

軟岩の間隙圧係数 B と飽和度の関係Relationships between Pore Pressure Coefficient B and the Degree of Saturation of Soft Rock

まつ 村 しん いち ろう み き しげる
松 村 真 一 郎* 三 木 茂*
にし がき よし ひこ
西 垣 好 彦**

1. ま え が き

最近、土木構造物は平地から山岳部へ、また平地では構造物の大型化等に伴い基礎地盤が軟岩となることが多くなってきた。その結果軟岩地盤の力学特性を把握するため、室内三軸圧縮試験が実施されるケースが増加してきた。ところが軟岩の飽和の判定は土質材料と同様にとらえられ、よく知られる Skempton (スケンプトン) の間隙圧係数 B (以後 B 値と略す) の測定が実施されることが多い。しかし軟岩は成因により鉱物組成が様々であり、一軸圧縮強度も数 kgf/cm^2 から 200 kgf/cm^2 程度まで広い範囲にあるため、骨格構造と間隙流体部の圧縮量の相対関係で決定される B 値で軟岩の飽和度を一意的に判定することには無理がある。

以上の状況から、軟岩の飽和度をいかに判定するかは今後重要な課題である。著者らはこの視点に立って、岩石物性を任意の拘束圧下で非破壊的に調べることが可能な三軸超音波速度測定システムを開発し、種々の岩石の物性値の検討を実施してきた¹⁾。今回このシステムを使って、弾性波速度を利用して軟岩の B 値を求め、飽和度との対比を行ったので報告する。

2. 理論式による B 値と飽和度の算出2.1 B 値の算出

飽和時の B 値は Bishop (ビショップ)²⁾、岡³⁾ がそれぞれ別の導入方法により式(1)を得ている。

$$B = \frac{1}{1 + n(C_w - C_s)/(C_b - C_s)} \quad \cdots (1)$$

ここに C_b は排水状態での骨格構造全体の圧縮率、 C_s は固体実質部(土粒子)の圧縮率、 C_w は間隙水の圧縮率 ($48 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{kgf}$)、 n は試料の間隙率である。したがって、飽和時の B 値は圧縮率 C_b 、 C_s および C_w の相対関係で決定されることが分かる。また C_b は排水時の体積弾性係数 k_D の逆数で次式で与えられる。

$$C_b = \frac{1}{k_D} = \frac{\Delta V/V}{\Delta \sigma} \quad \cdots (2)$$

ここに $\Delta \sigma$ は骨格構造全体に作用する圧力増分、 $\Delta V/V$ は

$\Delta \sigma$ による体積ひずみである。さらに非排水状態での骨格構造全体の圧縮率 C_u は、飽和状態での間隙の体積変化より決まるとして、多孔質弾性体理論から石原⁴⁾ は次式で与えている。

$$C_u = \frac{C_s(C_b - C_s)/n + C_b(C_w - C_s)}{(C_b - C_s)/n + (C_w - C_s)} \quad \cdots (3)$$

一方線形弾性体に対して、弾性波速度 V_p 、 V_s とせん断弾性定数 G 、体積弾性係数 k の間には次の関係がある。

$$V_p = \sqrt{\frac{g(k + \frac{4}{3})}{\rho}} \quad \cdots (4)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{gG}{\rho}} \quad \cdots (5)$$

したがって k は、

$$k = \frac{\rho(V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2)}{g} \quad \cdots (6)$$

となる。ここに ρ は試料の湿潤密度、 g は重力加速度である。石原は弾性波伝播時は非排水状態であるとして、次式を与えている。

$$C_u = \frac{1}{k} \quad \cdots (7)$$

固体実質部の圧縮率 C_s は $2.0 \sim 2.7 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{kgf}$ と狭い範囲にあることから、試料の湿潤密度、間隙率および飽和時の V_p 、 V_s が測定できれば、式(6)、(7)より C_u 、これを式(3)に代入して C_b がそれぞれ既知となり、式(1)から飽和時の B 値(以下 B_{ps} と略す)が求まる。

なお不飽和状態では B 値は式(1)の C_w が流体の圧縮率 C_f になる。 C_f は試料の飽和度を S_r とすれば

$$C_f = S_r C_w + (1 - S_r) C_g \quad \cdots (8)$$

となる。ここに C_g は空気の圧縮率で $0.69 \text{ cm}^2/\text{kgf}$ である。 C_f は $S_r = 1.0$ で C_w に、 $S_r = 0$ で C_g に等しくなり、式(1)から飽和度が低いほど B 値は小さくなることが分かる。

2.2 飽和度 S_r の算出

飽和度は $S_r = w \cdot G_s / e$ で与えられ、試験終了後に試料の密度 ρ_t 、含水比 w および真比重 G_s を測定することで求められる。しかし試験過程で通水したり背圧を負荷した後の飽和度はこの式では求められない。不飽和試料に背圧を加えると間隙内の空気は、圧縮されて体積が減少すると同時に間隙水に溶け込む。前者を Boyle (ボイル) の法則、後

*基礎地盤コンサルタンツ(株) 関西技術センター

**基礎地盤コンサルタンツ(株) 関西技術センター 所長

者を Henry (ヘンリー) の法則で考えると、次式で飽和度が算出できる^{5),6)}。

$$S_r = \frac{1}{1-H} - \frac{P_0}{P_0 + \Delta P} \left(\frac{1}{1-H} - S_{r0} \right) \quad \cdots \cdots (9)$$

ここに P_0 は大気圧 ($P_0 \approx 1 \text{ kgf/cm}^2$)、 ΔP は作用させた背圧、 S_{r0} 、 S_r はそれぞれ背圧作用させる前後の飽和度、 H は Henry 係数 ($H \approx 0.02$) である。河野、西垣⁷⁾ は以上の考えを室内加圧型変水位透水試験に利用できるとし、 S_{r0} を次式で算出している。

$$S_{r0} = \frac{1}{1-H} - \frac{\Delta V(P_0 + \Delta P)}{V_{v0} \cdot \Delta P} \quad \cdots \cdots (10)$$

$$V_{v0} = V \left(1 - \frac{\rho_a}{G_s} \right) \quad \cdots \cdots (11)$$

ここに V 、 V_{v0} はそれぞれ供試体の初期体積と間隙体積、 ΔV は背圧 ΔP により供試体内に流入する水量および ρ_a 、 G_s は試料の乾燥密度、真比重である。結局供試体の飽和度は式(10)、(11)を式(9)に代入して次式となる。

$$S_r = \frac{1}{1-H} - \frac{P_0 \cdot \Delta V}{\Delta P \cdot V_{v0}} \quad \cdots \cdots (12)$$

ただし、上記の誘導には以下の仮定が必要である。

- ① 供試体の間隙はすべて連結している。
- ② 供試体を構成する固体実質部は非圧縮性である。すなわち、背圧負荷により間隙内空気のみが圧縮され背圧負荷前後の供試体全体積は不変である。

①の仮定は多孔質弾性体理論そのものであり、②は前述した固体実質部の圧縮率 $C_s \approx 0$ に相当し、背圧が小さい範囲 ($0 \sim 8 \text{ kgf/cm}^2$) で十分成り立つと考えてよい。したがって以上の仮定は土のみならず、多孔質な軟岩でも十分適用できると考えられる。

以上から、供試体の初期体積 V 、乾燥密度 ρ_a と真比重 G_s を知れば、三軸セル内にて背圧増分 ΔP による流入水量 ΔV を測定することで、背圧負荷後の飽和度は式(12)で求められる。ただし、三軸セル中で実施する場合は吸排水経路中の気泡はもちろんであるが、供試体とメンブレン間の気泡は測定値の精度に大きく影響するので、事前に十分除去する必要がある。また式(12)の誘導にあたっては不飽和を前提としているので、 $S_{r0} \approx 100$ の場合は適用できない。

3. 試験概要

3.1 試験装置

2.1で示したように飽和時の V_p 、 V_s を知れば供試体の B 値が計算で求められる。しかし従来の超音波伝播速度測定器は主に硬岩を対象としていたため、軟岩ましてや土砂では超音波が減衰して測定ができず、また拘束圧下での測定も不可能であった。以上の状況から著者らは三軸応力下で測定できる超音波伝播速度測定システムを開発した。システムの概略図を図-1に示す。

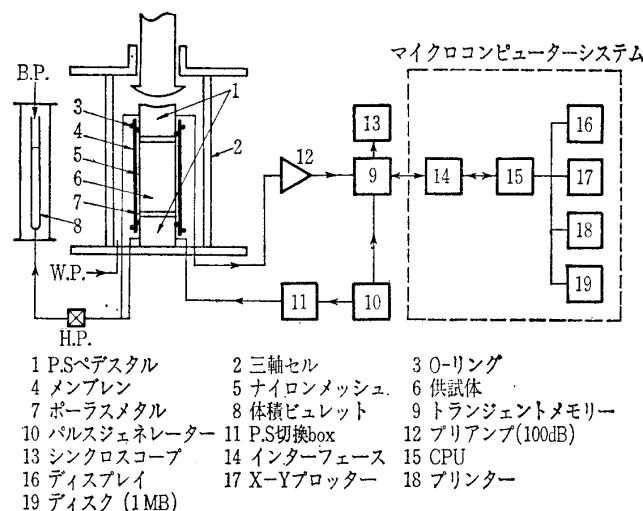


図-1 超音波速度測定システム

本システムの特徴は、第1に三軸セル内の上部および下部ベDESTAL (径 50 mm、高さ 50 mm) の中に、P波とS波用のトランスデューサーを一括して内蔵⁸⁾ していることである。これでベDESTALを交換することなくP波、S波速度の測定が可能になり、かつ硬岩から軟岩、土砂まで広範囲な測定を拘束圧下で測定できる。第2にパソコン処理により、波形データの保存、スタッキング処理および図化等ができることである。したがって三軸セル内にセットした供試体が飽和、不飽和に関係なく、任意の拘束圧 (耐圧 100 kgf/cm^2) 下で、 V_p 、 V_s の測定が可能である。

このシステムの三軸セル部および圧力系は通常の三軸圧縮試験で使用するものと同じであるため、背圧負荷による飽和度の算出および間隙水圧計を利用して B 値の測定が可能である。なお、 B 値を測定する場合、吸排水パイプの圧力膨張が B 値を低下させる原因となるので、パイプの材質はステンレス鋼または銅のものを使用した。また背圧負荷による流入水量を測定する場合、供試体周りのろ紙の体積変化は無視できないので、代わりにナイロンメッシュを使用した。

3.2 試験方法

試験は前節で紹介したシステムを利用し、任意の応力状態で、①弾性波速度 V_p 、 V_s 、②背圧増加による供試体内に流入する水量 ΔV 、③間隙水圧 Δu をそれぞれ測定した。応力負荷パターンは次の2つである。

(a) 有効拘束圧一定試験 ($\sigma_3' = \text{const}$)

背圧をかけず、設定した有効拘束圧 (側圧から背圧を引いた値 σ_3') で圧密した後、 σ_3' を変えないように背圧を $0 \sim 8 \text{ kgf/cm}^2$ まで段階的に増加し、各背圧段階で①②③の項目を測定した。その後背圧を0に戻し、次の有効拘束圧段階まで再圧密し、同じ背圧段階のもとで再度①②③の項目を測定した。有効拘束圧段階は2, 5, 10 kgf/cm^2 である。

(b) 有効拘束圧増加試験 (背圧 = const)

背圧 2 kgf/cm^2 一定で側圧を0から 30 kgf/cm^2 まで段

表一 物性値一覧表

岩 種	岩種記号	湿潤密度 g/cm ³	間 隙 率	一軸強度 kgf/cm ²
新第三紀砂岩	S-1	2.312	0.214	12
硬質砂岩	S-2	2.445	0.121	700
新第三紀泥岩	M-1	2.270	0.224	25
珪藻土	M-2	1.641	0.541	20
多孔質凝灰岩	TUFF-1	2.144	0.247	120
凝灰角礫岩	TUFF-2	2.211	0.240	10
モルタル	MO	1.974	0.433	100
ポーラスストーン	PS	2.407	0.455	—

階的に等方圧密し、圧密終了後各段階で①③の項目を測定した。

試験に使用した供試体の物性値を表一に示す。このうち、(a)の試験に使用した供試体はS-1, M-1 試料で、背圧による飽和度の変化を調べるため事前に飽和させていない。一方、(b)の試験は表一の全試料に対して試験前に飽和作業を行った。飽和方法は以下のとおりである。S-1, M-1 試料は水浸で試料が流出するため、セット後炭酸ガスを流入し空気と置換した後通水した。その他の試料では水中で12時間程度気泡が出なくなるまで真空脱気し、その後4日以上水浸させた。以後、これらの試料を飽和試料とみなす。

4. 弾性波速度とB値に及ぼす背圧効果

試料の間隙に水と空気が存在する場合、背圧負荷で間隙空気は圧縮されるが、この過程は試料内を伝播する弾性波の挙動から理解できる。図-2は σ'_3 が2 kgf/cm²のもとで、背圧の増加によるS-1 試料のP波の観測波形である。P波の到達時刻Tは波形の立下り(▼印)で判定するが、図では背圧が2 kgf/cm²以下では振幅が小さく不明りょうである。この場合は波形データーを再度拡大またはフィルター処理して判別した。図から背圧の増加でP波の到達時刻が速くなる傾向が顕著に分かる。

図-3に上記の関係を背圧に対し V_p および各背圧段階で測定したB値と共に示した。また図-4はM-1 試料の

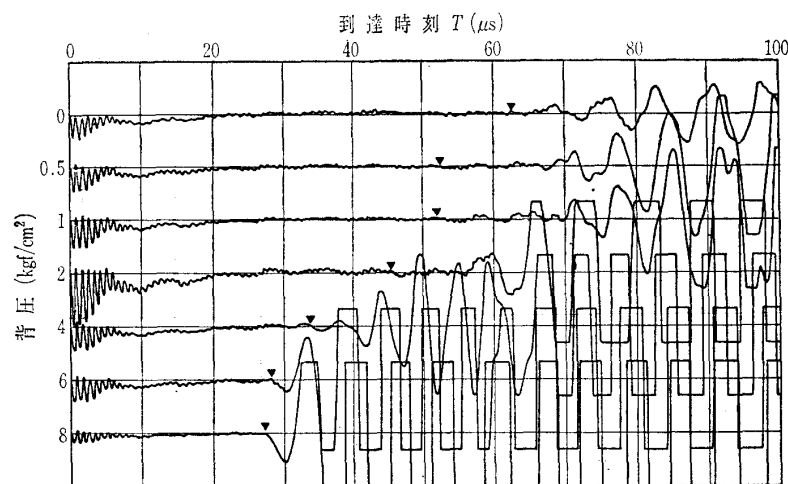


図-2 P波の観測波形 (S-1 試料)

結果である。図よりS-1 試料は σ'_3 が2 kgf/cm²で前述した V_p の速度増が顕著であるが、その後の段階では V_p はあまり増加しない。 V_s は式(5)で示されるように試料の剛性に依存するため、有効拘束圧一定のもとではあまり変化しない。一方M-1 試料では背圧の増加で V_p , V_s の変化はS-1 試料に比べ小さい。両試料で V_p の変化の傾向が異なるが、これは試料の初期飽和度 S_{r0} の差によると考えられる。すなわち、式(10)で求めた両試料の S_{r0} はS-1 試料で74.4%, M-1 試料で91.5%であり、M-1 試料の方が飽和に近い。両試料で実測したB値は背圧増加で上昇し、背圧6~8 kgf/cm²程度で収束する傾向を示すが最終値で0.8~0.9の範囲にある。また有効拘束圧が高いほど同

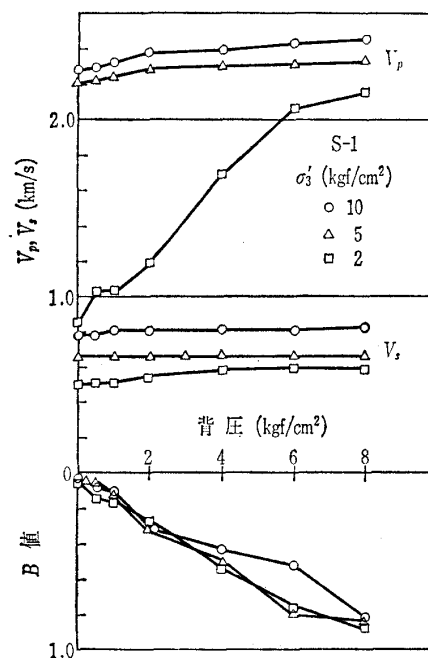


図-3 背圧と弾性波速度, B値の関係 (S-1 試料)

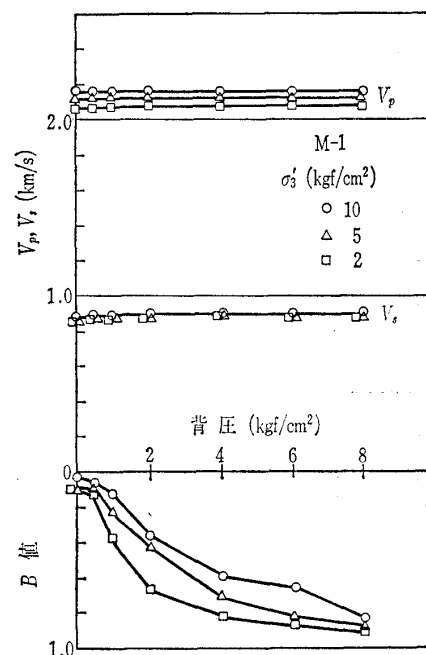
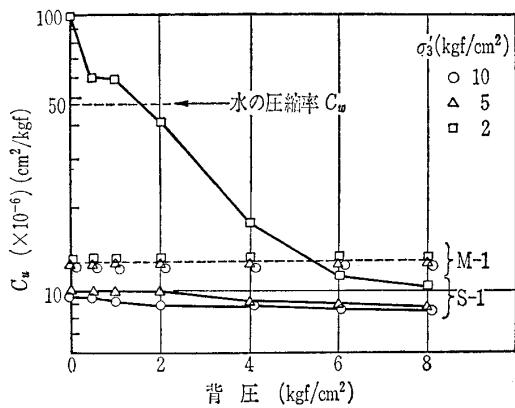


図-4 背圧と弾性波速度, B値の関係 (M-1 試料)

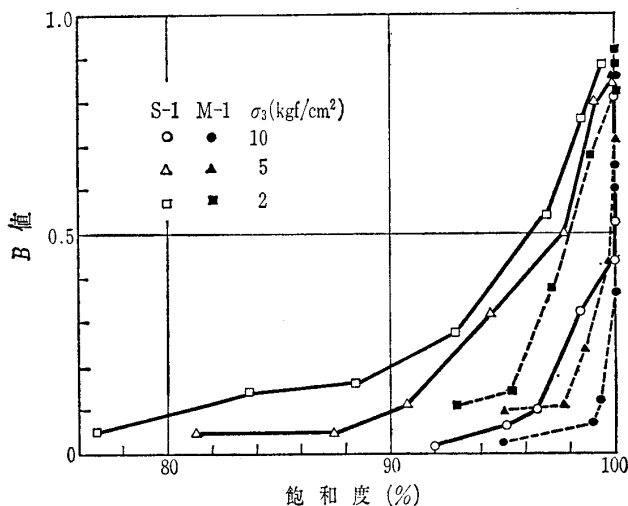
図-5 背圧と圧縮率 C_u の関係

じ背圧で B 値は低い値を示すが、 B 値の背圧に対する変化は有効拘束圧に関係なく 0~0.9 と変動幅は大きい。これは V_p の傾向と異なる。

非排水状態での試料の圧縮率 C_u は図-3, 4 の V_p , V_s を使って式(6), (7)から求められる。図-5 に両試料で求めた C_u と背圧の関係を示す。 V_s は背圧の増加に対して両試料ともほぼ一定値を示すので、 C_u は V_p のみの関数となることから C_u の変化は V_p の変化に対応する。図は有効拘束圧一定であれば、試料の非排水状態での圧縮性は V_p の変化で知ることができることを意味する。図の S-1 試料に見られる C_u の顕著な低下は、背圧で間隙内空気が圧縮率の小さい水に変わり結果として骨格構造全体の圧縮率が小さくなるからである。したがって、 C_u が一定の最小値に達したことは試料が飽和したことにほかならない。

5. 飽和度と B 値の関係

背圧負荷で供試体内に流入する水量を測定すれば、式(12)から各背圧段階での飽和度 S_r が計算できる。そこで飽和度と B 値の関係を調べるため、S-1, M-1 試料を多孔質弾性体と仮定して図-3, 4 の関係を S_r で再整理し図-6 に示す。図より飽和度に対応する B 値の変化が顕著になるのは、有効拘束圧によっても異なるが S-1 試料で S_r

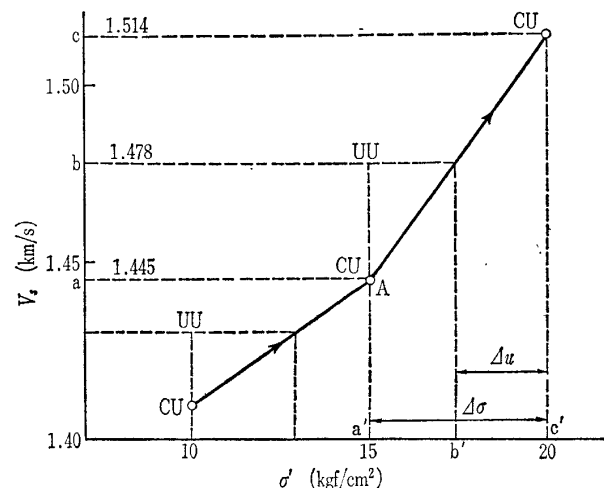
図-6 飽和度と B 値の関係

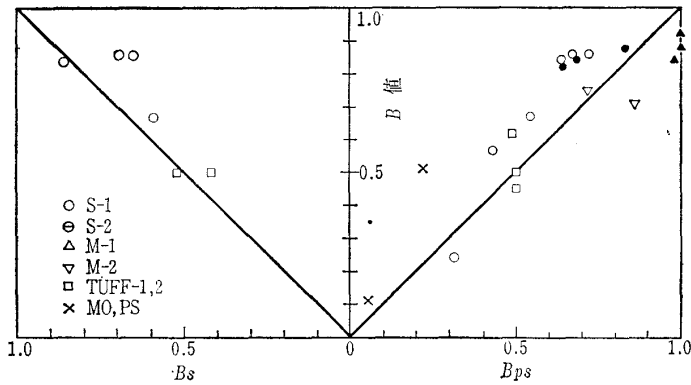
96%, M-1 試料で 98% 程度からである。これは飽和度と B 値に線形関係が成立しないこと、および B 値は若干の気泡にも敏感に反応することを意味し、 B 値測定には厳密な試験が要求されることが分かる。一方図-6 の S_r の範囲で、図-3, 4 から S-1 試料の $\sigma'_3 = 2 \text{ kgf/cm}^2$ を除き V_p はほぼ一定であることから、飽和度の上昇に伴う V_p の収束傾向は B 値の収束傾向より早く現れることが分かる。これは V_p が B 値ほど敏感に気泡の影響を受けにくいことを意味し、P 波が空気より伝播しやすい水の部分を通過する性質があることで説明できる。

以上から、実測した B 値は図-3, 4 から背圧増加で収束傾向を示すこと、図-6 から飽和度が 96~98% とかなり高い状態から上昇し始めることを考えると、試料の飽和は、背圧増加による実測 B 値の収束を確認することで判定できると考えられる。

6. 弾性波速度から求めた B 値と実測値の関係

2.1 で B 値が飽和時の弾性波速度から計算できることを示したが、 V_s が骨格構造の剛性、すなわち有効応力に依存することを利用すれば、実測した V_s から B 値が計算できる (以後 B_{ps} と略す)。図-7 は有効拘束圧増加試験で得られた V_s と有効拘束圧の関係を TUFF-1 試料で示したものである。図中点 a は $\sigma'_3 = 15 \text{ kgf/cm}^2$ で圧密が完了した後の V_s (CU 状態)、点 b はその後非排水状態で拘束圧を 5 kgf/cm^2 増加させた時の V_s (UU 状態)、さらに点 c は前記拘束圧で圧密終了後測定した V_s (CU 状態) をそれぞれ示している。図から V_s は UU 状態でも上昇 (a → b) することから、狭い応力範囲で有効応力と V_s に線形関係が成立すると仮定すれば、 V_s の上昇は有効応力の増加 (a' → b') に対応する。さらに圧密過程での V_s の上昇 (b → c) は、発生した過剰間隙水圧 Δu の消散、すなわち有効応力の増加 (b' → c') に対応する。したがって B_s は $\overline{b'c'}$ と $\overline{a'c'}$ の比、 V_s で表現すれば bc/ac で与えられる。また同時に図-7 の点 A で測定した間隙水圧 Δu と V_p か

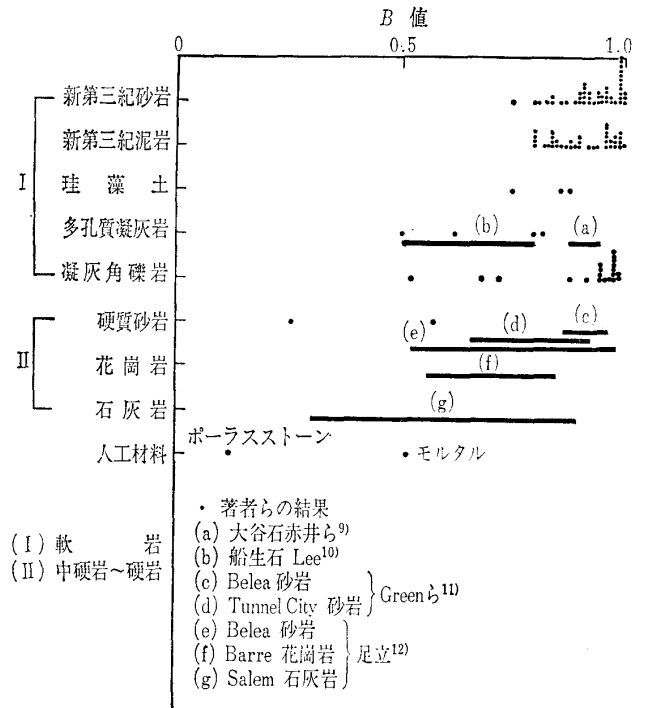
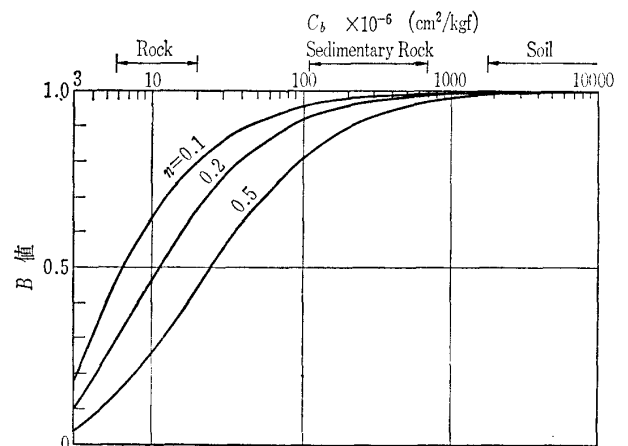
図-7 有効応力と V_s の関係

図-8 B値と B_{ps} , B_s の関係

ら実測 B 値と B_{ps} がそれぞれ求まる。図-8 は実測 B 値と B_{ps} , B_s を比較したものである。図中黒ぬきのプロットは、図-3, 4 で背圧 8 kgf/cm^2 時を飽和状態と仮定して求めた B_{ps} と B 値の関係を示している。ただし、 B_{ps} の計算に用いる固体実質部の圧縮率 C_s は、ポラスストーンで $0.58 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{kgf}$ 、その他の試料で $2.0 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{kgf}$ とした。図よりデータ数は少ないが実測 B 値は B_{ps} , B_s と同程度の値となることが分かる。これは飽和時の V_p , V_s を測定すれば B 値を概略で推定できることを示している。また前述したように、不飽和試料では背圧の増加で B 値より V_p の方が早く収束する傾向があるので、 V_s がほとんど変化しないことを考えれば、 V_p , V_s から求まる B_{ps} は実測した B 値より先に一定値を示すことになる。したがって、背圧増加による B 値の収束値は B_{ps} であらかじめ知ることができ、 B_{ps} は飽和の判断材料の 1 つになると考えられる。

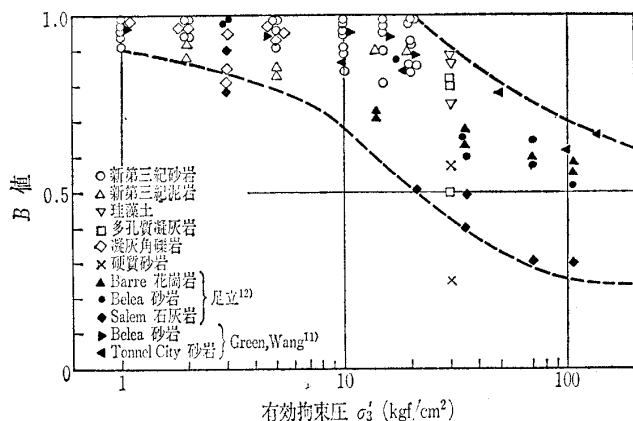
7. 考 察

図-9 は飽和試料に対して実測した B 値を軟岩から硬岩まで岩種別に整理したもので、過去の文献データ^{9), 10), 11), 12)} も併記してある。ただし B 値測定時の有効拘束圧と背圧はそれぞれ異なっている。図より著者らの結果では、新第三紀の砂岩および泥岩で B 値はおおむね $0.8 \sim 1.0$ 、凝灰角礫岩で $0.9 \sim 1.0$ であるが、その他の岩ではデータが少ないが低い B 値が測定された。一方過去のデータは多孔質凝灰岩で著者らと近い値を示すが、中硬岩から硬岩で B 値が 0.9 を越えるものもある。著者らの試料の飽和方法が一般に実施されている軟岩、硬岩の飽和方法であるのに対し、Green (グリーン) ら¹¹⁾ は飽和に Kerosene (ケロシン) を使用していること、また足立¹²⁾ は供試体セット後、下端より上端へ脱気水を 50 kgf/cm^2 の高圧力で圧入していることなど、厳密な B 値測定を行っている。言いかえると、中硬岩、硬岩でも完全飽和すれば、低拘束圧下で B 値はかなり大きい値を示すことを意味している。 B 値は骨格構造全体の圧縮率 C_b と間隙率 n を用いて式(1)で決まるので、式(1)の C_b と B 値の関係を間隙率をパラメーターにして図-10 に示した。ただし $C_s = 2.0 \times 10^{-6}$, $C_w =$

図-9 岩種別にみた B 値図-10 圧縮率 C_b と B 値の関係

$48 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{kgf}$ とした。 C_b は材料により変動範囲が広く、また式(2)から骨格全体に作用する圧力増分によっても左右されるが、図には岡³⁾ が過去のデータをもとに整理した材料別の C_b の値の範囲を目安として示した。図より B 値は C_b が小さいほど低下し、 C_b が同じであれば間隙率が大きいほど低い値をとる。これは一般に軟岩に比較し間隙率の小さい硬岩で、 C_b が同程度であれば B 値は硬岩の方が大きい値をとり得ることを意味し、図-9 の実測値の傾向と一致する。

B 値は前述したように骨格構造の圧縮性で決まるため有効応力に対して相関がある。図-11 は飽和した軟岩と硬岩に対して実測した B 値と有効拘束圧の関係を示したものである。ただし B 値測定時の背圧は著者らのデータで $2 \sim 8 \text{ kgf/cm}^2$ 、足立のデータで 28 kgf/cm^2 である。図より B 値は岩種によらず有効拘束圧の増加で減少する。



図一11 有効拘束圧とB値の関係

以上から、岩石のB値は試料の間隙率、圧縮率といった基本物性のみならず、外部要因として試料に作用する有効拘束圧に対しても大きく影響される。そのため飽和の判定にB値を利用する場合は絶対値では評価できないと考えられる。

足立は中硬岩から硬岩に脱気水を圧流し、かつ背圧増加で実測したB値が一定の収束をみる時点で、試料の飽和を判断することを提案している。軟岩の場合、上述の圧流方法は試料の欠落をまねく恐れがあり圧流設備も必要とするため、今回実施したように自然通水に頼らざるを得ない。図一11の新第三紀の砂岩、泥岩はこの方法をとっているが、式(12)で求めた飽和度は99%以上であり、通水していない場合(図一6)でも、初期飽和度が例えばS-1試料で70%程度以上あれば、背圧を8 kgf/cm²以上作用させることで実測B値はほぼ一定値を示す。よって初期飽和度を3.2で述べた方法で通水すれば、背圧は8 kgf/cm²以下で試料の飽和が得られる。したがって軟岩の飽和の判定は、背圧を段階的に増加し実測されるB値の収束をもって判断するのが適切である。なお試料が多孔質弾性体と仮定できるならば、背圧増加による流入水量から式(12)を利用して飽和度を直接求めておくことが望ましい。

以上、定量的評価には至らなかったが定性的にはいくつかの知見が得られたので、以下要約する。

- (1) 軟岩のB値と飽和度の関係を検討するため、不飽和試料に対して有効拘束圧一定試験を実施し、背圧増加による実測したB値と弾性波速度 V_p の変化、および試料内への流入水量から求めた飽和度とB値、 V_p の変化を調べた。その結果B値は背圧の上昇で収束傾向を示し、飽和度が96~98%程度から顕著に増加することから、B値は気泡に対して敏感である。一方 V_p は背圧の上昇でB値と同じく増加するが、飽和度が80%以上ではほぼ一定値を示した。
- (2) 飽和した軟岩で弾性波速度から求めた B_{ps} と B_s は

実測値と比較的一致し、飽和時のB値は弾性波速度からある程度推定できる。

- (3) 飽和した岩石で測定したB値は岩種により様々であり、骨格構造の圧縮率、間隙率および有効拘束圧の影響を強く受ける。岩石の正確なB値を求めるためには脱気水の試料内圧流や背圧を負荷することが必要であるが、飽和の判定にB値を利用する場合は絶対値では評価できない。むしろ上述(1)の結果から背圧増加でB値の収束を確認すること、および(2)の結果からあらかじめB値の収束値を弾性波速度から推定することが適切であると考えられる。なお多孔質軟岩の飽和は上述の判定方法に加えて、式(12)から直接飽和度を算定するのも1つの方法かと思われる。ただし式(12)の適用にあたっては精度よく試料の体積変化を測定する必要がある。

最後に、超音波伝播速度測定システムの制作にあたり御指導いただいた大阪市立大学理学部、中川康一先生、また実験に協力いただいた基礎地盤コンサルタント榎栗津和也氏に末筆ながら感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 松村真一郎・三木 茂・西垣好彦：岩石の超音波伝播速度に及ぼす圧力効果について 第18回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 296~300, 1986.
- 2) Bishop, A.W.: The Influence of an Undrained Change in Stress on the Pore Pressure in Porous Media of Low Compressibility, *Geotechnique* 23, No. 3, Vol. 13, pp. 435~442, 1973.
- 3) 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.
- 4) 石原研而：土質動力学の基礎，鹿島出版会，第4章.
- 5) Low, J. and Jonson, T.C.: Use of Back Pressure to Increase Degree of Saturation of Triaxial Test Specimens, *Proceeding, ASCE, Research Conf. on The Shear Strength of Cohesive Soils*, Boulder, Colo., pp. 819~836, 1960.
- 6) Mitchell, J.K. and Hopper, D.R.: Permeability of Compacted Clay, *ASCE*, Vol. 91, SM4, pp. 41~65, 1965.
- 7) 河野伊一郎・西垣 誠：室内透水試験法に関する2,3の考察，土質工学会論文報告集，Vol. 22, No. 4, pp. 181~188, 1982.
- 8) Nakagawa, K., Nakaya, S. and Miki, S.: Coincident Condition of Shear Wave Velocities from Laboratory and In Situ, 第6回地震学会シンポジウム，pp. 569~576, 1982.
- 9) 赤井浩一・足立紀尚・西 好一：堆積軟岩(多孔質凝灰岩)の弾・塑性挙動，土木学会論文報告集，第271号，pp. 83~95, 1978.
- 10) Lee, D.H.: Fundamental Studies on The Mechanical Characteristics of Soft Rocks and Their Application to Geotechnical Engineering, Doctor Thesis, Kyoto University, pp. 39~43, 1982.
- 11) Green, D.H. and Wang, H.F.: Fluid Pressure Response to Undrained Compression in Saturated Sedimentary Rock, *Geophysics*, Vol. 51, No. 4, pp. 948~956, 1986.
- 12) 足立格一郎：岩の試料の等方および非等方圧縮における間隙水圧の変化，第21回土質工学研究発表会，pp. 965~966, 1986.

(原稿受理 1986.12.11)