爆破, 風化, その他によるトンネル周縁の 地山のゆるみ層厚

池田 和彦※

The Relation of Rock around the Tunnel due to Explosion, Weathering, etc.

by Kazuhiko Ikeda

Abstract

In conditions as fault zone, soft mudstone, etc., the ground around an opening made in it generates the plastic flow and it results in load on the supports. In such good conditions as granite, sandstone, etc., the ground around an opening relaxes due to explosion, weathering, etc., and the supports bear the load due to relaxations.

This paper deals experimentally, in conformity to results of investigations in tunnels conducted by the author, with the rock pressure generated by the relaxation due to explosion, weathering, etc., and with the supports suitable to the openings in good ground.

1. まえがき

断層破碎帯や軟弱な泥岩などにトンネルを掘削する場合, 普通の弾性岩盤とはまったく異った盤圧現象をていする。すなわち, 周囲の地山は漸次トンネル中心に向かって押し出され, 支保工に時間と共に増加する荷重を生じる。また, 花崗岩や硬砂岩などの硬岩のトンネルでも, 爆破, 風化, 断面形状の不規則性などの理由によって, 地山が軟質になったり, き裂を生じたりしてゆるみ, 支保工に応力が働く。後者のゆるみ層厚について, 筆者がこれ迄調査した国鉄トンネル約25ヶ所(地

質別 50 地点) について実際例と照合してゆるみ層厚の実験式を得たので、これを報告する。最後に、坑内弾性波探査によるゆるみ層厚測定結果と実験式とを比較検討した次第である。

2. トンネル周縁のゆるみ層厚の実験式

硬岩のトンネルでも、爆破、風化、その他の原因によってトンネル周縁の地山は軟質になったり、き裂を生じたりして、肌落ちを生じる状態になるため、これを防止する意味において支保工の必要が生じる。このゆるみ層厚 R については、今迄調査したトンネルの地質状態、トンネル形状、実際の支保工状態から下のような実験式を得た。(池田和彦、その他：トンネル周縁の地山のゆるみおよび支保工との関係、鉄道技術研究所報告、昭和 41 年 3 月)

$$R = a \cdot c \cdot \left(1 - \frac{1}{2.72 \frac{V_m}{V_f}}\right) \cdot \lambda \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{但し } \lambda = \frac{b \cdot \left(\frac{-\rho h}{m-1} - \sigma_t\right) (1-k)}{-q_a - \sigma_t}$$

ρ = 地山単位容積重量

$c = 1.1 \sim 0.11 S$

m = 地山 ポアソン数

S = トンネル掘削断面積 (m^2)

σ_t = 地山引張り強度

b = 安全率 = 1.1 ~ 1.2

$k = \sin \theta$ = 地山摩擦係数

V_f = 地山弾性波速度

θ = 地山摩擦角

V_m = 地山最高弾性波速度 (6.0 Km/sec)

h = トンネル被り

q_a = 支保工よりの反力 ($0 \sim 0.5 Kg/cm^2$)

a = トンネル半径

σ_t, k_s は実際使用する際は次のように計算すれば良い。

$$\sigma_t = \sigma_{ts} \times \left(\frac{V_f}{V_s}\right)^2 \quad k = k_s \times \left(\frac{V_f}{V_s}\right)^2$$

但し σ_{ts} = 試料の引張り強度

k_s = 試料の摩擦係数

V_s = 試料の弾性波速度

従って支保工に作用する応力 p は

$$p = R \cdot \rho \quad \dots\dots\dots (2)$$

(1)式で爆破、風化、その他によるゆるみ層厚の計算の場合は、 $\lambda \leq 1$ で、 $\lambda > 1$ の場合は塑性地圧が作用する場合である。

3. ゆるみ層厚の実測例 ($\lambda \leq 1$)

トンネル掘削に伴う爆破、風化、その他による坑壁のゆるみ層の厚さを計測するため、青函トン

ネル調査坑（吉岡方）内で、坑口より60~80m, 90~110m間の路盤および側壁に延長20mの四つの測線を選び、屈折波式弾性波探査をおこなった。計算にあたっては、はぎ取り法によって表面層および基盤の速度を算定して、ミラージュ現象の仮定のもとに図式解法によりゆるみ層の厚さを計算した。

調査区間の地質は第三紀凝灰岩、泥岩の互層で、その物理的性質は下表の如くである。

地 質	地 山			試 料		
凝灰岩	弾性波速度	ポアソン数	単位容量重量	弾性波速度	引張り強度	内部摩擦角
泥 岩	V_p (Km/s)	m	ρ (gr/cm ³)	V_s (Km/s)	σ_{ts} (Kg/cm ²)	θ_s (度)
	2.4~2.6	3.3~3.7	2.2~2.4	2.2~3.9	25~40	40~50

なお調査区間のトンネル状態を下表に示す。

断 面 積 S (m ²)	坑底巾 (m)	被 り h (m)	支 保 工		半 径 a (m)
			種 類	間隔(m)	
23~25	5	30~40	H-125	1.5	3

4 測線のうちの1測線について走時曲線、地質断面図を示せば、図-1 になる。

図-1 走時曲線および地質断面図

すなわち、これらの4測線を解析した結果、ゆるみ範囲は0.7~1.5mの範囲にある。

つぎに、(1)式の $R = a \cdot c \cdot \left(1 - \frac{1}{2.72} \frac{V_m}{V_f}\right) \cdot \lambda$ に上表値を代入してゆるみ範囲Rを求めると、Rは0.75~1.45mとなり、実測値と計算値とは大体一致する。

4. 調査トンネルの実例 ($\lambda \leq 1$)

現在迄調査した約50ヶ所について、爆破、風化などによるトンネル周縁の地山のゆるみ層厚Rおよび支保工に働く荷重pを(1)、(2)式から計算し、この荷重から支保工種別、間隔を算定し(八幡製作所H形鋼設計施工資料集による)、この値を調査トンネルの実際の施工状態と比較検討した。その前に先ず調査トンネルの地質状態、トンネル被り、トンネル形状を示せば、表-1のごとくである。

表-1の値を(1)、(2)式に代入して支保工にかかる荷重pを計算し、これから支保工種別、間隔を算定し、この値を実際の施工状態と比較検討したのが表-2である。 $p < 0.3 \sim 0.4 \text{ Kg/cm}^2$ で坑底巾が5m以下の場合、支保工は原則として必要ないものと仮定している。また、aの値は断面積によって変り、大体下表のようになる。

断面積 S(m ²)	10~12	13~15	25	30	44~48	50~53	55~58	60以上
半径 a(m)	2.2~2.5	2.6~2.7	3.2	3.4	5.3~5.5	5.6~5.7	5.8~6.0	6.3

5. む す び

表-2は計算値と実際の施工例とがかなり良く一致することを示しており、また青函トンネル調査坑における実測例からわかるように、(1)、(2)式は爆破、風化などによるトンネル周縁の地山のゆるみ層厚、支保工にかかる荷重をあらわすものと考えて良いと思われる。

即ち

$$\text{ゆるみ層厚 } R = a \cdot c \cdot \left(1 - \frac{1}{2.72} \frac{V_m}{V_f}\right) \cdot \lambda \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{荷 重 } p = R \cdot \rho \quad \dots\dots\dots (2)$$

但し ($\lambda \leq 1$)

以 上

表-1 調査トンネルの形状、地質状況

線 名	トンネル名	地 質	地山弾性 波 速 度 V_f (Km/s)	試料弾性 波 速 度 V_g (Km/s)	ボア ソン 数 m	単位容積 重 量 ρ (g/cm ³)	摩擦角 (試料) φ_s (度)	引張り強 度(試料) σ_{st} (kg/cm ²)	被り h (m)	トンネル形状		
										導 坑 S (m ²)	半断面 S (m ²)	全断面 S (m ²)
幹 綽	蒲 原 (東)	礫岩(第三紀)	3.4	4.0	3.2	2.58	45	35	70	14.8	56.5	
		安 山 岩	4.2	5.2	4.0	2.60	54	60	80	"	"	
		(西) 礫岩(第三紀)	3.2	3.8	3.0	2.56	35	10	50	"	"	
	由 比	泥岩(第三紀)	2.5	2.7	2.5	2.30	30	20	40	10.2	"	
		角礫凝灰岩	3.5	4.6	3.7	2.60	52	70	100	"	"	
	坂ノ坂	石英・雲母片岩	4.7	5.8	5.6	2.72	58	100	60	13.0	44.0	
		ベグマタイト	4.8	6.0	6.4	2.76	80	180	80	"	"	
	羽 角	雲 母 片 岩	5.5	6.5	6.5	2.80	62	150	80		47.6	
		雲母片岩(風化)	4.2	5.0	4.2	2.60	50	50	40		51.0	
	関ヶ原	砂岩・粘板岩	4.8	6.2	5.6	2.68	68	120	50		"	
		砂岩(破砕質)	4.2	5.4	4.0	2.60	50	50	50		"	
		砂岩・粘板岩	4.2	5.6	4.2	2.60	60	60	80	12.0	"	
		石 灰 岩	4.2	5.8	4.2	2.58	60	70	80	"	"	
	横 山	雲 母 片 岩	5.0	6.2	5.8	2.75	60	110	100		"	
		"	4.2	6.0	4.0	2.62	52	40	90		"	
	音羽山	チャート・粘板岩	4.2	5.6	4.0	2.65	50	60	300		60.0	
	東 山	輝緑凝灰岩	4.5	5.8	4.5	2.64	60	70	80		57.5	
中 央	新小仏	石 墨 片 岩	5.2	6.0	5.2	2.70	60	70	180			30.0
		"	4.2	5.0	3.8	2.46	45	25	150			"
	新笹子	花崗閃緑岩	4.5	5.8	4.8	2.70	60	70	60			"
		粘 板 岩	5.0	6.0	5.5	2.68	65	100	500			"
		粘板岩(破砕質)	4.2	5.6	3.8	2.62	45	30	150			"
信 越	新 倉	角礫凝灰岩	3.2	4.5	3.5	2.46	45	45	80			"
	新碓氷	安 山 岩	4.6	5.2	4.6	2.65	68	100	150			"
		角礫凝灰岩	3.8	4.6	4.0	2.60	60	80	120			"
	塚 山	シルト岩	1.7	1.8	2.8	1.60	35	4	60	12.6	30.0	
上 越	新清水	閃緑花崗岩	5.3	6.2	6.5	2.78	78	180	150			30.0
		珪化凝灰岩	3.5	5.2	4.0	2.56	55	80	150			"
		閃緑花崗岩	5.0	6.0	6.0	2.75	70	160	300			"
		" (き裂多し)	4.2	6.0	5.8	2.75	70	160	300			"
北 陸	北陸(1)	粘板岩・砂岩	4.2	5.2	4.6	2.66	60	80	150		48.0	
		" (2) 花崗岩(き裂多し)	4.2	5.6	5.0	2.70	70	90	400		"	
		" (4) 輝緑凝灰岩	4.3	4.7	4.2	2.62	60	80	150		"	
	親不知	熔結凝灰岩(湧水)	4.2	5.6	4.8	2.67	55	60	250	12.0		
		熔結凝灰岩	4.2	5.6	4.8	2.67	65	80	250		30.0	
		角礫凝灰岩	3.2	3.8	3.2	2.30	45	50	150	12.0	"	
神 岡	中 山	閃緑片麻岩	5.2	6.2	6.2	2.76	78	120	150			30.0
		"	4.6	6.0	5.2	2.74	65	80	150			"
富 内	二 岩	粘 板 岩	4.2	5.5	4.5	2.72	60	100	120			30
		" (破砕質)	3.8	4.8	3.8	2.65	48	60	100			"
		砂 岩	4.2	5.5	4.2	2.68	65	100	120			"
奥 羽	大釈迦	凝 灰 岩	2.2	2.5	3.3	2.20	32	8	50			"
青 函	斜 坑	凝灰岩・泥岩	2.5	2.6	3.5	2.20	40	20	40			24.0
鹿兒島	城 山	ひ ん 岩	5.0	6.2	5.8	2.70	70	130	80	15.0		
		ひん岩(風化)	3.5	4.0	3.3	2.40	45	30	80	"		

表一 調査トンネルのゆるみ層の厚さ、および荷重と支保工との関係 ($\lambda \leq 1$ の場合)

線名	トンネル名	地質	地山弾性 波速度 V_p (km/s)	ゆるみ層 の厚さ R (m)	荷重 p (kg/cm ²)	トンネル 工法	計 算 値		現 場 施 工	
							支保工種別	支保工間隔 (m)	支保工種別	支保工間隔 (m)
幹線	蒲原 (東)	礫岩(第三紀)	3.4	1.62	0.42	底設導坑	37kg レール	1.4~1.5	I 鋼	1.2~1.5
		" "	"	1.69	0.43	上部半断面	H-150	1.0	H-150	1.0~1.1
		安山岩	4.2	1.20	0.31	底設導坑	支保	不必要	I 鋼	1.5
		"	"	1.25	0.32	上部半断面	H-150	1.2~1.3	H-150	1.2
	蒲原 (西)	礫岩(第三紀)	3.2	2.64	0.67	底設導坑	37kg レール	1.1~1.2	I 鋼	1.2
		" "	"	3.00	0.77	上部半断面	H-200	1.0~1.1	H-200	1.1
		泥岩(第三紀)	2.5	2.05	0.47	底設導坑	37kg レール	1.4~1.5	37kg レール	1.4
		" "	"	2.18	0.50	上部半断面	H-150	0.9~1.0	H-150	0.9~1.0
	由比	角礫凝灰岩	3.5	1.56	0.40	底設導坑	37kg レール	1.4~1.5	37kg レール	1.4
		"	"	1.60	0.41	上部半断面	H-150	1.0	H-150	1.0
		石英・雲母片岩	4.7	1.00	0.27	底設導坑	支保	不必要	支保	なし
		" "	"	1.32	0.34	上部半断面	50kg レール	0.9~1.0	50kg レール	1.0
	坂ノ坂	ペグマタイト	4.8	0.77	0.21	底設導坑	支保	不必要	支保	なし
		"	"	1.05	0.28	上部半断面	50kg レール	1.2~1.3	50kg レール	1.2~1.3
		雲母片岩	5.5	1.00	0.28	先進上部半断	50kg レール	1.2~1.3	50kg レール	1.2~1.3
		"	4.2	1.44	0.37	"	50kg レール	0.8~0.9	50kg レール	0.7~0.9
	関ヶ原	砂岩・粘板岩	4.8	1.20	0.32	上部半断面	H-150	1.2~1.3	H-150	1.2~1.4
		砂岩(破碎質)	4.2	1.70	0.44	"	H-150	0.8~0.9	H-150	0.8~0.9
		砂岩・粘板岩	"	1.45	0.38	底設導坑	37kg レール	1.6	37kg レール	1.5~1.6
		" "	"	1.58	0.41	上部半断面	H-150	0.9~1.0	H-150	1.0
		石灰岩	"	1.48	0.38	底設導坑	37kg レール	1.6		
		"	"	1.59	0.41	上部半断面	H-150	0.9~1.0	H-150	1.0~1.2
	横山	雲母片岩	5.0	1.15	0.31	"	H-150	1.2~1.3	H-150	1.2~1.4
		"	4.2	2.38	0.62	"	H-200	1.3~1.4	H-200	1.2~1.4
	音羽山	チャート・粘板岩	4.2	3.10	0.82	"	H-200	0.9~1.1	H-200	0.8~1.2
	東山	輝緑凝灰岩	4.5	1.55	0.41	"	H-150	0.9~1.0	H-150	0.9~1.0
中央	新小仏	石墨片岩	5.2	0.90	0.24	単線全断面	支保不必要 or せみアーチ		せみ	アーチ
		"	4.2	2.00	0.50	"	37kg レール	1.3~1.5	37kg レール	1.5
	新笹子	花崗閃緑岩	4.5	1.10	0.30	"	支保不必要 or せみアーチ		H-125	1.5~1.6
		粘板岩	5.0	1.12	0.30	"	"	"	"	"
		粘板岩(破碎質)	4.2	2.60	0.68	"	H-125	1.3~1.4	H-125	1.4
	新倉	角礫凝灰岩	3.2	2.34	0.57	"	H-125	1.5~1.6	H-150	1.5~1.6
		"	"	"	"	"	"	"	"	"
信越	新碓氷 (2)	安山岩	4.6	0.62	0.16	"	支保	不必要	支保	なし
		角礫凝灰岩	3.8	0.98	0.25	"	"	"	"	"
	塚山	シルト岩	1.7	2.75	0.44	導坑	H-125	1.6	H-125	1.5
		"	"	3.33	0.53	復線半断面	H-200	1.4~1.5	H-150	1.2(沈下)
上越	新清水	閃緑花崗岩	5.3	0.93	0.26	単線全断面	支保	不必要	支保	なし
		硅化凝灰岩	3.5	2.20	0.56	"	H-125	1.4~1.5	H-125	1.2~1.4
		閃緑花崗岩	5.0	1.15	0.31	"	支保	不必要	支保	なし
		"(き裂多し)	4.2	1.57	0.43	"	H-125	1.6	H-125	1.5
北陸	北陸(1)	粘板岩・砂岩	4.2	1.49	0.39	復線半断面	H-150	1.0~1.1	50kg レール	0.6~0.8
	北陸(2)	花崗岩 (割れ目多し)	4.2	2.59	0.70	復線半断面	H-150	0.6~0.7	50kg レール	0.8(変状)
	北陸(4)	輝緑凝灰岩	4.3	0.94	0.25	"	50kg レール	1.4~1.5	50kg レール	1.5~1.6
	親不知	熔結凝灰岩(湧水)	4.2	1.76	0.47	底設導坑	37kg レール	1.4~1.5	37kg レール	1.5
		熔結凝灰岩	"	1.20	0.32	復線上半断面	H-150	1.3	H-150	1.5
		角礫凝灰岩	3.2	1.80	0.41	底設導坑	37kg レール	1.4	37kg レール	1.2
		"	"	1.70	0.39	復線半断面	H-150	1.0~1.1	H-150	1.1~1.2
		"	"	"	"	"	"	"	"	"
		"	"	"	"	"	"	"	"	"
神岡	中山	閃緑片麻岩	5.2	0.66	0.18	単線全断面	支保	必要なし	支保	なし
		"	4.6	1.32	0.36	"	ルーフボルト or せみアーチ		37kg レール	1.5
富内	三岩	粘板岩	4.2	1.46	0.40	"	37kg レール	1.5~1.6	37kg レール	1.5
		粘板岩(破碎質)	3.8	1.65	0.44	"	37kg レール	1.3~1.4	37kg レール	1.2
		砂岩	4.2	1.40	0.37	"	ルーフボルト or せみアーチ		37kg レール	1.5
		"	"	"	"	"	"	"	"	"
奥羽	大釈迦	凝灰岩	2.2	3.10	0.68	"	37kg レール	1.0	37kg レール	1.0
青函	斜坑	凝灰岩・シルト	2.5	1.46	0.33	"	ルーフボルト	せみアーチ	H-125	1.6
鹿兒島	城山	ひん岩	5.0	0.83	0.22	導坑	支保	不必要	支保	なし
		"(風化)	3.5	1.70	0.40	"	37kg レール	1.5~1.6		