

(15) 岩盤分類に着目した不連続性岩盤の変形係数の推定について

大成建設(株) 山本 卓也

Suggestions for estimating the deformability of
jointed rock masses from a rock mass classification

Takuya YAMAMOTO, Taisei Corporation

Abstract

Present techniques to obtain the deformability of rock masses are reviewed and several problems of in-situ tests are discussed. The ratios of the modulus of deformation of rock mass to that of a rock specimen are statistically analyzed and it is shown that it is difficult to estimate the rock mass deformability from test results on small specimens. Rock mass classification systems proposed to date have been aimed at the provision of support recommendations for tunnels and openings in rock masses. When they are used as a basis of estimating rock mass properties, rating procedure should be done with care. Block size and the condition of joints are the main parameters which describe the behaviour of the rock mass and parameters related to these two concepts should be incorporated into the rock mass classification for estimating rock mass deformability. Suggestions for the modification of existing formulae are presented. Finally, guidelines are proposed for the estimation of the in-situ modulus of deformation. This method can be applied to the preliminary assessment of rock mass deformability.

1. はじめに

岩盤の変形係数は、強度と並んで、岩盤の力学特性を表す重要な定数である。重要で、かつ、大規模な構造物については、岩盤の変形係数は、原位置試験や室内試験を含む多くの試験結果に基づいて設定されることが多い。また、設計の初期の段階のように、試験データが比較的少なく、限られた情報から変形係数を設定せざるを得ない場合には、地質状況や岩質が当該地点と類似した他地点の岩盤の変形係数を用いたり、岩石コアを用いた室内試験等のデータがある場合には、岩石の変形係数を参考にして岩盤の変形係数を推定するのが通常である。

平板載荷試験を代表とする原位置試験については、試験が高価であり、時間を費やすが、試験結果から求めた変形係数のばらつきが大きく、結果の解釈が困難であることが多い。また、岩石コアの試験結果を利用する場合には、岩石コアの変形係数を岩盤の亀裂の状態に応じて、ある割合で低減させ、岩盤の変形係数とすることがよく行われるが、低減の方法に明確な根拠があるわけではない。このような観点から、岩盤のマスとしての変形係数を精度よく推定する簡便な手法について検討することは、有意義であると考えられる。

岩盤分類は、当初、岩盤を基礎とする構造物の支保の選定や構造物の安定性の確認を目的として提案されたが、トンネルや地下空洞を対象とした岩盤分類の指標を用いて変形係数を推定する試みが Serafim and Pereira(1983)やBieniawski(1978)らによりなされている。本研究では、第一次近似としての不連続

性岩盤の変形係数を精度よく求めることを目的とし、Bieniawski(1979)の提案によるRMRによる岩盤分類を用いて変形係数を推定する方法について考察した。

2. 岩盤の変形係数を得るための既往の方法

岩盤の変形係数を得る方法には、大きく分けて、直接法と間接法の2通りがある。原位置試験や室内試験は直接法に属し、解析的な方法や経験に基づく方法は間接法に分類される。以下に、各手法の特徴と問題点を簡単に述べる。

(1) 直接的な方法

直接的な方法には、平板載荷試験、フラットジャッキ試験、孔内載荷試験などがある。試験には高価なものが多く、時間と手間がかかることが多い。たとえば、Rocha and da Silva(1970)は、1m²の載荷面積に対して行った500以上の平板載荷試験の結果に基づいて、試験結果は坑道の掘削による岩盤の擾乱による影響を受けやすいことや、試験の対象とする領域が構造物の規模と比べて小さいため、変形係数の値は原位置の岩盤を代表するとは考え難いことを指摘している。他の試験についても、このような問題が少なからず存在する。

(2) 間接的な方法

間接的に変形係数を求める方法には、Goodman and Duncan(1971)やKulhawy(1978)による解析的な方法と、Dershowitzら(1979)やKulatilake(1985)による統計的な方法がある。これらは、単純化した岩盤の変形係数を求めるには便利な手法であるが、入力物性値の設定が困難であるという短所がある。

もう一つは、経験に基づく方法で、RQDや弾性波速度を変形係数と関連づけたCoon and Merritt(1970)によるものやJoint Shear Indexを変形係数と関連づけたVon Thun and Tarbox(1971)によるものがある。いずれもばらつきの非常に大きな関係となっており、上記の指標から直接、変形係数を推定するには、まだ問題がある。

(3) 原位置試験と室内試験から求めた変形係数の比較

原位置試験から求められた変形係数と同一地点で採取した岩石コアを用いた室内試験から求められた変形係数の比較を表-1にまとめて示す。データは、Bieniawski(1978)、Heuze(1980)、Heuze et al.(1982)、Lama and Vutukuri(1978)が報告したものをを用いた。表-1によれば、原位置試験と室内試験から求めた変形係数の比は、平均値は概ね0.5であるが、その分布は0.008から3.42までの広範囲にわたる。このことから、岩石コアのような小さな供試体から原位置岩盤の巨視的な変形係数を推定するのは困難であることが分かる。また、岩石の違いによる変形係数の明確な差異は認められない。

3. 岩盤分類による変形係数の推定に関する提案

これまでの考察により、第一次近似としての岩盤の巨視的な変形係数を推定するための簡便で、かつ、精度の良い手法が必要であると考えられる。岩盤分類を利用する方法は、そのひとつであり、トンネルを対象とした岩盤分類のうち、特に、不連続性岩盤の特徴である亀裂を定量的に評価していると考えられるRMRやQ値を、変形係数の推定に用いることは意義のあることである。すでにBieniawski(1978)やSerafim and Pereira(1983)が、原位置試験により求めた変形係数と、同地点で評価されたRMRの値を関連づけた経験式を提

表-1 原位置岩盤と岩石コアの変形係数の比

岩石の種類	試験数	E_F/E_L の 平均値	標準偏差
堆積岩	45	0.55	0.55
火成岩	59	0.56	0.48
変成岩	116	0.40	0.29
合 計	220	0.47 (0.008-3.42)	0.42

案している。

Bieniawski は、 E_M を岩盤の巨視的な変形係数とすれば、

$$E_M = 2 \text{ RMR} - 100 \quad (1)$$

で表される関係を提案した。この式で用いられているデータは、同じ地点で実施した多くの種類の原位置試験の結果を集積したものであり、また、対象とする構造物もトンネル、地下空洞、ダムと多岐にわたることから、データの質という点から見れば優れていると思われる。しかしながら、(1)式は、RMRが50以下の岩盤に対しては適用できないため、Serafim and Pereiraは、主としてダムサイトで得られたRMRが低い岩盤の変形係数のデータを加えて(1)式を修正し、次式を提案した。

$$E_M = 10^{(RMR-10)/40} \quad (2)$$

これらの式で用いられているRMRは、Bieniawskiが提案した、岩盤構造物の支保の規模や構造物の安定性の確認を意図した岩盤分類に基づいた評価点そのものである。RMRの値は、以下に示す6つのパラメタのすべてを点数で評価したものの総計となっている。

RMRのパラメタ	評価点
① インタクトな岩石の強度	0 - 15
② RQD (Rock Quality Designation)	3 - 20
③ 不連続面の間隔	5 - 20
④ 不連続面の状態	0 - 30
⑤ 地下水の状態	0 - 15
⑥ 不連続面の走向・傾斜による修正	-60 - 0

これらのパラメタの中には、変形係数の推定に関係のあるものとそうでないものが混在しているため、純粋に変形係数と関連のあるパラメタを用いて変形係数を推定することが必要である。この意味から、(1)式および(2)式から得られた変形係数は正確であるとはいえない。

不連続性岩盤は、インタクトな岩石材料と、岩体を個々のブロックに分割する不連続面で構成されていると仮定することができ、このような不連続性岩盤の強度・変形などの力学特性は、以下の要因に支配されるものと考えられる。

- 1) インタクトな岩石材料の強度
- 2) 岩盤の幾何学特性 (ブロックの寸法)
- 3) 不連続面の性状 (不連続面の風化および変質の程度)

パラメタの分析の結果、以下のことが分かった。RMRで考慮されている6つのパラメタのうち、①インタクトな岩石材料の強度は、岩盤の基本的な性質であることから変形係数の推定にそのまま採用し、②RQDと③不連続面の間隔は、不連続面により分割されたブロックの寸法や岩体の中で占める不連続面の密度と密接な関係がある。また、④不連続面の風化・変質の状態は、不連続面での摩擦特性に関連し、岩盤の変形特性にも影響を与えるものと考えられる。以上のパラメタを岩盤の変形特性の推定に組み入れることとする。⑤地下水の状態は、地下水の存在によって生ずる圧力がどの程度岩盤の応力状態に影響を与

えるかを表す指標である。このような地下水の影響は、岩盤の変形係数を推定する際には考慮せず、変形係数を設定した後に、外力として陽な形で考慮するのが妥当であると考えられる。たとえば、⑤のパラメタを採り入れて推定した変形係数を用いて、トンネル周辺の応力状態や変形の程度を議論する際に、初期の応力状態の設定を岩盤の物性値と岩盤に作用する外力とで二重に考慮することになり、不都合が生じる。このため、⑤は変形係数の推定に必要なパラメタからは除外する。また、⑥不連続面の走向・傾斜による修正については、⑤と同様の理由で、岩盤の物性値の推定とは別個に考慮するべきであると考えられる。以上のことから、⑤と⑥を除いた①から④までのパラメタを岩盤の巨視的な変形係数の推定に用いることとする。

構造物の基礎となる岩盤の調査の初期段階では、露頭や調査坑での岩盤観察やボーリングによるコアから得られる情報などが利用されることが多い。したがって、岩盤の変形係数をできるだけこれらの情報を利用して評価できる指標を用いて構成することを考える。

Wood(1990)との議論により、これまでに述べた1)不連続面により分割されたブロックの寸法と2)不連続面の風化・変質などの状態の2つは、岩盤の変形係数を推定するうえで重要な項目であり、また、原位置で比較的容易に評価できることから、これらの項目から成る表-3に示すマトリックスを作成した。この表の中で、1)ブロックの寸法および2)不連続面の状態は、それぞれ6つおよび5つのレベルに細分化されている。ブロックの寸法については、定量的な記述とブロックの寸法の概略値が併記されているため、適切なレベルを容易に選択できる。Laubscher(1977)によれば、ブロックの寸法は、RMRの6つのパラメタのうち、RQDおよび不連続面の間隔と関連しており、風化・変質などの不連続面の状態はRQD、インタクトな岩石材料の強度および不連続面の性状そのものに関連している。

そこで、このような影響を考慮して、ブロックの寸法と不連続面の性状の組合せを、RMRの6つのパラメタで評価した。本来ならば、原位置試験による変形係数と、上記のような方法で求めたRMRの修正値を関連づけた経験式を求めるべきであるが、まだ十分なデータが蓄積されていないため、暫定的に(2)式のSerafim and Pereiraによる経験式を用いて変形係数を算定した。たとえば、ブロックの寸法が1m程度で、強い風化を受けている岩盤のRMRは52となり、変形係数は11GPa程度と推定される。表中には参考のため、同様の方法で修正したBartonのQ値も併記してある。この方法で求めた変形係数の絶対値は、RMRの修正値が、もとのRMRと同等かそれ以上となるため、大きめの評価を与えることになる。

表-2 RMRに含まれるパラメタの設定方法

RMRのパラメタ	設定方法
①インタクトな岩石の強度	すべてBieniawski(1976)の提案した値を用いる
②RQD	
③不連続面の間隔	
④不連続面の状態	
⑤地下水の状態	15とする (完全に乾燥した状態)
⑥不連続面の走向・傾斜による修正	0とする(走向・傾斜の影響がない状態)

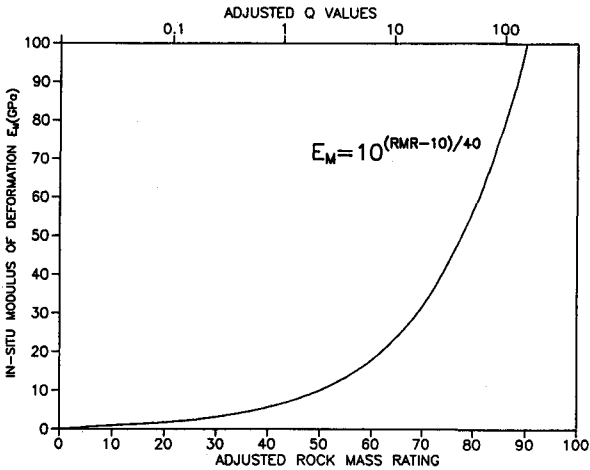


図-1 岩盤分類指標による変形係数の推定

表-3 RMRとQ値による変形係数の推定

			不連続面の状態				
岩盤の構造とブロックの寸法	岩盤の構造	ブロックの寸法 (m)	新鮮またはやや風化	わずかに風化	やや風化	強く風化	完全に風化または残積土
	マッシブである	3.0	100* 533** 178***	89 135 94	75 53 42	57 26 15	40 8 5.6
	ブロッキーである	1.0	95 160 133	84 40 71	70 16 32	52 8 11	35 2 4.2
	ブロッキーである	0.5	87 71 84	75 26 42	60 7 18	42 3 6.3	30 0.8 3.2
	小規模な断層を持つ わずかに褶曲 ブロッキー/ソームを有する	0.3	83 31 67	70 8 32	55 3 14	42 1 6.3	30 0.3 3.2
	中規模な断層を持つ やや褶曲、非常に ブロッキー/ソームを有する	0.1	76 21 45	63 5 21	53 2 12	40 0.8 5.6	28 0.2 2.8
	大規模な断層を持つ 強い褶曲 破砕されている	0.03	68 13 28	60 3 18	50 1 10	37 0.4 4.7	25 0.06 2.4

* 上段 修正したRMR ** 中断 修正したQ値 *** 下段 変形係数の推定値 (単位: GPa)

4. おわりに

RMRの値から第一次近似としての岩盤の巨視的な変形係数を推定することを試みた。RMRは、不連続面の発達した硬岩を対象とした岩盤分類であるが、不連続性岩盤の特性を適正に評価できる方法の一つであると考えられるため、今後、変形係数とRMRの修正値のデータを蓄積し、より正確で、実用的な関係系を確立していきたい。なお、本研究に関し、E. Hoek教授からご指導をいただいたことを付記する。

5. 参考文献

- Barton, N., Lien, R. and Lunde, J. (1974): Engineering classification of rock masses for the design of tunnel supports, *Rock Mechanics* 6, pp.189-236
- Bieniawski, Z. T. (1978): Determining rock mass deformability: Experience from case histories, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.15, pp.237-247
- Bieniawski, Z. T. (1979): The Geomechanics Classification in rock engineering applications, *Proc. 4th Int. Congr. Rock Mech.*, ISRM, Montreux, Vol.2, pp.41-48
- Coon, R. F. and Merritt, A. H. (1970): Predicting in-situ modulus of deformation using rock quality indexes, *ASTM Special Technical Publication* 477, ASTM, pp.154-173
- Dershowitz, W., Baecher, G. B. and Einstein, H. H. (1979): Prediction of rock mass deformability, *Proc. 4th International Congress on Rock Mechanics*, pp.605-612
- Goodman, R. E. and Duncan, J. M. (1971): The role of structure and solid mechanics in the design of surface and underground excavation in rock, *Proc. of the Conference on Structures, Solid Mechanics and Engineering Design*, Part 2, Paper 105, John Wiley & Sons
- Heuze, F. E. (1980): Scale effects in the determination of rock mass strength and deformability, *Rock Mechanics* 12, pp.167-192
- Heuze, F. E. et al. (1982): Rock mechanics studies of mining in the Climax Granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.19, pp.167-183
- Kulhawy, F. H. (1978): Geomechanical model for rock foundation settlement, *Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.104, No. GT2, pp.211-227
- Lama, R. D. and Vutukuri, V. S. (1978): Handbook on mechanical properties of rocks, Vol.3, Appendix 3, *Trans Tech Publications*
- Laubscher, D. H. (1977): Geomechanics classification of jointed rock masses-Mining Applications, *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Industry*, Vol.86, No.1, pp.A1-A8
- Rocha, M. and Da Silva, J. N. (1970): A new method for the determination of deformability of rock masses, *Proc. 2nd Congr. Rock Mech.*, Paper 2-21, ISRM, Belgrade
- Serafim, J. L. and Pereira, J. P. (1983): Considerations on the Geomechanics Classification of Bieniawski, *Proc. Int. Symp. Eng. Geol. Underground Constr.*, A. A. Balkema, pp. II 33-II 42
- Von Thun, J. L. and Tarbox, G. S. (1971): Deformation moduli determined by joint shear index and shear catalog, *Symposium of ISRM, Nancy*, paper II 23
- Wood, D. F. (1990): A rock mass classification for estimating the strength of jointed rock masses, unpublished material, University of Toronto