

II-3 トンネル掘削時の岩判定手法の確立に関する調査

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）
研究期間：平 13～平 15
担当チーム：トンネルチーム
研究担当者：真下 英人，砂金 伸治，
遠藤 拓雄

【要旨】

山岳トンネル施工時の安全性の向上や建設コストの縮減を図るためには、地山状態に応じた支保構造の選定が重要であり、そのためには掘削時の計測データや切羽観察表を用いて客観的に地山状態を評価できる手法の確立が望まれている。

本研究では標準支保パターンが採用されている道路トンネルにおいて、施工時に地山状態に適した支保パターンを選定するための地山等級を判定する方法として、切羽観察表を評点法（加重平均法）により定量的に評価する手法の適用を考え、評価に必要となる切羽観察項目の重み係数を施工時データから多変量解析により求めるとともに、得られた重み係数を用いて切羽観察表の評価点を求め、岩質毎に地山等級判定の目安を提示した。また、切羽の岩の強度を現場でより定量的に評価できる試験方法として、ポイントロード試験の有効性を確認した。

キーワード：トンネル，原位置試験，地山等級，切羽観察表，多変量解析，評点法

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く、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、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や変位等のデータを収集し、データベースを構築した。さらにその構築されたデータベースを用いて現場で得られるデータと地山等級との関連性について分析し、地山等級の判定への適用性を検討した。次に、切羽観察表を評点法（加重平均法）を用いて評価する際に必要となる重み係数を多変量解析により求めるとともに、得られた重み係数を用いて切羽観察表の評価点を求め、地山等級判定の目安となる値を提示した。また、現場でより定量的に岩の強度を評価できる試験方法として、ポイントロード試験の有効性についても検証を行った。

2. 地山等級と地山特性との関係

ここでは、既往の天端変位や内空変位といった変位計測データや吹付けコンクリート応力などのB計測結果と地山等級との関係を分析し、これらの現地計測データの地山等級判定への適用性の検証を行った。

2.1 地山等級とトンネル変位の関係

まず、天端変位および内空変位と土被りとの関係を整理し、地山等級に対する影響を検証した。検証対象岩種としては、硬質岩の代表として砂岩を、軟質岩の代表として泥岩を抽出した。図-1 および図-2にそれぞれの整理結果を示す。

砂岩においては、天端変位・内空変位どちらも土被りが大きくなっても、大半のデータが10mm前後に納まり、土被りとの相関関係は明確に認められず、また、地山等級についてもCIIとDIの混在が著しく、各変位との明確な傾向は読みとることができなかった。

泥岩においては、天端変位・内空変位どちらも土被りの小さい箇所にDIが現れやすいという傾向は見られるものの、一部を除いて地山等級や土被りにかかわらず、20mm程度の変位にとどまり、明確な傾向は見られなかった。

以上の結果より、地山変位は地山等級と明確な相関関係が認められず、地山変位だけを用いて地山等級を判定することは難しいと考えられる。

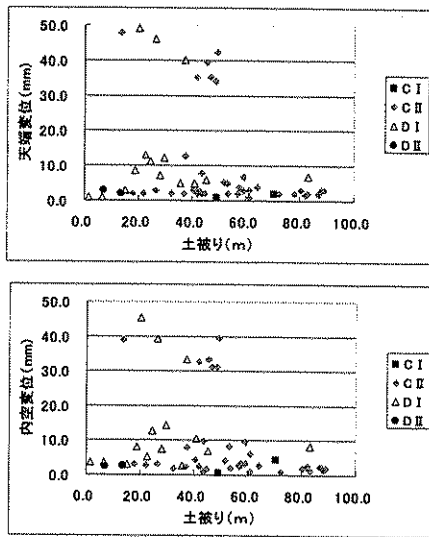


図-1 地山変位と土被りの関係
(砂岩)

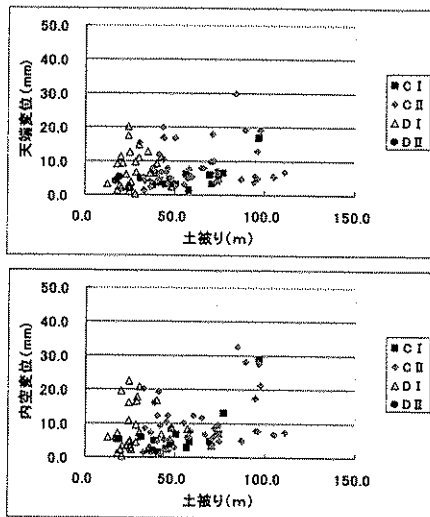


図-2 地山変位と土被りの関係
(泥岩)

2. 2 地山等級とB計測の関係

つぎに鋼アーチ支保工応力と土被り、ロックボルト軸力と土被り、吹付けコンクリート応力と土被りのそれぞれの関係を整理し、地山等級に対する影響の検証を行った。図-3～5にそれぞれの整理結果を示す。

吹付けコンクリート応力と土被りの関係に関しては、土被りが大きくなるに伴い吹付けコンクリート応力が比較的大きくなる傾向が見られたが、どの計測結果も地山等級との明確な傾向を見ることはできなかった。

以上の結果よりB計測から、直接地山等級の判別

を行うのは難しいと考えられるが、B計測に関してはデータ数が少ないため、今後データ数を増やすことにより、地山等級判定への活用についての検証を引き続いて行うことが必要と考えられる。

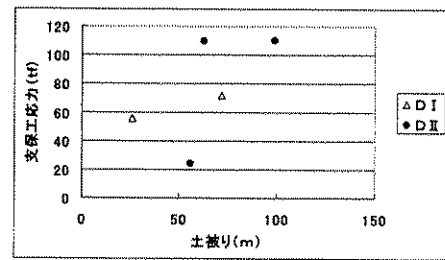


図-3 鋼アーチ支保工応力と地山等級の関係

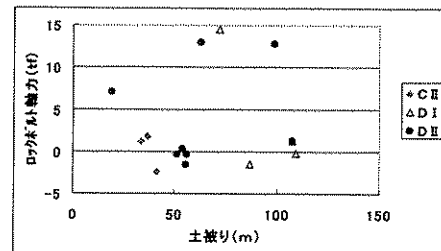


図-4 ロックボルト軸力と地山等級の関係

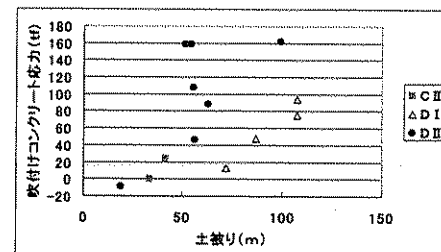


図-5 吹付けコンクリート応力と地山等級
の関係

3. 切羽観察表を用いた地山評価方法

現在、各トンネル施工現場において切羽観察表の記録を行っているが、その結果の評価方法に統一されたものが無く、個々の現場で独自に対応しているのが実情である。

ここでは、切羽観察表を評点法(加重平均法)を用いて評価する方法の適用を考え、評価の際に必要な各観察項目の重み係数を現地で収集したデータを用いて算出し、その重み係数を用いて切羽観察表の評価点を求め、その評価点と岩質毎の地山等級との関係を検討することによって、定量的な地山評価方法としての有効性を検証した。

3.1 研究方法

本研究ではまず 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¹⁾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にこれらのデータの内訳を示す。図-6に切羽観察表例を、表-2に切羽観察表に示された観察項目をそれぞれ示す²⁾。実際の施工では表-2に示した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。

表-1 岩質毎のデータ内訳

	B	CI	CII	DI	DII	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

観察による地山の状態と性状（上半スケッチの観察）

土 質 名	B	CI	CII	DI	DII	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

図-6 切羽観察表例

表-2 切羽観察表の観察項目

面としての情報	切羽の状態	素堀面の状態	
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	

本研究では、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。次に、この重み係数を観察項目の評価点に乘じ、得られた点数を断面毎で合計する。この合計点を100で除することで得られた断面毎の点数を「重み付き評価点」と定義し、この重み付き評価点について岩質毎に地山等級との関連性を検証した。なお重み係数の算定は、少数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。具体的な手法としては、収集したデータをもとに各岩質毎、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。この結果より得られた各観察項目内におけるカテゴリースコアの差を各観察項目のレンジと定義し、そのレンジを図-7に示すフローにあてはめ、重み係数を算定した。

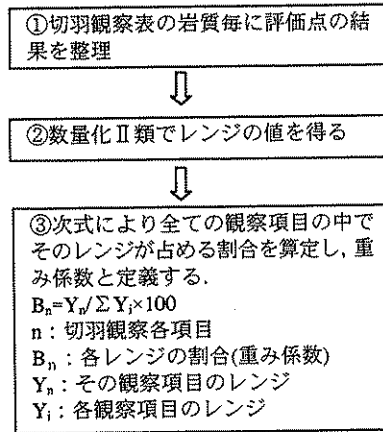


図-7 重み係数算定フロー

3. 2 岩質毎の切羽観察表の重み係数

表-3に岩質毎に観察項目の重み係数の算定結果を示す。全体の傾向としては湧水の影響が比較的小さいことが挙げられるが、それ以外には全体としての傾向は見られなかった。中硬質岩・軟質岩（塊状）では、どの観察項目も比較的均一で、特に重みが大い項目を抽出することはできなかった。硬質岩では割目の間隔が、中硬質岩（層状）では素堀面の状態が、軟質岩（層状）では風化変質がそれぞれ重みの大きい項目となった。

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	素堀面の状態	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	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

次に、現行の切羽観察表は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かもしれないと考え、観察項目の面としての情報である「切羽の状態」と「素堀面の状態」、割目の情報である「割目の形態」を除いた6項目での数量化Ⅱ類による重み係数の算定と、さらに水の情報である「湧水」と「水による劣化」を除いた4項目の数量化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-8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であり、棒グラフは、重み付き評価点の標準偏差値を δ とした場合の平均点 $\pm\delta$ の範囲を示す。また線グラフは重み付き評価点の最大値と最小値を結んだものである。

この結果よりデータ数の少ないCIを除けば、観察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なり、観察項目を減すと判断が難しくなることがわかった。

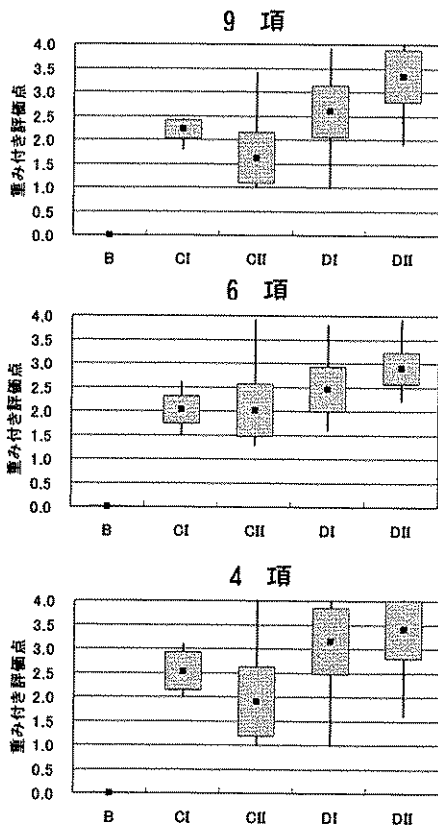


図-8 項目数毎の重み付き評価点の分布
(中硬質岩（層状）)

3. 3 重み付き評価点による地山等級の割合

3.2の結果より観察項目は9項目がもっとも地山

等級選定に有効であると推察されるため、9項目の観察項目を用いて、重み付き評価点を求め地山等級との関係を整理した。図-9~12は重み付き評価点を用いた場合の地山等級における重み付き評価点の分布を示す。また図-13~16は岩質毎の地山等級の割合を示すものである。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を示し、グラフ下部の表は各地山等級の断面数を示す。

① 硬質岩 (図-9 および 13)

硬質岩においてはDIIが採用された断面は無かったが、重み付き評価点の分布を見ると地山等級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る。地山等級の割合を見ると、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DIとなる傾向が見られる。

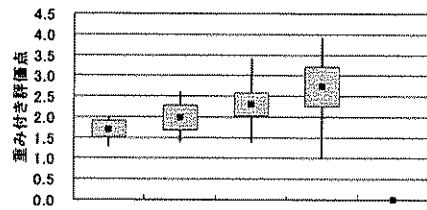


図-9 重み付き評価点の分布
(硬質岩)

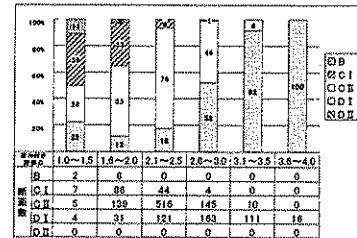


図-13 重み付き評価点による地山等級の割合 (硬質岩)

② 中硬質岩・軟質岩（塊状）

(図-10 および 14)

重み付き評価点の分布を見ると重み付き評価点が大きくなるにつれて、概ね地山等級は悪くなる傾向が見られるが、CIとCII、DIとDIIの重み付き評価点の明確な分布差は見られなかった。地山等級の割合を見るとDIIは、重み付き評価点が大きくなるにつれて頻度が上がるが、重み付き評価点が3.1以上になると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DIとなる傾向が見られた。

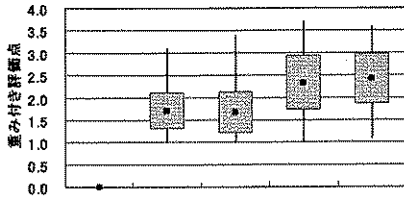


図-10 重み付き評価点の分布
(中硬質岩・軟質岩 (塊状))

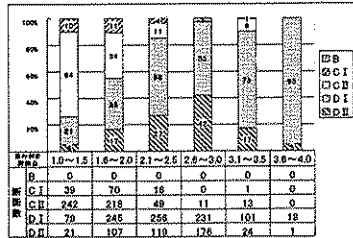


図-14 重み付き評価点による地山等級の割合 (中硬質岩・軟質岩 (塊状))

③ 中硬質岩 (層状) (図-11 および 15)

重み付き評価点の分布を見ると、CIについては他の地山等級に対して断面数が非常に少ないため、突出した傾向を示しているが、それ以外は地山等級と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は悪くなる傾向が見られる。地山等級の割合を見ると、重み付き評価点が2.0以下だと約70%以上の割合で地山等級はCII、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DIIとなる傾向が見られた。

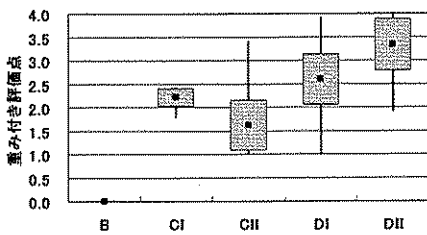


図-11 重み付き評価点の分布
(中硬質岩 (層状))

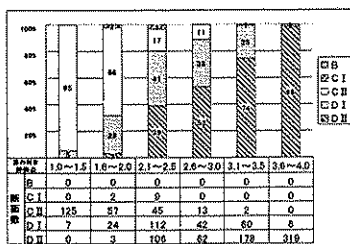


図-15 重み付き評価点による地山等級の割合 (中硬質岩 (層状))

④ 軟質岩 (層状) (図-12 および 16)

重み付き評価点の分布を見ると、地山等級と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は悪くなる傾向が見られた。地山等級の割合で見ると、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、CIは重み付き評価点が概ね2.0以下の場合に、DII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。

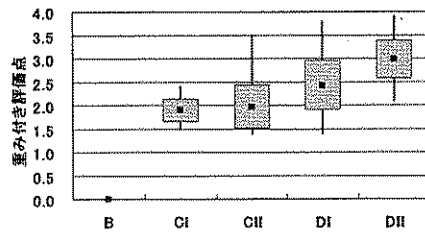


図-12 重み付き評価点の分布
(軟質岩 (層状))

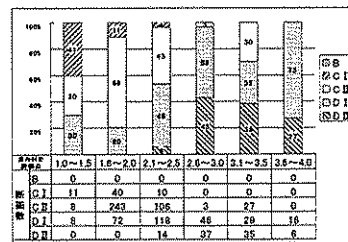


図-16 重み付き評価点による地山等級の割合 (軟質岩 (層状))

以上の結果より、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、重み付き評価点が大きくなるほど地山等級は悪くなることがわかり、重み付き評価点を与えることにより、比較的高い精度で地山等級の判別が可能となることがわかった。ただし、軟質岩は重み付き評価点が大きくなっても悪い地山等級の割合が増えるとは必ずしも言えないため、最終的な地山等級の判定には、現場での判断が重要となってくる。

4. 施工時に用いる原位置試験の提案

現在、トンネル施工現場において、切羽観察項目の一つである切羽の岩強度の判定は、ハンマーによる打撃を目安として行われている。しかしながらこの方法では、判定者の熟練度等により、結果が異なることが予想され、客観性に優れているとはいいが

たい。また、現地で岩片を採取し、室内試験によって一軸圧縮試験を行って、強度を算出している場合もあるが、時間と費用がかかり簡便に行うことができず、実際の施工においてそれほど多くの頻度では行われていない。

このため本研究では、岩強度が客観的に判断でき、なおかつ比較的簡易に行うことのできる試験方法として、ポイントロード試験の有効性を検証した。

4.1 一軸圧縮強度と地山等級との関係

トンネル切羽から採取した岩塊の供試体を用いて求めた一軸圧縮強度と地山等級の関係を図-17に示す。図中の点は各地山等級における一軸圧縮強度データの平均値であり、棒グラフは、一軸圧縮強度データの標準偏差値を δ とした場合の平均点 $\pm\delta$ の範囲を示す。また、線グラフは一軸圧縮強度の最大値と最小値を結んだものである。

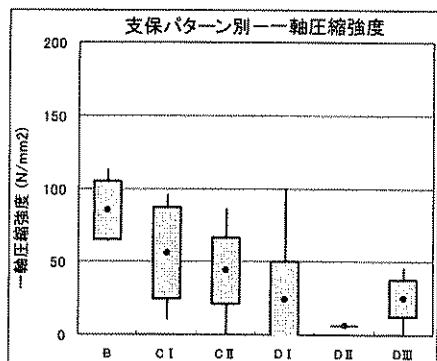


図-17 一軸圧縮強度と地山等級の関係

この結果より、一般に坑口や低土被り区間で施工されるDIIIを除き、一軸圧縮強度が低くなるに従って、地山等級が悪くなる傾向が認められた。したがって、一軸圧縮強度は地山等級を判定するための有効な指標として活用できるものと考えられる。

4.2 ポイントロード試験と一軸圧縮強度の関係

ポイントロード試験は現地で採取した岩片を整形もしくは非整形のまま、簡易に載荷試験を行うことができ、その試験装置も持ち運びが容易なため工事現場付近でも比較的簡単に試験を行うことができる。また、その結果は換算式を用いることで試験者の熟練度等に関係なく、客観的な数値データとして取り扱うことが可能である。

そこでポイントロード試験を幾つかのトンネル切羽で試験的に実施し、ポイントロード試験換算強度と一軸圧縮強度とで得られた関係を整理した。その結果を図-18に示す。

一軸圧縮強度とポイントロードの試験結果は正の

相関関係を読みとることができ、また上述したように一軸圧縮強度は地山等級を判別するための有効な指標として活用できると考えられるため、ポイントロード試験で得られた数値も地山等級を判定するための有効な指標として活用できるものと考えられる。今後はポイントロード試験のデータをより多く収集し分析することで、地山等級の判定手法への具体的な活用方法を検討する必要がある。

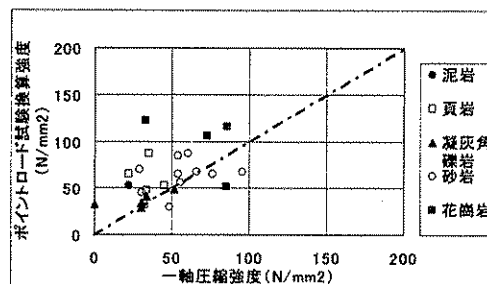


図-18 ポイントロード試験換算強度と一軸圧縮強度の関係

5. まとめ

本研究よりの以下の結果が求められた。

- 1) 変位計測結果や各種B計測結果と地山等級との関係を分析した結果、これらの計測結果は土被りの影響を受ける場合があることがわかったが、地山等級の間には明らかな相関関係は認められず、これらの計測データを地山等級の判定に活用することの有効性は認められなかった。
- 2) 地山等級を判定するための切羽観察表の評価手法については、観察項目に重み係数を付加した評点法により得られた重み付き評価点を用いることにより、比較的高い精度で地山等級を判定できることが明らかになり、現場で重み付き評価点を用いて地山等級を判定する際の目安を提示した。
- 3) 原位置試験については、簡易に現場で切羽の岩強度が評価できるポイントロード試験を地山等級の判定に活用することの有効性を確認した。

参考文献

- 1) 日本道路協会：「道路トンネル技術基準（構造編）・同解説」, pp78~79, 平成15年11月
- 2) 日本道路協会：「道路トンネル観察・計測指針」, pp23, 平成5年11月