

京都大学工学部 正員 畠 昭治郎 同 正員 谷本 親伯
同 正員 西原 晃 同 学生員 玉置 孝

1. はじめに 弾性波試験は、その簡便さにより現場調査法として頻繁に利用されているが、弾性波速度値をインデックスとした取扱いが多く、直接的には力学特性とは関連していない。そこで不連続性材料の弾性波伝播特性と力学特性の両者の間の基本的関係（特に弾性波縦波速度と動的弾性係数の関係）を明らかにし、不連続性材料の力学特性を示す因子として弾性波伝播特性がどの程度の可能性を持っているかを検討することを目的として本研究が着手された。そのため、まず不連続面を人為的に作り、石膏供試体に対し超音波試験・軸圧縮試験を実施した。

2. 超音波試験および軸圧縮試験

1) 供試体 実験に用いた供試体は以下のように2種類に分類できる。

a) LW (Layered-Width) シリーズ (供試体寸法 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ の直方体)

図-1に示すように互層の様相を呈する供試体で、層の方向は全て水平で幅が変化する。層の幅は0 cmから10 cmまで1 cmおきに11段階に変化させた。

b) LD (Layered-Direction) シリーズ (LWシリーズと同じ)

図-2に示すようにLWと同じく互層の様相を呈する供試体で、層の幅を一定として層の方向が変化する。層の方向は層の幅2 cm・3 cmの2つのシリーズに対して $\theta = 90^\circ, 75^\circ, 60^\circ, 45^\circ, 15^\circ$ おきに4段階に変化させた。但し図1・2中の斜線部分は石膏・粘土の混合物、白い部分は石膏で各々構成されている。石膏供試体の水・石膏比は2:3、石膏・粘土の斜線部分の重量比は2(石膏):1(粘土)とした。その結果、石膏供試体の弾性波速度・弾性係数の値は各々2.2 km/sec, $103.18 \times 10^4 \text{ kN/m}^2$ 、石膏・粘土の混合物の供試体では1.93 km/sec, $17.40 \times 10^4 \text{ kN/m}^2$ であった。

2) 実験装置と方法

a) 超音波試験装置 図-1, 2中の発振点Oにパルスジェネレータからピエゾ端子を通して波動を発生させ、受振点Mでピエゾ端子により波動を受けオシロスコープで波動を観測することにより弾性波速度も観測した。

b) 軸圧縮試験 得られる応力-ひずみ関係より弾性係数を測定した。

3. 理論的考察

1) 層方向が水平な場合 図-1に示したLWシリーズの供試体が圧縮を受け、その全長 l が Δl だけ変位し、斜線部分の長さ l_1 が Δl_1 だけ変位したとする。各々の部分の弾性波速度・弾性係数の値を V_{p1} , V_{p0} , E_1 , E_0 、さらに材料全体の弾性波速度・弾性係数の値を E , V_p とすると、いずれの部分の応力も等しいことより

$$E \frac{\Delta l}{l} = E_1 \frac{\Delta l_1}{l_1} = E_0 \frac{\Delta l - \Delta l_1}{l - l_1} \quad \therefore E = \frac{E_1 E_0}{E_1 (1 - \frac{l_1}{l}) + E_0 \frac{l_1}{l}} \quad (1)$$

また図-1中のOMで示した弾性波伝播経路を考える

$$\therefore V_p = \frac{V_{p1} V_{p0}}{V_{p1} (1 - \frac{l_1}{l}) + V_{p0} \frac{l_1}{l}} \quad (2)$$

1) 式, 2) 式より l_1/l を消去すると次式が得られる。

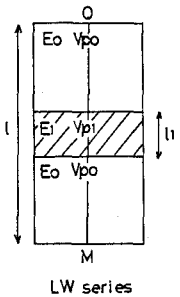


図-1 LWシリーズ

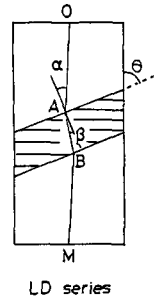


図-2 LDシリーズ

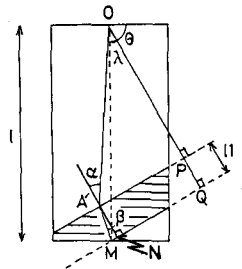


図-3 伝播経路

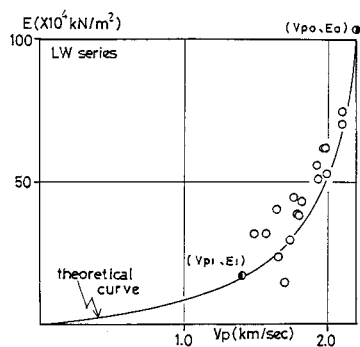


図-4 LWの試験結果

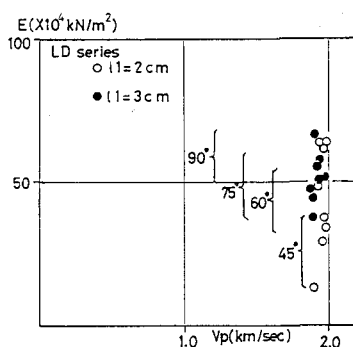


図-5 LDの試験結果

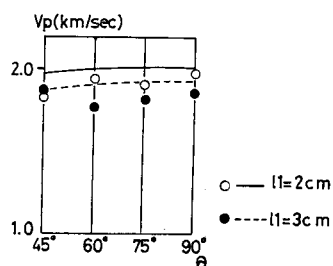


図-6 層の方向の影響

$$E = \frac{E_1 E_0}{E_1 + \frac{V_1 V_0 - V_0 V_1}{V_0 (V_0 - V_1)} (E_0 - E_1)} \quad (3)$$

よって層方向が水平であるなら、各層の弾性波速度・弾性係数および見かけの弾性波速度を測定することにより、2)式によって層の幅が、3)式によって材料全体の弾性係数が推定できることになる。

2)層方向が水平でない場合 図-2に示したLDシリーズの供試体中に弾性波がOABMの様に屈折して伝播するものとする。この時、図中の斜線部分の両側での伝播経路は平行だから、図-3の様に中央部分の幅を変えなければ、その位置を平行移動させても受振点OからMまでの走時(T)は変化しない。

図-3で $\overline{OA'} = x$, $\overline{A'M} = y$, また V_0, V_1 を図-1と同じく定義すると

$$\sin \beta / \sin \alpha = V_1 / V_0 \quad (4)$$

また幾何的な関係より

$$x \sin \alpha + y \sin \beta = l \sin \lambda \quad (5)$$

$$x \cos \alpha = l \cos \lambda - l_1 \quad (6)$$

$$y \cos \beta = l_1 \quad (7) \quad (\text{但し } \lambda = 90^\circ - \theta)$$

今、 $V_0, V_1, l, l_1, \lambda$ が既知であるとする、式(4), (5), (6), (7)より α, β, x, y が求まる。 x, y がわかれば次式で走時T, および見かけの弾性波速度 V_p を計算することができる。

$$V_p = l / T \quad (8) \quad \text{---} \quad T = x / V_0 + y / V_1$$

4. 実験結果

1) LWシリーズに対する実験結果 図-4にLWシリーズに対して実施された実験結果を示す。白丸が実験結果を、実線が式(3)を使った V_p による E の推定値を示しているが、その精度はかなり良いと言える。

2) LDシリーズに対する実験結果 図-5にLDシリーズに対して実施された実験結果を示す。図-5は V_p と E の関係、図-6は層方向 θ と V_p の関係を示している。図-5より E は層方向の影響を受けて大きく変動しているのに対し、 V_p は殆ど変化していない事がわかる。これは図-6を見て明らかである。但し図中の曲線は式(8)による理論曲線である。

5. 終りに

土木工事において弾性波探査は対象岩盤の力学的特性を知る調査法としてだけでなく、岩盤内の様々な弱面や不連続面の位置・形状・幅・方向等も明らかにする方法としても期待されている。本研究では、弾性波伝播特性はその幅を知る手がかりにはなり得るが、方向を知るための指標としては困難であると考えられる。