

(24) 互層岩盤中の弾性波伝播挙動

京都大学工学部 正員 谷本 親伯

正員 畠 昭治郎

学生員 ○玉置 淳

1. はじめに

弾性波試験は、現場調査法として頻繁に利用されているが、弾性波速度値は岩盤の良好度を示す1つのインデックスとして取扱われる事が多く、直接的には力学特性と関連していない。そこで本研究では岩盤の不連続性を示す指標としての弾性波伝播特性の信頼性を再検討すると共に、その力学特性を表わす指標としての可能性をも検討してみた。不連続性に関わるパラメーターとして、層の幅・方向、きれつの頻度を取り上げ、室内実験により、これらの因子と材料の力学的特性および、弾性波伝播特性との間の基本的関係を明らかにした。

また、得られた関係を基に、実際の岩盤に対して行われた弾性波試験結果に対し、若干の考察を試みた。

2. 超音波試験および一軸圧縮試験

層の方向・幅、きれつ頻度を考慮した供試体に対し、超音波試験と一軸圧縮試験を実施した。超音波試験は、パルスジェネレーター (WAVETEK MODEL 145)、発振子および受振子 (村田製作所製電歪素子)、オシロスコープ (TEKTRONIX 405) を用いて行った。

実験に用いた供試体は次の3種類に分類できる。

- a) W (Width) シリーズ (図1)
- b) D (Direction) シリーズ (図2)
- c) C (Crack) シリーズ (図3)

W、D、Cのシリーズは各々、層の幅 (Width)、方向 (Direction)、きれつ頻度 (Cracks) の影響を考慮した供試体である。なお、互層岩盤を対象とする本研究において、層の影響ばかりでなくきれつの影響も取り上げるのは、互層岩盤と言えども、きれつの発達が顕著な場合、その影響は層の厚さ・方向と比較しても、決して無視し得る程小さくはないと考えられるからである。

W、Dシリーズの供試体は図1、2に示すようにいずれも互層の様相を呈する、寸法5 cm×5 cm×10 cmの直方体の供試体である。Wシリーズでは、層の方向を水平に保ち、幅を0 cmから10 cmまで1 cmおきに11段階に変化させた。Dシリーズでは層の幅を一定に固定し方向のみを変化させた。ただし、図1、2中の斜線部分は石膏と粘土の混合物、白い部分は石膏のみで各々構成されている。石膏は水・石膏 (重量) 比2 : 3、石膏と粘土の混合物は石膏と粘土を重量比2 : 1で配合した。その結果、石膏の弾性波速度・弾性係数の値は各々2.2 km/sec, 1.03×10^6 kN/m²、石膏と粘土の混合物は1.43 km/sec, 1.74×10^5 kN/m² であった。

Cシリーズの供試体は均質の石膏供試体に厚さ約0.7 mm、幅1.5 cm及び3 cmのプラスチック板を挿入する事によってクラックを作ったものである。

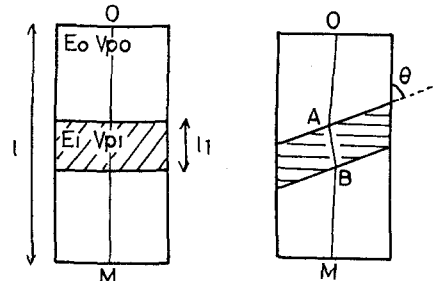


図1 Wシリーズ供試体 図2 Dシリーズ供試体

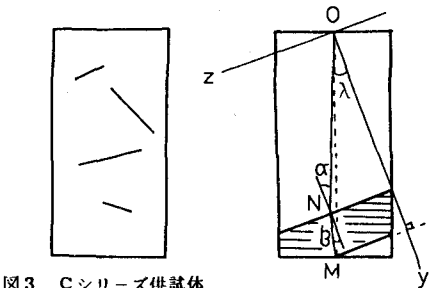


図3 Cシリーズ供試体

図4 経路長算定

3. 理論的考察

1) 層の幅の影響

図1に示したWシリーズの供試体が圧縮を受け、その全長 ℓ が $\Delta \ell$ だけ変位し、斜線部分の長さ ℓ_1 が $\Delta \ell_1$ 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、応力が一様な事より

$$E = E_1 E_0 / (E_1 (1 - \ell_1 / \ell) + E_0 \ell_1 / \ell) \quad (1)$$

また図1中にOMで示した弾性波伝播経路を考えると

$$V_P = V_{P1} V_{P0} / (V_{P1} (1 - \ell_1 / \ell) + V_{P0} \ell_1 / \ell) \quad (2)$$

1)、2) 両式より ℓ_1 / ℓ を消去すると次式が得られる。

$$E = \frac{E_1 E_0}{E_1 + \frac{(V_{P1} V_{P0} - V_P V_{P1})(E_0 - E_1)}{V_P (V_{P0} - V_{P1})}} \quad (3)$$

2) 層の方向の影響⁽¹⁾

図2に示したDシリーズの供試体を弾性波が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4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発振点OからMまでの走時(T)は変化しない。つまり、図2と図4で経路長OABMとONMは等しい。図4でOを原点として、y、z軸を図の様に取ると、点M、Nは次の様に表わされる。

$$M = M(L_y, L_z) \quad N = N(L_y - \ell_1, \Phi L_z) \\ (\text{ただし } L_y = \ell \cos \lambda, L_z = \ell \sin \lambda, 0 < \Phi < 1)$$

よって走時Tは次式で示される。

$$T = \sqrt{(L_y - \ell_1)^2 + (L_z \Phi)^2} / V_{P0} + \sqrt{L_z^2 (1 - \Phi)^2 + \ell_1^2} / V_{P1} \quad (4)$$

またスネルの法則により

$$\frac{V_{P0}}{V_{P1}} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\Phi}{1 - \Phi} \sqrt{\frac{L_z^2 (1 - \Phi)^2 + \ell_1^2}{(L_z \Phi)^2 + (L_z - \ell_1)^2}} \quad (5)$$

(5) 式を展開し整理すると

$$\Phi^4 - 2\Phi^3 + (pq^2 - 2pqr + r^2 + 1)\Phi^2 - 2p(q-r)^2\Phi + p(q-r)^2 = 0 \\ (\text{ただし } p = V_{P0}^2 / (V_{P0}^2 - V_{P1}^2), q = L_y / L_z, r = \ell_1 / L_z) \quad (6)$$

よって(6)式の4次方程式を解いて Φ を求め、4)式に代入すればTが算出される事になる。また V_P も次式により、求められる。

$$V_P = \ell / T \quad (7)$$

4. 実験結果および考察

1) 層の幅の影響

図5にWシリーズに対して実施した実験結果を示す。白丸が実験結果を実線が(3)式によるものである。実験値と理論値はかなりよく一致している。

2) 層の方向の影響

図6、および図7(a)、(b)にDシリーズの供試体に対して行った実験結果を示す。図6は V_P とEの関係、図7(a)、(b)は層方向 θ と V_P 、Eの関係を示している。これより、Eの値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 の値は殆ど変化していないのがわかる。それは、図6を見ても明らかである。図7(a)における実線及び点線は理論的考察より得た理論曲線を示しているが、実験結果と良く合致している。また、Dシリーズの $\theta = 45^\circ 60^\circ$ の供試体のうち幾つかは、図2の白線部分と斜線部分の境界すなわち弱面で破壊したが、このような事が、材料の変形特性が、顕著に層の走向、傾斜の影響を受ける理由

であると考えられる。

3) きれつの影響

原位置の岩盤において、きれつの存在状況を表現する指標として、きれつ頻度が良く用いられている。ここでは、単位面積中に含まれるきれつの合計長さをきれつ頻度 (n) として用いた。図8 (a)、(b) はCシリーズに対する実験結果をきれつ頻度で整理したものである。それぞれ、きれつ頻度 (n) と弾性波速度 (V_p)、弾性係数 (E) の関係を表わしている。なお、実験値はインタクトな供試体の値 (V_{p0} , E_0) を用いて、無次元化している。図8 (a) を見ると線形関係が認められる。

$$V_p / V_{p0} = 1.0 + a \times n \quad (8)$$

本実験においては $a = -9.58 \times 10^{-3}$ となったが、この係数は、きれつの風化状況や、充填物、含水状況等によって変化する係数と考えられる。図8 (b) における実線は次式で示される曲線である。

$$E / E_0 = (1.0 + a \times n)^2 = (V_p / V_{p0})^2 \quad (9)$$

この曲線は良く結果を表わしている。このことより、弾性波伝播特性はきれつ頻度を媒体として、材料の力学特性と関係付けられる事に気付く。

5. 原位置試験結果の検討⁽²⁾⁽³⁾

1) 方向の影響

ここで取り上げるのは、本四架橋大鳴戸橋建設にともなう四国自動車道路切取法面の安定に関する調査の一環として実施された孔間弾性波伝播速度測定結果である。

図9に示す1～6の位置にΦ65mm、深さ9.0mの鉛直ボーリングを行い、深度2m、4m、6m、8mの地点で試験を行った。図に示すように、2-6方向が地層方向である。また測定結果は1-6、2-6、3-6、4-6、5-6の各々の測線に対して、各深度毎に示されている。この結果により、地層方向による顕著な異方性を見る事はできない。これは、弾性波伝播特性が層の方向の影響を敏感に検知する事ができず、層の影響よりもむしろきれつの影響を多く受けたためと考えられる。

2) きれつの影響

池田はボーリング孔内速度検層、コアの速度測定、観察およびトンネルにおける孔間弾性波速度測定、供試体の速度測定、トンネル内岩盤観察によるきれつ頻度算定により、きれつ頻度 (n) と割れ目指数 ($k = V_{p0} / V_p$) との関係を調べた。その結果 n の値は $5.0 / (k - 0.1)$ と $2 - 4.0$ と $5.0 / (k + 0.1)$ 間に分布し、おおよそ次の式で表わせる事がわかった。

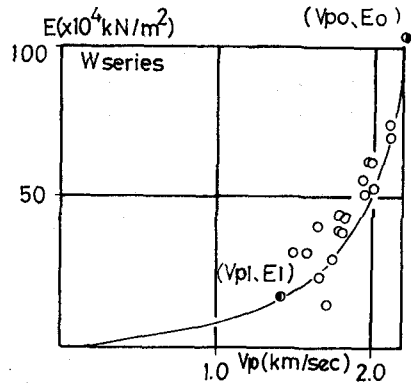


図5 Wシリーズ実験結果

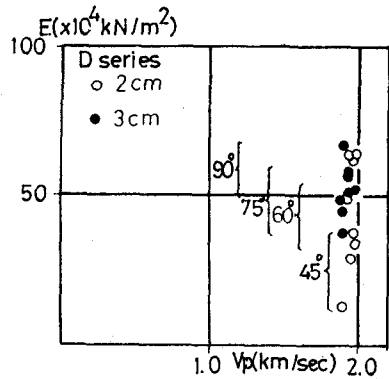


図6 Dシリーズ実験結果

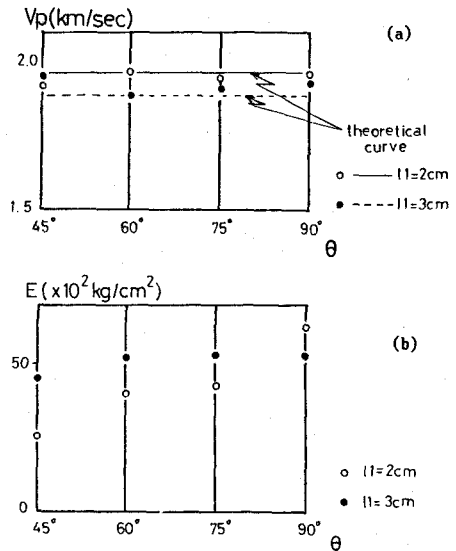


図7 層方向の影響

$$n = 5.0/k^2 - 4.0 \quad (10)$$

測定結果が幅を持つのは、同様のきれつ頻度でも、風化の程度や含水の具合等、きれつの質的な状況が違っているためと考えられる。

先に述べた室内試験の結果を池田の報告と対応させると、図10のようになる。プロットされた点が室内試験結果であるが、現場のデータと比較して割れ目指数の値が大きく出ている。これは、原位置の岩盤のきれつが、今回用いた供試体のきれつの様に理想的な状態にあるのではなくかなり風化が進んでいるためと考えられる。また、本研究においては、 n と k の間に線形関係が見られ、池田の報告と一致しない結果となっているが、今後さらに検討する必要がある。

6. おわりに

本報告では不連続性に関わるパラメーターとして、層の方向、幅、きれつ頻度を取り上げ、その影響を検討したが、いずれの因子も材料の力学特性に大きく影響を与えるのに対し、弾性波伝播特性は、層の厚さ、およびきれつ頻度を知る手がかりには成り得るが、層の方向を知るためのパラメーターとしては期待しにくい事がわかった。よって現場において、弾性波試験を実施する際は、層の方向をボーリングその他の方法で、あらかじめ知っておく必要があるだろう。また、他にきれつの風化度や含水状態等に関する検討も必要であると考えられる。今後の研究課題である。

7. 参考文献

- 1) 池田和彦 地盤の性状と調査設計 地質計測株式会社 1982. 1
- 2) 島昭治郎 多柱基礎掘削による岩盤ゆるみ領域の解析 京都大学工学部土木工学教室 1979. 3
pp. 83~197
- 3) 谷本親伯 NATM-1 森北出版株式会社 1984 pp. 56~61

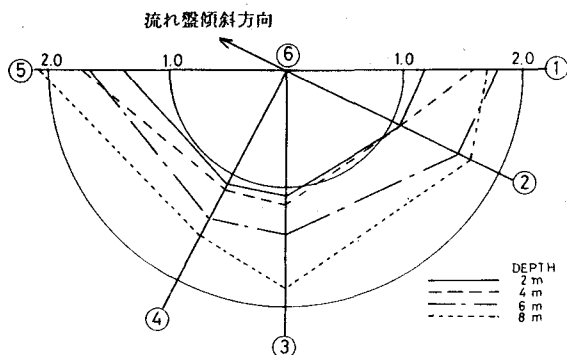


図9 孔間弾性波伝播速度測定結果(km/sec)

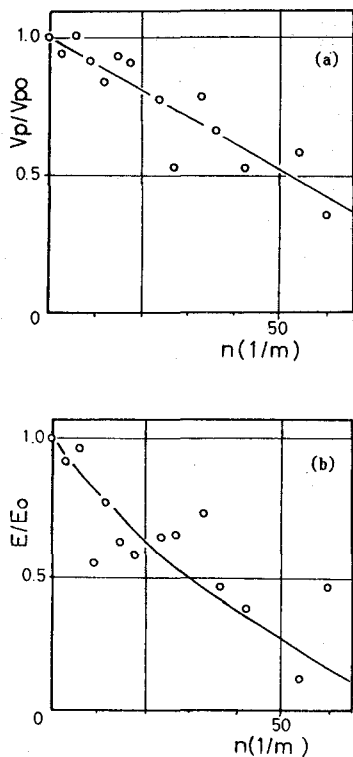


図8 きれつ頻度の影響

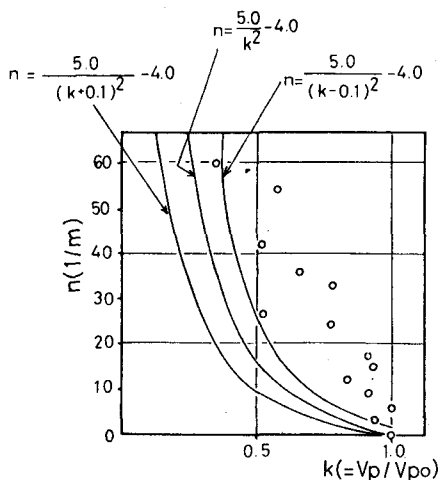


図10 きれつ頻度と割れ目指数の関係

(24) SEISMIC AND MECHANICAL BEHAVIOR OF LAYERED ROCK

by Chikaosa TANIMOTO, Shojiro HATA, and Jun TAMAKI
Dept. of Civil Engineering, Kyoto University

SUMMARY

Seismic (or acoustic) surveys have been extensively developed in Japan and have become conventional in both investigations at the planning stage and field measurement at the construction stage. Though the propagation velocity of a seismic wave is an overall index of the dynamic behavior of a rock mass, its relationship to the mechanical properties of rock including discontinuities have not yet been clarified.

The following parameters were chosen to describe the behavior of P-waves in jointed rocks: velocity(V_p), fracture frequency(n), aperture(b), moisture content of the joint fill(w) and velocity ratio(k), defined by the ratio of P-wave velocity in-situ or through a cracked sample to that of intact rock. [Ikeda, 1979; Hata, Tanimoto, et al, 1980; Tanimoto, Ikeda, 1983]

Therefore, the objective of this study is to estimate mechanical properties of rock masses through seismic surveys without performing expensive and time-consuming field tests, which tend to be impractical especially in tunneling.

Tanimoto and Ikeda [1983] discussed the fundamental relationship between seismic and mechanical properties of jointed rock. For this time, theoretical and experimental approaches were extended to layered rock. Thicknesses of respective layers and orientations of layers must be added as new parameters.

Following conclusions were obtained from the laboratory tests and field measurements.

- 1) From the practical point of view, fracture frequency(n) is a predominant parameter in the relationship between seismic and mechanical properties of layered rock as well as jointed rock.
- 2) Parameters such as orientation and thickness of a layer and fracture frequency are very sensitive to mechanical properties of rock, and it is possible to estimate a thickness of layer and degree of fracture frequency in terms of seismic survey. However, it was confirmed that seismic survey will not give distinct information to an orientation of layers.