

トンネル先進ボーリング調査による地山評価で より有効な指標の抽出に向けた統計分析の試行

岡崎 健治^{1*}・倉橋 稔幸¹・大日向 昭彦¹・山崎 秀策¹・亀村 勝美²・村山 秀幸³

¹土木研究所寒地土木研究所（〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1-3-1-34）

²深田地質研究所（〒113-0021 東京都文京区本駒込2-13-12）

³フジタ技術センター（〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1）

*E-mail: 90185@ceri.go.jp

トンネル施工時の地質調査として先進ボーリング調査を実施して切羽前方の地質確認とあわせて地山等級の分類を再度行う場合がある。分類における評価指標は、弾性波速度、亀裂係数、準岩盤圧縮強度、地山強度比、RQD等であるが、指標同士で分類結果に食い違いが生じる場合がある。本稿では、これらの評価指標の主成分負荷量と主成分得点を主成分分析で求めた後、クラスター分析によって主成分得点をグループ化した。その結果をもとに、主成分分析では、どの評価指標が地山等級を分類する際に類似性を有しているのか、また、クラスター分析では、非階層的手法であるK平均法を使用して、どの評価指標が地山等級を分類する際に着目されているのかについて、岩種別、地山等級の違いに応じて考察した。

Key Words : tunnel, advanced boring survey, ground classification, statistical analysis

1. はじめに

北海道の国道トンネルの施工時には、切羽前方の地質確認と地山の再評価を目的として、先進ボーリング調査を原則実施している¹⁾。先進ボーリング調査は、地山の状態にも左右されるが、切羽からその前方に100m程度を25日程度で掘削している。さらに、掘削コアの室内試験ならびにボーリング孔内での原位置試験を実施し、その結果を地山分類表¹⁾の地山等級ごとに設定されている弾性波速度等の評価指標の適用範囲に対比してトンネル設計時の地山等級の分類結果を見直している。しかし、評価指標が複数であること、また、それぞれの評価指標が異なる地山等級になる場合があり、地山等級を分類する際の課題となっている。

これまで中田ら²⁾は、高速道路トンネルの建設時において、切羽観察記録による地山分類の効率化を目的に、数量化Ⅲ類によって観察項目を数値化するとともにクラスター分析を行い、岩種ごとの観察項目の優位性や二重判定となる項目を改善するための提案を行っている。また川島ら³⁾は、合理的な支保の設計を目的に、鉄道トンネルの切羽観察記録などの施工実績を数量化Ⅲ類によって、その類似性を整理するとともにクラスター分析によって、特定の地山等級における地山の良否を細分化し、実績と比較することで分類のための試案を作成した。

本稿では、北海道の国道トンネルにおける施工時の地質調査として実施された先進ボーリング調査の結果を収集整理するとともに、地山等級を分類するための評価指標を多変量解析し、岩種別の類似性や地山等級に応じた特徴を考察したので、その結果について述べる。

2. 分析方法

本分析では、多変量解析のうち主成分分析とクラスター分析を用いた。分析項目は、地山等級を分類するための評価指標のうち、先進ボーリング孔内での速度検層によるP波速度（以下；孔内P波速度）、亀裂係数、準岩盤圧縮強度、RQD(5)（計測寸法5cm）および地山強度比とした。これらは、地山の強度特性、亀裂やその状態を表す指標であり、先進ボーリング調査を実施することで得られる掘削前の直近の地山における情報である。

ここで、分析に用いたデータは、これまで北海道の国道16トンネルの施工時に実施した先進ボーリング154孔のうち土被り厚さ2D以上の前述した室内と原位置での試験結果である。データの密度は、コアの一軸圧縮試験を実施した箇所数として、その同じ位置における各評価指標の値を分析に用いた。また、岩種は、剥離性を有する岩（ホルンフェルス、頁岩、粘板岩、以下；剥離

性), 層状な岩(堆積岩類, 以下; 層状), 塊状な岩(火山岩, 火砕岩類, 以下; 塊状)である。

次に, 先進ボーリング調査の結果, 各評価指標が異なる地山等級と判定されるケースにおいて, 最終的な地山等級の判定結果がDI等の単一の評価(以下; 単一評価)とCII~DIのように複数の範囲に跨がる評価(以下; 複数評価)となる結果が示されている。後者は, 各評価指標が異なる地山等級に判定されるケースであることから, 本分析では, 単一評価と複数評価のそれぞれの判定時に, どの指標が類似性を有しているのかについて分析を行うとともに, 複数評価を単一評価にするための適用方法について考察した。

(1) 主成分分析

主成分分析⁴⁾は, 複数の量的な変数をより少ない指標や合成変数に要約する分析方法であり, 主成分と要約した変数の関連性を説明するために活用されている。

分析では, まず, 主成分と各変数(地山等級を分類するための評価指標)の相関係数となる主成分負荷量をトンネルの岩種別に計算し, 地山等級を分類するための評価指標が, 地山の強度特性, 亀裂やその状態とどのような類似性があるのかについて考察した。また, 主成分負荷量の大きさや方向をもとに, 地山等級を分類するための評価指標の有効性について考察した。

(2) クラスタ分析

クラスタ分析⁴⁾は, 教師なしで, 大量のデータを自動的かつ定量的に類似性を有するデータ同士をいくつかのグループに分ける分析方法である。

クラスタ分析では, 主成分分析によって求めた主成分得点をグループ化して, 岩種別ならびに地山等級の判定別に, 主成分負荷量との関係について考察した。なお, クラスタ分析では, 非階層的手法のひとつであるK平均法を用いた。K平均法では, 1~15のクラスタ内の誤差平方和を計算後にエルボ図⁵⁾を作成し, その大小関係や変化分の大きさなどの情報をもとにグループ化するための個数であるKの値を決定した。

3. 分析結果

(1) 岩種別の評価指標

表-1, 図-1に岩種別の主成分分析の結果, 岩種別の主成分負荷量を示す。なお, 図-1の破線円は主成分と変数との相関係数がとる-1.0~1.0の範囲を示す。

主成分分析の結果, 固有値が1以上となる第1主成分と第2主成分の寄与率は, 剥離性で75.7%, 層状で69.1%および塊状で69.5%であり, 約7割の情報を第1主成分と第2主成分で表現する結果となった。

図-1の第1主成分をみると, 全ての岩種で孔内P波速度, 準岩盤圧縮強度, 地山強度比がプラス側にプロットされた。これらは, 地山の強度特性に関わる指標であることから第1主成分は地山の強度特性を示すと考えられる。

また, この3つの指標のベクトルは同程度の方向を示すため, 岩種に関わらず強度特性を示すとともに, 地山等級の評価においては類似性を有するといえる。

一方, 亀裂係数とRQD(5)は, その指標の性質から亀裂やその状態に関わる指標といえる。亀裂係数は, 亀裂がないコア供試体に対して, 亀裂を有する地山の弾性波速度との比を示す値であり, その値が小さい場合, 亀裂が少なく地山が良好な状態, 逆に大きい場合, 亀裂が多く地山が悪い状態を示す。それに対し, RQD(5)は, その値が大きい場合, 通常, 棒状のコアが採取されるような地山が良好な状態を示し, 小さい場合は亀裂が多く地山が悪い状態を示す。このため, 亀裂係数とRQD(5)の大小関係は逆となり, 主成分分析では相反する関係として第2主成分にプロットされると考えられる。また, どの岩種においても主成分負荷量は亀裂係数>RQD(5)の関係にあることから, 地山等級の判定では, RQD(5)より亀裂係数が有効と考えられる。

このような観点から, 主成分負荷量を岩種別にみると, 層状と塊状では, 主成分負荷量は亀裂係数がRQD(5)より大きく, 第2主成分が亀裂係数でプラス側にあることからRQD(5)よりも亀裂係数を評価指標として用いることが有効と判断できる。

表-1 岩種別の主成分分析の結果

岩種	剥離性			層状			塊状		
	第1主成分	第2主成分	第3主成分	第1主成分	第2主成分	第3主成分	第1主成分	第2主成分	第3主成分
孔内P波速度(km/s)	0.91	-0.21	0.18	0.86	-0.22	-0.08	0.90	-0.18	0.13
亀裂係数(%)	-0.73	0.58	-0.17	-0.30	0.77	0.44	-0.44	0.77	-0.23
準岩盤圧縮強度(MPa)	0.61	0.64	0.28	0.92	0.11	-0.03	0.88	0.26	0.06
RQD(5)(%)	0.61	0.16	-0.77	0.11	-0.60	0.79	0.09	-0.57	-0.81
地山強度比	0.14	0.92	0.09	0.66	0.57	0.21	0.49	0.66	-0.41
固有値	2.12	1.66	0.75	2.13	1.33	0.88	2.03	1.44	0.90
寄与率	42.4	33.3	14.9	42.5	26.6	17.5	40.6	28.9	17.9
データ数	113			122			394		

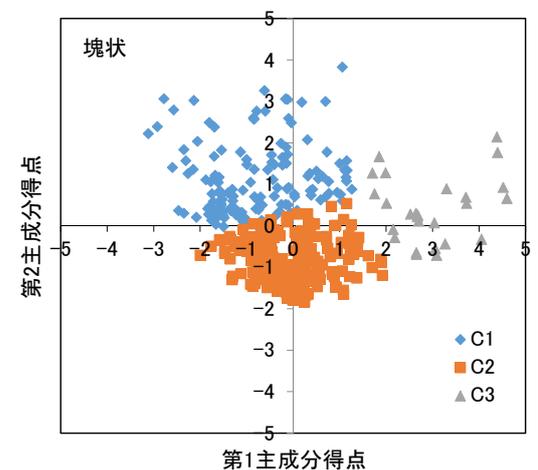
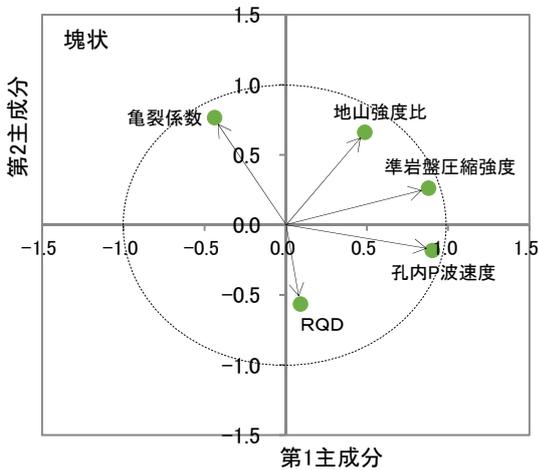
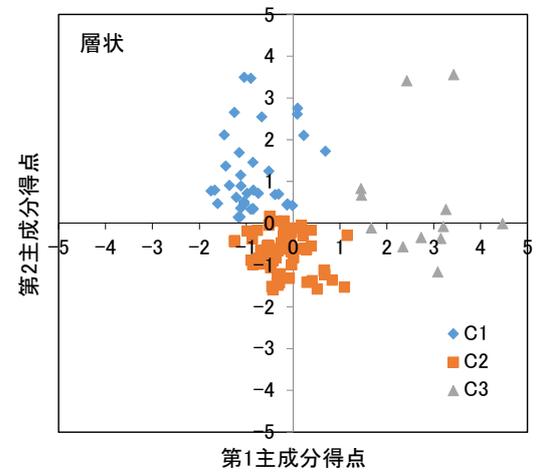
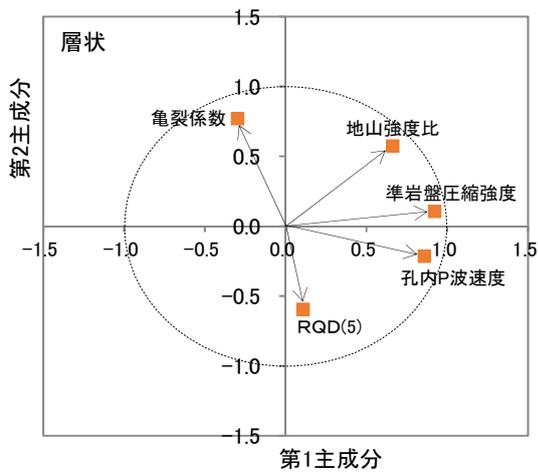
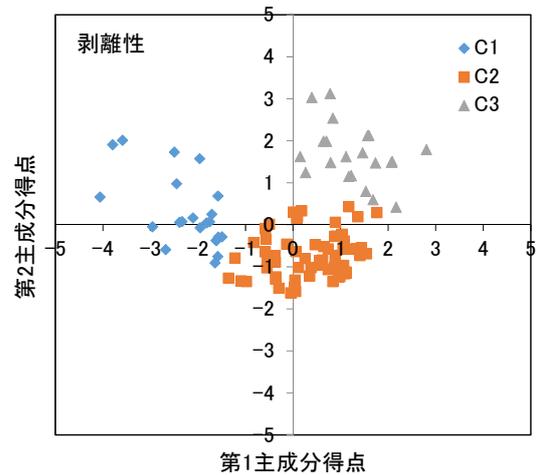
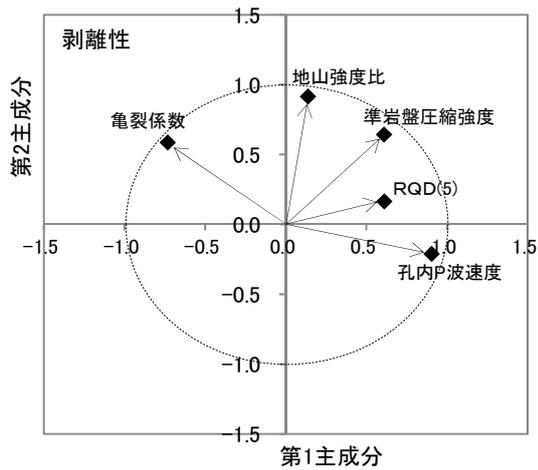


図-1 岩種別の主成分負荷量

図-2 岩種別の主成分得点

一方、剥離性をみると、孔内P波速度以外はベクトルの方向が層状と塊状のものと異なっている。また、RQD(5)は、主成分負荷量は亀裂係数よりも小さいが第1主成分がプラス側にプロットされているため、剥離性の岩石の地山評価において、RQD(5)は層状と塊状よりも評価の情報として着目されているといえる。

以上のことから、孔内P波速度は、全ての岩種におい

て、第1主成分における主成分負荷量として着目されており、ベクトルの方向も同程度であることから、岩種にかかわらず強度特性に関する評価指標として有効といえる。また、剥離性を有する岩石では、層状や塊状の岩石と比較してRQD(5)に着目した評価が行われている。

図-2に主成分得点のクラスター分析の結果を岩種別に示す。クラスター内の誤差平方和をクラスター数ごとに

計算すると、クラスター数が3以上では誤差平方和が大きく変化しないことから、主成分得点は、3つにグループ化することでK平均法によって分析した。

主成分得点のクラスター分析の結果(図-2)は、主成分負荷量が示す傾向(図-1)と関連付けて説明することができる。また、分析の結果、全ての変数の情報が同程度に寄与する場合、図の中心に集まる値となる。

分析結果を岩種別にみると、剥離性では亀裂係数をおもな評価指標としてグループ化するC1と、準岩盤圧縮強度ならびに地山強度比をおもな評価指標として含めてグループ化するC3に区分される。また、層状と塊状では、同様に亀裂係数をおもな評価指標としてグループ化するC1と、孔内P波速度ならびに準岩盤圧縮強度をおもな評価指標として含めてグループ化するC3に区分される。

以上のことから、主成分負荷量の分析結果をもとに岩種別に着目される評価指標の特徴を把握することができた。また、主成分得点の分析結果では、岩種ごとにグループ化される評価指標に違いのあることがわかった。

(2) 地山等級の判定別の評価指標

表-2、図-3に地山等級別の主成分分析の結果、岩種別の主成分負荷量を示す。

主成分分析の結果、固有値が1以上となる第1主成分と第2主成分の寄与率は、単一評価で68.4%、複数評価で70.6%であり、約7割の情報を第1主成分と第2主成分で表現している結果となった。

図-3の第1主成分をみると、両図ではともに、孔内P波速度、準岩盤圧縮強度、地山強度比がプラス側にプロットされた。これらは、地山の強度特性を示すと考えられ、ベクトルも同程度の方向を示すことから、単一と複数での評価に関わらず強度特性を示すといえ、地山等級の評価では類似性を有する。

一方、亀裂係数とRQD(5)は相反関係にあり、第2主成分上にプロットされている。主成分負荷量は、亀裂係数が大きいベクトル方向はマイナス側となっている。一方、RQD(5)は主成分負荷量は小さいがベクトル方向はプラス側である。この理由は、地山等級別の分析では、岩種の影響を考慮していないため、剥離性の岩石の判定にRQD(5)が有効であることがひとつの原因と考えられるが、亀裂係数の主成分負荷量はRQD(5)より大きい

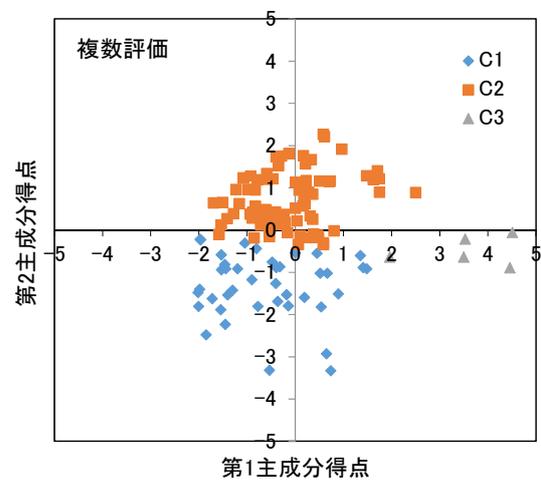
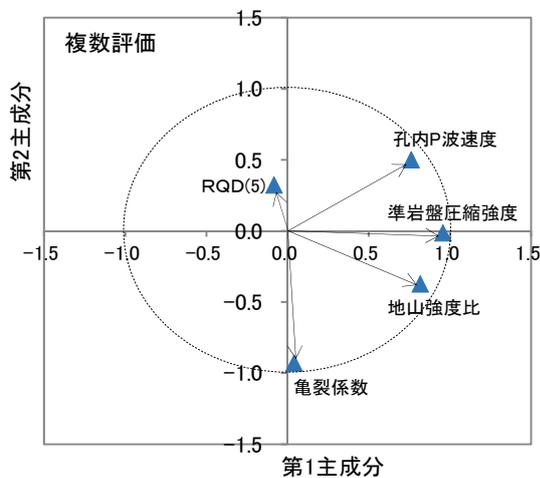
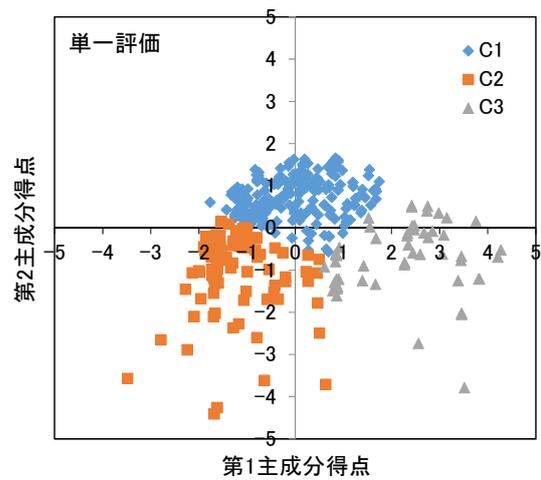
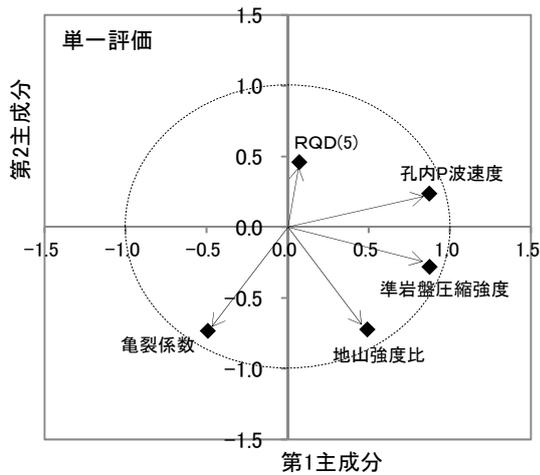


図-3 地山等級別の主成分負荷量

図-4 地山等級別の主成分得点

表-2 地山等級別の主成分分析の結果

支保区分 評価指標	単一評価			複数評価		
	第1主成分	第2主成分	第3主成分	第1主成分	第2主成分	第3主成分
孔内P波速度(km/s)	0.87	0.24	0.16	0.76	0.50	0.17
亀裂係数(%)	-0.49	-0.73	-0.21	0.04	-0.93	-0.13
準岩盤圧縮強度(MPa)	0.87	-0.28	-0.05	0.96	-0.01	-0.01
RQD(5)(%)	0.07	0.46	-0.88	-0.08	0.32	-0.94
地山強度比	0.49	-0.72	-0.27	0.82	-0.37	-0.25
固有値	2.02	1.41	0.93	2.17	1.36	0.99
寄与率	40.3	28.1	18.6	43.4	27.2	19.8
データ数	386			132		

め主成分との関連性が高く、評価ではRQD(5)より亀裂係数に着目することが有効と考えられる。

図-4に主成分得点のクラスター分析の結果を地山等級別に示す。

分析の結果、図の中心に集まる値は、全ての評価指標に関わる情報をもとに地山分類が行われていると考えられ、単一評価ではC1とC2が、複数評価ではC1とC2が該当した。また、単一評価では、孔内P波速度、準岩盤圧縮強度、地山強度比をおもな評価指標として含めてグループ化するC3も存在する。複数評価でも同様に、孔内P波速度、準岩盤圧縮強度、地山強度比をおもな評価指標として含めてグループ化するC3が存在する。また、単一評価のC2や複数評価のC1では、一部に亀裂係数に影響を受ける傾向を確認した。

以上のことから、主成分負荷量の大きさと方向をもとに複数評価を単一評価にするための適用方法を考えた場合、RQD(5)は、第2主成分の方向がプラス側であるが、主成分負荷量大きい亀裂係数を重視することが、より精度のよい評価ができると考えられる。

これらの分析結果については、例えば、主成分分析によって求めた孔内P波速度などの変数ごとの主成分負荷量と、トンネル断面ごと、または室内や原位置試験の実施箇所ごとの測定値の積和から主成分を計算することができ、その値をクラスター分析したC1～C3のグループの重心位置の値と比較することで、トンネルごとの実測値に基づく主成分が、どの区分に近い状態にあるのかを判断することができ、地山等級を分類するために、おもにどのような評価指標が有効であるかを判断する場合に活用できるとも考えられる。

4. まとめと今後の課題

本分析の結果をまとめると次のとおりである。

(1) 岩種別の分析結果

- ・岩種別の主成分分析の結果、全ての岩種で地山の強度特性を示す孔内P波速度、準岩盤圧縮強度、地山強度比が、おもな評価指標として有効と示されたが、地山等級の評価では類似性を有するといえる。また、孔内P波速度は、岩種にかかわらず強度特性に関する評価指標として有効といえる。
- ・地山の亀裂やその状態を示す亀裂係数とRQD(5)に関しては、剥離性を有する岩では、RQD(5)が層状と塊状を呈する岩よりも地山等級の分類における評価指標として着目されていた。
- ・また、層状と塊状を呈する岩では、亀裂係数を評価指標として用いることが有効と判断できる。
- ・岩種別のクラスター分析の結果、剥離性を有する岩は、亀裂係数をおもな評価指標とするグループと、準岩盤圧縮強度ならびに地山強度比をおもな評価指標とするグループに区分された。
- ・また、層状と塊状を呈する岩は、同様に亀裂係数をおもな評価指標とするグループと、孔内P波速度ならびに準岩盤圧縮強度をおもな評価指標とするグループに区分され、岩種ごとにグループ化される評価指標に違いのあることがわかった。

(2) 地山等級の判定別の分析結果

- ・主成分負荷量の大きさと方向をもとに、地山等級が複数の適用範囲に跨がらないように判定するためには、主成分負荷量大きい亀裂係数を重視することが、より精度のよい評価に有効な場合がある。
 - ・クラスター分析の結果、各評価指標に応じて主成分得点がグループ化され違いが生じる場合のあることがわかった。また、孔内P波速度、準岩盤圧縮強度、地山強度比をおもな評価指標としたグループのなかで一部に亀裂係数に影響を含む傾向を確認した。
- 今後は、同じ岩種で地山等級が同じ場合と異なる場合のデータの違いを分析するとともに、今回のクラスター分析でグループ化した区分に対し、実際のトンネル施工時の情報を適用させることで検証を進めたい。

謝辞：本分析の実施にあたり、トンネル施工時の調査記録等を提供していただいた国土交通省北海道開発局の関係各位に記して厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省北海道開発局：道路設計要領，第4集トンネル，pp.13-29，2019.
- 2) 中田雅博, 三谷浩二, 八木弘, 西琢郎, 西村和夫, 中川浩二：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，土木学会論文集，No.623，VI-43，pp.131-141，1999.
- 3) 川島義和, 越智修, 小島芳之, 岡野法之：地山等級I_Nにおけるトンネル施工実績データの統計分析，土木学会第59回年次学術講演会，pp.241-242，2004.
- 4) 河口至商：多変量解析入門I，pp.33-33．森北出版，1973.
- 5) 例えば，酒井高良, 赤松隆：首都圏高速道路網における渋滞パターンの時空間規則性，土木学会第57回土木計画学研究発表会講演集，OR7465，2018.

CASE STUDY OF STATISTICAL ANALYSIS FOR EXTRACTION OF MORE EFFECTIVE EVALUATION INDEX IN TUNNEL GROUND CLASSIFICATION OF ADVANCED BORING SURVEY

Kenji OKAZAKI, Toshiyuki KURAHASHI, Akihiko OBINATA,
Shusaku YAMAZAKI, Katsumi KAMEMURA and Hideyuki MURAYAMA

Advanced boring survey is conducted as a geological survey at the time of tunnel construction, and elastic wave velocity, crack coefficient, quasi-rock compression strength, ground competence ratio, RQD, etc. are obtained as evaluation indexes for tunnel ground classification. In this analysis, these evaluation indexes were examined by principal component analysis and cluster analysis (K-means method), focusing on the evaluation indexes to depending on the rock type and tunnel ground classification.