

(59) 岩盤分類と岩盤—支保相互作用解析

西松建設㈱ 正会員 北 川 隆

1. はじめに

トンネルや地下空洞を掘削した時に、岩盤と支保との相互作用により地山がどの程度変位して安定するかは、設計・施工の上で非常に重要な項目の一つである。本研究の目的は、地質調査ならびに岩盤分類の結果を利用して相互作用解析を行ない、支保の最適性の検討および概略の収束変位量を推定することである。岩盤分類としてはQ値および電研式のものを取りあげ、相互作用解析方法としては、フックとブラウンの方法を採用した。また、国内の4つのトンネル事例についても計算を行ない、考察を加えた。

2. 岩盤分類

2.1 Q値による岩盤分類

バートン、リーンとルンデ¹⁾は、数多くの地下空洞の実績を収集し、岩質の良否を判定し、かつ支保の選定に用いることのできる指数としてQ値とよばれるものを提案した。Q値は次式で定義される。

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \cdot \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \cdot \left(\frac{J_w}{SRF} \right) \quad \text{----- (1)}$$

ここに、RQD：ディアの岩盤良好度、 J_n ：節理群の数、 J_r ：節理面の粗さ係数、 J_a ：節理の変質係数、 J_w ：節理内の水による低減係数、SRF：応力低減係数である。

Q値は定義の上では最小値 0.0003125 から最大値 2120 の間の値をとることになる。しかし、一般に見られる岩盤のQ値は、0.001(きわめて悪い)から 1000 (きわめて良好)まで程度であることを考慮してバートン¹⁾は、Q値を用いた岩盤分類を提案している(図-1参照)。

2.2 Q値による支保選定

空洞の等価寸法 D_e は次式で定義される¹⁾。

$$D_e = \frac{D \text{ 又は } H}{ESR} \quad \text{----- (2)}$$

ここに、D：空洞直径(m)、H：空洞高さ(m)、ESR：空洞支保比である。空洞支保比ESRは空洞の重要度に反比例した数値をとり、仮設空洞の場合には3～5、一般の空洞やトンネルでは1.0～1.6、特に重要な空洞では0.8となる。

バートン¹⁾は、数多くの空洞とその支保の事例から、Q値と等価寸法 D_e に対する最適な支保を図-1のように選定している。同図で1から38までの数字は、支保カテゴリーの番号を示しているが、詳細については、文献¹⁾を参照されたい。

3. 岩盤—支保の相互作用解析

3.1 フックとブラウンの方法

フックとブラウン²⁾は、岩盤と支保の相互作用に関する一つの解析方法を提案している。基本的な仮定条件は、次のとおりである。

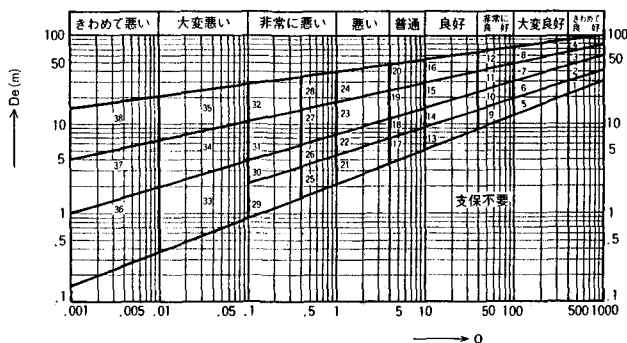


図-1 Q値による支保選定¹⁾

- ・岩盤：等方等質の弾塑性体 (E , ν) で、水平および鉛直方向の初期応力 p_0 は相等しいとする。
- ・トンネル：半径 r_i の円形で、2次元平面ひずみ問題とする。
- ・塑性条件：次式が成立するものとする。

$$\text{塑性前； } \sigma_1 = \sigma_3 + (m \sigma_c \sigma_3 + s \sigma_c^2)^{1/2} \quad (3)$$

$$\text{塑性後； } \sigma_1 = \sigma_3 + (m_r \sigma_c \sigma_3 + s_r \sigma_c^2)^{1/2} \quad (4)$$

ここに、 σ_1 , σ_3 ：最大および最小主応力， σ_c ：インタクト・ロックの一軸圧縮強さ， m , s/m_r , s_r ：塑性前および塑性後の岩石の材料定数（図-2参照）である。

- ・支保：トンネル内壁に等分布放射荷重 p_i を与えると考える。
- ・体積ひずみ：塑性点で岩盤は体積膨張し、ひずみは関連流れ則で計算されるものとする。

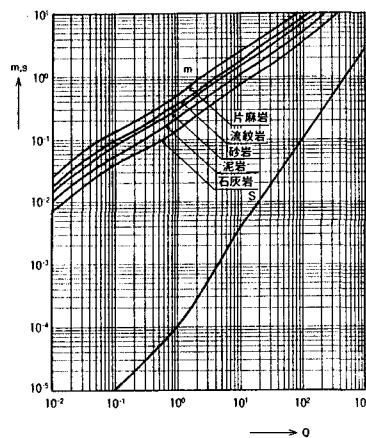


図-2 岩石の材料定数 m , $s^{2)}$

(1) 応力の釣合い

$p_{icr} \leq p_i$ の時、岩盤に塑性域は発生せず、 $p_i < p_{icr}$ の時、岩盤に塑性域が発生する。ここに、 p_{icr} ：極限応力 ($= p_0 - M \sigma_c$)， $M = 1/2 \{ (m/4)^2 + m p_0 / \sigma_c + s \}^{1/2} - m/8$ 。

(2) 応力～変位関係

$$\text{弾性域； } u_e = (1 + \nu) M \sigma_c r_e / E \quad (5)$$

$$\text{塑性域； } u_i = r_i [1 - \{(1 - e_{av}) / (1 + A)\}^{1/2}] \quad (6)$$

ここに、 $e_{av} = 2(u_e / r_e)(r_e / r_i)^2 / \{(r_e / r_i)^2 - 1\} / (1 + 1/R)$ ， $A = \{2(1 + \nu) M \sigma_c / E - e_{av}\} \cdot \exp [2N - 4(m_r \sigma_c p_i + s_r \sigma_c^2)^{1/2} / (m_r \sigma_c)]$ などである。

3.2 Q値による支保曲線

表-1のような岩盤およびトンネルを想定して、Q値による支保曲線を求める。Q値に対する支保カテゴリーを図-1から求めると表-2のようである。なお表-2には日本の岩盤分類との概略の対応³⁾も示してある。インプット・パラメータおよび限界応力、初期変位、収束変位の計算結果を表-3に示す、また支保曲線の計算結果を図-3～図-7に示す。

収束変位は岩盤分類の順序にはほぼ対応しており、バートンの提示した支保選定の妥当性が裏づけられた。また、それぞれの岩盤分類と支保に応じた収束変位の概略値を求めることができた。

表-1 Q値による支保曲線の計算例諸元

岩	土被り	50 m
	初期応力	100 tf/m ²
盤	インタクト・ロックの一軸圧縮強さ	500 kgf/cm ²
	直径	10 m
トンネル	空洞支保比	3 (仮設)
	等価寸法	10/3 = 3.3 m

4. トンネル事例

表-4に示す日本のトンネル事例（4トンネル、28測定断面）について同様の計算を行なった。

計算で求められた支保曲線の一例を示すと、図-8のようである。これは、支保としてショットクリート（厚さ5 cm）とロックボルト（長さ2 m、6本）を用いた1トンネルの

表-2 Q値から定まる支保カテゴリー

Q 値	日本の岩盤分類	Q値から定まる支保カテゴリー	
		NO.	ショットクリート
0.001 < Q ≤ 0.01	D	37	厚さ 20 ~ 60 cm
0.01 < Q ≤ 0.1	C _L	34	" 15 ~ 25 cm
0.1 < Q ≤ 0.4	C _H	30	" 5 ~ 7.5 cm
0.4 < Q ≤ 1	C _H	25	" 5 cm
1 < Q ≤ 4	B	21	" 2.5 ~ 5 cm
4 < Q	A		無 支 保

表-3 岩盤分類に対応するインプット・データと計算結果

岩 盤 分 類		D	C _L	C _H	C _H	B	A
インタクト・ロックの 一軸圧縮強さ	σ_c	500	500	500	500	500	500
	kgf/cm ²						
岩盤の変形係数 E	$\times 10^4$	0.1	0.4	1.5	5.0	10.0	50.0
	kgf/cm ²						
塑性前の 材料定数	m	0.01	0.03	0.1	0.2	0.4	1.0
	s	0	0.00001	0.00004	0.00008	0.0006	0.005
塑性後の 材料定数	m _r	0.001	0.01	0.03	0.04	0.1	0.2
	s _r	0	0	0.00001	0.00001	0.00003	0.0001
初期応力 p ₀		tf/m ²	100	100	100	100	100
限界応力 p _{icr}		tf/m ²	70.3	54.2	33.4	22.2	9.0
初期変位 u _{io}		mm	8	7	4.2	1.3	0.3
収束変位 u _{ic}		mm	24	21	12.6	3.9	1.0

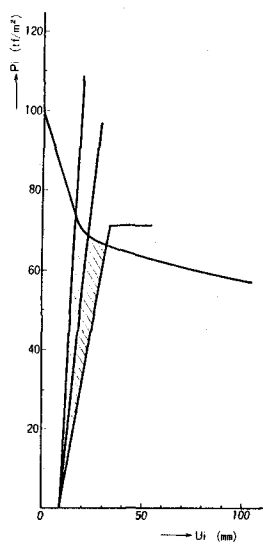


図-3 支保曲線 (岩盤分類D)

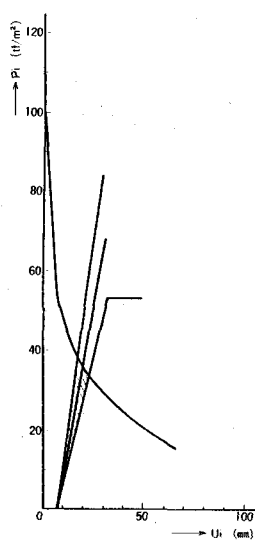


図-4 支保曲線 (岩盤分類C_L)

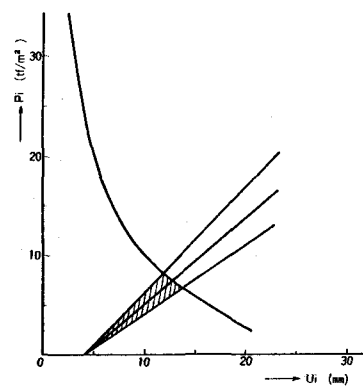


図-5 支保曲線 (岩盤分類C_H)

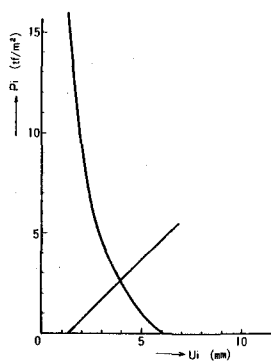


図-6 支保曲線 (岩盤分類C_H)

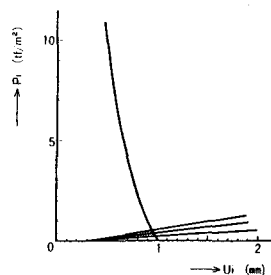


図-7 支保曲線 (岩盤分類B)

表-4 トンネル事例の計算諸元

トンネル名		Sトンネル	Oトンネル	Iトンネル	Nトンネル
岩 質		砂岩・頁岩 (古生代)	石灰岩・流紋岩 (古生代)	泥 岩 (新第三紀)	泥 岩 (新第三紀)
土被り (m)		48 ~ 83	37 ~ 130	51 ~ 67	19 ~ 48
トンネル直径 (m)		5.0	11.0	3.0	10.5
Q 値		0.6 ~ 1.0	1.1 ~ 1.3	0.3 ~ 0.4	0.1 ~ 0.2
インダクト・ロックの軸 圧縮強さ σ_c (kgf/cm ²)		800	890	48 ~ 121	25 ~ 100
支	ロックボルトのピッチ (m)	1.5 ~ 3.1	1.0 ~ 1.5	1.5, 1.6	0.9 ~ 1.2
	ショットクリートの 厚さ (cm)	5, 10	10, 15	5	15 ~ 30
保	H 鋼	—	H125, H150	L50	H150, H200
計測点の数		10	8	3	7

土被り67mの断面における支保曲線である。初期変位 $u_{i0}=3.0$ mmで支保を建て込むと、側壁変位 $u_{ic}=9.0$ mmで収束することがわかる。

表-4のすべての事例において、計算で得られた収束変位 u_{ic} を横軸にとり、実測で得られた値を縦軸にとってプロットしたものが図-9である。両者は概ね良い一致を示している。また、概略の収束変位が計算で求められる可能性を示唆している。

5. おわりに

Q値および電研式岩盤分類を基本として、各岩盤の支保曲線をフックとブラウンの方法で求めた。その結果、Q値に基づく支保選定の妥当性を確認し、トンネルの概略の変位量を推定することができた。

次に日本の4つのトンネル事例をとりあげ、同様の岩盤分類を行なって支保曲線を計算で求めた。収束変位量について計算値と計測値を比較したところ、概ね良好な一致が認められた。

今後はフックとブラウンの方法について、さらにパラメトリック・スタディを行なって解析精度を高めること、ならびにトンネル等の事例をさらに収集し、岩盤分類との対応をより明確にしていくことが必要であろう。

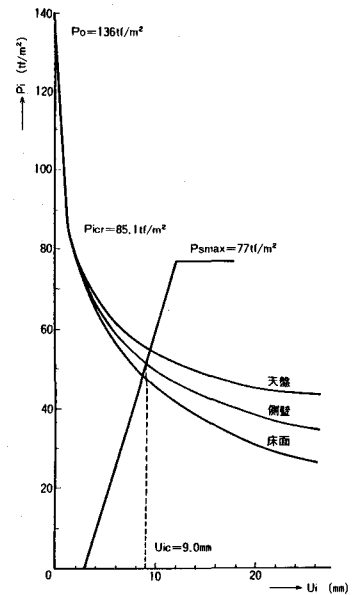


図-8 支保曲線の一例

6. 参考文献

- 1) N.Barton, R.Lien and J. Lunde : Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support, Norwegian Geotechnical Institute, Publication No.106, 1974.
- 2) E.フック, E.T.ブラウン共著 (小野寺透 吉中龍之進 斉藤正忠 北川隆共訳) : 岩盤地下空洞の設計と施工, 土木工学社, 昭和60年.
- 3) 谷本親伯, 山本純也, 森茂昭 : BartonのQ値と日本での岩盤分類および弾性波速度との関係, 土木学会第37回年次学術講演会講演概要集, 昭和57年.

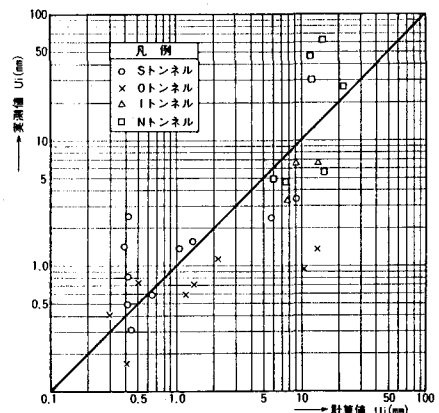


図-9 収束変位量の比較

(59) Rock Mass Classification and Rock-Support Interaction Analysis

Nishimatsu Construction Co., LTD. Takashi Kitagawa

Abstract

It is one of the most important items to determine the deformations between rock masses and support systems in tunnellings and underground excavations.

The aim of this paper is to analyse the interaction between rock masses and supports and to calculate the deformation of the caverns, based on a rock mass classification system. In this paper, the Q-system and the Japanese common system are adopted as rock mass classification. And as the analytical method of interaction, the Hoek and Brown's method is adopted. Some analytical examples of four tunnels in Japan are also represented.

The obtained results are as follows;

- 1) The interaction curve and the convergence deformation derived from Q-system are sufficiently reasonable.
- 2) Analytical method of Hoek and Brown can derive a very good coincidence with the actual measurement of the tunnel wall deformation.