

(Ⅲ-19) 不連続性岩盤における波動伝播特性の一評価方法

(株)青木建設 技術本部研究所 正会員 ○蝦名美則

〃 〃 〃 孫 建生

〃 〃 〃 永井哲夫

1. はじめに

地震や発破による地盤および構造物への影響を定量的に評価する場合、通常は基盤となる岩盤を等方等質の弾性体と仮定して取り扱っている。しかし、地震動や発破振動などの計測を行うと、岩盤の動的挙動が異方性を示す場合がある。そこで本研究では、このような現象が岩盤中に多数存在する不連続面によるものであると考え、岩盤と等価な力学的挙動を示す連続体を用いて考察する。具体的には、不連続性岩盤と等価な連続体の構成式を用いて等価弾性波速度を誘導し、過去に実施された不連続供試体の波動伝播実験の結果との比較をもとに、動的問題における不連続面の力学特性の評価方法について検討する。

2. 等価弾性波速度の定式化

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(図-1)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⁾。

$$\{\varepsilon\} = [C] \{\sigma\} \quad \cdots (1)$$

ここで、 $\{\varepsilon\}$ および $\{\sigma\}$ は、それぞれ x-y 座標系でのひずみベクトル ($\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \gamma_{xy}\}^T$) および応力ベクトル ($\{\sigma\} = \{\sigma_x \ \sigma_y \ \tau_{xy}\}^T$) 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。

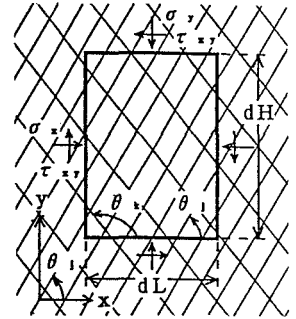


図-1 不連続性岩盤のモデル

$$\begin{aligned} C_{11} &= (1 - \nu_1^2) / E_1 + \sum_{j=1}^M (\sin^2 \theta_j / K_{nj} + \cos^2 \theta_j / K_{sj}) \sin^2 \theta_j / dS_j \\ C_{12} &= C_{21} = -\nu_1 (1 + \nu_1) / E_1 + \sum_{j=1}^M (1 / K_{nj} - 1 / K_{sj}) \sin^2 \theta_j \cos^2 \theta_j / dS_j \\ C_{13} &= C_{31} = \sum_{j=1}^M \{ -2 \sin^2 \theta_j / K_{nj} - (\cos^2 \theta_j - \sin^2 \theta_j) / K_{sj} \} \sin \theta_j \cos \theta_j / dS_j \\ C_{22} &= (1 - \nu_1^2) / E_1 + \sum_{j=1}^M (\cos^2 \theta_j / K_{nj} + \sin^2 \theta_j / K_{sj}) \cos^2 \theta_j / dS_j \\ C_{23} &= C_{32} = \sum_{j=1}^M \{ -2 \cos^2 \theta_j / K_{nj} + (\cos^2 \theta_j - \sin^2 \theta_j) / K_{sj} \} \sin \theta_j \cos \theta_j / dS_j \\ C_{33} &= 2 (1 + \nu_1) / E_1 + \sum_{j=1}^M \{ 4 \sin^2 \theta_j \cos^2 \theta_j / K_{nj} + (\cos^2 \theta_j - \sin^2 \theta_j)^2 / K_{sj} \} / dS_j \end{aligned}$$

ここに、 E_1, ν_1 : 岩石実質部の弾性係数およびポアソン比、 θ_j, dS_j : 第 j 群の不連続面の角度および間隔、 K_{nj}, K_{sj} : 第 j 群の不連続面の垂直およびせん断断剛性をそれぞれ示す。

式(1)により岩盤の任意方向の見かけの弾性係数およびせん断弾性係数が求められることから、岩盤の密度および見かけの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。

$$V_p = \sqrt{(1 - \nu) / \rho C_{22} (1 + \nu) (1 - 2\nu)} \quad \cdots (2)$$

$$V_s = \sqrt{1 / \rho C_{33}} \quad \cdots (3)$$

3. 不連続面の変形特性の評価

本研究では、前述の等価弾性波速度の提案式について、過去に実施された波動伝播実験の結果によりその妥当性を検証するため、まず、ある一方向に規則的に分布する不連続面を含む岩盤において、弾性波が不連続面に直交して伝播する場合を対象に考える(図-2)。式(2)および式(3)により等価弾性波速度を求め

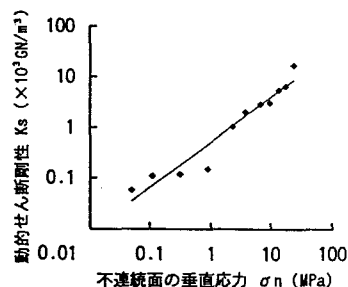
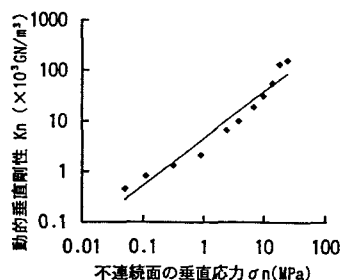
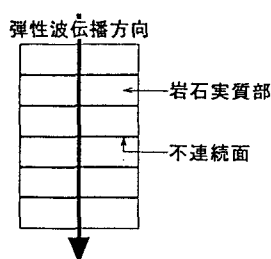


図-2 岩盤の波動伝播モデル 図-3 垂直応力と動的垂直剛性 図-4 垂直応力と動的せん断剛性

るためには、不連続面の動的変形特性 ($K_{n,j}$ および $K_{s,j}$) を適切に評価する必要がある。そこで、単一の不連続面を持つ岩石供試体の弾性波試験の結果²⁾をもとに不連続面の動的変形特性について検討する。いま、試験で得られた異なる圧縮応力下での弾性波速度を図から読み取り、本提案式により不連続面の動的垂直およびせん断剛性をそれぞれ逆算し、そこに作用する垂直応力との関係でまとめると図-3および図-4のようになる。ここでは、弾性波が伝播する媒体を棒と考えて式(2)を変形している。これらの図から、不連続面に作用する垂直応力の増加に伴い動的垂直およびせん断剛性がともに大きくなること、垂直応力と動的垂直およびせん断剛性の間には非常に良い相関(べき関数型)が見られることが分かる。このような不連続面の動的変形特性の応力依存性は静的な場合³⁾と同様であるが、絶対値を見ると静的な場合に比べてかなり大きくなっている。

4. 複数の不連続面を持つ岩盤モデルへの適用

萩原⁴⁾は、図-2のような複数の不連続面を持つ模擬節理性岩盤によりP波速度の測定を行い、不連続面の数の増加に伴いP波速度が減少すること、不連続面の垂直応力が低いほどその傾向は顕著であることを示し、P波速度の定量的評価を試みている。この実験結果を対象として、ここでは本提案式を用いて不連続面の数がP波速度に及ぼす影響について検討する。まず、棒を媒体として変形した提案式と実験結果から岩石実質部の弾性係数および不連続面の動的垂直剛性を求める。そして、任意の不連続面の数に対するP波速度を算出して実験値と比較すると図-5のようになる。この図から、本提案式による計算値は実験値と良い対応を示しており、不連続面の数および垂直応力がP波速度に及ぼす影響をよく表現できることが分かる。

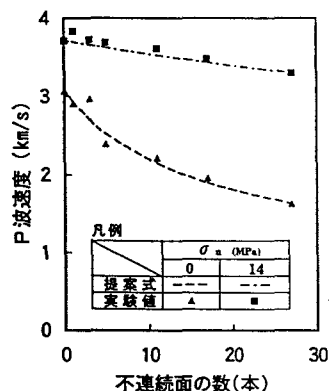


図-5 不連続面の数とP波速度

5. おわりに

本研究により、静的問題に対して著者らが提案している不連続性岩盤の構成式は動的問題に対しても妥当であること、そのとき不連続面の動的変形特性は静的な場合と同様に垂直応力に依存すると考えればよいことが明らかになった。今後は、実際の地震動や発破振動に関する適用性についても検討を行う予定である。

【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) 松崎 聡・畠 昭治郎・谷本親伯：自然状態の不連続面を含む岩石供試体中の弾性波伝播特性，土木学会第45回年次学術講演会講演概要集第3部，pp.494-495，1990。
- 3) Bandis, S.C., Lumsden, A.C. and Barton, N.: Fundamentals of rock joint deformation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.20, No.6, pp.249-268, 1983。
- 4) 萩原義一・中山知晴：不連続面を含む岩盤のP波速度，早稲田大学理工学研究所報告第119輯，pp.42-48，1987。