

岩盤分類を用いた斜面安定解析のための 岩盤物性の評価について

ASSESSMENT OF MECHANICAL PROPERTIES OF ROCKMASS BY ROCK CLASSIFICATIONS FOR SLOPE STABILITY ANALYSIS

清水泰弘*・アイダン・オメル**・渡嘉敷直彦***・川本脩万****

Yasuhiro SHIMIZU, Ömer AYDAN, Naohiko TOKASHIKI, and Toshikazu KAWAMOTO

The instability of rock slopes can be broadly classified as local failures and global failures. Local failures are generally associated with the geometry and number of discontinuities while the global failures depend upon the mechanical characteristics of rock mass in association with induced stress state in the slopes. Therefore, the estimation of mechanical properties of rock mass is of great importance. There are various methods to assess the mechanical properties of rock mass. In this article, the authors describe a series of site and laboratory investigations at a quarry with the purpose of assessing the mechanical properties of rock mass by using rock classifications for of finite element

1. はじめに

岩盤中にはいつも実在的な、あるいは潜在的な不連続性面を含んでいる。このような岩盤中に掘削される斜面の不安定性は局所的なものと全体的なものとの二つに分けて考えられる。特に前者は不連続面の幾何学的な分布や斜面の形状によって現れる。局所的な不安定性の可能性が不連続面の数、方向およびその摩擦特性等で判断できる。一方、斜面内部の応力状態によって岩盤の破壊に到るようなことも考えられる。そのため、斜面を構成する岩盤の変形・強度特性を的確に把握することが最も重要である。岩盤の力学特性を評価するために、いくつかの評価手法が提案されている。

本研究では、露天掘り鉱山の残壁斜面の安定性評価を対象として、まず現地の露頭調査を行い岩質、不連続面の方向、密度および間隔等の幾何学的特性と、室内試験によって圧縮強度、引張強度、超音波計測、摩擦係数計測等の力学特性を明らかにした。次にこれらの諸数値を利用して岩盤分類を行い、さらに、得られた諸データを用い現在の掘削断面から最終掘削断面までの盤下げにおける残壁斜面のFEM解析を行って残壁斜面全体の安定性の評価を行なった。

2. 岩盤の力学特性の評価

RMR (Rock Mass Rating) 法は、一般の岩盤を質に応じて 100 から 0 までの等級づけにより分類したものである (Bieniawski (1974))。等級づけにあたり岩石の一軸圧縮強度、RQD (Rock Quality Designation)、地下

*正会員 名城大学助教授 理工学部土木工学科 **正会員 東海大学助教授 海洋学部海洋土木工学科

正会員 琉球大学助教授 工学部環境建設工学科 *正会員 愛知工業大学教授 工学部土木工学科

水の条件、割れ目間隔、割れ目の状態および不連続面の方向性等の6つのパラメータを主要なものとして採用している。

現地の岩盤調査および屋内強度試験の結果を用いて RMR 法と Q-法で岩盤を評価すると表-1と2のようである。なお、L1~L5 は現地の観察場所を示しており、L1 より L3 は代表的な個所であり、L4, L5 は特に破碎された個所である。

不連続性岩盤の力学特性に関する各種評価手法の基本概念について簡単に述べ、岩盤分類に基づいて岩盤の強度・変形特性を評価した。ここでは岩盤の変形特性に関して以下の各関係式を利用する。

Bieniawski(1978)は RMR と岩盤の変形係数(E_m)の関係について実測値を収集して次の式を提案した。

$$E_m = 2 * RMR - 100$$

上式から分かるように RMR の値が 50 以下の場合この式を適用できない。このことを考慮して、Serafim-Pereira(1983)は様々なダムサイトで行われた現位置変形試験データを整理して変形特性と RMR の関係を次の式で与えた。

$$E_m = 10^{(RMR-10)/40}$$

同時期に Barton(1995)は Q 値 (Barton(1974)により $Q = (\text{岩塊の大きさ}) * (\text{岩塊間のせん断強度}) * (\text{作用応力})$) と岩盤の変形特性の関係を次式で与えている。

$$E_m = 25 \log Q$$

上式は Q 値が 1 より小さい場合には適用できない。近年 Barton(1995)は今までの実測値を考慮して上式を以下のように訂正している。

$$E_m = 10Q^{\frac{1}{3}}$$

以上の E_m の単位は Gpa である。Aydan-Ulusay-Kawamoto(1997)は、既存のデータと日本のデータを考慮して RMR と岩盤の変形係数について以下のような式を提案している。

$$E_m = 0.0097 RMR^{3.54}$$

E_m の単位は Mpa である。各手法によって求めた変形係数を表-3 に示す。

岩盤の強度特性としては一軸圧縮強度 σ_{cm} を以下の各関係式で求めることとする。Hoek-Brown(1980)は自らの降関数パラメータである s, m と RMR との間の関係を確立した。一軸圧縮強度の場合、岩盤強度は次式によって岩石の強度と関係づけられる。

$$s = e^{(RMR-100)/6}$$

$$\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_{ci}} = \sqrt{s}$$

ここで σ_{ci} はインタクトな岩の一軸圧縮強度である。

表-1 RMR 法による測定位置における岩盤の評価

	代表的な岩盤部分			破碎帯部分	
	L 1	L 2	L 3	L 4	L 5
圧縮強度点数	7	7	4	4	4
RQD 点数	8	8	8	3	3
不連続面間隔点数	8	8	8	5	5
不連続面状態点数	10	10	10	5	10
浸透状態点数	10	10	10	7	7
基本 RMR (B-RMR)	43	43	40	24	29
修正 RMR (M-RMR)	38	38	35	19	24
Favourable					

表-2 Q-値法による測定位置における岩盤の評価

	代表的な岩盤部分			破碎帯部分	
	L 1	L 2	L 3	L 4	L 5
RQD 点数	40	40	30	25	25
Jn 点数	10.5	10.5	10.5	20	15
Jr 点数	2	2	2	0.5	1
Ja 点数	1	1	1	10	8
SRF 点数	1	1	1	1	1
Q-値	7.62	7.62	5.714	0.0625	0.125

表－3 岩盤の変形係数 (GPa)

	代表的な岩盤部分			破碎帯部分	
	L 1	L 2	L 3	L 4	L 5
Serafim-Pereira B-RMR	6.683	6.683	5.623	2.239	2.985
Serafim-Pereira M-RMR	5.012	5.012	5.623	1.679	2.239
Barton-1983	22.05	22.05	17.85	-	-
Barton-1995	19.68	19.68	17.29	3.98	6.12
Aydan ら (1997) B-RMR	5.88	5.88	4.55	0.64	1.46
Aydan ら (1997) M-RMR	3.79	3.79	2.92	0.33	0.64
電研	1.5-4 (CM) 4-8 (CH)	1.5-4 (CM) 4-8 (CH)	1.5-4 (CM) 4-8 (CH)	≤ 0.3	0.3-1.5

Singh-Barton(1993)はQ値と岩盤強度との間に次のような経験式を提案している。

$$\sigma_{cm} = 0.7\gamma Q^{\frac{1}{3}}$$

Kalamaras and Bieniawski(1995)は、最近石炭についてのデータを用いて次のような関係を示している。

$$\sigma_{cm} = 0.5 \frac{(RMR - 15)}{85} \sigma_{ci}$$

RMR システムに対して Aydan-Ulusay-Kawamoto(1997)は岩盤の弾性係数と RMR の間に次に与えられるような関係を開発した。

$$\sigma_{cm} = 0.0016 * RMR^{2.5}$$

Hoek-Brown(1988)は自らの降伏基準における岩盤の摩擦係数に関連するパラメータ m に関して次式を提案している。

$$m_m = m_i e^{(RMR-100)/28}$$

上式におけるパラメータ m から岩盤の摩擦角を近似的に次式から求めることができる。

$$\phi^* = \sin^{-1} \left[\frac{m}{4\sqrt{s+m}} \right]$$

摩擦角については、Aydan-Akagi-Kawamoto(1993)が次式を提案している。

$$\phi_m = 20\sigma_{cm}^{0.25}$$

粘着力については、各手法から得られた圧縮強度より次式を利用して求める。

$$c = \frac{\sigma_{cm}}{2} \frac{1 - \sin \phi}{\cos \phi}$$

3. 現地調査

調査対象は、石灰石を採掘している鉱山の残壁斜面である。調査地域内は東西方向に輝石安山岩の岩脈が1本貫入しているほかは、全岩が石灰岩層であり、その他の岩石は賦存しない。石灰岩は、上部が白色～灰色の非晶質の石灰岩、下部が黒色の非結晶質石灰岩である。石灰岩中には多くの弱面、不連続面が存在し、大理石化作用によって生じた方解石が1～5mm幅の白い帯として、石灰岩中に多数見られた。地下水は、露頭面の観察では確認されず、地下水圧の作用は無いものと推測される。現在の残壁斜面は南北方向で東向きに形成され、残壁の高さは現在最高130mであり、平均勾配は45°である。

また、現況は、ベンチの1段が高さ10 m以下、ベンチ幅2 m以上、背面傾斜70°以下で、平均傾斜61°となっている。現場より採取した試料により行った岩石試験は一軸圧縮強度、引張強度（圧裂試験法）の試験、超音波および表面摩擦角の測定等を行った。これらの試験結果を表-4に示す。

RQDの評価については、ボーリングのコアが無いことから現位置の露頭調査で行なった。コア判定と露頭調査との比較(Cameron-Clarke at al. 1981)では、一般的にボーリングコアによる判定は実態を著しく悪くしていることが明らかであるが、また現位置の露頭の判定は微細な亀裂を見落とす可能性が有ることも示している。今回は露頭調査の作業の敏速性と精度の向上を目的として写真-1のようなゲージを製作し用いた。

4. 不連続面を含む石灰石岩盤の幾何学的安定性評価

石灰岩中には、大理石化作用によって生じた方解石の1～5 mmの白い帯が無数に見出される。掘削斜面には褶曲構造が確認され、堆積岩特有の層理面とそれにほぼ直交した不連続面の存在している層の厚みが10 cmより100 cmまで変化している。直交している不連続面が層の厚みに限定され、層から層への連続性はほぼ認められない。

しかし、褶曲運動に伴って、連続性の高いせん断による不連続面の存在が確認された。斜面の安定性に関しては、破砕帯近傍に見られるせん断による不連続面に対して安定性を検討する必要があると思われる。図-1は今回の調査で計測された不連続面の下半球のステレオネット投影を示す。

図-1から明らかなように幾つかのくさび破壊の可能性が認められる。その最もすべる可能性の高いくさびは、傾斜方位208/66(SW28/66)の不連続面と傾斜方位150/43(SE30/43)の不連続面によって形成される。斜面の傾斜が60°であるならばその交差線の傾きが60°であることから破壊の可能性が無くなるが、斜面の傾斜が60°より大きくなるとくさび破壊の可能性が高くなる。しかし、その規模は大きなものではなく、

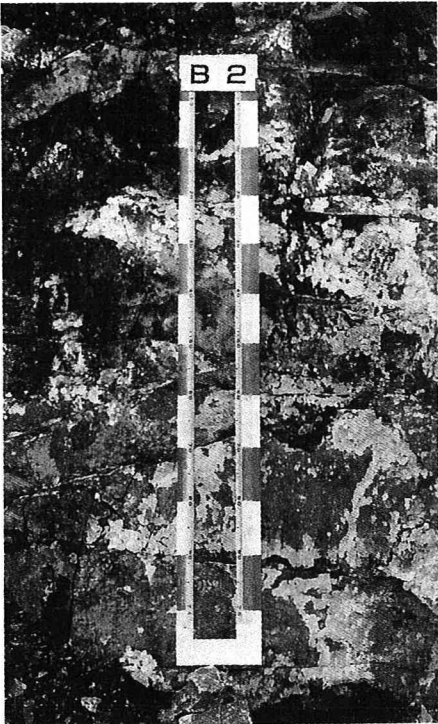


写真-1 露頭計測用ゲージ

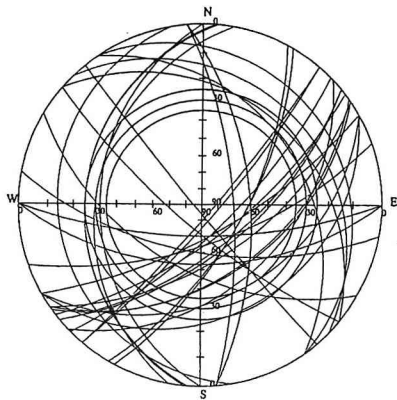


図-1 不連続面のステレオネット

表-4 岩石と岩盤の物理・力学特性

諸特性	強度試験結果	解析入力設定値
単位体積重量 (gf/cm ³)	2.68	2.68
静弾性係数 (MPa)	8.63×10 ⁴	2.5×10 ⁴
ポアソン比	0.25	0.25
一軸圧縮強度 (MPa)	100	30
引張強度 (MPa)	5.3	3
内部摩擦角 (°)	64	45
粘着力 (MPa)	11.5	4

現地調査において小規模なくさび破壊が見られたのみである。従って、斜面の傾斜が 60° より小さく掘削が行われるならば、斜面の不連続面の不安定性が起らないと推定される。

5. 残壁斜面の解析モデル

有限要素法 (FEM) の解析では、残壁斜面付近の地質図および地形図に基づいて解析モデルを作成し境界条件や先に求められた岩盤の諸物性値のデータを入力して、各節点の変位および各要素の応力、安全率を求めた。なお、掘削前の地山掘削により残壁が形成されているので、現在の地山の状態を初期状態とすれば、すでに残壁内にはそれに伴う応力、変位が発生していることになる。この解析では初めから残壁が存在する地形に対して重力が作用しているものとして解析を行った。FEM に用いた諸物性を表-8 に示す。この表の解析入力設定値は、強度試験結果および現場調査などの物性を基に岩盤分類し、秋本(1984)の値を参考にし、各種の強度評価手法に基づいて設定したものである。解析結果の局所安全率を見ると掘削を行った後も法尻部分で 2.74 の局所安全係数を示したが、その他の部分では 3.0 以上の値を示し、残壁斜面全体として十分安全であることが判明した。

6. まとめ

石灰石の採掘現場調査および各種の岩石試験結果を用い、岩盤の力学特性を岩盤分類(RMR)に基づいて評価し、それを参考に岩盤物性値を設定し有限要素法を用いて斜面全体の安定性を検証した。本論文で示した手法は岩盤の現位置試験結果が得られない場合に大変有効な手段となると判断できる。

参考文献

- Aydan, Ö., Akagi, T., Kawamoto, T. (1993). The squeezing potential of rocks around tunnels; theory and prediction. *Rock Mech. Rock Engng.* 26(2), pp.137-163
- Aydan, Ö., R. Ulusay, T. Kawamoto (1997): Assessment of rock mass strength for underground excavations. 36th US Rock Mechanics Symposium, pp.777-786.
- 秋本昌(1984): 石灰岩露天掘削面の安定性に関する研究, 博士論文, 早稲田大学, pp.53-77,
- Barton, N., Lien, R., Lunde, I. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel supports. *Rock Mechanics*, 6(4), pp.189-239.
- Bieniawski, Z.T. (1974). Geomechanics classification of rock masses and its application in tunnelling. Third Int. Congress on Rock Mechanics, ISRM, Denver, II, pp.27-32.
- Bieniawski, Z.T. (1978). Determining rock mass deformability -experience from histories. *Int. J. Rock Mech., Min. Sci.*, 15, pp.237-247.
- Barton, N.(1995): The influence of joint properties in modelling jointed rock masses. 8th Int. Rock Mech. Congress, Tokyo, Vol.3, pp.1023-1032.
- Hoek, E., Brown, E.T. (1980). Empirical strength criterion for rock masses. *J. Geotech. Engng. Div., ASCE*, 106(GT9), pp.1013-1035.
- Hoek, E., Brown, E.T. (1988). The Hoek-Brown failure criterion - a 1988 update. 15th Can. Rock Mech. Symp., pp.31-38.
- Kalamaras, G.S., Bieniawski, Z.T. (1995): A rock mass strength concept for coal seams incorporating the effect of time, 8th ISRM Congress, Tokyo, Vol.1, pp.295-302.
- Serafim, J.L., Pereira, J.P. (1983): Considerations of the geomechanics classification of Bieniawski, *Int. Sympo. Eng. Geol. Underground Constr., LNEC, Lisbon, Vol1, No. II*, pp.33-42