

砂質・礫質土の飽和度の違いによるP波速度とB値の関係

國生 剛治¹⁾

1) 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科 (〒112 東京都文京区春日1-13-27)

1995年兵庫県南部地震においては、マサ土からなる埋め立て地盤の液状化が被害の大きな要因となった。そのマサ土のP波速度は地下水以下においても予想外に小さく、十分には飽和していなかったのではないかと考えられている。マサ土のような砂礫材の液状化強度は飽和度に大きく依存するため、室内液状化試験を行う場合に、原地盤に飽和条件を合わせる事が重要となる。ここではそのための基礎的検討として、Biotの多孔質弾性体理論によって、原地盤のP波速度から液状化試験で採用すべきB値を推定するための関係式を導いた。それに基づき、代表的土質について計算を行い、P波速度は $B=1.0-0.8$ の範囲で大きく変化する傾向を示すため、原地盤の飽和度を推定するための良い指標となることがわかった。

Key Words: P-wave velocity, Pore-pressure coefficient B-value, Degree of saturation, Poisson's ratio, Poro-elasticity, Liquefaction, Sand, Gravel, Masa soil, Relative density, Particle gradation

1. 多孔質弾性体理論に基づく定式化

多孔質弾性体理論により¹⁾ 計算を進めると、非排水条件でのB値、P波速度 V_p 、ポアソン比 ν は式(1)-(3)で表されることが分かる。ここに、 n :間隙率、 ρ :湿潤密度、 G :せん断剛性、 K' :骨格体積弾性率、 K_s :土粒子体積弾性率である。また、 K_f は間隙水の見かけ体積弾性率で、後述のように完全飽和の場合の値($K_f = K_f^*$)から飽和度の減少とともに低下する。

$$B = \left(\frac{1}{K'} - \frac{1}{K_s} \right) / \left(\frac{1}{K'} - \frac{n}{K_s} + \frac{n}{K_f} \right) \quad (1)$$

$$V_p = \sqrt{K' + \left\{ \left(1 - \frac{K'}{K_s} \right) / \left(\frac{(1-n)}{K_s} + \frac{n}{K_f} \right) \right\} + \frac{4G}{3}} / \rho \quad (2)$$

$$\nu = \frac{K' + \left\{ \left(1 - \frac{K'}{K_s} \right) / \left(\frac{(1-n)}{K_s} + \frac{n}{K_f} \right) \right\} - \frac{2}{3}G}{2 \left[K' + \left\{ \left(1 - \frac{K'}{K_s} \right) / \left(\frac{(1-n)}{K_s} + \frac{n}{K_f} \right) \right\} + \frac{1}{3}G \right]} \quad (3)$$

これらの式において、せん断剛性 G と土の骨格の体積弾性率 K' をS波速度 V_s を用いて次式により表すと、

$$G = \rho V_s^2 \quad (4)$$

$$K' = \{2(1+\nu')/3(1-2\nu')\}G = \{2(1+\nu')/3(1-2\nu')\}\rho V_s^2 \quad (5)$$

B値と V_p の直接的関係である式(6)と、 ν とB値の直接的関係である式(7)が得られる。

$$B = 1 - \frac{2(1+\nu')}{3(1-2\nu')} \frac{1}{(V_p/V_s)^2 - 4/3} \quad (6)$$

$$\nu = \{3\nu' + (1-2\nu')B\} / \{2\{3 - (1-2\nu')B\}\} \quad (7)$$

これらの式で、 ν' は土の骨格のポアソン比である。これらの関係式では、式(1)-(3)とは異なり K_f の影響はもはやB値、 V_p 、 ν の値に陰に含まれるだけであり、陽には表れない。一方、 V_p とポアソン比の関係としては良く知られた次式が得られる。

$$\nu = \left\{ \left(V_p/V_s \right)^2 - 2 \right\} / \left\{ 2 \left(\left(V_p/V_s \right)^2 - 1 \right) \right\} \quad (8)$$

2. 代表的土質についての式の計算

ここでは、文献2)で用いた4種類の均等係数の異なる砂礫材と、文献3)の神戸のマサ土に式(1)-(3)を適用してみる。4種類の砂礫材は利根川砂礫からふるい分けで調整した堅硬な粒子からなる砂から礫にわたる材料で、マサ土は神戸市東灘から採取したものである。それらの物理特性を以下に示す。これらの材料のせん断剛性 G は文献2)、3)のS波速度の実験式にしたがい、式(9)、(10)により算定した($p_0=98\text{kPa}$)。

表1 計算の対象とした砂礫材料の物理特性

土質名	D50 (mm)	Uc	emax	emin	ρ_s (g/cm ³)
TS	0.34	1.95	0.966	0.584	2.701
G25	1.13	5.65	0.567	0.334	2.674
G50	2.28	11.3	0.429	0.240	2.668
G75	7.30	31.1	0.354	0.184	2.653
Masa	1.25	46.4	0.538	0.280	2.608

$$G = \rho V_p^2 = \{(1-n)\rho_s + n\rho_f\} \times$$

$$[120 + \{420U_c / (U_c + 1) - 120\} D_r] \times \quad (9)$$

$$(\sigma'_v \sigma'_h)^{0.25} / p_0^{0.5}$$

$$G = [(1-n)\rho_s + n\rho_f] [112(D_r + 1.0)]^2 (\sigma'_v / p_0)^{0.5} \quad (10)$$

ここで、簡単のため、式(9)、(10)で、鉛直・水平拘束圧 σ'_v 、 σ'_h の補正項を $(\sigma'_v \sigma'_h)^{0.25} / p_0^{0.5} = 1$ 、 $(\sigma'_v / p_0)^{0.5} = 1$ の条件で考える。このGより骨格の排水条件ポアソン比を $\nu' = 0.3$ として土の骨格体積弾性率 K' をもとめ、砂礫の母岩のS波速度 $V_{ss} = 3000\text{m/s}$ 、ポアソン比 $\nu_s = 0.3$ 、 $K_s / p_0 = 5.2 \times 10^5$ として、4種類の砂礫とマサ土の相対密度 $Dr = 25, 50, 75, 100\%$ の場合について式(1)-(3)から B 、 V_p 、 ν を計算し、それらの相互関係を求めた。 V_p については水中の音波速度 $V_{pf} = \sqrt{K_f^* / \rho_f}$ で除して基準化した値 V_p / V_{pf} で示している(水の体積弾性率 $K_f^* / p_0 = 22200$)。

まず、式(2)、(3)で $K_f = K_f^*$ として、完全飽和状態での V_p と ν を計算し、間隙率 n との関係を図1に示す。この結果は文献4) による計算結果とほぼ一致している。また、式(1)で $K_f = K_f^*$ として、完全飽和状態でのB値と間隙率 n との関係を4種類の砂礫材について示したのが図2である。これより、 Dr が小さい緩い砂礫では通常の液状化試験で目標とする $B \geq 0.95$ に楽に到達するが、 Dr が100%に近い特に礫分の多い土の場合、 $B \geq 0.95$ の厳密な達成は液状化試験試料が完全飽和で間隙水圧測定システムの剛性が無限大でも不可能であることが分かる。

つぎに、B値が徐々に低下していく場合について、式(1)から K_f を計算し、それに対する V_p / V_{pf} 、 ν を式(2)、(3)から計算する。図3はTS砂の相対密度 $Dr = 50\%$ の場合について、土粒子骨格のポアソン比 $\nu' = 0.3$ から 0.2 、 0.1 と変化させた場合のB値と V_p / V_{pf} 、 ν の関係である。B値の低下にともなう V_p の変化は $B = 1.0 \sim 0.8$ の間で激しく、それ以下では非常に小さいことが分かる。一緒に示したポアソン比はB値に対してほぼ線形に近い変化をたどる。これらの関係に与える ν' の影響はかなり大きく、

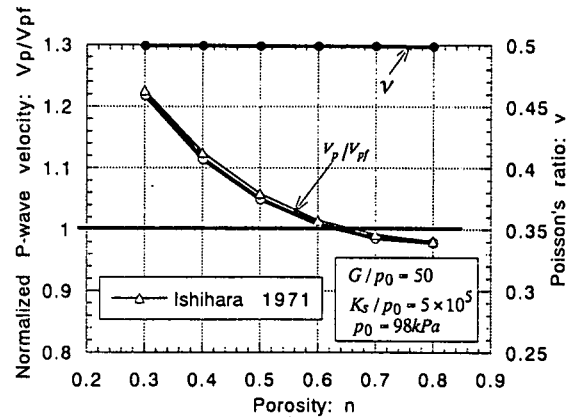


図1 完全飽和条件での間隙率～基準化Vp 関係と既往の研究との比較

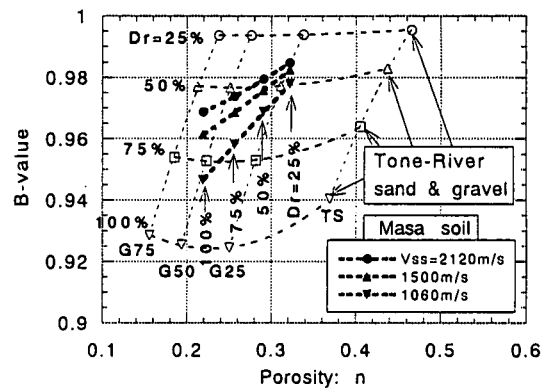


図2 完全飽和条件での間隙率～B値関係

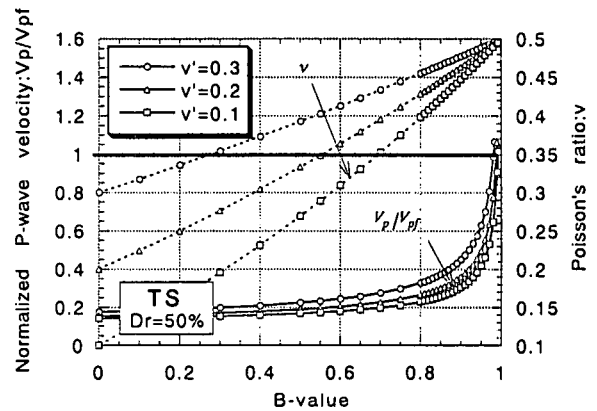


図3 飽和度が低下する場合のTS砂(Dr=50%)の B値と基準化Vp、ポアソン比の関係

ν' の適切な設定が重要であることが分かる。

図4は4種類の砂礫材について相対密度 Dr をパラメータとして求めたB値と V_p / V_{pf} 、 ν の関係である。とくに変化の激しい $B = 1.0 \sim 0.8$ の範囲で示している。これより、いずれの砂礫材についても、B値のわずかな低下によって V_p は大幅に低下し、 Dr が小さいほどその低下割合は大きいことが分かる。また、完全飽和土のB値に相当する V_p はいずれの場合にも水中の音波速度($\approx 1500\text{m/s}$)を上回ってお

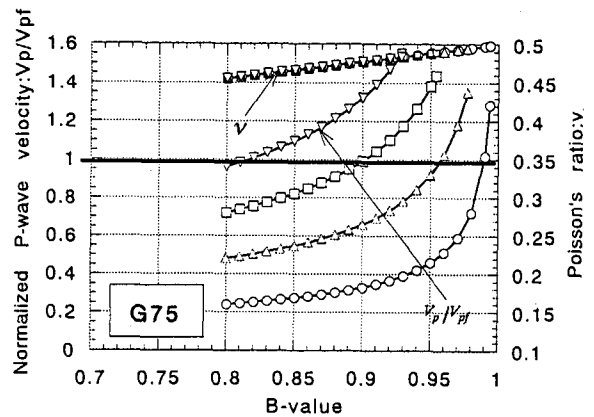
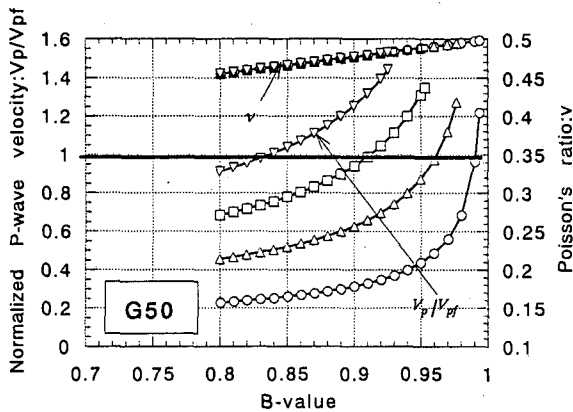
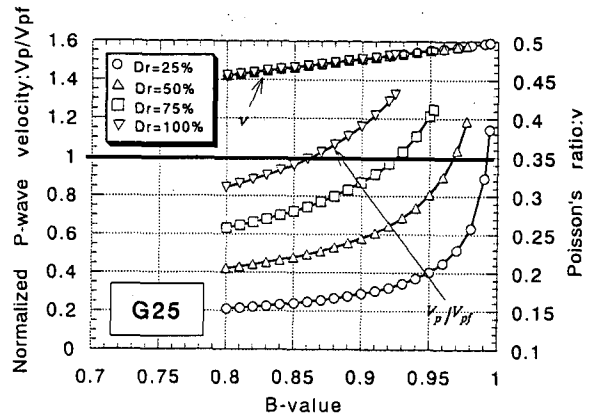
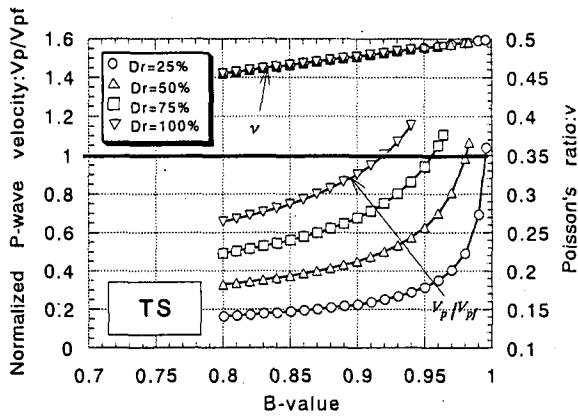


図4 飽和度が低下する際の4種類の砂礫のB値と基準化Vp、ポアソン比の関係

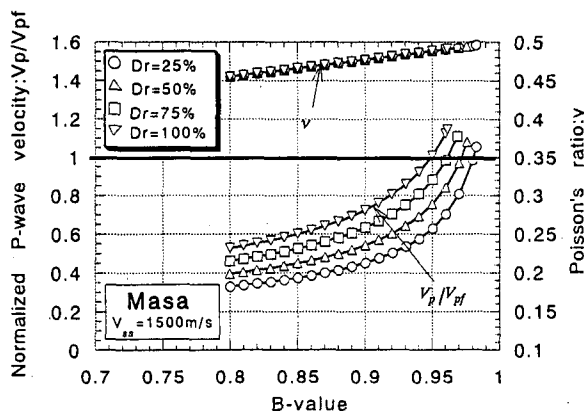


図5 飽和度が低下する際の神戸マサ土のB値と基準化Vp、ポアソン比の関係

り、Drが大きく均等係数 U_c が大きい材料ほどその傾向は著しい。ポアソン比 ν のB値に対する低下はこの定式化によれば式(7)からも明らかのように、Drによる差も、土の種類による差も認められず同一である。図5は図4と同様な関係をマサ土について示したものである。マサ土の方が相対密度の違いによる差異が小さい傾向があることになる。

3. 原地盤のデータの分析

図6は原地盤で計測された既往の多くのPS検層のデータ¹⁾から、表層近くの地下水面付近の上下の砂・礫層の基準化P波速度 V_p/V_{pf} と式(8)によりP波速度とS波速度の比、 V_p/V_s 、から算定したポアソン比 ν の関係をプロットしたものである。図中の点は、地下水面以上か以下か、マサ土かそれ以外の土質かにより区別されている。これより、地下水位以下の土は $\nu \geq 0.44$ の高い値であるが、それに関わらず V_p/V_{pf} は1.2~0.4の広い範囲の値をとることが分かる。また、わずかな例外を除いては地下水位以上の土は $\nu \geq 0.30$ であり、飽和度が低くなるにしたがい $\nu \rightarrow \nu'$ になることを考えると、前述のように $\nu' = 0.30$ と仮定したことの妥当性がほぼ裏付けられていると言えよう。

図7は同じ原地盤のデータを用いて、式(6)によりB値と V_p/V_{pf} の関係を求め、プロットしたものである。この図でも、図6と同じ記号の使い分けがされている。これより、ほぼ $V_p/V_{pf} \geq 0.9$ (ほぼ $V_p \geq 1350\text{m/s}$) であれば、B値は通常規定されている0.95は多少下回る場合があっても0.90以上は十分あ

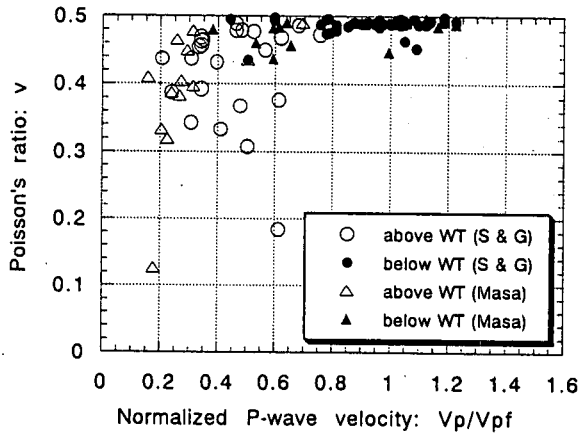


図6 原地盤のP S 検層データから算定した
基準化Vpとポアソン比の関係

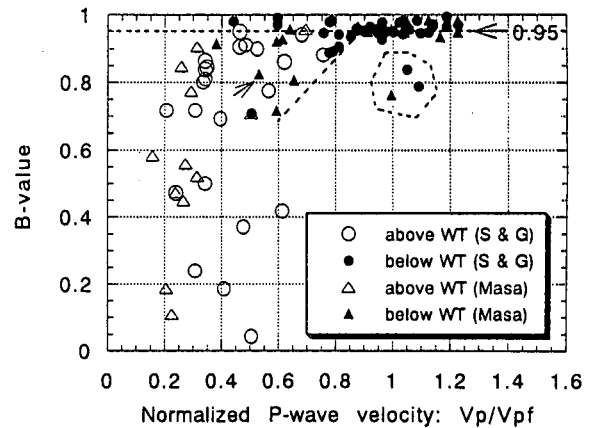


図7 原地盤のP S 検層データから算定した
基準化VpとB値の関係

ることが分かる（図中にそれより低い値をとる点が3つあるが、このデータの V_p は400m/s以上と浅い深度の割には非常に大きく、液状化などの観点からは除いて考えられる）。 $V_p/V_{pf}^* \leq 0.8$ の条件ではB値が0.9を下回る点がかかなり存在し、また明確な理由は断定できないが、地下水位以上と以下での明確な差異は認められず、両者のデータが入り交じっている。すなわち、B値が0.7~0.95の範囲で、地下水位との多少の上下のずれはB値に大きな影響を与えないように見える。

4. まとめ

以上のように、P波速度は飽和度のわずかな低下に応じて大きく変化する性質があり、原地盤でのP波速度がわかれば、液状化試験のような室内非排水せん断試験で採用すべきB値がほぼ推定できることが分かった。P波速度とB値の関係には相対密度が大きく影響し、土の粒度分布はそれほど影響しない。原地盤のB値は、P波速度とS波速度があればその比から、土の骨格のポアソン比を仮定することにより直接推定できる。既往のデータの分析により、 $V_p \geq 1350\text{m/s}$ であれば通常の室内試験で用いているB値0.90~0.95以上をほぼ満足することが分かった。

参考文献

- 1) Zienkiewicz, O.C. and Bettess, P.: Soils and other saturated media under transient, dynamic conditions; General formulation and the validity of various simplifying assumptions, Soil Mechanics-Transient and Cyclic Loads, John Wiley & Sons, pp.1-16, 1982
- 2) Kokusho, T. and Yoshida, Y.: SPT N-value and S-wave velocity for gravelly soils with different grain size distribution, Soils and Foundations Vol.37, No.4, pp.105-113, 1997
- 3) 國生剛治、吉田保夫、諏訪正博、桑原弘昌、佐藤正行：土槽貫入実験によるまさ土の液状化強度の評価（その1）—土槽実験による各種土質定数の関係—第34回地盤工学研究発表会、1999
- 4) Ishihara, K. (1971): On the longitudinal wave velocity and Poisson's ratio in saturated soils, Proc., 4th Asian Regional Conference of SMFE, Bangkok, Vol.1, pp.197-201, 1971
- 5) 例えば、阪神高速道路公団：阪神高速道路地質資料（3号神戸線、5号湾岸線 震災復旧編）、1997