

◆ 報 文 ◆

# 切羽観察結果に基づく地山等級判定手法に関する研究

真下英人\* 砂金伸治\*\* 遠藤拓雄\*\*\* 木谷 努\*\*\*\*

## 1. はじめに

山岳トンネルの施工時の安全性向上や建設コスト縮減を図るためには、地山状態に応じた適切な支保構造の選定が重要である。トンネルの施工時においては一般的に切羽の観察や掘削断面の変位計測を行い、その結果に基づいて事前調査で得られた地山等級を見直し、支保構造を選定している。しかし、観察した結果の評価方法には統一されたものが定められていないのと同時に、地山等級の判定そのものが過去の経験や実績に負うところが大きいのが現状である。合理的な支保構造の選定を行うためには、掘削時の切羽観察や計測データをさらに活用した客観性の高い地山の評価法の確立が必要である。

本研究では、第一にNATMによる道路トンネルの施工実績が蓄積されつつある実態を踏まえ、既往の道路トンネルの施工時に得られた切羽観察のデータを収集し、データベースを構築した。第二に、切羽観察結果の評価を行う手法として、現地の収集データを用いて観察項目に重み付けを行い、評点法(加重平均法)を用いた比較的簡易かつ汎用性の高い地山等級の判定手法を検討した。第三に、その評価点と岩質毎の地山等級との関係を把握し、地山評価方法としての有効性を検討するとともに、実際の現場で地山等級の判定に対する本手法の適用性を検証した。以上の結果について報告する。

## 2. 重み付き評価点の算出方法

### 2.1 切羽観察表の収集

本研究ではNATMにより施工された50本の道路トンネルにおいて、約5400断面の切羽観察表をデータベース化し、それ

表-1 分析対象数

	B	C I	C II	D I	D II	合計
硬質岩	8	141	815	446	0	1410
中硬質岩・軟質岩(塊状)	0	126	533	930	448	2037
中硬質岩(層状)	0	11	242	251	668	1172
軟質岩(層状)	0	61	387	289	92	829

注) B、C I、…D II は、道路トンネルで採用されている地山等級を示す

表-2 切羽観察表の観察項目

面としての情報	切羽の状態	素掘面の状態	
岩石の情報	風化変質	岩の強度	
割目の情報	割目の間隔	割目の状態	割目の形態
水の情報	湧水	水による劣化	

土 か ぶり	14m	総 合 判 断	地 山 区 分 有 り	は	判 定	
岩 種	a, b, c, ④ e		掘 削 区 分	名	Tb	
特 殊 条 件	膨圧・偏圧・流動性・土かぶり小	( )	形 成 地 質 時 代		(その他)	
状 態	膨圧・偏圧・流動性・土かぶり小	( )	形 成 地 質 時 代		(その他)	
掘削地点の地山の状態と挙動						
A	切羽の状態	1. 安定	2. 鏡面から岩塊が抜け落ちる	③鏡面の押し出しを生じる	4. 鏡面は自立せず崩れあるいは流出	5. その他
B	素掘面の状態	1. 自立(普請不要)	2. 時間がたつと積み崩れ落ちる(後普請)	③自立困難掘削後早期に支保する(先普請)	4. 掘削に先行して山を支けておく必要がある	5. その他
C	圧強 強度	1. $\sigma_c \geq 1000$ kgf/cm <sup>2</sup> ハンマー打撃はね返る	2. $1000 > \sigma_c \geq 200$ kgf/cm <sup>2</sup> ハンマー打撃でくだける	③ $200 > \sigma_c \geq 50$ kgf/cm <sup>2</sup> 軽い打撃でくだける	4. $50 \text{ kgf/cm}^2 > \sigma_c$ ハンマー刃先喰いこむ	5. その他
D	風 化 質	1. なし・健全	2. 岩目に沿って変色、強度や低下	③全体に変色、強度相当に低下	4. 土砂状、粘土状、破砕、当初より未固結	5. その他
E	割れ目の間隔	1. 間隔d $\geq$ 1m 割れ目なし	2. $1\text{m} > d \geq 20\text{cm}$	③ $20\text{cm} > d \geq 5\text{cm}$	4. $5\text{cm} > d$ 破砕、当初より未固結	5. その他
F	割れ目の状態	1. 密着	2. 部分的に開口	③開口	4. 粘土をはさむ、当初より未固結	5. その他
G	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、細片状、当初より未固結	5. その他
H	湧 水	①なし、滲水程度	2. 湧水程度	3. 堰中湧水	4. 全面湧水	5. その他
I	水による劣化	1. なし	2. ゆるみを生ず	3. 軟弱化	4. 崩壊・流出	5. その他
割 削 断 面 方 向 性 判 定	縦 断	1. 水平( $10^\circ > \theta > 0^\circ$ ) ②さし目( $30^\circ > \theta \geq 10^\circ$ , $80^\circ > \theta \geq 60^\circ$ ) 3. さし目( $60^\circ > \theta \geq 30^\circ$ ) 4. 流れ目( $60^\circ > \theta \geq 30^\circ$ ) 5. 流れ目( $30^\circ > \theta \geq 10^\circ$ , $80^\circ > \theta \geq 60^\circ$ ) 6. 垂直( $\theta \geq 80^\circ$ ) 7. 垂直(最大傾斜角をとる)				
	横 断	1. 水平( $10^\circ > \theta > 0^\circ$ ) ②右から左へ( $30^\circ > \theta \geq 10^\circ$ , $80^\circ > \theta \geq 60^\circ$ ) 3. 右から左へ( $60^\circ > \theta \geq 30^\circ$ ) 4. 左から右へ( $60^\circ > \theta \geq 30^\circ$ ) 5. 左から右へ( $30^\circ > \theta \geq 10^\circ$ , $80^\circ > \theta \geq 60^\circ$ ) 6. 垂直( $\theta \geq 80^\circ$ ) 7. 垂直(切羽面のみかけの傾斜角をとる)				
記 事						

図-1 研究の対象とした切羽観察表

Study on Evaluation Method of Ground Classification by Face Observation

らを岩質毎に分類した。岩質に関しては、道路トンネル技術基準（構造編）・同解説<sup>1)</sup>の分類を参考に、硬質岩、中硬質岩・軟質岩（塊状）、中硬質岩（層状）、軟質岩（層状）の4種類で分類した。表-1に分析の対象とした地山等級毎のデータの内訳、図-1に研究の対象とした切羽観察表、表-2に切羽観察表に示された観察項目をそれぞれ示す。この切羽観察表を使用して切羽面の評価を行う場合は、観察する項目が9項目、それぞれの項目の評価が1～4の4段階で実施される。いずれの項目についても1が地山の特性が相対的に良好な場合、4が相対的に良好でない場合を意味する。

2.2 重み係数

評点法（加重平均法）により各切羽観察表を点数化し、地山等級を決定する場合に必要な各観察項目に対し与えるべき重み係数を算定した。重み係数の算定は、少数のデータによる予備分析の結果、質的な説明変数を用いて量的な目的変数を推定する手法である数量化Ⅱ類が適当であると判断した。具体的には図-2に示したフローに従い、収集したデータをもとに岩質毎、地山等級毎に整理を行い、各岩質で地山等級を目的変数とした数量化Ⅱ類による判別分析を行った。この分析より各観察項目内におけるカテゴリスコア（地山等級の判定に与える切羽観察項目の評価区分値の影響度を数量化したもの）が得られ、各観察項目における最大と最小のカテゴリスコアの差の絶対値で定義されるレンジは、その値が大きいほど地山等級の判定に切羽観察項目の評価区分値が影響を与えていること示すことになる。このため、各観察項目のレンジが観察表の中で占める割合を図-2内のフロー③の式により算定し、これを重み係数とした。なお、重み係数の合計は各項目で概ね100になるように基準化してある。これにより得られた重み係数を表-3に示す。

重み係数の全体的な傾向を見ると湧水の影響が比較的小さいことが挙げられる。岩質毎では、硬質岩では割目の間隔が、中硬質岩（層状）では素掘面の状態が、軟質岩（層状）では岩の強度がそれぞれ重みの大きい項目となった。しかし、中硬質岩・軟質岩（塊状）では、重みが比較的均一であった。

2.3 重み付き評価点

前節で得られた重み係数に対して、観察項目毎の評価点1～4を乗じた総和を100で除することで

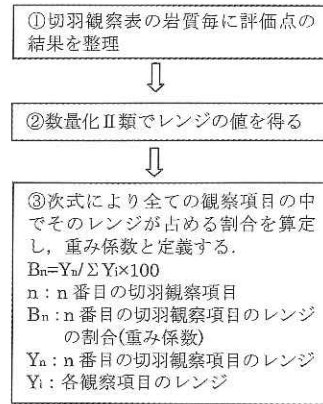


図-2 重み係数算定フロー

表-3 岩質毎の各切羽観察項目に対する重み係数

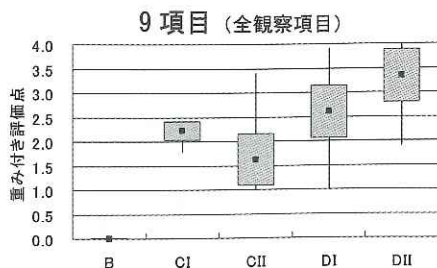
	切羽の状態	素掘面の状態	岩の強度	風化変質	割目の間隔	割目の状態	割目の形態	湧水	水による劣化
硬質岩	11	15	14	8	27	7	8	3	8
中硬質岩・軟質岩（塊状）	10	11	13	17	9	11	11	7	11
中硬質岩（層状）	9	36	9	5	7	10	14	5	5
軟質岩（層状）	16	8	26	13	6	3	6	9	13

得られた点数を、その断面の「重み付き評価点」と定義した。なお、上記の算定法により得られる各断面の重み付き評価点は1.0～4.0の範囲で求められることになる。

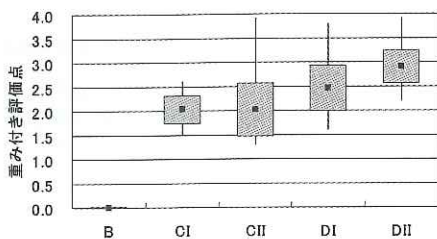
2.4 切羽観察項目の簡略化

現場における切羽観察作業の簡素化を考えると、切羽観察項目は少ない方が望ましい。このため、現行の切羽観察表において9種類ある項目を減らすことによって全体的な傾向を明確にできる可能性について検討した。表-2に示す観察項目の「面としての情報」である「切羽の状態」と「素掘面の状態」、『割目の情報』である「割目の形態」を除いた6項目に対しての場合、さらに『水の情報』である「湧水」と「水による劣化」を除いた4項目に対しての場合で数量化Ⅱ類による重み係数の算定を行い、重み付き評価点の分布を分析した。図-3に代表例として中硬質岩（層状）の観察項目数毎の重み付き評価点の分布を示す。図中の点は各地山等級における重み付き評価点の平均値、棒グラフは重み付き評価点の標準偏差をσとした場合の平均点±σの範囲、線グラフは重み付き評価点の最大値と最小値の範囲を示すものである。

これよりデータ数が少ないC Iを除けば、観察



6 項目 (風化変質・岩強度・割目の間隔  
・割目の状態・湧水・水による劣化)



4 項目 (風化変質・岩強度・割目の間隔  
・割目の状態)

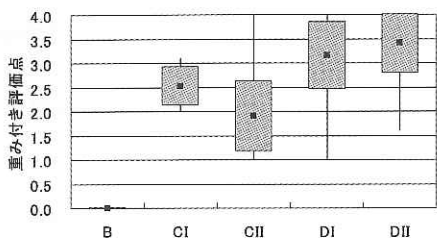


図-3 項目数毎の重み付き評価点の分布  
(中硬質岩 (層状))

項目を減らすほど、地山等級毎の重み付き評価点の分布に重なる部分が増え、明確な差を読みとることが難しく、地山等級の判断が困難となることが分かった。また、他の岩質についても同様の傾向が見られた。これより、本研究では観察項目として9項目を採用することにした。

### 3. 重み付き評価点の分析結果

前章の結果より地山等級選定に比較的有效であると推察された9項目の観察項目を用いて、重み付き評価点を求め岩質毎に地山等級との関係を整理した。

#### 3.1 硬質岩の分析結果

硬質岩について、図-4 (a) に各地山等級にお

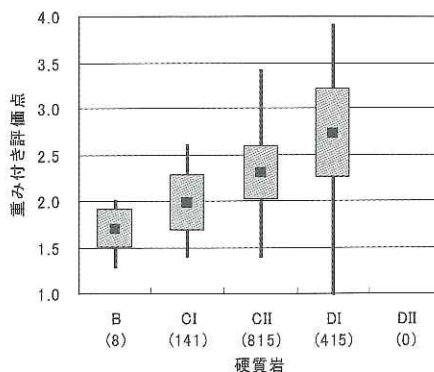


図-4 (a) 重み付き評価点の分布  
(硬質岩)

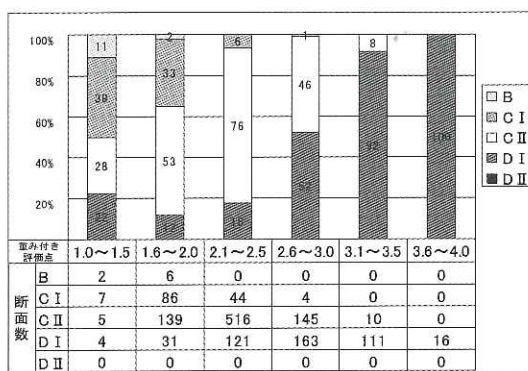


図-4 (b) 重み付き評価点による地山等級の割合  
(硬質岩)

ける重み付き評価点の分布を示す。また、図-4 (b) に重み付き評価点の区間毎の地山等級の割合を示す。なお、棒グラフ内の数値は重み付き評価点内の各地山等級の割合、棒グラフ下部の表は各地山等級の断面数を示す。硬質岩ではD IIが採用された断面はなく、Bが採用された断面は8断面と少数であった。図-4 (a) より、地山等級と重み付き評価点の相関関係は良好で、重み付き評価点が大きくなるにつれて地山等級が悪くなる傾向が見られた。また、図-4 (b) より、重み付き評価点が3.1以上になると90%以上の割合で地山等級はD Iとなる傾向が見られた。

#### 3.2 中硬質岩・軟質岩 (塊状) の分析結果

中硬質岩・軟質岩 (塊状) について、図-5 (a) に各地山等級における重み付き評価点の分布、図-5 (b) に重み付き評価点の区間毎の地山等級の割合を示す。図-5 (a) より、重み付き評価点が大きくなるにつれて、地山等級は悪くなる傾向が概ね見られるが、C IとC II、D IとD IIの重み付き評価点の明確な分布の差は見られなかった。しか

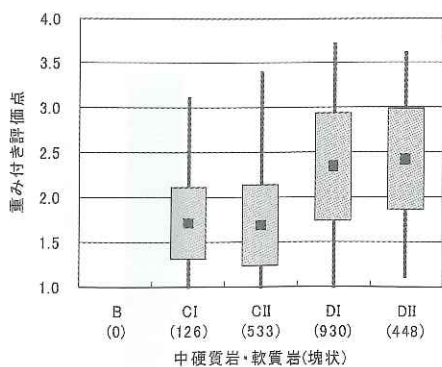


図-5 (a) 重み付き評価点の分布  
(中硬質岩・軟質岩 (塊状))

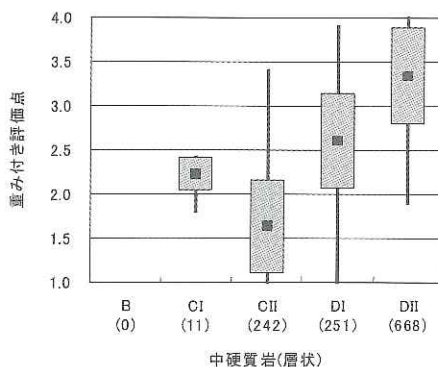


図-6 (a) 重み付き評価点の分布  
(中硬質岩 (層状))

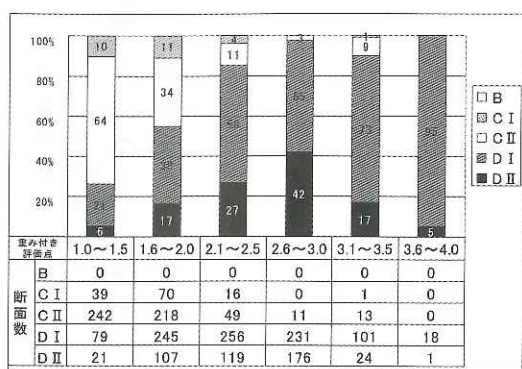


図-5 (b) 重み付き評価点による地山等級の割合  
(中硬質岩・軟質岩 (塊状))

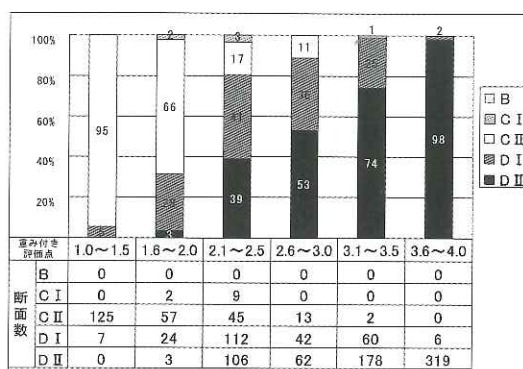


図-6 (b) 重み付き評価点による地山等級の割合  
(中硬質岩 (層状))

し、重み付き評価点が2.0程度で地山等級のCとDを区別する敷居値になりうる可能性が高いことが分かる。また、図-5 (b) より、重み付き評価点が3.0までは、評価点が大きくなるにつれてD IIの占める割合が上がるが、それ以上になるとその割合は下がる傾向が見られた。また、重み付き評価点が3.1以上になると70%以上の割合で地山等級はD Iとなる傾向が見られた。

### 3.3 中硬質岩 (層状) の分析結果

中硬質岩 (層状) について、図-6 (a) に各地山等級における重み付き評価点の分布、図-6 (b) に重み付き評価点の区間毎の地山等級の割合を示す。図-6 (a) より、C Iについては他の地山等級に対して断面数が少ないため、異なる傾向を示したが、それ以外は地山等級との相関は良好で、重み付き評価点が大きくなるにつれて地山等級は悪くなる傾向が見られた。図-6 (b) より、重み付き評価点が2.0以下だと約70%の割合で地山等級はC II、重み付き評価点が3.1以上になると70%以上の割合で地山等級がD IIとなる傾向が見られた。

### 3.4 軟質岩 (層状) の分析結果

軟質岩 (層状) について、図-7 (a) に各地山等級における重み付き評価点の分布、図-7 (b) に重み付き評価点の区間毎の地山等級の割合を示す。図-7 (a) より、地山等級との相関関係は比較的良好で、重み付き評価点が大きくなるにつれて地山等級は悪くなる傾向が見られた。しかし、図-7 (b) より、C IIは重み付き評価点1.0~3.5の範囲に分布しているが、評価点の区間毎における地山等級の割合の変化に明確な傾向は見られなかった。また、D Iは重み付き評価点の全ての範囲に分布する傾向が見られた。さらに、D IIでは1.6~3.0の範囲では重み付き評価点が大きくなれば割合が上がるが、3.1~3.5では割合が下がり、3.6以上になると割合がさらに下がる等の傾向が見られた。

以上より、軟質岩 (層状) においては、他の岩質に比較してデータにばらつきが多く、必ずしも重み付き評価点が大きくなると悪い地山等級の割合が増えるとは言えなかった。しかし、C Iは重

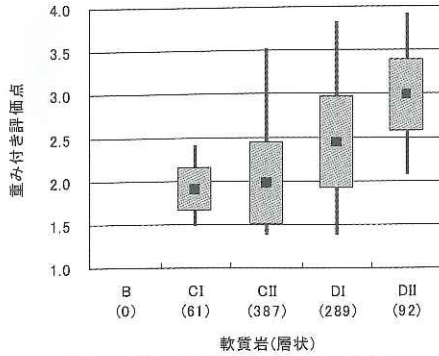


図-7 (a) 重み付き評価点の分布 (軟質岩 (層状))

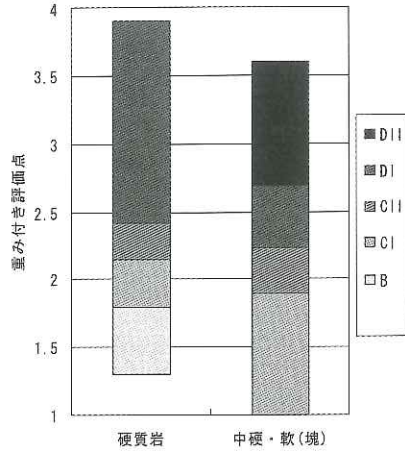


図-8 地山等級毎の重み付き評価点

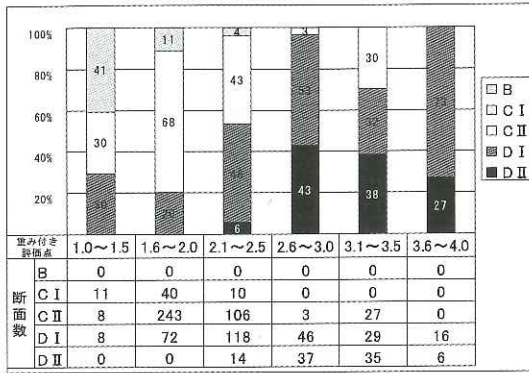


図-7 (b) 重み付き評価点による地山等級の割合 (軟質岩 (層状))

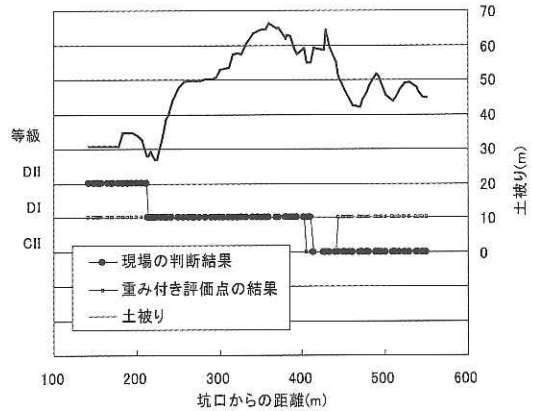


図-9 A トンネルの試行結果

み付き評価点が概ね2.0以下の場合に、D IIは重み付き評価点が概ね2.6以上の場合に採用される傾向が見られた。

#### 4. 重み付き評価点の適用性の検証

図-4~7で得られた結果をもとに、実際のトンを用いた地山等級決定の適用性を検証した。今回の検証では各地山等級毎に「敷居値」を設け、重み付き評価点により得られた地山等級と実際の施工で判定された地山等級と比較した。敷居値は前後する2つの地山等級において、地山が良い側の重み付き評価点の+1σの値と地山が悪い側の重み付き評価点の-1σの値の平均をとることで算定した。図-8に硬質岩および中硬質岩・軟質岩(塊状)における地山等級毎の重み付き評価点を示す。この方法により得られた敷居値を用いて地山等級を判定する場合は、ただ1つの地山等級が選択されることになる。

適用性の検証は硬質岩の地山に対してトンネルAとB、中硬質岩・軟質岩(塊状)の地山に対し

てトンネルCにて実施した。主たる地質はAトンネルでは強風化の花崗岩、Bトンネルでは礫岩、Cトンネルでは安山岩が主体であった。図-9~11にそれぞれのトンネルの地山等級に関して、現場の判断結果と重み付き評価点による場合の結果を示す。

図-9より、比較的全線にわたって現場での判断結果と重み付き評価点の結果が一致する結果が得られた。しかし、硬質岩では重み付き評価点のデータがDIIパターンでは存在しないため、評価点の範囲の設定が不可能であったが、一部でDIIパターンが現れた場合があった。

また、図-10より、重み付き評価点による判定結果と実際の現場の判断結果において、地山等級の判断が分かれる場合があった。この理由として、図-8に示したような地山等級毎の重み付き評価点の算定方法では、重み付き評価点の重複区間がなく、地山等級が唯一に決定されるため、個々の

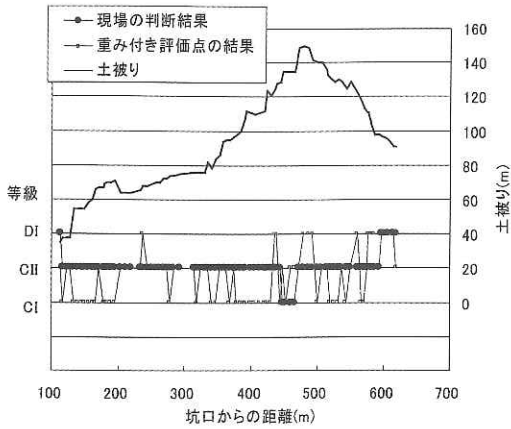


図-10 Bトンネルの試行結果

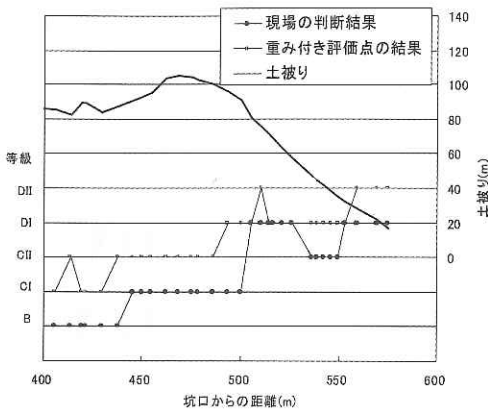


図-11 Cトンネルの試行結果

現場が有している特性を考慮することができない可能性があると考えられる。

さらに、図-11より、重み付き評価点による判定結果と実際の現場の判断結果が分かれる場合があった。この理由として、Bトンネルと同様に図-8に示した算定方法に起因する同様の理由があることや、中硬質岩・軟質岩（塊状）では、今回提案

した検討手法によれば、地山等級がCとDの境界は比較的明確なものの、CIとCII、およびDIとDIIでは明確ではないため、判定結果にばらつきが生じた可能性があると考えられる。

### 5. 結論と今後の課題

今回の検討より、以下の知見が得られた。

- ①本研究で収集したデータでは、既存の切羽観察項目を9項目より減らすほど、重み付き評価点の分布に重なりが増え、明確な地山等級選定が行いにくくなること傾向があった。本研究で対象とした様式の切羽観察表を使用する場合、観察項目を減らすことなく、項目数は9であることの方が有効であると推察される。
- ②切羽観察表の重み付き評価点について分析を行った結果、軟質岩を除く岩質では重み付き評価点が大きくなるほど地山等級は悪くなり、比較的高い精度で地山等級の判別が可能となることが判った。また、軟質岩は重み付き評価点が大きくなって悪い地山等級の割合が増えるとは必ずしも言えず、観察項目の評価点の細分化などを含めたさらに詳細な検討が今後も必要である。
- ③実際の現場において本研究で示した地山等級の判定手法の適用性を検証した結果、硬質岩の場合は、地山等級の判定の一資料と出来る結果が得られた。

今後はさらなるデータの蓄積と分析を踏まえ、重み付き評価点の重複区間の設定や、重み係数の妥当性を照査し、簡易で汎用的な切羽観察表を用いた地山等級判定手法を提案する予定である。

真下英人\*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所道路技術研究グループトンネルチーム首席研究員、工博  
Dr. Hideto MASHIMO

砂金伸治\*\*



内閣府政策統括官（防災担当）付地震・火山対策担当参事官補佐  
Nobuharu ISAGO

遠藤拓雄\*\*\*



国土交通省北海道開発局札幌開発建設部滝川道路事務所  
Takuo ENDOU

木谷 努\*\*\*\*



（前）独立行政法人土木研究所つくば中央研究所道路技術研究グループトンネルチーム専門研究員  
Tsutomu KITANI