



土/水/空気三相連成モデルによる間隙圧係数B値の解釈

杉山, 友理
河井, 克之
田中, 博之
飯塚, 敦

(Citation)

土木学会論文集A2 (応用力学), 70(2):I_145-I_153

(Issue Date)

2014

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2014 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003365>



土/水/空気三相連成モデルによる 間隙圧係数B値の解釈

杉山友理¹・河井克之²・田中博之³・飯塚敦⁴

¹学生会員 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail: 128t120t@stu.kobe-u.ac.jp

²正会員 神戸大学准教授 都市安全研究センター (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail: kkawai@kobe-u.ac.jp

³学生会員 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail: 141t129t@stu.kobe-u.ac.jp

⁴正会員 神戸大学教授 都市安全研究センター (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail: iizuka@kobe-u.ac.jp

三軸試験を行う場合に、供試体設置後に計測されるB値は、供試体の飽和化の度合いを知るために用いられる。しかしながら、このB値に及ぼす要因については、飽和度以外には詳細な力学的説明は加えられていない。本論文では、極めて飽和に近い不飽和状態でも、間隙空気の挙動を精緻に表現できるように、まず既存の不飽和土構成モデルの枠組みに、空気相の液相への溶解を規定するヘンリーの法則を適用し定式化した。次に、得られたモデルを用いて、供試体の飽和度や拘束圧、背圧がB値計測に及ぼす影響を数値シミュレーションによって検討した。その結果、同じ飽和状態であっても、応力条件によって計測されるB値が異なることが分かった。

Key Words : Pore pressure coefficient, Unsaturated soil, Henry's law

1. はじめに

Terzaghi¹⁾が土の変形および強度特性を支配する応力成分として有効応力の概念を提案して以来、土質力学が体系化され、地盤工学が大きく発展することとなった。Terzaghiの有効応力の物理的意義に関しては、Bishop²⁾やSkempton³⁾によって考察が行われてきたが、岡⁴⁾は2相混合物理理論から、飽和状態にある土において、土粒子および間隙水の圧縮性が全体の変形に対して無視できるほど小さい限りは、Terzaghiの有効応力式が成立することを示している。そのため、地盤材料の材料特性評価には、飽和状態の変形強度特性を明らかにすることが重要となる。

三軸セル内で \overline{CU} 試験を行い、変形強度特性を求める場合、どれだけ精緻な間隙水圧計測が可能かが焦点となる。そのため、通水や二酸化炭素による間隙空気の置換および背圧载荷を行い、供試体の飽和化を行った後、その確認のため間隙圧係数B値⁵⁾の計測を行うのが一般的である。Terzaghiの有効応力式によれば、飽和状態にある理想供試体では、B値は1.0となる。このB値が小さい

ほど、供試体の飽和化が不十分であると判断するとともに、 \overline{CU} 試験から得られる材料定数の信頼性が乏しいことを意味する。実際の試験では、1.0のB値を得ることは困難であり、0.95以上であれば飽和状態にあると見なし試験を行う。しかし、供試体が完全な飽和状態でないことを前提とすると、このB値の評価およびその影響因子を明らかにすることには大きな意義がある。そこで本研究では、高飽和度付近の応力変化を精緻に再現できる数理モデルを用いることでB値測定過程をシミュレートし、B値と飽和度の関係や、B値の影響因子について検討を行う。

2. 既往の研究

三田地、工藤⁶⁾は、B値測定方法の違いが \overline{CU} 試験結果に及ぼす影響について実験的に検討を行っている。B値は、セル圧増分を与えて計測された間隙水圧増分との比から算出するのが一般的である。このとき、飽和が不十分な状態でセル圧を増加させると、間隙水圧増分がセル圧増分より小さくなるため、有効応力の増加につな

がり応力履歴依存性発現の懸念があるため、セル圧を減じて B 値を算出することが推奨されている。三田地、工藤は、このセル圧の载荷、除荷の違いが B 値算出、及びその後の試験で変形強度特性に及ぼす影響について検討を行っている。さらには、セル圧、背圧の大きさへの依存性についても検討している。図-1 及び図-2 は、それぞれ初期状態が同じカオリン粘土について実験を行った結果得られた B 値の時間変化及び有効応力経路であり、セル圧载荷によって得られる B 値がセル圧除荷から得られる B 値よりも小さいことを示した。しかし、B 値载荷後の圧縮せん断過程で得られる有効応力経路には違いはなく、変形強度特性に及ぼす影響は小さいと結論付けている。また、初期応力状態を様々に変えて B 値を測定した結果が図-3 である。ここでは、セル圧と背圧の差を一定とした状態で排水バルブを閉じ、B 値計測を行っている。その結果、初期の拘束圧及び背圧が大きいほど、得られる B 値が 1.0 に近いことを示している。これは、B 値計測後の圧縮せん断試験でも間隙水圧計の反応の違いとして表現されている(図-4)。しかしながら、最終的な破壊強度は同じ値に収束するとしている。また、図-5 のように、清幌粘土で有効拘束圧の違いによる B 値の発現傾向を示しているが、有効拘束圧が小さい方が初期の B 値の上昇が速いと結論付けている。三田地、工藤は、これらの B 値の違いについて言及しているが、そのメカニズムについては詳しくは触れていない。

3. 空気の溶解を考慮した数理モデル

Borja⁷⁾は三相混合体理論を用いて不飽和土の構成モデルを提案しており、金澤⁸⁾はそれに倣って土/水/空気連成問題として定式化を行っている。しかしながら、これらの方法では、高飽和度領域で境界値問題を解くと、空気相が封入され、過剰な空気圧変化が計算され、計算が不安定になるという問題点がある。また、実際の空気は圧力に応じて液相への溶解が生じることも考慮できていない。そこで、本研究では空気相の液相への溶解を考慮した数理モデルを提案する。

(1) 連続条件式

混合体理論に基づき、地盤材料を図-6のような多相混合体としてモデル化した。間隙気体と溶解気体について、それぞれ状態方程式及びヘンリーの法則が成り立つと仮定した。気体の状態方程式より、

$$p_a V_a = \frac{m_a}{M^*} R^* T \quad (1a)$$

$$\rho_a = \frac{m_a}{V_a} = \frac{p_a M^*}{R^* T} \quad (1b)$$

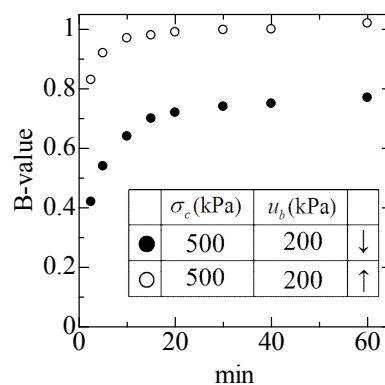


図-1 セル圧载荷方法の異なる B 値⁶⁾

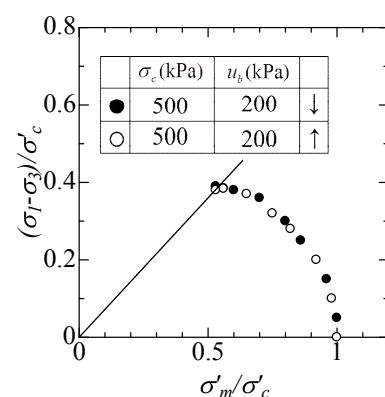


図-2 B 値計測方法の異なる試料のせん断挙動⁶⁾

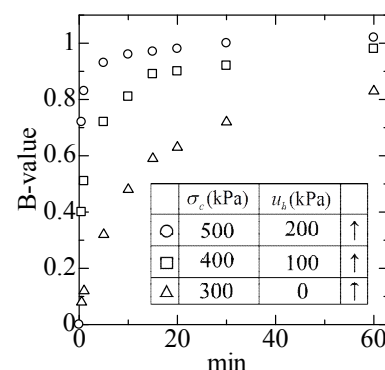


図-3 背圧の異なる B 値⁶⁾

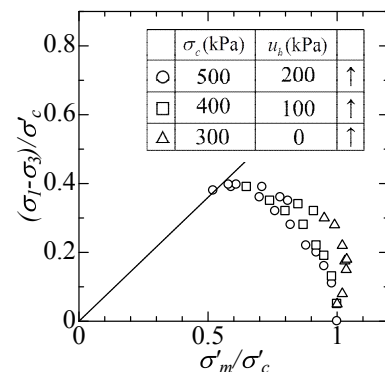


図-4 異なる背圧で B 値計測を行った試料のせん断挙動⁶⁾

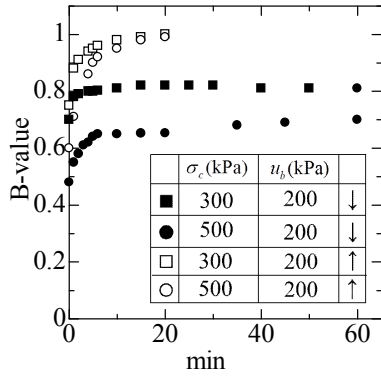


図-5 異なる有効拘束圧下でのB値⁶⁾

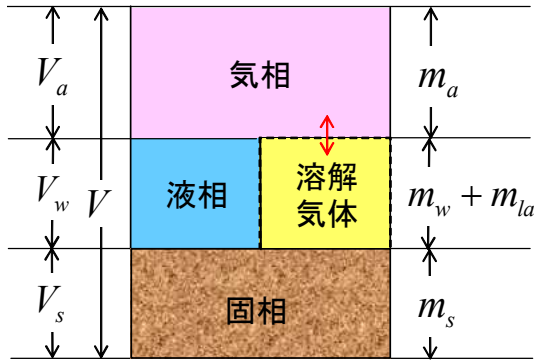


図-6 多相混合体モデル

$$\bar{\rho}_a = \frac{m_a}{V} = n(1 - S_r) \frac{p_a M^*}{R^* T} \quad (1c)$$

のように、気体の密度として表すことができる。ここで、 ρ_a は気体の実密度、 $\bar{\rho}_a$ は気体の部分密度、 m_a は気体の質量、 V_a は気体の体積、 R^* は気体定数(ここでは単位をそろえるために換算した値)、 M^* は単位換算された物質質量、 T は絶対温度、 p_a は空気圧である。また、液相への溶解を考慮して、ヘンリーの法則より溶解気体の密度は、

$$m_{la} = k_h p_a V_w \quad (2a)$$

$$\rho_{la} = \frac{m_{la}}{V_w} = k_h p_a \quad (2b)$$

$$\bar{\rho}_{la} = \frac{m_{la}}{V} = n S_r k_h p_a \quad (2c)$$

のように与えられる。ここで、 ρ_{la} は溶解気体の実密度、 $\bar{\rho}_{la}$ は溶解気体の部分密度、 m_{la} は溶解気体の質量、 V_w は液相の体積、 k_h はヘンリー定数である。

固相、液相、気相(溶解気体を含む)それぞれの質量保存則を以下のように示す。添え字 $\alpha = s, f, a, la$ で、各相の変数を区別する。

$$\dot{\bar{\rho}}_\alpha + \bar{\rho}_\alpha \text{div} \mathbf{v}_\alpha = 0 \quad (\bar{\rho}_\alpha = \phi_\alpha \rho_\alpha) \quad (3)$$

ここで、 $\bar{\rho}_\alpha$ は部分密度、 ρ_α は実密度、 \mathbf{v}_α は相の実速度、 ϕ_α は体積占有率を表す。また、ドットは増分を表す。固相と液相の質量保存則より液相の連続条件式は、

$$n \dot{S}_r - S_r \dot{\epsilon}_v + \text{div} \tilde{\mathbf{v}}_w = 0 \quad (4a)$$

が得られる。ここで、 n は間隙率、 S_r は飽和度である。また、本研究で行う計算は非排水条件での1要素シミュレーションであることから、(4a)式の第3項が消去でき、飽和度増分式を以下に示すように体積ひずみ増分で表現することができる。

$$\dot{S}_r = \frac{S_r}{n} \dot{\epsilon}_v \quad (4b)$$

固相と気相の質量保存則と、式(1c)、(2c)より気相の連続条件式は、

$$\begin{aligned} & -(1 - S_r) \dot{\epsilon}_v - n \dot{S}_r + \frac{n(1 - S_r)}{p_a} \dot{p}_a + \text{div} \tilde{\mathbf{v}}_a \\ & - \frac{S_r k_h p_a}{\rho_a} \dot{\epsilon}_v + \frac{n k_h p_a}{\rho_a} \dot{S}_r + \frac{n S_r k_h}{\rho_a} \dot{p}_a + \frac{k_h p_a}{\rho_a} \text{div} \tilde{\mathbf{v}}_w = 0 \end{aligned} \quad (5a)$$

ここで、本研究で行う計算は非排気非排水条件であることから、(5a)式の第4項及び第8項が消去した式と、(4b)式より、以下の間隙空気圧の増分式を得る。

$$\dot{p}_a = \frac{p_a}{n(1 - S_r) + \frac{n S_r k_h}{M^*}} \dot{\epsilon}_v \quad (5b)$$

空気及び水の出入りがある場合、ダルシー則より、

$$\tilde{\mathbf{v}}_w = -k_w k_{rw} \cdot \text{grad} h \quad (6a)$$

$$\tilde{\mathbf{v}}_a = -k_a k_{ra} \cdot \text{grad} h_a \quad (6b)$$

$$h_a = \frac{p_a}{\rho_w g} \quad (6c)$$

$$k_{rw} = S_e^{1/2} \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (6d)$$

$$k_{ra} = (1 - S_e)^{1/2} \left(1 - S_e^{1/m} \right)^{2m} \quad (6e)$$

である。ここで、 $\tilde{\mathbf{v}}_w$ 、 $\tilde{\mathbf{v}}_a$ はそれぞれ液相、気相の固相に対する相対速度、 ϵ_v は土塊の体積ひずみ、 p_a は間隙空気圧、 k_w は飽和透水係数、 k_{rw} は比透水係数、 k_a は絶対乾透気係数、 k_{ra} は比透気係数、 h は全水頭、 h_a は空気圧力水頭、 m はMualem係数⁹⁾である。式(6d)、(6e)はvan Genuchten¹⁰⁾によって提案された比透過係数である。

(2) 構成関係と水分特性曲線

不飽和土の構成モデルには、大野ら¹¹⁾の提案するモデ

ルを用いた．有効応力は次式で表される

$$\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{\sigma}_{\text{net}} + p_s \mathbf{1} = \boldsymbol{\sigma}_{\text{net}} + S_e s \mathbf{1} \quad (7a)$$

$$\boldsymbol{\sigma}_{\text{net}} = \boldsymbol{\sigma}^T - p_a \mathbf{1} \quad (7b)$$

$$s = p_a - p_w \quad (7c)$$

$$S_e = \frac{S_r - S_{rc}}{1 - S_{rc}} \quad (7d)$$

ここで， $\boldsymbol{\sigma}'$ は有効応力テンソル， $\boldsymbol{\sigma}_{\text{net}}$ はネットストレステンソル， p_s はサクション応力， $\mathbf{1}$ は二階単位テンソル， S_e は有効飽和度， s はサクション， $\boldsymbol{\sigma}^T$ は全応力， p_w は間隙水圧， S_{rc} は限界飽和度である．降伏関数は，次式で与える．

$$f(\boldsymbol{\sigma}', \zeta, \varepsilon_v^p) = MD \ln \frac{p'}{\zeta p'_{\text{sat}}} + D \frac{q}{p'} - \varepsilon_v^p = 0 \quad (8a)$$

$$\zeta = \exp[(1 - S_e)^{n_s} \ln a] \quad (8b)$$

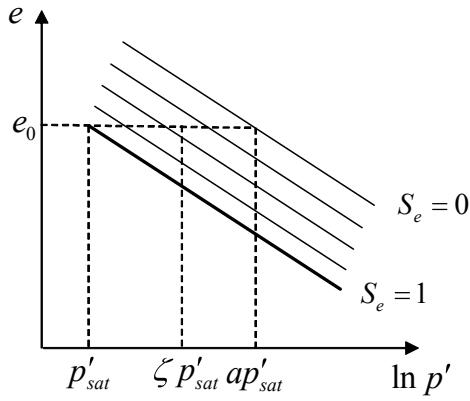


図-7 等方応力状態での体積変化

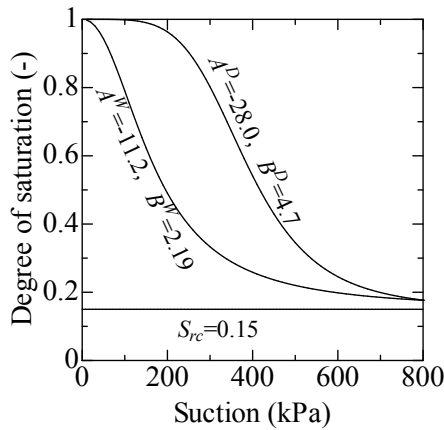


図-8 水分特性曲線

表-1 材料パラメータ

λ	κ	k_h	M^*	R^*	T
0.16	0.011	0.173	1.28	8.31	288.15

k_h (mol / m³ · kPa), M (kg / mol), R (J / K · mol), T (K)

$$MD = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \quad (8c)$$

$$p' = \frac{1}{3} \boldsymbol{\sigma}' : \mathbf{1} \quad (8d)$$

$$q = \sqrt{\frac{3}{2} \boldsymbol{\sigma}_D : \boldsymbol{\sigma}_D} \quad (8e)$$

$$\boldsymbol{\sigma}_D = \boldsymbol{\sigma}' - p' \mathbf{1} \quad (8f)$$

ここで， ε_v^p は塑性体積ひずみ， M は限界状態における q/p' ， D はダイレタシー係数， a と n_s は不飽和化に伴う降伏応力の増加を表すパラメーター， λ ， κ はそれぞれ圧縮，膨潤指数， $\boldsymbol{\sigma}_D$ は偏差応力テンソルである．図-7 は等方応力状態の体積変化挙動を表したものである．本研究では等方条件で計算を行うため，ダイレイタシーによる体積変化を考慮しなくても良い．そのため，有効応力増分式は，(8a)式の第2項を除いた式と(8b)式より以下ようになる．

$$\dot{p}' = D \dot{\varepsilon}_v + C \dot{S}_e \quad (8g)$$

$$D = \frac{p'(1 + e_0)}{\kappa} \dot{\varepsilon}_v, C = p' n (1 - S_{re})^{n-1} \ln a$$

水分特性曲線モデルには，ヒステリシス表現が可能な河井ら¹²⁾のモデルを用い，次式で表される杉井，宇野¹³⁾のロジスティック曲線式を適用した．

$$\frac{S_r - S_{ra}}{S_{rf} - S_{ra}} = \frac{1}{1 + \exp(A + B \log_e \frac{S}{s_0})} \quad (9a)$$

ここで， S_{ra} は $s \rightarrow \infty$ のときの収束飽和度， S_{rf} は $s \rightarrow 0$ での飽和度， S_{ra} は A, B は形状パラメータ， s_0 は単位サクションである．

式(9a)を飽和度について整理し増分系をとった式及び式(7)を用いて，体積ひずみ増分からサクションを求め式を以下のように得る．

$$\dot{s} = \frac{S_{ra} - S_{rf}}{B s^{B-1} \cdot \exp A (S_r - S_{ra})^2} \frac{S_r}{n} \dot{\varepsilon}_v \quad (9b)$$

4. B値計測シミュレーション

3章の数値モデルを用いて，B値の算出を行う．実際の三軸試験では，排水経路のバルブを閉じたままセル圧増分を与え，その時に計測される間隙水圧増分との比からB値を算出する．この時，供試体は非排気非排水圧縮条件下にあるとして，次のようにB値を求める．

式(7)は次のように表せる．

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \dot{\boldsymbol{\sigma}}' + (\dot{p}_a + S_e \dot{s} + \dot{S}_e s) \mathbf{1} \quad (10)$$

式(10)に式(4b)，(5b)，(8g)及び(9b)を代入することで，全

応力増分が体積ひずみ増分の関数として表される。B 値計測時のセル圧増分を、ここで全応力増分として与え、体積ひずみ増分を求める。体積ひずみ増分が求められると、式(8g)、(9b)よりそれぞれ有効応力増分、サクション増分が算出される。また、式(5b)に体積ひずみ増分を代入することで、間隙空気圧増分が求められ、サクション増分との差から間隙水圧増分が得られる。

シミュレーションは、シルト質材料を想定し、表-1に示す材料定数を与えた。また、水分特性曲線は図-8に示すとおりである。水分特性曲線の形状を表すパラメータ A, B は添え字の D, W で脱水過程、吸水過程の別を表現している。供試体の初期サクションは、所定の初期飽和度に対して、主吸水曲線上の保水状態にあるとして与えた。

(1) 初期飽和度が間隙水圧挙動に及ぼす影響

一般的に、B 値は供試体の飽和状態を表す指標として用いられている。ここでは、初期飽和度による間隙水圧の発生傾向を明確に見るために、初期飽和度を様々に変えてシミュレーションを行い、得られる B 値について

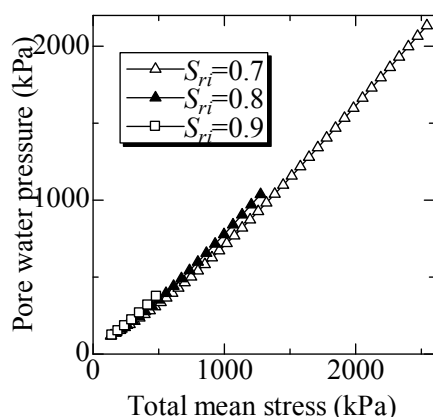


図-9 非排気非排水圧縮による間隙水圧変化

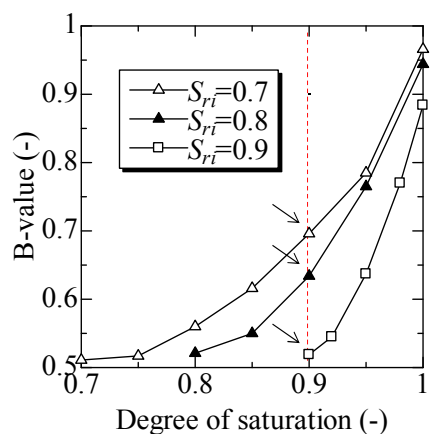


図-10 飽和度～B 値関係

検討する。初期の全応力、間隙水圧は、ともに 100kPa とし、初期の空気圧は初期サクションから設定した。このとき得られる有効応力から、初期に弾塑性状態にあるとして初期間隙比を設定した。図-9 に、シミュレーション

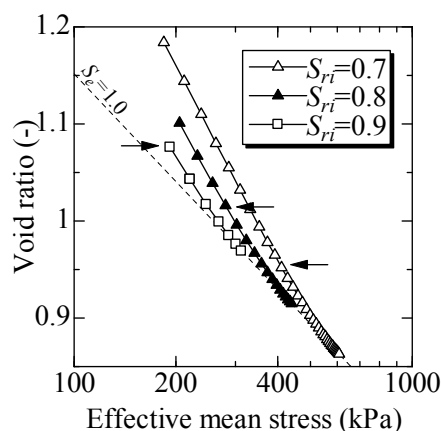


図-11 有効応力～間隙比関係

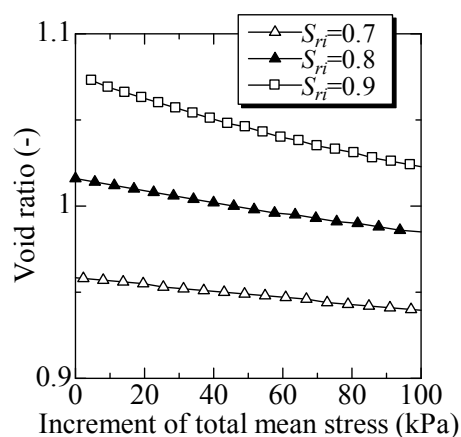


図-12 全応力～間隙比関係(飽和度 0.9 の状態)

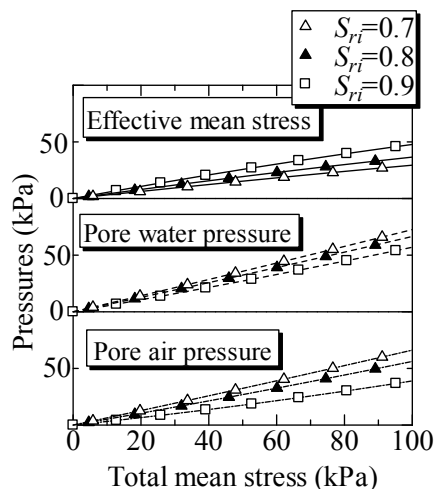


図-13 応力成分変化

ンから得られた全応力増分と間隙水圧増分の関係の一例を示す。ここで、図中の S_{ri} は初期飽和度を意味する。シミュレーションでは、飽和度が 1.0 となるところで計算を終了しているため、初期飽和度の違いにより曲線の長さが異なっている。全応力増加によって間隙が圧縮されると、間隙空気圧の増加に伴って間隙水圧も増加していくが、図のように加速度的に水圧が上昇していくのが分かる。また、初期飽和度の高い供試体ほど間隙水圧

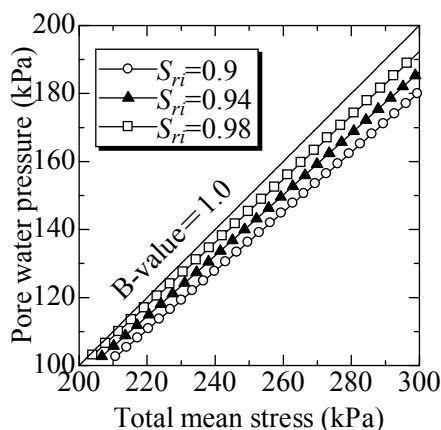


図-14 全応力～間隙水圧関係
CASE1 : $\Delta\sigma = 100(kPa)$

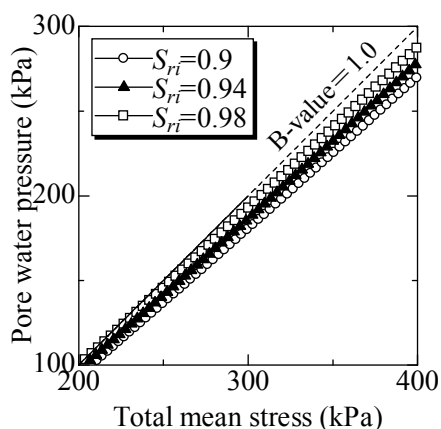


図-15 全応力～間隙水圧関係
CASE1 : $\Delta\sigma = 200(kPa)$

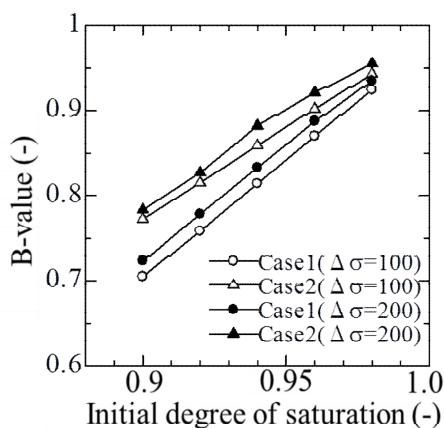


図-16 B値～初期飽和度関係

増分が大きいという結果になった。この図から所定の飽和度における曲線の接線勾配を B 値とし、飽和度ごとにまとめたものが図-10 である。図に示すように、ある初期不飽和状態から圧縮によって飽和度が上がるに従い、B 値も上昇していくのが確認できる。また、初期飽和度の異なる供試体間の比較を行うために、同じ飽和度に達した時の B 値の大きさを比較する。ここでは、飽和度 0.9 に達した時を取り上げる。図から、初期飽和度が大きいほど、その時点での B 値が小さい値になっていることが分かる。このことから、B 値は飽和度だけでなく、それまでの応力履歴(変形履歴)に依存すると考えられる。図-11 に、非排気非排水圧縮中の平均有効応力と間隙比の関係を示す。図中の矢印は飽和度が 0.9 に達した位置を表している。初期飽和度が低い供試体は、初期に間隙比の大きな状態にあり、飽和度 0.9 を満足するためにかなり圧縮されるので、同じ飽和度に達した状態の比較では、剛性が高く、圧縮性が小さくなっている。飽和度

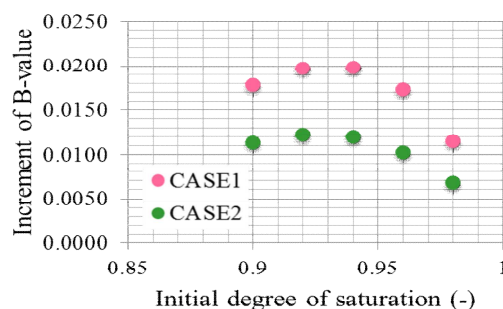


図-17 全応力増分の違いによる B 値増分～初期飽和度

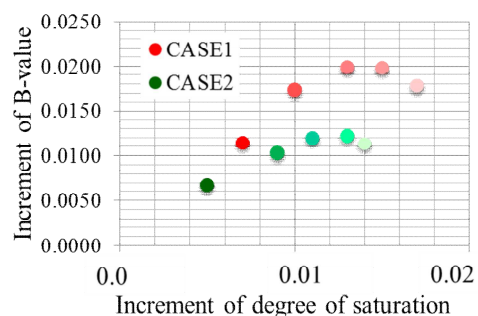


図-18 全応力増分の違いによる B 値増分～飽和度増分

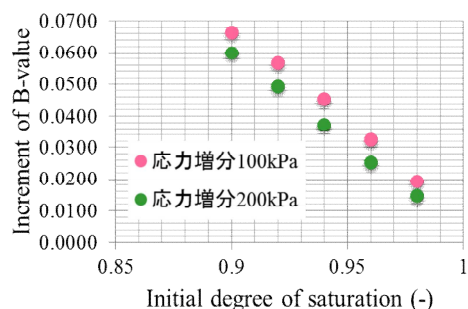


図-19 初期拘束圧の違いによる B 値増分～初期飽和度

0.9 に達して以降の全応力増分に対する間隙比を表した図-12 から、それが明らかである。図-13 で、この時の有効応力、間隙水圧、間隙空気圧の増分を比較する。初期の飽和度が大きいほど、体積変化が大きいので有効応力増分が大きく、その分水圧、空気圧への全応力の寄与が小さくなるのが分かる。その結果、初期飽和度が低いほど、同じ飽和度に達した時の B 値が、大きくなるという結果になっていると説明できる。しかしながら、この結果は初期の、応力(全応力、間隙水圧)条件や、弾性、弾塑性の状態によって変化するものと考える。

(2) B 値に及ぼす有効拘束圧の影響

実際の試験では飽和状態を目指して供試体を設置する。ここでは、0.9以上の高飽和度領域を初期状態としたケースについて検討を行う。計算には前節と同様の材料定数を用いる。初期飽和度は0.90, 0.92, 0.94, 0.96, 0.98の5ケースとし、初期有効拘束圧(ここでは、全応力と間隙水圧の差)100kPaの場合をCASE1、200kPaの場合をCASE2とする。また、それぞれのケースについて応力増分が100kPaと200kPaの場合の計4パターンについて検討を行う。

まず、全応力増分が B 値に及ぼす影響について検討を行う。初めに、CASE1 での応力増分の違いによる全応力と間隙水圧関係について図-14, 15 に示す。先に示したように、初期飽和度が高いほど、間隙水圧増分が大きくなっているのが分かる。また、図-14, 15 の比較から、わずかではあるものの、全応力増分が大きいほど、全体的にグラフの傾きが急になっていることが分かる。初期の全応力が異なる CASE2 でも同様の結果を得た。このグラフの傾きはそれぞれの初期飽和度における B 値を表しており、 B 値と飽和度の関係についてそれぞれのケースについてまとめたグラフを図-16 に示す。初期拘束圧の等しい丸印と三角印でそれぞれ比較すると、加える全応力増分が大きいほど B 値が大きくなっていることが分かる。また、初期飽和度が大きくなるほど、全応力増分の違いによる変化は小さくなっているように見える。図-17 は、この全応力増分の違いによる差を初期飽和度ごとにまとめたものである。この結果から、初期拘束圧が小さい CASE1 の方が、初期の飽和状態に関わらず、応力増分に伴う B 値の増分が大きくなっていることがわかる。次に、全応力増分が 100kPa から 200kPa に増える間の圧縮による飽和度の増分と B 値増分についてまとめた結果を図-18 に示す。CASE1 では初期の拘束圧が小さいので、より圧縮するため飽和度増分も大きく、その結果 B 値増分も大きくなっているのが分かる。しかし、CASE1 と CASE2 の比較から、 B 値増分が示す飽和度増分は唯一の関係ではないことが分かる。

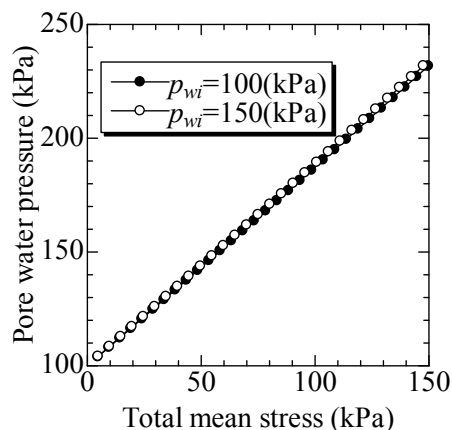


図-20 背圧の違いによる全応力増分～間隙水圧

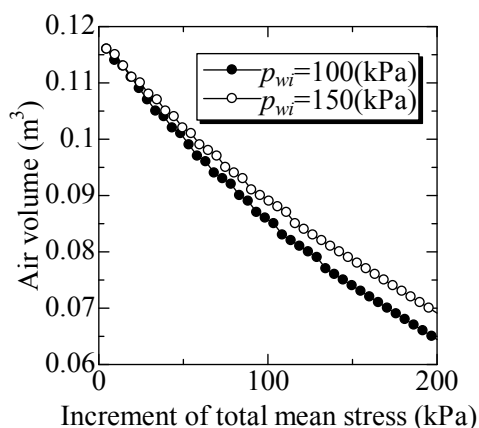


図-21 気相の体積変化

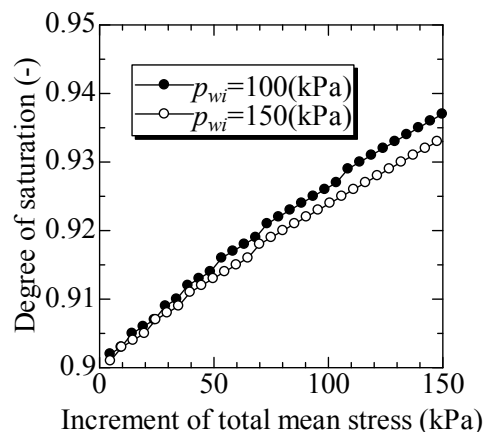


図-22 飽和度変化

初期拘束圧の違いが B 値に及ぼす影響について考察を行う。図-16 の白印と黒印を比較すると、応力増分の違いによらず、初期の拘束圧が大きい CASE2 で大きい B 値を得ていることが分かる。図-19 に、初期拘束圧が増えることによる B 値の差を初期飽和度によってまとめた結果を示す。図より、初期飽和度が低いほど初期拘束圧の違いによる B 値の差が大きいことが分かる。この結果から、 B 値の初期拘束圧への依存性は、低飽和度ほど顕著であるといえる。また、初期拘束圧増加に伴う B 値増分は、応力増分が小さい方が大きくなる結果を得

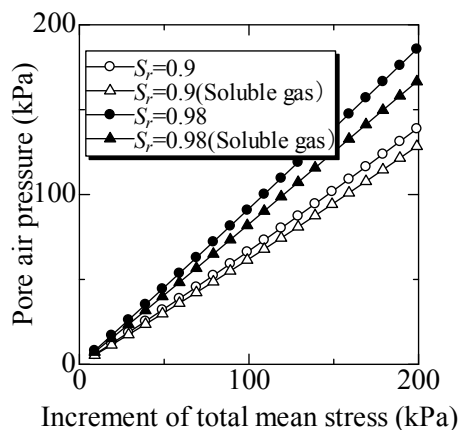


図-23 全応力増分～間隙空気圧関係

た。

これらの結果から、初期拘束圧の違いはB値の絶対値に影響を及ぼし、その時得られるB値は加える全応力増分とともに大きくなると言える。

(3) 初期背圧及び気相の溶解がB値に及ぼす影響

三軸試験では、間隙空気体積を小さくし、間隙水圧応答をよくするために、背圧载荷を行う。ここでは、背圧の大きさおよび間隙空気の間隙水への溶解がB値計測に及ぼす影響について検討する。比較のため、CASE1と同じ条件で、初期の間隙水圧を150kPa、またそれに応じて空気圧も50kPa大きい状態を初期状態とした。図-20に全応力増分に対する間隙水圧変化の比較を行う。図からは判別しにくい、背圧の大きい方がわずかに間隙水圧の上昇が大きくなっており、B値が大きいことを示している。これは、三田地、工藤の結果とも、一致している。この場合、初期の背圧が大きいと、初期の間隙空気圧も大きくなり、気体の状態方程式からは、体積変化が小さくなる(図-21)。その結果、飽和度増分も小さくなっており(図-22)、この結果からも、B値が飽和度のみで決まらないことが分かる。

また、気相の溶解を考慮したことによる効果を明らかにするために、不溶性気体に関するシミュレーションも行った。式(5b)より、気相の溶解は分母の第二項で表されており、溶解を考慮すると、間隙空気圧増分が小さくなることを表している。図-23は、全応力の増加に伴う間隙空気圧変化を表しており、溶解を考慮する方が間隙空気圧の上昇が小さくなっていることが分かる。その結果、間隙水圧の上昇幅も抑えられるということが分かった(図-24)。

5. 結論

三軸試験で計測されるB値の意義について明らかにするために、液相への気相の溶解を考慮した不飽和供試

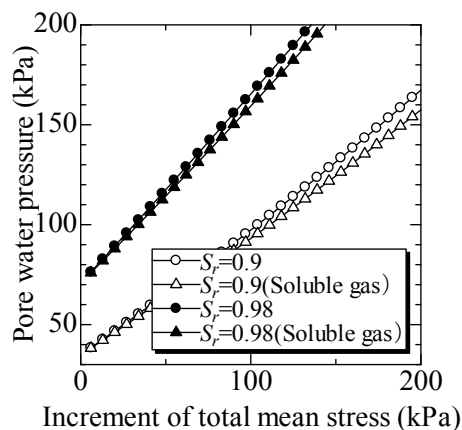


図-24 全応力増分～間隙水圧関係

体の数値モデルを提案し、数値シミュレーションを行った。その結果、B値は単に飽和度による関数ではなく、応力条件や変形の過程によって異なる値を示すことが分かった。つまり、三軸試験における供試体の飽和化の指標としてのB値を評価するうえで、一定の応力载荷プロセスを設定することの重要性を示唆している。

参考文献

- 1) Terzaghi, K.: *Theoretical soil mechanics*, John Wiley & Sons., New York, pp.11-15, 1943.
- 2) Bishop, A. W.: *The principle of effective stress*, Nowegian Geotechnical Institute, No.32, pp.1-5, 1960.
- 3) Skempton, A. W.: Effective stress in soils, concrete and rocks, *Conf. Pore Pressure and Suction in Soils*, pp.4-16, 1960.
- 4) 岡二三生: 2相混合体理論からみた有効応力の定義について, 土木学会論文報告集, 第299号, pp.59-64, 1980.
- 5) Skempton, A.W.: The Pore-pressure coefficients A and B, *Geotechnique*, Vol.4, No.4, pp.143-147, 1954.
- 6) 三田地俊之, 工藤豊: B値測定方法の違いがCU試験結果に及ぼす影響について, 三軸試験に関するシンポジウム発表論文集, pp.85-90, 1991.
- 7) Borja, R. I.: A mathematical framework for three-phase deformation and strain localization analyses of partially saturated porous media, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.193, pp.5301-5338, 2004.
- 8) 金澤伸一: 不飽和土の数値モデルに基づく締固め土構造物の力学挙動評価, 神戸大学博士論文, 2010.
- 9) Mualem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, Vol.12, No.3, pp.514-522, 1976.
- 10) van Genuchten, M.: A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil, *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, pp.892-898, 1980.
- 11) 大野進太郎, 河井克之, 橋伸也: 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, Vol.63, No.4, pp.1132-1141, 2007.
- 12) 河井克之, 汪偉川, 飯塚敦: 水分特性曲線ヒステリシスの表現と不飽和土の応力変化, 応用力学論文集, Vol.5, pp.777-784, 2002.
- 13) 杉井俊夫, 宇野尚雄: 新しい水分特性曲線のモデル化

THEORETICAL INTERPRETATION OF THE PORE PRESSURE COEFFICIENT B WITH SOIL/WATER/AIR COUPLED MODEL

Yuri SUGIYAMA, Katsuyuki KAWAI, Hiroyuki TANAKA and Atsuhiko IIZUKA

The pore pressure coefficient B , which is measured on triaxial test, is useful for evaluating degree of saturation of specimen. However, the influential factors on this B value other than degree of saturation have not been investigated in detail up to now. In this study, first, Henry's law that indicates dissolved air in pore water was applied to the existing constitutive model for unsaturated soil in order to express the behavior of pore air on unsaturated soil extremely close to fully saturated state. Next, the influential factors, such as degree of saturation, confining stress and back pressure, were investigated through numerical simulations with using newly obtained model. Consequently, it was found out that B value depends on not only degree of saturation but also stress state.