

1. まえがき

トンネルの設計施工のため、あらかじめいろいろな地質調査が行われているが、これらの調査結果と設計施工とを結びつけ、しかも正確かつ簡便な定量的地山岩石強度分類がない。即ち従来使用されている分類はいずれも地質状態と設計施工との関聯がばく然として、定量的でなく、かつトンネル施工の進捗に対して時代遅れの観がある。筆者は国鉄で建設した主要トンネルについて、昭和33年から43年にかけて、次の如き調査、計測を行つた結果、地質条件と設計施工とを対応させた岩盤強度分類を完成することができたので、ここにまとめて報告する。

調査、計測項目： トンネル内精密地質踏査． トンネル内採集岩石試料及びボーリングコアの物理試験． トンネル内弾性波探査． トンネル内岩盤強度試験． 地表弾性波探査及びボーリング（大部分外注調査）． トンネルの形状、土被りの調査． トンネル施工状態及び実績調査．

2. 岩盤強度分類

調査結果から総合判断して、トンネルの設計・施工を判定する地質条件を定量、定性的にきめる岩盤強度分類を左右する諸要素は、1) 岩質 2) 破碎状態 3) 風化、き裂、固結程度 4) 岩盤の物理的特性 5) 膨張性 6) 湧水状態 7) トンネルの被りである。従つてこれらの諸要素を適当に組み合わせれば、設計・施工とを結びつけた岩盤強度分類を作成することができる。

1) 岩質

一般に岩石は地質学的には成因から分類しているが、岩盤強度からは岩石の種類、生成年代、固結程度、強度、弾性波速度などを総合的に考慮して分類すべきである。この主旨のもとに各岩石を表1に示すようにA B C D E Fの6種類の岩質に分類した。

2) 破碎状態

岩質の破碎状態は施工に大いに影響するものである。一般に同じ岩質では破碎度が大きくなる程、弾性波速度は遅くなるもので、破碎程度は弾性波速度の変化によつてあらわすことができる。

3) 風化、き裂、固結程度

風化、き裂、固結程度はトンネルの施工に大いに關聯するものであるが、その状態の変化は弾性波速度によつて示すことができる。

4) 岩盤の物理的特性

比重、ポアソン比、圧縮引張強度、内部摩擦角などで、一般に同じ岩質では弾性波速度と比例關係にある。

5) 膨張性

トンネルを掘削する際の地山の膨張には二種類ある。一つは岩質が特殊の鉱物組成をもつた岩石から構成されていて、吸湿膨張を起す場合である。他は岩質が強度の弱い、まつしいぶな岩石から構成

されている場合である。ただしこの場合はトンネルの破りが膨張性を左右する大きな要因となる。

6) 湧水状態

湧水はトンネル工事の難易を左右することが多く、特に多量の圧力水が湧出する場合は、施工は非常に困難になる。しかしながら現在の時点で湧出量、湧出位置、湧出範囲などを適確に推定することは困難であるので、施工中は湧水状況をよく観察、判断して岩盤強度分類に適宜修正を加えるようにしなければならない。

7) 土被り

トンネルの土被りは地圧に關聯するもので、強度の弱い岩石のトンネルでは被りの深い程土圧は大きくなる。しかし土被りの浅い場合は、風化岩や表層たい積物を掘削することが多い。

一般にトンネルの土被りは300～500米以内で、施工条件から考えると岩石の物理的強度はそう大きい必要はない。大体500～800kg/cm²の圧縮強度の岩質であれば良好な岩盤で、施工上は寧ろ風化、き裂、破碎などの状態が問題である。例えば3.5km/secの弾性波速度をもつた花こう岩と第3紀層の砂岩とを比較すると、花こう岩は風化激しいか、き裂多いか、或は破碎帯で施工条件としては悪い岩盤であるが、砂岩はかなり良好な岩盤である。

表-1 岩質分類

岩質	岩	石	名
A	(イ) 古生層 中生層	{ 粘板岩, 砂岩, 礫岩, チャート 石灰岩, 輝綠凝灰岩 など	(ロ) 深成岩 { 花こう岩, 花こう斑岩 せん緑岩, はんれい岩など
	(ハ) 半深成岩 { 斑岩, 花こう斑岩, ひん岩 輝綠岩, 蛇紋岩など	(ニ) 火山岩の一部 {	玄武岩, 中生代の 流紋岩など
	(ホ) 変成岩 (結晶片岩, 千枚岩, 片麻岩, ホルンフェルスなど)		
B	(イ) 剥理の著しい変成岩	(ロ) 細剥理の発達した古生層, 中生層	
C	(イ) 中生層の一部 (頁岩, 砂岩, 角礫凝灰岩など)	(ロ) 火山岩 (流紋岩, 安山岩など)	
	(ハ) 古第三紀層の一部 (珪化頁岩, 珪化砂岩, 火山岩質凝灰岩など)		
D	古第三紀層 新第三紀層	{ 泥岩, 頁岩, 砂岩, 礫岩, 凝灰岩, 角礫凝灰岩, 凝灰熔岩など	
E	新第三紀層 ～ 洪 積 層	{ 泥岩, シルト岩, 砂岩, 砂礫岩, 凝灰岩, 段丘, 崖すい, 火山噴出物など	
F	洪 積 層 ～ ちゅう積層	{ 粘土, シルト, 砂, 砂礫, 火山噴出物, ローム, 扇状たい積物, 崖すい, 段丘など	

従つて施工条件を左右する岩盤強度分類法として、筆者はまず (1) 岩質と (2), (3) の要素をよく表現するものと思われる弾性波速度とを組合せて岩盤を分類し、これに (4) (5) (6) の要素をとりいれて、表-2に示すような岩盤強度

表-2 岩盤強度分類

分類を作成した。

つぎにこの岩盤強度分類と設計、施工との関係について述べる。

分類	岩 質						良好の程度	備 考
	A	B	C	D	E	F		
1	> 5.0		>4.8	>4.2			良	1) 切羽に湧水がついて陥るようであれば分類を1段階落とす 2) 膨張性岩石 (蛇紋岩, 菱朽安山岩, 石墨片岩, 泥岩, 凝灰岩, 温泉余土) は速度値にとらわれず特として考える。 この場合は速度は4.0 Km/sec より小さく、ポアソン比は0.3より大きい。 3) 風化岩でポアソン比が0.3より小さい場合は分類を1～2段階あげる。
2	5.0～4.4		4.8～4.2	4.2～3.6			中	
3	4.6～4.0	4.8～4.2	4.4～3.8	3.8～3.2	>2.6		中	
4	4.2～3.6	4.4～3.8	4.0～3.4	3.4～2.8	2.6～2.0		中	
5	3.8～3.2	4.0～3.4	3.6～3.0	3.0～2.4	2.2～1.6	1.8～1.2	不	
6	<3.4	<3.6	<3.2	<2.6	<1.8	1.4～0.8	良	
7					<1.4	<1.0	良	

注 1. 1～7は岩盤強度分類の大きさの順次である。
2. 数値は弾性波速度 (Km/sec) を示す。
3. 岩質のA～Fは表-1を参照

3. 岩盤強度分類と設計・施工

3-1. 岩盤強度分類と掘削適正爆薬量

トンネル掘削1立方メートル当りの所要爆薬量に影響を与える因子としては、1)掘削断面積2)掘削岩石の強度3)使用火薬の種類4)穿孔径及び穿孔長(発破法)が考えられる。各トンネルでの調査結果、使用されている爆薬は大体桐、新桐、榎、檜、樺で、薬包径も20~25mmが多く、穿孔径も32~35mmと大体一定しており、一発破進行長もほぼ1.5m前後で大差はないので、上の因子のうち3)4)による差異は一応無視できるものと思われるので、1)2)の項と爆薬量との関係求めた。約70のトンネルについての実績調査から、爆破に対する耐爆強度H(岩盤強度)と適正火薬量Qとの間には次のような実験式が成り立つ。

(イ) 坑道の場合 $Q = K \cdot H^{0.6}$ (ロ) 切掛けの場合 $Q = (0.06 \sim 0.07) \cdot H^{0.46}$

ここに $H = \left\{ 1 + \frac{1}{\exp(\frac{V_c}{V} - 1)} \right\} \sigma_{ss} \cdot \left(\frac{V}{V_c} \right)^2$

K; 断面積によつて異なる係数

トンネル断面積 m ²	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
K	0.08	0.071	0.065	0.061	0.058	0.055	0.053

σ_{ss} ; 岩石試料の剪断強度 (kg/cm) ; 岩盤弾性波速度 (km/sec)

V; 岩石試料の弾性波速度 (km/sec)

V_c ; 各岩質に固有な弾性波速度 (km/sec)

岩質	A, B	C	D	E	F
V_c	6.0	5.5	5.0	4.0	3.0

3-2 岩盤強度分類と支保工

断層破砕帯や軟岩などの地山にトンネルを掘削すると、普通の弾性地盤と全く異つた盤圧現象を呈する。即ち周囲の地山は漸次トンネルの中心に向つて圧し込まれ支保工に時間と共に増加する荷重を及ぼす。また花こう岩や硬砂岩などの堅硬な岩石のトンネルでは塑性地圧は一般に作用しないが、爆破、断面形状の不規則性、岩石の風化などによつて、地山がゆるみ支保工に荷重がかかる。前者の地圧を P_1 、前者の地圧を P_2 とすると、

$$P_1 = \left(\lambda^{\frac{1-k}{2k}} - 1 \right) a \cdot f \quad P_2 = a \cdot c \left(1 - \frac{1}{\exp(\frac{V_c}{V} - 1)} \right) \lambda$$

ここに λ ; 塑性限界係数

$$\lambda = \frac{\left(\frac{-\frac{1}{m} - 1 - \sigma_E}{-q_a - \sigma_E} \right) (1-k) \cdot b}{-q_a - \sigma_E}$$

調査トンネルで P_1 もしくは P_2 を求め、同時にその地点での実際の支保工状態を調査して、両者の関係を求めた。その際トンネルを単線と復線とに分け、また崩壊もしくは変状の有無も調査した結果、岩盤強度分類と支保工との間には表-3に示すような状態にあることが解つた。

3-3 岩盤強度分類と巻厚

各トンネルについて岩盤強度分類と、施工巻厚との関係を求めた結果、表-3に示すような結果がえられた。

3-4 岩盤強度分類と掘削工法

トンネル施工にあつては、作業の安全性、掘削速度、経済性から考えて最も効率の良い掘削工法を採用しなければならない。掘削工法の実績調査結果から、岩盤強度分類と掘削工法との間には表-3に示すような関係があることが解つた。

3-5 岩盤強度分類とトンネルボーリングマシン

トンネルボーリングマシン (R T M) はイ) 掘進速度が大きいロ) 掘削による地山のゆるみが少いハ) 余掘りが少いニ) 他構造物に及ぼす影響が少いホ) 労働条件の向上 などの利点を持ち、将来その利用が多くなるものと思われる。

しかしながら現在の時点で R T M が如何なる地質にも適するかというと、そうではなく地質条件に限界があり、かつ R T M そのもののにも改良する点が多くある。R T M によるトンネル掘削が可能かどうか可能でも効率がよいかどうかを判断する地質の要素は、

- 1) トンネル地圧 (塑性地圧の有無、地圧の大きさ)
- 2) き裂状態 (き裂の多少は R T M 施工に大に関係するもので、岩石試料の強度が同じ場合、き裂の多少によつて R T M 施工の適応性が変ってくる)
- 3) 岩石強度 (岩盤の強度が大きいと R T M 掘削は困難である。一般に準岩盤圧縮強度が $50 \sim 800 \text{ kg/cm}^2$ であることが、R T M 施工の必要条件でこれより強度が大きいと効率が悪く、R T M 掘削は困難になる)
- 4) 湧水状態 (一般に湧水があれば R T M 施工は困難になる)

これらの地質的要素は岩盤強度分類であらわすことができるので、岩盤強度分類と R T M 施工の適応性との間には表-3 に示すような関係になる。

4 まとめ

設計・施工条件を考慮した定性・定量的岩盤強度分類法として、筆者はまず岩質と弾性波速度とを組み合わせ岩盤を分類し、つぎに湧水、膨張性、岩盤の物理的要素をとりいれて表-2 の如き分類を作成した。この岩盤分類と施工と関係は表-3 に示す如くである。表-3 は細部にわたつてなお検討の余地があるが、現時点における地質調査法および施工の精度から考えて、大体妥当な所であると思われる。

表-3 岩盤強度分類と設計・施工

岩盤 分類	掘削工法		設計		施工		巻 厚	その他
	単 輪	復 輪	単 輪	復 輪	単 輪	復 輪		
1	全断面工法	1) 全断面工法または木ノ子型半断面工法	$1.4 \sim 1.8 \text{ kg/cm}^2$ (全断面工法)	$1.2 \sim 1.6 \text{ kg/cm}^2$ (木ノ子型半断面工法)	必要なし 時に H-125 1.5m	1) 必要なし 2) M-7ボルト 3) H-150 1.3~1.5m	1) 30cm 2) 吹付	40~50cm 大部分先導掘坑不要
2	全断面工法	1) 全断面工法 2) 木ノ子型半断面工法 3) 上部半断面工法	$1.1 \sim 1.5 \text{ kg/cm}^2$ (全断面工法)	$0.9 \sim 1.3 \text{ kg/cm}^2$ 上部半断面工法	H-125 1.3~1.5m 時に必要ない	1) H-150 1.1~1.3m 2) M-7ボルト	1) 30cm 2) 吹付	40~50cm 時にボーリング・マシン適す
3	1) 全断面工法 2) 上部半断面工法 3) 導坑先導半断面工法	1) 木ノ子型半断面工法 2) 上部半断面工法 3) 導坑先導半断面工法	$0.7 \sim 1.3 \text{ kg/cm}^2$ (半断面工法)	$0.6 \sim 1.1 \text{ kg/cm}^2$ 導坑先導半断面工法	1) H-125 1.0~1.3m 2) H-150 1.3~1.5m	1) H-150 0.8~1.0m 2) H-175 1.2~1.5m	30~40cm	50~60cm 多くの場合ボーリングマシン適す
4	1) 上部半断面工法 2) 導坑先導半断面工法 3) 底設導坑先導リング掘り工法	1) 上部半断面工法 2) 導坑先導半断面工法 3) 底設導坑先導リング掘り工法	$0.4 \sim 0.8 \text{ kg/cm}^2$	$0.3 \sim 0.7 \text{ kg/cm}^2$	1) H-150 1.0~1.3m 2) H-175 1.3~1.5m	1) H-175 1.0~1.3m 2) H-200 1.2~1.5m	40~50cm	60~70cm 1) 時に水抜き孔、注入、導坑工法を必要とする 2) A B F 地質を除いてボーリングマシン適す
5	1) 底設導坑先導半断面工法 2) 底設導坑先導リング掘り工法 3) 鋼管導坑先導リング掘り工法		$0.2 \sim 0.6 \text{ kg/cm}^2$	$0.1 \sim 0.5 \text{ kg/cm}^2$	H-175 1.0~1.3m	H-200 0.8~1.2m	50~60cm 時にインパート必要	70~80cm 時にインパート必要 1) 時に水抜き孔、注入、導坑工法を必要とする 2) A B F 地質を除いてボーリングマシン適す
6	同上		$0 \sim 0.4 \text{ kg/cm}^2$	$0 \sim 0.3 \text{ kg/cm}^2$	H-175 0.7~1.2m	H-250 0.8~1.2m	60cm (インパート)	70~80cm (インパート) 1) 時に水抜き孔、注入、導坑工法を必要とする 2) E, F 地質ではボーリング工法が必要な場合がある
7								

Railway Technical Research Institute (J N R)

Kazuhiko Ikeda

The classification of rock conditions in connection with the route-location , the plan and the construction work of a tunnel should have previously been instituted in order to make good use of the results obtained by geological surveys. Author has surveyed and studied about 70 tunnels under construction with the methods as follows since 1960 .

a) precise geological surveys inner tunnels b) physical tests of rocks collected in tunnels and boring cores
c) seismic surveys inner tunnels d) in-situ shear tests and jacking tests e) surface seismic surveys and boreholes at site work f) tunnel size and depth of tunnel from the ground surface g) observations of tunneling methods , used quantity of powder , ground support , tunnel concrete lining , if failure and transformation would take place or not and etc. in the tunnels under construction

This report describes the rock conditions classified quantitatively based on these surveyed results and the relations between the classification of rock conditions and construction of tunnel.

Principal factors to be considered for the classification of rock conditions as of structural materials in which a tunnel might be constructed , are as follows.

- (1) quality of rock (The rock as of structural materials should be classified by 6 kind of A - F as shown in table 1.
- (2) fractured condition
- (3) state of weathering , fissures or fractures and consolidation
- (4) physical properties of the rock conditions
- (5) expansibility of the rock
- (6) inflows of water into tunnel
- (7) depth of tunnel formation from the ground surface

The factors of (2) and (3) are generally expressed by the difference of the velocity of the elastic waves in the rock . Wherefore , author has first classified the rock conditions taking into account of the quality of rock of (1) factor and the velocity of the elastic wave in the rock to be considered that may represent the factors (2) and (3) . This classification should then be completed by the secondary factors (4) - (6) as shown in table 2 .

The relation between the classification of rock conditions and construction conditions as shown in table 3 has been obtained by the survey of tunnels under construction .

The table 2 and 3 should generally be adequate considering from the exactitude of the geological surveys and construction method in present .