

観察記録の分析に基づく新しいトンネル切羽 評価システムの提案

中田雅博¹・三谷浩二²・八木 弘³・西 琢郎⁴・西村和夫⁵・中川浩二⁶

¹正会員 工修 日本道路公団 試験研究所 トンネル研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)

²正会員 日本道路公団 試験研究所 トンネル研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)

³正会員 工修 日本道路公団 技術部 道路技術課 (〒100-0013 東京都千代田区霞ヶ関3-3-2)

⁴正会員 理博 清水建設(株) 技術本部 和泉研究室 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町2-2-2)

⁵正会員 工博 東京都立大学 工学部 土木工学科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

⁶正会員 工博 山口大学 工学部 社会建設工学科 (〒755-0000 山口県宇部市常盤台2557)

切羽観察結果から標準支保を客観的に選定するための新しい切羽評価の考え方を提示した。①切羽に現れる地山状況は、総合的な岩盤強度とその岩盤が置かれている場の状態で評価する。②総合的な岩盤強度を評価する項目は「岩石強度」「風化変質」「割れ目頻度」「割れ目状態」の4項目であり、場の状態を評価する項目は「湧水」「水による劣化」と「地山強度比」の3項目である。③総合的な岩盤強度の評価点は岩種と項目にそれぞれ応じた加重平均より算出し、場の状態の評価点は湧水と劣化の組み合わせ、あるいは地山強度比のランクによって総合的な岩盤強度の点数から値を減じる調整点とする。この考え方が有効であるかを確認するため、旧切羽観察結果から5つ岩種グループを抽出し評価点を計算したところ、支保パターンの判別にある程度の有効性が推察された。

Key Words: tunnel face, geological observations, rock classification, support determinations, quantification method

1. はじめに

近年わが国における山岳トンネルの掘削技術の進歩は著しく、大断面トンネルや未固結地山掘削における各種補助工、さらには高速施工と省力化を目指したTBM、TWSの普及や試行などには目を見張らせるものがある。しかし同時に、公共事業の抑制などに関連して建設工事におけるさらなる経費縮減も重要な課題となっており、その為にはトンネル工事の多くを占める一般的なトンネル(施工実績の多数を占める支保パターンのトンネルの意味、日本道路公団の支保パターンでCI~DIクラス)を合理的、経済的に掘削する技術を開発することもまた必要である。このクラスのトンネル掘削は、通常事前あるいは施工時の地山判定に基づき支保選定がなされかつ施工される。従って、このクラスのトンネルにおいて安全を確保しつつ経済的な施工を行うためには、地山評価、地山分類と支保の選定についての考え方を合理的に関連させる必要がある。換言すれば、切羽観察に基づく地山分類を、支保選定のための地山判定に役立つものとして発展させることが有用であると考

えられる。

一方、地山分類はダムやトンネル等の建設対象毎に、あるいは各発注者により、また時には個々の構造物毎に独自のものが採用されることがあり、古くから実に多くのものが見られる¹⁾。トンネルに限定しても幾つかの方法が知られており、中でもBartonによるQ-system²⁾やBieniawskiによるRMR³⁾が有名である。しかしこれらの方法はわが国の地山に比べて比較的均質で良好なものを対象に考案され発達してきたものであり、わが国における地質条件が、激しい地殻変動により複雑なものとなっていることからすれば、これらを直接採用するには問題がないとは言えない。

わが国においては、NATMの導入に際して切羽観察の重要性が認識され、当時の国鉄を中心に検討がなされている⁴⁾⁵⁾。日本道路公団(以下JH)においても、NATM導入にあたり委員会検討等を経て旧切羽観察様式(表-1参照)を採用して最近に至っている。当初切羽観察は地山の定性的評価法として取り扱われ、変位量等の計測結果と補完しあって技術者の総合的判断を促す資料としての性格を有していた。その後、道路や鉄

道におけるNATMによるトンネル掘削が一般的になるに伴い、切羽観察結果を定量化することにより全国的な標準化をする試みがなされた⁹⁾。また、本間ら⁷⁾あるいは鈴木ら⁸⁾による切羽観察の定量化の研究が発表される中で、次第に地山評価点なる概念が一般化されたものと思われる。しかしJHにおける現状では、トンネル施工を担当する各工事事務所毎に岩判定委員会を設置し、計測と定性的な切羽観察の結果をもとに支保選定を行うのが通常であり、切羽観察結果を定量的に取り扱って支保選定に関連付けるシステムを構築するには至っていない。

JHによるトンネル施工管理要領⁹⁾によれば、トンネル施工に際してはJHの示す様式に準じた切羽観察記録を一日一回残すことが義務づけられている。JH試験研究所では、この記録の多くをデータベース化しており、今日ではその蓄積された切羽数は約10000に及ぶ。しかしこの切羽観察様式は、上述したように本来定性的な利用目的のために作られており、これをもとにした合理的な支保選定のための定量的指標としては必ずしも適切でない面も有している。

JHでは以上のような状況に基づき、蓄積された切羽観察記録を分析することにより、切羽観察の実情を把握し、その分析結果をもとに支保選定のために有力な助けとなり得る切羽評価システムを提案し、平成8年秋より試行導入を行っている¹⁰⁾。本文はこの提案に至る研究過程を明らかにし、定量的な切羽評価システムとその課題および今後の方向性を示すことを目的としている。本文では、まず分析に用いたデータの内容について概要を記載し、次に数量化Ⅲ類とクラスター分析により観察項目の類似性分析とその類似性から見た岩種の分類を行う。そしてこの結果に基づいて新しい切羽評価法の考え方を提案し、最後に現行の評価点法と新評価法による支保パターンの判別に対する比較を行う。

2. 分析データの内容

(1) データ選択条件とサンプル数

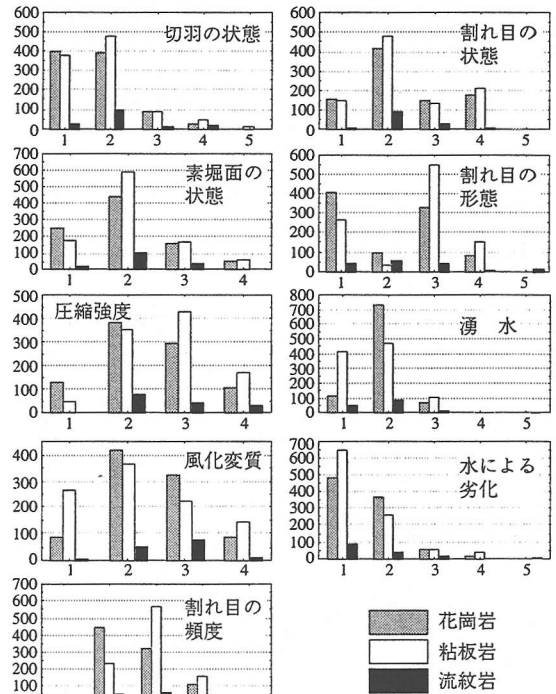
分析の対象としたものは、切羽観察記録のうち岩石、表一1に示す各観察項目の評価ランク、採用された支保パターンである。本研究では、岩石の違いによる評価傾向の違いを分析するため、複数のトンネルにおける観察結果を岩石毎に一つのデータセットとしてまとめた。対象とした岩石は、花崗岩、安山岩、流紋岩、凝灰岩、凝灰角礫岩、黒色片岩、中・古生層砂岩、泥岩・頁岩、粘板岩の9種である。表一2にNATMの適用が始まった昭和58～平成7年までの各岩石の生データのサンプル数と、分析に用いたデータ数を示す。分析にあたっては、評価ランクや支保パターンの記載がないものや内

表一 従来の切羽観察項目とそれぞれの評価ランク

観察項目 (7行4)	評価ランク (カテゴリー)				
	1	2	3	4	5
切羽の状態	安定	鏡面から岩塊が抜け落ちる	鏡面の押し出しを生じる	鏡面は自立せず崩れあるいは流出	その他
素掘面の状態	自立 (巻掛不要)	時間が経つと鏡み肌落ちする (後巻掛)	自立困難掘削後早期に支保する (先巻掛)	掘削に先行して山を受けておく必要がある	同上
圧縮強度	$\sigma_c \geq 1000 \text{kgf/cm}^2$ ハンマー打撃はね返る	$1000 > \sigma_c \geq 200$ ハンマー打撃でくだける	$200 > \sigma_c \geq 50$ 軽い打撃でくだける	$50 \text{kgf/cm}^2 > \sigma_c$ ハンマー刃先くい込む	同上
風化変質	なし・健全	岩目に沿って変色、強度やや低下	全体に変色、強度相当に低下	土砂状、粘土状、破砕、当初より未固結	同上
割れ目の頻度	間隔 $d \geq 1\text{m}$	$1\text{m} > d \geq 20\text{cm}$	$20\text{cm} > d \geq 5\text{cm}$	$5\text{cm} > d$ 破砕当初より未固結	同上
割れ目の状態	密着	部分的に開口	開口	粘土を挟む、当初より未固結	同上
割れ目の形態	ランダム・方形	柱状	層状、片状、板状	土砂状、細片状、当初より未固結	同上
湧水	なし、滲水程度	滴水程度	集中湧水	全面湧水	同上
水による劣化	なし	鏡みを生ず	軟弱化	崩壊・流出	同上

表二 分析に用いたデータ数

	花崗岩	安山岩	流紋岩	凝灰岩	凝灰角礫岩	黒色片岩	中・古生層砂岩	泥岩・頁岩	粘板岩
生データ	1251	251	299	356	514	532	501	792	1887
分析データ	919	189	152	282	177	377	263	353	1003



図一 観察項目別評価ランクの度数分布

容不明とされているもの、支保工が特殊で他との比較ができないものを除いたためデータ数が少なくなっている。

表-3 数量化Ⅲ類による岩石別観察項目（アイテム）のスコア

固有値No.	岩 石										
	花崗岩	安山岩	流紋岩	凝灰岩	凝灰角礫岩	中・古生層砂岩	黒色片岩	泥岩・頁岩	粘板岩		
観 察 項 目 (ア イ テ ム)	切	1	-0.00960	-0.01235	-0.02447	-0.01343	-0.00807	-0.01140	-0.00641	-0.01333	-0.00537
		2	0.00719	-0.00250	0.00478	-0.00639	0.04961	-0.00180	-0.00493	0.00512	-0.00045
		3	0.01715	0.01716	-0.01706	0.00957	0.00869	-0.01123	0.00634	0.00294	0.00743
素	1	-0.00001	-0.00694	-0.01562	-0.00292	0.00200	0.00724	-0.00495	0.01602	-0.00074	
	2	0.00277	0.01786	-0.01514	-0.02507	0.05343	0.00031	-0.00429	0.03937	-0.00465	
	3	0.01901	0.02154	-0.03468	0.01456	-0.00588	-0.01820	-0.00293	-0.01733	0.01048	
圧	1	0.01645	0.01550	-0.01001	0.04270	0.03653	0.03620	0.01994	0.06726	0.01800	
	2	-0.01026	0.03111	-0.06210	-0.00765	-0.02362	-0.00074	0.06198	-0.04572	-0.01457	
	3	-0.00465	-0.00864	0.00202	-0.02828	-0.07173	-0.00607	0.06005	-0.05364	-0.00517	
風	1	0.01581	0.01035	0.05920	0.02999	0.03319	0.02891	-0.00280	0.02439	0.00658	
	2	-0.00518	0.03242	-0.03701	-0.01692	-0.00745	0.00020	0.01449	0.02035	-0.01135	
	3	-0.00142	-0.00606	-0.03104	-0.01242	0.00239	-0.01598	0.01399	0.00968	0.00926	
頻	1	0.01757	0.04291	0.09225	0.03834	0.03480	0.07116	0.03739	0.05365	0.02928	
	2	-0.01372	0.01636	-0.01090	0.00771	-0.01556	-0.01956	0.08143	-0.04607	-0.00189	
	3	-0.00577	-0.07036	0.04380	-0.01897	-0.03435	0.10871	-0.10346	-0.00237	-0.04389	
状	1	0.01075	0.00155	-0.00531	0.00233	0.02883	0.01824	-0.00236	0.01209	0.00585	
	2	-0.00112	0.01284	-0.01975	0.00806	-0.00599	-0.00267	-0.00159	0.01570	-0.01028	
	3	0.00358	0.02001	0.00258	0.03992	0.02441	-0.02971	-0.01366	0.04103	0.00805	
形	1	0.00650	0.10117	0.02871	0.00216	0.02723	-0.01327	0.14600	-0.01060	0.02513	
	2	0.03769	-0.08841	0.07007	0.07703	-0.03226	0.10174	-0.05945	-0.03628	0.04817	
	3	-0.01635	0.03233	-0.03976	0.00331	0.07252	0.02102	0.01161	0.02902	0.01502	
湧	1	-0.01720	-0.03660	-0.01391	-0.03792	-0.04344	-0.03177	-0.00930	-0.02575	-0.01738	
	2	-0.00732	-0.03863	0.02241	0.00044	-0.01653	-0.01639	-0.01358	-0.00661	0.00797	
	3	-0.01993	-0.03560	0.06194	-0.03856	-0.00812	0.01100	-0.00198	-0.01362	-0.01304	
劣	1	-0.01427	-0.01332	-0.02657	-0.00982	-0.03986	-0.02125	-0.00574	-0.01286	-0.01091	
	2	-0.00624	-0.01051	0.00925	-0.00949	-0.02556	-0.01179	-0.01124	0.00071	0.00318	
	3	0.00239	0.02414	0.00255	0.01748	-0.00022	0.01784	-0.00582	-0.02396	-0.00473	

切：切羽の状態，素：素堀面の状態，圧：圧縮強度，風：風化変質，頻：割れ目の頻度，状：割れ目の状態，形：割れ目の形態，湧：湧水，劣：水による劣化

(2) 岩種別のデータばらつき

図-1に各観察項目（表-1参照）における評価のばらつきを、花崗岩・粘板岩・流紋岩を代表例として示す。ここに示されるように、ほとんどの観察項目における評価の度数分布は評価ランク1ないし2に最頻値を持っており、この傾向は図-1に表示した岩石以外においてもほぼ共通している。すなわち評価結果の頻度やばらつきだけでは岩石による違いは明確には現れていないケースが多い。

しかし「圧縮強度」や「風化変質」「割れ目の頻度」では岩石によっては評価ランク3が最頻値となることもある。これは「圧縮強度」についてみると、花崗岩のようにインタクトな状態での強度が元来大きなものでは評価ランクの1や2が選ばれることが相対的に多く、粘板岩のように強度が元々小さければ評価ランク3以降が選ばれることが多くなるという岩種による評価傾向の違いを示唆している。また「割れ目の頻度」についても、粘板岩のように層理面が密に発達する岩種では、層理面を割れ目と見なして評価ランク3とするように、岩種の特質による評価の違いが現れている可能性がある。

る。またこのような評価傾向の違いは「割れ目の形態」にもある程度認められる。「割れ目の形態」は評価ランク1と3にピークを持つbimodalな度数分布となることが多いが、粘板岩や図には示されていないが黒色片岩では、当然のことながら評価ランク3の「層状、片状、板状」が相対的に多く観察され、花崗岩のように方状の節理ができ易いものでは評価ランク1の「ランダム・方形」が多くなる。また流紋岩では他の岩種で観察されることが少ない「柱状」が相対的に多く観察されている。しかし、このような岩種による評価傾向の違いもあくまで定性的な解釈にとどまるものである。

3. 観察項目の類似性分析

数量化Ⅲ類により観察結果を数値化し、その数値を比較することによって観察項目相互の類似性を分析する。更に数値化された類似性をクラスター分析し、岩種間の評価傾向の相違を検討する。

(1) 数量化Ⅲ類による分析結果

数量化Ⅲ類では、一般にサンプルとカテゴリー個々の

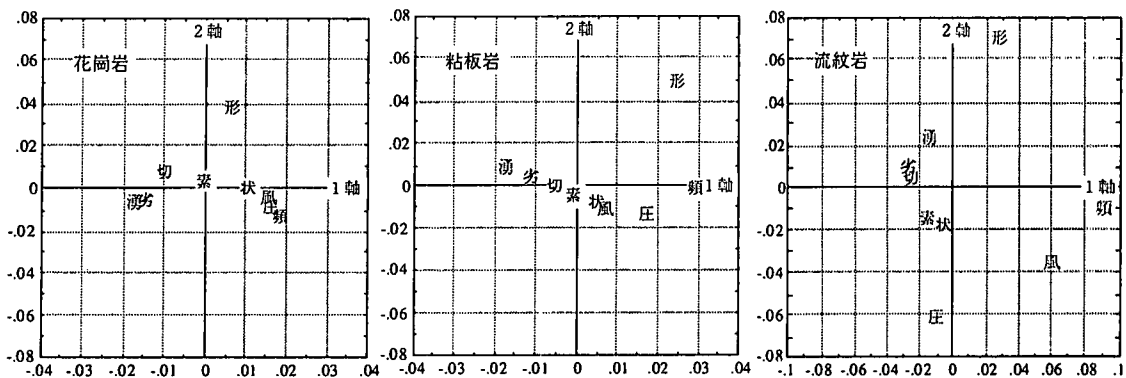


図-2 観察項目スコアの散布図 (凡例は表-3と同じ)

反応関係を示すデータ行列を用いて分析を行う¹³⁾が、本研究では、観察項目(アイテム)間の類似性をより明瞭にするため、各項目における評価ランク(カテゴリー)が2以下と3以上の二つのカテゴリーに分けた任意反応タイプのデータ行列を作成しスコアを計算した。

表-3に分析結果として、岩石別に第3固有値までの観察項目のスコアと各固有値を示す。ここではある一つの岩石において、同一の固有値番号での観察項目スコアを比較することにより、その項目間の類似度が評価できる。すなわち、項目間のスコアが近似しているものほどお互いの類似性が強い。この関係をより視覚的に示すため、図-2に花崗岩、粘板岩、流紋岩を例として、横軸に第1固有値(=1軸)での観察項目スコア、縦軸に第2固有値(=2軸)での観察項目スコアをプロットしたものを示す。図-2では、近い位置にプロットされるものほど項目間の類似性が強い。

代表例としてあげたそれぞれの岩種における項目の類似性のパターンはまちまちであるが、共通して言えることは「割れ目の形態」が常に他の項目からかけ離れた位置にあること、「湧水」と「水による劣化」は類似性が高い傾向にあることである。そこで、これらの関係をより明確に表すため、観察項目間のクラスター分析を行った。

(2) クラスター分析結果

ここでは、表-3の観察項目スコアをxyz方向の座標値とみなし、項目間のユークリッド距離を類似性の測定とし、ワード法¹⁴⁾にてクラスターを計算した。図-3に観察項目間の類似性を示す樹形図を岩石別に示す。この図では、項目間の結合点位置が左側にあるほどお互いの距離が小さく類似性が高い。例えば、花崗岩では「圧縮強度」「割れ目の頻度」や「風化変質」「割れ目の状態」のペアの類似性は高いが、「割れ目の形態」は他の全てに類似性が低く単独でクラスターを形成している。

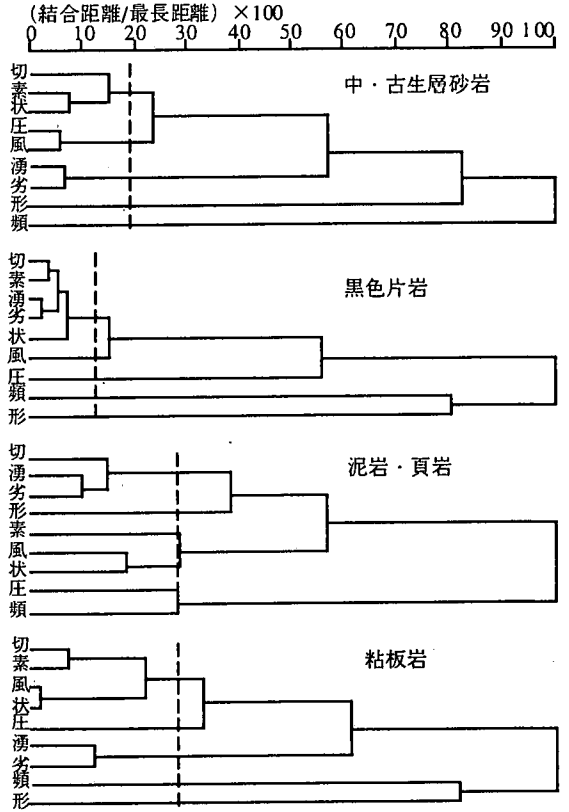
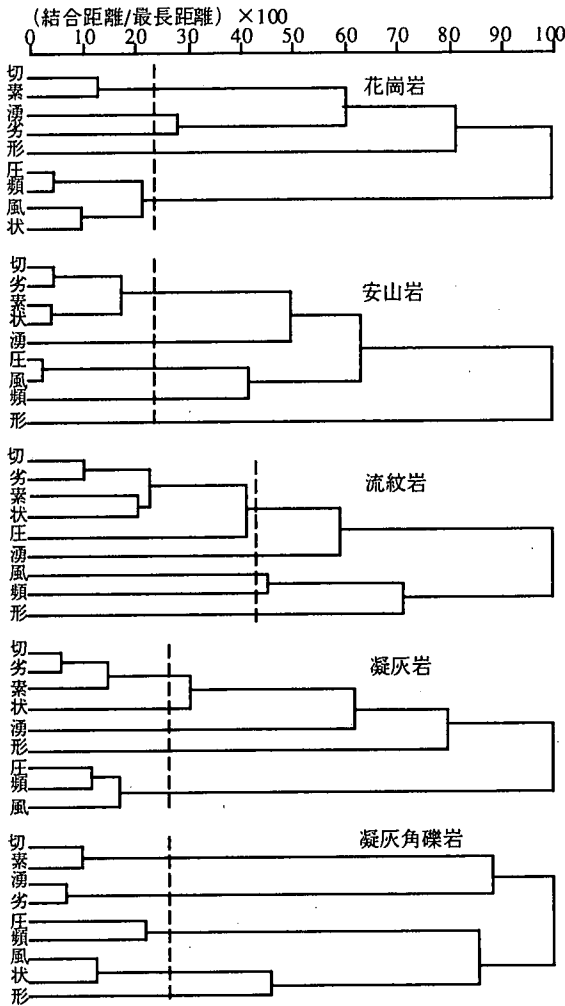
このようなクラスターの形成状況から各項目の評価特性

を比較するには、クラスターの数をある程度少なくし、1クラスターに含まれる項目の数を増やすとわかりやすい。ここでは図-2に示した観察項目スコアの散布状況から、全体的に岩石当たり5個程度のクラスターが形成されると見なされることから、各岩石当たり5個のクラスターを選択し、それぞれに含まれる項目の一覧を表-4に示した。この表から、「割れ目の形態」は9岩石中の全てにおいて単独クラスターとなり、他の項目との類似性に乏しいことがわかる。次いで「割れ目の頻度」も9岩石中5種において単独クラスターとなり、かなり類似性に乏しい項目であると推定される。一方逆に、類似性が高いペアになる頻度が比較的大きい組み合わせは、「湧水」と「水による劣化」や「切羽の状態」「素堀面の状態」「風化変質」「割れ目の状態」のペアとなる。但し「湧水」は「水による劣化」とペアにならない場合は常に単独で孤立する。

次に、図-3と表-4に示されるクラスターのパターンを岩石別に比較すると、安山岩と流紋岩では第3クラスター以降の項目が一致し、第1、第2クラスターを構成する項目のペアもほとんど共通している。同様に黒色片岩と粘板岩におけるクラスターのパターンもお互いにほぼ共通し、これらの岩石における評価傾向が似ていることがわかる。また、花崗岩と凝灰角礫岩も類似性の度合いは異なるもののクラスターを構成する項目が共通しており、評価傾向が比較的類似していると考えられる。しかし、残りの岩石ではいずれもクラスターのパターンから共通のものを見いだすことは困難であった。

4. 分析結果の考察

数量化Ⅲ類において他のカテゴリーとの類似性に乏しいものとは、他の項目と反応の仕方が違うものを示す。つまり今回の検討例では、「切羽の状態」や「圧縮強度」等の評価が地山の状況によって変化している場合においても、「割れ目の形態」や「割れ目の頻度」「湧水」に



図一三 クラスタ分析樹形図 (点線は5クラスター目を分ける境界を示す。凡例は表一三と同じ)

は変化がないか、あるいはまったく違う傾向の変化を示しているということになる。

「割れ目の形態」は、前述したように地山の岩石によってある特定のものに集中する傾向がある。例えば黒色片岩での主要な割れ目は片理面に沿って形成され、このパターンは風化の度合い等が変わっても基本的には変化しないであろう。また、安山岩や流紋岩等の火山岩では、岩盤の生成時(溶岩が冷却固結する時)に形成される柱状節理が主要な割れ目となろう。つまり、「割れ目の形態」は地山の岩種そのものに依存する部分が多く、他の観察項目のように地山の状況によって変化していくものではないと解釈される。また同様の解釈として「割れ目の頻度」も片理面や柱状節理が主要な割れ目となっている岩盤では、他の項目に比べて評価の変化が少ない結果が現れていると考えられる。一方、「湧水」に関しては他の項目との類似性の強弱は岩石によって異なっている。湧水の有無や程度は、明らかに水理地質状況を表すものであり、岩の堅さ、割れ目の性状等で評価される岩盤としての強度とは次元が異なる。

表一四 クラスタの岩石別パターン

クラスターNo. 岩種	1	2	3	4	5
花崗岩	切素	庄類, 風状	劣	湧	形
安山岩	庄風	切劣, 素状	類	湧	形
流紋岩	切劣, 素状, 庄	風	類	湧	形
凝灰岩	切劣, 素	庄類, 風	状	湧	形
凝灰角礫岩	湧劣	切素	風状	庄類	形
中・古生層砂岩	庄風	湧劣	素状, 切	形	類
黒色片岩	湧劣, 切素, 状	風	庄	類	形
泥岩・頁岩	湧劣, 切	風状	庄類	素	形
粘板岩	湧劣	風状, 切素	庄	類	形

凡例は表一三と同じ

従って、たとえ湧水が全くない状態でも著しく風化変質したり割れ目が多い場合があるであろうし、また逆の場合もありうる。「湧水」が他の項目との類似性に乏しくなっている花崗岩や安山岩・流紋岩では、このようなケースが多いと解釈される。しかし泥岩・頁岩や黒色片岩では「湧水」は「水による劣化」と類似性を持ち、かつ「切羽の状態」や「素掘面の状態」の評価とも類似す

るようになる。このような評価傾向は、別種の統計手法によって岩種特性を分析した研究例⁹⁾においても共通している。一方、類似性に富む項目のペアとしては、上述の「湧水」「水による劣化」の他に、「切羽の状態」「素堀面の状態」、「風化変質」「割れ目の状態」があげられる。「切羽の状態」と「素堀面の状態」は切羽や素堀面の安定性を表わす評価であるので両者が類似するのは当然の結果と考えられる。「風化変質」と「割れ目の状態」においても「割れ目の状態」の評価が開口性と変質に着目したものであることから両者が類似するケースが多いことはうなずける。

ここで切羽や素堀面の安定性を表わす「切羽の状態」と「素堀面の状態」に着目すると、これらのスコアは多くの岩石において平均値=0に近い値を示している。このことは図-2においてこれら2項目が原点近辺にプロットされていることや表-4で単独のクラスターを作りにくいことから示される。この事実は、これらの2項目が他とは離れた極端な評価をされることはなく、常に他の項目の変化と連動し、それらの総合的な(=平均的な)結果が表わされているものと解釈される。つまり切羽や素堀面の安定性を表す2項目は、他の岩石の硬さや割れ目の性状に対する評価が組み合わさった結果を総合的に判断するケースが多いと考えられ、ある意味では評価に対する二重判定を行っていると思われ得る。

またクラスターの形成パターンを比較することによって岩石間の評価傾向の類似性も読み取ることができる。すなわち同じクラスターの形成パターンを示す岩石は、評価において考慮する観察項目が一致していることになる。分析した9岩石においては、少なくとも安山岩と流紋岩、黒色片岩と粘板岩は各々ほぼ共通の形成パターンを成し、花崗岩・凝灰角礫岩も比較的共通性が高いと見なされる。つまり評価傾向が類似している岩種群が3つあることになる。これらの岩種の特長を、成因や岩盤としての基本的形態から分類すると、火山岩(注:ここで言う火山岩とは、安山岩や流紋岩等の溶岩が固結してできたものをさし、凝灰岩や凝灰角礫岩等のいわゆる火砕岩は含めない。以下、火山岩*と記す)、層状岩(黒色片岩・粘板岩)、塊状岩(花崗岩・凝灰角礫岩)に区分することができるであろう。

5. 新しい切羽評価システムの考え方と提案

(1) 新しい切羽評価システムの目的

施工管理における計測工の目的が安全性、経済性の確保であることは言うまでもない。中でも切羽観察は施工時の安全性の確保に加えて、設計・施工時の経済性の確保ならびに将来の工事計画の資料蓄積の性格を有す

る重要なものと考えられる。

このことから、切羽評価システムは支保選定における地域、経験、技術レベル等によるばらつきをできるだけ少なくし、客観的な標準支保が提示できるものであることが望ましい。また、これから経験を積もうとする技術者にでも活用できるように支保の選定と結びついた情報を提示するものであり、さらには切羽観察作業をすることが山を見る(岩盤工学的な学習をする)性格を有するものであるべきであろう。また本システムの現場での適用を具体的に考えると、筆者らが蓄積したトンネル計測データの分析から得られた次の結論を考慮する必要がある。すなわち、大半のトンネル地山では支保工の役目は変位量を抑制することではなく、むしろ緩みや崩落を防ぎ地山の一体性を保持することにある。従って、切羽観察による評価を有効に活用するためには、緩みやその荷重、緩みの最終形態の一つである崩落などを推定・評価できるものであることが望ましい。このような目的に対し、以下の新しい切羽評価システムを提案する。

(2) 新しい切羽評価システムの考え方

旧切羽観察様式は、基本的には定性的資料として考案されたものであるため、定量化して支保選定の参考になるようにするには改良すべきいくつかの点がある。その主なものを挙げれば以下の通りである。

- ①観察項目が独立していない。
- ②各項目への重みに関する考慮がない。
- ③緩み荷重を意識した観察となっていない。
- ④観察項目の意味、意義が明確にされていない。

切羽観察を前述の目的に応じたものとするためには、これらの点に対して次のような改良を加えた評価システムを発展させることが望ましい。

- ①できる限り二重評価を避け独立した項目により評価する。
- ②各評価項目には地山岩種に応じた重みを考慮する。
- ③地山状況の変化に対して感度の鈍い項目は除外し、緩み荷重に関連した項目を重視する。
- ④各項目毎にその性格に応じた扱いをすることにより、観察者の意識を促すものとする。

さらに具体的には、切羽観察結果の分析から旧切羽観察様式を改善するものとして次のような考え方が可能であろう。

- ①切羽に現れる地山の状況は、総合的な岩盤の強度とその岩盤が置かれている場の状態の評価に区分する。
- ②地山の岩種を区分してそれぞれに特有の性質に対応する。
- ③切羽評価の対象は地山状態に対する長期的(供用後も含む)評価と位置づけるとともに、切羽の安定性も

評価できる観察項目であることを考慮する。

ここで①でいう総合的な岩盤の強度とは、岩石自体の強度と亀裂の性状で決まるものであり、これを評価する項目としては、現行の観察項目の「圧縮強度」「風化変質」「割れ目の頻度」「割れ目の状態」が該当する。場の状態とは総合的な岩盤の強度とは次元を異にし、岩盤の強度に対し外的条件を与えるようなものをいう。場の状態を評価する項目としては、現行の「湧水」が該当する。湧水に関する評価は、切羽周辺岩盤の含水率と透水性によって決まる。これらは岩盤の強度とは基本的には別の物性であり岩盤強度を補正するものとして出現するであろう。このような項目の評価を「場の状態」の評価と位置づけている。また更に、岩盤の強度を補正する場の状態としては、水理地質状態の他に切羽周辺地山の応力状態も重要であろう。

また②でいう岩種を区分しそれに特有の性質に対応するとは、評価項目自体を変えるのではなく、岩種毎に項目に対する重みを変えることによって、岩盤等級判定(支保パターン)に対しより感度の高いものを目指すことを意味する。

③の切羽の安定性に対する評価は、施工の安全性においては欠くことのできない重要なものであり、現行の観察項目では「切羽の状態」「素掘面の状態」が該当する。しかしこれらの評価は、他の項目の評価から総合的に判断されるものと見なされる。そこで地山状態の長期的評価を行う場合には、上記2項目を他から分離することによって評価における二重判定を避け、かつそれぞれの切羽評価の目的を明確にするものである。なお、本論文では施工時の切羽安定性と切羽観察項目との関連性についての知見を得ていないので、具体的な考慮はできていない。

(3) 新しい切羽評価システムの提案

以上の考え方にに基づき、現行の切羽観察シートを再整理して新しい切羽観察シートを試案した。

総合的な岩盤強度に対する評価項目は、「圧縮強度」「風化変質」「割れ目の頻度」「割れ目の状態」の4項目が該当する。場の状態に対する評価項目は、「湧水」と「水による劣化」が該当する。「水による劣化」は岩盤に水が浸いた状態で岩盤の強度がどの程度低下するかを評価する項目であり、基本的には岩盤の強度に関連したものと考えられる。しかし、この項目のトンネルへの影響は湧水状況如何によって左右されるところが大である。またクラスター分析の結果からも両者に比較的高い評価の類似性が認められている。従って、両者は併せて評価する方がより合理的と考えられ、場の状態の評価項目とした。またこれらの項目は前述したように岩盤の総合的な強度を補正するものと位置づけられる

が、どちらも最良の評価ランクが「なし」であり、以降ランクが変わるごとに評価が悪くなる。つまりこれらの項目は、岩盤強度関連の評価を引き下げるものと位置づけることができる。そこでRMR法³⁾を参考にして、これらは岩盤強度関連の評価によって決まった評価点から、2項目の組み合わせで決まる評価に応じて点数を減じる調整点とする。

また場の状態に対する評価として切羽周辺地山の応力状態への評価が必要であることを述べたが、これに対しては、JHをはじめ鉄道における事前地山分類⁴⁾においても評価されている地山強度比の概念が適用できる。地山強度比は、亀裂の発達も考慮した岩盤強度と土被り高・岩石密度より求められるが、切羽観察の段階では、「圧縮強度」の評価による一軸強度の代表値とその切羽における土被り高と岩石密度からも簡便な指標としての値が得られるであろう。また、一般に地山強度比はある値以上であればその岩盤は安定であり、それ以下になるにつれて岩盤の不安定度が増す指標と言える。従ってこの評価項目も湧水関連と同様に評価ランクが最良の場合0であり以下評価が増すに従って岩盤強度の評価点から値を減じる調整点と位置づけることができる。ただし、切羽観察時における地山強度比の評価は旧来の観察項目(表-1参照)にはないため、本論ではこの項目の評価ランク区分の検討を新たに行った。ここでは鉄道における地山分類基準⁴⁾(地山強度比6以上を最高とした5段階区分)を参考にしたが、JH試験研究所データベースにおける地山強度比(Gs)と変位量の相関関係⁵⁾から、岩種によってはGs \geq 10においてもトンネルに変状が生じ地山が安定とはいえないものがあることから、もう1段階追加した6区分程度が適当と判断した。

以上の評価項目に対し、岩種に応じて支保パターンの判別に対する最適重み係数を付けて評価点を計算することにより切羽評価を行う。この試案に基づいた新しい切羽観察シートの仕様は表-5となる。

6. 新切羽評価システムにおける評価点と旧切羽観察様式による評価点との比較

ここで提案した新しい切羽評価システムの効果を検証するため、旧様式による評価点と、表-5の切羽観察システムに基づいた評価点を計算し、両者の支保パターン判別効果を比較した。

(1) 観察項目の重み付け

新しい評価システムにおいては、岩種や観察項目に重み付けを行って最適評価を行うことが重要な点である。従来の研究においても観察項目に重み付けを行っ

て判定効果を挙げる例が多数ある。これら既往の研究において、重みをつける方法として用いられている考え方は、観察者に対する直接のアンケートや切羽観察記録に対する何らかの統計処理を基本とするものが一般的である。ここでは旧様式による観察結果を用い、統計処理に基づいて重みを計算することとした。

統計処理に先立って、処理が可能な岩石を検討したが、岩石毎に個別に分析すると目的変数となる支保パターンや説明変数となる評価ランクがまちまちとなり、汎用性を見込める結果を出すことが不可能であることがわかった。そこで、各岩石のインタクトな状態での一軸圧縮強度による区分¹⁰と、前述5.分析結果の考察で分類した3つの岩種区分を用い、表-6に示す岩石の該当のない4つのグループ除いた5つの岩種グループを分類し処理の対象とした。また、用いるデータは表-2のデータから土被り高が40m以上のものを選択し、かつ評価ランク5はランク4に統合した。これは、支保工選択における坑口からの漸移区間をさけるためと、ランク5は個数が少なく岩種によるばらつきが大きいためである。

計算手法は標準支保パターンB~DIを目的変数とした数量化II類による判別分析により、新評価法における岩盤強度項目に相当する「圧縮強度」「風化変質」「割れ目の頻度」「割れ目の状態」に対する最大固有値におけるカテゴリースコアのレンジを求め、それを0.5単位で丸めたものを重みと見なす方法を採用した。得られた観察項目重み係数を表-7に示す。この重み係数は同一項目内での評価ランクの格差にまでは対応しておらず、厳密に言えば項目自身や岩種に対し最良の感度を発揮するにはやや曖昧さを残している。しかし、この岩種毎の各重み係数の比率を、岩石強度(=圧縮強度と風化変質):割れ目性状(=割れ目頻度と割れ目状態)という点から見ると、塊状硬岩でおおむね2:8、火山岩*と塊状軟岩で6:4、層状中硬岩と層状軟岩で7:3となり、硬質な岩ほど割れ目の評価が重く、軟質なほど岩石自体の強度が重く評価される結果となっている。この様な傾向は一般的な岩盤の評価と整合しており、項目や岩種に対する評価の感度を表す比較検討用の暫定的値として用いることが可能と考えられる。

一方、「湧水」「水による劣化」の評価組み合わせや、地山強度比評価ランクに対しては、これらを調整点と位置づけているため、実際に何点とすれば、地山状態(支保パターン)を明確に判別できるか現状では判断基準となる実績がない。そこで、本研究では検討の一例として総合的な岩盤強度の評価の重みに対する調整点の評価の重みを20~40%と考え、この範囲内で幾つかの検討例を試行錯誤的に作成し、各支保パターンに対する評価点全体のバラツキが最も小さく、かつ隣り合う

表-5 新しい切羽評価システムによる観察シートの試案

観 察 目 的	評価ランク (カテゴリー)					
	1	2	3	4	5	
圧 縮 強 度	$\sigma_c \geq 1000 \text{ kgf/cm}^2$ ハンマー打撃はね返る	$1000 > \sigma_c \geq 200$ ハンマー打撃はね返る	$200 > \sigma_c \geq 50$ 軽い打撃でくだける	$50 \text{ kgf/cm}^2 > \sigma_c$ ハンマー刃先くい込む	その他	
風 化 変 質	なし・健全	岩面に沿って変色、強度やや低下	全体に変色、強度相当に低下	土砂状、粘土状、破砕、当初より未固結	同上	
割れ目の頻度	間隔 $d \geq 1\text{m}$	$1\text{m} > d \geq 20\text{cm}$	$20\text{cm} > d \geq 5\text{cm}$	$5\text{cm} > d$ 破砕当初より未固結	同上	
割れ目の状態	密着	部分的に開口	開口	粘土を挟む、当初より未固結	同上	
湧水量 水による劣化	なし、滲水程度	滴水程度	集中湧水	全面湧水	その他	
なし	Y11	...	...	...	Y15
緩みを生ず	:	:	:	:	:	
軟弱化	:	:	Y33	:	:	
崩壊・流出	:	:	:	:	:	
その他	Y51	...	...	...	Y55
地山強度比の範囲	$G_s \geq 10$	$10 > G_s \geq 5$	$5 > G_s \geq 3$	$3 > G_s \geq 2$	$2 > G_s \geq 1$	$1 > G_s$
調整点	G1	...	...	...	G6

表-6 岩種グループ

岩石の形態・成因 強度区分	塊 状	層 状	火山岩*
硬 岩	花崗岩 中・古生層 砂岩	本検討では 該当無し	本検討では 該当無し
中硬岩	本検討では 該当無し	粘板岩	安山岩 流紋岩
軟 岩	凝灰岩 凝灰角礫岩	黒色片岩 泥岩・頁岩	本検討では 該当無し

インタクトロックの強度区分は文献¹⁰に従った

表-7 岩種グループ別観察項目重み係数

	圧	風	頻	状
塊状硬岩	1.0	0.5	4.0	1.5
火山岩*	2.5	0.5	0.5	1.5
塊状軟岩	2.5	1.0	1.5	0.5
層状中硬岩	2.5	1.0	1.0	0.5
層状軟岩	1.5	2.5	1.0	0.5

凡例は表-3と同じ

表-8 本検討で用いる調整点

湧水量 水による劣化	なし、滲水程度	滴水程度	集中湧水	全面湧水		
なし	0	0	-5	-10		
緩みを生ず	0	-5	-7	-10		
軟弱化	-5	-7	-10	-15		
崩壊・流出	-7	-10	-15	-20		
地山強度比の範囲	$G_s \geq 10$	$10 > G_s \geq 5$	$5 > G_s \geq 3$	$3 > G_s \geq 2$	$2 > G_s \geq 1$	$1 > G_s$
調整点	0	-3	-9	-13	-17	-20

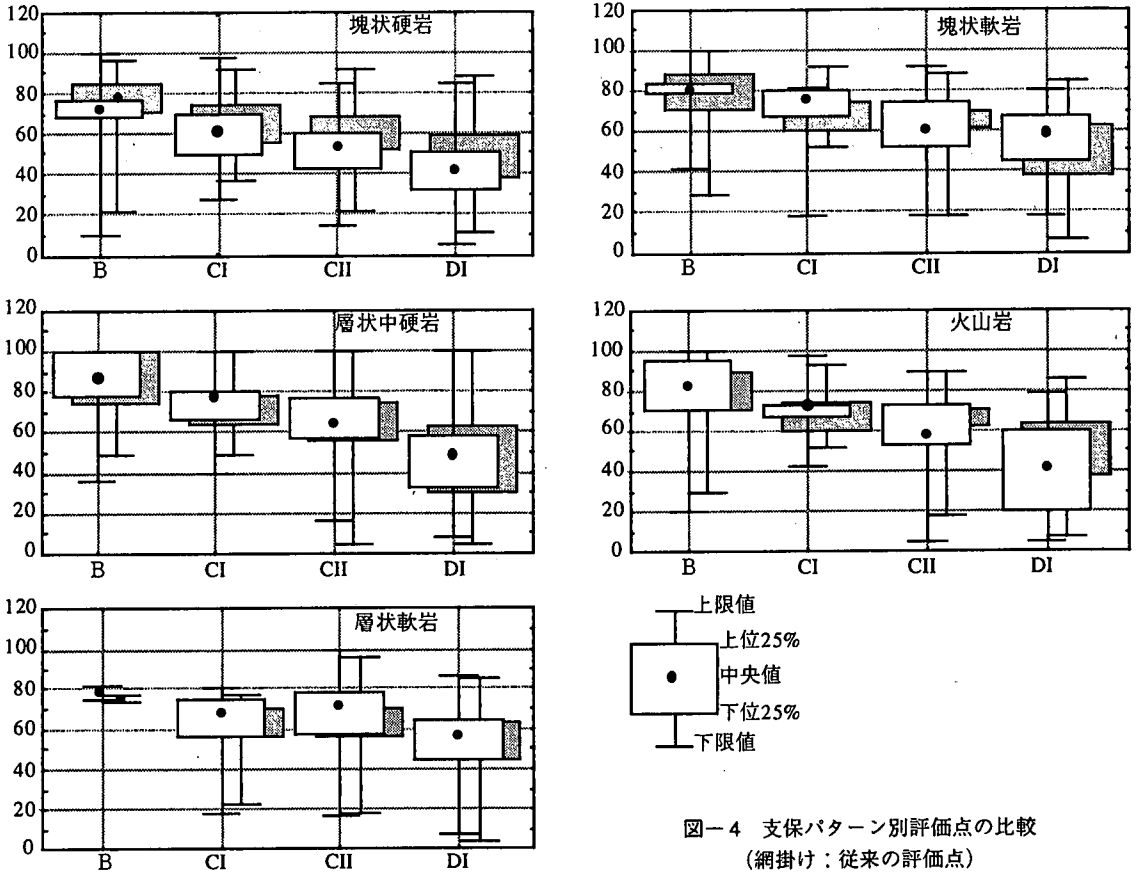


図-4 支保パターン別評価点の比較
(網掛け：従来の評価点)

支保パターンの評価点との重複が最も少ない組み合わせを選択した(表-8参照)。ただし、JH試験研究所のデータベースから得られた、地山強度比と変位の相関関係¹³⁾や、鉄道における地山分類基準¹⁴⁾などを参考にすると、土被り1000m程度未満の通常のトンネルでは、地山強度比が地山の状態の指標となりうる岩石は限定されているようである。それらを本研究で用いている岩種グループに適用すると、塊状軟岩、層状中硬岩、層状軟岩の3岩種グループとなる。よって、地山強度比を支保判別のための指標として用いる岩種グループは上記の3種とし、残りの2グループ(塊状硬岩、火山岩*)については、この評価を適用しないものとした。

(2) 新システムにおける評価点の計算と従来の評価点法との比較

評価結果全体の評価点は、表-7に示した観察項目の重みを用い表-8の調整点分のマイナスを考慮した上で、評価ランクがすべて最高であった場合には100点、最低の場合は0点になるように調整した重み付算術平均により求めた(式1, 2)。なお、地山強度比調整点の対象となる3岩種グループの岩石密度は、JH試験研究所データベースに記載されているものを用い、岩盤の圧

縮強度は各評価ランクにおける一軸圧縮強度の指標(表-1参照)を参考に、ランク1:1000kgf/cm²(98MPa)、ランク2:500kgf/cm²(49MPa)、ランク3:125kgf/cm²(12.25MPa)、ランク4:50kgf/cm²(4.9MPa)とした。

$$P_a = 100 - \left\{ \frac{\sum_{i=1}^4 w_i (k_i - 1) \frac{80}{3}}{\sum_{i=1}^4 w_i} \right\} + Y \quad (1)$$

$$P_b = 100 - \left\{ \frac{\sum_{i=1}^4 w_i (k_i - 1) \frac{60}{3}}{\sum_{i=1}^4 w_i} \right\} + Y + G \quad (2)$$

ここで、 P_a は塊状硬質岩と火山岩*の評価点、 P_b は塊状軟岩、層状中硬岩、層状軟岩の評価点、 w_i は*i*番目観察項目の重み、 k_i は*i*番目観察項目で選択されたカテゴリ番号、 Y は湧水調整点、 G は地山強度比調整点である。

得られた評価点に対し、支保パターン毎にそのばらつきを示したものが図-4である。図中には、比較の対象として従来評価点算定式としてよく用いられている本

間らの方法⁷⁾による評価点を満点を100、最低を0に調整したのもを示した。両者を比較すると、各パターン間の点数の重複は依然あるとはいえ、層状軟岩を除けば、パターン間における点数の差は全体に従来の評価点方式と同程度ない若干明瞭になったと考えられる。各パターン間の点数の重複が避けられない理由としては、重み係数や調整点の算定が暫定的なものである影響が大きいと考えられる。またこの様な手法に共通した問題である観察者個人個人における評価傾向のばらつきなどが完全には取り除けないことや、支保パターンの選択が、施工の安全性など観察表にある評価項目以外の情報から判断されている可能性もあるであろう。また層状軟岩で判別精度が悪いのは、比較的強度が大きく亀裂の多い頁岩と、固結度は低いにもかかわらず一見して亀裂が少ない様に見える第三紀泥岩を区別することができずに取り扱ったことに原因があると考えられる。しかし、新評価システムは旧来のものより観察項目数を減らしているにも関わらず、全体としては同程度の支保パターン判別精度を持つものと思われる。

7. 結 論

JHで最近まで行われてきた切羽観察結果を統計処理することにより、各切羽観察項目の持つ物理的特質の相違を示し、かつ岩種による評価傾向の相違を明らかにした。この成果を踏まえ、客観的な標準支保の選定の参考となる新しい切羽評価の考え方を提示した。その結果は以下に要約される。

- ①切羽に現れる地山の状況は、総合的な岩盤の強度とその岩盤が置かれている場の状態で評価する。
- ②総合的な岩盤強度を評価する項目は「岩石強度」「風化変質」「割れ目頻度」「割れ目状態」の4項目であり、場の状態を評価する項目は「湧水」「水による劣化」と切羽に現れる岩盤強度とその場所での鉛直荷重の比「地山強度比」の3項目である。
- ③総合的な岩盤強度の評価点は岩種と項目にそれぞれ応じた加重平均より算出する。
- ④場の状態の評価点は湧水と劣化の組み合わせ、あるいは地山強度比のランクによって総合的な岩盤強度の点数から値を減じる調整点とする。

以上の考え方が有効であるか否かを確認するため、旧切羽観察結果を用い9種類の岩種から5つのグループを抽出し、観察項目の重み係数と調整点を算出した。この係数と調整点を用いた評価点は、旧様式の結果を用いさらに観察項目を減じているにも関わらず、支保パターンの判別にある程度の有効性が見いだせた。ここでの判別効果は図-4に示した程度のものであるが、この結果は新切羽評価システムにおける観察結果に基づ

いた重み係数・調整点の検討および評価ランク区分の吟味により精度をさらにあげることが可能と考えるので、現在筆者らは新規データの収集と分析を続行中である。

NATMによるトンネル施工が行われて以来、膨大な数の切羽観察結果が蓄積されているが、これらを総括し実績に基づいて切羽評価法の見直しを行っていくことは意義ある事であろう。本研究ではこの様な立場でこれまでのデータを分析し、それによりある程度の理論的裏づけを持って新しい評価法の考え方を提示した。しかし、ここで示した観察項目の重み・調整点ならびに岩種グループの区分は、あくまで暫定的なものである。今後は新システムによるデータの蓄積とその分析を進めると同時に、節理・層理などの岩盤不連続面の剪断強度に着目した評価など、観察方法をより定量化するような改良を加える必要もある。また観察者個人の評価をより共通のものとするため、観察項目の位置づけと評価ランク選択の為の詳細な解説も併せて検討することが重要である。この様な改良は、この新しいシステムをトンネル現場で実際に適用し、できるだけ多数の技術者の批判を受けることによって達成されるものである。ここに提案する切羽観察システムが、現場データをもとにした何段階かの修正を経ることにより、一つの指針として役立つことを期待するものである。

謝辞：JHが(社)日本トンネル技術協会に委託した地山評価特別小委員会において、今田徹東京都立大学教授をはじめ委員、協力者各位からは、切羽観察結果の分析・解釈に関する有益なご意見を頂いた。ここに深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 吉中龍之進、桜井春輔、菊地宏吉：岩盤分類とその適用、土木工学社、pp.213-231、1989。
- 2) Barton, N., Lien, R. and Lunde, J.: Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support, Rock Mechanics Vol. 6, No. 4, pp. 189-236, Springer-Verlag, 1974。
- 3) Bieniawski, Z. T.: Geomechanics Classification of Rock Masses and Its Application in Tunneling, Proc. 3rd Int. Congress on Rock Mechanics, Vol. II-A, 1974。
- 4) 日本国有鉄道：NATM設計施工指針(案)、pp. 204-211、1983。
- 5) 吉川恵也、朝倉俊弘：NATMのための地山分類の検討、応用地質、特別号、pp. 53-62、1984。
- 6) (社)トンネル技術協会：地山評価のあり方に関する研究報告書、pp. 35-43、1985.2。
- 7) 本間直樹、竹田直樹、平野逸雄、亀村勝美：膨張性泥岩中に掘削されたトンネルの地山挙動について、第18回土質工学研究発表会講演集、2/2、pp. 1371-1374、1983。
- 8) 鈴木昌次、古川浩平、井上洋司、中川浩二：フェジイ回帰モデルに基づく岩盤分類法の提案、土木学会論文集、No.

- 418 / III-13, pp.181-190, 1990.
- 9) 日本道路公団：トンネル施工管理要領（計測工編），p. 5, 1988.
- 10) (社) トンネル技術協会：トンネル地山の評価手法に関する研究報告書，pp. 155-261, 1997.3
- 11) 田中 豊，脇本和昌：多変量統計解析法，現代数学社，pp. 161-171, 1983.
- 12) 鈴木昌次，古川浩平，井上洋司，中川浩二：ファジイ帰帰モデルに基づく岩盤分類と岩種特性，土木学会論文集，No. 430 / III-15, pp.153-156, 1991.
- 13) (社) トンネル技術協会：トンネル地山の評価手法に関する調査検討報告書，pp. 14-46, 1996.2.
- 14) 佐々木祐三，亀甲谷義高，磯野龍昭：古生層地山の地山評価と支保の選定，トンネルと地下，Vol. 19, No. 9, pp. 37-46, 1988.
- (1998. 3. 30 受付)

A NEW PROPOSAL OF EVALUATION SYSTEM FOR TUNNEL FACE BASED ON THE ANALYSIS OF THE OBSERVATION RECORDS

Masahiro NAKATA, Koji MITANI, Hiroshi YAGI, Takuro NISHI,
Kazuo NISHIMURA and Koji NAKAGAWA

This paper proposes a new evaluation system for the condition of rock mass at a tunnel face as follows: 1) the condition of rock mass is evaluated from the strength of rock mass and the condition of ground water and stress, 2) the strength of rock mass is scored by a weighted mean of the rank which corresponds to the rock strength, degree of weathering, and frequency and openness of fractures, 3) the score is adjusted by the rank which corresponds to the ground water inflow and that calculated by the ratio of strength and vertical load of the rock mass. This new system is found to be more effective than the current appraising method for the support determinations.