

# 供試体側面での加速度計測を利用した地盤材料の 弾性波速度測定システムの開発

Development of Elastic Wave Measurement System Employing Accelerometers Attached on Side of Soil Specimens

古 関 潤 一\*・レグワン アンダン\*・佐 藤 剛 司\*

Junichi KOSEKI, LeQuang ANHDAN and Takeshi SATO

## 1. はじめに

近年、長大橋梁や高層ビルなどの土木・建築構造物の基礎が、良く締まった砂礫層を支持地盤として建設される事例が増えている。これらの基礎の建設時や地震時の変形量を精度良く予測するためには、支持地盤の変形特性を正確に把握する必要がある<sup>1)</sup>。そのための原位置試験として、近年では弾性波速度の計測が比較的頻繁に実施されるようになってきたが、このような動的な測定を行う場合、砂礫のような粗粒材料に対しては適用上の問題点が指摘されており<sup>2)</sup>、詳細な検討が必要である。

ここでは、よく締め固めた砂礫のような硬質な粗粒材料の弾性波速度を室内で計測するために新たに開発した測定システムの概要と、これを用いた基礎的な検討結果を紹介する。詳細については文献<sup>3)</sup>を参照されたい。

## 2. 測定システムの概要

本測定システムは、圧電素子を用いたアクチュエーターを振動源とし、供試体の側面に貼り付けた超小型の圧電式加速度計を用いて多点間で受振することにより、P波（圧縮波）速度およびS波（せん断波）速度の分布とその異定性を評価することができる。

大型の矩形供試体（高さ58 cm，断面23×23 cm）を対象としたセンサー配置の模式図を図1に示す。鉛直方向に伝播する弾性波速度を測定する場合には振動源を供試体上方のキャップ側面に接着し、供試体側面のメンブレン表面に設けた鉛直測線上にいくつかの加速度計を接着する。水平方向に伝播する弾性波速度を測定する場合は振動源も供試体側面のメンブレン上に接着し、同じ側面と反対側の側面の水平測線に加速度計を接着する。

発振用の振動源はセラミック製の圧電素子を積層構造としたアクチュエーター（寸法10×10×20 mm，質量35 g，

\*東京大学生産技術研究所 人間・社会部門

共振周波数69 kHz）で、±50 volt以下の電圧信号で駆動する。大型供試体を加振する場合には図2に示すように反力用のU字型鋼材（質量60 g）と2種類の形状の鋼板の間にアクチュエーターを挟み込む。鉛直・水平方向に伝播するP波（ $P_v$ および $P_h$ 波）を発振する場合には、それぞれ

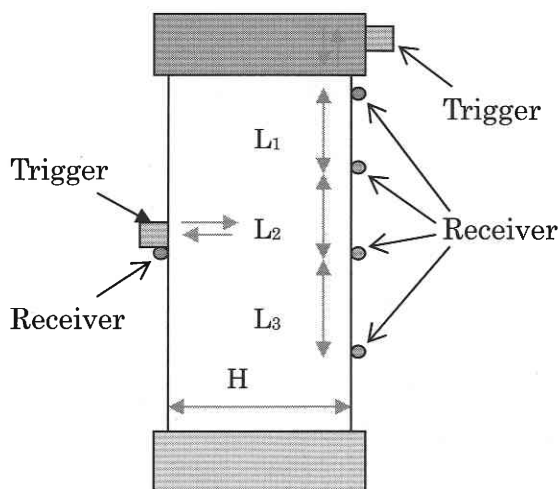


図1 大型矩形供試体を対象としたセンサー配置の模式図

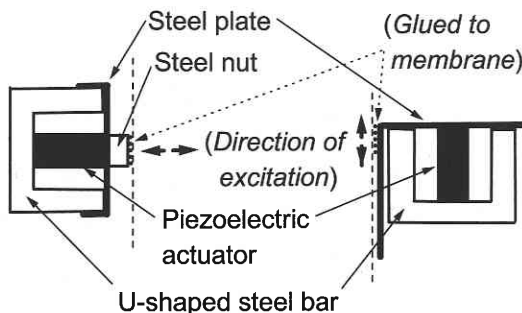


図2 振動源の模式図

キャップ側面・供試体側面にこれを接着する。銅板の形状を変更することにより、S波も同様に発振することができる。

受振用の加速度計も圧電素子を用いた超小型のもの（寸法  $4 \times 4 \times 13$  mm, 質量 1.3 g, 共振周波数 4 kHz と寸法  $\phi 3.6 \times 3$  mm, 質量 0.16 g, 共振周波数 60 kHz の 2 種類）で、供試体側面のメンブレンに直接接着する。

本測定システムは、以下のような特徴を有する。

- 1) 供試体またはキャップの側面であれば任意の位置に設置できるので、鉛直・水平方向のみならず、傾斜した方向に伝播する弾性波速度の測定も可能であり、弾性波速度の異方性を調べることができる。また、セル圧を加えずに供試体に負圧を作用させて拘束圧とする試験では、試験中にセンサーの設置位置を任意に変更できる。
- 2) 供試体中に発振・受振素子を挿入する必要がある。
- 3) 鉛直測線をいくつかの区間に分割し、それぞれにおける鉛直方向弾性波速度を測定することができる（図 1 参照）。また、水平測線をいくつか設けて、異なる高さにおける水平方向弾性波速度を測定することもできる。
- 4) 振動源に inputs する駆動電圧の波形と周波数を変化させることができるので、これらが固定される打撃法と比較して、弾性波の到達時間の判定を精度よく行うことができる。

加速度記録の計測は、大型供試体を対象とする場合には最大 4 ch の同時サンプリング（最大 100 kHz）が可能な A/D 変換モジュールをパソコンに接続して行う。一方、小型供試体を対象とする場合にはより高い周波数領域での計測が必要となるので、2 ch の同時サンプリング（最大 1 MHz）が可能なモジュールに変更して計測を行う。振動源への入力電圧（ $\pm 10$  volt で出力後に高速バイポーラ電源で増幅）と周波数の設定や任意波形の出力が可能なファンクションジェネレータ・D/A 変換モジュールの制御も同じパソコンで行う。

### 3. 大型供試体を対象とした測定結果の例

#### 3.1 測定波形の例

周波数 1.2 kHz の正弦波を駆動電圧波形として入力した場合の P 波と S 波の測定波形の例を図 3 に示す。いずれも乱れの少ない良好な入力・出力波形が得られたことから、ここでは near field effect<sup>4)</sup> の影響は無視できるものと判断し、弾性波の到達時間を入力側と出力側の加速度記録におけるピーク時刻の差として算定した。ただし、S 波の到達時間は図 3 b に示すように測定波形の 1 周期よりも長い場合があるため、図中に示した大きなノイズ波形（この場合

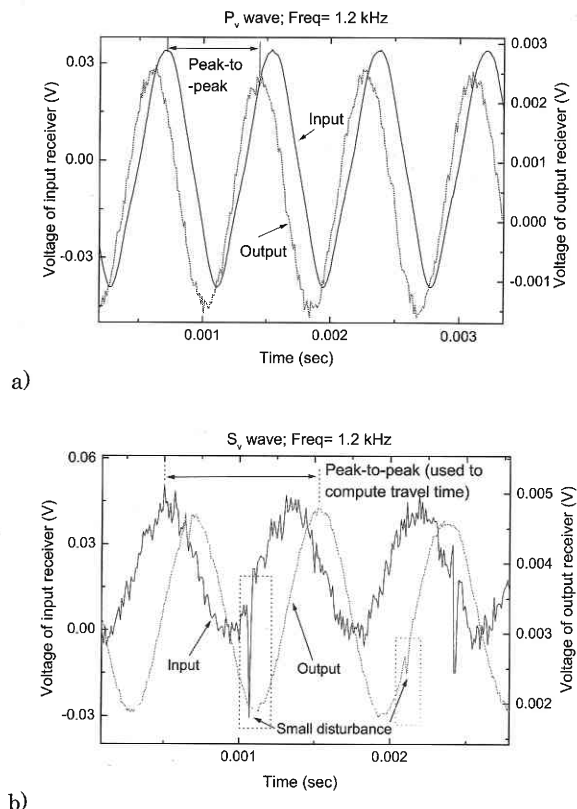


図 3 鉛直方向に伝播する P 波と S 波の測定例

はコンプレッサーが稼働し、電源がその影響を瞬時的に受けたことによる）の伝播状況等を考慮して到達時間を算定し、さらに周波数を変えて測定を行い、得られた到達時間が変化しないことを確認した。

#### 3.2 P 波速度から換算したヤング率と静的な測定値の比較

空中落下法で作成した密な乾燥豊浦砂の大型矩形供試体（図 1 参照、相対密度 90 %）を等方圧密する過程で鉛直・水平方向の P 波速度を測定した。これらの測定値から換算して求めた動的な鉛直・水平ヤング率と鉛直応力の関係を図 4 に示す。ただし、鉛直方向に伝播する P 波についてはキャップ全体を加振していることから加振直交方向の変位が拘束されていない状態を仮定し、水平方向に伝播する P 波については側面の一部のみを加振していることから加振直交方向の変位が拘束されている状態を仮定して換算を行った。

図 4 中には、同じ供試体に対して鉛直・水平方向に微小振幅の繰返し載荷を行い、LDT（図 5 参照）を用いて局所変位を測定した結果から求めた静的なヤング率もあわせて示した。いずれの方向についても動的なヤング率は静的なヤング率よりも 10 ~ 20 % 程度大きかった。しかし、ヤン

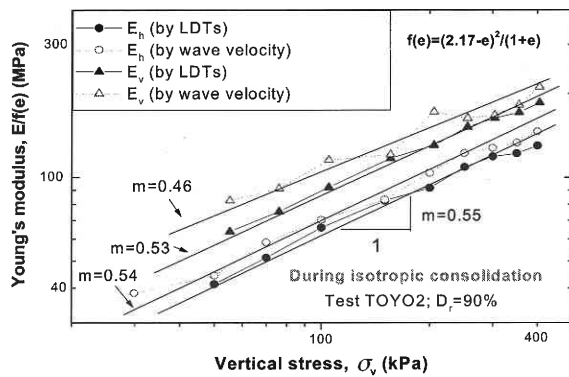


図4 等方応力状態でのヤング率の比較 (豊浦砂)

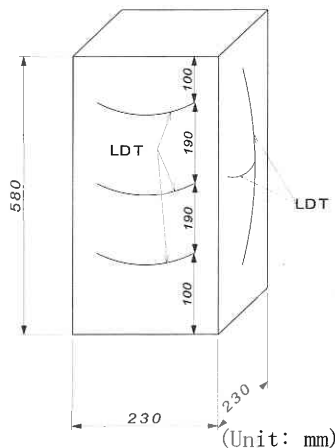


図5 静的な測定における LDT (局所変位計測装置) の配置

グ率の応力レベル依存性を示す  $m$  値 (図中の定義参照) は測定方法によらず 0.5 程度だった. 三軸伸張および三軸圧縮によるせん断過程でも同様な測定を行い, 全般的には動的なヤング率のほうが静的なヤング率よりも大きいものの, 両者の定性的な挙動は一致することを明らかにした (図6, 7 参照).

豊浦砂よりも粒径の大きい3種類の礫質土 (図8 参照) を供試体として用いた場合には, 例えば図9に示すように動的なヤング率と静的なヤング率の差が豊浦砂の場合以上に大きくなったが, 定性的な挙動は上記と同様に一致していた. 動的なヤング率と静的なヤング率の比率は, 図10に示すように応力レベルによらず各試料ごとにほぼ一定値であった. これらの比率は各試料の平均粒径とP波の波長の比に応じて変化しており, 文献2) で報告されている結果と整合していた.

なお, 大型供試体を用いた場合には, 弾性波が供試体を

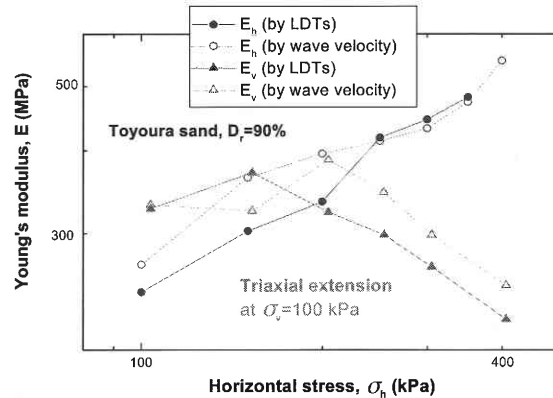


図6 三軸伸張応力状態でのヤング率の比較 (豊浦砂)

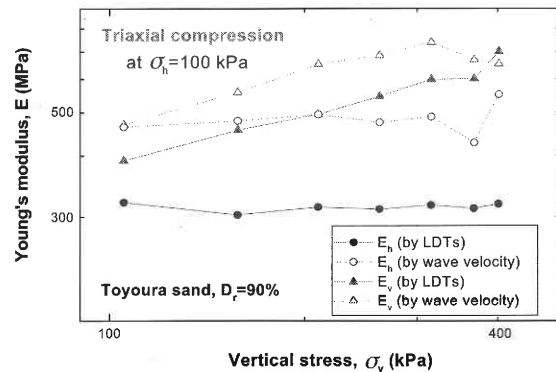


図7 三軸圧縮応力状態でのヤング率の比較 (豊浦砂)

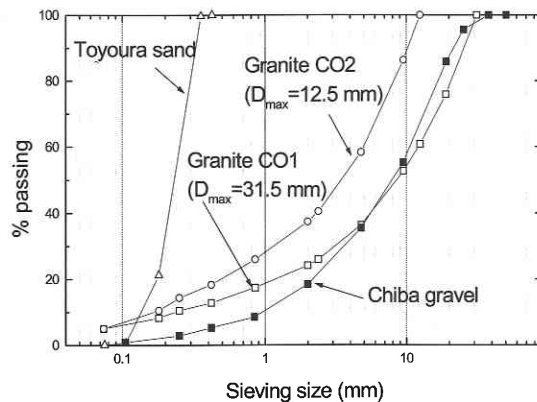


図8 試験に用いた試料の粒度分布

伝播する過程での減衰が比較的大きいために反射波の影響を無視することができるので, 上記のような連続正弦波を用いた測定が可能であった. 一方, 小型供試体 (例えば直径

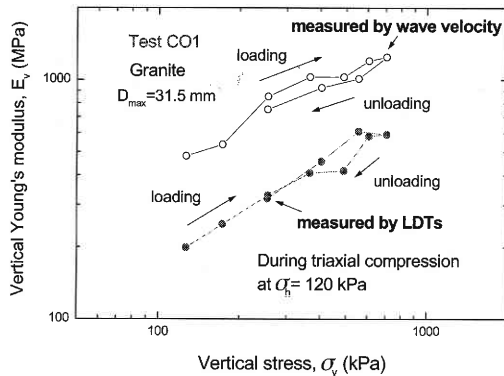


図9 三軸圧縮応力状態でのヤング率の比較 (試料 CO1)

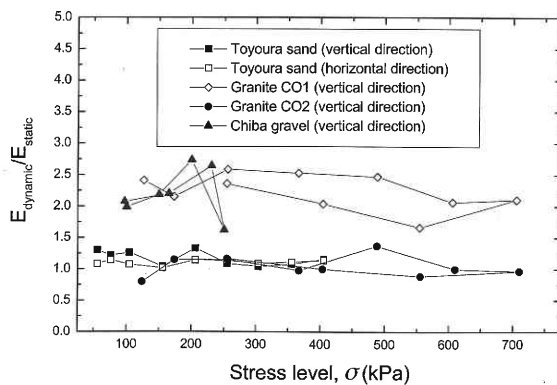


図10 等方応力状態での各試料の動的および静的ヤング率の比と応力レベルの関係

5 cm, 高さ 10 cm の円柱形) を用いた場合には, 供試体中での減衰が小さく反射波の影響が強く現れるため, これを避けてパルス波や単一の正弦波を用いた測定を行う必要があった. この点についての検討を継続して実施している.

#### 4. ま と め

よく締め固めた砂礫のような硬質な粗粒材料の弾性波速度を室内で計測するためのシステムを新たに開発した. 本システムは供試体またはキャップの側面であれば任意の位置に設置可能であり, 供試体中に発振・受振素子を挿入する必要がない. また, 複数の測線での計測が可能で, 振動源に inputs する駆動電圧の波形と周波数を容易に変化させることができる. 大型矩形供試体を用いた基礎的な検討の結果, 本システムを用いて計測した動的なヤング率は, その応力レベル依存性が別途計測した静的なヤング率と定性的に整合するが, それぞれの絶対値は必ずしも一致しないことを明らかにした.

#### 謝 辞

圧電素子を用いたアクチュエーターは, 情報・システム部門の藤田隆史教授よりご紹介いただいた. ここに記して深謝の意を表す.

(2002 年 8 月 9 日受理)

#### 参 考 文 献

- 1) 例えば, Tatsuoka, F. and Kohata, Y.: "Stiffness of hard soils and soft rocks in engineering applications", 生産技術研究所報告, Vol. 38, No. 5, pp. 135-274, 1995.
- 2) Tanaka, Y., Kudo, K., Nishi, K., Okamoto, T., Kataoka, T. and Ueshima, T.: "Small strain characteristics of soils in Hualien, Taiwan," Soils and Foundations, Vol. 40, No. 3, pp. 111-125, 2000.
- 3) AnhDan, L.Q., Koseki, J. and Sato, T.: "Comparison of Young's moduli of dense sand and gravel measured by dynamic and static methods," Geotechnical Testing Journal, ASTM, Vol. 25, No. 4, 2002 (in print).
- 4) Jovicic, V., Coop, M.R. and Simic, M.: "Objective criteria for determining  $G_{max}$  from bender element tests," Geotechnique, Vol. 46, No. 2, pp. 357-362, 1996.