

# P波を用いた地盤の飽和度計測法の開発

田村 修次<sup>1</sup>・阿部 秋男<sup>2</sup>

1. 工博 信州大学助教授 工学部社会開発工学科(建築コース) (〒380-8553 長野市若里4丁目17番1号)

(併任: 科学技術庁防災科学技術研究所 研究員 〒305-0006 つくば市天王台3丁目1番地)

2 株式会社東京ソイルリサーチ 特殊試験室室長 (〒305-0045 つくば市梅園2丁目1番12号)

Sonic wave method using hydro-phones is presented for the determination of P-wave velocity of partly saturated sands. The system consists of a piezoelectric pulse generator, a pair of hydro-phones. Relationship between B-value and P-wave velocity at relative density of 60% and 80% are showed by experiments using large-scale cyclic triaxial apparatus. P-wave velocity is normalized with respect to P-wave velocity at fully saturated sand and dry sand. The normalized P-wave velocity has a good correlation with B-value, irrespective of relative densities. A simplified method is presented for estimation B-value of partly saturated sands from P-wave velocity.

**Key Words:** P-wave velocity, Degree of saturation, B-value, Bender element, Liquefaction

## 1. はじめに

液状化実験を行ううえで、地盤の飽和の管理は重要である。それは、地盤の液状化抵抗は飽和度によって大きく異なるためである。例えば、飽和度が100%から70%に低下すると、液状化抵抗は約3倍になることが指摘されている<sup>1)</sup>。

室内要素試験の場合、供試体の間隙空気をCO<sub>2</sub>で置換して脱気水を通すことで、完全飽和が可能である。また、遠心載加実験等の小型土槽地盤では真空槽の利用など、飽和度を高める工夫がなされている<sup>2)</sup>。それに対し、大型土槽地盤では飽和度を高める技術は確立していない。現在、防災科学技術研究所が三木市に建設を進めている実大三次元震動破壊実験施設(2005年完成予定)では、超大型地盤の振動実験が行われる予定であり、大型地盤の作成法の確立が急務である。

以上の背景から、科学技術庁振興調整費による総合研究「構造物の破壊過程解明による生活基盤の地震防災性向上」の一環として、「大規模地盤の振動実験における地盤作成法・計測技術の開発」がスタートした。本テーマは、大規模地盤の振動実験における均一で飽和な地盤の作成法や液状化地盤の変位計測技術等の開発を目的としている。

飽和地盤の作成法を検討するうえで、地盤の飽和度を計測する技術が必要不可欠である。室内要素試験の

場合、B値によって地盤の飽和の程度を把握することが出来る。しかし、振動実験における土槽地盤の場合、飽和の評価方法は確立していない。土槽地盤において飽和を評価するには、P波速度を計測することが最も簡便と考えられる。それは、P波速度が飽和度100%付近の変化に敏感であるためである。しかし、PS検層などの現位置試験の手法を土槽地盤に適用しても、P波速度を精度良く計測することが困難であった。

そこで本研究では、土槽地盤の飽和度を把握することを目的として、音波を用いたP波速度計測手法を開発するとともに、飽和度(B値)とP波速度の関係を大型三軸試験装置で検証する。また、P波速度からB値を推定する手法を提案する。

## 2. 音波を用いたP波速度計測システム

### (1) 計測システムの概略

土槽という閉じた空間では、土槽フレームからの反射波が存在し、またセンサー間距離を長くとることができない。そのため土槽地盤のP波速度を計測するためには、高い周波数のP波を発生させ、直達波の初動の立ち上がりを明確に捉えることが必要である。そこで起振源として、500~4000Hz程度のP波を発生する圧電型パルス発生装置を用いた。受信はポータブル水中マイクを用いた。水中マイクを用いたのは、加速度計

に比べて高周波数の微小な波を計測するのに適していることと、P波速度と飽和度の関係が水の体積弾性係数に強く依存することを考慮したためである。AD変換は圧電型パルス発生装置の起振信号をトリガーにして12bit, 500kHzで行った。P波速度はセンサー間距離と初動の立ち上がり時間差から算定した。図-1にP波速度計測システムの概要、写真-1に圧電型パルス発生装置および水中マイクを示す。

## (2) 小型土槽における妥当性の検討

提案するP波計測手法の有効性を検討するため、小型せん断土槽(長さ74cm, 幅37cm, 高さ50cm)に圧電型パルス発生装置, 水中マイク, 圧電型加速度計(90mV/G, 0.2-8000Hz)を埋め込んで実験を行った。図-2にセンサー配置を示す。地盤は飽和度をパラメータに3ケースとした。まず土槽内に脱気水を張りケイ砂7号をまき散らして飽和地盤を作成した。次に土槽下部から排水することで不飽和地盤を作成した。サンプリングしたところ, 飽和度は15%程度であった。その後, 再度, 脱気水を土槽下部から注入した。飽和度は99~100%であり, 以後, 部分飽和地盤とよぶ。部分飽和地盤と飽和地盤の飽和度の違いをサンプリングで区別することは困難であった。上記の地盤に対し, 圧電型パルス発生装置および土槽フレームへの打撃を加える方法で, P波を発生させた。なお, 圧電型パルス発生装置を用いたケースでは, 時刻歴波形を24回スタッキングした。

せん断土槽のフレームに打撃を加えた時の加速度計の時刻歴波形を図-3に示す。飽和地盤のケースでは, 初動の立ち上がりがやや不明瞭であり, P波速度は1000~2000m/sと推定される。それに対し, 部分飽和地盤のケースでは, 2つのセンサーで波が同時に到達してしまう。これは, 土槽フレームを伝播する波の影響のためと考えられる。不飽和地盤のケースでは, 明確な初動が得られP波速度は620m/s程度と推定される。ところが, このP波速度は後述の圧電型パルス発生装置を用いたケースに比べて著しく大きく, 土槽フレーム伝達波の影響を受けていると考えられる。上記の傾向は, 水中マイクにおいても同様であった。

圧電型パルス発生装置を用いた時の加速度の時刻歴波形を図-4に示す。起振源に近いと初動を捉えることができるが, 起振源から離れると初動を明確に捉えることができない。これは, 初動のピークが $0.2\sim 1\text{cm/s}^2$ 程度と極めて小さいためと考えられる。

圧電型パルス発生装置を用いた時の水中マイクで得られた時刻歴波形を図-5に示す。飽和地盤のケースでは, 初動を明瞭に捉えることができ, P波速度は

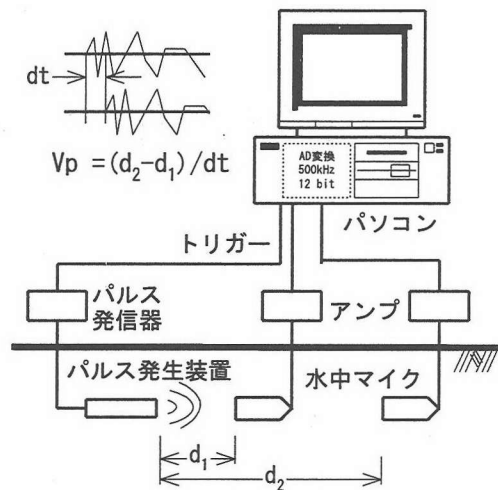


図-1 音波を用いたP波速度計測システムの概略



写真-1 パルス発生装置および水中マイクとアンプ

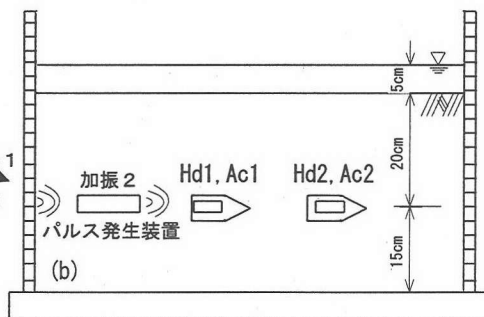
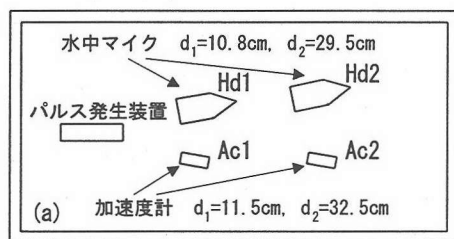


図-2 センサー配置

1560m/sと推定される。これは, 飽和地盤におけるP波速度の理論値とほぼ対応する。部分飽和地盤のケースでは, 起振源から離れたセンサーで初動がやや不明瞭であるが, P波速度は500m/s程度と算定される。不飽

和地盤のケースでは、明確な初動が得られ、P波速度は260m/sと算定される。以上から、土槽フレームを打撃する手法では、土槽フレーム伝達波の影響のため、地盤のP波速度を計測するのが難しいことが分かる。それに対し、圧電型パルス発生装置と水中マイクを用いることでP波速度計測は可能と考えられる。また、得られたP波速度は、飽和の僅かな違いによって大きく変化した。

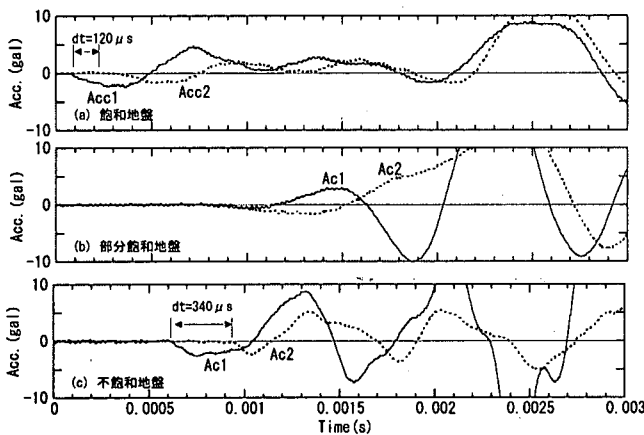


図-3 土槽の打撃時の加速度時刻歴波形

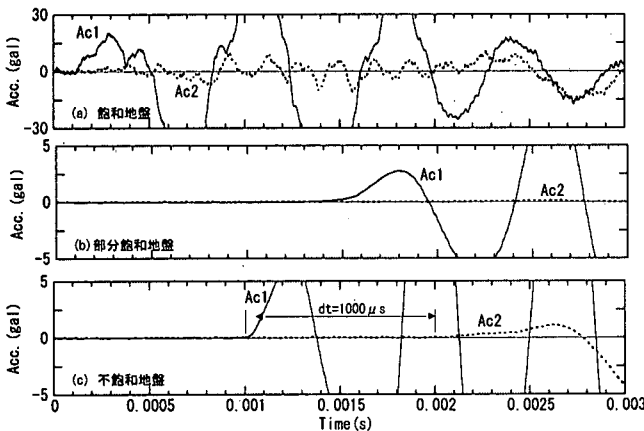


図-4 パルス発生装置における加速度の時刻歴波形

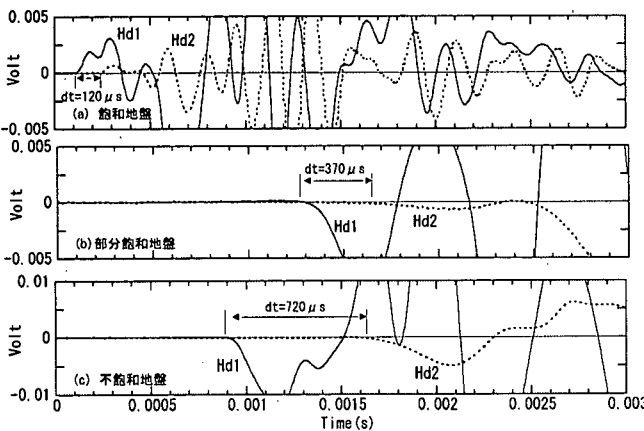


図-5 パルス発生装置における水中マイクの時刻歴波形

### 3. 大型三軸試験装置を用いたP波速度と飽和度(B値)の関係

大型三軸試験装置（供試体：直径300mm，高さ600mm）を用いて、P波速度と飽和度(B値)との関係を検討した。供試体には、図-6に示すように圧電型パルス発生装置、水中マイク、さらにベンダーエレメント<sup>3)</sup>を埋め込んだ。ベンダーエレメントは、従来、S波速度計測に用いられてきたが、ここではP波速度計測も試みた。供試体は豊浦ケイ砂で相対密度を60%、80%とし、拘束圧49kPaで間隙空気をCO<sub>2</sub>で置換した後、脱気水を通水した。飽和度(B値)の制御は、バックプレッシャーを変化させることで調整した。飽和度はB値0.95以上のときを飽和度100%と仮定して、B値調節の際に生じる供試体の給排水量をもとに求めた。また、P波速度、S波速度計測の前後で、B値の変動がないことを確認した。センサー間距離を表-1に示す。P波計測に用いるベンダーエレメント間の距離を、水中マイク間の距離の約1/2に設定したのは、ベンダーエレメントで発生するP波が極めて微少で、減衰の影響を強く受けるためである。

#### (1) 飽和度とP波速度

相対密度80%の飽和度100%、99.5%、99%における水中マイクおよびベンダーエレメントで得られたP波の

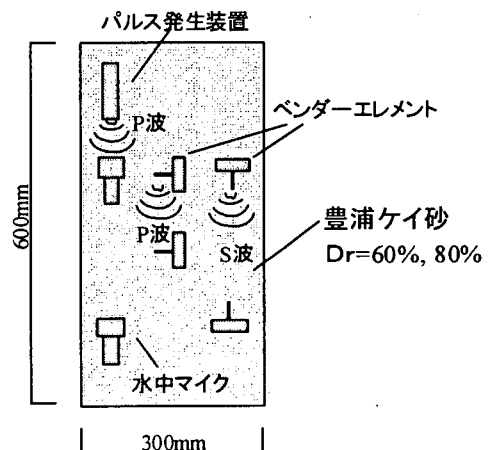


図-6 大型三軸試験装置におけるセンサー配置

表-1 センサー間距離

相対密度	センサー間の距離		
	水中マイク	ベンダーエレメント(V <sub>p</sub> )	ベンダーエレメント(V <sub>s</sub> )
80%	21 cm	10.1cm	21.2cm
60%	18.9cm	9.6cm	19.0cm

時刻歴波形を図-7, 8に示す。水中マイクで得られたP波速度は、飽和度100%で1627m/s, 飽和度99.5%で1055m/s, 飽和度99%で955m/sと、飽和度100~99%にかけて大きく変化する。ベンダーエレメントで得られたP波速度は、飽和度100%, 99.5%では、水中マイクのそれと同程度である。ところが、飽和度99%のケースでは水中マイクで得られたP波速度の1/2程度と大きく異なる。ベンダーエレメントの場合、飽和度99.5%のケースでも初動が不明瞭であることを考慮すると、飽和度99%のケースでは初動が減衰して読み取りができなかったと考えられる(図-8b, c)。

図-9は、相対密度60%, 80%における飽和度とP波速度, S波速度の関係を示す。S波速度は飽和度によらず、ほぼ一定である。これから、S波速度は飽和の影響を受けないことが分かる。それに対し、P波速度

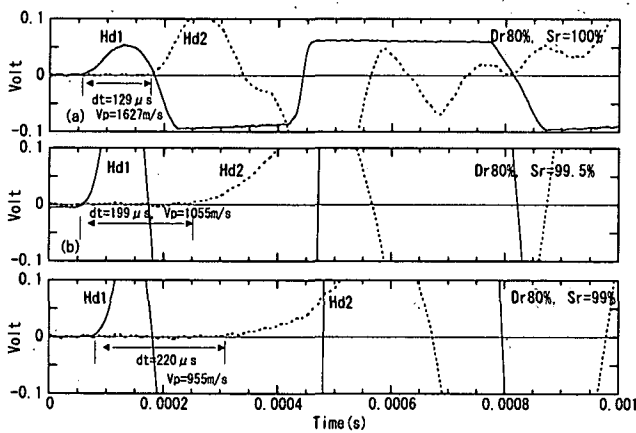


図-7 水中マイクの時刻歴波形

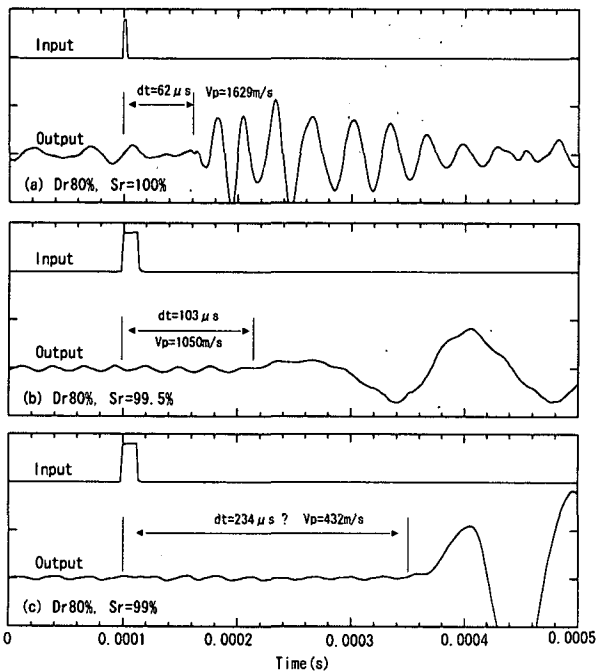


図-8 ベンダーエレメントの時刻歴波形

は、水中マイク、ベンダーエレメントともに飽和度100%~99.5%にかけて大きく変化する。これから、P波速度が飽和度100%付近の変化に敏感であることが分かる。また、相対密度80%の飽和度99.5%以上および相対密度60%では、水中マイクとベンダーエレメントで、得られたP波速度は概ね一致する。このことは、水中マイク、ベンダーエレメントともにP波速度をある程度の精度で計測していることを示唆している。ただし、相対密度80%の飽和度99.5%以下では、水中マイクとベンダーエレメントでP波速度は異なる。これは、前述のようにベンダーエレメントで発生させたP波の減衰が大きく、初動が読みとれなかったためと考えられる。

## (2) B値とP波速度

図-10は相対密度60%におけるB値とP波速度, S波速度の関係である。B値によらずS波速度はほぼ一定であることが確認できる。それに対し、水中マイクおよびベンダーエレメントで得られたP波速度は、B値0~0.9の範囲において変化する。図中の点線は多孔質弾性体理論に基づくB値とP波速度の関係(付録参照)である。B値0.4以下では、理論のP波速度は音波で得ら

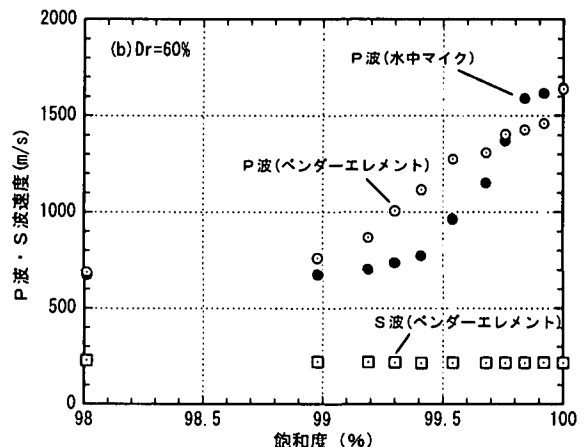
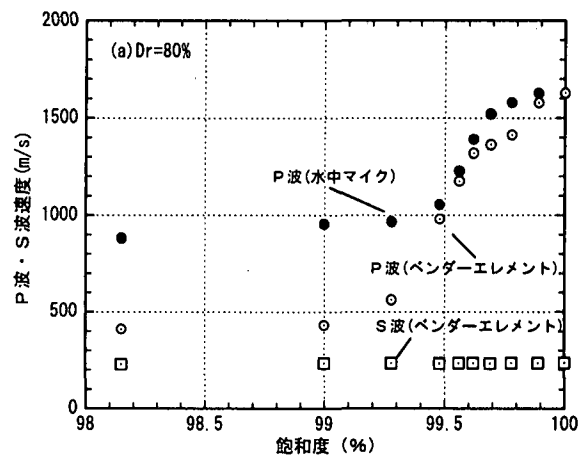


図-9 飽和度とP波速度・S波速度の関係

れたP波速度とほぼ一致する。しかし、多孔質弾性体理論のP波速度は、B値0.9付近で大きく変化するのに対し、実験で得られたP波速度はB値0~0.9にかけて緩やかに変化する。これは、理論では多孔質弾性体（土粒子、水、空気の3相体）をP波が均等に伝播すると仮定するが、実際のP波は体積弾性係数の大きい箇所を伝播してしまうためと考えられる。今後、B値とP波速度に関する理論的検討が必要である。

図-11は、相対密度60%、80%におけるB値と水中マイクで得られたP波速度の関係である。B値0.8以上では、相対密度60%のP波速度と相対密度80%のP波速度はほぼ一致する。これは、完全飽和のP波速度が相対密度の影響を受けにくいためである。しかし、B値が0.8より小さくなると、同じB値でもP波速度は大きく異なる。これは、乾燥状態のP波速度が相対密度によって異なるためと考えられる。そこで、乾燥状態のP波速度、完全飽和状態のP波速度を用いて、次式のようにP波速度を正規化する。

$$NV_P = \frac{V_P - V_{Pd}}{V_{Ps} - V_{Pd}} \quad (1)$$

ここに、 $NV_P$ は正規化P波速度、 $V_P$ は計測されたP波速度、 $V_{Pd}$ は乾燥状態のP波速度、 $V_{Ps}$ は完全飽和状態のP波速度である。図-12に相対密度60%、80%におけるB値と正規化P波速度の関係を示す。B値によらず、相対密度60%、80%の正規化P波速度が概ね一致することが分かる。乾燥状態のP波速度はS波速度から推定可能であること、飽和状態のP波速度は1600m/s程度であることを考慮すると、P波速度計測でB値を0~0.9の範囲で推定可能と考えられる。

一般に室内土質要素試験ではB値0.95以上が推奨されている。ただし、これはセル圧一定の三軸試験装置で有効応力を一定に保つための条件であり、必ずしも液状化強度の条件ではない。不飽和砂の液状化強度に関する既往研究によると、B値0.22の部分飽和砂の液状化強度は、飽和砂のその40%程度大きくなる<sup>9)</sup>。また、B値0.6の部分飽和砂の液状化強度は、飽和砂のその15%程度大きくなることも報告<sup>9)</sup>されている。土槽地盤における飽和の条件は議論のあるところであるが、液状化実験において問題になる飽和度(B値)の違いは、提案する手法で評価できると考えられる。

#### 4. まとめ

圧電型パルス発生装置と水中マイクを用いたP波速度計測手法を提案した。また、大型三軸試験装置を用いて、飽和度(B値)とP波速度の関係を検討した。そ

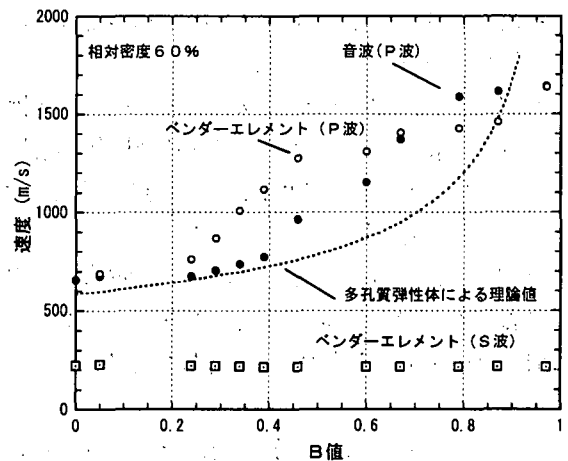


図-10 B値とP波速度・S波速度の関係(Dr=60%)

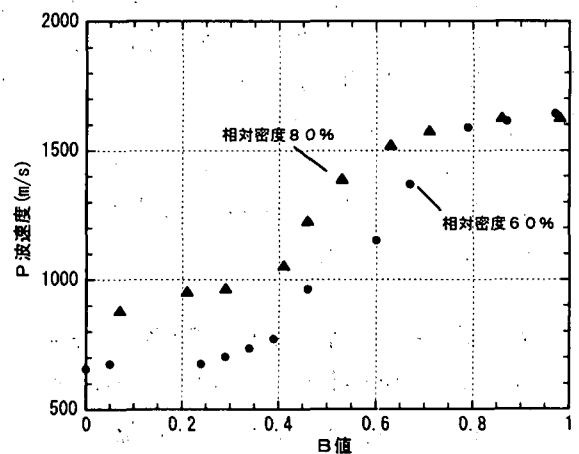


図-11 B値とP波速度の関係(Dr=60%,80%)

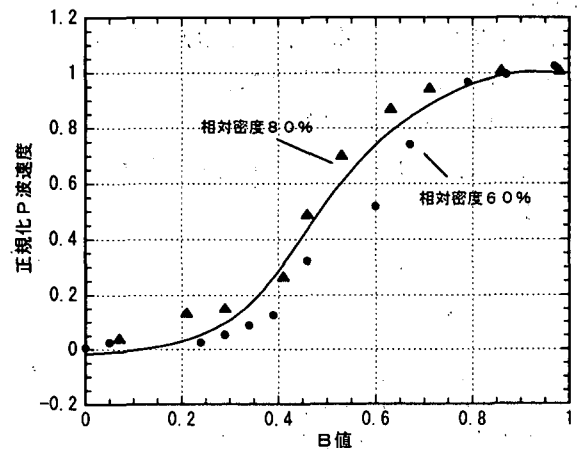


図-12 B値と正規化P波速度の関係(Dr=60%,80%)

の結果、以下のことが分かった。

- (1) 土槽フレームへ打撃を加える手法では、フレーム伝達波の影響のため、P波速度を計測することが困難である。それに対し、圧電型パルス発生装置と水中マイクを用いることにより、飽和度によらず地盤のP波速度計測が可能である。
- (2) ベンダーエレメントでもP波速度計測は概ね可能である。ただし、相対密度が大きく飽和度が99.5%

程度より小さいと、減衰のため初動が読みとれない場合がある。

- (3) P波速度は飽和度99~100%, B値0~0.9の範囲で大きく変化する。ただし、多孔質弾性体理論に基づくB値とP波速度の関係は、B値0.4以上において、必ずしも実験値と対応しない。
- (4) 計測されたP波速度を乾燥状態のP波速度、完全飽和状態のP波速度で正規化することにより、地盤のB値をある程度の精度で把握できる。

謝辞：本研究は科学技術庁振興調整費による総合研究「構造物の破壊過程解明による生活基盤の地震防災性向上」(研究リーダー：濱田政則 早稲田大学教授)の一環として行ったものである。記して感謝いたします。総合研究の第4分科会第1班(座長：水野二十一 建築研究所先端技術研究官)の皆様には貴重な助言をいただきました。また、ベンダーエレメントに関しては、清水建設技術研究所：佐藤正義博士、西尾伸也氏によるところが大きい。深く感謝いたします。

#### 付録：多孔質弾性体の理論によるB値と弾性波速度

多孔質弾性体の体積弾性係数 $K$ は次式で表される<sup>5)</sup>。

$$K = \frac{n(1 - K_{wa}/K_s)K_d + (1 - K_d/K_s)K_{wa}}{n(1 - K_{wa}/K_s) + (1 - K_d/K_s)K_{wa}/K_s} \quad (A1)$$

ここに、

$n$ : 間隙率、 $K_{wa}$ : 間隙水の体積弾性係数、

$K_s$ : 土粒子の体積弾性係数、

$K_d$ : 土骨格の体積弾性係数

一般に  $K_{wa}/K_s \ll 1$ ,  $K_d/K_s \ll 1$  であるため、(A1)式は次式で表される。

$$K = K_d + K_{wa}/n \quad (A2)$$

一方、B値は次式で表される。

$$B = \frac{1}{1 + n(K_d/K_{wa})} \quad (A3)$$

(A2)式を考慮すると、(A3)式は次式で表される<sup>6)</sup>。

$$B = 1 - \frac{K_d}{K} \quad (A4)$$

弾性波動論に基づくと体積弾性係数 $K$ は次式で表される。

$$K = \rho \left( V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right) \quad (A5)$$

ここに $\rho$ は密度である。したがって、B値は次式で表される。

$$B = 1 - \frac{\rho \left( V_{pd}^2 - \frac{4}{3} V_{sd}^2 \right)}{\rho \left( V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right)} \quad (A6)$$

ここに添え字 $d$ は、土骨格(乾燥状態)のものであることを示す。S波速度が間隙水の影響をほとんど受けないことを考慮すると、B値がP波速度と密接な関係があることが分かる。

#### 【参考文献】

- 1) Yoshimi, Y., Tanaka, K., and Tokimatsu, K.: Liquefaction resistance of a partially saturated sand, *Soils and Foundations*, Vol.29, No.3, pp.157-162, Sept. 1989.
- 2) Sato, M. and Zhang, J.M.: Liquefaction-induced damage to caisson-type quay wall and its neighboring pile foundation, *Centrifuge 98*, Kimura, Kusakabe & Takemura eds., Balkema, Rotterdam, pp.371-376, 1998.
- 3) 西尾伸也, 馬場幸吉, 安部透, 岩井俊之: ベンダーエレメント試験におけるせん断波発振子の変位計測, *物理探査学会第100回学術講演会論文集*, pp.127-131, 1999.
- 4) Ishihara, K., Huang, Y. and Tsuchiya, H.: Liquefaction resistance of nearly saturated sand as correlated with longitudinal wave velocity, *Poromechanics*, Thimus et al. eds., Balkema, Rotterdam, pp.583-586, 1998.
- 5) 石原研而: 土質動力学の基礎, 鹿島出版会, 1976.
- 6) 西尾伸也: 砂および砂礫の弾性波速度に与える飽和度の影響, 不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp.221-224, 1987.