

(25) 不連続岩盤せん断時の弾性波伝播挙動

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

学生員 松田 均

1. はじめに 弾性波速度は岩石実質部の性質と岩盤内に存在する不連続面の性質に関する総合的なパラメータであると考えられており、この弾性波速度値は、岩盤の良好度を示す1つのインデックスとして、岩盤分類やゆるみ領域の調査において、現在頻繁に利用されている。

岩盤の不連続性に起因する力学特性と弾性波伝播特性の関係については、様々な研究¹⁾²⁾³⁾がなされているが未だ明瞭な結論は得られていない。

そこで、本研究では、とくに不連続面の力学特性を示すパラメータとして、ジョイントの剛性を取りあげ、弾性波伝播特性との関係を明らかにした。

そのため、室内において、ジョイントの閉合時ならびに、せん断時の弾性波速度を測定し、ジョイントの変形挙動と弾性波伝播挙動の関係を調べた。

2. 等間隔節理モデル⁴⁾ まず、岩盤が一方向のみに規則的に発達した不連続面を持ち、弾性波が、節理に直交する伝播経路を持つ場合を考える。(図-1)

経路方向(図中の点線)の見かけの変形係数を算出し、1次元波動伝播を考えると、見かけの弾性波速度(V_p, V_s)は次の様に与えられる。岩石の密度を ρ 、P波速度を V_{po} 、S波速度を V_{so} とし、ジョイントの剛性を、垂直剛性 kn 、せん断剛性 ks 、節理間隔を S 、き裂つ頻度を N とする。

$$V_p = 1 / \sqrt{1 / V_{po}^2 + \rho N / kn, d} \quad \text{--- ①}$$

$$V_s = 1 / \sqrt{1 / V_{so}^2 + \rho N / ks, d} \quad \text{--- ②}$$

(但し $N = 1 / S$)

ここでは岩盤の不連続性が、き裂つ頻度(N)と、ジョイント剛性(kn, d および ks, d) により表わされている。

①および②式においてジョイントの剛性を kn, d 、 ks, d としたのは、波動伝播に関わる動的剛性として、静的剛性 kn, s 、 ks, s と区別するためである。

①および②式を見ると、岩盤の弾性波速度(V_p, V_s)が岩盤の不連続性(N, kn, d, ks, d)と岩石自身の性質(ρ, V_{po})により決まる値であることがわかる。

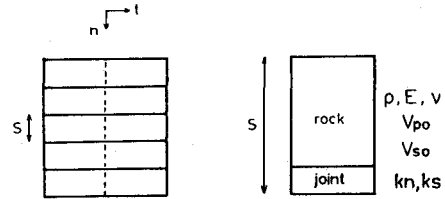


図-1 等間隔節理モデル

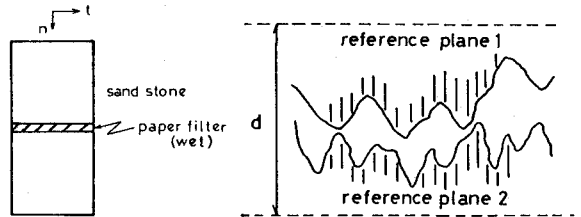


図-2 供試体1

図-3 ジョイントの閉合

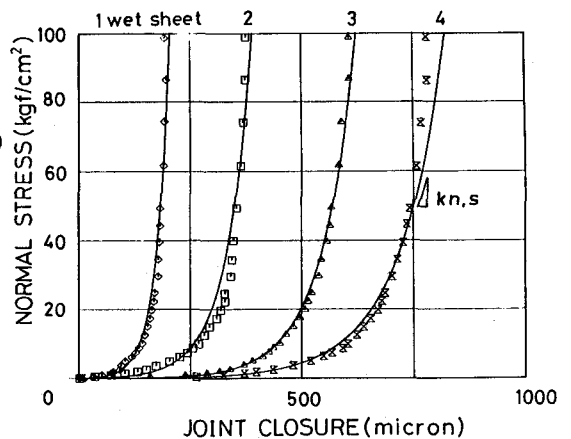


図-4 ジョイントの垂直変形

	A(micron)	B(micron)	r
1 wet sheet	67.93	29.64	0.9876
2 wet sheet	124.65	57.79	0.9675
3 wet sheet	264.96	77.91	0.9968
4 wet sheet	343.98	104.15	0.9961

表-1 定数の値

3. 実験1—ジョイントの垂直変形と弾性波伝播挙動

1) 実験方法及び供試体 砂岩の間にろ紙を挿入した供試体(図-2)に対し、図のn方向に、1軸圧縮試験と超音波試験を実施し、ジョイントの閉合に伴う弾性波速度の変化を観測した。ろ紙の枚数は1枚から4枚まで4段階に変化させた。砂岩は直径約70mm、高さ約50mmの円柱形の供試体で、100分の1mmの精度で端面を整形したものである。P波速度は4.27km/sec、密度2.52g/cm³であった。ろ紙の厚さは、乾燥状態で0.243mm、水を含んだ状態で0.286mmであった。また超音波試験はパルスジェネレータ(WAVETEK MODEL 145)、発信子および受信子(村田製作所製電歪素子)、オシロスコープ(TEKTRONIX405)を用いて実施した。

2) 結果

a) ジョイントの垂直変形 ジョイントの垂直変形量は、図-3において示した2つのreference planeの間の距離dの減少量をもって表される。つまり、載荷前の距離をd₀とすると、ジョイントの垂直変形量(u)は次の様に表せる。

$$u = d_0 - d \quad \text{————— ③}$$

ジョイントの垂直変形に関する研究は古くから行われているが、最近のものでは、Goodman(1976)⁵⁾、Brown & Sholtz(1984)⁶⁾があげられる。彼等は充填物を含まないジョイントに対して実験を行っている。その結果、ジョイントの垂直変形量(u)と垂直応力(σ)の間に次の様な関係が近似できると報告している。

$$u = A + B \cdot \ln \sigma \quad \text{————— ④}$$

ここでは、Goodman(1976)にならい、ジョイントを含んだ岩石の変形量から岩石自身の変形量を引いた値を、ジョイントの垂直変形量(joint closure)とした。

図-4に実験結果を示す。プロットされた点が実験値で、実線が最小自乗法により④式の形で近似した曲線である。

表-1に定数A、Bの値と、uとlnσの相関係数rの値を示す。これより、ろ紙を含んだジョイントの変形特性も、④式の形で近似できる事がわかる。

b) ジョイントの静的垂直剛性 図-4における実線の任意の点における接線の勾配を静的垂直剛性(kn,s)とすると、kn,sは④式により次の様に表せる。

$$kn,s = \sigma / B \quad \text{————— ⑤}$$

⑤式を見るとkn,sはσに比例して増加することがわかる。この関係を図示したのが図-5である。同一の垂直応力を

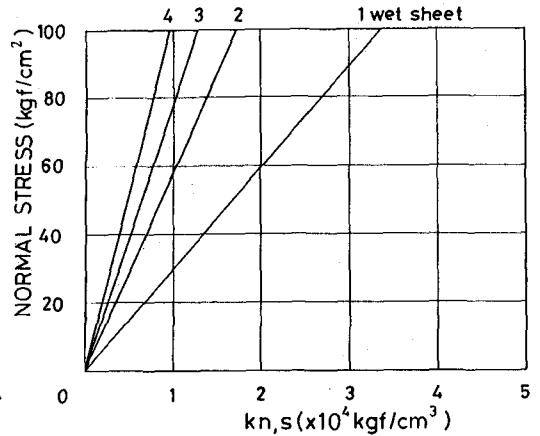


図-5 ジョイントの静的垂直剛性

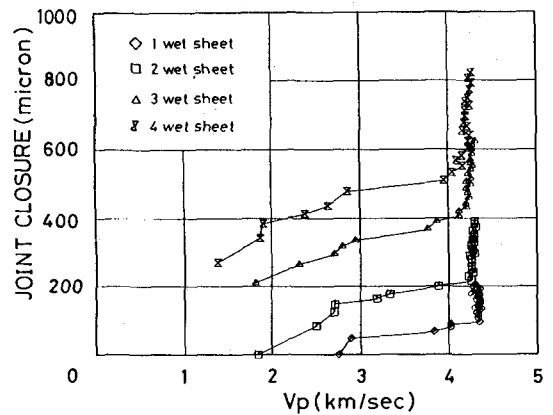


図-6 ジョイントの垂直変形量とP波速度

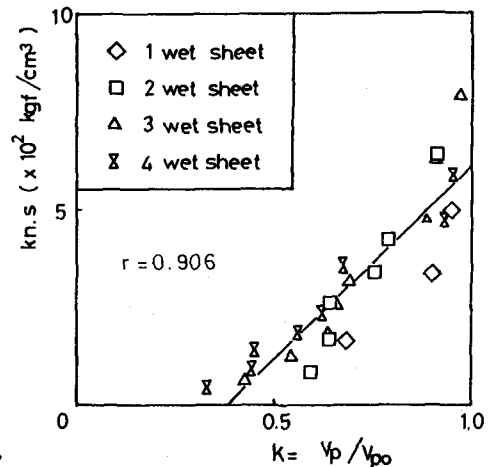


図-7 ジョイントの静的垂直剛性とP波速度

見ると、ろ紙の枚数の少ないほど、 kn,s が大きい事がわかる。

c) ジョイントの垂直変形量とP波速度 実験結果をジョイントの閉合量 (Joint closure) と P波速度 (V_p) について整理したのが図-6である。

この図を見ると、ジョイントの閉合に伴い P波速度は増加するが、それは閉合過程で止まってしまう事がわかる。P波速度の増加が止まる時点での、ジョイントの閉合量の値は、ろ紙の枚数が増加するほど大きくなっている。また、ろ紙の枚数に拘わらず、P波速度は、ジョイントを含まない岩石自身の値に達している。

d) ジョイントの静的垂直剛性とP波速度 図-6において示した P波速度の増加領域で V_p と kn,s の関係を検討してみる。

3. 2) b) で述べた様に σ と kn,s の間には線形関係があり、また実験結果より、 V_p の増加領域では、 σ と V_p の間にほぼ線形関係が認められたので、 V_p と kn,s の間にも線形関係がある事が予想される。この関係を図示したのが図-7である。横軸には V_p を V_{p0} で除して無次元化した値 (k) を取っている。図中の実線は最小自乗法により近似した直線で次式で表される。このとき k と kn,s の相関係数は0.906であった。

$$kn,s = -3.721 + 9.879 \ k$$

(ただし kn,s の単位は [$\times 10^2 \text{ kgf/cm}^3$])

e) ジョイントの動的垂直剛性と静的垂直剛性

V_p と V_{p0} 、密度 ρ およびきれつ頻度 N により、①式を用いて、動的垂直剛性 (kn,d) を算出する事ができる。この値と図-5に示した静的垂直剛性 (kn,s) の関係を示したのが図-8である。相関関係は認められるが、両者の値には2~3ケタの違いが認められる。さらに、検討する必要がある。

f) ジョイントの垂直変形と振幅比 ジョイントを持たない岩石について実施した超音波試験の結果得られる波形の最大振幅を $A_{0,max}$ とする。それに対し、ジョイントを含んだ図-1の様な供試体に対し実施した試験の結果得られる波形の最大振幅を A_{max} とする。この時 $A_{max}/A_{0,max}$ を振幅比と呼ぶ事にする。この振幅比とジョイントの閉合量および静的垂直剛性との関係を示したのが図-9、図-10である。これらの図より振幅比はジョイントの垂直変形の過程で止まる事無く増加し続け、しかもジョイントの静的垂直剛性と非常に良い相関関係がある事がわかる。

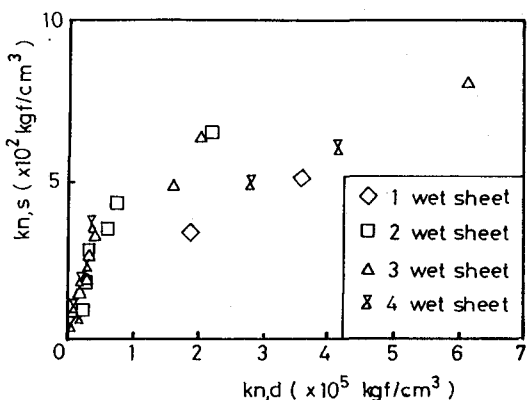


図-8 静的剛性と動的剛性

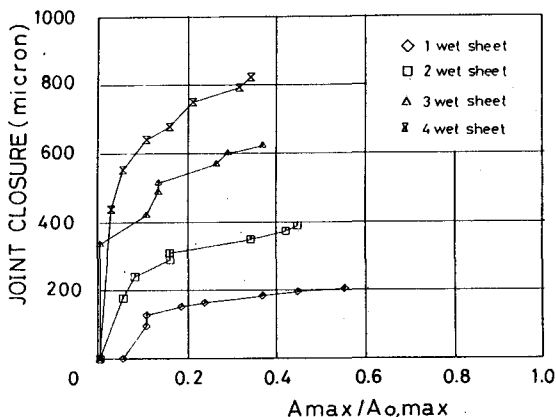


図-9 ジョイントの垂直変形量と振幅比

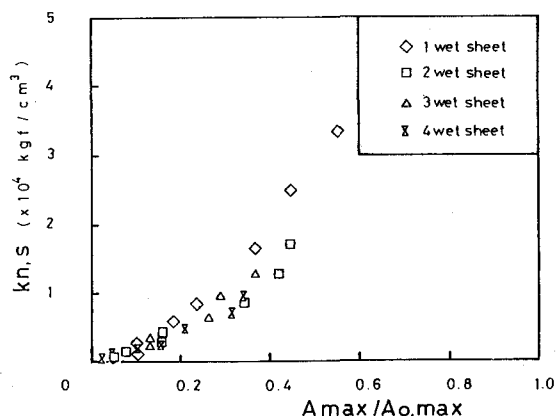


図-10 ジョイントの静的垂直剛性と振幅比

4. 実験2—ジョイントのせん断変形と弾性波伝播挙動

1) 実験方法および供試体 図-11に示すような高さ約3.05cm (上半部約2.5cm 下半部約0.55cm) 直径約60mmの円柱形の石膏供試体に対し、ジョイント面に沿った一面せん断試験とジョイント面に直行するn方向の超音波試験を実施した。

石膏は水：石膏 (重量比) = 2 : 3としたもので、P波速度が2.60km/sec、密度が1.11g/cm³であった。一面せん断試験は、垂直応力を一定とし垂直方向の変位 (ダイレーション) を測定した。

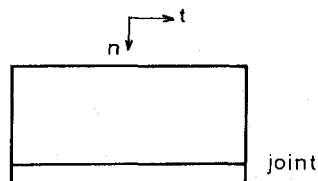


図-11 供試体2

2) 結果

a) ダイレーションとP波速度 実験はスムーズなジョイントとラフなジョイントの2種類で行った。スムーズなジョイントは800番のサンドペーパーで整形し、ラフなジョイントはジョイント面に深さ0.1mmの溝をカッターで掘る事により作成した。

スムーズなジョイントに対しては、垂直応力を0.4、0.8、1.2kgf/cm²と3通りに変化させて実験を行ったが、いずれの場合でも0.01mm程度のダイレーションしか生じず、P波速度の変化もほとんど生じなかった。

ラフなジョイントでは、垂直応力 0.4、0.8kgf/cm² で実験を行った。その実験結果をダイレーションとP波速度の関係について整理したのが、図-12 a), b)である。この図より、正のダイレーションが生じて、P波速度がほとんど変化せず、その後急激に減少する位置が存在する事がわかる。この位置は垂直応力が変わってもほとんど変化していない。

このVpの減少は図-6に示したジョイントの垂直変形量とP波速度の関係により説明できる。つまり、正のダイレーションに伴うVpの減少はジョイントの閉合によるVpの増加現象を逆にたどる現象として把握できる。例えば、図-6を逆に見るとプロットされた実験結果は、図-12のそれと全く同じ形をしている事からも説明できよう。

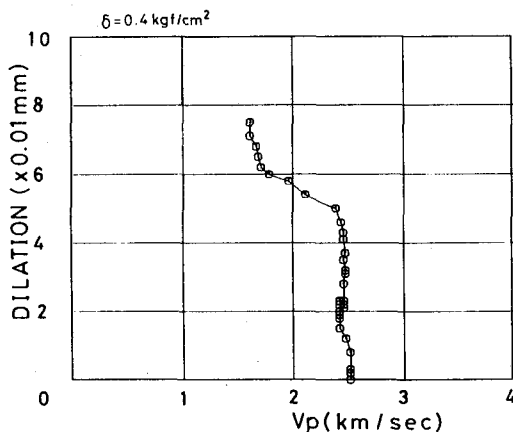


図-12a) ダイレーションとP波速度 1

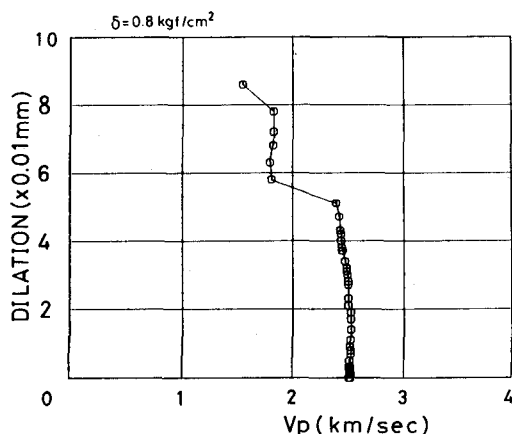


図-12b) ダイレーションとP波速度 2

5. 結論 Vpの観測により、ジョイントの変形挙動を、またVpならびに振幅の観測により、ジョイントの静的垂直剛性を推定する見通しを得た。

(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-I、森北出版株式会社、1984、pp56-61

4)R.E.Goodman;大西 有三、谷本 親伯 わかりやすい岩盤力学、鹿島出版会、1984 pp134-135

5)R.E.Goodman;Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks,West Publishing Co,1976

6)Brown,S.,and C.Scholtz,The Closure of Rock Joints.submitted to J.Geophys.Res.,19846

(25) Seismic Behaviors of Discontinuous Rock Under Shearing

by Chikaosa Tanimoto, Shojiro Hata, Jun Tamaki and Hitoshi Matsuda
Dept. of Civil Engineering, Kyoto University

Summary

P wave velocity is an overall parameter of discontinuous rock which, in addition to being related to the rock properties, is directly related to the discontinuities present in rock. This is because the seismic wave is affected by the frequency and nature of the geological discontinuities present. For example, compression wave velocity of a fractured or weathered rock is lower than that of an intact rock.

The compression wave velocity is often used for discontinuous rock mass as an index of rock quality. This is because seismic method is comparatively easier to perform than the other field measurements for evaluating the rock mass. Because the static deformability and the strength of the rock mass is needed for designing the rock structure, it is important to understand the correlation between the property of wave propagation (compression wave and shear wave velocities and wave dissipation) and the static mechanical behavior of rock caused by discontinuities. However, in present stage this relationship has not yet been well researched.

In this study, joint stiffness is chosen to be a parameter of the mechanical behavior of discontinuities, and the relation between "joint stiffness" and "wave propagation properties" was investigated by experimental and theoretical approaches.

In the laboratory, the acoustic method was used to observe the process of closure and shearing of a single joint, and the relation between the joint deformation and the elastic wave property was studied.

For the case of a single joint closure experiments, the joints of the test-pieces were artificially made by inserting wet paper filters between two intact sand-stone test-pieces, and the number of paper filters was altered from one to four. However, for the case of single joint shearing experiments, plaster test-pieces were used, and nothing was inserted between the joints, due to restriction of the laboratory instruments.

From this study, the following conclusions were obtained:

- 1) The P wave velocity is clearly related to joint closure caused by the normal stress and the dilation caused by the shear deformation.
- 2) It is possible to model discontinuous rock by an "equivalent" continuous material. Once the elastic properties are found, the P and S wave velocities are easily determined with elastic properties given directly in terms of the intact rock properties and "the dynamic joint stiffness ($k_{n,d}$ and $k_{s,d}$)".

$k_{n,d}$ and $k_{s,d}$ calculated from wave velocity measurements does not have an one-to-one correspondence with static values $k_{n,s}$ and $k_{s,s}$ which are needed in the design stage of a structure. The relationship between the dynamic and static stiffness was investigated and preliminary results were obtained experimentally. The experimental results showed that the dissipation of wave amplitude was found to be a good parameter to show the joint static stiffness. Further experimentation is needed to clarify the relationship.