

液状化実験で作製する模型地盤のP波伝播速度を 高精度に測定する方法

—超音波探触子を用いた測定システムの有効性検証—

宇野 浩樹・志波 由紀夫

Keywords : P-wave propagation velocity, ultrasonic transducer, degree of saturation, liquefaction, geotechnical centrifuge

P波伝播速度, 超音波探触子, 飽和度, 液状化, 遠心力載荷装置

1. はじめに

液状化実験等, 飽和砂地盤を対象とする模型実験においては, 作製した模型地盤の飽和度が実験結果に大きな影響を及ぼす。それは, 土粒子と間隙水と空気とで構成されている砂質土に生じる現象に共通した, 本質的な問題である。これに関して, 上記三相構成媒質の挙動を論ずるアプローチの一つである多孔質弾性体理論¹⁾や既往の実験成果によると, 地盤の飽和度はその中を伝播するP波(疎密波, 音波)伝播速度と密接な関係があるとされており, この関係から地盤の飽和度を評価しようという試みがなされている^{2), 3)}。ただし, 模型地盤のP波伝播速度を正確に測定することは簡単ではなく, さまざまな測定方法が試されている状況である。

本論文は, 模型地盤の飽和度評価のためにP波伝播速度を高精度に測定する方法として, 超音波探触子をP波の送受信に利用する方法を試みた結果, その有効性を確認できたので報告するものである。

2. 超音波探触子を用いた測定システム

2.1 超音波探触子選定の背景

飽和砂模型地盤のP波伝播速度を計測する方法としては, 模型地盤の1地点に振動や衝撃を与えてP波を発生させ, これを模型地盤内の別の地点で感知して, 両地点の離間距離と伝播に要した時間とから求めるというのが共通しているが, P波の発振源と受振器の組合せで, これまでにさまざまな方法が使われている。1G場での比較的大型の土槽に作製した模型地盤については, 板たたき等によって発生させた振動を埋設加速度計で受振する, いわゆるPS検層のほか, 圧電型パルス発生装置と

水中マイクとの組合せによる方法⁴⁾などが見られる。遠心力載荷実験に用いられる小型の模型地盤においては, 発振子および受振子に, 圧電素子を貼り合わせたベンダーエレメントが用いられた事例⁵⁾がある(ベンダーエレメント法は, 1G場の土槽実験や三軸試験⁶⁾の中でも使われている)。

こうした計測方法で, これまでにそれなりの成果が得られているのであるが, 計測精度の面で十分満足な方法は確立されていない。計測精度が上がらない原因は, P波の発振における立上がり速度の不足と, 受振器まで伝播する過程での減衰が, 主なものである。P波伝播速度の計測においては, 通常, 発振側波形の立上がりの瞬間と受振側波形の立上がりの瞬間を, それぞれの時系列波形から読み取って, 伝播に要した時間を算出する。このときに, 波形の立上がり方が鈍い(零線からの変化がゆっくりしている)と, 時間軸上でのP波の出発と到達の瞬間を特定することが難しく, 伝播時間の算出に誤差が入る。また, 伝播過程でのP波の減衰が大きいと, 受振側の波形に含まれるノイズとの関係で, やはりP波到達の瞬間の特定が難しくなる。前述した各種計測方法には, こうした点でさらなる改善の余地があった。

2.2 P波伝播速度の測定方法の概要

(1) 超音波探触子

本研究では, 発振と応答の立上がり性能にすぐれた発振子および受振子として写真-1に示す超音波探触子を選定し, その有効性の検証を行った。超音波探触子(垂直探触子)は, 振動子(厚み振動モード型圧電素子), ダンパおよび被覆板から主に構成される。振動子の上下面に電極が取り付けられており, 電極間に電圧を作用させるとピエゾ効果によって振動子の厚みが増減する。したがって, 交流電圧が加わると厚みが増減し, これが機

機械的な振動となって超音波が発生する。逆に、振動子に機械的な振動が加わると厚みが増減して電極間に交流電圧が生じる。振動子は、超音波の送受信の効率を良くするために、厚さを1/2波長にして共振させて使用するが、過度の共振は反射法による材料の厚さ測定等の際に分解能を低下させるので、その背面にダンパを設置して振動エネルギーを吸収させる。今回用いたのは、図-1に示すように約0.5MHzに共振周波数をもつものである。



写真-1 本研究で用いた超音波探触子
Ultrasonic transducer employed in this study

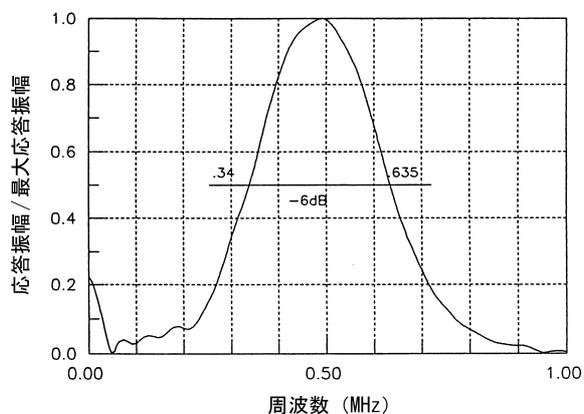


図-1 本研究で用いた超音波探触子の周波数特性
Frequency property of the ultrasonic transducer

(2) P波伝播時間測定システム

本研究で用いたP波伝播時間測定システムを図-2に示す。測定システムは、超音波探触子、パルサー・レーザ、オシロスコープおよびデータ収集システムからなる。このシステムは、透過法によって離間距離が既知な2つの探触子間を伝播するP波の伝播時間を測定するものである。パルサーからは、発振側探触子に矩形パルス(パルス幅 $2\mu\text{s}$ 、振幅 100V 、立上がりおよび立下がり時間 10ns)を送信して探触子を振動させ、超音波を発生させる。このとき、パルスの立上りに同期した

パルス電圧(パルス幅 $10\mu\text{s}$ 、振幅 20V)がパルサーから送信され、これをオシロスコープとデータ収集システムで収録する。一方、媒質内を伝播した超音波は受振側探触子に到達すると電圧信号として計測され、これをレシーバーで増幅させてオシロスコープとデータ収集システムで収録する。なお、今回用いたデータ収集システムはPCカード型のもので、最高 100MHz のサンプリング周波数でデジタルデータを収録できるものである。

前述したように、発振側の同期信号の立上がりと受振側の増幅信号の立上がりとの時間差をP波伝播時間とし、これと探触子の離間距離からP波伝播速度を算定する。

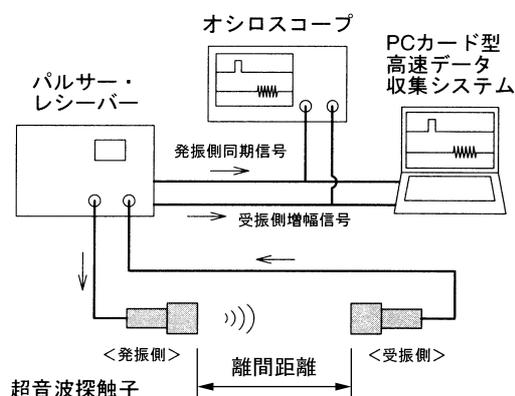


図-2 本研究で用いたP波伝播時間測定システム
Measurement system of P-wave propagation time

3. 実験概要

3.1 実験フロー

実験フローを図-3に示す。

(1) 水中音波速度計測による測定精度の検証

水中での音波の速度は、よく知られているように約 1500m/s である。ただし、これは水温が 26°C のときの値であり、水の密度および圧縮性が温度によって変化するため、水中音波速度は約 1400m/s (0.7°C で極小値)から約 1555m/s (約 74°C で極大値)までの値をとる。この温度帯での水中音波速度については数多くの精密な計測データが得られていることから⁷⁾、水温を変化させてP波伝播速度を測定することにより、今回の測定システムによる測定値の精度を検証した。

なお、この実験ケースでは、発振子および受振子にベンダーエレメントを用いた計測も比較のため行った。

(2) 遠心場における測定方法の適用性検討

遠心力载荷模型実験では、超音波探触子が大きな遠心

加速度を受けるほか、遠心装置稼働による振動や熱雑音等に起因したノイズの問題もあり、本測定システムの適用性が懸念された。そこで、超音波探触子を含む実験装置を遠心力载荷装置に搭載して水中音波速度を測定し、本測定システムが遠心力载荷模型実験においても適用可能か否かを検討した。

(3) 飽和模型地盤中の P 波伝播速度の測定

以上の実験結果を踏まえ、飽和砂模型地盤について、P 波伝播速度を 1G 場および遠心場で測定した。

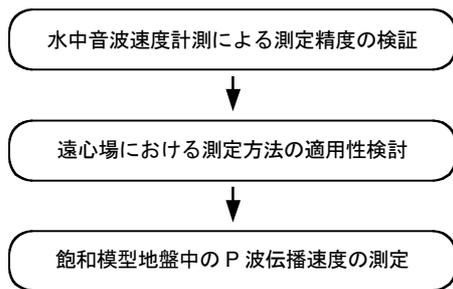


図-3 実験フロー
Test flow

3. 2 実験装置と実験条件

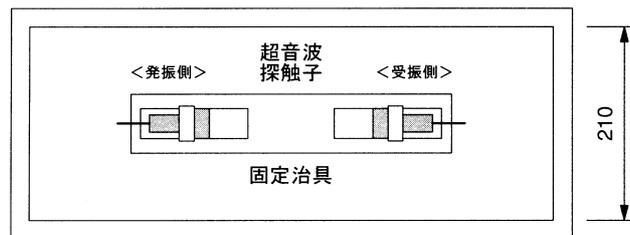
実験に用いた実験装置の概要を図-4に示す。実験装置の準備は以下の手順で行った。なお、用いた砂試料は豊浦砂 ($\rho_s=2.64g/cm^3$, $e_{max}=0.952$, $e_{min}=0.598$) であり、空中落下法により相対密度を $D_r=60\%$ とした。

- (1) 2つの探触子を固定治具に取り付け、マイクロメータ(測定精度 0.005mm)を用いて離間距離を精密に計測する。
- (2) 土槽容器内に上記探触子および熱電対を設置する。2つの探触子は、その中心が水面あるいは地表面から 90mm の深さになるようにする。
- (3) 写真-2に示すように、P 波伝播媒質となる水あるいは豊浦砂を所定量投入する。
- (4) 脱気水槽に土槽容器を入れ、砂地盤の場合は水を注入しながら脱気し、探触子周辺を飽和させる。一連の実験条件を表-1に示す。

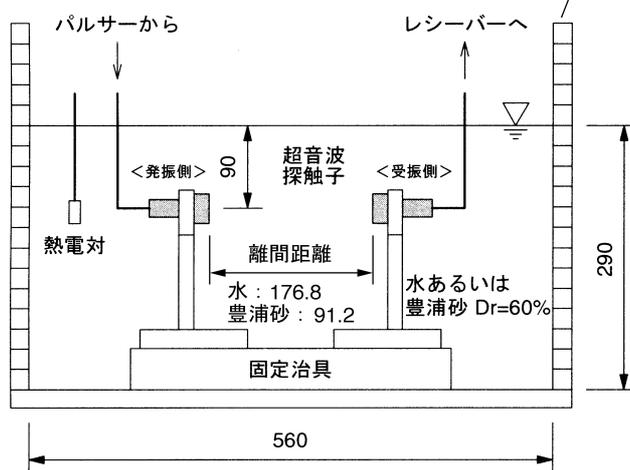
表-1 実験条件
Test condition

ケース	媒質	測定環境	探触子離間距離 (mm)	温度 (°C)
Case 1	水	1G 場	176.8	11~45
Case 2	水	遠心 50G 場	176.8	12
Case 3	飽和豊浦砂	1G 場	91.2	11
Case 4	飽和豊浦砂	遠心 50G 場	91.2	11

<平面図>



<立面図>



単位: mm

図-4 実験装置の概要
Outline of the P-wave velocity measurement

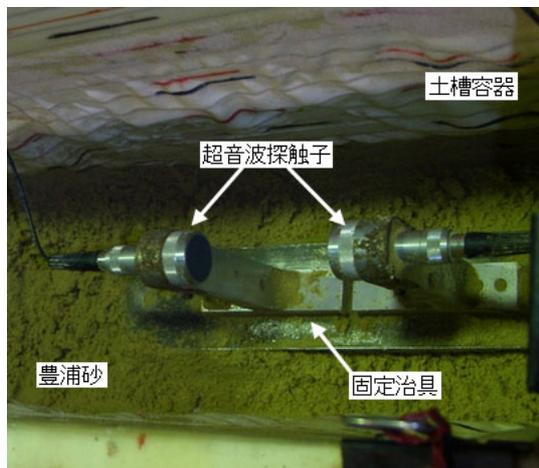


写真-2 土槽内の超音波探触子の設置状況
The ultrasonic transducer in the soil box

4. 実験結果

4. 1 水中音波速度の測定 (Case1)

図-5と図-6はそれぞれ、バンダーエレメントによる方法と超音波探触子による方法とで、温度 20°C の水中での音波速度を計測した際の、発振側同期信号と受振側増幅信号の波形である。バンダーエレメントによる方法では、受振子の出力電圧が非常に小さいため、伝播距離を 28.0mm まで近づける必要があった。また、出力電圧

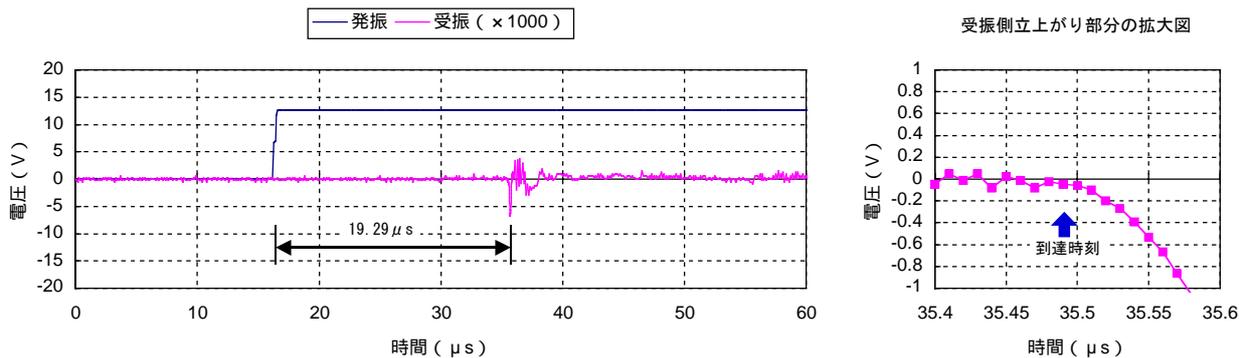


図-5 入力電圧および出力電圧の時系列 (ベンダーエレメントによる計測)
Time history of input and output voltage (by use of bender element)

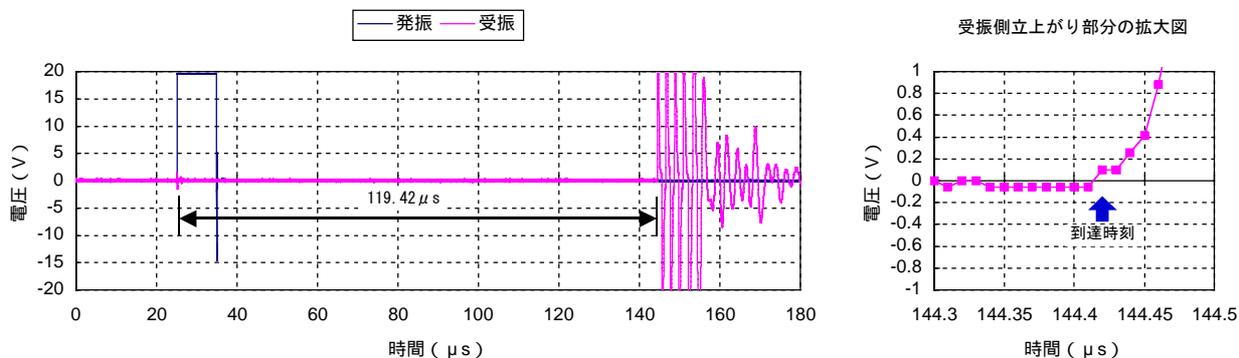


図-6 入力電圧および出力電圧の時系列 (超音波探触子による計測)
Time history of input and output voltage (by use of ultrasonic transducer)

は 1000 倍に拡大して示してある。この受振子の出力電圧波形の立上がり部分を拡大して見ると、立上がり自体がゆっくりしているのと背景にノイズがのっていることで、音波到達の瞬間を明確に指し示すことが難しい。この波形は 100MHz のデータサンプリングで収録しており、発振から受振までの伝播時間を $1/100 \mu s$ まで読むことができるので、不明確を承知の上で伝播時間を $19.29 \mu s$ と読むと、音波速度は $1452m/s$ と算出される。水温 $20^\circ C$ での音波速度としては $1483m/s$ という値が正確なところであるので、ベンダーエレメントによる方法での計測誤差は 2%程度となる。

一方、超音波探触子による方法の場合、発振した音波の減衰が比較的小さく、伝播距離を $176.8mm$ と長くとることができた。また、図- 6 から分かるように、受振子の出力電圧波形の立上がり点は明瞭で、伝播時間を $119.42 \mu s$ と容易に確定することができた。この場合の音波速度は $1480m/s$ と算定され、既往値 $1483m/s$ との差はわずか 0.2%である。

同様の方法で、超音波探触子による水中音波速度の測定は、水温を $11^\circ C$ から $45^\circ C$ までの範囲で変化させて行

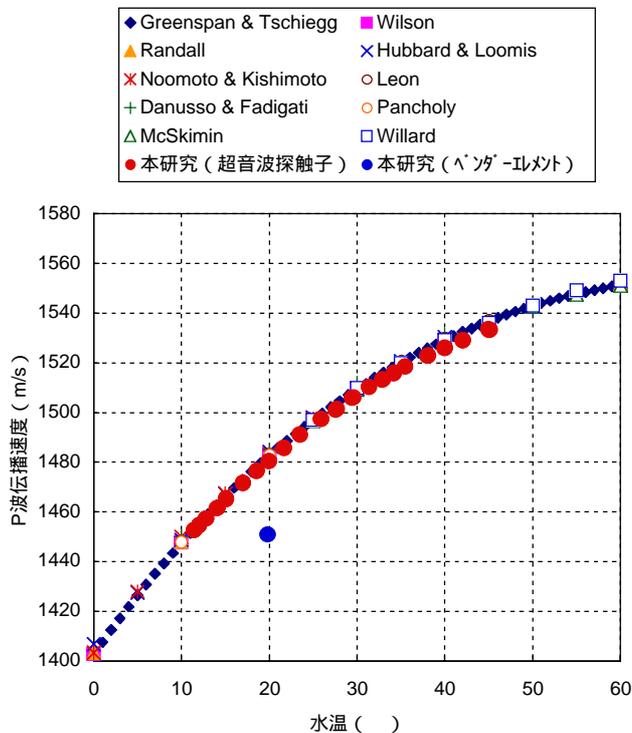


図-7 水中音波速度と水温の関係
Relationship between sonic wave velocity in water and water temperature

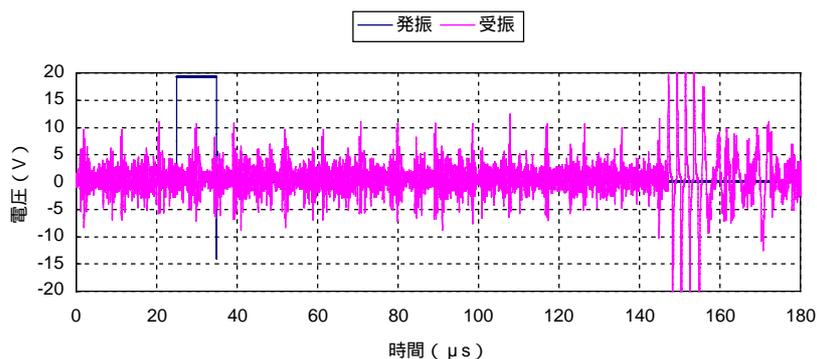


図-8 50G 場で測定された入力電圧および出力電圧の時系列 (水, スリップリング)
Time history of input and output voltage measured at 50G (in water, via slip-ring)

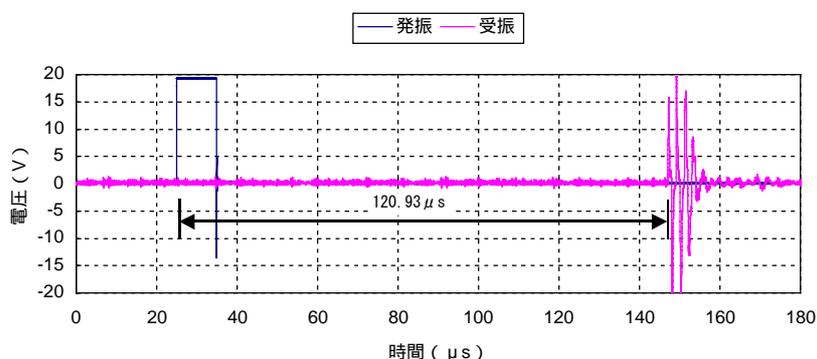


図-9 50G 場で測定された入力電圧および出力電圧の時系列 (水, 同軸ケーブル)
Time history of input and output voltage measured at 50G (in water, via coaxial cable)

った。これらの結果を図-7 にまとめて示す。図中に既往の精密計測データ⁷⁾を併せて示したが、今回の超音波探触子を用いた計測結果は、これらとの差が 0.5%以内に収まっている。

4.2 遠心場における水中音波速度 (Case2)

遠心加速度 50G 場の下で水温 12℃の水中音波速度を測定した。この実験では、装置への信号の送受信の経路を2通り試みた。

図-8 は、光スリップリングの経路を介して得られた時系列データである。非常に大きなノイズがあるために受振子の出力電圧波形の立上がり点が不明瞭で、P 波伝播速度を確定できなかった。

そこで、通常は CCD カメラの撮影信号を送受信する経路を用いて測定を試みた。この経路の配線にはノイズに強い同軸ケーブルが使用されている。測定結果を図-9 に示す。光スリップリングの経路に比べてノイズが小さく抑えられており、伝播時間を 120.93 μs と読み取ることができた。この場合の音波速度は 1462m/s と算定され、水温 12℃に対する既往値 1455m/s との差は 0.5%であった。

表-2 飽和豊浦砂における P 波伝播速度

P-wave propagation velocity in saturated Toyoura sand

測定環境	温度 (°C)	離間距離 (mm)	伝播時間 (μs)	P 波速度 (m/s)
1G 場	11	91.2	54.29	1680
遠心 50G 場	11	91.2	54.12	1685

4.3 飽和模型地盤中の P 波伝播速度の測定 (Case3, Case4)

前段の実験結果を踏まえ、同軸ケーブルを経由する方法で、 $D_r=60\%$ 飽和豊浦砂における P 波伝播速度を 1G 場および遠心場で測定した。測定結果を図-10 と図-11 に示す。いずれについてもノイズがほとんどなく、受振子の出力電圧波形の立上がり点は明瞭であり、表-2 に示すように伝播時間と P 波伝播速度を測定することができた。

水温 11℃における水中音波速度は 1452m/s とされており、ここで得られた P 波伝播速度はそれよりも速くなっている。これは、水と土粒子の二相系の波動伝播を反映したものと考えられる。また、50G 場における P 波伝播速度が 1G 場におけるそれよりも若干速いのは、

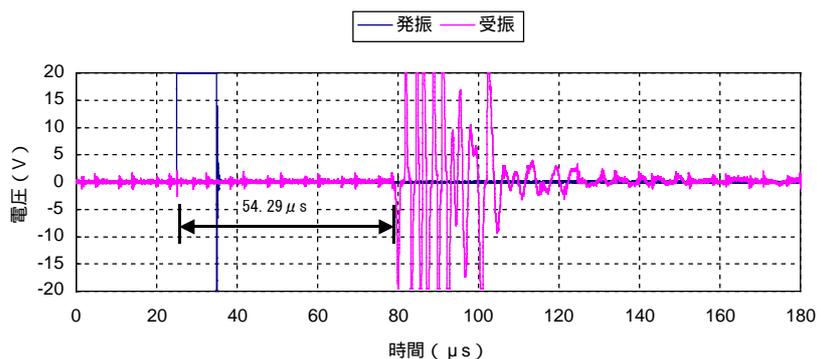


図-10 飽和豊浦砂中における入力電圧および出力電圧の時系列 (1G 場)
Time history of input and output voltage in saturated Toyoura sand (at 1G)

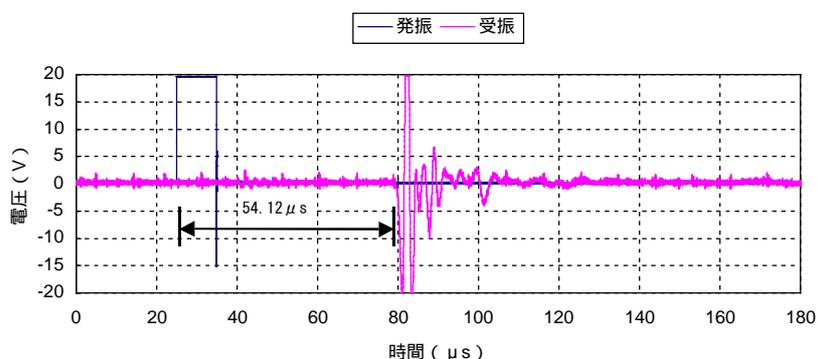


図-11 飽和豊浦砂中における入力電圧および出力電圧の時系列 (50G 場)
Time history of input and output voltage in saturated Toyoura sand (at 50G)

前者において土粒子骨格の剛性が増加したことに起因すると考えられる。なお、石原・塚本²⁾は加速度計を用いた測定システムにより、等方拘束圧 98kPa、温度 15°C の条件で豊浦砂の P 波伝播速度を測定している。そこでは、飽和度 100%、相対密度 60%に対して 1722m/s という結果が得られており、表- 2 に示した値は、測定条件が異なるものの、これに近い値となっている。

5. まとめ

超音波探触子を用いた P 波伝播速度測定システムを試作し、測定を行った結果、超音波探触子の送受信データを高周波数でサンプリングすることによって、1G 場および遠心場において水中および飽和模型地盤中の P 波伝播速度を高精度に測定することができた。特に、水中を伝わる P 波速度に関しては、誤差 0.5%以内で測定できることが確認された。

この測定システムを用いることにより、液状化実験で作製する模型地盤の飽和度と P 波伝播速度との関係を、より明確にすることができるものと期待できる。

参考文献

- 1) Ishihara, K. : Approximate forms of wave equations for water-saturated porous materials and related dynamic modulus, *Soils and Foundations*, Vol.10, No.4, 1970.
- 2) 石原研而・塚本良道 : 地下水面近傍にある不完全飽和砂質土の液状化特性評価 (課題番号 12555144) , 平成 12 年～平成 13 年度科学研究費補助金 (基盤研究(B)(2)) 研究成果報告書, 2002.
- 3) Tamura, S., Tokimatsu, K., Abe, A. and Sato, M. : Effect of air bubbles on B-value and P-wave velocity of a partly saturated sand, *Soils and Foundations*, Vol.42, No.1, pp.121-129, 2002.
- 4) 田村修次・阿部秋男 : 音波を用いた P 波速度計測手法の開発, 第 34 回地盤工学研究発表会発表論文集, pp.2073-2074, 1999.
- 5) 佐藤清 : ベンダーエレメントを用いた遠心重力場での地盤の S 波速度・P 波速度の測定, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, 第三部門, pp.1129-1130, 2002.
- 6) 例えば, 森井慶行・後藤聡・末岡徹 : 川砂および豊浦砂の微小ひずみ時のせん断剛性と液状化特性, 大成建設技術研究所報, Vol.31, pp.149-152, 1998.
- 7) 超音波技術便覧 (新訂版) , pp.1200～1203, 日刊工業新聞社, 1978.