

RMRによる岩盤の変形係数の推定

岡部 幸彦¹・進士 正人¹・呉 旭¹・川本 眺万²

¹正会員 応用地質株式会社 技術本部 (〒330-8632埼玉県大宮市土呂町2-61-5)

²正会員 工博 愛知工業大学教授 土木工学科 (〒470-0356 愛知県豊田市八草町)

本文では, Bieniawskiの岩盤分類評価法RMRから岩盤の変形係数を推定する方法を新たに提案する. 提案方法は, Hoek-Brownの岩盤破壊基準を基に, 岩盤の限界ひずみと岩石の限界ひずみとがほぼ等しいという条件から導出したものである. 日本国内の平板載荷試験の結果と比較することにより, 提案方法が既存方法より改善された推定結果を与えることを示す.

Key Words : rock mass classification, RMR, deformation modulus, Hoek-Brown failure criterion, critical strain.

1. はじめに

岩盤の変形特性を評価するには, 等方均質弾性モデルがしばしば用いられる. これは, 割れ目や不均質性を有する岩盤の変形挙動が極めて複雑であるため(非線形, 異方性), 適切なモデル化およびパラメータの決め方が難しいによるものだと考えられる. そこで, 第一次近似として平板載荷試験等で測定された岩盤の変形係数を近似的に弾性係数として仮定することは, 工学的によく行われる.

しかし, 岩盤の変形係数を原位置試験から求めるのは, 多大な時間とコストを要するにもかかわらず, 試験場所の代表性や試験結果の解釈と評価が容易ではない. このため, 原位置試験の実施は非常に限られている. 代わりに, 地質調査段階では, 岩盤の露頭観察や室内岩石試験, あるいは横坑内およびボーリング孔内での不連続面の観察などから, 岩盤分類を行うと同時に, 分類した岩盤毎に変形係数を推定することが一般的実施されている. 今までこのような岩盤分類法に関する研究は, 国内外で広く行われ, 実用的な提案が数多く行われている^{1), 2), 3), 4)}.

中でも, Bieniawski が提案した Rock Mass Rating(RMR)法⁴⁾による岩盤分類法は, RMRと呼ばれる評価点で岩盤を数値化することにより, 岩盤の変形係数や強度定数とRMRとの関係が経験的に提案されているため, よく用いられている. しかし, RMRはともかく, 変形係数の推定式は, 主に欧米の原位置岩盤の計測データから分析して得られ

たものであるため, 日本の岩盤に適用する場合に, 変形係数を過大に評価する傾向があると思われる.

そこで, 本文では, RMRから岩盤の変形係数を推定する方法を新たに提案する. すなわち, Hoek-Brownの岩盤破壊基準^{5), 6)}を基に, 岩盤の限界ひずみと岩石の限界ひずみがほぼ等しいという条件(櫻井 1982)⁷⁾を利用し, RMRから岩盤の変形係数を推定する方法を導出する. この方法により推定した結果を日本国内の平板載荷試験の結果と比較することにより, 提案方法が既存方法より改善された推定結果を与えることを示す.

なお, ここで言う岩盤の変形係数は, 「原位置岩盤の変形およびせん断試験の指針」⁸⁾に従って行われた平板載荷試験から求めたもの, あるいは岩盤の一軸圧縮強度と限界ひずみとの比率で定義したものと定義をする. 従って, この変形係数は, 可逆でひずみ速度の影響を受けない弾性ひずみ(非常に小さい)に対して定義される弾性係数と必ずしも同一ではない.

2. RMR法とは

RMR法は, Bieniawski により提案された岩盤分類法⁴⁾の一手法である. 評価の結果から直接的に岩盤の強度・変形特性の推定が可能であることから, 設計手法等への適用も行われている. また, Bartonの岩盤分類指標Q値との関連づけが研究されており, RMR法による評価結果があれば, Q値法を用いた

物性値の推定式等も利用が可能である^{3),4)}。RMR法はこのような利点を有するため、広く適用されている^{10),11),12)}。

RMR法では、岩盤評価を以下の観察項目から行っている。ただし、不連続面の走向、傾斜という項目6)に関しては、構造物毎に影響が異なるため、トンネル、基礎、斜面と構造物によりグループ化し、それぞれの構造物毎に減点するシステムとしている。

- 1) 一軸圧縮強度 (最大 15 点)
- 2) RQD(Rock Quality Designation) (最大 20 点)
- 3) 不連続面の間隔 (最大 20 点)
- 4) 不連続面の状態 (最大 30 点)
- 5) 地下水の状態 (最大 15 点)
- 6) 不連続面の走向、傾斜 (減点、トンネルの場合最大 10 点)

以上の各評価項目は、岩盤の力学挙動に与える影響により、異なる重み付けと配点がなされている。その重み付けと配点は、岩種によらず一定値であり、RMRが高いほど良好な岩盤であることを意味する。これらの評価項目の配点から分かるように、不連続面の間隔と状態の2項目で最大 50 点となるため、RMR法が主として硬岩を対象とした岩盤評価手法に適したと考えられる。

3. 岩盤の変形係数の推定

(1) 既往の推定式

RMRから岩盤の変形係数を推定するために、今まで主に以下の三つの推定式が提案されている^{4),6)}。

$$E_m = 2 \times RMR - 100 ; RMR \geq 50 \quad (1)$$

$$E_m = 10^{\frac{RMR-10}{40}} \quad (2)$$

$$E_m = \sqrt{\frac{q_u}{100}} 10^{\frac{RMR-15}{40}} \quad (3)$$

ここで、 E_m (単位: GPa) は岩盤の変形係数であり、 q_u (単位: MPa) は岩盤に内包した岩石の一軸圧縮強度である。

最初に提案されたのは、式(1)である。主に良質岩盤 (RMR>61) に適用されるが、一般的に、推定値が平板載荷試験の結果より大きい。その後、

Serafim and Pereira⁹⁾(1983)は、ダム基礎岩盤の計測データを解析し、式(2)を提案した。この式を使っても日本でのような良質でない岩盤に対して、やはり過大評価の傾向があると思われる。

最近、Hoek and Brown(1997)⁶⁾は、岩石の一軸圧縮強度が 100MPa 以下の岩盤を対象に Serafim and Pereira の提案式(2)を修正して、式(3)を発表した。この推定式によれば、岩盤の変形係数は、RMRだけに依存することではなく、岩盤に内包した岩石の一軸圧縮強度にも直接的に関係する (RMRにも岩石の一軸圧縮強度が含まれているが)。すなわち、RMR法による評価点と同じである岩盤に対して、岩盤を構成する岩石の強さの違いによって岩盤の変形係数は異なることを意味する。

推定式(3)を説明するために、次のようなことが考えられる。すなわち、良質岩盤の変形係数は、主に割れ目系に支配されるため、割れ目系を記述する岩盤評価点RMRだけを変数として良い。一方、良質でない岩盤では、変形係数は、割れ目系だけではなく、岩盤の内包した岩石の硬さそのものの影響が大きくなるため、RMR以外に、岩石の硬さを代表する因子 (一軸圧縮強度 q_u) を直接取り入れることが必要である。しかし、後の4章に示すように推定式(3)も、日本のような良質でない岩盤に適用する際に、依然として岩盤の変形係数を過大評価する傾向にある。

(2) 提案の推定式

そこで、本研究では、岩盤の強度特性とリンクして岩盤の変形係数を推定する方法を提案する。すなわち、櫻井による岩盤の限界ひずみと岩石の限界ひずみとがほぼ等しいという条件⁷⁾を利用して、Hoek-Brown の破壊基準を元に、RMRから岩盤の変形係数を推定する方法が導かれる。以下、その手順を示す。

Hoek-Brown の破壊基準^{5),6)}

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{mq_u \sigma_3 + sq_u^2} \quad (4)$$

より、岩盤の一軸圧縮強度 σ_{cm} (式(4)に $\sigma_3 = 0$ を代して得られる) は、岩石の一軸圧縮強度 q_u と以下の関係がある。

$$\frac{\sigma_{cm}}{q_u} = \sqrt{s} \quad (5)$$

ここで、 m, s は岩盤の強度定数である。また、 σ_1, σ_3 はそれぞれ最大、最小主応力である。

一方、 $\sigma_{cm} = E_m \varepsilon_{mf}$ 、 $q_u = E_0 \varepsilon_{0f}$ の関係式が成り立つため、 $\varepsilon_{0f} = \alpha \varepsilon_{mf}$ を仮定すれば、式(5)から

$$E_m = \alpha E_0 \sqrt{s} \quad (6)$$

が得られる。

ここで、 E_m, ε_{mf} は岩盤の変形係数と限界ひずみ⁷⁾であり、 E_0, ε_{0f} は岩石の変形係数と限界ひずみ⁷⁾である。また、 α は岩石の限界ひずみと岩盤の限界ひずみとの比率である。

櫻井⁷⁾は、岩石の室内試験や日本国内の岩盤原位試験のデータを分析することにより、岩盤の限界ひずみと岩石の限界ひずみとがほぼ等しいという知見を得ている。すなわち、割れ目が存在すると岩盤の強度は低下するが、変形係数も同程度低下するため、その比率として求められる限界ひずみは一定に保たれることになる。これによれば、 $\alpha \approx 1$ となる。

そこで、Hoek-Brown が提案した s と RMR の関係式、つまり

$$s = \exp\left(\frac{RMR - 100}{9}\right) \quad (7)$$

を式(6)に代入すれば

$$E_m \approx E_0 \sqrt{\exp\left(\frac{RMR - 100}{9}\right)} \quad (8)$$

の推定式が導かれる。

推定式(8)によれば、岩盤の変形係数は、岩石の弾性係数を低減することにより推定できることを示している。低減率は、RMR から計算される。一方、岩石の弾性係数は、一軸圧縮実験の結果から求められる。

ただし、岩石の一軸圧縮実験を実施しない場合には、岩石の一軸圧縮強度(例えば、点荷試験等から求める)より岩石の弾性係数を与える必要がある。そのため、岩石の一軸圧縮強度と弾性係数との相関図(Deere and Miller, 1966)^{2), 3)}からや、あるいは、岩石の一軸圧縮強度と限界ひずみとの相関図(櫻

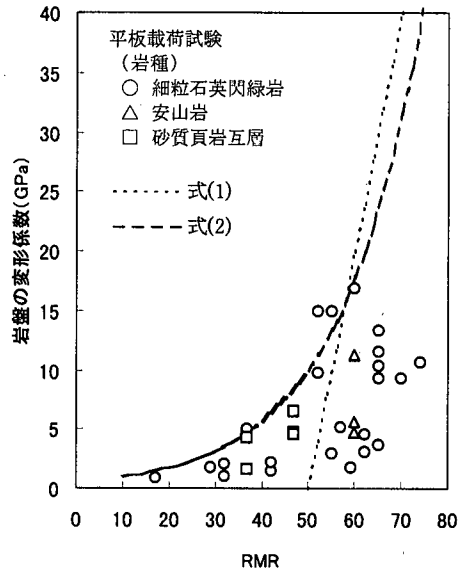


図-1 岩盤の変形係数とRMRとの関係

井, 1982)⁷⁾を利用することにより、岩石の一軸圧縮強度 q_u から限界ひずみ、そして岩石の弾性係数 E_0 を推定する。

4. 推定値と計測データとの比較

以下では、日本国内の平板荷試験の結果を用いて、RMRから岩盤の変形係数を推定する方法の適用性について検討する。すなわち、原位置岩盤に対して、平板荷試験を行うと同時にRMRも求める。そして、平板荷試験から求めた岩盤の変形係数と、RMRから推定した岩盤の変形係数との比較より、推定式がどの程度適用できるかを見してみる。

まず、推定式(1)および(2)による推定結果と平板荷試験の結果との比較を図-1に示す。図から分かるように、推定式(1)および(2)は、試験値に近い推定結果をいくつか与えたものの、全体的に過大な評価となる。

次に、同じ平板荷試験の結果を用いて、推定式(3)および(8)の適用性について検討する。そのため、式(3)および式(8)で推定した岩盤の変形係数と平板荷試験の結果との対応関係を、図-2に示す。なお、分かり易くするため、等値ライン(推定と試験とが同じ)を併せて示している。図から分かるように、推定式(3)による結果(○, □, △)には、試験値に近いもの(等値ラインの近傍)があるが、

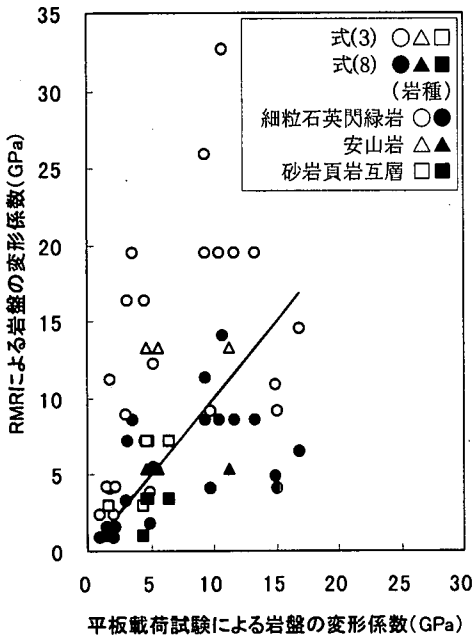


図-2 岩盤変形係数の推定値と試験値との比較

大部分の推定結果は、等値ラインから離れ、等値ラインの上部分に位置する。これに対し、提案式(8)による推定結果(●, ■, ▲)は、ばらつきがあるものの、大半が等値ラインの近傍に分布する。すなわち、既存の推定式による結果が岩盤の変形係数を過大評価することに対し、提案方法はかなり改善された推定結果を与えると言える。

5. まとめ

本文では、RMRから岩盤の変形係数を推定する方法を新たに提案した。Hoek-Brownの岩盤破壊基準を基に、岩盤の限界ひずみと岩石の限界ひずみがほぼ等しいという条件より、岩盤の変形係数は、岩

石の変形係数とRMRの関数である低減係数との積で求められることを示した。日本国内の平板荷重試験の結果との比較から、提案方法は既存方法より改善した推定結果を与えた。今後、多くの計測データとの比較を行い、提案方法の適用性をさらに検証する必要がある。

参考文献

- 1) 土質工学会編：岩の工学的性質と設計施工への応用，土質工学会，1974.
- 2) 土木工学会編：土木技術者のための岩盤力学，技報堂，1975.
- 3) 吉中龍之進，櫻井春輔，菊地宏吉：岩盤分類とその適用，土木工学社，1989.
- 4) Bieniawski, Z. T.: *Engineering Rock Mass Classifications*, John Wiley & Sons, New York, 1989.
- 5) Hoek, E.: Strength of jointed rock masses, *Geotechnique*, Vol.33, No.3, pp.187-223, 1983.
- 6) Hoek, E. and Brown, E.T.: Practical estimates of rock mass strength, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 34, No. 8, pp.1165-1186, 1997.
- 7) 櫻井春輔：トンネル工事における変位計測結果の評価法，土木学会論文集，No. 317, pp. 93-100, 1982.
- 8) 土木学会：原位置岩盤の変形およびせん断試験の指針-解析と設計への適用，1983.
- 9) Serafim, J. L. and Pereira, J. P.: Consideration of the geomechanical classification of Bieniawski, *Proc. Int. Symp. On Engineering Geology and Underground Construction*, Lisbon, 1(II), pp.33-44, 1983.
- 10) Medhurst, T. P. and Brown, E. T.: A study of the mechanical behaviour of coal for pillar design, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 35, No. 8, pp.1087-1105, 1998.
- 11) Verman, M., Singh, B., Viladkar, M.N. and Jethwa, J.L.: Effect of tunnel depth on modulus of deformation of rock mass, *Rock Mech. Rock Engng.*, Vol. 30, No. 3, pp. 121-127, 1997.
- 12) Milne, D., Hadjigeorgiou, J. and Pakalnis, R.: Rock mass characterization for underground hard rock mines, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 13, No. 4, pp. 383-391, 1998.

(1999. 6. 29 受付)

ESTIMATING DEFORMATION MODULUS OF ROCK MASS FROM BIENIAWSKI'S ROCK MASS RATING (RMR)

Yukihiko OKABE, Masato SHINJI, Xu WU and Toshikazu KAWAMOTO

A practical procedure for estimating the deformation modulus of rock mass from Bieniawski's rock mass rating (RMR) is proposed. The procedure is based on the Hoek-Brown failure criterion and the fact that the critical strain of rock mass is approximately as the same as one of the intact rock. Thus the deformation modulus of rock mass is expressed in terms of the elastic modulus of intact rock multiplied by a reduction factor which is a function of RMR. The comparison of the proposed and the existing procedures with the results obtained from plate loading test shows that the proposed one improves the estimation of deformation modulus of rock mass.