

不連続供試体を用いた岩盤の波動伝播特性に関する一考察

NOTE ON THE PROPAGATION PROPERTIES OF SEISMIC WAVE THROUGH DISCONTINUOUS SPECIMEN

池尻 健*・永井哲夫**・小谷野康之*

Takeshi IKEJIRI, Tetsuo NAGAI, Yasuyuki KOYANO

When we evaluate and classify rock mass, we often use seismic wave propagating properties. But it is very difficult for engineer to evaluate the relationship between joint geometrical and mechanical characteristics in rock mass and dynamic properties of jointed rock mass.

The author applies equivalent joint compliance model to equivalent seismic wave velocity equation. In this study, we use this equation to investigate macroscopic dynamic properties of discontinuous specimens which consist of mortar. So effects of dynamic characteristics of discontinuities on macroscopic properties are discussed. And the relationship between static and dynamic mechanical properties of discontinuities are also examined.

Keywords : seismic wave propagation, discontinuous specimen, equivalent velocity, rock joints

1. はじめに

一般に、岩盤の評価および分類において、弾性波速度に代表されるように岩盤の弾性波伝播特性がよく用いられている。そこでは、岩盤の巨視的な弾性波伝播特性と岩盤分類の経験的対応関係が利用されている。しかし、岩盤内に存在する不連続面の幾何学および力学特性と岩盤の弾性波伝播特性の関係を定量的に評価できる手法はまだ確立されていないのが現状である。そのため、弾性波速度などを用いて岩盤不連続面の諸特性を推定することは困難である。

そこで本研究では、岩盤の巨視的な弾性波伝播特性が岩盤中に多数存在する不連続面により影響を強く受ける点に着目し、不連続性岩盤と等価な力学的挙動を示す連続体を用いてその定量的評価を試みる。具体的には、著者の一人が提案している不連続性岩盤の構成式¹⁾に基づき等価弾性波速度式の誘導を行う。そして、モルタルにより作製した不連続供試体を用いてパルス透過実験を実施し、その実験結果をもとに本提案式の妥当性を検証する。ただし、この実験においては不連続面間に充填物を含まない供試体を用いている。また、パルス透過実験に合わせて不連続供試体の静的載荷実験を行い、不連続面の動的力学特性を静的力学特性により表現する方法についても検討する。

* 正会員 (株)青木建設 研究所 土木研究室

** 正会員 博士(学術) (株)青木建設 研究所 土木研究室

2. 岩盤における弾性波動伝播特性に影響を及ぼす要因

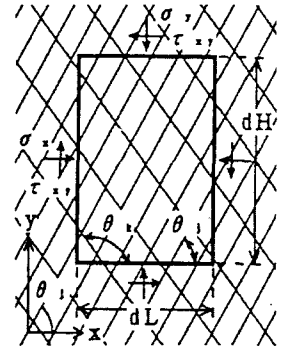
岩盤内に存在する不連続面の幾何学および力学特性と岩盤の弾性波伝播特性の関係を定量的に評価するためには、不連続面の諸特性を的確に把握しなければならない。ISRMの指針²⁾では、岩盤不連続面を定量的に記載するための指標として10項目が取り上げられている。その中で、過去に実施された不連続供試体による弾性波伝播特性に関する室内実験³⁾では、幾何学特性として不連続面の方向および間隔、力学特性として不連続面の粗さおよび不連続面間の充填物の4項目が弾性波伝播特性に影響を及ぼす要因としてよく用いられている。そこで本研究では、これらのことや過去に実施された不連続面の静的力学特性に関する研究⁴⁾を総合的に判断し、弾性波伝播特性に影響を及ぼす要因として不連続面の間隔および粗さを取り上げた。今回は、弾性波探査などでよく用いられる縦波(P波)の伝播特性に着目していることから、不連続面が弾性波の伝播方向と直交する場合のみを対象とし、不連続面の方向を要因として考慮していない。また、不連続面間の充填物についても簡単のため本実験では検討対象としていない。

3. 等価弾性波速度式の提案

これまで、著者らは不連続性岩盤として節理性岩盤を取り上げ、それと力学的に等価な連続体の構成式を誘導し、2次元平面ひずみ状態においては次のように表している。そして、過去に行われた実験結果との比較をもとにその妥当性を確認している¹⁾。

$$\{\Delta \varepsilon_x \Delta \varepsilon_y \Delta \gamma_{xy}\}^T = [C] \{\Delta \sigma_x \Delta \sigma_y \Delta \tau_{xy}\}^T \dots (1)$$

ここで、 $\{\Delta \varepsilon_x \Delta \varepsilon_y \Delta \gamma_{xy}\}^T$ および $\{\Delta \sigma_x \Delta \sigma_y \Delta \tau_{xy}\}^T$ は、それぞれx-y座標系における増分ひずみベクトルおよび増分応力ベクトルを示している。また、 $[C]$ はコンプライアンスマトリックスであり、その各成分 C_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) は次のように表される。



図一1 不連続性岩盤のモデル

$$\begin{aligned} C_{11} &= (1-\nu^2)/E + \Sigma (\sin^2 \theta_j / K_{nj} + \cos^2 \theta_j / K_{sj}) \sin^2 \theta_j / dS_j \\ C_{12} &= C_{21} = -\nu(1+\nu)/E + \Sigma (1/K_{nj} - 1/K_{sj}) \sin^2 \theta_j \cos^2 \theta_j / dS_j \\ C_{13} &= C_{31} = \Sigma \{-2 \sin^2 \theta_j / K_{nj} - (\cos^2 \theta_j - \sin^2 \theta_j) / K_{sj}\} \sin \theta_j \cos \theta_j / dS_j \\ C_{22} &= (1-\nu^2)/E + \Sigma (\cos^2 \theta_j / K_{nj} + \sin^2 \theta_j / K_{sj}) \cos^2 \theta_j / dS_j \\ C_{23} &= C_{32} = \Sigma \{-2 \cos^2 \theta_j / K_{nj} + (\cos^2 \theta_j - \sin^2 \theta_j) / K_{sj}\} \sin \theta_j \cos \theta_j / dS_j \\ C_{33} &= 2(1+\nu)/E + \Sigma \{4 \sin^2 \theta_j \cos^2 \theta_j / K_{nj} + (\cos^2 \theta_j - \sin^2 \theta_j)^2 / K_{sj}\} / dS_j \dots (2) \end{aligned}$$

ここで、 E 、 ν は岩石実質部の弾性係数およびポアソン比、 θ_j 、 dS_j は第 j 群の不連続面の角度および間隔、 K_{nj} 、 K_{sj} は第 j 群の不連続面の垂直およびせん断剛性をそれぞれ示す。また、 Σ は複数の不連続面群の重ね合わせを意味する。通常の解析では、2~3群程度で十分であると考えられる。

式(1)により岩盤の任意方向の等価弾性係数およびせん断弾性係数が求められることから、岩盤の密度および等価ポアソン比をそれぞれ ρ および ν とすると、y軸方向に伝播する弾性波(P波およびS波)の等価速度は次式のように表せる。

$$Vp = \sqrt{(1-\nu)/\rho C_{22}(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad Vs = \sqrt{1/2\rho C_{33}(1+\nu)} \dots (3)$$

4. 実験概要

4.1 実験装置

載荷装置は、H型鋼からなる門型フレームおよびアクチュエータにより構成されている。このアクチュエータはサーボパルス（EHF-JD50）であり、電気・油圧サーボ方式により荷重および変位制御が可能となっている。

一方、計測においては、不連続面の変位をクリップゲージ（RA-5）により直接的に測定している。そして、波形については図-2に示すような計測システムを構築して測定を行っている。ここで、MULTIFUNCTION SYNTHESIZER（1930A）は、周波数および振幅がそれぞれ0.1mHz～1.2MHz、0.01mV～30Vの範囲で入力波形（正弦波、三角波および矩形波）を合成することができる。また、PREAMPLIFIER（9917）は2kHz～1.2MHzの周波数特性を有し、受振波の増幅用として、DISCRIMINATOR（AE-922）は20kHz～2MHzの周波数特性を有し、受振波の増幅および周波数領域の選択用として用いている。本実験では、過去の研究⁵⁾およびこれまでの著者らの経験から、弾性波速度を最も安定してサンプリングできる100kHz以上の周波数領域での受振波に焦点を当て、DISCRIMINATORに内蔵のHPF（HIGH PASS FILTER）を用いて選択受振している。これに対応させて、ピックアップも広帯域で周波数特性が平坦である広帯域型（50kHz～600kHz）AEセンサ（AE-900FL）を用いている。なお、波形の表示およびデータの取り込みはOSCILLOSCOPE（MODEL 9310A）により行っている。

4.2 供試体

ここでは、供試体の作製方法について要約して示す。まず、サミットモールド（φ10cm、h20cm）にモルタルを打設し（早強セメント：川砂：水＝1：1.5：0.5（重量比））、養生室において枠内養生1日間、脱型後、気乾養生6日間を行う（温度20±1℃、湿度80±5%）。次に、インタクト供試体をダイヤモンドカッターにより所定の位置で切断した後、境界面を研磨機で磨き（粗度：2/100mm）、それぞれを重ね合わせて不連続供試体としている。なお、割裂モデルの場合、割裂試験により不連続面を人工的に形成している。本実験に用いた供試体の概要は図-3に示すようになっている。

4.3 実験方法

まず、垂直荷重および不連続面の変位を測定しながら所定の荷重レベルまで載荷する。そして、所定の値に達した時点でその荷重を一定に保持して波形計測を行う（垂直応力一定条件）。ここでは、応力制御で載荷を行っている（載荷速度：0.02MPa/s）。波形計測に際しては、MULTIFUNCTION SYNTHESIZERにより供試体の一端に取付けたピックアップを振動させて、供試体にパルス波を一波長入力し（周波数：140kHz、振幅：30V）、供試体の他端に取り付けたピックアップにより受振する。そして、受振波をPREAMPLIFIERにより増幅させ、DISCRIMINATORにより再度増幅させて周波数領域を選択受振した後、OSCILLOSCOPEにてデータの保存を行う。各ケースの実験が終了した後、保存されたデータをOSCILLOSCOPEにて再表示させて初期走時を求める。なお、供試体へのピックアップの接着は、エレクトロンワックスにて行っている。

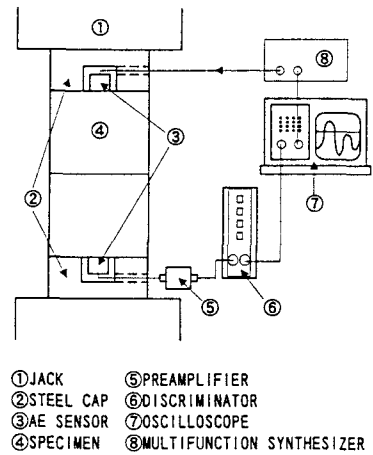


図-2 実験概要

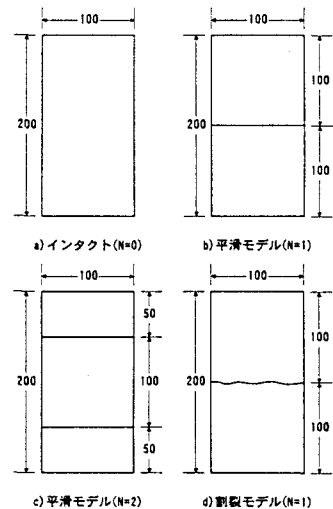


図-3 供試体概要

5. 実験結果および考察

5.1 不連続面の数と等価動弾性係数

平滑な不連続面を有する不連続供試体に関して、不連続面の数 (N) がそれぞれ0 (インタクト)、1および2面の場合を対象に、垂直応力比に対する等価動弾性係数比をプロットすると図-4のようになる。ここで、垂直応力比とは、垂直応力と岩石実質部の一軸圧縮強度の比 (σ_n / σ_c) として定義されるものである。また、等価動弾性係数比は、弾性波が伝播する媒体を等方等質の棒と考えて誘導した式 (5) により求められる等価動弾性係数と岩石実質部の動弾性係数の比 (E_d / E_{d0}) と定義している。

$$E_d = V_p^2 \rho \quad \dots (5)$$

ここで、 V_p は実験によって得られた弾性波速度、 ρ は不連続供試体の密度をそれぞれ示す。

この図から、どの垂直応力レベルにおいても、不連続面の数が多くなるにつれて等価動弾性係数が低下していることが分かる。つまり、岩盤の弾性波伝播特性を定量的に評価するためには、従来法のように岩盤を等方等質の弾性体として取り扱うのではなく、岩盤不連続面の諸特性を考慮してモデル化する必要がある。

5.2 等価弾性波速度式の妥当性の検証

ここでは、第3章で提案した等価弾性波速度式の妥当性について不連続面の諸特性を考慮して検証する。

まず、不連続面の間隔について検討する。図-5は、平滑な2面の不連続面を有する不連続供試体に関して、実験値と提案式による計算値をプロットして比較したものである。ここでは、参考のために不連続面の影響を考慮しない場合 (従来法) の計算値も合わせて示している。なお、提案式により計算する際、式 (3) を弾性波が伝播する媒体を棒と考えて変形した式を用いている。この図から、従来法では実験の現象を説明できないこと、提案式によると垂直応力レベルに無関係に実験値をよく説明できることが分かる。このことは、不連続面の分布密度が大きくなると岩盤の弾性波速度が小さくなるという現象も提案式によると表現できることを示唆している。

次に、不連続面の粗さについても、割裂モデルを用いて同様の方法で検討した。図-6にその結果を示す。ここでは、提案式に代入する不連続面の動的垂直剛性 (K_{nd}) の値として、平滑な1面の不連続面を有する不連続供試体の実験結果から逆算したものをを用いている。この図から

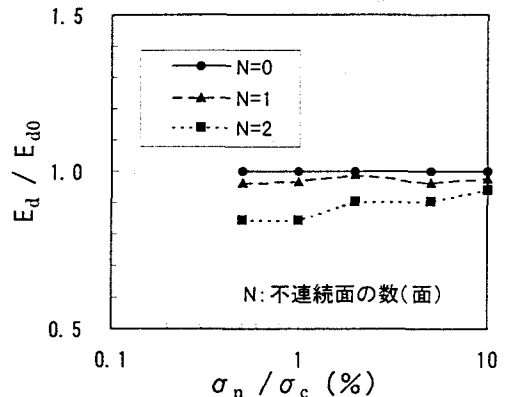


図-4 不連続面の数による E_d の変化

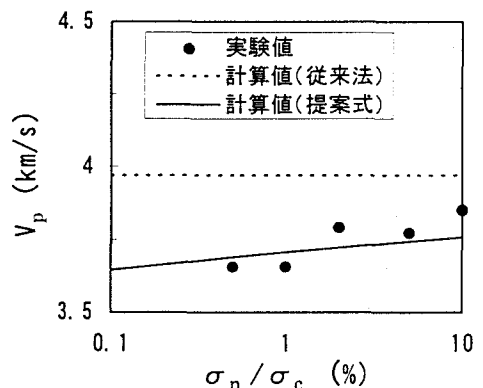


図-5 提案式の妥当性検証 (平滑: $N=2$)

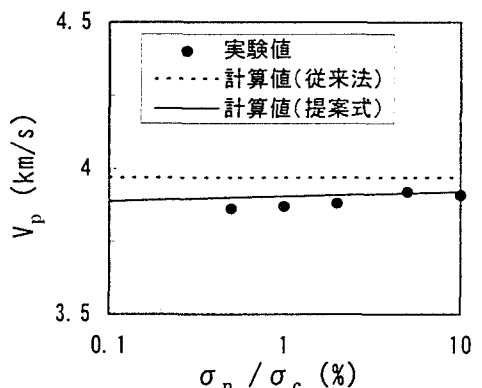


図-6 提案式の妥当性検証 (割裂: $N=1$)

ら、従来法では説明できない現象を提案式により表現できることが分かる。このことは、実験データ数が不十分ではあるものの、不連続面の粗さが岩盤の弾性波速度に及ぼす影響はあまり大きくないことを示唆している。また、提案式に平滑な不連続面の動的垂直剛性を用いることにより、ラフネスを有する岩盤の弾性波速度を推定できると考えられる。

5.3 不連続面の動的垂直剛性の評価

以上に示したように、実験による種々の検討から提案式の妥当性を検証することができた。ただし、本提案式により岩盤の波動伝播特性を定量的に評価する場合、不連続面の動的垂直剛性を適切に評価しなければならない。これを直接的に

求めることが難しいことから、本研究では不連続面の静的垂直剛性により推定する方法を検討する。いま、平滑な1面の不連続面を有する不連続供試体を対象に、垂直応力比と不連続面の垂直剛性比を実験結果から求めてプロットすると図-7のようになる。ここで、不連続面の垂直剛性比とは、不連続面の動的および静的垂直剛性の比(K_{nd}/K_{ns})を示す。なお、不連続面の静的垂直剛性はパルス透過実験に合わせて実施した不連続供試体の静的荷重実験により求めたものである。この図から明らかなように、両者の間には強い相関($r=0.95$)があることが分かる。このことは、不連続面の静的垂直剛性から本提案式に必要な不連続面の動的垂直剛性を推定することが可能であり、岩盤の等価弾性波速度を評価できることを示唆している。

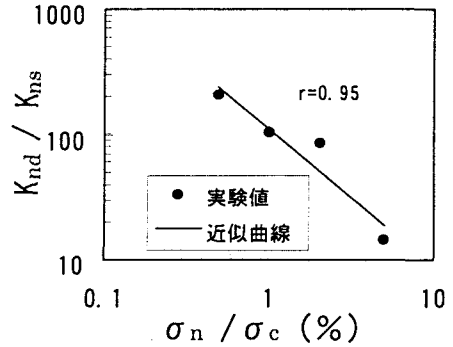


図-7 K_{nd} と K_{ns} の相関

6. おわりに

本研究では、不連続供試体を用いて荷重状態におけるパルス透過実験を実施し、岩盤の弾性波伝播特性について検討を行った。その結果、不連続性岩盤の構成式をもとに提案した等価弾性波速度式を用いることにより、巨視的な岩盤の弾性波伝播特性が定量的に評価できることが分かった。また、本提案式に必要な不連続面の動的垂直剛性については、静的なそれをもとに推定が可能であることも明らかになった。今後の課題としては、今回は取り上げなかった不連続面の諸特性を表す指標(方向、不連続面間の充填物)に関する検討を行うことが挙げられる。それにより、本提案式が弾性波伝播特性を利用した岩盤の評価および分類のみならず、グラウトの充填効果の確認などのにも応用できるものと考えられる。

【参考文献】

- 1) 永井哲夫・孫 建生・櫻井春輔：不連続性岩盤の構成式について，土木学会第49回年次学術講演会講演概要集第3部，pp.718-719, 1994.
- 2) ISRM Commission on Testing Method : Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, Vol.15, 1978.
- 3) 例えば、谷本親伯・岸田 潔：一軸圧縮状態での岩盤不連続面を透過する弾性波伝播特性に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.523, pp49-58, 1995.
- 4) 例えば、Bandis, S.C., Lumsden, A. and Barton, N. : Fundamentals of rock jointed formation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, Vol. 20, No.6, pp.249-268, 1983.
- 5) 例えば、谷本親伯・松崎 聡・岸田 潔・安藤 拓：弾性波ジオトモグラフィにおける周波数特性に関する基礎的研究，第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.450-453, 1990.