

切羽観察結果に基づく 鏡吹付けコンクリート工の採用特性

Adoption Characteristic of Face Shotcrete Based on Tunnel Face Observation Results

榎田敦之¹・関茂和²・進士正人³・中川浩二⁴

Atsuyuki Enokida, Shigekazu Seki, Masato Shinji and Koji Nakagawa

¹学生会員 山口大学大学院 理工学研究科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目16-1)

E-mail:enokida@rock.civil.yamaguchi-u.ac.jp

²正会員 日本道路公団試験研究所 トンネル研究室(〒194-8508 東京都町田市忠生一丁目4-1)

³正会員 学博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目16-1)

⁴正会員 工博 山口大学教授 臨床トンネル工学研究所(〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目16-1)

In mountain tunnel, the necessity and importance of an auxiliary method are recognized widely. However, its adoption standard is not clear. In the present stage, since it is judged based on an engineer's experiential subjectivity, the establishment of index of an objective adoption standard is desired.

In this study, as a result of arranging about the existence of adoption of face observation results and face shotcrete, the tendency which an adoption rate increases was seen, so that evaluation of face became bad. Face observation item which influences adoption was able to be extracted by using a multivariate analysis. Moreover, it was shown that a multivariate analysis is effective in adoption prediction.

Key Words : Face Shotcrete, Tunnel Face Observation, Adoption Characteristic,
Discriminant Analysis, Mahalanobis' Distance

1. はじめに

山岳トンネルにおいて、切羽が不安定な地山でも、補助工法を採用することで安定した掘削が可能となり、その必要性ならびに重要性は広く認識されるようになった。

しかしながら、補助工法の採用に関する基準が明確でないため、現状では当該トンネルを担当する現場技術者により、現場での施工条件をはじめ、補助工法の施工性、経済性等を考慮し、採用されている。このように、補助工法の採用過程は現場技術者の経験的主観に基づいて判断されている傾向が強いことが問題として指摘されており、客観的かつ定量的な採用基準の指標の確立が望まれている^{1), 2)}。また、この指標が補助工法の採用の妥当性を評価する事後評価としても役立つものと考えられる。

本報告では、切羽安定対策の初期段階の工法で、施工実績も多い鏡吹付けコンクリート工（以下、鏡吹付け工という）に着目した。鏡吹付け工は上記の

問題に加え、最近ではある支保パターンでは必ず採用するとしているトンネル現場もみられており、合理的に施工されているとは言い難い。

そこで、通常支保パターンの選定等に用いられている切羽観察項目の評価区分値と鏡吹付け工の採用の有無の関係に着目している。加えて、多変量解析の一つである判別分析により、採用特性の把握を行うと共に、切羽観察結果に基づく鏡吹付け工の採用の判断の予測を試み、その有用性を示す。

2. 切羽観察データの選別

本研究で対象とした切羽観察データは、日本道路公団（以下、JH という）のトンネル現場において、表-1 の新しい切羽観察様式³⁾を用いて切羽観察が実施された1997年から2002年までの約5年間に施工されたデータのうち、収集できた切羽観察データ数27,388 データである。新しい切羽観察様式は全国規

模で JH のトンネル現場に導入されたものである。

データの整理を行うにあたって、まず始めに、切羽観察データを、JH のトンネル設計・施工の際に用いられている表-2 のような 4 つの岩石グループ⁴⁾に分類した。次に坑口部等の低土被り区間や、観察項目以外の特殊な条件等や、湧水・劣化等の影響を極力取り除くため、切羽観察データを以下の条件で選別し、対象とするデータを決定した。

- ① 土被り 40m 以上の切羽観察データ
- ② 各岩石グループにおける、鏡吹付け工採用の有無それぞれについて、切羽観察項目の「圧縮強度」、「風化変質」、「割れ目の間隔」、「割れ目の状態」（以下、切羽観察 4 項目という）の評価区分値の総和を算出し、総和が平均値±標準偏差の範囲に収まる切羽観察データ
- ③ 「湧水量」、「劣化」の評価区分が 1 と判断された切羽観察データ

その結果、対象とする切羽観察データ数は 4,326 データとなった。これは元データの約 16% に相当する。各岩石グループにおける切羽観察データの内訳を表-3 に示す。

3. 切羽観察データの整理・分析

(1) 鏡吹付け工の採用割合

切羽観察結果と鏡吹付け工採用の有無との関係を把握するために、各岩石グループにおける切羽観察 4 項目それぞれの採用割合を図-1 に示す。ここで採用割合とは、評価区分毎の切羽観察データ数に対する鏡吹付け工採用有りの切羽観察データ数の割合である。評価区分値は、切羽天端部の評価比重を大きくした加重平均値として取り扱っている。

この図から、ある評価区分値になると鏡吹付け工が採用され始め、そこから評価区分値が大きくなる、つまり地山が悪く評価されるほど採用割合は増加する傾向がみられる。鏡吹付け工は切羽面からの肌落ちや崩落防止の手段として取り扱われていることから、地山の評価が悪くなれば積極的に採用されている状況がうかがえる。

ここで、岩石グループ 1 の「割れ目の間隔」のように評価区分値 5.00 で採用割合が急激に低くなるものがみられる。これは母数である切羽観察データ数に偏りがあったため、採用割合が高くならなかったと考えられる。したがって、採用割合が連続的に増加している中で、採用割合が極端に低い箇所があ

表-1 切羽観察記録表の一部

観察項目	評価区分					
	1.000以上	1.000~500	500~100	100~10	10~1	1以下
A. 圧縮強度 (km/cm ²)	400以上	40~20	10~1	10~1	10~1	1以下
B. 風化変質	風化の目安	風化の目安	風化の目安	風化の目安	風化の目安	風化の目安
C. 割れ目の間隔	割れ目の間隔	割れ目の間隔	割れ目の間隔	割れ目の間隔	割れ目の間隔	割れ目の間隔
D. 割れ目の状態	割れ目の状態	割れ目の状態	割れ目の状態	割れ目の状態	割れ目の状態	割れ目の状態
E. 湧水量	湧水量	湧水量	湧水量	湧水量	湧水量	湧水量
F. 劣化	劣化	劣化	劣化	劣化	劣化	劣化

表-2 岩石グループ

	硬質岩 qu ≧ 80N/mm ²	中硬質岩 20N/mm ² ≦ qu ≦ 80N/mm ²	軟質岩 qu ≦ 20N/mm ²
塊状岩盤	花崗岩 斑レイ岩 花崗閃緑岩 石英斑岩 花崗斑岩 ホルンフェルス 角閃石岩 砂岩、礫岩 (第三紀層) 石灰岩、チャート 片麻岩	安山岩 玄武岩 石英安山岩 流紋岩 ひん岩 砂岩 (中古生層) 礫岩 (中古生層)	蛇紋岩 凝灰岩 凝灰角礫岩
層状岩盤		粘板岩 頁岩 (中古生層)	黒色片岩 緑色片岩 千枚岩 泥岩 (第三紀層) 頁岩 (第三紀層)

表-3 切羽観察データの内訳

	切羽観察データ		採用有りのデータ	
	選別前	選別後	データ数	割合 (%)
岩石グループ1	6,634	1,061	130	12.3
岩石グループ2	8,734	1,896	413	21.8
岩石グループ3	5,687	415	80	19.3
岩石グループ4	6,333	954	235	24.6
計	27,388	4,326	858	19.8

ったとしても、本質的には採用割合は高いと解釈しても差し支えがないと考えられる。

(2) 採用割合の分析

図-1 において、採用割合の変化に着目して、より詳細な分析を行った。

まずはじめに、採用割合の変化には様々なタイプが存在している。例えば岩石グループ 3 の「圧縮強度」のように、採用割合が急激に増加するタイプ（以下、タイプ I という）、岩石グループ 2 の「割れ目の間隔」のように直線的に増加するタイプ（以

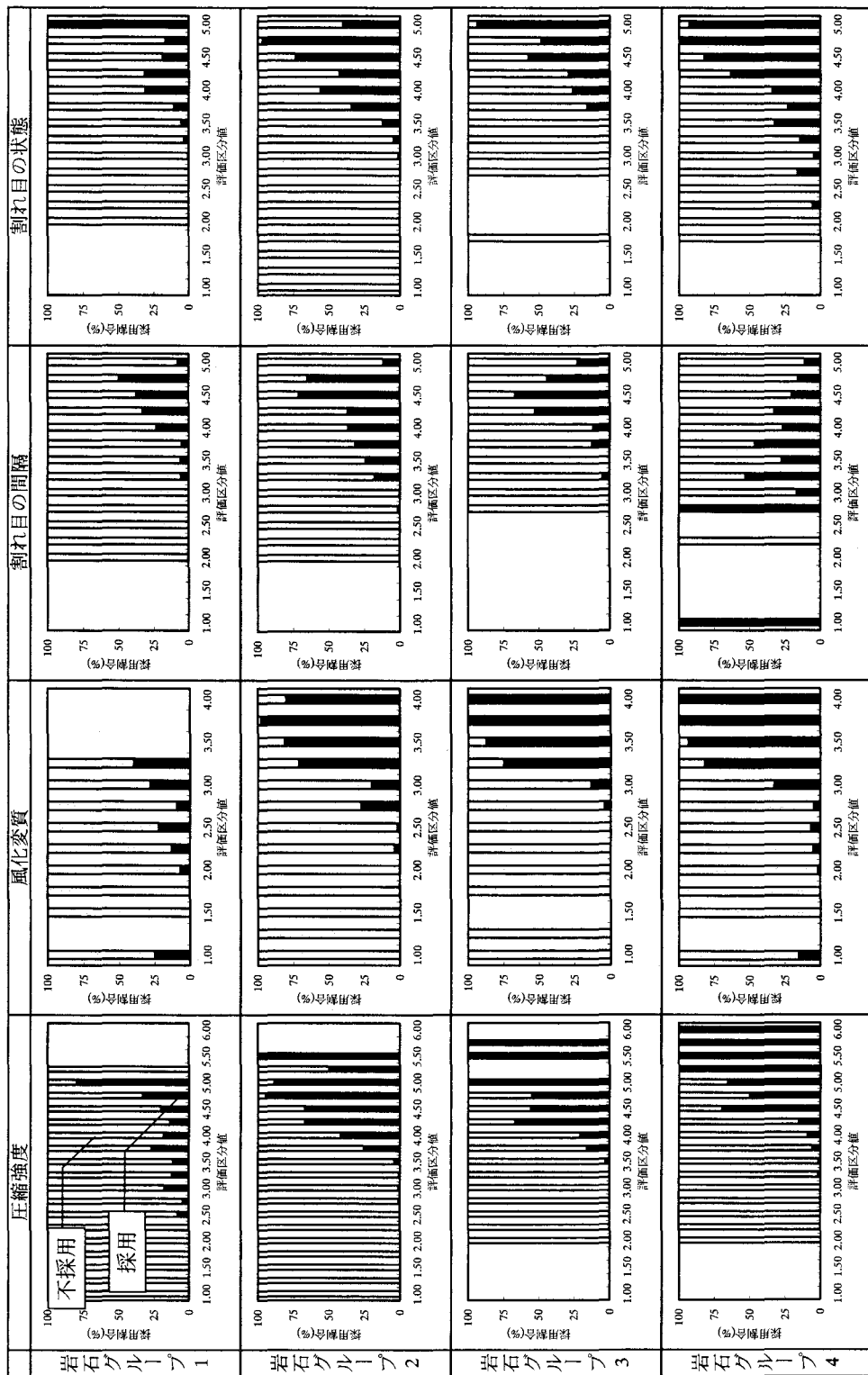


図-1 採用割合

下、タイプⅡという）、岩石グループ4の「割れ目の状態」のように緩やかに増加するタイプ（以下、タイプⅢという）に分類することができる。

タイプⅠは地山が不良に評価されるに従って積極的に採用されることから、鏡吹付け工の採用の判定に対する影響度が大きいことを示唆していると考えられる。さらにタイプⅡからタイプⅢとなるにつれてその影響度は小さくなることが予想される。一方、岩石グループ4の「割れ目の間隔」は、地山が不良と評価されるに従って、採用割合が減少するタイプ（以下、タイプⅣという）もみられた。タイプⅣは地山の評価に関わらず、採用されていることから、その影響度が小さいことを示唆していると考えられる。

以上のことから、ある評価区分値になると鏡吹付け工が採用され始め、そこから地山が悪く評価されるほど採用割合は増加する傾向がみられた。また採用割合の変化の仕方には、急激に増加するものや緩やかに増加するもの、逆に減少するものなど、様々なタイプが存在していることが分かった。

4. 多変量解析を用いた採用特性の把握及び採用予測の検討

(1) 判別分析の適用

鏡吹付け工の採用特性の把握及び採用予測を検討するために、多変量解析の1つである判別分析を用いた。

判別分析とは、サンプルが持っているいろいろな特性から、そのサンプルがどのグループに属するかを判別する手法であるが、その性質上、質的な予測値に対してどのような量的要因が効いているかという観点から要因分析を行うことができる。この性質を利用して、鏡吹付け工の採用特性の把握を行った。あるいは、質的データである目的変数を種々の量的な説明変数に基づき予測することもできる。この性質を利用して、鏡吹付け工の採用予測の検討を行った。

本報告では、目的変数を質的データである鏡吹付け工の採用の有無、説明変数を数量データである切羽観察4項目の評価区分値とする。

(2) 鏡吹付け工の採用特性の把握

鏡吹付け工の採用特性の把握を行うために、判別分析を切羽観察データに適用させた結果の一部を表-4に示す。

表-4 判別分析の結果

	判別的中率(%)	観察項目	F値	F値の比率(%)	増減のタイプ
岩石グループ1 硬質岩／塊状	77.95	圧縮強度	42.43	22	Ⅲ
		風化変質	2.86	1	Ⅲ
		割れ目の間隔	31.04	16	Ⅱ
		割れ目の状態	119.55	61	Ⅰ
岩石グループ2 中硬質・軟質岩／塊状	87.66	圧縮強度	213.31	44	Ⅰ
		風化変質	107.80	22	Ⅱ
		割れ目の間隔	55.64	12	Ⅱ
		割れ目の状態	103.58	22	Ⅱ
岩石グループ3 中硬質岩／層状	97.11	圧縮強度	216.44	43	Ⅰ
		風化変質	92.63	18	Ⅰ
		割れ目の間隔	59.61	12	Ⅱ
		割れ目の状態	135.59	27	Ⅱ
岩石グループ4 軟質岩／層状	90.46	圧縮強度	416.65	60	Ⅰ
		風化変質	223.34	32	Ⅰ
		割れ目の間隔	6.85	1	Ⅳ
		割れ目の状態	44.48	6	Ⅲ

ここで、表中の判別的中率とは実績と予測の一致率、つまり分析精度を表すものである。判別的中率は75%以上あれば分析精度は良いとされている²⁾。また、F値とは説明変数が目的変数に与える影響度を把握するもので、その値が大きいほど影響度は大きいことを表している。またF値の比率とは、切羽観察4項目のF値の総和を100%としたときの各切羽観察項目の比率を表している。さらには図-1で示した採用割合の増減のタイプも併せて示している。判別分析の結果を基に、採用特性について岩石グループ毎に分析し、以下に述べる。

a) 岩石グループ1（硬質岩／塊状）

判別的中率は77.95%と比較的良好な分析精度が得られている。F値の比率をみると、「割れ目の状態」が他項目に比べて極端に高くなっている。これは、岩片自身の強度が高く、塊状であるため、岩片の抜け落ちの判断が重要となる。したがって、鏡吹付け工の採用を判断するのに重要な情報としては割れ目に関する情報であり、それらの評価結果が採用の判定に相対的に大きな影響を及ぼすものと考えられる。

b) 岩石グループ2（中硬質・軟質岩／塊状）

判別の中率は87.66%とかなり良い分析精度が得られている。F値の比率をみると、極端に突出した切羽観察項目はみられなかった。これは、岩石グループ1に比べて岩片自身の強度が低いためであり、割れ目に関する情報だけでなく、岩石強度に関する情報についても重要であると考えられる。

c) 岩石グループ3（中硬質岩／層状）

判別の中率は97.11%と極めて良い分析精度が得られている。F値の比率をみると、岩石グループ2

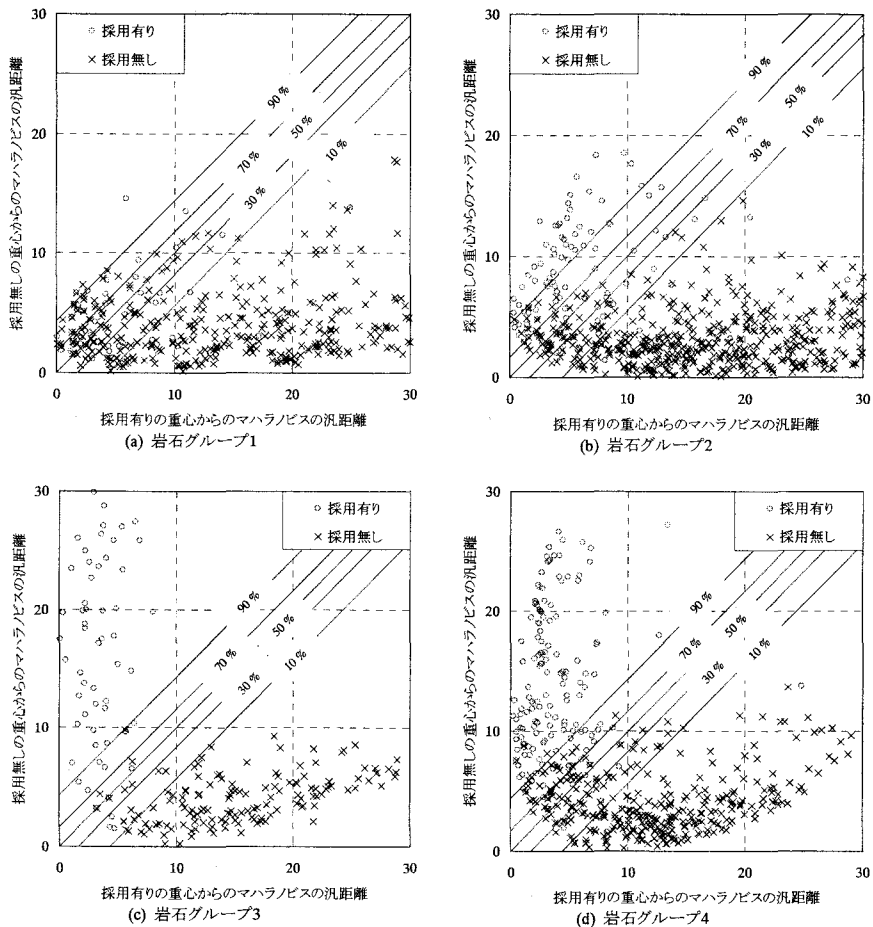


図-2 マハラノビスの汎距離と採用の有無との結果

と同様の傾向がみられ、「圧縮強度」が採用の判断の際には注目すべき項目であることを示唆している。但し層状岩盤において、層間の強度は重要ではあるが、地山の形状によっては岩片の抜け落ちが懸念されることから、割れ目に関する情報についての注意も必要であると考えられる。

d) 岩石グループ4 (軟質岩／層状)

判別の中率は90.46%とかなり良い分析精度が得られている。F値の比率をみると、「圧縮強度」が他項目に比べて極端に高くなっている。したがって、岩石強度に関する情報について重要であると考えられる。

判別分析の結果、鏡吹付け工採用の判断の際に、岩石グループ1～3については、「圧縮強度」や「割れ目の状態」、岩石グループ4については「圧縮強度」や「風化変質」が比較的重要視されている傾向がみられた。またF値の比率について、その値が大きいほど、タイプI及びIIに多く属している傾向がみ

られ、逆にF値の比率が小さいほど、タイプIII及びタイプIVに多く属している傾向がみられる。

(3) マハラノビスの汎距離による採用予測の試み

マハラノビスの汎距離による判別分析を用いて、鏡吹付け工の採用予測を試みる。ここでマハラノビスの汎距離による判別分析とは、当該サンプルが各グループの重心までどれほどの距離があるかを調べ、最も近い距離のグループに属すると判定する方法である。したがって本報告の場合、個々の切羽観察結果について、鏡吹付け工採用の有無それぞれのマハラノビスの汎距離を求め、そのグループの重心に近い方に属していると判定することとなる。

個々の切羽観察データについて、鏡吹付け工採用の有無それぞれのマハラノビスの汎距離を算出し、分布させたものを図-2に示す。ここで図中の百分率は採用確率を表す。採用確率とは、マハラノビスの汎距離による判別分析の判定が、どの程度の確率

で鏡吹付け工採用有りのグループに属するかについて表したものであり、マハラノビスの汎距離などから求められる。また図中の凡例の○×は現場での施工実績を表している。したがって、採用確率 50%以上の領域に○のデータがあれば、実績は採用有り、予測も採用有りに判定されていることを表している。逆に採用確率 50%以上の領域に×のデータがあれば、実績は採用無し、予測は採用有りに判定されていることを表している。

この図から、採用確率 50%を境にして、ある程度判別できていることが分かる。また採用確率が大きくなればなるほど実績データは採用有り、逆に小さくなればなるほど実績データは採用無しが多く分布していることが分かる。

このことから、鏡吹付け工の採用判断について、判別分析による採用予測の有用性を示すことができたといえる。ただし、マハラノビスの汎距離による判別分析を用いて得られた予測は、あくまでも確率であることから、実績と予測が一致しないことは容易に考えられる。

したがって、本報告で得られた知見、さらにいえば鏡吹付け工の採用確率を鏡吹付け工の採用判断の一材料として位置付け、その他に「こそくの状況」、「走向・傾斜」、「削孔時の状況」など、切羽観察 4 項目以外の情報も加味しながら、総合的に判断することが望ましいと思われる。

今後トンネル現場において、本報告で得られた知見が、鏡吹付け工の採用判断の一助となれば幸いである。

5. おわりに

本報告では、通常支保パターンの選定に用いられている切羽観察項目の評価点と鏡吹付け工の採用の有無との関係に着目し、両者の関係を整理した。また、多変量解析の一つである判別分析を切羽観察 4 項目に適用させることで、鏡吹付け工の採用特性を把握すると共に、切羽観察結果に基づく採用判断の予測を試みた。得られた結論を以下に示す。

- ① JH に蓄積された切羽観察データを用いて、切羽観察結果と鏡吹付け工の採用の有無との関係を整理した。その結果、地山の評価が悪くなるほど採用割合が増加する傾向にあることが分かった。またその増加の仕方には、様々なタイプが存在していることが分かった。

- ② 判別分析を用いることにより、鏡吹付け工の採用特性の把握を行った。その結果、鏡吹付け工採用の際に重要視すべき切羽観察項目を岩石グループ毎に抽出することができた。特に、岩石グループ 1~3 については「圧縮強度」と「割れ目の状態」、岩石グループ 4 については「圧縮強度」と「風化変質」が特に重要であることが分かった。
- ③ マハラノビスの汎距離による判別分析を用いることで、鏡吹付け工の採用判断の予測を試みた。その結果、実績と予測が一致しない部分もみられたが、採用確率を把握することができるため、採用の判定の一材料としての有用性を示すことができたと考えられる。

今後は、鏡吹付け工の採用を簡易的に判定できるような指標を確立すると共に、その他の補助工法についても同様の手法を用いた検討を行っていく予定である。

謝辞

本報告を行うにあたり、JH 試験研究所には貴重な切羽観察データを提供して頂きました。また JH 試験研究所の中田雅博トンネル研究主幹、山口大学の榊原弘之助教授、青木宏一助手には有益なご意見を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 本間宏記、栃木博、古川浩平、中川浩二：双設トンネルの施工実績に基づく地山評価と補助工法の採用特性に関する研究、土木学会論文集、No.553/VI-33, pp. 21-31, 1996.12
- 2) 中川浩二、御手洗良夫、寺戸秀和、木村恒雄：山岳トンネルの補助工法の選定における技術者の評価と意思決定に関するアンケート調査、土木学会論文集、No.602/VI-40, pp. 53-65, 1998.9
- 3) 日本道路公団：設計要領第三集トンネル, pp. 86-88, 1997.
- 4) 日本道路公団：設計要領第三集トンネル, pp. 69-70, 1997.
- 5) 菅民郎：多変量解析の実践（上）、現代数学社, pp. 87-126, 1993.