応力条件が B 値計測に及ぼす影響

Effects of stress conditions on the B-value measurement

田中 博之¹⁾ Hiroyuki Tanaka 杉山 友理²⁾ Yuri Sugiyama 飯塚 敦³⁾ Atsushi Iizuka

概要: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 値計測時の応力条件などは規準化されておらず,その計測手法の違いが結果に及ぼ す影響についても詳細な検討は行われていない.本論文では,精緻な応力制御を行えるスマート三軸試験器を用 いて,種々の応力条件下で飽和状態に近い供試体の B 値を計測し,その結果を比較検討した.また,空気相の液 相への溶解を規定するヘンリーの法則を既存の不飽和土構成モデルに適用し,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新たな構成モデルを構築するとともに,ここで行った B 値計測試験を数 値シミュレーションすることで,B 値に及ぼす各種応力の影響を明らかにした.

キーワード:間隙圧係数 B, 三軸試験, 溶解現象

1. はじめに

三軸試験で非排水試験を行う場合,間隙水圧挙動を正確に計測することが求められる.そのため,試験開始時 に,水圧計の感度や供試体の飽和状態をチェックするために,Skempton¹⁾の間隙圧係数 B 値を計測する. Skempton によって提案されている間隙水圧係数 B 値は,三軸試験において非排水条件下で,供試体にセル圧増 分を与え,その時に得られる間隙水圧増分の比として表される.供試体が完全な飽和状態であれば,Terzaghi²⁾の 有効応力式に従って理論的には B 値は 1.0 を示すはずである.しかしながら,完全な飽和供試体を得ることが難 しいことから, B 値はおおおまかな飽和状態を示す基準として,また非排水試験における間隙水圧の感度の目安 として用いられており,0.95 以上の値が得られれば非排水試験として妥当の結果が得られるものと考えられてい る.そのため,非排水試験時には背,B 値を向上させるために背圧を載荷ことが有効であるとされている.

一方で, Baldi ら³は, B 値は飽和状態のみならず土骨格の圧縮性にも依存することを示しており,同じ B 値で も,圧縮性の低い材料では,圧縮性の高い材料に比べて飽和度が高くなるとしている.そのため,供試体が完全な 飽和状態でない以上,供試体の圧縮性に影響を及ぼす応力条件によっても B 値に違いが生じてくるものと考える. そこで,本研究では B 値に及ぼす影響因子について詳細に調べるため, B 値測定時の応力条件に注目して実験と 解析の両方からアプローチする.

2. 空気の溶解を考慮した数理モデル

非排水試験時に、相当に高い飽和状態であるにもかかわらず、高い B 値が得られないことがよくある.背圧の 載荷は、供試体内の間隙水圧を増加し、間隙空気圧の増加とともに、空気相の液相への溶解によって飽和度の増加 を期待して行う.これまでいくつかの不飽和土構成モデルが提案されているものの.かなり高い飽和度領域でも 空気相は空気相のままで気体状態方程式を満たすものとしてモデル化されているため、背圧載荷による影響は空 気相を圧縮する効果のみしか与えられていなかった.ここでは、空気相の液相への溶解を表現できる不飽和土構 成モデルを提案する.具体的には、Borja⁴の三相混合体モデルに倣って、金澤⁵が土/水/空気連成問題として定 式化したモデルに、ヘンリー則を適用する.以下に、その手法をまとめる.

(1) 連続条件式

混合体理論に基づき,地盤材料を多相混合体としてモデル化した.土粒子間隙に気相として存在する気体と溶 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.気相としての気体について は、状態方程式より,

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

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

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

のように、気体の密度を表すことができる.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、

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

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

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

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 *α* =*s*, *f*, *a*, *la* で, 各相の 変数を区別する.

$$\dot{\overline{\rho}}_{\alpha} + \overline{\rho}_{\alpha} \operatorname{div} \boldsymbol{v}_{\alpha} = 0 \ \left(\overline{\rho}_{\alpha} = \phi_{\alpha} \rho_{\alpha} \right) \ (3)$$

ここで、 $\bar{\rho}_{\alpha}$ は部分密度、 ρ_{α} は実密度、 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、

$$\dot{n}S_r\rho_w + n\dot{S}_r\rho_w + nS_r\rho_w \text{div}\boldsymbol{v}_w = 0 \quad (4)$$

$$-19-$$

が得られる.ここで、nは間隙率、 S_r は飽和度である.

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、

$$-(1-S_r)\dot{\varepsilon}_v - n\dot{S}_r + \frac{n(1-S_r)}{p_a}\dot{p}_a + \text{div}\boldsymbol{v}_a$$

$$-\frac{S_rk_hp_a}{\rho_a}\dot{\varepsilon}_v + \frac{nk_hp_a}{\rho_a}\dot{S}_r + \frac{nS_rk_h}{\rho_a}\dot{p}_a + \frac{k_hp_a}{\rho_a}\text{div}\boldsymbol{v}_w = 0$$
(5)

が得られる.

空気及び水の出入は、ダルシー則が成り立つものとし、

 $\tilde{\mathbf{v}}_{w} = -k_{w}k_{rw} \cdot \operatorname{grad} h \quad (6a)$ $\tilde{\mathbf{v}}_{a} = -k_{a}k_{ra} \cdot \operatorname{grad} h_{a} \quad (6b)$ $h_{a} = \frac{p_{a}}{\rho_{w}g} \quad (6c)$ $k_{rw} = S_{e}^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(1 - S_{e}^{\frac{1}{2}m}\right)^{m} \right]^{2} \quad (6d)$ $k_{ra} = \left(1 - S_{e}\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - S_{e}^{\frac{1}{2}m}\right)^{2m} \quad (6e)$

で与えられる. ここで、 \tilde{v}_w , \tilde{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 ⁶⁾である. 式(6d)、(6e)は van Genuch-ten⁷⁾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8の提案するモデルを用いた. 有効応力は次式で表される.

$$\sigma' = \sigma_{net} + p_s \mathbf{1} = \sigma_{net} + S_e s \mathbf{1} \quad (7a)$$
$$\sigma_{net} = \sigma^T - p_a \mathbf{1} \quad (7b)$$
$$s = p_a - p_w \quad (7c)$$
$$S_e = \frac{S_r - S_{rc}}{1 - S_{rc}} \quad (7d)$$

ここで、 σ' は有効応力テンソル、 σ_{net} はネットストレステンソル、 p_s はサクション応力、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、 σ^{T} は全応力、 p_w は間隙水圧、 S_{re} は限界飽和度である。降伏関数は、次式で 与える。

$$f\left(\mathbf{\sigma}',\zeta,\varepsilon_{v}^{p}\right) = MD\ln\frac{p'}{\zeta p'_{sat}} + D\frac{q}{p'} - \varepsilon_{v}^{p} = 0 \quad (8a)$$

$$-20 -$$

$$\zeta = \exp\left[(1 - S_e)^{n_s} \ln a \right]$$
(8b)
$$MD = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0}$$
(8c)
$$p' = \frac{1}{3} \sigma' : \mathbf{1}$$
(8d)
$$q = \sqrt{\frac{3}{2}} \sigma_{\mathbf{D}} : \sigma_{\mathbf{D}}$$
(8e)

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

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、 $a \ge n_s$ 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、 σ_D は偏差応力テンソルである.

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⁹⁰のモデルを用い、次式で表される杉井、宇野¹⁰⁾のロジスティック曲線式を適用した.

$$\frac{S_r - S_{ra}}{S_{rf} - S_{ra}} = \frac{1}{1 + \exp(A + B\log_e \frac{s}{s_0})}$$
(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.

3. 三軸試験概要

本研究では、完全な飽和状態ではない高飽和度試料の B 値に及ぼす影響について検討することを目的としているため、本来実験前に行われる通水等の飽和度を上げる作業は行っていない. 試料には市販の粉末カオリンクレー(表・3.1,図・3.1)を用いた. 液性限界の2倍以上の含水比でスラリー化したカオリンクレーを、直径20cmの一次元圧密容器内で196kPaまで予圧密し、ブロックサンプルを作製した. このブロックサンプルを直径50mm、高さ100mmの円柱形に成型し、供試体(平均飽和度97%、平均間隙比1.00)とした.

4. B値に影響を及ぼす因子について

本章では、B値に影響を及ぼす因子について調べるため、まず応力状態を様々に変えてB値測定を行った.図-1に検討したケースを示す.まず、排水条件でセル圧を与えることで、所定の有効応力まで等方的に圧密し、そこから有効応力(ここではセル圧と背圧の差)一定の状態で、セル圧、背圧とも載荷し、図中のプロットで示された応力状態で非排水条件とし、セル圧増分10kPaを与えてB値測定を行った.このときのセル圧増分と計測された間隙水圧増分の比をB値としている.実験結果を全応力で整理したものが図・2である.この結果より、有効応力の低い白丸で示された実験ケースで多少ばらつきがあるものの、同じ有効応力下であれば背圧が大きいほどB値が

増加しているのが分かる.また,圧密終了後の有効応力が大きくなるほど,同じ全応力に対して B 値が小さくな るという結果を得た.ここで,初期有効応力と初期背圧の違いが B 値に及ぼす影響について詳細に調べるため, それぞれについて図・3 に示すケースに分けて実験及び解析を行った.図・3(a)のケースは,初期背圧は全て 100kPa であり,初期有効応力 100kPa, 150kPa, 200kPa, 300kPa とした場合をそれぞれ S100, S150, S200 及び S300 とする.また,図・3(b)のケースは,初期有効応力 100kPa で,初期背圧を 100kPa, 150kPa, 200kPa, 300kPa とした場合をそれぞれ B100, B150, B200, B300 とする.比較のために行う解析で用いる材料パラメータを表-1 に示す.また,図・4 に用いた水分特性曲線を示す.ここで,気相は全て空気であり,温度変化はないと仮定して いる.

4-1. 初期有効応力の違いが B 値に及ぼす影響

(a) 実験結果

図・5 に各ケースの B 値測定過程でのセル圧増分に対する間隙水圧増分を示す.図から,初期有効応力が大きく なるほど,B値測定時のセル圧載荷過程での間隙水圧増分が小さくなっていることが分かる.さらに、セル圧除荷 後、全てのケースで間隙水圧が B 値測定前よりも大きいまま消散せずに残留している.その結果,図・6 に示す有 効応力(セル圧と間隙水圧の差)変化が得られた.B値が1でないことから、全てのケースで B 値測定過程で有効 応力が変化していることから,B値測定による応力履歴が、供試体を過圧密状態にしてしまうといえる.ここで、 図・7 に B 値測定過程での応力・ひずみ関係を示す.横軸の体積ひずみ変化量は,B値測定過程での変形が等方的に 生じると考え、計測された軸ひずみ量の3倍を体積ひずみとして求めた結果である.図・6,7より,初期有効応力 が大きいほど B 値計測のセル圧載荷時の有効応力増分が大きく、このとき発生する体積ひずみは小さくなってい る.しかしながら,B値測定後の体積ひずみは大きくなっており、塑性体積ひずみが大きいことが分かる.これら の結果から,初期有効応力が 大きくなるほど,B値測定時の剛性が大きいため、全応力載荷に対して土骨格の分 応力の割合が大きくなり、その結果B値が小さくなることが分かる.また、それによって有効応力増分が大きく なり、塑性体積ひずみが生じやすくなると言える.

(b) 解析結果

図・8,9,10に各ケースのB値測定過程での間隙水圧増分,有効応力増分及び応力・ひずみ関係を示す.解析結 果は、セル圧の載荷経路にわずかなずれはあるものの、載荷後、除荷後とも実験で得られた間隙水圧の値も体積ひ ずみも定量的によく表現できていると言える.この結果からも、有効応力の違いによる土骨格剛性が B値に影響 が確認できる.図・11 は B 値測定過程の飽和度変化であるが,有効応力が大きいほど飽和度が小さくなっている. これは、図・12 に示す間隙空気圧からも分かるように、背圧一定で有効応力を与えると、間隙空気圧が高まる.気 体状態方程式から、圧力の高い気体ほど同じ圧力変化に対して体積変化が生じにくいため、結果的に飽和度が低 くなったと考えられる.また、飽和度が低く、間隙水圧応答が鈍いため、セル圧の載荷、除荷過程でのヒステリシ スが生じやすいことが分かる.図・13(a),(b),(c),(d)に式(7a)で示される不飽和土の有効応力と間隙比の関係を 表す.図中には圧縮指数、膨潤指数の傾きを表す直線を描いている.構成モデルでは、不飽和土の圧縮挙動は飽和 度の低下に応じて降伏応力は大きくなるものの、降伏後の圧縮線の傾きは等しくなる.しかしながら、図・11 に示 す通り、B 値測定時にも飽和度変化があるため、有効応力の大きい S200,S300では、セル圧載荷時に圧縮指数 以上の圧縮が生じているのが分かる.これは飽和度増加によって現れる塑性ひずみである.この塑性ひずみがあ るため、有効応力が大きいほど B 値測定後に非可逆なひずみが生じると説明できる.

4-2. 初期背圧の違いが B 値に及ぼす影響

(a) 実験結果

図-14, 15 に各ケースの B 値測定過程での間隙水圧増分及び有効応力増分の結果を示す. これらの結果より, 初期背圧が大きいほど,間隙水圧増分が大きくなるとともに, B 値測定過程でのヒステリシスループが小さく, B 値測定前後で間隙水圧及び有効応力に差があまり生じていないことが分かる. このことから,初期背圧を上げる ことで, B 値測定過程で生じる応力履歴を生じさせにくくすることができると考えられる.

(b) 解析結果

図-16, 17 に各ケースの B 値測定過程での間隙水圧増分及び有効応力増分を示す. セル圧載荷時の間隙水圧増

分および除荷後の残留間隙水圧とも、実験結果とよく一致しており、背圧の影響を表現できているといえる。図-18に飽和度変化を示すが、背圧は飽和度を増加させる効果があり、それがB値増加に寄与していることが分かる。 つまり、実際の実験でも背圧によって飽和度増加させる効果を期待することができるといえる。

4-3. B 値に関する検討

図-19 に、Case S と Case B について行った実験及び解析から得た全応力と B 値関係についてまとめた結果を 示す.また既往の研究として、三田地、工藤¹²⁾が、B 値測定方法の違いが 試験結果に及ぼす影響について実験的 に検討を行った結果を図-20, 21, 22 に示す. これらはそれぞれ, 初期有効応力の違い, 初期背圧の違い, セル圧 載荷による上がりB値とセル圧を一旦除荷して再載荷することによって得られる下がりB値の違いについての結 果である. ここで, 用いられた試料は本研究と同様, シルト質土である. 図-19 と図-20 より, 初期有効応力が大 きいほど B 値が小さくなる傾向が一致していることが分かる.また,図-19 と図-21 より,初期背圧が上がると, 両者共に B 値が大きくなる傾向を示した.これらの結果は図・2 で得た実験結果とも一致しており、有効応力の増 加は B 値を減少させ,背圧の増加は B 値を増加させるといえる.このことから,応力変化は B 値変化にも影響を 及ぼしており、B値が必ずしも飽和度の大きさに依るものではないといえる.ここで、図-20より、上がりB値よ りも下がり B 値のほうが小さくなる傾向があることが分かる. 前節で, B 値測定過程でヒステリシスを生じるこ とが分かった.これは、B値測定の載荷過程と除荷過程で間隙水圧応答が異なることを意味する.前節の結果で、 B 値測定後に間隙水圧が測定前よりも大きくなっており、 B 値測定除荷時のほうが、間隙水圧変化が小さく、除 荷時に B 値を測定すると, B 値が小さくなるといえる. これは, 下がり B 値が小さくなることに対応している. つまり、B 値測定時の有効応力が小さいほど、また背圧が大きいほど、B 値測定過程でのヒステリシスが小さくな るため、大きい下がり B 値が得られると考えられる.また、上がり B 値の測定を行う際、B 値測定前後で有効応 力変化が生じ、そのため応力履歴の影響が現れることが分かったが、下がり B 値にはこのような応力履歴の影響 が現れにくいため、実験精度の向上を目指した基準としては下がり B 値を用いることが望ましいといえる.図-23 に、解析結果から得た B 値と飽和度の関係について示す. 全体的に飽和度の上昇とともに B 値が大きく現れる傾 向が分かる.ただし、前述のように Case B に見られる背圧の効果は飽和度を上昇させるものの、Case S の有効 応力の増加は剛性の増大に影響を及ぼし、飽和度が低下しているのは間接的な影響であるため、図・23を唯一の関 係とみなしていいかどうかは判断が難しい.ここでの解析結果は、同じ初期状態に背圧、有効応力履歴を与えて得 たものであり,異なる初期状態(間隙比,飽和度,応力状態等)を与えた場合に,図-23の関係に一致するとは言え ない. それに関しては、今後の検討課題である. 以上の事を考慮して、 図・24 では、同じ初期状態に背圧、有効 応力を載荷することによる, B 値変動を,実験結果および解析結果からまとめたものである.

4-4. 繰り返し B 値測定の影響

B 値測定過程でヒステリシスを示し、応力増分によって B 値増分が異なることが分かったが、B 値を繰り返し 測定することで、この B 値や測定過程でのヒステリシスに及ぼす影響について検討を行う.

図・25 に実験・解析手順を示す. B 値測定は, セル圧 300kPa で背圧 100kPa のときと, セル圧 400kPa で背圧 200kPa の 2 ケース行い, それぞれ B 値測定時のセル圧増分を 50kPa として, 3 回 B 値測定を繰り返した. 図・26 にそれぞれ(a)背圧 100kPa, (b)背圧 200kPa のときの B 値測定過程における間隙水圧変化についての実験結果を示す. これらの結果から, 一回目の B 値測定では, 初期背圧が大きいほどヒステリシスが小さくなったが, B 値 測定を繰り返すと, ヒステリシスループに差がほぼなくなり, B 値測定前後でヒステリシスが生じなくなる結果 を得た. 実験を模擬した解析シミュレーションの結果 (図・27) でも同様の傾向を示した. このときの繰り返し回 数と B 値についてまとめた結果を図・28 に示す. 図・28 より, 実験・解析結果ともに, 1 回目の B 値測定 過程での飽和度変化について調べると, 図・29 に示す結果を得た. 図・29 より, 背圧が大きいほうが飽和度が大きく, このとき図・28 より B 値も大きくなっていることが分かる. また, B 値測定 1 回目では測定後の飽和度が大きくなり, 2 回目以降はほとんど飽和度変化に差が生じていないことがわかる. これらの結果より, B 値測定を繰り返すことで, 飽和度及び B 値が一定値に落ち着き, また, 一度降伏して弾性領域が拡大することで, 二回目以降はヒステリシスがなくなると考えられる.

さらに、繰り返し B 値測定でのセル圧増分を 10kPa として同様の実験及び解析を行った. 初期背圧 100kPa, 200kPa のときの繰り返し回数-B 値関係の実験・解析比較検討結果をそれぞれ図-30, 31 に示す. 図-30 から、実

験・解析結果共にセル圧増分が小さい方が繰り返し載荷後の B 値が大きくなっていることが分かる.また,実験 結果に着目すると,セル圧増分が小さいとき,B 値測定を繰り返しても,B 値にほとんど変化がないことが分か る.前述のように,1回目の B 値測定には,塑性ひずみ発生による影響が含まれるが,セル圧増分が小さい場合 は,この塑性ひずみ量も小さくなることが,セル圧増分の違いとなって現れると考えられる.解析結果では,この 塑性ひずみ増分を過大評価しているため,1回目の B 値が大きくなっている.図-31では,セル圧増分が小さい方 が B 値が小さい結果となっているが,これも設定した降伏応力が小さく,1回目から塑性ひずみ増分を大きく評 価した結果と考える.

以上から、セル圧増分は B 値に影響を及ぼし、セル圧増分が大きいほど応力状態により異なる B 値を得てしま うといえる.そのため、初期応力状態の違いが B 値に及ぼす影響を小さくするために、セル圧増分を小さくする 方が良いといえる.

5. 結論

三軸試験で計測される B 値に及ぼす応力状態や応力履歴の影響を明らかにするために,種々の応力条件で B 値 計測を行った.また,このときに現れる応力の影響について力学的な解釈を行うために,数値シミュレーションを 行った.ここでは,高い飽和度領域での気相,液相の挙動を精緻に表現するために,既存の不飽和土構成モデル に,気相から液相への溶解を表現するふいっくそくを適用し,新たなモデルを提案した.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,一定の応力載荷プロセスを設定することの重要性を 示唆している.また,B値測定過程で応力履歴を残してしまうことが分かり,B値測定時の応力の与え方にも注意 が必要であることが分かった.B 値について,大きい B 値を得るためには,初期に背圧を大きくし,初期有効応 力がなるべく小さい条件で B 値測定を行うことが効果的であるといえ,非排水試験での敏感な間隙水圧応答を得 ることができる.しかしながら,供試体の飽和状態の絶対的な評価手法としては,値は小さくなるものの,B 値測 定を繰り返し,応力履歴の影響を除去することが必要であるといえる.この原稿は Soil&Foundation に投稿した ものである.

参考文献

- 1) Skempton, A.W.: The Pore-pressure coefficients A and B, *Geotechnique*, Vol.4, No.4, pp.143-147, 1954.
- 2) Terzaghi, K.: Theoretical soil mechanics, John Wiley & Sons., New York, pp.11-15, 1943.
- Gualtiero Baldi. & Roberto Nova.: Membrane penetration effects in triaxial testing, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 110, No.1, 1984, pp.403-420.
- 4) 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.
- Kawai, K. Iizuka, A & Kanazawa, S. : Expression of mechanical characteristics in compacted soil with soil/water/air coupled F.E. simulation. *Proc. of the 18th ICSMGE*, 1129-1132, 2013.
- 6) 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.
- 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.
- Ohno, S., Kawai, K. & Tachibana, S. : Elasto-plastic constitutive model for unsaturated soil applied effective degree of saturation as a parameter expressing stiffness, *Journal of JSCE*,63(4), 1132-1141, 2007. (in Japanese).
- 9) Kawai, K., Iizuka, A., Hayakawa, E. & Wang, W. : Non-uniform settlement of compacted earth structures caused by the deformation characteristics of unsaturated soil on wetting, *Soils and Foundations*, 47(2), pp. 195-206, 2007.
- Sugii, T. & Uno, T. Modeling of hydraulic properties for unsaturated soils. Proc. Symp. Permiability of Unsaturated Ground, Japan, pp. 179-184. 1996. (in Japanese)
- 11) Alan. W. Bishop.& D. J. Henkel: *The measurement of soil properties in the triaxial test*, Edward Arnold (publishers) LTD, 1957.

12) 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.

著者:1) 田中博之、工学研究科市民工学専攻、学生;2) 杉山友理、工学研究科市民工学専攻、学生;3) 飯塚 教、都市安全研究センター、教授



写真-1 スマート三軸試験機 表-3.1 力学試験結果

$\rho_s(g/cm^3)$	$\rho_{d\max}(g/cm^3)$	$w_L(\%)$	$w_p(\%)$	W_{opt} (%)
2.716	1.46	61.8	27.7	26.9



図-3.1 粒度曲線



-25-





図-4 水分特性曲線

表-1 材料パラメータ

λ	K	M	e_i
0.1074	0.0107	1.4	1.0
а	n_s	k_w (m / day)	k_a (m / day)
90	1.0	0.6	3.0
k_h	M^*	R^*	Т
0.173	1.28	8.31	288.15

 $k_h (\text{mol} / \text{m}^3 \cdot \text{kPa}), M (\text{kg} / \text{mol}), R (\text{J} / \overline{\text{K} \cdot \text{mol}}), T(\overline{\text{K}})$







-27-



50



図-20 初期有効応力の違いによる B 値¹²⁾



図-22 上がり・下がり B 値の違い¹²⁾

-Case S -Case B Experiment Simulation

100

 $\Delta \sigma', \Delta p_w$

図-24 応力増分-B 値増分

200

0.3

0.2

 Δp_w

0



図-21 初期背圧の違いによる B 値¹²⁾











図-30 繰り返し回数-B値(初期背圧 100kPa)

Number of cycle

図-31 繰り返し回数-B値(初期背圧 200kPa)

Effects of stress conditions on the B-value measurement

Hiroyuki Tanaka Yuri Sugiyama Atsushi Iizuka

Abstract

This thesis describes examined the B-value .Design of civil engineering structures, most basic information in construction are those obtained by soil tests with the soil survey and it. There is a triaxial test on one of the shear test that is most prevalent today in the soil test. When performing a three-axis test, B-value measured after installation specimen is used to determine the degree of saturation of the specimen. If saturation of the specimen is low, it is difficult to generate pore pressure gauge side, to become behavior effective stress path rises, it is impossible to obtain the correct shear strength. However, such stress conditions at the time the B-value measured are not normalized, is not conducted detailed studies also affects the difference in measurement technique is the result. In this way there are many points of unsolved for B-value.

Therefore, in this study, using a smart triaxial testing machine capable of performing precise stress control, it is carried out under various conditions B-values measured for specimens prepared from kaolin clay and verified. Furthermore, to perform numerical simulation simulating the B-value measurement test, a comparison study of experiments and analysis. Just by numerical simulation and saturation change and suction changes that do not know the experiment, to examine the impact of various types of stress on the B-value.

©2016 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.