

## 切羽観察に基づく地山分類の支保設計に対する適用性の検討

河上 清和 武内 秀木  
後藤 克人 \* 藍澤 正直

### 要 旨

最近、トンネル施工の合理化等から、日本道路公団発注のトンネル建設に際しては、支保パターンとしてマルチパターンが適用されることが多くなってきている。そのために、これまで以上に切羽で行う地山評価点法による地山分類が重要となってきた。

そこで筆者らは、海外の評価点法を用いた地山分類法であるRSR、RMRおよびQシステムと日本道路公団による地山評価点法を用いて切羽の情報を数値化し、これに基づき客観的な支保規模を設計することを目的に、日和トンネルで切羽データを収集し、これらの地山分類の支保設計に対する適用性の検討を行った。

その結果、切羽観察に基づく地山分類を用いて支保設計を行うためには、地山分類要素に対して岩種ごと、あるいは地山条件ごとの重み付けを行う必要があるという結論を得た。

### 1. まえがき

吹付けコンクリートおよびロックボルトを主な支保部材とする山岳トンネル工法では、施工中の地山の挙動を計測などで把握して、その計測結果を速やかに設計や施工にフィードバックし、現場に即応した施工を進めることは無論重要であるが、さらに重要なことはそのフィードバックのルールを十分生かすことである。

しかし、現状の計測には限界があり、地山の不連続性、異方性、施工の巧拙・ばらつき、支保の設置時期、計測の開始時期などの影響が計測結果に反映されやすく、全体的な地山の性状や変化傾向を見失いがちになる。

したがって、トンネル施工の合理化を図るためには、調査・設計および施工の各段階において適切で客観的な地山分類を行い、これを利用して過不足のない適切な支保規模を設計できるような地山評価手法、計測結果のフィードバック手法を確立する必要がある。

特に施工中の切羽鏡面や素掘面で観察できる地質状態は、地表踏査や事前の弾性波速度調査による調査よりも数段詳細で正確なものである。したがって、これらを用いて切羽状況に応じた支保規模を設計(支保設計)することは合理的なトンネル施工を実施する上で非常に重要である。これまでは現場技術者の経験や勘をたよりに支保設計が実施されてきた。しかし、最近では、切羽観察結果を数値化し、内空変位や天端沈下等の計測データとともに支保の安定性検討に利用するとともに、地山分類結果と支保パターンの相関性を把握し、よりきめの細かい支保

パターンを設定するという2つの動作を繰り返しながら支保規模を設計するいわゆる「マルチパターン」が採用されつつある。

本報告は、種々の地山分類を用いたトンネル切羽の数値化と、各地山分類の相関性の把握およびそれぞれの地山分類の支保設計に対する適用性について報告するものである。

### 2. 地山分類

#### 2.1 地山分類の概要

地山分類とは、過去の経験をもとに、岩石の強度、割れ目の頻度、割れ目の状況、弾性波速度、地山強度比、湧水状況、水による劣化および風化の程度など、掘削岩盤に関する地山分類要素情報から地山を区分し、等級付けすることである。

表-1にトンネル工事における評価点法を利用した地山分類の1例を示す。

表-1 トンネル工事における代表的な地山分類

① R S R システム	Rock Structure Rating System
② R M R システム	Rock Mechanics Rating System
③ Q システム	Rock Mass Quality System
④ 日本道路公団による地山分類評価点評価法	

\* 五洋建設株式会社中国支店大町工事事務所

2. 2 各地山分類の特徴

2. 2. 1 RSRシステム<sup>1)</sup>

RSRシステムにおける地山分類要素は、地質要素と施工要素の2要素に分けられる。

地質要素は岩石の種類、割れ目の状態、割れ目の間隔、湧水状況および地質構造で、それぞれ採点・評価される。また、施工要素はトンネルの大きさ、掘進方向である。

これらの地質要素および施工要素をそれぞれ「岩石と地質構造の関係」、「割れ目と掘進方向の関係」、「湧水の影響」に合成・分解して地山状況を数値化する。

2. 2. 2 RMRシステム<sup>1)</sup>

RMRシステムにおける地山分類要素は岩石の一軸圧縮強度、RQD、割れ目の間隔、割れ目の状態および湧水の状態である。これらにより算出された評価点を不連続面(割れ目)の方向性で修正し、地山の分類を行う。

2. 2. 3 Qシステム<sup>1)</sup>

Qシステムの地山分類要素はRQD、節理群の数、節理の粗さ係数、節理の風化・変質係数、節理間の水による低減係数(水の状態)および応力低減係数(健全な岩では作用する応力の大きさ、健全でない岩やせん断された岩は脆弱化あるいは乱れの度合い)である。

これらの分類要素を基に、「岩塊の大きさ」、「岩塊間のせん断強度」および「岩塊に作用する応力」の各パラメータを算出し、それらに乗じてQ値を求める。なお、支保規模(たとえばボルト間隔、ボルト長、吹付けコンクリートの厚さ等)はQ値と掘削支保比から設計される。

2. 2. 4 日本道路公団地山分類評価点評価法<sup>2)</sup>

日本道路公団の評価点評価法における地山分類要素は、通常、山岳トンネルで用いられる切羽観察調査のうち、切羽の状態と素掘り面の状態を除いた、岩の圧縮強度、風化変質、割れ目の頻度、割れ目の状態、割れ目の形態、湧水および水による劣化である。

表-2に各地山分類の地山評価点算出方法を示す。

2. 3 現場への適用方法

本研究では切羽での地山評価点算出に際して、現場で何種類もの切羽調査を作成しなくても済むように、各地山分類の共通項目(たとえば割れ目の間隔等)を整理し、従来の切羽観察調査項目を細分化したり、あるいは、調査項目を追加した1枚の調査シートを作成し、必要な切羽データ収集ができるよう工夫した。

表-3に地山分類のための切羽観察調査シートを示す。

表-2 各地山分類における評価点算出方法

分類法	RSRシステム Rock Structure Rating System	RMRシステム Rock Mechanics Rating System	Qシステム Rock Mass Quality System	日本道路公団による 地山評価点評価法
発案者等	Wickmanら(1972, 7月鉱山局) 33のトンネル(200断面)の施工結果を基に作成。	Bieninawskiら(1973, 南77科学技術研究機関) 49のトンネル施工事例から作成	Bartonら(1974) カンザリア地方の支保の例(200のトンネル事例)から作成	切羽観察調査に基づく 地山評価点評価法
分類要素	I. 地質要素 ①岩石の種類と硬さ ②割れ目の種類と要素 ③割れ目間隔 ④断層 ⑤しゅう曲構造 ⑥湧水 II. 施工要素 ①掘削方向	①付外ロツクの一軸圧縮強度 ②RQD ③割れ目の間隔 ④割れ目の状態 ⑤地下水(湧水)の条件	①RQD ②節理群の数 ③節理の粗さ ④節理の風化・変質 ⑤節理間の水の状態	①圧縮強度 ②風化変質 ③割れ目の頻度 ④割れ目の状態 ⑤割れ目の形態 ⑥湧水 ⑦水による劣化
修正要素	トンネルの大きさ	トンネル掘進方向と 不連続面の方向性による修正	応力低減係数(SRF)による修正 健全な岩では作用応力、それ以外は脆弱化あるいは乱れの度合い	各項目に対し重み係数を設定する
算出式	RSR = (A+B) + C A: 岩石の種類と地質構造 B: 掘進方向に対する割れ目のパターン C: 地下水と割れ目の状態	RMR = (1+2+3+4+5) - b 1:①, 2:②, 3:③, 4:④, 5:⑤ b: トンネル掘進方向に対する不連続面の方向	$Q = \left( \frac{RQD}{J_n} \right) \left( \frac{J_r}{J_a} \right) \left( \frac{J_w}{SRF} \right)$ $\left( \frac{RQD}{J_n} \right)$ : 岩塊の大きさ $\left( \frac{J_r}{J_a} \right)$ : 岩塊間のせん断強度 $\left( \frac{J_w}{SRF} \right)$ : 作用応力	地山評価点 = $100 - \left\{ \frac{\sum(C \sim I)}{7} - 1 \right\} \times \frac{100}{3}$ 各項目の最大点 4
利用方法	トンネルの支保工選定	地山分類、平均自立時間、岩盤の粘着力、内部摩擦角の推定 Qシステムを併用した自立時間と無支保区間の関係 RMRと変形係数の関係	ESR (Excavation Support Ratio) を使用し、支保パターンを選定	

表一 3 本研究に用いた地山評価点算出用切羽観察調査シート

トンネル名						調査日					
調査位置	距離					土被り	支保パターン				
岩種	1. 変成岩 (千枚岩, 石英片岩, ホルンフェルス等), 深成岩 (斑れい岩, かんらん岩) 2. 古生層および中生層 (粘板岩, 砂岩および礫岩, 石灰岩, 輝緑凝灰岩等) 3. 火山岩 (安山岩, 玄武岩等), 原岩 (花崗岩, ひん岩等), 深成岩 (花崗岩, 閃緑岩) 4. 第三紀および第四紀堆積層 (泥岩, 頁岩, 砂岩および礫岩, 凝灰岩, 凝灰角礫岩等) 5. 上部洪積層 (ロームおよび粘土, 火山砕屑物), 沖積層 (堆積, 粘土)										
地質構造	塊状 (互層, 不整合, 岩脈貫入を含む) 2. 断層またはしゅう曲 (21. わずか 22. 中程度 23. 集中的)										
特殊条件	1. 膨張性土圧 2. 偏土圧 3. 流動性 4. 土被り小 5. 重要構造物近接 6. 谷の直下										
掘削地点の地山の状態と挙動											
A 切羽の状態	1. 安定		2. 鏡面から岩塊が脱落する		3. 鏡面の押し出しを生じる		4. 自立せず崩れ、流出する				
B 切羽先端付近のRQD (%)	1. 90<RQD<100 非常に良好		2. 75<RQD<90 良好		3. 50<RQD<75 普通		4. 25<RQD<50 悪い		5. 0<RQD<25 非常に悪い		
※切羽先端付近を観察し、RQDを推算する											
C 露出面の状態	1. 自立		2. 時間がたつと緩み、肌落ち		3. 掘削後早期に変換する		4. 掘削に先行し地山を受ける必要がある		5. 自立困難		6. 掘削後早期に変換する
D 岩石の硬さ kgf/cm <sup>2</sup>	1. qu>2500 N?跳返る金属音がする		2. 1000<qu<2500 N?跳返る金属音がする		3. 500<qu<1000 N?跳返る金属音がする		4. 250<qu<500 N?の強い打撃で壊れる		5. 200<qu<250 N?の軽い打撃で壊れる		6. 50<qu<200 N?の打撃で容易に壊れる
E 風化質	1. なし, 健全		2. 岩面に沿ってやや変色		3. 全体に灰色強度相当低下		4. 土砂, 粘土状当初より未固結				
F 割れ目の数	1. なし (塊状)		2. 1方向		3. 1方向 + ラングラム		4. 2方向		5. 2方向 + ラングラム		6. 3方向
※ラングラムな節理とは、あまり顕著でない節理のことをいう。											
G 割れ目の頻度	1. 200cm/d 塊状		2. 100<d<200 塊状		3. 60<d<100 塊状		4. 30<d<60 中程度の割れ目		5. 20<d<30 中程度の割れ目		6. 5<d<20 密な割れ目
H 割れ目の状態	1. 密着		2. 部分的開口		3. 開口		4. 粘土を挟む未固結				

I 割れ目の形態	1. 5?x4?方形		2. 柱状		3. 層状, 片状		4. 土砂, 粘土状未固結				
J 割れ目の粗さ	1. 不連続		2. 粗い, 波状		3. 滑らか, 波状		4. 鏡面状, 波状		5. 粗い, 平坦		6. 滑らか, 平坦
K 割れ目の変質およびトリップ	1. 強く結合		2. ひずんでいるが変質せず		3. 3?層, 砂層の被覆		4. 粘土質被覆		5. 砂, 砕岩		6. 硬い粘土 (厚さ<5mm)
L 湧水	1. なし		2. 湧水程度		3. 湧水程度		4. 集中湧水		5. 全面湧水		
M 水による劣化	1. なし		2. 緩みを生じる		3. 軟弱化		4. 崩壊・流出				
N 割れ目方向性 (縦断)	1. 0<θ<10		2. 10<θ<20		3. 20<θ<30		4. 30<θ<45		5. 45<θ<60		6. 60<θ<80
※切羽を見て最大傾斜角をとる											
O 割れ目方向性 (横断)	1. 水平 0<θ<10		2. 左から右へ 10<θ<20		3. 左から右へ 20<θ<30		4. 左から右へ 30<θ<45		5. 左から右へ 45<θ<60		6. 左から右へ 60<θ<80
※切羽を見て、切羽面の見かけの傾斜角をとる											
P 応力低減した推定地山	1. 土砂で充填された不連続面を持つゆるい岩		2. 土砂で充填された不連続面を持つ深い位置での岩		3. 土砂で充填された不連続面を持つ深い位置での岩		4. 粘土を含まない不連続面を持つゆるい岩		5. 粘土を含まない不連続面を持つ深い位置での岩		6. 粘土を含まない不連続面を持つ深い位置での岩
Q 火山岩	1. 低い応力 200<qu/rH		2. 中程度の応力 10<qu/rH<200		3. 高い応力 5<qu/rH<10		4. 山はね少ない 2.5<qu/rH<5		5. 山はね多い qu/rH<2.5		
※qu: 一軸圧縮強度, r: 単位体積重量, H: 土被り											
R 応力低減した膨張性地山	1. 中程度の押し出し性岩盤		2. 遊しい押し出し性岩盤		3. 膨潤性岩盤		4. 遊しい膨潤性岩盤				
支保工の状況等, 特記事項											

3. 対象トンネルでの支保設計の現状と切羽の数値化

3.1 対象トンネルの地質

研究対象トンネルとして、

- (1) 地山分類の分類傾向が比較的明瞭に表れる硬岩地山であること
- (2) トンネル延長が長く、多くの切羽データをサンプリングできること

から日和トンネルを選定した。

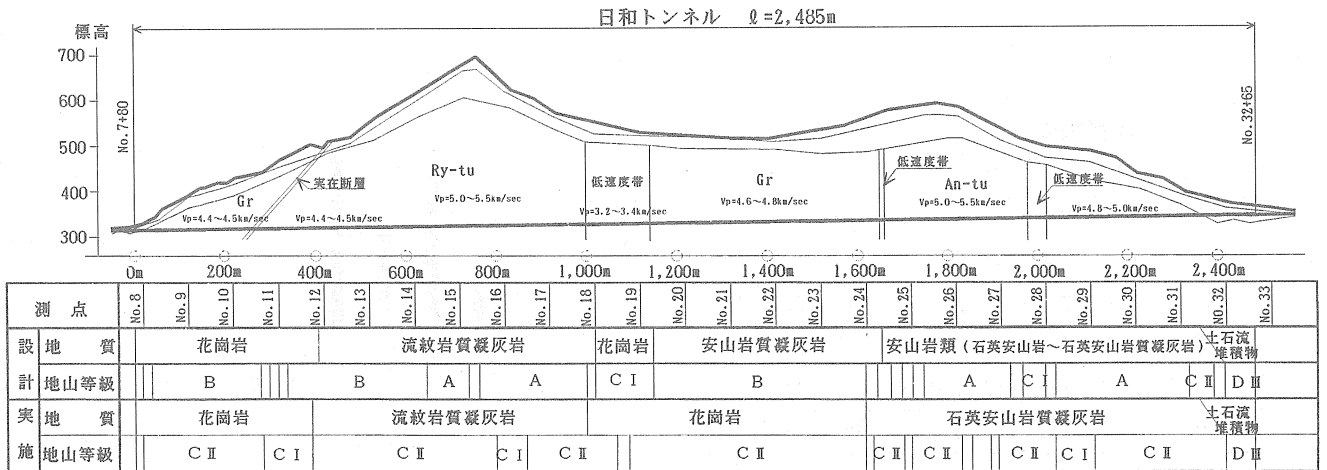
日和トンネルは硬岩地山を貫く延長2,485mの2車線道路トンネルで、地質は花崗岩、流紋岩質凝灰岩および石英安山岩質凝灰岩から構成されている。ハンマリングによれば岩石コアの一軸圧縮強度は500~1,000kgf/cm<sup>2</sup>程度と非常に大きい。

3.2 当初設計と実施設計の比較

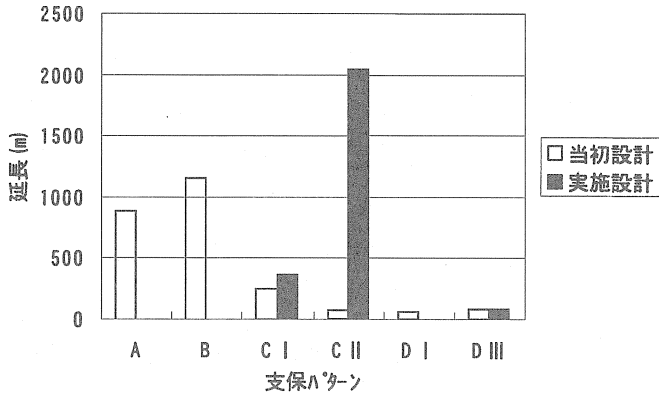
図一1に対象トンネルの当初設計および実施設計における地質と地山等級 (支保パターン) を示す。

当初設計では、トンネル延長のうち、約35%が地山等級A、約46%がB、約10%がC I、約9%がDパターンで、このようにトンネル延長のほとんどが地山等級A, Bで計画されていた。しかし実施設計では地山等級AおよびBの区間はほとんどが地山等級C IIに変更されている。最終的に、実施設計における地山等級C IIのトンネル延長に占める割合は約82%であった。

図一2に当初設計と実施設計における支保パターン延長の比較図を示す。



図一1 当初設計と実施設計の比較



図一 2 当初設計と実施設計の支保パターン延長の比較

次に、当初設計の支保パターンがどのように変更されたかの比較・追跡を、次式に定義される換算変更率<sup>3)</sup>を用いて検討する。

$$\text{換算変更率} = \frac{\text{各支保パターンごとに変更距離}}{\text{各支保パターンの当初設計時総延長距離}} \times 100$$

表一 4 に各支保パターンの換算変更率を示す。表中、TLDN は地山等級が下位ランク側に変更された部分、TLUPは地山等級が上位ランク側に変更された部分の換算変更率の総和を示す。

表一 4 より次のことがわかる。

- (1) 支保パターンの変更はほとんどが下位ランク側になされている。ただし、D I パターンのみすべて上位ランク側へ変更されている。
- (2) 支保パターンの変更は特にA, Bパターンに多い。AパターンおよびBパターンともに100%下位側に変更されている。また、A, BパターンからC IIパターンへの変更がそれぞれ77%、94%と高いのが特徴である。C Iパターンに関してもその70%がC IIパターンへ変更されている。

表一 4 換算変更率一覧表 (%)

		変更後支保パターン						トータル	
		A	B	CI	CII	DI	DIII	TLDN	TLUP
当初パターン	A	0.0	0.0	22.6	77.4	0.0	0.0	100	-
	B	0.0	0.0	5.8	94.2	0.0	0.0	100	0.0
	CI	0.0	0.0	29.8	70.2	0.0	0.0	70.2	0.0
	CII	0.0	0.0	0.0	100	0.0	0.0	0.0	0.0
	DI	0.0	0.0	31.3	68.8	0.0	0.0	0.0	100
	DIII	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100	-	0.0

### 3. 3 切羽の状況

表一 5 は、切羽観察調査結果で得られた主な切羽観察項目に関する評価内容の最頻値を支保パターンごとに示したものである。

表一 5 主な切羽観察項目の最頻値

観察項目	C Iパターン	C IIパターン
切羽の状態	安定	鏡面から岩塊が抜落ちる
剥離面の状態	時間がたつと緩み、肌落ちする	
岩石の硬さ	500 ≤ σc < 1,000 kgf/cm <sup>2</sup>	
風化・変質	岩目に沿ってやや変色。強度、やや低下	
割れ目の数	1方向+ランダムな節理	2方向+ランダムな節理
割れ目の頻度	5 ≤ d < 20cm	
割れ目の状態	部分的に開口	
割れ目の形態	ランダム方形	層状、片状、板状
湧水の程度	なし	滲水程度
割れ目の方向	流れ目 80 ≤ θ < 90°	

この調査結果より対象トンネルの切羽状況は、次のように評価することができる。

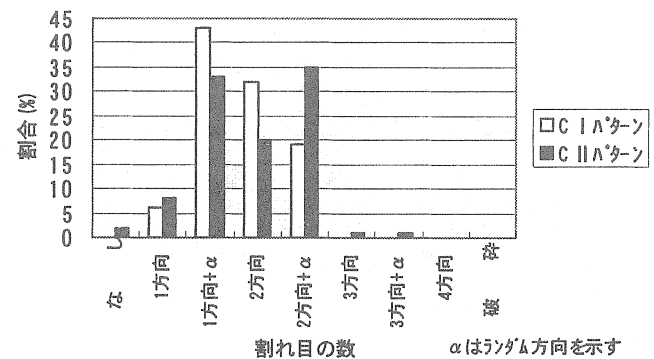
- (1) 鏡面は比較的安定している。
- (2) 岩石の強度は大きい。
- (3) 通常はほとんど切羽からの湧水はなく、湧水による地山の劣化も発生してない。ただし、掘削中、何度かの集中湧水は発生した。
- (4) 割れ目間隔は5~20cmと狭く、亀裂が発達している。
- (5) 割れ目の方向は掘進方向に対して流れ目である。すなわち、切羽では

- (1) 岩質は硬いが、亀裂が発達している。
- (2) 亀裂方向は急な流れ目を形成している。

という情報を基に支保設計を行い、下位ランク側へ支保パターンを変更したものと考えられる。

さらに、地山等級Cの中でも亀裂の数が多く、割れ目の形態が層状や板状を呈している場合にはC IIパターンを選択していることがわかる。

図一 3 に割れ目の数に関する切羽データの割合 (%) を示す。



図一 3 支保パターン別の割れ目の数

3. 4 地山分類による評価点

図-4 に対象トンネルの各地山分類評価点分布図を示す。この図からわかるように、RSR、RMRおよび日本道路公団評価点法では、同一支保パターンにおける評価点はばらつきが少ないが、Qシステムによる評価点は非常にばらつきが大きい。この原因として、対象トンネルのような節理の発達した地山では節理の程度がめまぐるしく変化しやすいことと節理の評価に関して個人差が大きいことが考えられる。したがってQシステムの導入にあたっては節理の状況を慎重に評価する必要があるといえる。

図-5 にC IIパターンの評価点の分布を、表-6 に各地山分類によって得られた各支保パターンごとの地山評

価点の平均値を示す。

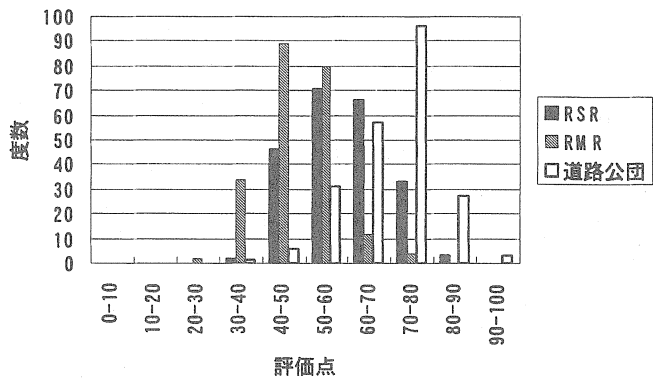


図-5 C IIパターンにおける評価点の分布

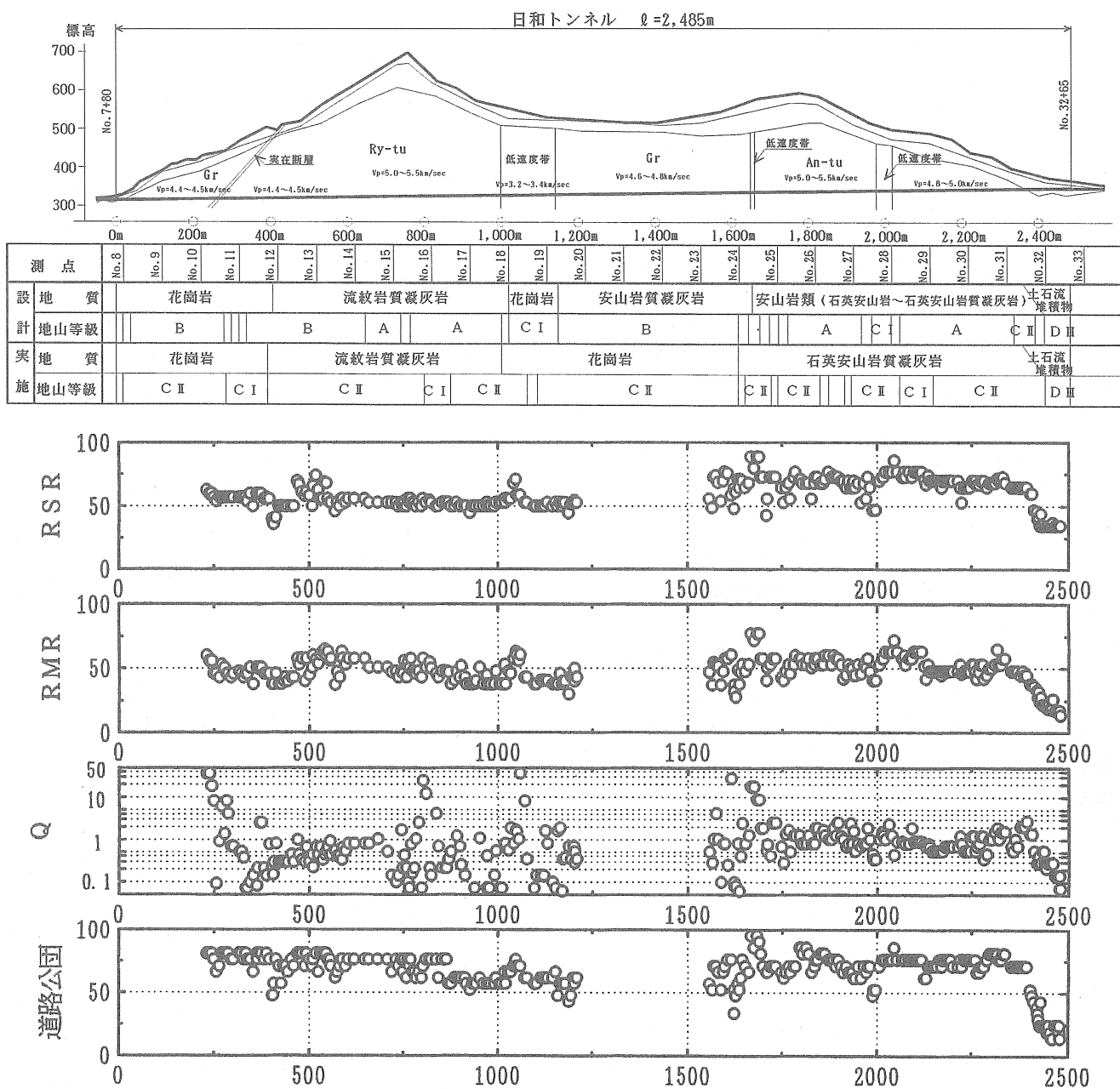


図-4 各地山分類による評価点分布図

表一 6 各支保パターンの評価点の平均値

	C I	C II	D III
R S R	62.9	60.5	47.6
R M R	51.8	49.3	31.7
道路公団	75.1	69.2	41.6

計算上、評価点は地山等級が上位であるほど大きくなる。対象トンネルにおいてもその傾向は確認された。すなわち、地山等級CとDを比較すると、各地山分類による評価点は地山等級Cのほうが大きくなっている。

しかし、地山等級が同じCでもC IパターンとC IIパターンの間には明瞭な評価点の差は見られない。これは対象トンネルの現場技術者がC IパターンとC IIパターンのいずれを採用するかという判断情報の1つとした地山分類要素「割れ目の数」および「割れ目の形態」が各地山分類法にうまく組み込まれていないためである。

表一 7 は各地山分類評価点と地山分類要素「割れ目の数」および「割れ目の形態」との相関係数を示したものである。Qシステムは「割れ目の数」を分類要素に組み込んでいるが、先に述べたようにQ値自体のばらつきが大きいため相関性は低い。一方、日本道路公団評価点法は「割れ目の形態」をその評価法に組み込んでいるので評価点との相関性は高いが、「割れ目の数」を組み込んでいないためにC IパターンとC IIパターンとの差異が明瞭でなくなっている。したがって、対象トンネルでの支保設計に地山分類を適用する場合には、この両者を組み込む必要があるといえる。

表一 7 各地山分類との相関係数

	割れ目の数	割れ目の形態
R S R	0.02	0.03
R M R	0.13	0.17
Qシステム	0.21	0.02
道路公団	0.09	0.62

### 3. 5 各地山分類の相関性

これまでにR S R、R M RおよびQシステム等の地山分類法間の相関性については種々の関係式が提案されているが、対象トンネルでは次に示す関係式が得られた。

なお、Qシステムに関しては値のばらつきが大きいため対象トンネルでは対象外とした。

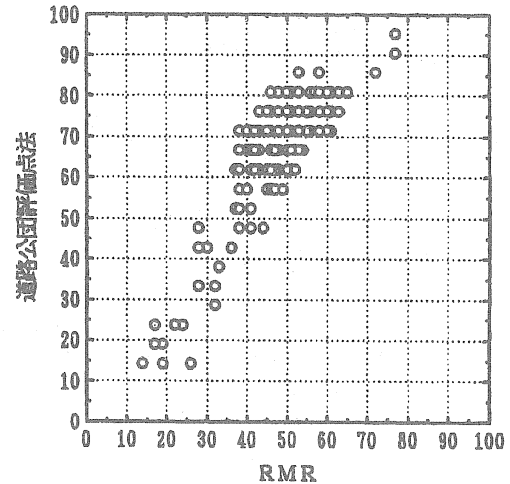
$$RMR = 0.85 \times RSR + 18.82$$

(相関係数0.80)

$$\text{日本道路公団評価点} = 1.61 \times RMR - 9.68$$

(相関係数0.86)

図一 6 に道路公団評価点法とR M Rの関係図を示す。



図一 6 日本道路公団による評価点法とR M Rの関係

### 4. まとめ

今回、実際の切羽に対して各地山分類を適用してその支保設計への適用性を検証した。その結果、地山等級区分ごとの大まかな地山分類は可能であったが、現場技術者の切羽での判断基準を再現するような地山分類はなかった。この理由として現場での支保設計に考慮される地山分類要素が岩種ごとに、一山一山ごとに違うためであることが考えられる。すなわち、通常用いられる切羽観察調査表は「観察記録が煩雑になる」あるいは「複雑で評価できない」等の理由から、最小限の地山分類要素から構成されている。

今後は種々の岩種、種々の地山条件下での支保設計が定量的に可能となるよう、それぞれの条件に応じて地山分類要素に重みを付ける「ルール」に関して研究していく予定である。

### 参考文献

- 1) 吉中龍之進ほか：岩盤分類とその適用、土木工学社
- 2) (社) 日本トンネル技術協会：トンネル計測工の活用に関する調査研究報告書（日本道路公団委託）、1992
- 3) 井上洋司ほか：トンネルにおける初期設計と実施設計の比較、岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、PP61-654、1990
- 4) 西野治彦ほか：トンネル切羽観察に基づく地山評価方法の検討、岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、PP266-269、1989