

山岳トンネルの支保パターン選定手法に関する一考察

Consideration on Selecting Support Pattern in Mountain Tunnel

砂金 伸治¹⁾, 遠藤 拓雄²⁾, 真下 英人³⁾

Nobuharu ISAGO, Takuo ENDO and Hideto MASHIMO

Proper tunnel support which is suitable for ground condition should be selected for safety and economical construction. Method of selecting support is mainly based on the past experience and the observation and measurement data in excavation should be used for the judgment of ground condition. In this study, impact values for face observation item calculated using cluster analysis and their tendency was examined. It was found that the values were different between rock characteristic and it may be possible to classify much clearly using the value calculated by cluster analysis.

Keywords: mountain tunnel, face observation, support pattern, cluster analysis, crack

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。現在の道路トンネルの施工時には、通常の場合は切羽の観察や断面の変位を計測し、それに基づいて事前調査で得られた地山等級を見直し、支保パターンを選定している。しかし、その支保パターンの選定そのものが過去の経験や実績に負うところが大きく、合理的な支保構造の選定のためには、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、NATMでの施工実績が増え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表のデータを収集し、それらを整理した。さらにその結果をもとに、切羽観察表の観察項目における指標と地山等級との関連性に関して、多変量解析等を用いることにより分析を行い、地山等級との関連性が顕著である指標の抽出を実施し、掘削時の種々のデータに基づいた客観性の高い地山評価手法の確立を目指すための検討を行った。

2. 研究方法

本研究では NATM により施工された 36 本の道路トンネルにおいて、3301 断面の切羽観察表を収集し、それらを岩質毎と岩種毎に分類した。岩質に関しては、日本道路公団の設計要領¹⁾の分類を参考に、硬質岩、中硬質岩(層状と塊状)、軟質岩(層状と塊状)の 5 種類で分類した。また岩種に関しては、データ数が分析を実施する上で問題がないと判断した岩種においてのみ分析を行うこととし、花崗岩、泥岩、片岩の 3 種類について検討を行った。表-1(a)および(b)にこれらのデータの内訳を示す。このデータをもとに切羽観察表に示された観察項目における評価点と地山等級との分析を行った。表-2 に切羽観察表に示された観察項目を示す²⁾。実際の施工では表-2 に示した

表-1(a) 岩質毎のデータ内訳

岩質・支保パターン	B	CI	CII	DI	DII	合計
硬質岩	62	88	353	187	0	690
中硬質岩(塊状)	0	4	79	243	33	359
中硬質岩(層状)	0	4	80	107	101	292
軟質岩(塊状)	0	11	88	174	192	465
軟質岩(層状)	77	171	537	563	147	1495

表-1(b) 代表岩質毎のデータ内訳

岩質・支保パターン	B	CI	CII	DI	DII	合計
花崗岩	60	6	227	162	0	455
泥岩	0	71	239	452	85	847
片岩	77	100	298	111	62	648

1) 正会員 修士(工学) 独立行政法人土木研究所 基礎道路技術研究グループ(トンネル)
2) 正会員 独立行政法人土木研究所 基礎道路技術研究グループ(トンネル)
3) 正会員 博士(工学) 独立行政法人土木研究所 基礎道路技術研究グループ(トンネル)

観察項目に対して評価点としてそれぞれ1～4の4段階で評価されている。その評価点は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。分析では地山等級を決定する場合に、切羽観察表に示された観察項目に対して与えるべき重み係数を2つの方法によって算定した。

第1の方法は、実際の施工で判定された地山等級毎で、観察項目毎に得られた評価点の結果を整理する。引き続いて、地山等級毎で観察項目毎に平均値を算出し、それを重み平均値と定義する。さらに重み平均値の最大値と最小値の差をその観察項目のレンジと定義し、最終的にそのレンジが顕著なものに重みを与え、観察項目全体で100となるようにして重み係数と定義する。図-1にこれらのフローを示す。この重み係数に評価点を再度乗じ、項目数毎に加えて100で除すること

で、重み係数を乗じた断面毎の「評価点の平均値」が得られることになる。この平均値の傾向を岩質毎、岩石毎に地山等級との関連性を検討した。なお、比較の意味で重み係数を乗じない場合、すなわち観察項目毎に得られた評価点全体の単なる平均値に関する分析を併せて実施した。

また、切羽観察表の整理を実施したところ、掘削に伴い切羽が進行しても、切羽観察の評価点は同一のままのデータが多く蓄積されている場合があることが分かった。そのためある一定のパターンでほとんど同様の傾向を示す断面をあるグループに分けた上で重み係数を算出すればさらに地山分類の精度が向上するのではないかと考えた。そこで第2の方法として、重み係数の算出方法および重み係数を用いた観察指標全体の平均値の算出方法そのものは同一であるが、クラスター分析を行うことにより、観察結果を「同様の傾向を示す断面」のデータ毎のグループに分類し、そのグループ毎で重み係数を算出し、それらを用いて得られた断面毎の指標の平均値の傾向を岩質毎に支保パターンとの関連性を検討することとした。

3. 研究結果

(1) 支保パターン毎の分析結果

表-3 に岩質毎にすべての観察項目を用いた場合の重み係数の算定結果を

示す。全体的な傾向として、硬質岩・中硬質岩のほうが切羽の状態の重みが小さいが、素掘面の状態の重みが比較的大きいことと風化変質の重みが若干高くなる傾向が見られた。また、一般的には軟質岩では岩の強度の評価点が、硬質岩では割目に関する

評価点がそれぞれ地山等級を決定する上で重みが大きいと考えられるが、分析結果からは明確な差は見られなかった。これはどちらの項目も観察表上では概ね同一の評価点が与えられて変動が少なく、

今回の分析では地山等級の決定に大きく寄与しない結果として現れたためと考えられる。

水に関する2つの観察項目は、軟質岩(層状)を除けば重みが小さい傾向があった。これに基づき、この2つの観察項目を除いた場合の重み係数を算定した。表-4にその結果を示す。

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	

①切羽観察表の地山等級・観察項目毎に評価点の割合を集計

②次式により地山等級毎の各観察項目の重み平均値を算出
 $A = (X_1 \times 1 + X_2 \times 2 + X_3 \times 3 + X_4 \times 4) / 100$
A: 重み平均値
 $X_1 \sim X_4$: ①で求めた評価点の割合

③地山等級毎で得た、各観察項目の重み平均値の最大と最小の幅をレンジと定義する

④次式により全ての観察項目の中でそのレンジが占める割合を算定し、重み係数と定義する。
 $B_n = Y_n / \sum Y_i \times 100$
n: 切羽観察各項目
 B_n : 各レンジの割合(重み係数)
 Y_n : その観察項目のレンジ
 Y_i : 各観察項目のレンジ

図-1 重み係数算定フロー

表-3 支保パターン毎の分析による重み係数の結果

	切羽の状態	素掘面の状態	風化変質	岩の強度	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	10	15	13	9	11	17	12	6	7
中硬質岩(塊状)	7	12	17	14	17	18	12	1	2
中硬質岩(層状)	8	11	11	11	12	15	15	7	10
軟質岩(塊状)	11	10	13	7	17	17	12	2	11
軟質岩(層状)	18	10	8	11	8	8	13	12	11

表-4 重み係数の結果(水に関する観察項目を除く)

	切羽の状態	素掘面の状態	風化変質	岩の強度	割目の間隔	割目の状態	割目の形態
硬質岩	12	17	15	11	13	20	13
中硬質岩(塊状)	7	12	18	15	17	19	12
中硬質岩(層状)	10	13	14	13	15	18	18
軟質岩(塊状)	13	11	15	8	19	20	13
軟質岩(層状)	24	13	10	15	11	10	16

割目に関する重み係数が全体の観察項目に対して 50%程度の重みを占めることになるとともに、切羽の状態や素掘面の状態といった面に関する情報で 20~30%, 風化変質や岩の強度といった岩に関する情報で同様に 20~30%の重みを占める結果となった。ただ、硬質岩に関しては切羽の状態や素掘面の状態といった「面に関する情報」が、また軟質岩(層状)に関しては「面に関する情報」, 「割目に関する情報」に関して比較的顕著な傾向が見られる以外は、岩質による大きな差は見られなかった。

次にこれらの重み係数を付加して各岩質に対して評価点の平均値を算定した。図-2 に硬質岩に関する検討結果のうち、すべての観察項目を用いた評価点の平均値を示す。また、図-3 に重み係数を乗じない場合、すなわち観察項目毎に得られた評価点の平均値を示す。なお、図中の点は支保パターン毎での評価点の平均を示し、棒グラフは標準偏差を σ とした場合の $\pm\sigma$ の範囲を示している。これより硬質岩に関しては地山等級がBからDに変化するにしたがって比較的明確に平均値が増加し、 $\pm\sigma$ の範囲も明確に遷移することが分かる。これは現行の切羽観察を用いることでも、硬質岩については比較的精度良く地山等級の判定が可能であることを示していると考えられる。また、図-2と図-3を比較すると特に地山等級がCIIの場合とDIの場合の差が明確に現れる結果が得られた。地山等級の判定を明確にしようとする場合は重み係数の算定によって可能になると考えられる。

図-4 に軟質岩(層状)において、重み係数を乗じてすべての観察項目を用いた評価点の平均値を示す。これより、地山等級が悪くなるほど平均値は増加する傾向があるものの、硬質岩の場合と比較すれば変化が明確ではなかった。特にCIIとDIの値の差は他の部分よりも比較的顕著に表れていたが、DIとDII間の差が大きく見られず、これは軟質岩の場合は重みを考慮しても、現行の観察表全ての項目対象にした評価点の平均値だけで地山等級を評価することは困難である可能性が高いことを示していると考えられる。

次に、ある岩種に着目して算定した結果を示す。図-5 に花崗岩に関して、重み係数を乗じた指標の平均値の結果を示す。これより、地山等級がCIに関しては他の3つの地山等級に比較してデータの数が少ないものの、それを含めて考えれば、重み係数を乗じることで、比較的明確に指標の平均値の分布が得られた。また、泥岩の結果については花崗岩ほど明確な結果は得られなかったが比較的明確に、また片岩の結果については、地山等級による差があまり見られない結果が得られた。今後は、重み係数をトンネル毎、岩種毎に算定したうえで、岩質毎へ発展させて全体的な傾向を比較し、地山評価に資する重み係数の提案を図る必要があると考えられる。

(2) クラスタ分析によるグループ毎の分析結果

次にクラスタ分析によって地山等級に関わらずデータを再分類し、そのグループを用いて算出した重み係数を用いて評価点の平均値を算定した。

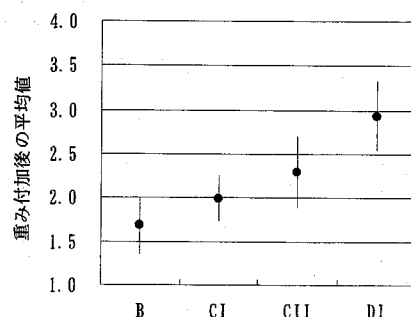


図-2 重み係数を付加した平均値(硬質岩)

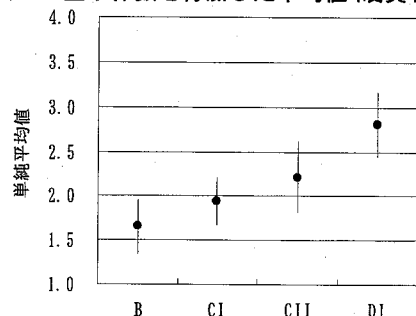


図-3 評価点の単純平均値(硬質岩)

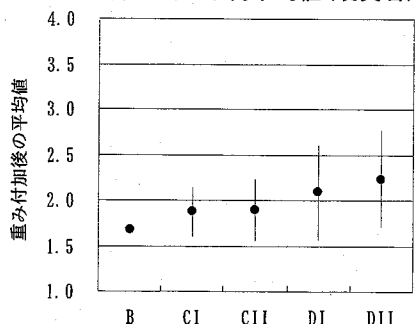


図-4 重み係数を付加した平均値(軟質岩(層状))

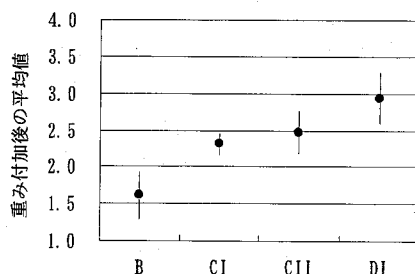


図-5 重み係数を付加した平均値(花崗岩)

表-5 に岩質毎に算定したすべての観察項目を用いた場合の重み係数の算定結果を示す。これより、軟質岩ほど切羽の状態や素掘面の状態といった面に関する情報の重みが大きくなる傾向が見られた。

表-5 地山等級の再分類後の分析による重み係数の結果

	切羽の状態	素掘面の状態	風化変質	岩の強度	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	7	14	12	15	11	16	10	8	8
中硬質岩(塊状)	5	6	17	20	16	19	11	5	1
中硬質岩(層状)	12	12	9	8	9	15	12	10	12
軟質岩(塊状)	14	15	10	11	13	11	8	4	13
軟質岩(層状)	15	14	11	15	7	16	12	4	6

硬質岩や中硬質岩(塊状)では比較的風化変質や岩の強度の重みが大きく得られ、割目の情報に関しては岩質毎の大きな差が見られなかった。また、3つの割目の情報のうちでは、割目の状態の評価点の影響が大きいことが分かったが、岩質による明確な差が見られなかった。全体的な傾向として水に関する情報の重みが大きくなかったが、ばらつきが大きいため、詳細な検討をさらに要すると考えられる。

図-6 にクラスター分析を行って切羽観察の結果が似た傾向を示すものを大きく3つのグループに分けた場合の硬質岩に関する検討結果のうち、すべての観察項目を用いて評価点の平均値を求めた結果を示す。また、表-6 にクラスター分析を実施したことによる地山等級の再分類の内訳を示す。これよりグループ毎に評価点の平均値が明確に分類されることが分かるが、表-6 に示したように、各グループに分類しても、一つのグループに一つの地山等級が対応せず、それぞれのグループに地山等級が混在したもののとなっており、予想される地山等級の大まかな傾向を把握出来るにすぎない。この結果より、クラスター分析によってグループを分類したときに各グループが一つの地山等級を代表とする結果とならない場合は現地で簡易に適用することが難しくなるため、さらに詳細なデータの分析が必要であると考えられる。

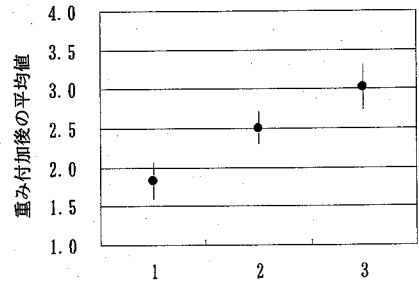


図-6 クラスター分析グループの指標の平均値(硬質岩)

表-6 クラスター分析グループの地山等級内訳

グループ番号	1	2	3
データ数	276	226	188
B	56	4	2
C I	66	22	0
C II	146	160	47
D I	8	40	139
予想地山等級	B~CII	CII	DI

4. まとめと今後の課題

本研究では切羽観察表の観察項目における指標と地山等級との関連性が顕著である観察項目の検討と重みに関する検討を実施することで、地山評価手法に資する考察を加えた。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 現行の観察結果に基づいて重み係数を与えることにより、岩質や岩種によっては地山等級の判定がある精度で可能となる。
- (2) クラスター分析を行うことにより、地山等級の判定の精度が向上する可能性があるが、クラスター分析によって分類した場合のグループ分けについての検討が必要である。

今後は、重み係数の算定方法の妥当性、サンプル数の的確性などに関して、岩石の対象を増加させて検討を行い、重み係数の算定や、支保の増強や軽減のために着目すべき指標について検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 設計要領 第3集トンネル, 日本道路公団, pp.70~71, 平成9年10月
- 2) 道路トンネル観察・計測指針, 日本道路協会, pp23, 平成5年11月