

# 山岳トンネルにおける切羽観察記録と支保工 および補助工法との相関性に関する一考察

結城則行\*・日永田雅司\*\*・古川浩平\*\*\*・  
中川浩二\*\*\*\*

硬岩トンネルにおいて、切羽観察記録の結果から評価される地山状態と、岩質判定の結果に基づいて決定される支保パターンとは必ずしも対応していない。そこで、まず切羽の地山状態を表す地山評価点を定義した。その上で、時系列の観点から地山評価点の分布、支保パターンの変更状況および補助工法の採用状況を示すことにより、地山状態と支保パターンおよび補助工法相互の関係を施工の実態を考慮して考察した。

**Key Words** : standard support pattern, assisting method, time series, heterogeneity, rock mass rating

## 1. はじめに

トンネルにおける地山評価は計画段階での地質調査や事前設計から施工、支保パターンの決定に至るまで共通の指標であり、工学上非常に重要である。しかし、地山評価は現状の地質調査における調査費の制約や技術レベルにより評価値の精度が不十分なこと、並びに事前設計時と施工時における評価要因が異なること等から、施工段階で変更される場合が多い<sup>1),2)</sup>。すなわち、現状のトンネル施工では事前設計時の地山評価の結果を踏まえて、施工段階での切羽観察や計測管理に準拠して実状の地山状態に対応した設計変更を行う、いわゆる観測修正法が取られている。

施工時の支保パターンの選定は、日常的に実施される切羽観察や内空変位に代表される計測管理に多くを依存しており、軟岩地山や特殊地山においては切羽観察はもとより、内空変位や天端沈下などの計測値が支保パターンの選定基準<sup>3)</sup>に積極的に導入されている。しかし、いわゆる硬岩地山では地山強度比が大きく、かつ内空変位量や天端沈下量も小さいことから定量的な地山評価基準を設定することは困難である。そこで、現状では専門技術者による切羽観察記録を主体とした地山評価やそれに基づく支保パターンの設定とならざるを得ず、日本道路公団（以下公団）では表一に示す切羽観察記録表を作成し、トンネル施工時の坑内観察を統一様式で実施している（以下、公団基準と略す）。しかし、この基準においても統一的な支保基準という立場から以下のような問題点が指摘されている。

1) 技術者の主観性：切羽観察による岩盤評価や支保

表一 切羽観察記録

㉔	切羽の状態	1. 安定	2. 壁面から岩塊が抜け落ちる	3. 壁面の押し出しを生ずる	4. 異音が自覚せず、崩れあるいは流出する
㉕	剥離面の状態	1. 自立(音積不要)	2. 時間がたつと緩み剥落しうる(後背積)	3. 自立困難瞬間後早期に支保する(先背積)	4. 崩際に先行して山を受けておく必要がある
㉖	圧縮強度	1. $\sigma_c \geq 1000 \text{ kgf/cm}^2$ ハンマー打撃はね返る	2. $100 > \sigma_c \geq 200 \text{ kgf/cm}^2$ ハンマー打撃でくだける	3. $200 > \sigma_c \geq 50 \text{ kgf/cm}^2$ 軽い打撃でくだける	4. $50 \text{ kgf/cm}^2 > \sigma_c$ ハンマー刃先食い込む
㉗	風化象徴	1. なし・健全	2. 岩目に沿って紫色強度やや低下	3. 全体に紫色、強度相違に低下	4. 土砂状粘土状砂岩当初より未固結
㉘	割れ目の状態	1. 間隔 $d \geq 1\text{m}$	2. $1\text{m} > d \geq 20\text{cm}$	3. $20\text{cm} > d \geq 5\text{cm}$	4. $5\text{cm} > d$ 脆弱、当初より未固結
㉙	割れ目の位置	1. 密着	2. 部分的に開口	3. 開口	4. 粘土を挟む、当初より未固結
㉚	割れ目の形態	1. ランダム、方形	2. 柱状	3. 層状・片状板状	4. 土砂状・鱗片状、当初より未固結
㉛	湧水	1. なし・浸水程度	2. 湧水程度	3. 集中湧水	4. 全面湧水
㉜	水による劣化	1. なし	2. 緩みを生ずる	3. 軟弱化	4. 崩壊・流出

(注) \*4:4でないいずれか

パターンの選定基準が専門技術者の経験的な主観に多くを依存している。

2) 切羽面の不均質性：原則として、1切羽面を見て切羽観察項目それぞれのランク分けは可能であるが地山の局所的な不均質性に関しては内容が特記事項として定性的に記述されるのみで統一的な表現方法がない。そのため、項目によっては評価値が特定出来ない場合がある。

3) 施工上の特性：最終的な標準支保パターンは施工性との対応により決定されるもので、部分的な岩盤不良は支保パターンを変更せずに補助工法で対応しており、逆に部分的に良好な岩盤に対しても施工管理や安全性の面から支保パターンを変更せずに施工を続行する場合が多い。

以上のように、硬岩地山の支保選定においては切羽観察における定量的な評価基準や補助工法の採用基準が明確でないことから、施工時の切羽観察結果を数値化した地山評価点<sup>4)</sup>と岩質判定の結果に基づいて決定される支保パターンとは必ずしも良く対応しているとは言えない。海外の代表的な岩盤分類であるRMR法やQシステム<sup>5)</sup>においても評価点方式を採用した定量的な評価法は示されているものの、国内の岩盤で適用した事例は少なく、支保選定の基準として十分に活用されているとは言いがたい<sup>6)</sup>。

\* 正会員 工修 山口大学助手 工学部社会建設工学科 (〒755 宇部市常盤台 2557)

\*\* 正会員 日本道路公団 福岡建設局 建設部工務課

\*\*\* 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

そこで筆者らは、切羽観察記録中の④～⑨項目（表1）各々についての評価値の合計（地山評価点）でトンネル切羽の地山評価を行うことを試みる。本論では、始めに切羽観察記録を利用した従来の研究を概観し、その傾向や問題点を考察する。その上で、まず公団により施工された硬岩トンネルを対象として岩種別に支保パターン毎の地山評価点の分布特性を示す。次に、黒色片岩に施工されたトンネルに限定して切羽毎の支保パターンの分布と切羽観察より得られる地山評価点および補助工法の採用状況の分布を連続的に示し、地山評価点と支保パターンおよび補助工法の関係を時系列の観点から検討する。さらに、切羽観察記録上の9項目と各種補助工法との関係、補助工法相互の関係を統計的手法を利用して考察し、施工時の支保工と補助工法との相関性に検討を加える。

## 2. 従来の研究

切羽観察記録は、地質学的な評価要素や工学的な評価要素を内包している点で利用価値は高く、従来よりトンネル施工時の地山評価を客観的に決定する目的で利用されている。この切羽観察記録についての従来の研究内容を大別すると以下の2つに分けられる。

a) 切羽観察記録を点数化し、定量的に地山を評価しようとする方法。

b) 同一の切羽を対象に公団基準の切羽観察記録に基づく評価とRMR法やQシステムの基準による評価を実施し、それらの相関性から地山を評価する方法である。

a) に関しては、データのばらつきを考慮せずに従来の判別分析による分類や<sup>7)</sup>、数量化理論Ⅰ類による支保パターンの予測・要因分析、数量化理論Ⅱ類による支保パターンの判別を行う方法<sup>8)</sup>、各切羽観察項目の支保パターンへの依存度を考慮して地山評価を行う方法<sup>9)</sup>なども試みられている。しかし、結果の工学的解釈の困難な場合がある<sup>9)</sup>、岩種・地域による格差があるなど課題は多い。

また、切羽観察記録は専門技術者の経験的な主観に依存した資料であるとの前提に、ファジィ理論を適用したトンネルの岩盤分類法も提案されている<sup>9)</sup>。

b) に関しては、公団基準の切羽観察記録を点数化した値とQシステムによる評価点の相関性を分析した後、逐次項目を修正しながらQ値に変換して地山を評価する試み<sup>10)</sup>、単純に同一の切羽を対象に公団基準による切羽観察記録とRMR法による切羽の評価を行い、両者各々と地山等級区分との相関性を対比したもの<sup>11)</sup>などがある。

しかし、いずれの場合も地山等級区分毎の切羽項目のばらつきの原因や現行の切羽観察において記載方法が明

表-2 標準支保パターン

地 質 種 別	一 層 厚 尺 (m)	ロックボルト				鋼製支保工		吹 付 厚 (cm)	覆工厚 (cm)	変形余裕量 (cm)			
		長 さ (m)	施 工 間 隔 (m)		上 部 (部)	下 部 (部)	達 込 間 隔 (m)			上 部 (部)	下 部 (部)		
			方 向	延 長 方 向									
B	上平工法	2.0	3.0	1.5	2.0	なし	なし	—	5	30	0	0	0
C I	上平工法	1.5	3.0	1.5	1.5	なし	なし	—	10	30	0	0	0
C II	上平工法	1.2	3.0	1.5	1.2	H 125	なし	1.2	10	30	0	0	0
D I	上平工法	1.0	4.0	1.2	1.0	H 125	H 125	1.0	15	30	45	0	0
D II	上平工法	1.0以下	4.0	1.2	1.0以下	H 150	H 150	1.0以下	20	30	50	10	0

表-3 補助工法一覧表

補助工法 A	補助工法 B
先受け工 (ファットラフ工) 先受け工 (鉄矢板、鋼矢板) 鋼地盤締め部材工 ミニパイプルーファ工 鋼吹き付工 鋼出め部材工 切羽傾斜	(水抜き工) 排水工 圧気工法 鋼板挿入工法 パイプルーファ工 凍結工法 特殊鋼矢板推進工法 鋼板締地工法 遮断壁工法

確となっていない切羽面の不均質性に関する検討は十分なされていない。この点、筆者らは先の論文で<sup>12)</sup>切羽面の岩盤評価は局所的な不良条件に左右される度合いが高く、専門技術者は不良条件を考慮した上で地山評価の総合判断を行っていることの可能性を示した。この際、岩盤不良に対する現場での対応策は設計変更が主たるものの補助工法に依存した短期的な安全性確保の度合いも高いものと考えられる。すなわち、NATMの施工においては補助工法の役割は大きく、都市部の極軟弱な土砂地山を対象としたNATM施工が可能<sup>13)</sup>となった背景には補助工法の研究開発に負う処が大きい。しかしながら、施工時の支保パターンと補助工法の採用状況を各々個別に検討した例<sup>8)</sup>は見られるものの、施工の実態を考慮して両者の関係を具体的に考察したものは見られない。ゆえに、補助工法採用の特徴や妥当性を評価することはNATMの適用限界を知る上でも重要であろう。

そこで、本研究では本文1.で示した切羽観察記録の問題点を以下のように考え、従来の研究における問題点を考察した。

1) については、専門技術者により基準は異なるもの一現場を連続的に追って行けば専門技術者の技術的判断には一定の傾向がある。

2) については、切羽の不均質性は切羽観察9項目のいずれかに従属し、間接的に地山評価点に反映される。

3) については、施工手順に沿って、支保パターンの変動を示し、同時に支保工とは独立した形で補助工法の採用状況を示すことで地山評価点と支保パターンおよび補助工法の相互の関係を明らかにできる。

## 3. トンネル施工時に得られる諸情報

(1) 切羽観察記録と支保パターンおよび補助工法 研究の対象とした公団のNATM標準支保パターンは

表-4 切羽観察記録および補助工法のデータ例

切羽	切羽観察項目									評価点	補助工法						地山等級
	④	③	②	①	⑥	⑤	④	③	②		①	①	②	③	④	⑤	
1	1	2	2	2	1	2	2	1	1.2	2	14.5						B
2	2	2	2	2	2	3	2	1	2	1	17						B
3	1	2	2	2	2	2	1	1	3	1	15	有					C I
4	2	2	2	2	2	2	2	1	3	1	17						C I
5	2	2	2	2	2	3	2	2	1.2	1	17.5						C I
6	2	2	3	3	3	2.3	2.3	3	3	2	23		有				C II
7	2	2	3	3	2	3.4	2	3	3	2	22.5						C II
8	2	2	2.3	2	3	2.3	3	2	1	1	20						C II
9	2	2	3	3	3	3	3	2	1.2	2	21.5						D I
10	2	2	3	3	3	3	3	1	1	1	21						D I
11	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	35	有		有			D I
12	4	4	4	4	4	4	4	1	1	1	30	有		有			D II
13	4	4	3	3	3.4	3	3	2	1	1	26.5		有		有		D II

- ①鏡吹き付け
- ②鏡止めボルト
- ③リングカット
- ④縫地斜めボルト
- ⑤水抜き工
- ⑥薬液注入

注)  
補助工法については、統計解析に際して次のように数値を対応させた  
無: 1  
有: 2

表-2に示すとおりであり、表中にない地山等級A, Eに関しては地山条件を考慮して別途支保パターンを設計するものとしている。経験的手法においては、施工時に表-1の観察項目に従って切羽を観察した後、計測管理データをも踏まえて経験的主観に基づいて支保パターンを決定する。なお、表-1の観察項目はトンネル地山評価上で最も重要と考えられる9項目に限定して分類されたもので、表に記述されていない多くの要因も専門技術者の経験的な判断でいずれかの項目に反映して評価されているものと考えられる。また各切羽位置での支保パターンは地山等級区分に準じて決定されるもので、地山の状態によっては表-3に示す補助工法を適宜採用することによって施工時の安全性が確保されている。既存資料<sup>14)</sup>によれば、NATM施工においては鉄道トンネルで50%、道路トンネルでは実に67%ものトンネルで何らかの補助工法が採用されている。

ここで、本研究で対象とする補助工法の考え方は以下のとおりである。まず、補助工法は原則として施工時のみに効力を発揮するもので、施工後の支保効果は一般に期待されない。補助工法と特殊工法とに分類した場合、一部混同して記述されている工法も存在するが<sup>15), 16)</sup>、ここでは対象としたトンネルに用いられたものがかなり限定されていることから前出資料<sup>14)</sup>による補助工法Aのうち、鏡吹き付け、鏡止めボルト、リングカット、縫地斜めボルトの4工法、補助工法Bのうち、水抜き工、および薬液注入の2工法の計6工法のみ取扱う(表-3中に網目で示す)。なお、補助工法A, Bの境界は通常の施工で使用される設備機械で対応可能か否かとされている。

(2) 地山評価点の定義と岩種別の地山評価点の分布特性

前述したように、切羽観察に基づく地山評価点より地山区分を行う方法は単純加算や重み付き加算などもあるが、切羽の岩盤性状を簡潔に表現するには単純加算で十分と言う指摘もあり<sup>6)</sup>、本研究においても現行の切羽観察自体を見直すことを目的としたものではない。ゆえに、切羽観察9項目のそれぞれのランク値を単純加算したものを地山評価点と定義する。

表-5 岩種毎のデータ特性一覧表

岩種	項目	B	C <sub>I</sub>	C <sub>II</sub>	D <sub>I</sub>	D <sub>II</sub>	備考
粘板岩	データ個数	-	-	23	131	51	データ数
	平均値	-	-	18.4	21.3	26.9	205
	標準偏差	-	-	2.61	3.15	2.29	
花崗岩	データ個数	-	5	101	92	20	データ数
	平均値	-	22.4	23.6	27.6	30.3	218
	標準偏差	-	1.02	2.91	2.27	4.09	
黒色片岩	データ個数	25	67	290	293	58	データ数
	平均値	15.1	16.7	20.5	24.1	27.5	733
	標準偏差	2.59	2.90	3.50	4.80	4.57	

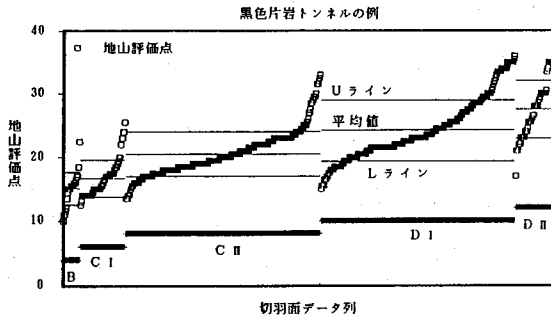
表-6 基礎統計量(黒色片岩)

地山区分	B	C <sub>I</sub>	C <sub>II</sub>	D <sub>I</sub>	D <sub>II</sub>	合計(範囲)
データ数	25	67	290	293	58	733
平均値	15.1	16.7	20.5	24.1	27.5	15.1~27.5
標準偏差	2.59	2.90	3.50	4.80	4.57	2.59~4.80
最小値	10.0	12.5	13.5	15.0	17.0	10.0~17.0
最大値	22.5	25.5	33.0	36.0	35.0	22.5~36.0
平均値-σ	12.5	13.8	17.0	19.3	22.9	12.5~22.9
平均値+σ	17.7	19.6	24.0	28.9	32.1	17.7~32.1

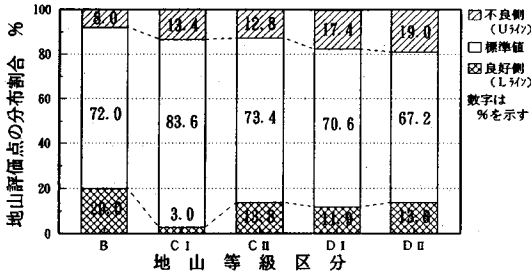
今回利用したデータの一例を表-4に示した。このようにある切羽に対して切羽観察項目④~①の9項目とその合計の地山評価点が決定し、さらに補助工法である鏡吹き付けなどの6項目の採用の有無が対応した形で1つの切羽データが得られる。表で項目によってはランク値が2, 3等の2つ以上に及んで選択されているものは切羽面の不均質性を多ランク選択することで表現していることを示している。なお、各地山等級区分に対応する支保パターンはA~D<sub>II</sub>の6段階とし、D<sub>II</sub>以下(例えばD<sub>IIIa</sub>)はすべてD<sub>II</sub>に含めて分類した。

そこで、中国地方の代表的な堆積岩、火成岩および変成岩地山に施工されたトンネルについて切羽データを集集し、地山等級区分毎の地山評価点を算出し、取りまとめたものを表-5に示す。

表に示すように岩種により地山等級毎の地山評価点の平均値や標準偏差が異なっており、各々ばらついている。このことは既にトンネルにおける岩盤評価の決定要因が岩種により異なることが指摘されていることから、当然の結果である。しかし、地山等級間で重複する範囲が存在することは共通である。従って、本研究では地山等級区分が広範囲に分布し、かつ収集データが最も充実している黒色片岩トンネルに限定して以降の考察を行う。表-6、および図-1は黒色片岩トンネルについて詳細に



図一 黒色片岩トンネルの分布例



図二 異常値の分布割合

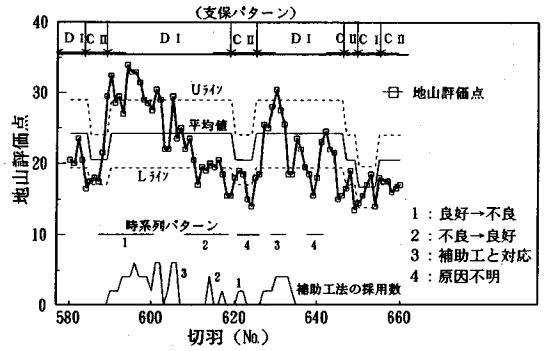
示したものである。表一6では、地山等級区分別にデータ数、地山評価点の平均値および標準偏差、データの分布範囲を示している。それらの基礎データに基づいて、地山等級区分別に地山評価点の小さい切羽より連続的に示したものが図一1である。図中でUラインは各地山等級区分における地山評価点の平均値+標準偏差、Lラインは平均値-標準偏差を示し、以後この範囲の外側に分布するデータを異常値と称する。図より各地山等級区分毎で地山評価点の平均値は段階的に異なるものの、個々の地山評価点を見るとかなり重複する部分があり、D<sub>I</sub>に属する切羽でも2ランク異なるC<sub>I</sub>に相当する地山評価点を示すものもある。図二は異常値の分布割合を地山等級区分毎に示したもので、約16~33%の切羽で異常値を示す。

#### 4. 時系列の観点から見た支保パターンおよび補助工法の採用過程

##### (1) 事例にみる地山評価点、支保パターンおよび補助工法の分布特性

切羽面の観察記録は岩質判定時に必ず行われ、また日常の施工業務においても1日1回は実施される作業であり、トンネル延長方向に2~5m置きに得られる。

図一3は例として取り上げた黒色片岩トンネルの一部について時系列の観点から施工時の支保パターン、支保パターン毎の地山評価点の平均値、Uライン、Lラインおよびその切羽の地山評価点、異常値の時系列パターン、補助工法の採用数を示したものである。地山評



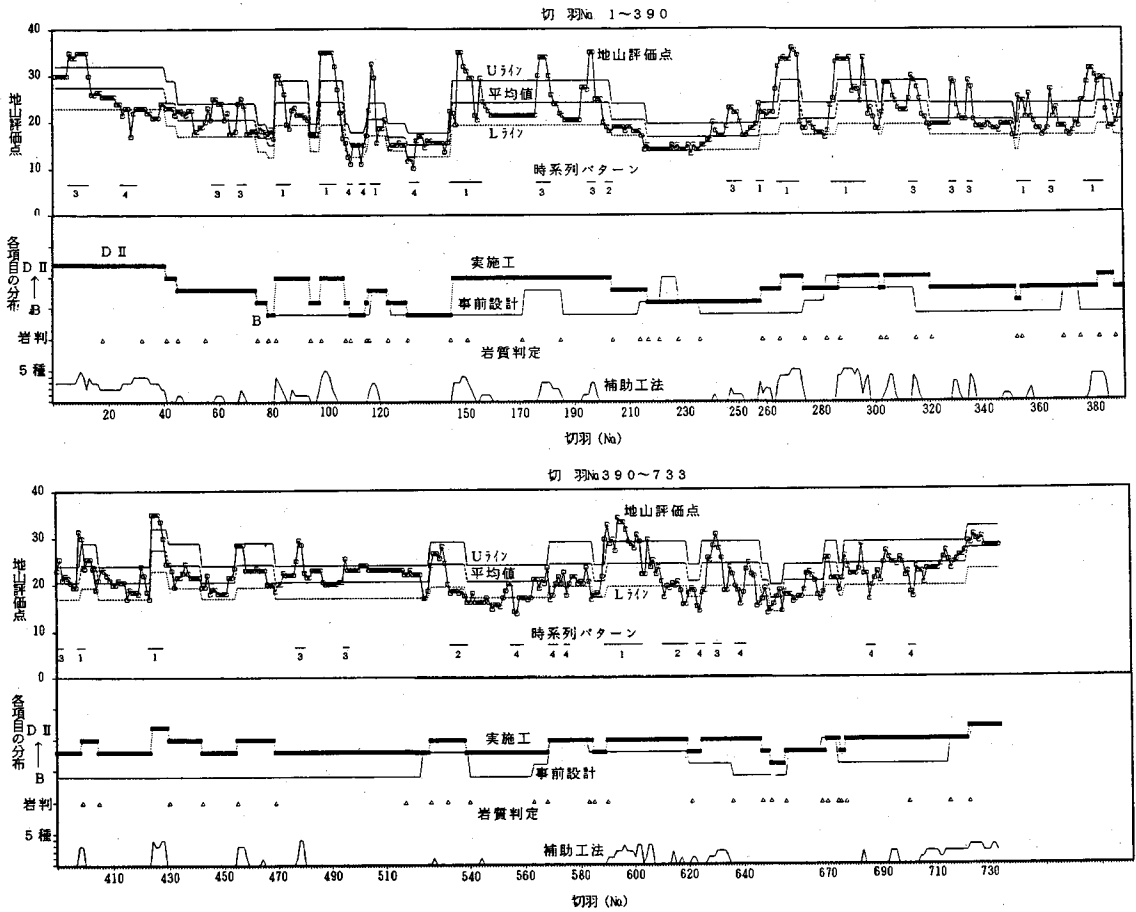
図三 時系列による地山評価点の分布パターン

価点における異常値の分布位置は図の4種の時系列パターンに大別され、支保パターンが上方側および下方側に変更される地点(時系列パターン1, 2)と支保パターン一定の地点(時系列パターン3, 4)で観測される。これら異常値出現の背景と異常値発生前後の各指標値の変化を事例を基に考察する。

図一4は図一3に示したトンネルの全体に関して時系列の観点から、施工時の支保パターン毎の地山評価点の平均値、Uライン、Lライン、各切羽観察から得られる地山評価点および時系列パターンを上図に、また、下図には事前設計および実施工での支保パターン、岩質判定位置、ならび補助工法の採用状況を連続的に示したものである(切羽面、計733地点)。なお、この事例では日常の地山評価は原則として同一の技術者が行っている。

図より各指標値の分布特性を比較すると以下のようなになる。まず、1~80切羽付近までは、坑口からトンネル一般部にかけての区間であり、地山評価点が若干ばらつく反面、局所的に地山評価点の大きな部分は補助工法で対応している。すなわち、坑口付近は比較的事前地質調査も入念に行われているために事前設計が十分に生かされた形で施工が進捗している。また、この区間でさらに着目すべき点はD<sub>II</sub>地山に分類される特殊区間(1~40切羽)で、ここは全区間において複数の補助工法が併用されている。

次に、80~130切羽付近を見ると、事前設計ではB等級に評価されているにもかかわらず、実施工ではD<sub>I</sub>に変更され3ランクも重い支保工となっている。しかも設計変更が頻繁になされており、1つには事前の予測と実岩盤の状態が大きく違ったこと、また1つはトンネル掘削においては特殊区間から一般部への遷移区間でもあり、まだ施工が軌道に乗っていない等の理由によるもので、いわば施工における慣らし区間であることがわかる。ここでも、補助工法が多用されており、時系列より見た地山評価点の凸部と補助工法の採用状況とは非常に良く対応している。



図—4 黒色片岩トンネルの時系列分布特性

130～140 付近は事前設計と実施工は一致している。その後、146 切羽で再び地山評価点が跳ね上がる。この地点においても地山評価点が一時的に高い所は設計変更と同時に補助工法を多用して切り抜けている。220 まで局所的に不良部分も見られるが、また補助工採用で切り抜けている。すなわち、地山評価点の局所的な高まりは支保パターンの変更の有無にかかわらず、何らかの補助工法を採用していることが明確である。

次に、220～230 区間で一部事前設計が D<sub>I</sub> なのに対して実施工では C<sub>I</sub> で行っており、安全側に施工されていた前切羽までとは異なった傾向を示すが、これは事前の地質調査でリニアメントが確認されていたために安全側の設計がなされていたためである。

以下、同様に時系列で追っていくと地山評価点における U ラインを突出した部分がほぼ補助工法の採用と対応していることは明瞭であり、時系列で示すと地山評価点の異常値の発生パターンを分類できる。

(2) 時系列による異常値の発生パターン分類

図—4 に示した事例を基に、4 パターンの特性を表—7

表—7 時系列による 4 パターンの特性一覧表

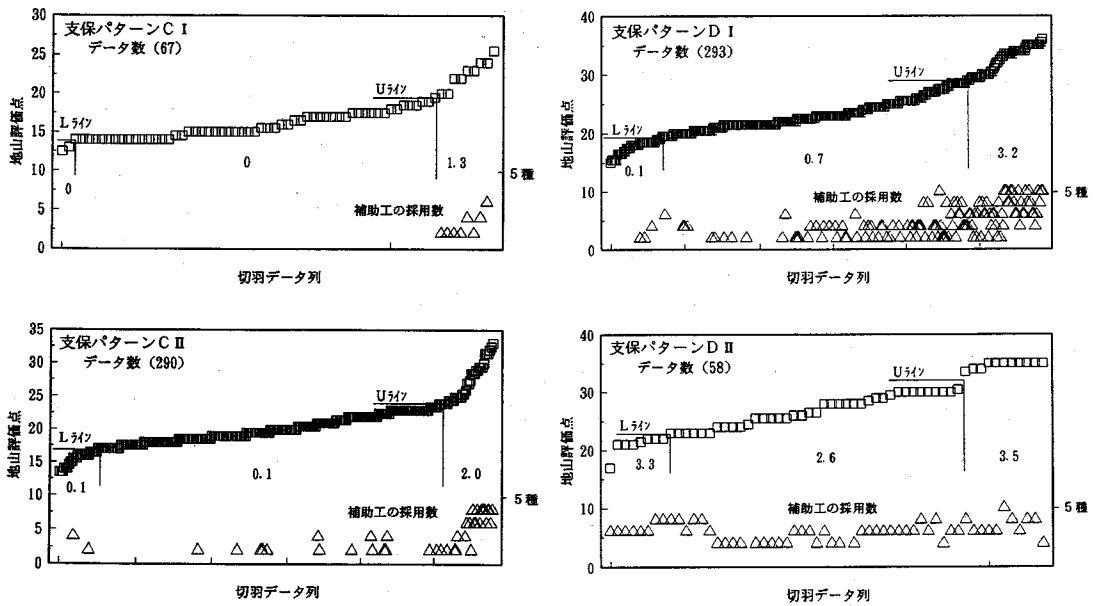
施工状態	地山状態	時系列パターン	箇所数	備考
支保パターン 変更点	良好—不良	1	12	補助工の採用と対応
	不良—良好	2	3	Lライン下のみの切羽
支保パターン 一定	主に不良側	3	14	補助工の採用と対応
	主に良好側	4	11	主に本文 5 で考察

に分類した。施工の実態を考慮し、各パターンの特徴を考察すると以下のようである。

a) 支保パターンの変更点前後の特性

切羽の岩盤状態が明らかに変化すると判断される位置で、岩質判定に基づいて支保パターンの変更がなされる。この際、地山等級区分が不良側に移行する場合(表—7 の 1 行目の時系列パターン 1)には施工の安全性を加味し、速やかに地山等級および支保パターンの変更がなされるようである。本パターンは 12 例示され、地山評価点の急増と補助工法の採用数は良い対応を示す。(図—3, 4 の時系列パターン 1 に対応)

支保パターンの変更点において地山等級区分が良好側



グラフ内の数字は各区間における  
(補助工法の採用数/1切羽)を示す

図—5 支保パターン毎の地山評価点と補助工法数の関係

に移行する際には、施工の安全性を配慮して地山評価点  
が良好側に評価されても地山状況が安定するまでは地山  
等級区分や支保パターンの変更は見送られているようで  
あり、結果的にLライン以下の地山評価点を示す切羽  
がこの部分に集中する(図—3, 4で時系列パターン2  
に対応)。

b) 支保パターンの一定区間での異常値

標準支保パターンが一定でも切羽観察より得られる地  
山評価点が異常値を示す箇所が存在する。原因が明らか  
な例としては局所的な岩盤不良などが切羽観察項目のラ  
ンク値に反映した場合で表に示すように補助工法の採用  
と対応づけが可能である(図—3, 4で時系列パターン  
3に対応)。

また、主に地山評価点が良好側に分布する切羽に関し  
ては図—4の時系列分布からでは要因分析は困難であり、  
(図で時系列パターン4に対応)この点に関しては  
本文5.で切羽観察項目や特記事項から別途考察する。

5. 時系列による4パターンの特性評価

(1) 時系列パターン1, 3の特性

前節で示した地山評価点がUラインよりも高く評価  
される場合(時系列パターン1, 3)について、補助工  
法採用との関係を検討する。

まず、支保パターン毎の地山評価点の分布と補助工法  
の採用状況を図—1と同様にプロットした(図—5)。C<sub>I</sub>、  
C<sub>II</sub>についてUラインより不良側に評価された地山で補  
助工法が多用されていることが示される。この区間(U

ラインより上)ではC<sub>I</sub>で1切羽当たり1.3種、C<sub>II</sub>で  
1切羽当たり2.0種の補助工法が採用されている。D<sub>I</sub>  
に関しても同様であるがC<sub>I</sub>、C<sub>II</sub>ほどUラインでの区  
分は明瞭でなく標準区間でも1切羽0.7程度の補助工法  
が使用されている。C<sub>II</sub>とD<sub>I</sub>パターンの相違は下半部  
に鋼製支保工を使用するか否かの境界であり、D<sub>I</sub>地山  
では変状対策を下部まで行う必要のある地山である。地  
山分類表でもC<sub>II</sub>とD<sub>I</sub>の境界は明瞭に区分されている<sup>15)</sup>。

一方、地山等級区分D<sub>II</sub>に至っては坑口付近を含む特  
殊区間であり、地山評価点の大小に係わりなく、1切羽  
当たり2.6~3.5種の補助工法が施されており、施工面  
での安全対策を十分行っていることが分かる。

図—6、図—7は時系列パターン1, 3別に異常値(こ  
の場合Uラインより上のみ)を示す切羽における地山  
評価点とそれに対応する支保パターンの地山評価点の平  
均値を引いたものを横軸に、また同一の切羽で採用され  
た補助工法の総数を縦軸にプロットしたものである。両  
パターンはいずれも正の相関を示しており、地山評価点  
と対応支保パターンの平均地山評価点との差と補助工法  
の採用総数は有意な関係にある。

(2) 時系列パターン2, 4の特性

一方、時系列分布において地山評価点がLラインよ  
り低く評価されている場合は、支保パターン変更点で支  
保が軽減される場合(パターン2)と、支保パターンが  
一定でも局所的に異常値が出現する場合(パターン4)  
がある。パターン2に関しては、前述したように施工時

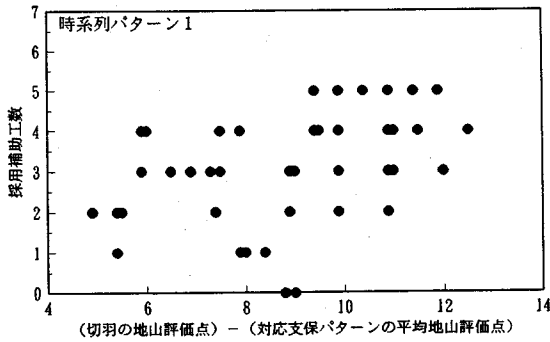


図-6 地山評価点と補助工法採用数との関係 (時系列パターン1)

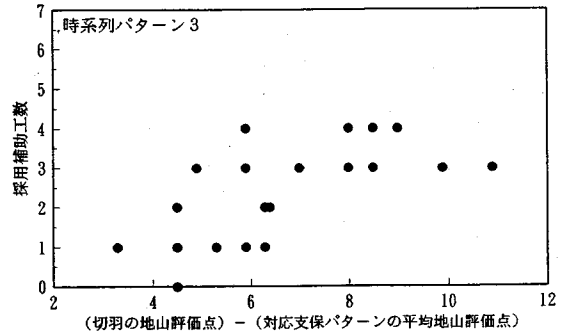


図-7 地山評価点と補助工法採用数との関係 (時系列パターン3)

表-8 切羽観察記録における特記事項 (良好側に評価された切羽の例)

切羽 (No.)	地山区分	評価点	特記事項	対象区分	切羽 (No.)	地山区分	評価点	特記事項	対象区分
27	D <sub>II</sub>	23	踏前に硬質な黒色片岩 踏前にアブライトが成長 中央部でアブライトが成長	D <sub>I</sub>	583	D <sub>I</sub>	20.5	板状~柱状で一部層状となる。軽打で破碎 天端付近に一枚岩。強打でブロック状に破碎 柱状~板状で粘土を薄く挟む	D <sub>I</sub>
*28	"	17			*584	"	16.5		
29	"	22			*585	"	17.5		
107	C <sub>I</sub>	15.5	中央部は堅固。片理発達 石英斑岩が全面に。堅硬 石英斑岩が全面に。堅硬で緻密 半分以上が黒色片岩となる。比較的堅硬	B	610	D <sub>I</sub>	20.5	粘土層を薄く挟む。板状~ランダム状で堅固 板状~ランダム状。軽打で破碎 板状~ランダム状。軽打で破碎。湧水程度の湧水	D <sub>I</sub>
*108	B	11			*611	"	17		
*109	B	15			612	"	19.5		
112	B	15	割れ目も密着しており。比較的堅硬 堅硬な黒色片岩が全面。片理面は密着して安定 山側は堅硬であるが。節理が目立ってくる	B	622	C <sub>II</sub>	18.5	ランダム状。集中湧水 板状~ランダム状。ハンマー強打にて破碎 柱状~ランダム状。ハンマー強打にて砕ける~跳ね返る 全面的に粘土を含み。破碎状。ハンマー刃先食い込む	C <sub>II</sub>
*113	"	11			*623	"	15		
114	"	15			*624	"	14		
232	C <sub>I</sub>	15	ホルンフェルス化し。節理発達 ホルンフェルス化し。節理発達 ホルンフェルス化し。節理発達。表面風化	C <sub>I</sub>	644	C <sub>II</sub>	21.5	土砂状。湧水程度の湧水。片状 板状~ブロック状。強打で跳ね返る 湧り程度の湧水。石英をかみ堅固。強打で跳ね返る 一枚岩。湧り程度の湧水。石英をかみ堅固。強打で跳ね返る 湧水程度の湧水。強打で破碎	C <sub>II</sub>
*233	"	13			*645	"	15		
234	"	15			*646	"	15.5		
*523	C <sub>II</sub>	13.5	ハンマー強打でブロック状。縦断方向に一枚岩 ハンマー強打でブロック状。割れ目はランダム ハンマー軽打で破碎。粘土状	C <sub>II</sub>	*647	"	16.5	ランダム状。節理優勢。一部層状~板状となる ランダム状の節理優勢で一部層状~板状となる	C <sub>I</sub>
524	"	17			648	"	19		
525	"	18.5			653	C <sub>I</sub>	18.5		
555	C <sub>II</sub>	20	茶褐色に変色。板状でハンマー強打でブロック状に破碎 ランダム状に節理が発達 ランダム状の節理優勢。一部層状~板状となる ランダム状の節理優勢で一部層状~板状となる	C <sub>II</sub>	*654	"	14	湧水程度の湧水。ハンマー強打で砕ける ランダム状。ハンマー強打で砕ける程度 湧水程度の湧水。ハンマー強打で砕ける	C <sub>I</sub>
*556	"	14			685	D <sub>I</sub>	22		
*557	"	13.5			*686	"	16.5		
558	"	17	687	"	19.5				
568	C <sub>II</sub>	23.5	節理発達。軽打で節理沿いに。強打でブロック状に破碎 堅固な岩。強打で節理沿いに破碎。ブロック状節理あり 茶褐色に変色し。ハンマー打撃にて節理沿いに破碎 板状。油目。小さく破碎。一部ランダム状節理あり	D <sub>I</sub>	700	D <sub>I</sub>	22.5	全面粘土付着。ハンマーで容易に破碎。一部刃先が食い込む 破碎部なくなり。片状の節理発達。比較的均質。 破碎部なくなり。片状の節理発達。比較的均質。 土砂を挟む。軽打で破碎	D <sub>I</sub>
*569	D <sub>I</sub>	16.5			*701	"	18		
*570	"	17.5			*702	"	17		
571	"	20			703	"	23.5		
574	D <sub>I</sub>	22.5	板状~ランダム状。薄く粘土を挟む。軽打で容易に破碎 板状~ランダム状。一部ブロック状。薄く粘土を挟む ブロック~ランダム状。軽打で破碎する部分と跳ね返る部分あり	D <sub>I</sub>	*印はライン下の異常値を示す切羽面				
*575	"	17.5							
576	"	20							

の安全性を第一に考慮した結果と理解されるが、パターン4に関しては補助工法に対応するような客観的な指標値は見い出せず、パターン4の考察に当たっては切羽観察記録の特記事項からキーワードを抽出して検討する。

一覧表は表-8に示す。異常値を示す切羽の前後に関しても特記事項を抽出したのは、前後でどの程度の差が観測されるかを確認するためである。

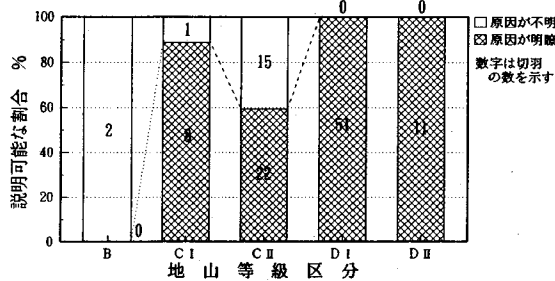
まず、支保パターンBが施工された切羽2例(切羽No.107~110, 112~114)について見ると石英斑岩という異質な岩盤の出現、堅硬などのキーワードが目立つ。切羽観察項目(表-1)の連続性を見ても圧縮強度◎が特に良好に評価されている。C<sub>I</sub>パターンは2例(切羽No.232~234, 653~655)示されている。前者はホルンフェルス化により割れ目の状態Ⓔが良好側に、後者の例では割れ目がランダム状Ⓒに発達して滴水がないⒼこと

から地山評価点が良好に評価されている。しかし、前者の例では1つ前の切羽と同一の記述となっている。

次にC<sub>II</sub>については4例(切羽No.523~525, 555~558, 622~625, 644~648)見られるが板状~ランダム状、ハンマー強打でブロック状などの記述が目立つ。しかし、特記事項から前後の切羽と区分することは非常に困難であり、わずかに後者1例で湧水が少な目とされていることが判別基準と考えられる。

D<sub>I</sub>は6例示されており、切羽観察項目個々(表-1)のランク値を前後の切羽で対比しても◎~Ⓔ項目に及んで不規則に良好な評価がなされており、共通に良好側に評価されている項目を特定することはできない。

D<sub>II</sub>は1例を示した。ここではアブライトと言う異質な岩盤の出現がポイントとなり、この岩盤の一時的な出現により圧縮強度◎、風化変質Ⓔ、割れ目の程度Ⓖや形



図—8 異常値切羽の判別度合い

態⑥が良好に評価されている。

以上の考察より、地山評価点が局所的に良好と評価されている切羽においては特記事項の対比から幾つかの事例で異常値の原因を定性的に把握できた。一つは異質な岩盤の出現であり、また割れ目の形態・滴水の程度である。しかし、一方で特記事項が同一であるにもかかわらず異常値を示す切羽が存在することも事実である。ただ、いずれの場合も支保軽減までには至っておらず、時系列でも示したように良好な切羽がある程度続かない限り施工の安全性を重視し、支保変更は見送られる傾向にある。

### (3) 補助工法との対応で異常値の出現が説明可能な割合

ここでは具体的に前出図—2の不良部分について、時系列分布の特性(時系列パターン1, 3)によりどの程度異常値を示す切羽を説明できるかを示す。結果は図—8のとおりであり、B等級を除いては60~100%のデータについて補助工法との対応で異常値発生の原因を説明することが可能であり、全体的には約80%以上を占める。特に異常値の最も多く分布しているDⅠパターンは補助工法との対応ですべて説明可能である。

## 6. 補助工法に関する詳細検討

### (1) 切羽観察項目9項目と補助工法の関係

本節では、切羽観察項目と補助工法の採用状況の関係および補助工法相互の関係を検討することで、経験則に基づく補助工法の選択特性を考察する。まず、切羽観察項目④~⑩と補助工法の関係を重回帰分析により解析した。ここでは、便宜上地山評価点を目的変数に、切羽観察記録9項目および補助工法6種、計15を説明変数とした同定式を仮定した。図—9はその結果得られた相関係数を支保パターン毎に示したものである。図に基づいて、切羽観察項目と各種補助工法採用の関係を考察する。

B等級に関しては補助工法を必要としない。

CⅠパターンでは鏡吹き付け、縫地斜めボルトおよび水抜き工が採用されている。地山評価点と各種補助工法の相関性を見ると、高いものから縫地斜めボルト、鏡吹き付け、水抜き工の順となっており、縫地斜めボルトは相関係数0.70以上で最も高い相関性を示す。すなわち、

表—2に示されるように、CⅠ、CⅡ標準支保パターンの相違は上半部に鋼製支保工を使用するか否かがポイントとなっており、CⅠで上半部に鋼製支保工を施工しない分、短期的な天端付近の安定性を縫地斜めボルトに依存している可能性が高い。項目別で見ると、風化変質⑩に対しては縫地斜めボルト、水による劣化①に対しては縫地斜めボルトや、鏡吹き付けで対処している。なお、素掘面の状態⑥はほとんど2ランクにあるため、補助工法採用とは無相関となっている。

次にCⅡパターンについて見ると地山評価点と鏡止めボルト、縫地斜めボルト、鏡吹き付けの順で高い相関性を示しており、上半部で鋼製支保工を使用する分、切羽前方の安全対策が主流になって来ている。DⅠパターンはロックボルト長が4.0mでしかも鋼製支保工を上半部に採用するものである。そのため、鏡吹き付け、鏡ボルトと地山評価点の相関性が高く、切羽前面の自立性を確保しながら施工されているものと考えられる。切羽観察項目とは水による劣化①や素掘面の状態⑥が高い相関性を示し、水による軟弱化や崩壊・流出および風化変質にどう対処するかが施工面での課題となっていることが伺える。

DⅡパターンはDⅡ以下すべてを含み、しかも前述したように地山状態が良くても土被り厚が浅い場合に採用されるパターンである。さらに、前節でも記述したように地山評価点の大小によらず何らかの補助工法が採用されている。図—9によれば、薬液注入を始め、本文で取り上げた全補助工法を採用しているが、地山評価点との対応を見ると鏡止めボルトが最も相関性が高く、逆に水抜き工とは⑩項目以外は負の相関性を有している。また、切羽観察項目個々の関係について最も相関の高い項目同士から列挙すると薬液注入と切羽の安定性④、鏡止めボルトと水による劣化①や、割れ目の形態⑥、鏡吹き付け、鏡止めボルトと風化変質⑩となっている。水抜き工に関しては、この工法自体が直面している切羽の状態に対処するためのものではなく、水抜きを目的とする他に切羽前方の地質予測を目的に実施されるために、施工位置の切羽状態と直接対応しないことは十分考えられる。また、薬液注入が切羽面の安定性や周辺構造物の沈下防止等の目的として適宜利用されることから、DⅡ地山での使用頻度が高いことも理解できる。

### (2) 補助工法相互の関係

次に補助工法間の相関性、すなわち併用される場合の傾向について考察する。統計解析の結果から求まる各補助工法間の相関係数を表—9に示す。表中では、相関係数が0.6以上、0.6~0.4、0.4未満の場合を分けて示している。表—9より、相関係数0.6以上を示す相関性の高い鏡吹き付けと鏡止めボルトはともに切羽前面の安定性を確保するための工法で補助工法としては最も簡易な



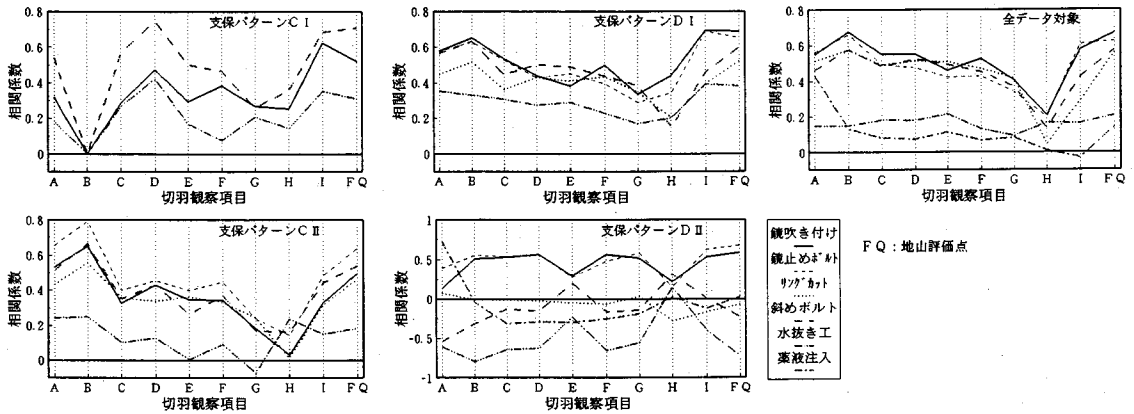


図-9 切羽観察項目と各種補助工法との相関性

表-9 補助工法相互の相関性

補助工法	①	②	③	④	⑤	⑥	備考
観吹き付け ①	1.000						
観止めボルト ②	0.618	1.000					
リフトネット ③	0.460	0.419	1.000				
斜めボルト ④	0.520	0.500	0.515	1.000			
水抜き工 ⑤	0.211	0.284	0.333	0.358	1.000		
薬液注入 ⑥	0.015	0.008	0.287	0.081	0.030	1.000	

■ 0.6以上 □ 0.4未満

ものである。そのため、併用の度合いが高いことも当然の結果である。表には支保パターン毎の結果は示していないが、特にC<sub>II</sub>パターンでの相関が高く、C<sub>II</sub>では上半部に鋼製支保工を使用することから、天端部は保護され主に切羽前方の地山状態に着目して掘削を進めているためと想定される。また、同じく相関性の高いリングカットと縫地斜めボルトの併用はD<sub>I</sub>パターンで最も高く、同パターンにおいては切羽前面の安定確保と天端部の安定の両方を重視した施工がなされている可能性を示唆している。

他方、相関性の低い補助工法の組み合わせは水抜き工または薬液注入と他5工種の補助工法すべてであり、これら2工法は単独で採用されるか、または特殊なケースで他と併用されている可能性が高い。

## 7. おわりに

切羽観察記録は専門技術者の主観が含まれるものの、施工時に肉眼にて切羽観察を行って得られるものであるから、現行の施工管理上かなり信頼性が高い資料と考えられる。しかし、本文1.で示した問題点を有しているため、切羽観察記録と支保パターンとは必ずしも整合性が取れているとは言えない。本研究では、これらの点を踏まえ、まず施工時の切羽観察記録より得られる地山評価点のばらつき要因を標準支保パターンと補助工法の採

用状況を時系列でプロットすることによって説明できることを示した。さらに、専門技術者の経験則に基づいて適用される補助工法の採用傾向を統計解析の結果から検討した。

本研究の成果をまとめると以下のとおりである。

1) 各指標値を時系列の観点から示すと、地山評価点における異常値の発生パターンは支保パターン変更点で地山状態が「良好→不良」および「不良→良好」に変わる場合（それぞれ時系列パターン1, 2に対応）、さらに支保パターン一定区間で局部的に不良側（時系列パターン3）、または良好側（時系列パターン4）に評価される場合の4種に分類される。各々の特性を示すと次のようになる。

a) 時系列パターン1：地山状態が不良側になることから、施工の安全性を重視し、速やかに支保パターンの変更がなされる。この位置での地山評価点の急増と補助工法の採用数は良い対応を示す。

b) 時系列パターン2：地山状態が良好側に評価されてもすぐには支保軽減がなされず、切羽が良好側に安定するまでは支保変更は見送られる。これも施工上の安全性を配慮した結果と考えられる。

c) 時系列パターン3：前後の地山状態に比較して局部的に不良と評価された場合であり、その結果が地山評価点に反映している。しかし、支保パターンの変更までには至っておらず、補助工法の一時的な採用で施工時の安全性を確保している。

d) 時系列パターン4：対象区間で支保パターンが一定にもかかわらず、地山評価点が良好側に評価される場合であり、時系列の観点から要因を分析することは困難であった。

2) 時系列パターン1, 3に関しては、地山評価点の異常値と補助工法の採用数との関係に明確な対応がみられ、異常値を示す切羽のうち、80%以上がこれらの関係から説明可能である。支保パターン別ではC<sub>I</sub>やC<sub>II</sub>

で特にその傾向は顕著であり、Uラインより高い地山評価点を有する切羽では何らかの補助工法が採用されている。

3) しかし、時系列パターン2, 4に関しては切羽観察記録の特記事項やスケッチなどからキーワードを抽出することによりある程度の定性的な評価はできるが補助工法に匹敵するような客観的な指標は見い出せなかった。

4) 補助工法の詳細検討においては、鏡吹付けと鏡止めボルトと切羽観察記録9項目のうち素掘面の状態⑥、水による劣化⑦が高い相関性を示したが、補助工法全般と湧水⑧は相関性が低い。また、補助工法Bに分類される水抜き工と薬液注入は単独で採用される場合が多いことが示された。

本研究においては収集データの制約上、支保パターンの変更か補助工法の採用かにおける具体的な判断過程を明らかにするまでには至らなかった。また、1トンネルに限定した評価となったことも事実である。しかし、ここで評価要因として提案した切羽面に関する不均質性の定量的評価が可能となれば、補助工法の採用過程を客観的に評価できるシステムの構築も可能であると考えられる。

最後に、本研究を行うに際して、ご協力を頂いた日本道路公団広島管理局徳山管理事務所、栃木博、赤木健二両氏に深謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 鈴木昌次・古川浩平・井上洋司・中川浩二：NATM 施工実績に基づく事前設計の評価に関する一考察，土木学会論文集，第427号／VI-14，pp.261～270，1991.3.
- 2) 古川恵也・朝倉俊弘・木谷日出男・小野田滋：トンネルの事前設計と実績の対比，土木学会第39回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-247，pp.493～494，1984.10.

- 3) 土木学会：トンネルにおける調査・計測の評価と利用，1987.9.
- 4) 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，pp.37～46，第19巻，第9号，1988.9.
- 5) 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，1989.7.
- 6) 例えば，(財)高速道路技術センター：山岳トンネルにおける計測・管理に関する検討(その2)報告書，1992年3月.
- 7) 例えば，井田隆久：切羽観察による地山評価への判別分析の適用，土木学会第44回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-129，pp.332～333，1989.10.
- 8) (社)日本トンネル技術協会：地山評価のあり方に関する研究，1985.2.
- 9) 鈴木昌次・古川浩平・井上洋司・中川浩二：ファジィ帰属モデルに基づくトンネル岩盤分類法の提案，土木学会論文集，第418号／Ⅲ-13，pp.181～190，1990.6.
- 10) 土山茂希・早川誠・本間直樹・竹田直樹：硬岩地山における地山評価方法について，第20回岩盤力学に関するシンポジウム，pp.234～238，1988.2.
- 11) 西野治彦・篠川俊夫・矢田敬：トンネル切羽観察に基づく地山評価方法の検討，第21回岩盤力学に関するシンポジウム，pp.266～270，1989.2.
- 12) 鈴木昌次・古川浩平・井上洋司・中川浩二：アンケートに基づくトンネル施工時の岩盤分類に関する研究，土木学会論文集，第435号／VI-15，pp.51～60，1991.9.
- 13) 桜井春輔・足立紀尚：都市トンネルにおけるNATM，鹿島出版会，pp.1～10，1992.4.
- 14) (社)日本トンネル技術協会：第7回山岳トンネル技術シンポジウム—NATMの補助工法—，1987.6.
- 15) 日本道路公団：設計要領第三集第9編トンネル，1985.10.
- 16) 土木学会：トンネル標準示方書(山岳編)・同解説，p.102，1991.1.
- 17) 鈴木昌次：NATMにおける岩盤評価の合理化に関する研究，岡山大学博士申請論文，p.107，1991.9.

(1993.10.18 受付)

## A STUDY ON THE PROCESS OF THE SUPPORT SYSTEM DECISION AND ASSISTING METHODS ADOPTION UNDER TUNNEL CONSTRUCTION

Noriyuki YUKI, Masashi HIEIDA, Kohei FURUKAWA and Koji NAKAGAWA

Standard support patterns are not always selected according to in-situ rock condition estimated from tunnel face observation in hard rock tunnel. First, we define rock mass rating about tunnel face. The purpose of this paper is approach to make clear the relation among rock mass rating defined here, standard support patterns and some assisting methods about each tunnel face. Therefore, we show them graphically from a viewpoint of time series. As the result, it is realized that the distribution characteristic of rock mass rating is able to explain from a process of support pattern change and the number of assisting methods adopted.