

既存の不飽和土構成モデルの解釈および 水分特性曲線ヒステリシスを考慮したモデルの一般的な表現方法

Interpretation of existing constitutive models for unsaturated soil
and the general expression of the constitutive model considering hysteresis of the water retention characteristic curve

河井克之¹, 汪偉川², 飯塚敦³

Katsuyuki KAWAI, Weichuan WANG, Atsushi IIZUKA

¹ 工博, 神戸大学助手, 工学部建設学科 (〒657-8001 神戸市灘区六甲台町 1-1)

² 工修, 神戸大学大学院自然科学研究科 (〒657-8001 神戸市灘区六甲台町 1-1)

³ 工博, 神戸大学助教授, 工学部建設学科 (〒657-8001 神戸市灘区六甲台町 1-1)

There are some constitutive models for unsaturated soil. However, their mathematical structures, particularly for expression of collapse phenomenon, are essentially the same. Therefore, it is possible to unify the constitutive models which were proposed in the past. In this paper, a generalized constitutive model for unsaturated soils is presented. First, we outline existing constitutive models for unsaturated soil and, next, we propose a comprehensive constitutive model for unsaturated soils in terms of the effective stress for unsaturated soils. To this new elasto-plastic model, it is easier to introduce sophisticated methods such as a rotational hardening, a subloading surface and so forth. This model is formulated in the form of incremental general stress and strain relationship and is incorporated into a finite element code, DACSAR-U, for unsaturated soils. The performance of the new constitutive model is demonstrated by comparing with the models proposed by Karube et al. and by Honda et al.

Key Words: *Unsaturated Soil, Constitutive model, Suction stress*

キーワード: 不飽和土, 構成モデル, サクション応力

1. はじめに

締固め土構造物や自然斜面は、地盤内間隙に空気相を含んだ不飽和状態にあることが一般的であり、従来はこのような不飽和地盤であっても、挙動予測の際には、簡易のため近似的に飽和土の力学が用いられてきた。しかしながら、近年、不飽和土の力学体系が整理され、いくつかの構成モデルが提案され、初期値境界値問題へと組み込まれるようになり、不飽和地盤の挙動予測が可能な段階まで来ている。

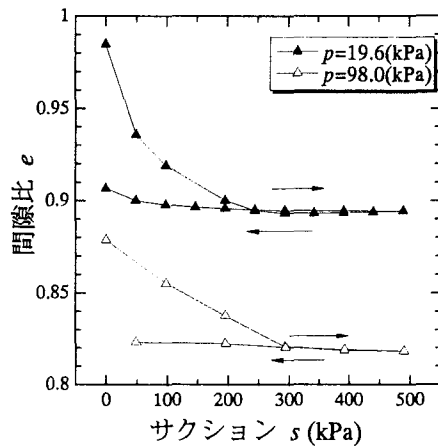
これまで、数値計算が可能な段階にまで発展された構成モデルは、Alonso ら¹⁾²⁾, Kohgo ら³⁾⁴⁾, 軽部ら⁵⁾⁶⁾⁷⁾があり、それぞれ Alonso ら⁸⁾, Kohgo⁹⁾, 飯塚ら¹⁰⁾によって初期値境界値問題として定式化されている。しかし、これらの構成モデルは用いている応力成分等は異なるものの、その構成は本質的に同一であり、それぞれの予測能力に関して、実験結果との整合性を論じるまでには至っていない。本研究では、これらの構成モデルを一般的な形として表現し、今後実験結果と整合性を見極めながら、新たな

構成モデルを組み立てる手法を提案する。また、それを用いて組み立てられたモデルにおいて、軽部らの手法に従って応力成分を設定したときのパフォーマンスを、従来モデルと比較を通して検討する。

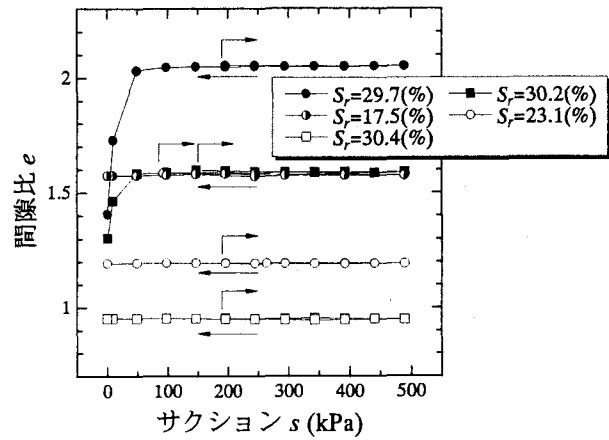
2. 既存の構成モデル

不飽和土の構成モデルに関する研究は、Bishop¹¹⁾による不飽和土の有効応力原理を Jennings and Burland¹²⁾が否定することから始まったと言える。彼らの指摘は、サクションを有効応力の一部とすることは、不飽和土水浸の際の圧縮変形(コラプス)の表現において矛盾を生じるというものである。以来、このコラプスを如何に表現するかが不飽和土構成モデル構築の焦点となった。

図-1 は、不飽和土にサクションが作用したときの間隙比変化を表している。図-1 (a), (b) は、それぞれ、初期に飽和状態にある供試体にサクションを作用させた場合、初期に種々の含水状態間隙比状態に締め固められた不飽和供試体にサクションを作用させた



(a) 飽和供試体



(b) 不飽和供試体

図-1 サクション作用による供試体の間隙比変化¹³⁾

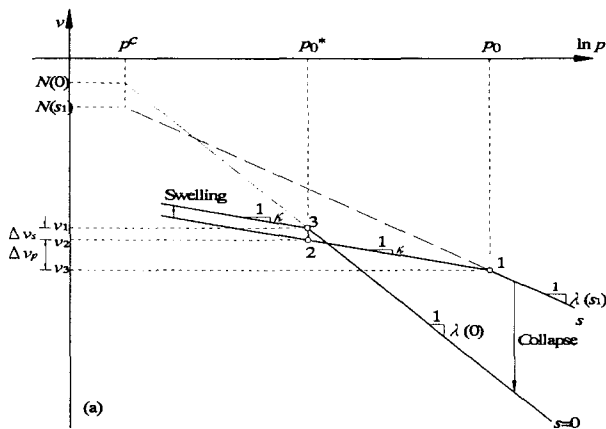


図-2 Alonso らの等方応力面上での降伏面と体積変化

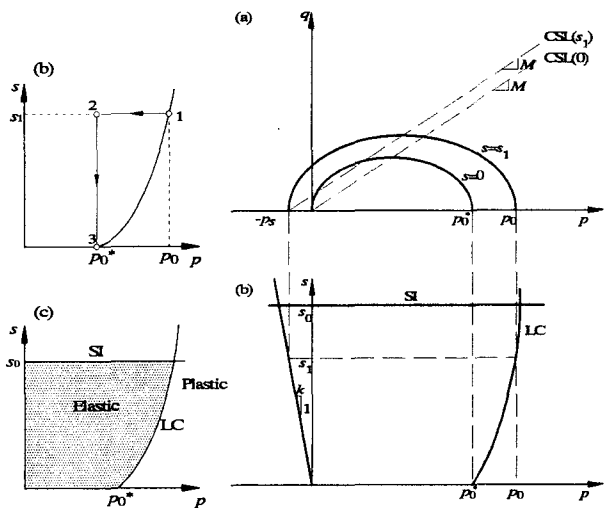


図-3 Alonso らの降伏面

場合である。飽和供試体の場合は、サクション増加に伴って圧縮が生じており、乾燥収縮と呼ばれる変化を表している。一方、不飽和供試体では、初期状態によって異なるが、サクション減少時にコラプス性の圧縮変形を生じる場合があることが分かる。つまり、サクションは供試体の状態によって作用が異なるため、この乾燥収縮およびコラプスを同時に表現し得ることが、不飽和土構成モデルとして具備すべき条件として挙げられる。

(1) Alonso らの構成モデル

Alonso らは、不飽和土の挙動に影響を及ぼす応力成分として次式で表される基底応力とサクションを選択した。

$$\sigma = \sigma^T - u_a \quad (1)$$

$$s = u_a - u_w \quad (2)$$

ここで、 σ^T 、 u_a 、 u_w はそれぞれ、全応力、間隙空気圧、間隙水圧である。この応力成分は Bishop の与え

た有効応力原理に従うものである。彼らは、図-2(a)(b)に示す方法で不飽和土の体積変化挙動と表現し、図-2(c)の LC(Loading-Collapse)降伏面を次式で与えた。

$$\left(\frac{p_0}{p^c} \right) = \left(\frac{p_0^*}{p^c} \right)^{\frac{\lambda(0) - \kappa}{\lambda(s) - \kappa}} \quad (3)$$

ここで、 p_0 は等方応力面上での平均基底主応力であることを示し、 p_0^c は参照基底主応力である。 λ 、 κ はそれぞれ圧縮、膨潤指数であり、 λ に関してはサクションの関数として表せるとした。図中 v は比体積で $v = (1 + e)$ で表される。 e は間隙比。さらに、乾燥収縮を表現するために

$$s = s_0 \quad (4)$$

で表される SI(Suction-Increase)降伏線を定義した(図-2(c))。 s_0 は過去に受けた最大のサクション値を表す。Alonso らは、これらの2つの降伏線が互いに独立したものではなく、 p_0^* と s_0 が関連し合っているというカップリング効果に

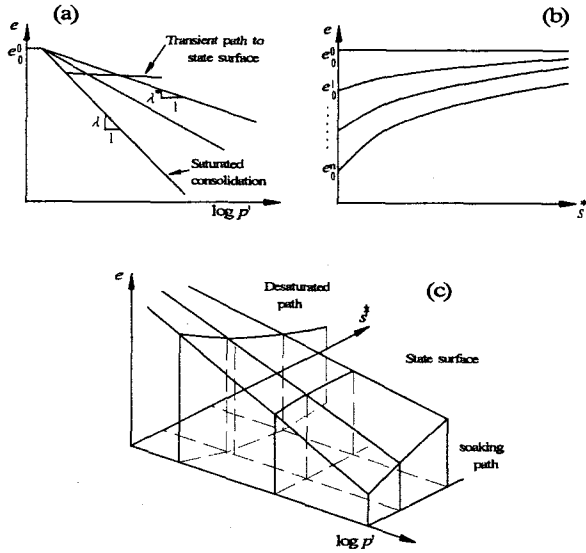


図-4 Kohgo らの等方応力状態における状態面

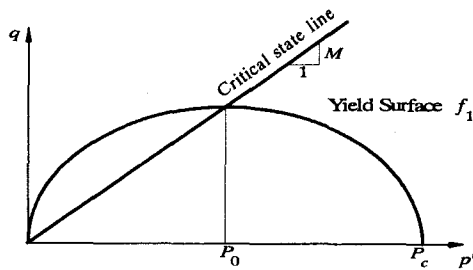


図-5 Kohgo らの降伏面

ついて述べているが具体的な予測手法については触れていない。同時に等方応力-せん断応力空間での降伏面と限界状態線を次式で与えた(図-3)。

降伏面

$$q^2 = M^2 (p + p_s)(p_0 - p) \quad (5)$$

限界状態線

$$q = M(p + p_s) \quad (6)$$

ここで、 q は主応力差、 M は限界状態線の傾き、 p_s はせん断試験によるサクシオン応力で、具体的に次式で与えている。

$$p_s = ks \quad (7)$$

ここで、 k は定数。 p_0 と p_0^* の関係が式(3)で与えられているので、ある弾塑性状態で応力が (p, q, s) にあるとき、式(5)より p_0 を求め、そのときの p_0^* を飽和状態の正規圧密線上に換算すると体積比 v が求められる。

(2) Kohgo らの構成モデル

Kohgo らは、せん断試験から得られるサクシオンのせん断強度への寄与分より有効応力を次式で与えた。

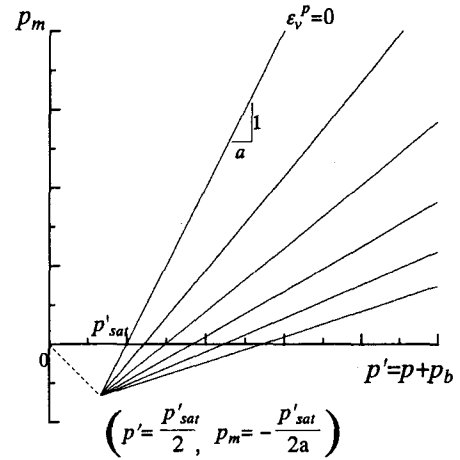


図-6 軽部らの等塑性体積ひずみ線群

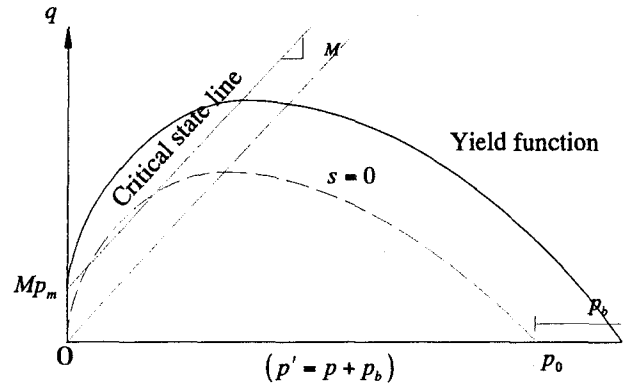


図-7 軽部らの降伏面

$$\sigma' = \sigma - u_{eq} \quad (8)$$

$$u_{eq} = u_a - s \quad (s \leq s_e) \quad (9)$$

$$u_{eq} = u_a - \left(s_e - \frac{s_c - s_e}{s^* + a_e} s^* \right) \quad (s \geq s_e) \quad (10)$$

$$s^* = 0 \quad (s \leq s_e) \quad (11)$$

$$s^* = s - s_e \quad (s \geq s_e) \quad (12)$$

ここで、 u_{eq} は等価間隙圧、 a_e は材料パラメーター、 s_c は限界サクシオン、 s_e は空気侵入値、 s^* はサクシオンの空気侵入値に対する超過分であり有効サクシオンと呼ぶ。また、Matyas and Radhakrishna¹⁴⁾ が実験によって求めた状態面に基づいて、式(8)で表される有効応力の平均主応力 p' と有効サクシオン s^* に対する間隙比 e の状態面を図-4(c)で表した。図-4(a)(b)は、それぞれ図-4(c)を s^* 一定面、 p' 一定面に投影したものである。Kohgo らは、 $e \sim \log p'$ 関係を線形関数として式(13)、 $s^* \sim e$ 曲線を双曲線関数として式(16)を定義している。

$$e = -\lambda^* \log p' + \Gamma^* \quad (13)$$

飽和状態で $\lambda^* = \lambda$, $\Gamma^* = \Gamma$

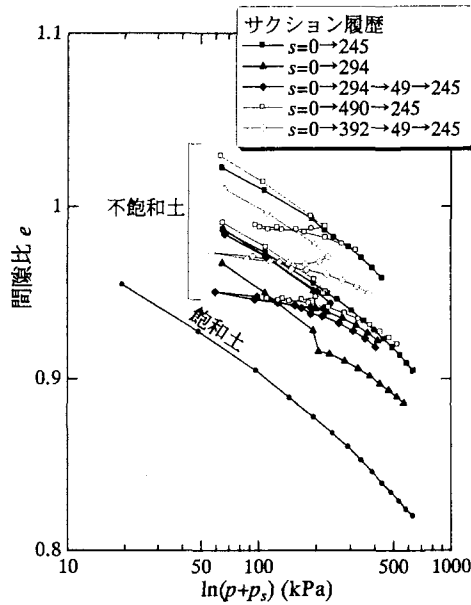


図-8 サクション載荷-等方圧密試験時の間隙比変化

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{1+y} \quad (14)$$

$$\Gamma^* = \frac{\Gamma + e_0^0 y}{1+y} \quad (15)$$

$$y = \frac{e^n - e_0^n}{e_0^0 - e^n} = \left(\frac{s^*}{a_s} \right)^{n_s} \quad (16)$$

ここで、 $e_0^0, \dots, e_0^n$ は飽和時の間隙比、 a_s, n_s は材料パラメータ。Kohgo らは、有効応力を用いることで、Alonso らのように乾燥収縮を表現するために別の降伏面を適用する必要性をなくした。また、次式で与える降伏関数を与え、図-5 に示す降伏面を表現した。

$$f_1 = M^2 (p' - P_0)^2 + q^2 - (MP_0)^2 = 0 \quad (17)$$

$$P_0 = \frac{P_c}{2} \quad (18)$$

ここで、 P_0, P_c は図-5 に定義される降伏面の大きさを表すパラメータである。式(17)は Alonso らと同じ修正 Cam-clay モデルの拡張であり、せん断強度に寄与するサクションの効果を有効応力としていることから、2つのモデルにおける降伏面は等しいこと分かる。しかし、Kohgo らのモデルでは、せん断応力軸に対して降伏面が切片を持たないため、一般の弾塑性論に用いられている回転硬化や下負荷面を適用できるという利点がある。

(3) 軽部らの構成モデル

軽部らは、サクションの効果が間隙水状態によろし、バルク水に作用するサクションの効果をバルク応力とし、不飽和土における有効応力に寄与するものとした。また、メニスカス水に作用するサク

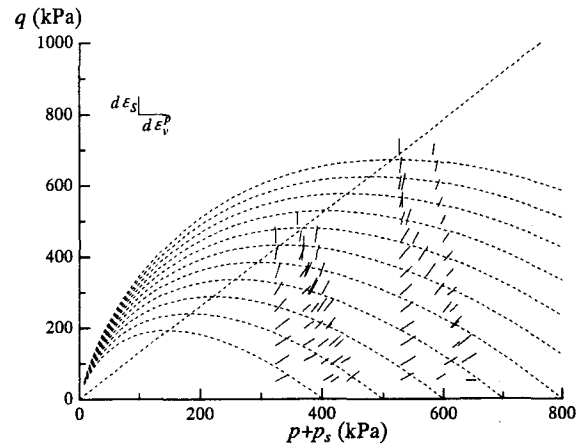


図-9 不飽和土の非排水圧縮試験試験におけるひずみ増分比¹⁶⁾

ションは剛性を高める効果があり、メニスカス応力と呼び次式で表した。

$$p_b = \frac{S_{rb}}{100 - S_{rc}} s \quad (19)$$

$$p_m = \frac{S_{rm}}{100 - S_{rc}} s \quad (20)$$

ここで、 p_b, p_m はそれぞれ、バルク応力、メニスカス応力であり、 S_{rb}, S_{rm}, S_{rc} はそれぞれ、バルク水、メニスカス水、吸着水が示す飽和度分。基底応力の平均応力 p とバルク応力の和を有効応力として $p' = p + p_b$ で表し、メニスカス応力との応力空間で塑性体積ひずみ ϵ_v^p を次式で示した。

$$\epsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \left(\frac{p'_0 + p_m}{p'_{sat} + (1 + a) p_m} \right) \quad (21)$$

ここで、 e_0 は降伏時の間隙比、 p'_{sat} は飽和土における正規圧密線上の e_0 に相当する応力。式(21)は、 $p' \sim p_m$ 面上で、図-6 のように描ける。また、Cam-clay モデルを不飽和土に拡張し、次式で表す降伏面を与えた。

$$q = -p' M \ln \frac{p'}{p'_0} + M p_m \left(1 - \frac{p'}{p'_0} \right) \quad (22)$$

図-7 は、式(22)を描いたものであるが、限界状態線は $q = M(p + p_b + p_m)$ で表されており、サクション応力 p_s で表すと、Alonso ら、Kohgo らと等しくなる。ただし、軽部らは p_s を飽和度に依存した値であると、次式で表している。

$$p_s = \frac{S_r - S_{rc}}{100 - S_{rc}} s \quad (23)$$

ここで、 s_r は飽和度。

本田ら¹⁵⁾は、軽部らのモデルにおいて式(22)が p'_0 について解くことができず、式(21)と連立させる場合に近似的な降伏関数を得なければならないことから、降伏面を次式のように修正した。

$$q = -Mp' \ln \frac{p'}{p'_0} + Mp_m \quad (24)$$

いづれにしても、せん断応力 q 軸に対して切片を持つことから、回転硬化や下負荷面の適用は容易でない。

3. 水分特性曲線ヒステリシスを考慮した一般的な構成モデルの提案

前章で述べた3つの既存の構成モデルは、用いる応力成分は異なるものの、等方応力~せん断応力空間の降伏面を、等方応力面上に示された体積変化に換算するという意味で同じ構成である。また、等方応力面では、土骨格を圧縮する応力成分と、土の剛性を増加させるパラメーターで表現されているのが分かる。Alonso らのモデルでは乾燥収縮を表現するために別に降伏面を設定しているが、実験結果が Kohgo ら、軽部らのモデルのようにサクシオンが有効応力の一部であることを示せば、より簡易なモデルを構築できる。

図-8 は、サクシオン履歴を与えた後等方圧密を行った場合の間隙比変化を、式(23)に示すサクシオン応力を用いて連続的に整理したものである。結果、サクシオン応力を用いることで平行な圧縮曲線が得られることが分かる。ここでは、間隙比の絶対量が異なるが、これがサクシオンの剛性に寄与する作用によるものとする、サクシオン応力が不飽和土における有効応力の一部であると考えることができる。

図-9 は河井ら¹⁶⁾が行った、不飽和土の排気非排水せん断試験中のひずみ増分比を応力 $(p+p_s, q)$ 空間に投影したものである。図中、破線で示したものは Cam-clay モデルが示す降伏面である。ひずみ増分ベクトルは降伏面にほぼ直交しているように見える。関連流れ則が適用可能であるとする、同様にサクシオン応力が有効応力の一部であることを示唆しているといえる。

以上のことより、サクシオンの効果は有効応力の一部としてはサクシオン応力の適用により、剛性を高める効果については少なくともサクシオンと含水状態の関数である C_m を導入することにより一般的な不飽和土構成モデルの構築を行う。ちなみに、 C_m

は、Alonso ら、Kohgo ら、軽部らのモデルで、それぞれサクシオン、有効サクシオン、メニスカス応力に相当し、コラプス圧縮現象を引き起こす主要因となる剛性の低下を C_m も減少として表しているのである。どのモデルのパラメータが妥当かは今後の検討課題である。ここで、注意すべきことは、実験データ整理時に、検討すべき応力成分でデータ整理を行うことである。本論文で挙げている3モデルはすべて等方応力面上での体積変化に関する記述が異なるが、それは用いる応力成分が異なるためであり、試料、試験条件によっては、同じ予測精度を期待できるものとする。しかしながら、一般的にサクシオン~含水状態関係が水分特性曲線ヒステリシスによって唯一の関係で与えられないことは考慮せねばならず、以下、水分特性曲線ヒステリシスを考慮しているモデルとして、軽部らのモデルに基づいて定式化を行う。

まずは、不飽和土の有効応力を次式で与える。

$$\sigma' = \sigma + p_s \quad (25)$$

ここで、 σ は基底応力、 p_s については式(23)で与えられる。図-8 より、軽部らの構成モデル(図-6)に習い、図-10 に示す塑性ひずみ線群を与える次式を提案する。

$$\epsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \left(\frac{p'}{p' + aC_m} \right) \quad (26)$$

また、図-9 より式(25)を有効応力として Cam-clay モデルを適用すると、降伏関数は次式で表され、

$$f = q + Mp' \ln \left(\frac{p'}{p'_0} \right) = 0 \quad (27)$$

式(26)と式(27)より、 p'_0 を消去すると、

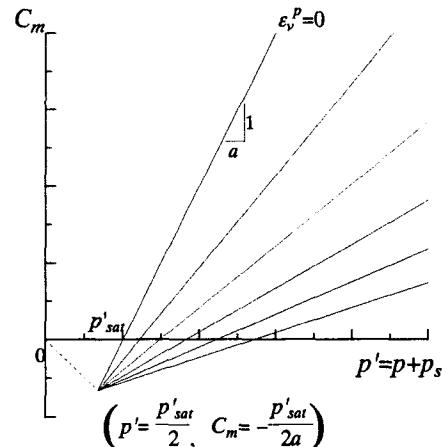


図-10 サクシオン応力を有効応力の一部とした場合の等塑性体積ひずみ線群

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \left[\ln \left(\frac{p'}{p'_{sat} + aC_m} \right) + \frac{q}{Mp'} \right] - \varepsilon_v^p \quad (28)$$

$$= MD \ln \left(\frac{p'}{p'_{sat} + aC_m} \right) + D \frac{q}{p'} - \varepsilon_v^p = 0$$

を得る。ここで、 D はダイレタンシー係数であり、次式で表される。

$$D = \frac{1}{M} \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \quad (29)$$

ただし、ここで材料によって Alonso らや Kohgo らの修正 Cam-clay 型の降伏面も適用可能である。

式(28)より一般的な応力ひずみ関係を導出する。次式で示す関連流れ則を適用する。

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \Lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{ij}} \quad (\Lambda \text{ はスカラー}) \quad (30)$$

フックの法則より

$$\dot{\sigma}'_{ij} = D_{ijkl}^e \dot{\varepsilon}_{kl} = D_{ijkl}^e \dot{\varepsilon}_{kl} - \Lambda D_{ijkl}^e \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{kl}} \quad (31)$$

ここで、 $D_{ijkl}^e = \left(K - \frac{2}{3}G \right) \delta_{ij} \delta_{kl} + G(\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk})$

$$K = \frac{1 + e_0}{\kappa} p' : \text{体積弾性係数}$$

$$G = \frac{3(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)} K : \text{せん断弾性係数}$$

弾塑性状態では、常に応力点が降伏面上にあることより、

$$\begin{aligned} \dot{f} &= \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{ij}} \dot{\sigma}'_{ij} + \frac{\partial f}{\partial C_m} \dot{C}_m + \frac{\partial f}{\partial \varepsilon_v^p} \frac{\partial \varepsilon_v^p}{\partial \sigma'_{ij}} \dot{\varepsilon}_{ij} \\ &= \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{ij}} \dot{\sigma}'_{ij} + \frac{\partial f}{\partial C_m} \dot{C}_m - \Lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{ij}} \delta_{ij} = 0 \end{aligned} \quad (32)$$

式(32)より、

$$\Lambda = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma'_{ij}} \dot{\sigma}'_{ij} + \frac{\partial f}{\partial C_m} \dot{C}_m \right) \quad (33)$$

ここで、 $h = \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{ij}} \delta_{ij}$

式(31)を式(33)に代入すると、

$$\Lambda = \frac{1}{H} \left(\frac{\partial f_s}{\partial \sigma'_{ij}} D_{ijkl}^e \dot{\varepsilon}_{kl} + \frac{\partial f_s}{\partial C_m} \dot{C}_m \right) \quad (34)$$

ここで、 $H = h + \frac{\partial f_s}{\partial \sigma'_{ij}} D_{ijkl}^e \frac{\partial f}{\partial \sigma'_{kl}}$

式(34)を式(31)に代入し、それぞれの導関数を解くこ

とで、次の応力ひずみ関係式が得られる。

$$\dot{\sigma}'_{ij} = D_{ijkl} \dot{\varepsilon}_{kl} - c_{ij}^{kw} \dot{C}_m \quad (35)$$

ここで、

$$D_{ijkl} = D_{ijkl}^e - \frac{1}{H^{kw}} \left(K \beta \delta_{ij} + \frac{3G}{q} s_{ij} \right) \left(K \beta \delta_{kl} + \frac{3G}{q} s_{kl} \right)$$

$$H^{kw} = \frac{p'^2}{D^2} H$$

$$c_{ij}^{kw} = \frac{p'}{H^{kw}} \left(K \beta \delta_{ij} + \frac{3G}{q} s_{ij} \right) \frac{aM}{p'_{sat} + aC_m}$$

この新しい構成モデルは、実験結果に合わせて C_m を選択できるほか、降伏面がせん断応力軸に対して、切片を持たないため、回転硬化や下負荷面といった手法が適用可能となる。

4. 従来モデルとの比較検討

ここで、新しいモデルにおいて、軽部らの構成モデルに従って $C_m = p_m$ とした場合のパフォーマンスについて比較検討を行う。軽部らのモデルは、応力成分が水分特性曲線に依存するため、水分特性曲線のヒステリシスを考慮した場合、計算が煩雑になるため、軽部らのモデルおよび本田らのモデルを適用した DACSAR-U に新たなモデルを適用して、土/水連成解析を行った。解析対象として、0.01 × 0.01m の一要素を選択し、要素の下端鉛直方向、左端水平方向を(圧密水浸試験に関しては、一次元圧密を模し要素右端も)固定した平面ひずみ条件下で解析を行った(図-11)。初期サクシオンとして、サクシオンに相当する全水頭を要素中心および全辺に与え、サクシオン変動時には要素辺に境界水頭変動を与えた。荷重は所定の圧力に相当する節点荷重を与えた。材料定数、初期状態をそれぞれ表-1、表-2 に示す。表-2 中の p は基底応力である。

(1) サクシオン載荷および除荷試験

拘束圧を一定に保ち、一要素のすべての境界における全水頭を変化させることでサクシオン変化を与えた。

(a) サクシオン載荷

図-12 に飽和状態からサクシオンを載荷させた時の間隙比変化を示す。 $s = 250$ (kPa)あたりまでは、サクシオン増加による有効応力の増加のために、体積圧縮が生ずる。これは、前述の乾燥収縮に相当する。その後、水分特性曲線に従うと、サクシオンが有効応力の増加よりも剛性の増加に寄与する割合が大きくなるために、膨張が生じる。最初に設定している、有効応力成分が異なるためにいくつかの違いはあるが、ほぼ同じ結果となっているのが分かる。

(b) サクシオン除荷

表-2 に示す初期状態からのサクシオン除荷時の間隙比

表1 材料定数一覧

λ	κ	M	ν	k_x (m/day)	k_y (m/day)	R (m)	a
0.097	0.029	1.347	0.33	0.01	0.01	0.000004	0.05
A^D	B^D	A^D	B^D	S_{rc}	S_{rf}	m	s_w (kPa)
-23.11	6.61	-6.94	2.45	0.28	0.9999	1.3	125

表2 初期状態の一覧

	p (kPa)	e	S_r (%)	s (kPa)
s 載荷	200	1.00	100	0
s 除荷	200	1.00	40	392
排水せん断	200	1.00	90	49
			40	392
圧密-水浸	200	1.00	40	392

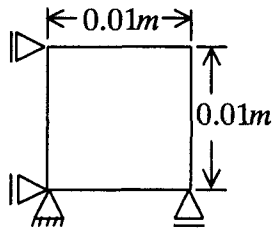
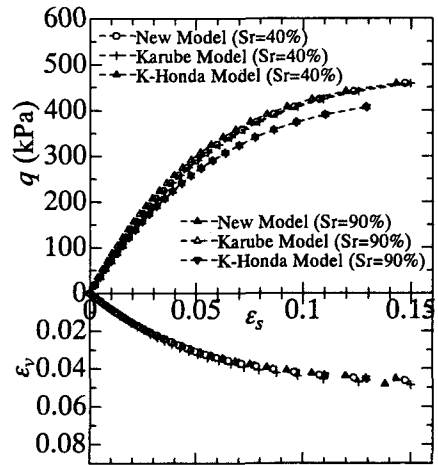
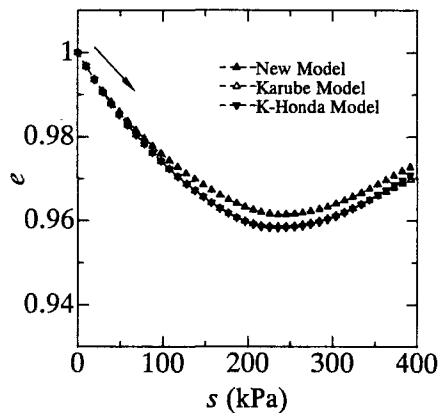
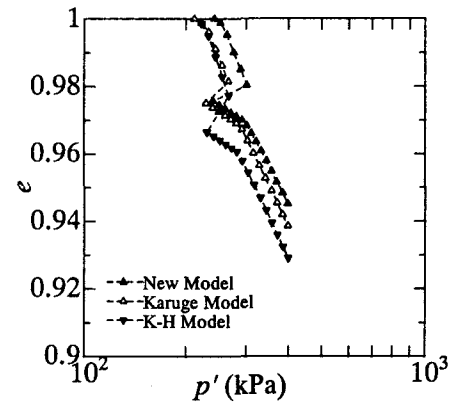
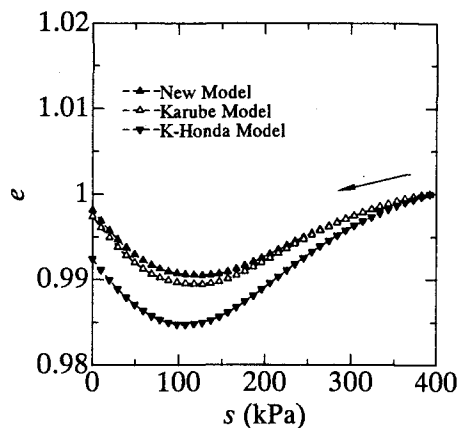
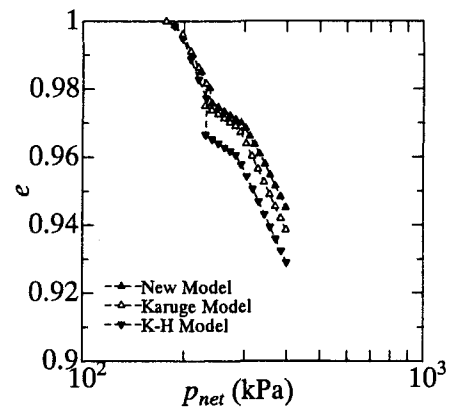


図-11 解析要素

図-14 排水せん断試験結果 $\varepsilon \sim q$ 図-12 サクション載荷試験結果 $s \sim e$ 図-15 圧密-水浸試験結果 $e \sim \log p'$ 図-13 サクション除荷試験結果 $s \sim e$ 図-16 圧密-水浸試験結果 $e \sim \log p_{net}$

変化を図-13 に示す。 $s = 100$ (kPa)あたりの、体積圧縮はコラプスを表している。本田らのモデルにおいて、大きな圧縮量を示しているが、彼らのモデルは応力成分におい

て軽部らのモデルと等しいが、コラプス量に影響を及ぼす等方応力面上の降伏面の傾きを決定するパラメータ a の意味合いが異なることが原因であると考え。つまり、こ

のパラメータの設定の仕方によって、同じ挙動を表現し得ると考える。新しいモデルは軽部らのモデルとよく似た結果を与えている。

(2) 排水せん断試験

サクシオンと拘束圧を一定に保ち、軸方向に応力制御で20kPaごとの荷重増分を与え、排水せん断試験とした。図-14に応力～ひずみ関係を示す。三つのモデルは、よく合致しているのが分かる。不飽和土のせん断強度は、サクシオン応力に依存するが、ここでは、サクシオン応力の大きい飽和度40%の供試体で、せん断強度が高くなっている。

(3) 圧密-水浸試験

外力による影響とサクシオン変化による影響を同時に検討するために、サクシオン一定で一次元圧縮し、途中で水浸、その後飽和状態で再度一次元圧縮させた。このとき、要素は水平方向を固定し、荷重は要素上端に節点荷重を与えた。図-15は、そのときの有効応力～間隙比関係を表している。ここでの、有効応力は軽部ら、本田らのモデルにおいては、基底応力とバルク応力の和として表されているが、新たなモデルでは基底応力とサクシオン応力の和となっている。いずれにせよ、有効応力で表した場合、弾塑性状態では圧縮曲線が対数グラフ上で直線になることが分かる。新しいモデルでは、水浸時に大きな有効応力の減少があるが、水浸後の降伏応力は全てのモデルで同じであり、当然、飽和状態に移行すると挙動は等しくなることが分かる。

図-16には横軸を基底応力とし、それぞれのモデルでのコラプス量を比較しやすくしている。新しいモデルと軽部らのモデルではほぼ等しく、本田らのモデルが最もコラプス量が多いが、これは前述の理由による。

5. 結論

本研究では、既存の不飽和土構成モデルの基本となっている部分を整理し、新たに一般的な不飽和土の構成モデルを提案した。そして、例として軽部らのモデル、本田らのモデルとその予測能力について比較検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) 既存の主要な不飽和土構成モデルは、コラプスの表現において、同じ構成となっており、大きな相違点は剛性を増加させるパラメータの設定方法にあると言える。ここでは、そのパラメータを C_m とし、より一般的なモデルを提案した。今後、実験結果との比較により、このパラメータ決定し得ると考える。
- (2) ここで提案するモデルは、せん断応力軸に対して切片を持たないため、一般弾塑性論で用いられる手法を簡易に適用可能である。
- (3) 新しいモデルにおいて、 $C_m = p_m$ とし軽部らのモデル、本田らのモデルと比較検討を行った結果、軽部らのモ

デルとは全ての面でよい一致が見られた。つまり、新しいモデルは軽部らのモデルをある程度包含しているといえる。本田らのモデルとは、初期降伏面の設定におけるパラメータが異なるため、コラプス量に違いが見られたが、これは、パラメータ設定によっては同様の結果が得られるものと考えられる。

参考文献

- 1) Alonso, E. E., A. Gens and D. W. Hight : Special problem soils. General Report., *Proc. 9th European RC-SMFE*, pp.1087-1146, 1987.
- 2) Alonso, E. E., A. Gens and A. Josa : A constitutive model for partially saturated soils, *Geotechnique*, Vol.40, No.3, pp.405-430, 1990.
- 3) Kohgo, Y., M. Nakano and T. Miyazaki : Theoretical aspects of constitutive modeling for unsaturated soils, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.4, pp.49-63, 1993.
- 4) Kohgo, Y., M. Nakano and T. Miyazaki : Verification of the generalized elasto-plastic model for unsaturated soils, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.4, pp.64-73, 1993.
- 5) 軽部大蔵, 加藤正司, 浜田耕一, 本田道識 : 不飽和土の間隙水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.
- 6) Karube, D., S. Kato, M. Honda and K. Kawai : A constitutive model for unsaturated soil evaluating effects of soil moisture distribution, *Proc. 2nd International Conference on Unsaturated Soils*, pp.485-490, 1998.
- 7) Karube, D. and K. Kawai : The role of pore water in the mechanical behavior of unsaturated soils, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.19, No.3, pp.211-241, 2001.
- 8) Alonso, E.E., F. Batle, A. Gens and A. Lloret : Consolidation analysis of partially soils-application to earthdam construction, *Proc. International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, pp.1303-1308, 1988.
- 9) Kohgo, Y. : A consolidation analysis method for unsaturated soils coupled with an elastoplastic model, *Proc. 1st International Conference on Unsaturated Soils*, pp.1085-1093, 1995.
- 10) 飯塚敦, 本田道識, 西田博文, 河井克之, 軽部大蔵 : 間隙水分布の違いを考慮した不飽和土の土/水連成解析, *土木学会論文集*, No.659/Ⅲ-52, pp.165-178, 2000.
- 11) Bishop, A. W. : The principal of effective stress, *Norwegian Geotechnical Institute*, No.32, pp.1-5, 1960.
- 12) Jennings, J. E. and J. B. Burland : Limitation to the use of effective stress in partly saturated soils, *Geotechnique*, Vol.12, No.2, pp.125-144, 1962.
- 13) 河井克之, 軽部大蔵, 芦田渉, 嘉戸善胤 : 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) Matyas, E. L. and H. S. Radhakrishna : Volume change characteristics of partially saturated soils,

Geotechnique, Vol.18, No.4, pp.432-448, 1968.

- 15) 本田道識, 飯塚敦, 河井克之, 軽部大蔵 : 不飽和土の応力～ひずみ関係式, 土木学会論文集, No.659/Ⅲ-52, pp.153-164, 2000.
- 16) 河井克之, 軽部大蔵, 嘉戸善胤, 加藤正司 : 不飽和土の非排水三軸圧縮試験における変形強度特性および水分特性, 土木学会論文集, No.715/Ⅲ-60, pp.287-296, 2002.

(2004 年 4 月 16 日 受付)