

IAEG Bulletin 紹介 (7)

ロックボルト支保要素：岩盤のロックボルティング効果に関する研究紹介

国際委員
徳 楠 充 宏

1. はじめに

海外のトンネル設計では国内のような道路、鉄道に使用される地山区分や支保設計が適用されるケースは少なく、地山区分では支保設計に直接リンクする Rock Mass Rating (RMR) や Tunneling Quality Index (Q) System が使われることが多い。また、地下空洞やダム設計を対象として、調査・設計時点で岩石物性から岩盤物性を推定できる利点から Geological Strength Index (GSI) ならびに Hoek-Brown Failure Criterion も使用頻度が高い。

トンネル掘削技術では最先端を走る我国の地山区分や支保設計標準が軽視されるのは、プロジェクトのレンダーである国際金融機関の技術査察団に欧米系の人材が多く採用されることが要因であると認識している。

2. 紹介論文の概要

紹介する論文は、トンネルの地山区分とそれに対するロックボルティングの打設効果を論じた内容で、IAEG Bulletin Volume 76- Number 1- February 2017 に掲載されている “Rock bolt supporting factor: rock bolting capacity of rock mass” である。著者は Mohammad Mohammadi をはじめとするイラン大学関係技術者である。地山区分や支保設計における歴史的な流れを説明した上でロックボルティングの効果に着目した Q 値と RMR の適性比較を行っている点で珍しいテーマであると考え紹介した。尚、本稿は Open Access でフリーに閲覧できるので、詳細は IAEG のホームページにアクセスしていただきたい。

3. Abstract

RMR と Q 値は、地下構造物に対する空洞掘削

設計に必要な岩盤等級区分として過去 50 年間に渡り多くの現場に適用されてきた。

ここでは、RMR での岩盤不連続面データと岩盤本来の特性を利用して算出される Rock Bolt Supporting Factor (RSF) を紹介する。

RFS は 5 項目の不連続面データを使用する点、2 項目のみを使用する Q 値によるロックボルトの支保効果ファクター(QRSF)よりも信頼性が高いと判断される。

4. Introduction

地下構造物や鉱山開発プロジェクトにおける岩盤区分は、古くは支保工に依存するトンネル掘削に適用された Terzaghi (1946) による区分を発端とする。また、Lauffer (1958) は、トンネル壁面の自立時間に基づく区分として、トンネル切羽から最近傍の支保までの区間を無支保区間の自立時間は岩盤の質によるとした。Lauffer の区分は Pacher 他 (1974) に修正され New Austrian Tunneling Method (NATM) へと導かれる。Deere 他 (1967) は、

Rock Quality Designation Index (RQD) を利用して、 $RQD=115-3.3J_v$ (J_v : すべての割れ目系に対する単位長さ毎の割れ目数の総計) ...式(1) を提唱している。

Wickham 他(1972)は、岩盤の性状、トンネル方向と割れ目の幾何的特性の影響、割れ目の状態に影響する地下水の状況に関する評点を合計する Structure Rating (RSR) を提唱した。

その後、Bieniawsky (1973) が提唱した Rock Mass Rating system (RMR) は国際基準として適用されるに至ったが、その後幾度か修正されている。

Bieniawsky (1989) においては、RMR を決定するのには、以下の 6 項目に基づく。

1) 一軸圧縮強度(UCS)

- 2) RQD
- 3)不連続面の間隔
- 4)不連続面の状態
- 5)地下水の状態
- 6)不連続面の方向

パラメータのひとつである不連続面の状態は Rock Bolt Supporting Factor(RSF)を決めるための重要な要素となっている。

同じく、以下の6項目のパラメータで岩盤区分する Tunneling Quality Index (Q) System は、Barton 他(1974)により提唱されている。

- 1) RQD
- 2)割れ目系の数と不連続面の間隔 (Jn)
- 3)最も悪い影響を与える割れ目または不連続面の粗度 (Jr)
- 4)最も弱い割れ目沿いの変質度や介在物の程度 (Ja)
- 5)地下水の流入(Jw)
- 6)地圧状態 (SRF)

ブロックサイズを示す RQD/Jn、割れ目面や介在物の粗度や内部摩擦特性を示す Jr/Ja、二つの応力状態を示す Jw/SRF により下記の計算を行う。

$$Q = RQD/Jn \times Jr/Ja \times Jw/SRF \quad \dots \text{式(2)}$$

本書では、RMR における Rock Bolt Supporting Factor (RFS)について紹介する。RFS はロックボルトのメカニズムを数学的理論に基づき発展させてきただけではなく、ロックボルトによる岩盤補強に関してその岩盤が有する機能を特定する幾つかの適用を明らかにした。

5. RMR: 理論上の適用性

RMR はトンネル施工での適用・実践に伴い改良されつつ設計要領として、ダム基礎、斜面、リップビリティ、鉱山等を対象として広く利用されている。

RMR のパラメータは先述の通りであるが、最初の5つのパラメータにより0から100点までの評点を設定し、6つ目のパラメータである不連続面の方向により評点を補正する。

例えば、パラメータのひとつである”不連続面の状態”を Table-1 で示すが、5項目の特性 (Discontinuity Length, Separation, Roughness, Infilling, Weathering)があり、各特性の最高値が6点であるため合計30点が最高値となる。同じく、その他のパラメータでの最高値は USC(15

点)、RQD(20点)、不連続面の間隔(20点)、上述した不連続面の状態(30点)、地下水の状態(15点)で理論上の最高点は100点となる。RSFを決めるにあたってはこの5つのパラメータを利用する。6つ目のパラメータである不連続面の方向はトンネル軸方向に依存するため含まない。

Table-1 Guidelines for classification of discontinuity conditions (after Bieniawski 1989)

Parameter	Range				
Discontinuity length (persistence/continuity)	<1m 6	1-3 m 4	3-10 m 2	10-20 m 1	>20 m 0
Separation (aperture)	None 6	<0.1mm 5	0.1-1mm 4	1-5 mm 3	>5 mm 2
Roughness	Very rough 6	Rough 5	Slightly rough 4	Smooth 3	Stickensided 2
Infilling (gouge)	Hard filling 6	<5mm 5	>5mm 4	<5mm 3	>5mm 2
Weathering	Unweathered 6	Slightly weathered 5	Moderately weathered 4	Highly weathered 3	Decomposed 2
Condition of discontinuities	Very rough surfaces, not continuous, no separation, unweathered wall rock	Slightly rough surfaces, separation <1 mm, slightly weathered walls	Slightly rough surfaces, separation <1 mm, highly weathered wall	Stickensided surfaces or gouge, <5 mm thick or separation 1-5 mm continuous	Soft gouge >5 mm thick or separation >5 mm
Rating	30	25	20	10	0

例えば、Table -2 は、異なった評点の組み合わせであるが総計RMRが85になる4つの岩種ケース (ケース A, B, C, D) を事例として示す(本稿に示すRMRの総計が74, 45および25になるケースは割愛する)。

トンネルや斜面の岩盤評価を行う際に合計RMRが使用されるが、ロックボルトニングやグラウト注入による岩盤改良・補強の点では評点の組み合わせが重要となる。

Table-2 Different combination of parameters to yield the basic RMR value of 85

State Parameter	A RMR = 85	B RMR = 85	C RMR = 85	D RMR = 85
UCS (MPa)	200	200	110	200
Value	20	20	11	20
Rating	15	15	10	15
RQD (%)	85	90	100	100
Value	17	18	20	20
Rating	17	18	20	20
Spacing	200 mm	850 mm	2200 mm	2200 mm
Value	8	12	20	20
Rating	8	12	20	20
Condition of discontinuities				
Persistence	<1m 6	1-3m 4	Slightly rough surfaces Separation <1mm	10-20m 1
Value	None 6	<0.1m 5	Highly weathered wall	0.1-1mm 4
Rating	6	5		4
Roughness	Very rough 6	Rough 5		Smooth 3
State	None 6	None 6		None 6
Value	None 6	None 6		None 6
Rating	6	6		6
Weathering	Unweathered 6	Slightly weathered 5		Highly weathered 3
State	Unweathered 6	Slightly weathered 5		Highly weathered 3
Value	Unweathered 6	Slightly weathered 5		Highly weathered 3
Rating	6	5	20	3
Groundwater (inflow per 10 meter tunnel length (L/min))	Completely dry 15	Completely dry 15	Completely dry 15	Completely dry 15
State	Completely dry 15	Completely dry 15	Completely dry 15	Completely dry 15
Value	Completely dry 15	Completely dry 15	Completely dry 15	Completely dry 15
Rating	15	15	15	15

6. RSF

RMRが85点から100点のようなClass Iに相当する岩盤ではその評点は一軸圧縮強度に依存することが多い。このような高RMRを示すのは、完全に乾燥した岩盤からなり、割れ目間隔

が 2,000mm 以上あるような不連続面の状態の評価点が最高値の 30 点である。よって、このような岩盤では不連続面の存在は RMR 評点の減点に寄与しない。これが RMR での問題であり、不連続面の挙動や岩盤挙動への影響に注視する必要がある。

Table-1 に示すように、不連続面の状態はせん断抵抗の増減に関係している。即ち、粗い面は平滑な面よりも高いせん断抵抗を得られることを意味する。また、密着した不連続面は開口した場合や介在物が付着した場合よりも高いせん断抵抗を示す。このように、不連続面の内部摩擦を引き上げることが岩盤を補強させることになる。

適切なロックボルティングの設計とは RMR の入力パラメータのうち、不連続面の状態を示す連続性、開口性、粗度、介在物、風化について最大値の 6 点に近づけるための処置である。

例えば、Table-2 の岩種 C では不連続面の状態に関する評点合計は 20 点を 30 点にするためにロックボルトにより 10 点分を補強することができる。RFS とは不連続面の状態での評点である r_{co} を使うと下記のように定義される。RFS は小数点を除く $0(r_{co}=30)$ から $100(r_{co}=0)$ までの数値で $RFS=100$ はロックボルティングによる岩盤補強余地が最大であることを意味する。

$$RFS=100 \times (30 - r_{co}) / 30 \quad \dots \text{式(3)}$$

$$RFS=100 - (10 \times r_{co}) / 30 \quad \dots \text{式(4)}$$

7. Mechanism of Rock Bolting

ロックボルトと岩盤の多様性から、岩盤ロックボルティングのメカニズムは完全に掌握されていない。Habenchit (1983) は、ロックボルティングの重要な耐荷性メカニズムについては、吊り下げ効果(suspending effect), 補強効果(nailing effect), 梁形成効果(beam building effect), アーチ効果(arch building effect)の 4 つの効果を期待するとしている。ロックボルティングの設計においては、このうち少なくとも 1 項目の効果をベースに一定の設計要求を満たす必要がある。ロックボルティングによる岩盤補強の概念から得られる 5 つ目の原理を紹介する。原理は簡単で、RMR の不連続面の状態の評点を最大にすることで RMR 評点そのものを向上させることである。即ち、オリジナルの岩盤(RMR)に対してロックボルティングにより RMR を向上さ

せることによって形成させる新しい岩盤 (RMR_{eq}) を 5 つ目の効果と考える。ここで、

$$RMR_{eq} - RMR = 30 - r_{co} \quad \dots \text{式(5)}$$

ロックボルティングの 5 つ目の効果を系統立てるとしたら、 RMR_{eq} は RFS を使うと式(5)と式(3)により式(6)のように設定される。

$$RMR_{eq} = RMR + 0.3RFS \quad \dots \text{式(6)}$$

例えば、Table 3 の岩種 B では不連続面の状態の評点は $4+5+5+6+5=25$ 点であるので、以下の計算となる。

$$RFS = 100 \times (30 - 25) / 30 = 16.67, RMR_{eq} = RMR + 0.3RFS = 85 + 0.3 \times 16.67 = 90 \text{ となる。}$$

8. RFS and the Q-system

Q 値の場合、不連続面の状態を示すパラメータは 2 つで割れ目の粗度(Jr)と割れ目の変質度(Ja)である。両パラメータの比である Jr/Ja は割れ目の接触性や介在物の粗度と内部摩擦の特性を表す。Jr は 0.5 から 4 程度、Ja が 0.75 から 20 とすると、Jr/Ja は 0.025 から 5.33 の範囲となる。ロックボルティングの適切な設計はその比を初期値から最大値である 5.33 まで引き上げることになり、増加分である I_{fc} は式(7)のように書ける。

$$I_{fc} = 5.33 - Jr/Ja \quad \dots \text{式(7)}$$

式(8)はロックボルティングによる補強効果への寄与率を示す。1000 倍することにより、QRFS は 4.71 から 1004.71 の範囲となる。5.305 は Jr/Ja の最大値 5.33 と最小値 0.025 の差である。また、式(8)は式(9)に書き換えられる。

$$QRFS = 1000 \times I_{fc} / 5.305 \quad \dots \text{式(8)}$$

$$QRFS = 188.5 \times I_{fc} \quad \dots \text{式(9)}$$

ロックボルティングによる岩盤効果を Q 値で示すのに、式(2), 式(7), 式(8)および式(9)を用いると式(10)が求められる。

$$Q_{eq} = 5.33 \times Q / (5.33 - QRFS / 188.5) \quad \dots \text{式(10)}$$

Bieniawsky (1989) に述べられているように、Park River トンネルでの RMR と Q 値は 56 と 9 とされており、RMR での不連続面の評点は 25 であるのに対して、Q 値では割れ目は粗く、平面状であり汚れはあるが未変質であることから Jr と Ja はそれぞれ 1.5 と 1 である。よって、RFS は 16 であるのに対して QRFS は 722 である。RFS 値から判断される本岩盤へのロックボルトによる補強効果は幾分低いとされるのに対して、QRFS では幾分高い補強効果が期待さ

れる結果となっている。このように、QRFSではロックボルディングによる補強効果を正確に評価することは難しい。これは不連続面の状態を評価するためのパラメータが二つしかないために生じる。補強前後のRMRとQ値がそれぞれ56から61に対して9から932であり、両方の評価において普通(fair)とから良い(good)と改善されたことになるが、その効果度合いの観点からは、QRFSは感度が悪いと言えよう。

9. おわりに

昨今、主として開発途上国の電力セクターに我国の電力会社や商社等の投資機関が水力発電開発のIPP (Independent Power Producer) 事業に参入するケースが多々見られる。調査数量に限られるトンネルについては、事前調査結果での地山区分および支保工選定が工事に反映されるとは言い難く、出来高精算の対象となることや工程のクリティカルパスになることが多い。国内の公共事業であれば安全性を重視する地山区分が原則であるが、海外事業は時には経済性を重視することもある。トンネル切羽でのオーナー側とコントラクター側の工種判定協議には、日本で活用される定性的な区分に対して数値判定する方法がより明確ではある。また、オーナー側とコントラクター側の地山区分の事前目合わせに専門家が呼ばれてかなり繊細な点まで時間をかけて詰めるのは、工事費に大きく影響を与えるためである。国内基準と国際基準、今後は双方に通じる技術者が育成されることを期待したい。

10. 参考文献 (代表的な文献を抜粋)

- 1) Mohammad Mohammadi, Mohammad Farouq Hossaini, Heydar Bagloo (2017) Rock bolt supporting factor: rock bolting capability of rock mass, IAEG Bulletin Vol.76:231-239
- 2) Barton N, Lien R, Lunde J (1974) Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mech 6:183-236
- 3) Bieniawsky ZT (1973) Engineering classification of jointed rock masses. Trans S Afr Inst Civ Eng 15:335-344
- 4) Bieniawsky ZT (1989) Engineering rock mass classification: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering. Wiley-Interscience publication, New York
- 5) Romana M (1985) New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. In: Proceedings of International Symposium Rock Mechanics in Excavation for Mining Civil Works, ISRM, Mexico City, pp 59-68
- 6) Gonzalez de Vallejo LI (1983) A new rock classification system for underground assessment using surface data. In: Proceedings of International Symposium Engineering Geology Underground Construction, LNEC, Lisbon, vol. 1, pp II.85-II.94
- 7) Habenicht H (1983) The anchoring effects—our present knowledge and its shortcomings—a keynote lecture. In: proceedings of International Symposium on Rock Bolting, Abisko, pp 253-268
- 8) Kendorski F, Cummings R, Bieniawski ZT, Skinner E (1983) Rock mass classification for block caving mine drift support. In: Proceedings of 5th International Congress Rock Mechanics, ISRM, Melbourne, pp B51-B63
- 9) Laubscher DH (1984) Design aspects and effectiveness of support systems in different mining situations. Trans Inst Min Metall 93:A70-A81
- 10) Palmstrom A (1982) The volumetric joint count—a useful and simple measure of the degree of rock jointing. In: proceedings of 14th international congress, International Association Engineering Geology, Delhi, vol 5, pp 221-228
- 11) Serafim JL, Pereira JP (1983) Considerations of the Geomechanics classification of Bieniawski. In: Proceedings International Symposium Engineering Geology Underground Construction, LNEC, Lisbon, vol. 1, pp I.33-II.42
- 12) E.Hoek and E.T.Brown (1997) Practical estimates of rock mass strength, IJRM and MS Vol34: 1165-1186