

薬液注入層の波速測定と剛性率の算出

茨城大学工学部 会員 野北舜介、 会員 桑原祐史

日立市役所 会員 高畑和宏

はじめに

薬液注入工法を適用した後に薬液注入範囲を確認することが重要であるが、簡便な確認方法が知られていない。ここでは、注入範囲を非接触で測定することを念頭において、薬液注入層を通過する縦波と横波の速度を測定し、さらに、測定対象とした砂層と薬液注入層の剛性率を求める。

実験装置

実験装置の外観を Fig. 1 に示す。主要な構成要素は、全長 6 m の試験筒、縦波 (P 波) と横波 (S 波) を発生させるための振動片、振動を検知するための衝撃センサー、オシロスコープ、打撃用金槌である。試験筒は、実験条件の変更を容易にするため、3 分轄してフランジで接合する方式とした。筒の素材は塩化ビニール、外径 114 mm × 内径 100 mm である。塩ビ筒の内側には厚さ 10 mm の多孔性プラスチック (プラスチック・スポンジ) を貼り、砂層の振動が筒壁に伝わらないように配慮した。このため砂層の直径は 80 mm となった。試験筒の長さは、上部筒 U = 2.3 m、中間筒 A = 0.9 m、または B = 0.6 m、または C = 0.3 m、下部筒 L = 2.8 m とした。中間筒は長さの異なる薬液注入層を作るために 3 種類を用意し、試験筒を直立させて実験に供した。

縦波の発振源としては、下部筒の底部に直径 98 mm × 厚さ 8 mm の木製円板を置き、中心に 70 mm を穿孔した塩ビ・ソケットで筒に固定した。このとき、木製円板と塩ビ筒および塩ビ・ソケットの間にプラスチック・スポンジを挟み木製円板の振動が筒壁に直接伝わらないように配慮した。木製円板には衝撃センサーを貼りつけて打撃時刻の開始点を検出した。横波の発振源としては、下部筒の底面から 1.5 m 高さの筒壁の相対する位置に縦 30 mm × 横幅 15 mm の窓を 1 個ずつ開孔し、それぞれの窓に縦に切れ目を入れたスポンジ・パッキンをはめ込み、幅 20 mm、厚さ 5 mm、長さ 200 mm の鋼鉄製ヤスリをヤスリ面が筒軸に平行するように設置した。砂層中のヤスリを水平方向に動かし、砂層とヤスリのスベリに基づく横波を発生させた。砂層の振動は、下部筒の底面から 2.5 m の高さに設けた加速度センサー 1 と上部筒の上端から 1.5 m の位置に設けた加速度センサー 2 を用いて検知した。

実験条件と実験手順

まず、上部筒、中間筒 A、および下部筒を接続した全長 6 m の標準試験筒に乾燥砂 (海砂) を満たし、下部筒底に設けた木製円板を金槌で打撃して縦波を発生させ、その振動を加速度センサー 1 と加速度センサー 2 によりオシロスコープを用いて計測した。つぎに、乾燥砂を抜いて試験筒を解体し、横波発生用の鋼鉄製ヤスリを取り付け、さらに加速度センサー 1 と 2 を (横波に対して) 高感度方向に設置したのち、標準試験筒に乾燥砂を満たし、ヤスリの頭を金槌で水平に打撃して横波を発生させ、その振動を加速度

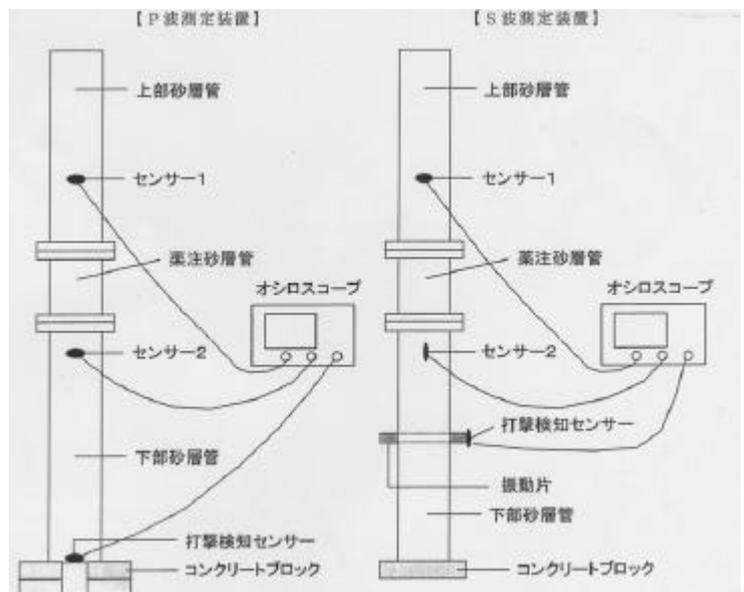


Fig. 1 Apparatus

センサー 1 と 2 によりオシロスコープを用いて計測。

薬液注入層に関しては、乾燥砂を満たした中間筒 A、B、および C に薬液を注入して薬液注入層を形成させたのち、乾燥砂を満たした上部筒と薬液注入した中間筒 A、B、または C のいずれかと乾燥砂を満たした下部筒を接続し、試験筒とした。したがって、試験筒の全長は、6 m、5.7 m、または 5.4 m のいずれかである。実験手順は乾燥砂の場合と同様とした。

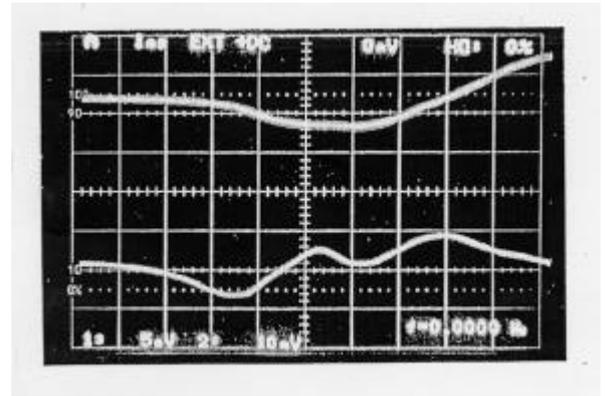


Fig. 2 Oscillograph

測定結果

乾燥砂に関する縦波実験のオシロスコープ画面を Fig. 2 に例示する。この実験は標準試験筒を用いて行った。したがって、センサー間の距離は 2 m である。掃引時間（横軸）は、1 目盛を 1 ms に設定し、電圧（縦軸）は、センサー 1 に対して 1 目盛を 10 mV に、センサー 2 に対して 1 目盛を 5 mV に設定した。図から読み取ると、2 波の第 1 ピーク（最小点）の時間差はおよそ 2.6 ms であった。そこで、縦波の波速として、

$$2.0\text{ m} / 0.0026\text{ s} = 770\text{ m/s}$$

薬液注入層と乾燥砂層を含んだ試験筒に関する縦波実験および横波実験の結果を整理して、Fig. 3

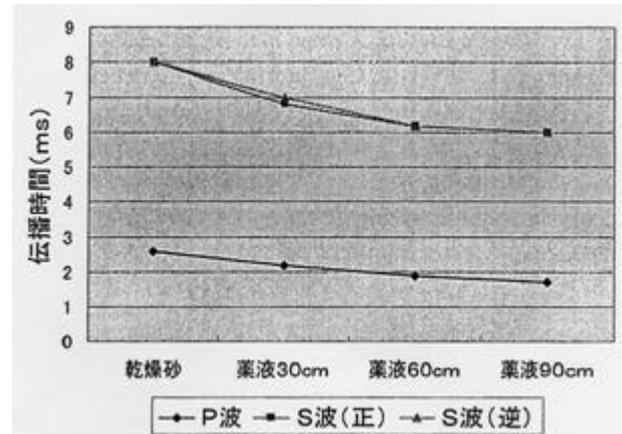


Fig. 3 Wave Propagation Time

が得られた。そこで、薬液注入層における波速は、薬液注入層の長さに拘わらず一定であると仮定して、すべての実験結果にほど良く適合する波速を次式 (1) によって計算した。結果を Tab. 1 に示す。

$$S = \text{Min} [(T_0 - L/V_0)^2 + \{T_j - L_j/V_0 - (L - L_j)/V_1\}^2] \quad (1)$$

ここで、L は試験筒の全長、L_j は j 番目の薬液注入層の長さ、T₀ は乾燥砂層実験での伝達時間、T_j は薬液注入層と乾燥砂層を含んだ試験筒での伝達時間、V₀ は乾燥砂層での波速、V₁ は薬液注入層での波速。

剛性率の算出

縦波速度を V_p、横波速度を V_s とするとき、弾性体について次の関係式 (2) (3) が知られている。

$$V_p = \{(\rho + 2\mu) / \rho\} \quad (2)$$

$$V_s = (\mu / \rho) \quad (3)$$

ここで、ρ と μ はラメの定数 (剛性率の係数)、ρ は密度である。乾燥砂層と薬液注入層の密度実測値として、1.7 および 2.1 (g/cm³) を用い、波速として Tab. 1 上段の値を採用して、剛性率の係数を求め Tab. 1 の下段に示した。

Tab. 1 Wave Speed and Coefficients

	砂層	薬注層
(g/cm ³)	1.7	2.1
V _p (m/s)	770	3300
V _s (m/s)	255	354
μ (MN/m ²)	0.011	0.026
(MN/m ²)	0.079	2.2

まとめ

砂層と薬液注入層について縦波と横波の速度を測定し、それぞれの層の剛性率の係数を算出した。