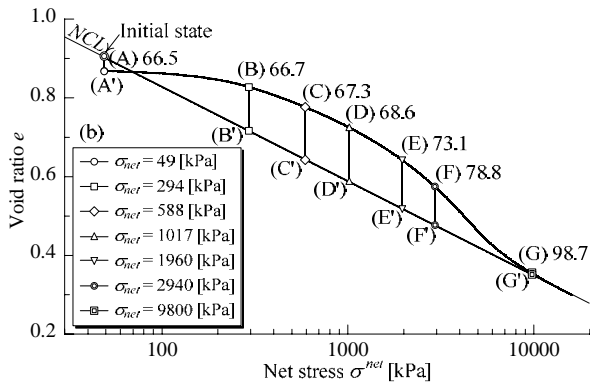


図-12 サクション除荷試験-解析値(初期正規圧密土)

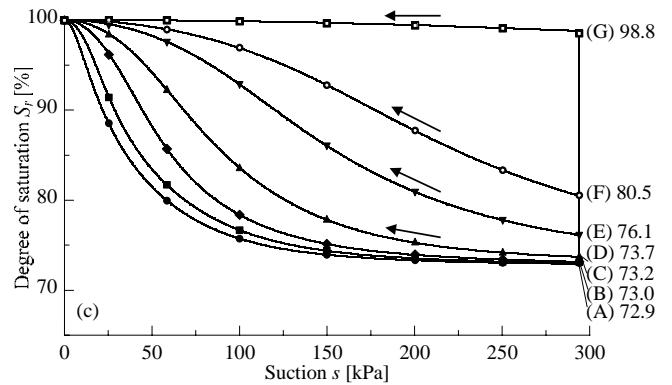
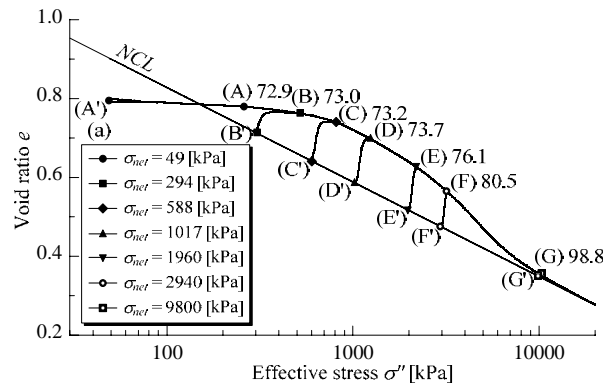
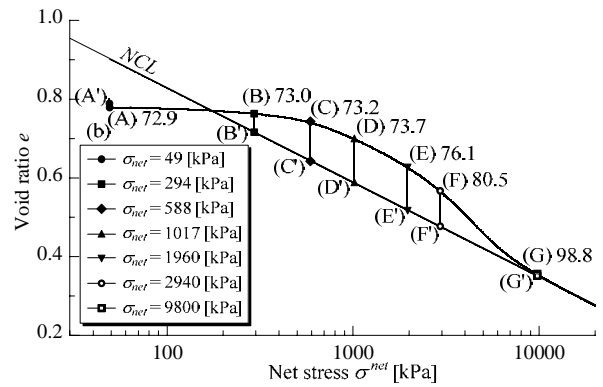


図-13 サクション除荷試験-解析値(初期過圧密圧密土)

いる。このような拘束圧および間隙比の違いによる水浸コラプス挙動の差異は、De'an Sun らが示す実験結果¹⁸⁾に見られる傾向であり、提案モデルをこれらの挙動を初期密度ならびに飽和化に伴う“嵩張り”の減少によって適切に表現する。

これまでに多くの不飽和土構成モデルでは、実験事実をそのままに不飽和土の正規圧密線(NCL)の傾き λ および切片 N をサクシオン等の大きさによって変化させてきた。図-15に既往の構成モデルで与えられる不飽和土の正規圧密線をまとめる。たとえば Alonso ら¹⁹⁾、Kohgo ら²¹⁾は、不飽和土の圧縮特性をサクシオンに依存させ $\lambda(s) < \lambda$ (saturated), NCLの切片を $N(s)$ とした(a)。また一方で、Wheeler and Sivakumar²⁰⁾や、Russel and Khalil²¹⁾は圧縮特性を $\lambda(s) > \lambda$ (saturated) とした(b)。さらに、Josa ら²²⁾は水浸コラプス時に生じる体積変化量の差異に着目し、降伏応力の変化より飽和土のNCLに対して上に凸になるような不飽和土NCLを与えた(c)。このようにそれぞれが異なる正規圧密線を規定しており、モデル化においてもその統一性が課題となる。しかしながら、提

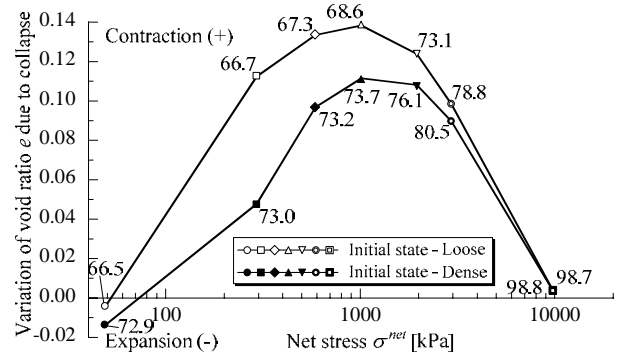


図-14 水浸時体積変化量

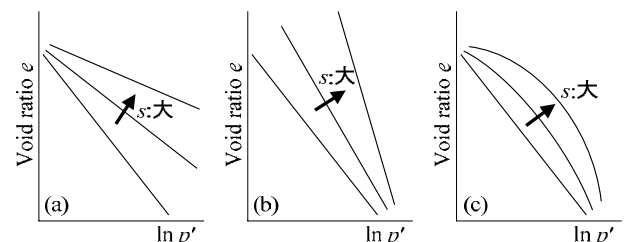


図-15 既存構成モデルの不飽和正規圧密線

案モデルでは飽和度変化に伴う“嵩張り”発達 / 消散によって、実測値と同様のメカニズムで正規状態の刻々の変化を規定しており、実験結果を統一的に説明する。

4. おわりに

不飽和化に伴った土の剛性増加や、圧密時における緩い間隙の保持、水浸による大圧縮挙動などは、粒子間に作用する表面張力の影響が起因すると考えられる。本稿では不飽和土の複雑な応力-ひずみ特性を、土の間隙構造の変化である“嵩張り”の発達 / 消散によるものとしてとらえた。モデル化に際し、このような構造変化を陽に定義するのではなく、中井らが提案する簡単な1次元モデルに倣い、土が参照する正規状態の変化 $\psi(S_s)$ を導入することで、これらの影響をシンプルに表現した。また飽和度 S_s は菊本らが提案する水分特性曲線モデルにより算出することで、間隙変化の影響を適切に考慮した。これは、圧密やせん断時における刻々の“嵩張り”の変化を記述するうえで必須である。

提案モデルの検証では、サクシオン一定圧密試験、サクシオン除荷試験の典型的な要素試験を対象としてパラメトリックスタディを行った。標準圧密試験の結果から、提案モデルが示す圧密挙動は飽和度増加に伴う“嵩張り”の刻々の消散により、実測値に見られる剛性変化を忠実に再現した。またサクシオン除荷試験でも、実測値と同様に水浸コラプス挙動における密度、拘束圧の影響を適切に評価するなど、種々の不飽和土の力学応答のメカニズムを統一的に説明した。

参考文献

- 1) J.E.B. Jennings and J.B. Burland: Limitations to the use of effective stresses in partly saturated soils, *International Journal of Geotechnique*, 12(2), pp.125-144, 1962.
- 2) Kohgo, Y., Nakano, M., and Miyazaki, T.: THEORETICAL ASPECTS OF CONSTITUTIVE MODELING FOR UNSATURATED SOILS, *Soils and Foundations*, 33(4), pp.49-63, 1993.
- 3) Tamagnini, R.: An extended cam-clay model for unsaturated soils with hydraulic hysteresis, *International Journal of Geotechnique*, 54(3), pp.223-228, 2004.
- 4) Karube, D., Kato, S., Honda, M. and Kawai, K.: A constitutive model for unsaturated soils, *Geotechnical and Geological Engineering*, 19(3), pp.211-241, 2001.
- 5) Gallipoli D., Gens A., Sharma R. and Vaunat J.: An elasto-plastic model for unsaturated soil incorporating the effects of suction and degree of saturation on mechanical behavior, *International Journal of Geotechnique*, 53(1), pp.41-54, 2003.
- 6) 本天道織: 不飽和地盤における力学挙動の予測手法に関する研究, 博士論文, 神戸大学, 2000.
- 7) Bishop AW., *Tecnisk Ukeblad*, 39, pp.859-863, 1959
- 8) 中井照夫, Hossain Md. Shahin, 菊本統, 京川裕之, 張鋒: 地盤材料の諸特性の簡単且つ統一的なモデリング — 密度, ボンディング, 時間効果特性を例として —, *応用力学論文集 vol.12*, 2009.
- 9) Mathieu Nuth and Lyesse Laloui: Effective stress concept in unsaturated soils: Clarification and validation of a unified framework, *International Journal for Numerical and Analytical Method in Geomechanics*, 32, pp.771-801, 2008.
- 10) 軽部大蔵, 加藤正司, 浜田耕一, 本天道織: 不飽和土の間隙水の状態と土塊の力学的挙動の関係について, *土木学会論文集 No.535/III-34*, pp.83-92, 1996.
- 11) 菊本統, 京川裕之, 中井照夫: サクシオン履歴・間隙比・温度を考慮した水分特性曲線モデル, *応用力学論文集 vol.12*, 2009.
- 12) Van Genuchten, M.T.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, 44, pp.892-898, 1980.
- 13) 河井克之, 軽部大造, 芦田渉, 嘉渡善雄: 間隙比の影響を考慮した水分特性曲線モデル, *土木学会論文集 No.666/III-53*, pp.291-302, 2000.
- 14) Sivakumar, V. : A critical state frame work for unsaturated soil, *Ph.D thesis*, University of Sheffield, 1993.
- 15) Y. J. Cui and P. Delage: Yielding and plastic behavior of an unsaturated compacted silt, *International Journal of Geotechnique*, 46(2), pp.291-311, 1996.
- 16) 京川裕之, 菊本統, 中井照夫: サクシオン・飽和度・密度を統一的に考慮できる不飽和土の弾塑性モデル, *応用力学論文集 vol.12*, 2009.
- 17) 清水正喜, 福田尚弘, 南部啓太: 定体積・排気・非排水条件における不飽和土の挙動, *鳥取大学工学部研究報告第34号*, pp.49-54, 2003.
- 18) De'an Sun, Daichao Sheng and Yongfu Xu: Collapse behaviour of unsaturated compacted soil with different initial densities, *Canadian Geotechnical Journal*, 44, pp.673-686, 2007.
- 19) Alonso EE., Gens A. and Josa A.: A constitutive model for partially saturated soils, *International Journal of Geotechnique*, 40(3), pp.405-430, 1990.
- 20) Wheeler, S.J. and Sivakumar, V.: An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil, *International Journal of Geotechnique*, 45(1), pp.35-53, 1995.
- 21) Khalili, N., Geiser F. and Blight GE.: Effective stress in usaturated soils: review with new evidence, *International Journal of Geomechanics*, 4(2), pp.115-126, 2004
- 22) Josa, A., Balmaceda, A., Gens A. and Alonso, E.E.: An elasto-plastic model for partially saturated soils exhibiting a maximum of collapse. *Proceeding of 3rd International Conference Computational*.