

山口県切羽評価システムを使用した補助工法選定システムの構築



所属：山口県土木建築部道路建設課
発表者：阿部 雅昭

1 はじめに

山岳トンネル工法は、地形・地質上良好な条件の箇所のみならず、不良地山や土被りの薄い都市部などへ、その施工領域が飛躍的に拡大している。これは、これまでトンネル施工上のボトルネックであった切羽の自立性確保が、多種多様な切羽対策補助工法の開発・適用によってより確実に実現可能となったことが拡大理由の一つと言われている。

その反面、補助工法の安易な採用はトンネル建設コストの想定外の増加を引き起こす例も散見され、補助工法の採用に際しては地山状況に見合った適切な工法・施工量の選定が求められている。しかしながら、補助工法の採用が通常のトンネル施工の一プロセスになりつつある現在においても、その選定基準は必ずしも明確ではない。加えて、それぞれの補助工法の採用は、施工性・経済性などから総合的に判断され選定されているものの、施工技術者の経験的主観に大きく依存しているとの指摘もある。

その一方、施工実績は、見方を変え、各技術者が持つ技術や経験を総合的かつ最大限に駆使した成果であるとも言える。本論は、施工事例を分析し技術者による判断基準を数量化することにより、合理的な補助工法選定システムの開発及びその適用について述べる。

2 山口県土木建築部官学共同研究における取り組み

山口県土木建築部においては、地元に着目した高度な技術を有するシンクタンクである山口大学と連携し、土木行政の特定課題に大学と県が共同して問題解決を図る取り組みとして、「官学共同研究」を平成11年度から進めている。

トンネル工事に関するものとしては、平成14年～16年に官学共同研究「山口県版切羽評価システムの検討」を行っている。現在、山口県の施工するトンネルでは、この共同研究成果である切羽評価システムを導入し、合理的なトンネル切羽評価及び支保選定を実施している。加えて「山口県版切羽評価システムの検討」の中で、補助工法と切羽評価に良い相関関係が見受けられる可能性が明らかとなった。

一方、トンネル工事の現場においては、補助工法の必要性・重要性は十分認識しているものの、その採用基準が不明確であることから、補助工法の採用にあたっては、現場での判断に技術者が窮する状況が多く、特に、施工中に急遽実施される補助工法は、緊急に併用しなければ効果を十分に得られない場合も多く、検討に手間取って、事故、大きな損失、環境への悪影響を招くことのないよう臨機に適切な判断が求められ、採用にあたって技術や経験が豊富な施工サイドの意見を尊重する傾向にある。

このため、平成17年度からの3箇年計画で官学共同研究「山口県切羽評価システムを援用した補助工法選定システムの構築」を新規に実施し、トンネル切羽評価システムを援用して補助工法の合理的な判断をおこなうための補助工法選定システムの開発を行うこととした。

なお、対象補助工法は、切羽鏡吹付けコンクリートおよびフォアポーリング・パイリング工法を検討対象とした。

3 補助工法選定システムの構築

3.1 切羽観察記録データベース

切羽観察記録データベースとしては、1997年から2002年に旧日本道路公団により施工されたトンネルのうち、切羽観察が実施されたトンネル本数152本、切羽観察データ数27,388データを用いた。

切羽観察記録表には、切羽観察6項目をはじめ、切羽安定対策工実施の有無や主岩種などの情報が記述されている。分析を始めるにあたり、切羽・天端の安定性は地質状況により異なることが予測されるため、硬質岩 塊状、中硬質・軟質岩 塊状、中硬質岩 層状、軟質岩 層状 の4つの岩石グループに大別し、それぞれのグループ毎に整理・分析を行う。

表-2 , 表-3 に岩石グループおよびグループに属するデータ数を示す。

表-1 切羽観察 6 項目

観察項目	評価区分					
	100以上	100~50	50~25	25~10	10~3	3以下
圧縮強度 ポンド	4以上	4~2	2~1	1~0.4	0.4以下	
ハンマーの打撃による強度の目安	岩片を地面に置きハンマーで強く打つと割れにくい	岩片を地面に置きハンマーで強く打つと割れる	岩片を手を持ってハンマーでたたき合わせて割ることができる	岩片をおおむね両手で岩片を割り分けて割ることができる	両手で岩片を割り分けても割ることができる	力を込めれば小さな岩片を指先で潰すことができる
評区分	1	2	3	4	5	6
風化の目安	概々新鮮	割れ目の風化変質	岩芯まで風化変質	土砂に風化 未固結土砂	著しい変質により全体が土砂状 粘土化	
熱水変質などの目安	変質は見られない	変質により割れ目に粘土を挟む	変質により岩芯まで強度低下			
評区分	1	2	3	4		
割れ目間隔	d 1m ROD 80以上	1m > d 50cm 80~50	50cm > d 20cm 60~30	20cm > d 5cm 40~10	5cm > d 20以下	
評区分	1	2	3	4	5	
割れ目状態	割れ目は密着している	割れ目の一部の開口している (幅 < 1mm)	割れ目の多くが開口している (幅 < 1mm)	割れ目が開口している (幅 1~5mm)	割れ目が開口し 5mm 以上の幅がある	
割れ目の充填物	なし	なし	なし	薄く粘土を挟む (5mm以下)	厚く粘土を挟む (5mm以上)	
割れ目の粗さ	粗い	割れ目が平滑	一部は粗い	よく磨かれた粗い		
評区分	1	2	3	4	5	

表-2 岩盤区分

強度区分 風化区分	硬質岩	中硬質岩	軟質岩
塊状	グループ1 [硬質岩・塊状] 花崗岩、中古生層砂岩、石英斑岩、花崗閃緑岩など	グループ2 [中硬質岩・塊状、軟質岩・塊状] 凝灰岩、火山礫凝灰岩、流紋岩、安山岩、玄武岩、砂岩など	
層状		グループ3 [中硬質岩・層状] 中古生層頁岩、粘板岩など	グループ4 [軟質岩・層状] 緑色片岩、黒色片岩、第三紀層泥岩など

表-3 切羽観察データ数

岩石グループ	トンネル本数	切羽観察データ
硬質岩(塊状)	58	6,634
中硬質・軟質岩(塊状)	81	8,734
中硬質岩(層状)	33	5,687
軟質岩(層状)	55	6,333
計	227	27,388

湧水量	状態	なし 滲水 1/分以下	湧水程度 1~20/分	集中湧水 20~100/分	全面湧水 100/分以上
評区分		1	2	3	4
劣化	水による劣化	なし	緩慢劣化	軽微劣化	流出
評区分		1	2	3	4

3.2 鏡吹付け選定手法の考案

3.2.1 鏡吹付け評価点表の考案

多変量解析を用いて鏡吹付けコンクリートの採用に対する各観察項目の影響度を調べた。この影響度に着目し、影響度が大きいほど高い評価点(最高点)を与え、その合計が100点となる配点法を考案した。その結果を表-4に示す。

次に、各評価区分値への点数配分については、評価区分値と採用割合の関係に着目した。

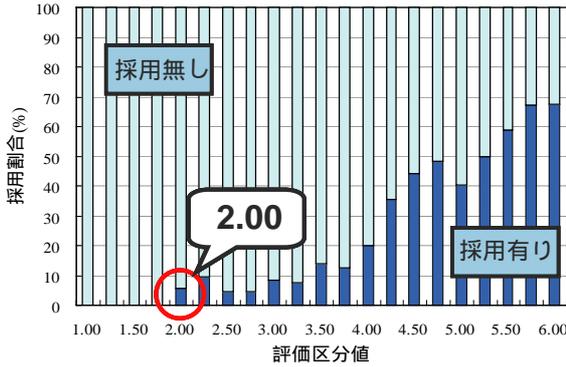
例として図-1の軟質岩(層状)の圧縮強度の採用割合を示す。この図より、採用の有無の境界にあたる評価区分値が2.00以下では鏡吹付け工の採用例がないことがわかる。従って、その評価区分値より大きい整数値(3)から評価区分値の最大値(6)まで表-4をもとにほぼ等間隔で配分し、採用の無い評価区分値については評価点をゼロとした。

他の観察項目、岩石グループについてもそれぞれ同様に配分し、表-5に示す鏡吹付け評価点表を作成した。表-4から、岩石グループ1(硬質岩)では、地山や岩片自身の強度は高いため、切羽近傍の状態に対する評価が重要となると思われる。従って必要な情報としては、湧水・(水による)劣化であり、それらの評価区分値の寄与度が大きくなっているものと思われる。同様に、岩石グループ2(中硬質・軟質岩)では、地山ブロックの抜け落ちの判断と、切羽近傍の状態に対する評価が重要となる。従って割れ目の状態、(水による)劣化の項目の影響度が高くなっている。それに対して岩石グループ3,4(中硬質岩~軟質岩)では、地山や岩片の強度が地山の安定性評価に重要な要素であるため、岩片強度の寄与度が大きく評価される結果となっている。

表-4 各観察項目における最高点の配点表

		影響度(%)	最高点
グループ1 硬質岩 <塊状>	圧縮強度	15.1	15
	風化変質	10.9	11
	割れ目間隔	8.0	8
	割れ目状態	19.5	19
	湧水	21.7	22
	劣化	24.8	25
合計		100	100
グループ2 中硬質・軟質岩 <塊状>	圧縮強度	17.8	18
	風化変質	12.8	13
	割れ目間隔	12.6	13
	割れ目状態	23.8	24
	湧水	7.4	7
	劣化	25.4	25
合計		100	100
グループ3 中硬質岩 <層状>	圧縮強度	21.4	22
	風化変質	32.6	33
	割れ目間隔	16.9	17
	割れ目状態	17.4	17
	湧水	4.3	4
	劣化	7.4	7
合計		100	100
グループ4 軟質岩 <層状>	圧縮強度	38.6	39
	風化変質	21.9	22
	割れ目間隔	4.0	4
	割れ目状態	13.1	13
	湧水	14.5	14
	劣化	7.9	8
合計		100	100

図 - 1 評価区分値における採用割合
(軟質岩・層状/圧縮強度)



3.2.2 鏡吹付け評価点の算出

鏡吹付け評価点の算出方法は、まず切羽観察 6 項目の評価結果より、表の鏡吹付け評価点表を用いて、各観察項目の天端部、左右肩部の評価点を算出する。次に、切羽評価と同じく天端部の評価結果を左右肩部より重く評価する加重平均値を用いて、各観察項目の評価点を算出する。各観察項目の評価点の合計を鏡吹付け評価点とする。

3.2.3 採用確率算定手法の考案

評価点では鏡吹付けコンクリート採用の必要性の判断がしがたい。そこで、目的変数を鏡吹付けの採用の有無、説明変数を各観察項目の評価区分値とした多変量解析結果より求められた鏡吹付け採用有りの確率分布を求めた。図 - 2 にグループ 4 のデータから算出された鏡吹付け評価点と、鏡吹付け採用有りの確率との関係を示す。図からわかるように鏡吹付け評価点と採用有りの確率との相関性が認められる。

そこで、鏡吹付けコンクリート採用の有無の判別手法として、図 - 2 のデータにロジスティック式による回帰分析を行う。ロジスティック式は以下に示す通りであり、回帰分析より求められたそれぞれの岩石グループのパラメーターを表 - 6 に示す。このロジスティック式に鏡吹付け評価点を代入し、求められた値が 50% 未満なら鏡吹付け採用無しとし、50% 以上なら鏡吹付け採用有りとして判断することとした。

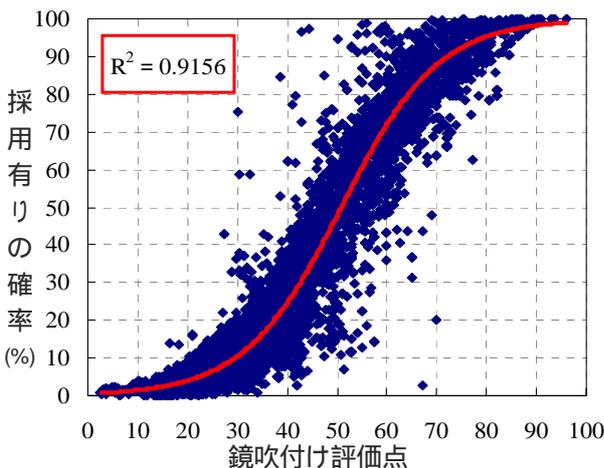


図 - 2 評価点と採用有り確率の分布

グループ 4 における岩石グループの R^2 (決定係数) は、0.9156 ときわめて高く、鏡吹付け評価点と鏡吹付け採用有りとの間に高い相関性があるといえる。

表 - 5 鏡吹付け評価点表

岩石グループ	観察項目	評価区分値						採用の有無の境となる評価区分値
		1	2	3	4	5	6	
グループ1 硬質岩 <塊状>	圧縮強度	0	3	6	9	12	15	1.50
	風化変質	0	3	7	11			1.00
	割れ目間隔	0	2	5	8			2.00
	割れ目状態	0	6	12	19			2.00
	湧水	0	7	14	22			1.00
	劣化	0	8	16	25			1.00
グループ2 中硬質・軟質岩 <塊状>	圧縮強度	0	3	6	10	14	18	1.75
	風化変質	0	4	8	13			1.00
	割れ目間隔	0	3	6	9	13		1.00
	割れ目状態	0	6	12	18	24		1.00
	湧水	0	2	4	7			1.00
	劣化	0	8	16	25			1.00
グループ3 中硬質岩 <層状>	圧縮強度	0	5	10	16	22		2.00
	風化変質	0	16	33				2.00
	割れ目間隔	0	5	11	17			2.00
	割れ目状態	0	5	11	17			2.00
	湧水	0	1	2	4			1.00
	劣化	0	2	4	7			1.00
グループ4 軟質岩 <層状>	圧縮強度	0	9	19	29	39		2.00
	風化変質	0	7	14	22			1.00
	割れ目間隔	0	1	2	4			2.50
	割れ目状態	0	3	6	9	13		1.75
	湧水	0	4	9	14			1.00
	劣化	0	2	5	8			1.00

ここで、
 a, b, k : 算出式を表すパラメーター
 x : 鏡吹付け評価点
 y : 鏡吹付けの採用有りの確率

$$y = \frac{k}{1 + ae^{-bx}}$$

表 - 6 鏡吹付け算出式を表すパラメーター

岩石グループ	a	b	k
硬質岩 塊状	187.6	0.1025	100
中硬質・軟質岩 塊状	7,444.9	0.1453	100
中硬質岩 層状	157,166.5	0.1850	100
軟質岩 層状	120.4	0.0916	100

3.3 先受けボルト選定手法

鏡吹付け評価と同様の切羽観察データ及び解析手順を用いて、先受けボルトの選定手法の検討を行う。

3.3.1 AGF・FP評価点表の考案

観察項目、岩石グループについて、表-7に示す先受けボルトの評価点（以下AGF・FP評価点と呼ぶ）の評価点表を作成した。この表から、いずれの岩石グループにおいても、切羽近傍の状態に対する評価、つまり、湧水・劣化の評価が重要となっていることが分かる。

3.3.2 AGF・FP評価点の算出

AGF・FP評価点の算出方法は、まず切羽観察6項目の評価結果より、AGF・FP評価点表を用いて、各観察項目の天端部のみの評価点を算出する。

3.3.3 採用確率算定手法の考案

AGF・FP評価点についても鏡吹付け評価点と同様に、AGF・FP採用有りの確率の分布を調べた。図-3にその結果を示す。図からわかるように、AGF・FP評価点と採用有りの確率の間には相関性が認められる。

そこで、鏡吹付け評価点と同様に、ロジスティック式による回帰分析を行う。ロジスティック式は以下に示す通りであり、回帰分析より求められたそれぞれの岩石グループのパラメータを表-8に示す。このロジスティック式に、鏡吹付け評価点を代入し、求められた値が50%未満なら鏡吹付け採用無しとし、50%以上ならAGF,FP採用有りとして判断することとした。

表-7 AGF・FP評価点表

岩石グループ	観察項目	評価区分値						採用の有無の境となる評価区分値
		1	2	3	4	5	6	
岩石グループ1 硬質岩 <塊状>	圧縮強度	0	1	2	4	6	8	1.00
	風化変質	0	3	6	10			1.00
	割れ目間隔	0	3	6	9	12		1.00
	割れ目状態	0	2	4	7	10		1.00
	湧水	0	10	21	32			1.00
	劣化	0	9	18	28			1.00
岩石グループ2 中硬質・軟質岩 <塊状>	圧縮強度	0	4	8	12	16	21	1.00
	風化変質	0	2	4	7			1.00
	割れ目間隔	0	5	10	15	20		1.00
	割れ目状態	0	2	5	8	11		1.00
	湧水	0	4	8	13			1.00
	劣化	0	9	18	28			1.00
岩石グループ3 中硬質岩 <層状>	圧縮強度	0	5	11	17	23		2.00
	風化変質	0	2	4	7			1.00
	割れ目間隔	0	4	9	14			2.00
	割れ目状態	0	6	12	19			2.00
	湧水	0	5	10	16			1.00
	劣化	0	7	14	21			1.00
岩石グループ4 軟質岩 <層状>	圧縮強度	0	3	6	10	14		2.00
	風化変質	0	8	16				2.00
	割れ目間隔	0	5	10	15			2.00
	割れ目状態	0	1	3	5			2.00
	湧水	0	9	18	28			1.00
	劣化	0	7	14	22			1.00

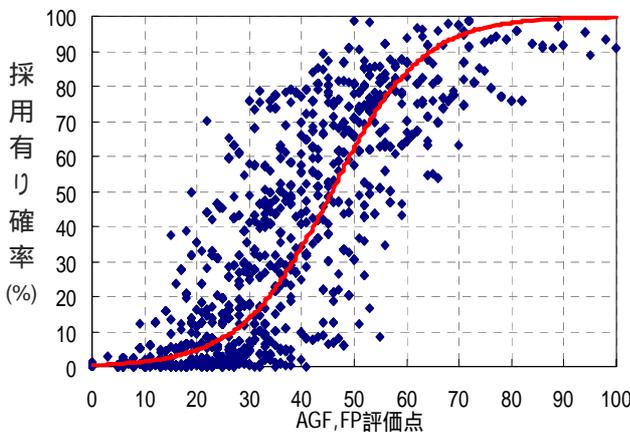


図-3 評価点と採用有りの確率の分布

$$y = \frac{k}{1 + ae^{-bx}}$$

ここで、
 a,b,k: 算出式を表すパラメーター
 x: 鏡吹付け評価点
 y: 鏡吹付けの採用有りの確率

表-8 AGF・FP算出式を表すパラメーター

岩石グループ	a	b	k
硬質岩 塊状	79.3	0.1184	100
中硬質・軟質岩 塊状	204.3	0.0990	100
中硬質岩 層状	3,299.9	0.1391	100
軟質岩 層状	200.1	0.1166	100

4 補助工法選定システムの適用性の検証

前章で示した補助工法選定システムを、山口県が施工したトンネルに適用し、選定システムの適用性を検証した。検証対象としたトンネルの地質は、比較的軟質な泥質片岩・黒色片岩であり層状流れ目で、割れ目沿いに風化し、鏡および天端付近の肌落ちがたびたび発生していた。

4.1 鏡吹付け選定手法の検証

鏡吹付け採用有りの確率分布を経距変化図として図-4に示す。同図には、既往研究^{1), 2)}による確率分布もあわせて示した。なお、一致率とは、実績群と推定群における採用の有無についての一致の度合いのことである。各研究の施工実績との一致率を表-9に示す。一致率は、施工実績の区間に採用有りの確率が概ね収まっていることから一致状況は良好である上に、既往研究より改善が認められるため、本研究で提案する鏡吹付け選定手法の適用性は高いと考えられる。

図 - 4 鏡吹付け採用有りの確率分布経距変化図

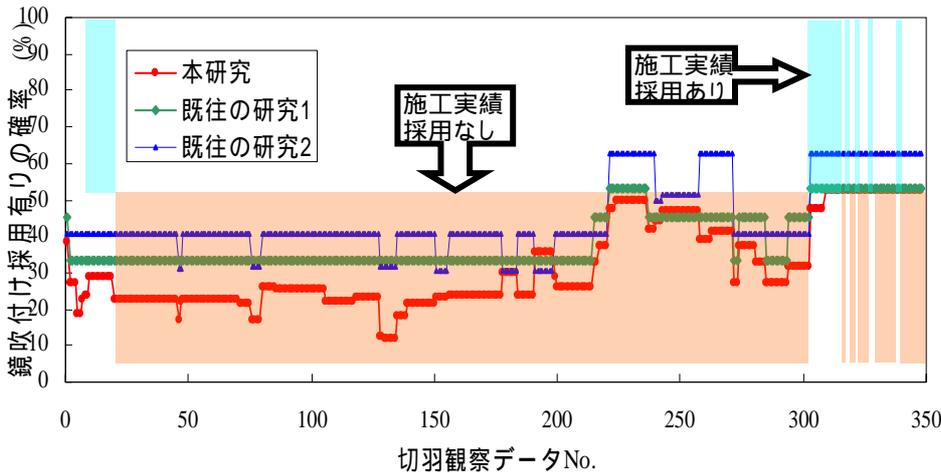


表 - 9 鏡吹付け施工実績との一致率

	一致率 (%)	
	中硬質岩層状	軟質岩層状
本研究	80.88	83.33
既往の研究1	76.49	80.46
既往の研究2	75.71	71.26

4.2 AGF・FP選定手法の検討

AGF・FP 評価点採用有りの確率を求め、施工実績との一致率を既往の研究と比較した。各研究の AGF・FP 評価点採用有りの確率分布を経距変化図として図 - 5 に示す。また、各研究の一致率を表 - 10 に示す。図からわかるように、施工実績の区間と AGF・FP 採用有りの確率の相関があまり良くないことがわかる。一致率も、岩石グループによって 78%と高い値を示すグループや、31%しか一致しなかったグループなど、大きなばらつきがあり、AGF・FP の選定手法の確立には至らなかったと考えられる。AGF・FP の選定には、切羽観察記録に加えて、さらなる地山情報が必要であると考えられる。

図 - 5 AGF・FP採用有りの確率分布経距変化図

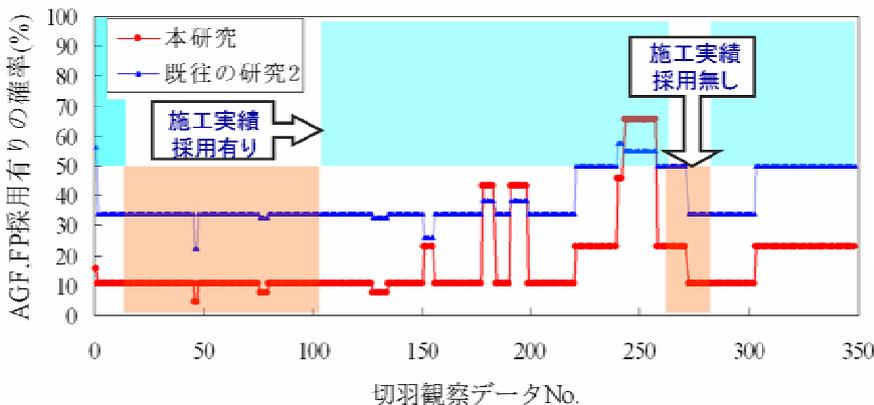


表 - 10 AGF・FP施工実績との一致率

	一致率 (%)		
	硬質岩塊状	中硬質岩層状	軟質岩層状
本研究	38.86	78.88	31.90
既往の研究	50.29	59.36	50.57

5 おわりに

本研究は、平成 14 ~ 16 年に実施された官学共同研究「山口県版切羽評価システムの検討」を契機に山口県で導入された切羽評価システムを、トンネル掘削補助工法の合理的な選定システムに援用することで、合理的な補助工法選定システムの開発を目指した。山口県内で施工したトンネルに適用したところ、鏡吹付け選定手法に関しては適用性が確認できた。このため、今後、施工現場において運用方法の検討を行うとともに、運用マニュアルの作成を行う。

一方、AGF・FP 選定手法に関しては適用性の判断が困難であった。今後、さらにデータを収集し、その問題点を明らかにするように研究を進めて行く。

【参考文献】

- 1) 馬吉祥代: 切羽観察結果に基づく鏡吹付けコンクリートの定量的な選定手法の検討, 山口大学卒業論文 2005.3.
- 2) 進士 正人, 榎田 敦之, 関 茂和, 中川 浩二; “切羽観察記録結果を用いた切羽補助工法の選定システム”, 土木学会論文集 F, Vol. 62, No. 3, pp.513-518, (2006)
- 3) 進士正人: 山口県切羽評価システムを援用した補助工法システムの構築, 平成 17 年度官学共同研究報告書