

亀裂係数の定量的評価法の提案

CRACK COEFFICIENT

—A QUANTITATIVE ESTIMATION AND ITS APPLICABILITY

永井哲夫*・池尻 健**

Tetsuo NAGAI and Takeshi IKEJIRI

Crack coefficient is defined by the use of ultrasonic velocity of intact rock and corresponding wave velocity of rock mass. It is an effective index for engineers to evaluate the degree of cracks in rock mass. Therefore, in engineering practice, it is quite often used. But, it is not easy to get the representative value at a certain point. In this study, the authors propose a new method to estimate crack coefficient quantitatively using the equivalent wave velocity based on continuum mechanics. And its validation for engineering applications is demonstrated by the comparison of analytical results with test data. The way to evaluate the average dynamic property of rock joint for the proposed method is discussed.

1. はじめに

亀裂係数は、岩石コアの超音波伝播速度と岩盤の弾性波伝播速度を用いて定義され、岩盤中の割れ目の発達程度を表す有効な指標である。そのため、岩盤掘削の難易性の評価¹⁾、切土のり面の安定性評価²⁾、および速度検層結果に基づく地盤構造の推定³⁾など、亀裂係数の工学的利用は多岐にわたっている。

この亀裂係数の評価に際しては、岩石コアの超音波伝播速度と岩盤の弾性波伝播速度が入力値として必要となる。前者は、ボーリングにより採取した岩石コアの超音波速度試験から比較的容易に求めることができ、後者は、現位置における地震探査や速度検層などにより得られる。ただし、後者は、前者に比べると試験が大がかりになり経費もかかることから、限られた測線に対してデータを取得するのが精一杯である。また、測定値は測線を横切る割れ目の間隔や角度などの影響を受けやすく、対象地点の代表的な弾性波伝播特性を得ることは容易ではない。以上のことから、現状では亀裂係数を適切に評価することが難しい。

本研究では、著者が提案している岩盤の等価弾性波速度式⁴⁾に、岩石コアの超音波速度試験および岩盤不連続面の観察結果を入力することにより、任意地点において亀裂係数の定量的評価が容易に行える方法を提案する。そして、立坑における岩盤掘削の難易性評価に際して、超音波速度試験やP S検層から求めた亀裂係数を対象に、本提案法の実務への適用性を検証する。

* 正会員 博士(学術) (株)青木建設 研究所 土木研究室

** 正会員 (株)青木建設 研究所 土木研究室

2. 亀裂係数の評価法について

亀裂係数は、岩石コアの超音波伝播速度と岩盤の弾性波伝播速度を用いて次式のように定義される。

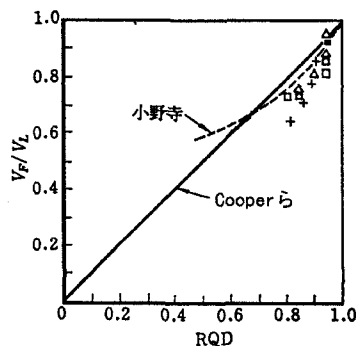
$$C_r = 1 - (V_F / V_L)^2 \quad (1)$$

ここで、 C_r は亀裂係数、 V_L は岩石コアの超音波伝播速度、 V_F は岩盤の弾性波伝播速度である。式(1)から明らかなように、 C_r は0から1の間の値をとる。そして、岩盤に割れ目が全くない場合には C_r は0となり、割れ目が多くなるにつれて C_r は1に近づく。このようにして、 C_r により岩盤中の割れ目の発達程度を表すことができる。ただし、両者の相関を表現できる経験式などは得られていない。そのため、 C_r を評価する場合には、 V_L および V_F を直接測定しなければならない⁵⁾。

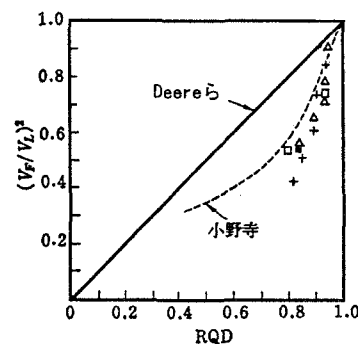
式(1)において、 V_F/V_L は割れ目指数、 $(V_F/V_L)^2$ は岩盤良好度または岩目係数と呼ばれ、 C_r と同様の目的で用いられることもある³⁾。 V_F/V_L および $(V_F/V_L)^2$ については、岩盤中の割れ目の頻度を表すパラメータである RQD との相関がそれぞれ図-1のように示されている⁶⁾。Cooper らは、 V_F/V_L が RQD と 1:1 の関係に、Deere らは、 $(V_F/V_L)^2$ が RQD と 1:1 の関係にあるとしており、小野寺の実測データは前者とよく対応している。ただし、このデータは RQD が 0.8 以上と割れ目の影響がかなり小さい岩盤を対象としたものである。

それに対して、広範囲の RQD を対象として得られた RQD と $(V_F/V_L)^2$ の関係を示すと図-2 のようになる⁷⁾。この図では、主として硬質岩盤サイトを対象として、サイトごとの巨視的な RQD と $(V_F/V_L)^2$ の関係がまとめられている。サイトの地質は、細粒砂岩、流紋岩、チャート、または頁岩であり、地質年代としては古生代～古第三紀に相当するものである。図-1 (b) および図-2 から、RQD が小さく（つまり、岩盤中の割れ目が多く）なると $(V_F/V_L)^2$ も小さくなること、RQD が 0 の場合でも $(V_F/V_L)^2$ は 0 以外の数値に収束することが分かる。ここで、 $(V_F/V_L)^2$ が小さくなると式(1)より C_r は 1 に近づくことから、 C_r と岩盤中の割れ目の発達程度が相関を有することは明らかである。ただし、両者の相関は定性的に見て取れるだけで、定量的に把握するにはデータが十分ではない。また、図-1 (b) および図-2 から、岩種によらず RQD と $(V_F/V_L)^2$ はある相関を示すようである。この岩種による両者の相関の有無については、今後さらに多くのデータをもとに検討する必要がある。

以上のことから、現状では岩盤中の割れ目の頻度と亀裂係数の関係を定量的に評価できる方法はないことが分かる。



(a) RQD vs. V_F/V_L



(b) RQD vs. $(V_F/V_L)^2$

図-1 RQD と V_F/V_L または $(V_F/V_L)^2$

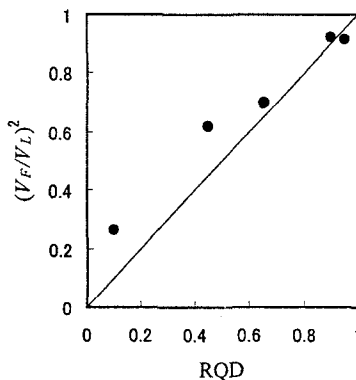


図-2 RQD と $(V_F/V_L)^2$ (広範囲 RQD)

3. 等価弾性波速度式を用いた亀裂係数の定式化

これまで、著者の一人は不連続性岩盤を対象として、それと力学的に等価な連続体の構成式を誘導し、地下空洞掘削時の計測結果のシミュレーション解析などによりその有効性を確認している⁸⁾。そして、この構成式を用いて不連続性岩盤を伝播する弾性波の等価速度を求めている⁴⁾。いま、図-3に示すような岩盤モデルにおいて、 y 軸方向に伝播するP波の等価速度式は次のように表せる。

$$V_F = \sqrt{\frac{1 - \nu_F}{\rho_F C_{22} (1 + \nu_F) (1 - 2\nu_F)}} \quad (2)$$

ここで、 ρ_F は岩盤の密度、 ν_F は岩盤の動ポアソン比、 C_{22} は岩盤の動的コンプライアンスマトリックスの成分であり、次式により求めることができる。

$$C_{22} = \frac{1}{E_L} + \sum \left(\frac{\cos^2 \theta_j}{K_{ndj}} + \frac{\sin^2 \theta_j}{K_{sdj}} \right) \frac{\cos^2 \theta_j}{dS_j} \quad (3)$$

ここで、 E_L は岩石実質部の動弾性係数、 θ_j 、 dS_j は第 j 群の不連続面の角度および間隔、 K_{ndj} 、 K_{sdj} は第 j 群の不連続面の動的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、解析では、2〜3群程度で十分であると考えられる。なお、不連続面の数が一定であれば、不連続面の分布状態の違いはほとんどP波速度に影響を及ぼさないこと⁹⁾から、式(3)では不連続面の傾度を平均間隔により表現している。

式(2)と同様にして、岩石コアのP波速度(V_L)も容易に求めることができる。このようにして求めた V_F および V_L を式(1)に代入して整理すると、亀裂係数は次のように表される。

$$C_r = 1 - \frac{\rho_L (1 - \nu_F) (1 + \nu_L) (1 - 2\nu_L)}{\rho_F C_{22} E_L (1 + \nu_F) (1 - 2\nu_F) (1 - \nu_L)} \quad (4)$$

ここで、 ν_L は岩石実質部の動ポアソン比である。

いま、岩盤内に占める不連続面の体積の割合は非常に小さいことから、岩盤の密度は岩石コアの密度と等しいと見なせる。そこで、一般に岩盤の動ポアソン比は岩石コアの動ポアソン比と等しいと仮定すれば、最終的に亀裂係数を次のように定式化できる。

$$C_r = 1 - \frac{1}{C_{22} E_L} \quad (5)$$

本提案式の入力値として、岩石コアの超音波速度試験結果から E_L 、岩盤不連続面の観察結果から θ_j および dS_j を求めればよい。また、 K_{ndj} および K_{sdj} には、単一の岩盤不連続面を含む供試体から求める方法、静的剛性との相関を利用して求める方法、亀裂係数の実測値より逆算する方法などから得た値を用いればよい。

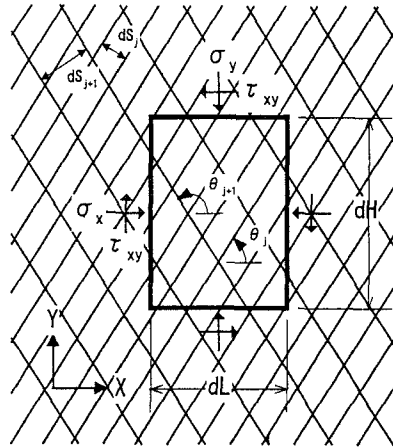


図-3 不連続性岩盤モデル

4. 実務への適用性

4・1 概要

A 現場では、立坑における岩盤掘削の難易性を評価するため、岩石コアの超音波速度試験およびP S 検層を実施して亀裂係数を求めた。さらに、ボーリングによりコアのサンプリングを行った後、コアの観察に加えて、ボアホールカメラによる孔壁観察も行い、岩盤不連続面の状況を総合的に把握した。ここでは、実測値から直接求めた亀裂係数と本提案式により推定した亀裂係数を比べて考察する。

4・2 地質概要

立坑地点付近は、有馬層群が分布しており、佐曽利凝灰角礫岩が基盤岩層として見られる。その岩相は、超丹波帯・丹波帯の砂岩、頁岩、チャートの角礫を多量に含む黒雲母流紋岩火山礫凝灰岩および火山角礫岩である。ボーリングの結果、対象地点ではGL-3.0mまでは表層土、それ以深に凝灰角礫岩が分布していた。

4・3 亀裂係数の実測値

P S 検層により求めた走時曲線を図-4に示す。対象となる岩盤のP波速度は、GL-3.0mから-8.0mまでは1.93km/sec、GL-8.0mから-11.0mまでは2.50km/secであった。それぞれに対応する超音波伝播速度を求めると、3.15km/secおよび3.06km/secが得られた。これらの試験結果から、亀裂係数としてGL-3.0mから-8.0mまでは0.62、GL-8.0mから-11.0mまでは0.33が求められる。

4・4 岩盤中の不連続面の状況

ボーリングコアの状況およびボアホールカメラによる孔壁観察の結果を写真-1および写真-2に示す。ボーリングによりコアがかなり乱されている箇所が見られる。そのため、コアからは不連続面の平均間隔を評価できない。このような場合、孔壁に見られる岩盤不連続面の状況が実際の地山のものに対応していると考えられる¹⁰⁾。そこで、ボアホールカメラの観察結果をもとに不連続面の平均間隔を求めた。

4・5 本提案式の検証

まず、GL-8.0mから-11.0mまでの区間における亀裂係数の実測値と岩石コアの超音波伝播速度、不連続面の平均間隔を式(5)に代入して、この区間における見かけの不連続面の動的剛性を求めた。次に、同一岩種ではこの剛性が共通であると仮定し、GL-3.0mから-8.0mまでの区間における岩石コアの超音波伝播速度と不連続面の平均間隔を式(5)に代入して亀裂係数を推定した。このようにして、本提案式により求めたGL-3.0mから-8.0mまでの区間における亀裂係数は0.57となり、実測値の0.62とよい対応を示している。なお、ここでは不連続面の動的剛性の応力依存性⁹⁾を考慮している。

以上のことから、本提案式が実岩盤に対しても有効であることが分かる。

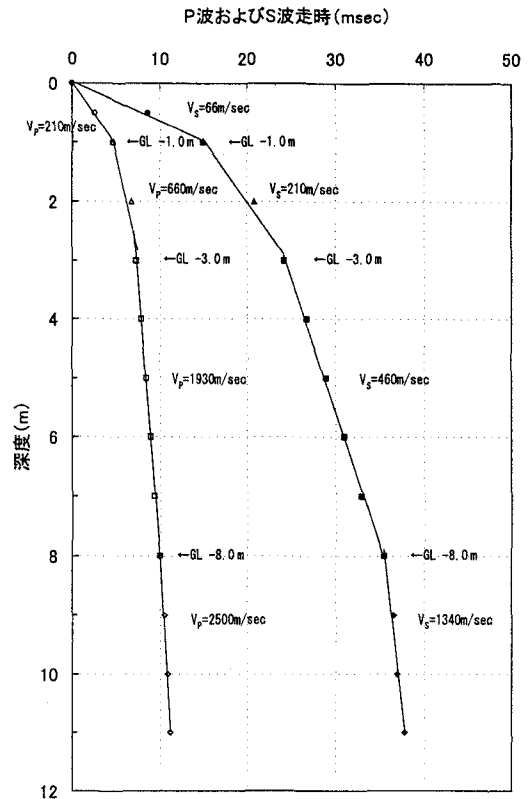


図-4 P S 検層走時曲線

5. おわりに

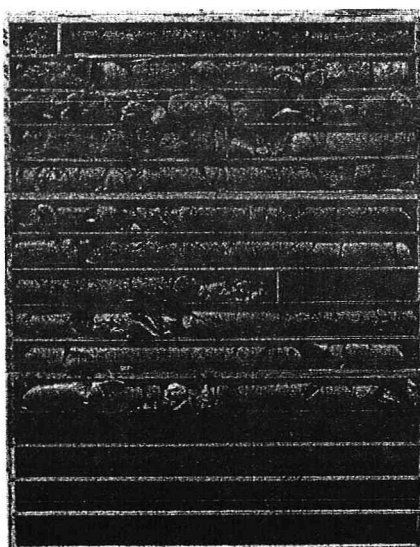
本研究では、工学的利用が多岐にわたる亀裂係数に関して、岩盤の等価弾性波速度式により定量的に評価する方法を提案した。そして、実測値をもとに実務への適用性を検証した。

本提案法においては、平均的な岩盤不連続面の動的剛性を的確に把握することが重要となる。これに関しては、供試体から求める方法よりも実測値から逆算する方法が有効であることを確認している。今後、実務への適用を通し、より実用的な評価法に発展させていきたい。

0.00m

5.00m

10.00m



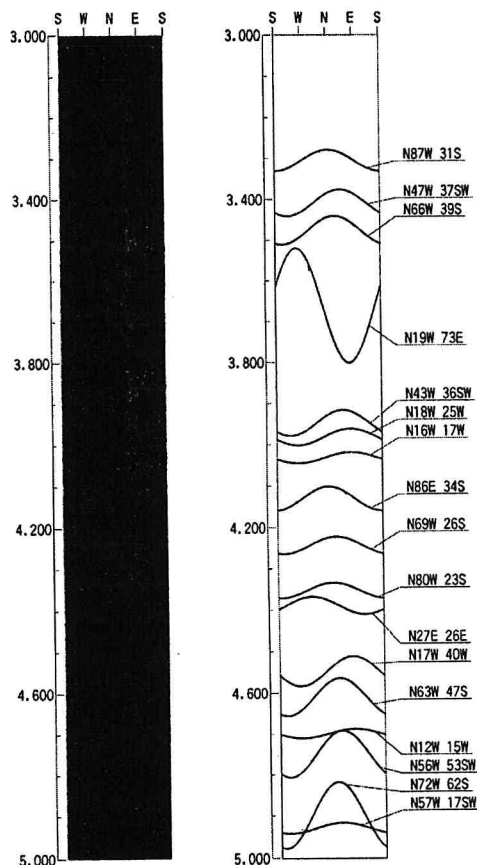
5.00m

10.00m

写真－1 ボーリングコア写真 (GL＝0.0m～11.0m)

【参考文献】

- 1) 若月・奥園・中嶋：現場および室内試験による岩質判定について，第10回日本道路会議論文集，pp.60-62，1971.
- 2) 奥園誠之：切土ノリ面の崩壊とノリコウ配，土と基礎，Vol.20，No.2，pp.33-39，1972.
- 3) 土質工学会：岩の調査と試験，pp.225-228，1989.
- 4) 池尻・永井・小谷野：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，第28回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.129-133，1997.
- 5) 土質工学会：土と基礎の物理探査，pp.222-227，1981.
- 6) 土質工学会：岩の工学的性質と設計・施工への応用，pp.333-360，1991.
- 7) 上田・佐藤・長谷部・浅野：地震波伝播速度を用いる硬質岩盤の原位置平板載荷試験結果の評価について，第33回地盤工学研究発表会，pp.1225-1226，1998.
- 8) Nagai, T., Sun, J.S. and Sakurai, S.: Constitutive modelling of jointed rock masses based on equivalent joint compliance model, *Proc. 9th Int. Conf. on Computer Methods and Advances in Geomech.*, Wuhan, pp.981-986, 1997.
- 9) 渡辺・佐々：亀裂岩盤のRQDとP波速度との関係に関する数値シミュレーション，資源・素材学会誌，106 (No.6)，pp.13-17，1990.
- 10) 最上谷・鈴木・佐藤・許：RQD法の問題点，日本応用地質学会平成2年度研究発表会論文集 pp.37-40，1990.



写真－2 孔壁観察結果 (GL＝3.0m～5.0m)