

NATM補助工法の選定指標について

松田 紀子¹・濱本 敬治²

¹近畿地方整備局 大阪国道事務所 管理第二課 (〒536-0004 大阪府大阪市城東区今福西2-12-35)

²近畿地方整備局 兵庫国道事務所 品質確保課 (〒650-1600 兵庫県神戸市中央区波止場町 3-11)

山岳トンネルは、掘削時に地質を再評価し、設計時の支保工や補助工法等を変更または新規に採用を決定することが一般的であり、設計時と施工時で乖離が生じることがある。これらの変更が事業費に与える影響は小さくなく、事業を合理的に進めるためには適切な地山評価を行うことが重要となる。しかしながら、山岳トンネルの地質の評価は定性的で不明確な部分が多いことから、本稿では、ボーリングコアの評価に着目し、統計分析を用いて定量化した補助工法採用の有無を選定する指標を作成した。また、本検討結果および事例収集の結果を反映した、「NATM補助工法の手引き（案）、平成12年」を改定したので紹介する。

キーワード 山岳トンネル、NATM補助工法、地山等級判定、ボーリング、数量化Ⅱ類分析

1. はじめに

近畿地方整備局では、1,937kmの管理路線延長に対し198本（令和2年1月時点）のトンネルの管理を行っている。また現在、一般国道158号大野油坂道路や一般国道42号すさみ串本道路等において複数の山岳トンネル事業を進めている。

山岳トンネルは、掘削時に地質を再評価し、設計時の支保工や補助工法等を変更または新規に採用を決定することが一般的であり、設計時と施工時で乖離が生じることがある。これらの乖離が事業費に与える影響は小さくないため、事業を合理的に進めるためには適切な地山評価を行う必要がある。

近畿地方整備局では、「トンネル地山等級判定マニュアル（案）」を整備し、地山の状態を点数化することで地山等級（支保パターン）の判定指標を明確化している¹⁾。さらに、統一的な地山等級の判定が行えるよう、発注者と受注者による地山等級の判定において、上記のマニュアルを用いて第三者の岩判定員（トンネル経験豊かな技術者）による判定を支援する業務を行っている。一方で、補助工法については、地山の状態を評価することは地山等級判定と同様であるが、明確な選定指標はなく、統一的な評価をするに至っていない。

そのため、補助工法の有無を選定する明確な指標が求められている。

上記を解決するため、山岳トンネルの施工実績を整理・分析し、補助工法採用の有無、採用の場合の工種を選定する指標の検討を行った。

2. 山岳トンネルの構造と補助工法

現在の山岳トンネルは、NATM（New Austrian Tunneling Method）と呼ばれる工法を採用している。

この工法では、地山自体が空間を保持する能力に期待するため、構造は最小限の支保工（吹付コンクリート、ロックボルト、鋼アーチ支保工等）で構成されている。

支保工は、安全性や構造安定性と経済性のバランス（合理化）を図るため、施工時に切羽観察や変位計測等²⁾を行い地山を評価し、設計段階で計画された地山等級（支保工）の見直しが行われる場合がある。

補助工法は、坑口部など地質が悪く、地山が空間を保持する能力を発揮するまでに崩壊する可能性のある場合や将来的にトンネルの安定性が確保できない場合、トンネル掘削により周辺環境に大きく影響を与えると判断される場合において施工される。

図-1³⁾に補助工法が必要となる地山の現象を示す。図の(1)~(5)に示された地山現象に対し、施工時の安全性やトンネル構造の安定性、周辺環境の保護を目的として補助工法が実施される。また、その工法は現象によってさまざまであり、選定手法は現象によって異なる。

本検討では、実際に設計段階や施工段階において問題となるケースが多く、選定指標がわかりにくい(1)切羽崩壊（天端崩落、鏡崩壊、脚部沈下）に対する補助工法の選定指標を対象とした。

写真-1に切羽崩壊の例（天端崩落）を示す。また、図-2に天端崩壊を抑制するための補助工法の例を示す。切羽崩壊は、写真に示す通り掘削面（切羽）の崩壊を伴い

施工時の安全性で問題となる事例が多い現象である。

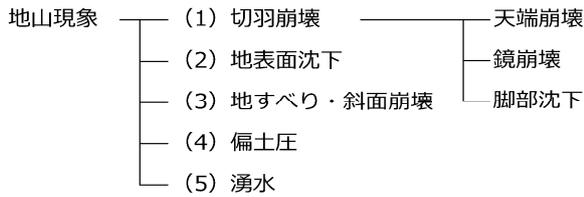


図-1 補助工法が必要となる地山の現象³⁾



写真-1 切羽崩壊の例（天端崩落）

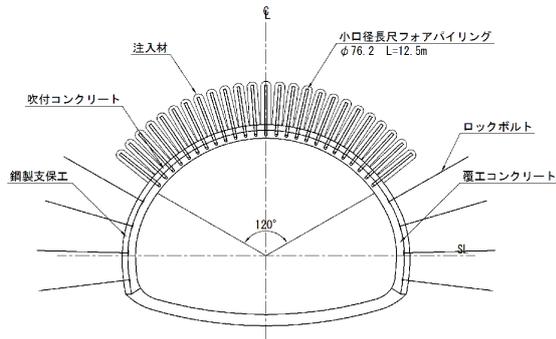


図-2 天端崩壊を抑制するための補助工法の例³⁾

3. 補助工法の選定指標に関する検討

(1) 従来の選定方法

切羽崩壊（天端崩落、鏡崩壊、脚部沈下）現象の大きな要因は不良地山であり、設計段階では地質調査結果を施工段階ではこれに加え、切羽観察や計測データ等を基に不良地山であることを整理し、補助工法の選定を行っている。

設計段階で活用する主な地質調査結果は、弾性波速度、ボーリング（コア、柱状図）、原位置・室内試験結果、地表踏査結果がある。地山等級（支保工）は、これらの調査結果を総合的に判断し、地山状況を想定して決定する。補助工法についても同様に評価を行うが、弾性波速

度の落ち込みや、ボーリングでの状況を定性的に評価される場合が多い。地山等級は、施工段階においてマニュアル⁴⁾に基づいて判定されるが、補助工法はマニュアル⁴⁾に示される判定区分よりもさらに地山状態の悪い条件で採用されるためマニュアルでの点数評価は難しい。まれに滑り計算や、計測データを基に数値的に示される場合もあるが、地質の状況を定性的に評価している場合が多い。

(2) 選定指標の抽出と検討方法

本検討においては、以下の理由によりボーリングコアを選定指標として抽出した。

- a) 地質状況を直接確認できること。
- b) 地質不良箇所は坑口に近い低土被り部に多く、近年では坑口部においてほとんどのケースで水平ボーリングが実施されていること。
- c) ボーリングコアの評価が地山等級判定⁴⁾の項目と類似していること。
- d) 施工段階でも前方予測に活用できること。

具体的には、道路トンネルの施工実績から補助工法の採用区間とボーリングコアの評価との関係を数量化^{II}類により分析を行い、得られた結果を基に、ボーリングコアの評価を点数化し、補助工法の有無、採用された工種との関係を整理した。

(3) 検討対象データ

検討の対象は、近畿地方整備局管内で2009年から2017年の間に施工が完了した道路トンネルである。図-3に、検討の対象としたトンネル延長と補助工法の採用延長、割合を示す。トンネルは67本であり、全体延長が約66,000mに対して補助工法が採用された区間延長は、8,500mであり、割合は12.9%である。補助工法はDI~DIII（坑口パターン）の地山が比較的悪いと判断される区間で採用されている。また、補助工法が採用された延長のうち、天端崩落に対して実施された補助工法の割合は97%（全体の12.5%）を占める。

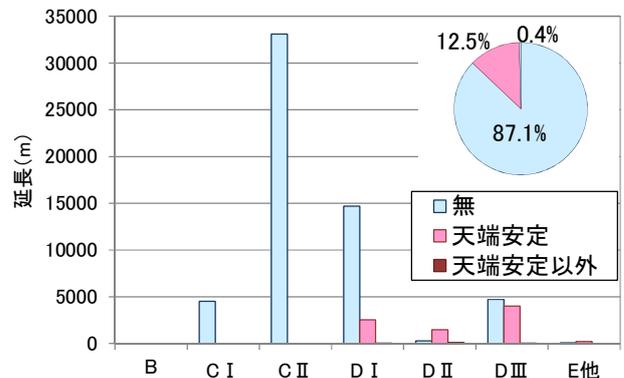


図-3 補助工法の採用延長と割合

(4) ボーリングコアの分析

ボーリングコアは、採取後コアの観察が行われる。この観察結果に、コアの状態を表す5つの評価項目「(A)硬軟、(B)コア形状、(C)割れ目の状態、(D)風化、(E)RQD」がある。この評価項目が、地山等級判定に用いられる項目と類似しており、点数化することで地山等級判定に近い評価が行えると考えた。

本検討では、ボーリングコアの評価項目を点数化し、補助工法の有無・工種との関連性について、地山等級判定に使われている切羽評価点の考え方を参考に統計的手法（数量化Ⅱ類）を用いて結び付けを行った。

表-1にボーリングコアの評価項目と区分を示す。(A)～(E)の5項目を4区分で評価することとした。実際の区分は、最小で4区分、最大で8区分であったが、最小の区分に合わせて4区分で統一した。再区分をするにあたって、良好の評価は1区分とし、評価に影響を与える不良の評価に重み付けを与えて3区分とした。以上の情報を基に、補助工法の有無と工種を“目的変数”，ボーリングコアの評価項目を“説明変数”として、数量化Ⅱ類による分析を行い、補助工法の選定においてコアの各評価項目が影響を与える割合（レンジ）を算出し、レンジから“重み係数”を算出し、この重み係数を用いた平均値をコアの評価点とした。

補助工法の工種は、検討対象とした施工事例において天端崩落対策において採用事例の多い“注入式フォアボーリング、小口径長尺鋼管フォアパイリング、長尺鋼管フォアパイリング”とした。

さらに、収集した施工事例のうち分析対象としたトンネルは、ボーリング結果と補助工法の情報が明確に整理できた43トンネルとした。検討対象区間は、水平ボーリングが実施されていた区間、周辺環境対策（地表面沈下）等で採用された区間を除外した2,743mを対象とした。なお、分析はボーリングコア1m毎とした。

表-1 ボーリングコアの評価項目と区分

区分	1	2	3	4
(A) 硬軟	極硬または硬ハンマーで容易に割れず、金属音がする。	中硬、ハンマーで容易に割れる。	軟、ハンマーでポロポロに砕ける。	極軟、マサ土、粘土状。
(B) コア形状	長さが15cm以上の棒状コア	長さが15～5cmの棒状～片状コア	長さが5cm以下の棒状～片状コアでかつコアの外周の一部が認められるもの。	土砂状(角礫、砂、粘土)のものまたはコアの採取ができないものスライムを含む。
(C) 割れ目の状態	密着している、あるいは分離しているが割れ目沿いの風化・変質は認められない。	割れ目沿いの風化変質は認められるが、岩片はほとんど風化・変質していない。	割れ目沿いの岩片に風化・変質が認められ軟質となっている。	割れ目として認識できない角礫状、砂状、粘土状コア
(D) 風化	非常に新鮮または新鮮である。層理面、片理面にそって僅かに変色があり割れやすい	弱風化している。層理面、片理面にそって風化している	風化している。岩芯まで風化している。ハンマーで簡単に崩せる。	強風化している。黄褐色化し、指先で簡単に壊すことができるハンマーで簡単に崩せる。
(E) RQD	75～100(%) 非常に良い または良い	50～75(%) 普通	25～50(%) 悪い	0～25(%) 非常に悪い

(5) 検討結果

図-4に各評価項目のカテゴリースコアとレンジを示す。レンジとは、各評価項目のカテゴリースコアの最大値と最小値の差であり、数字が大きいコアの評価項目（説明変数）ほど、補助工法の有無・工種（目的変数）に与える影響が大きいことを示す。

表-2に重み係数を示す。重み係数は、レンジをわかりやすく整理したものであり、全評価項目のレンジの合計に対する各評価項目のレンジの割合である。表より、補助工法の選定に対して影響が大きい項目は“(c)割れ目の状態”であり、次いで“(E)RQD”，さらに“(B)コア形状・(D)風化、(A)硬軟”となる。

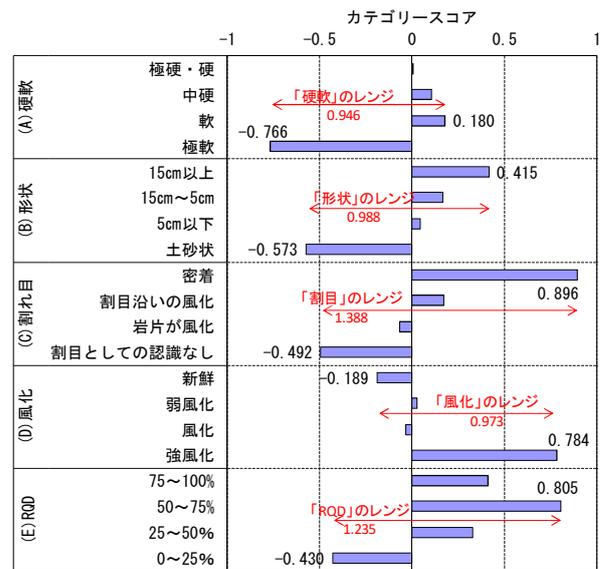


図-4 各評価項目のカテゴリースコアとレンジ

表-2 重み係数

(A) 硬軟	(B) 形状	(C) 割れ目	(D) 風化	(E) RQD
17	18	25	18	22

図-5に天端安定対策の評価点の箱ひげグラフを示す。評価点（縦軸）に、ボーリングコア1m毎の各評価区分に重み係数を乗じ平均値を求めたものを示しており、補助工法「なし」の場合と「あり（の場合は工種毎）」の分布を示している。グラフの帯（箱）は、それぞれの評価点の標準偏差であり、棒（ひげ）の部分は最大値と最小値である。

図より、補助工法“なし”の評価点の箱が1.5～3.0点の範囲にあるのに対し、補助工法“なし以外”は、2.1～3.7点の範囲にある。この結果から、評価点が3点以上では、なんらかの補助工法が採用される場合が多く、2.1～3.0点までは両方のケースが考えられ、さらに2.1点未満ではほとんど補助工法は採用されないと考えることができる。

補助工法の工種は、グラフの右側ほど剛な対策を想定し

ており、右に行くほど評価点が大きくなるなど、工種毎に評価点の分布に差異が生じると考えたが、結果として大きな差は見られなかった。この結果は、実際に工種を決定する場合においては、地質の評価以外にも地形や採用延長、現場での資材の調達のしやすさや経済性等の様々な状況により採用条件が異なることから、各工種での優位性が地質のみで決まらないためと考えられる。

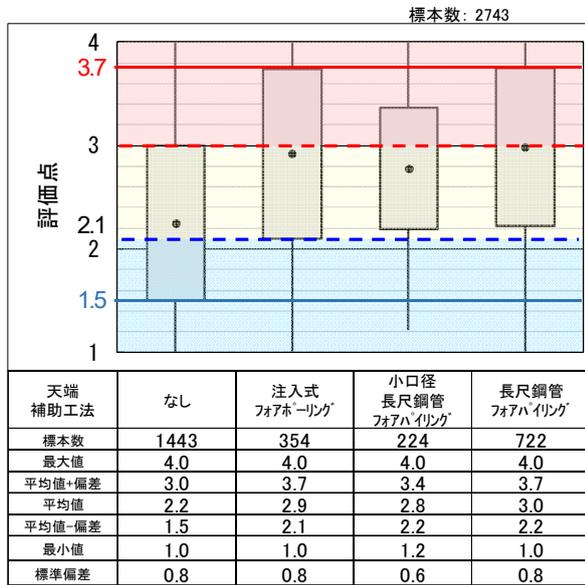


図-5 天端安定対策の箱ひげグラフ

4. 選定指標の活用方法

(1) 補助工法の選定での活用

表-3に選定指標を活用した例を示す。表は、選定指標に基づいて補助工法の要否を検証した結果の一例である。ボーリングは水平ボーリングであり、測点と深度を合わせている。

使い方は、表に示す通り、1m毎に存在する「ボーリングコアの評価」から「重み付評価点」を算出し、図-4の箱ひげグラフにおける評価点の位置を確認する。表はわかりやすいように、箱ひげグラフの評価範囲と同じ着色としている。

表-3を見ると、深度が深くなるにつれて評価点が小さくなっており、地山が地表面に近いところから深部に行くにつれて良好な状態になっていることを示す。図-5において補助工法が採用される場合が多い3点以上の区間が、0m～16m程度までであり、該当区間に補助工法として長尺鋼管FPを採用している。

(2) ボーリング実施時の活用

補助工法の選定以外の使用方法として、調査段階（設計・施工段階）でのボーリング（追加）の延長の決定（堀止め）に活用できると考えられる。ボーリングコアを確認後、速やかに5段階の評価を行い、点数化することでボーリングコアでの地質の状況が確認できる。

表-3 選定指標を活用した例

距離程 (m)	コアの 深度 (m)	ボーリングコアの評価					重み付 評価点	採用工法 (天端安定)
		硬軟 (A)	コア の形状 (B)	割れ目 の状態 (C)	風化 (D)	RQD (E)		
20 + 93	1	3	4	3	2	4	3.5	長尺鋼管FP
20 + 94	2	3	4	3	2	4	3.5	長尺鋼管FP
20 + 95	3	3	4	3	2	4	3.5	長尺鋼管FP
20 + 96	4	3	4	3	2	4	3.5	長尺鋼管FP
20 + 97	5	3	4	3	2	4	3.5	長尺鋼管FP
20 + 98	6	3	4	3	2	4	3.5	長尺鋼管FP
20 + 99	7	3	4	3	2	4	3.5	長尺鋼管FP
21 + 0	8	3	3	3	3	3	3.0	長尺鋼管FP
21 + 1	9	3	3	3	4	3	3.1	長尺鋼管FP
21 + 2	10	3	3	4	3	3	3.1	長尺鋼管FP
21 + 3	11	2	3	3	3	3	2.8	長尺鋼管FP
21 + 4	12	3	3	4	3	3	3.1	長尺鋼管FP
21 + 5	13	3	3	3	4	3	3.1	長尺鋼管FP
21 + 6	14	2	3	3	2	2	2.3	長尺鋼管FP
21 + 7	15	2	3	3	2	2	2.3	長尺鋼管FP
21 + 8	16	3	3	3	4	3	3.1	長尺鋼管FP
21 + 9	17	2	2	2	2	1	1.7	
21 + 10	18	2	2	2	3	2	2.1	
21 + 11	19	2	2	2	1	1	1.6	
21 + 12	20	2	2	2	1	1	1.6	
21 + 13	21	2	2	2	1	1	1.6	

たとえば、坑口部の水平ボーリングの評価を行い、評価点が小さくなる3点以下(2点以下)が5m程度続く等の場合には掘削を取りやめるなど活用ができると考えられる。

(3) 活用にあたっての留意点

本選定指標は、ボーリングコアを用いており、地質を直接確認できる。一方でトンネル断面はボーリングコアよりも大きいので、得られたコアがトンネル区間全体もしくは対象となる断面での代表的な地質をとらえているかを見極める必要がある。

地山の現象は、地質以外の地形や周辺環境等により影響を受けるため、ボーリングコアのみで評価できない場合も十分に考えられるため、岩判定時に得られた条件を総合的に判断して選定することが望ましい。

5. NATM補助工法の手引き（案）の改定

(1) 概要と改定目的

トンネル事業を監督する職員が、必ずしもトンネルに精通しているわけではないため、近畿地方整備局では、補助工法に関する技術解説書として平成12年に「NATM補助工法の手引き（案）（以後、「手引き」とする）」を作成した。初歩的な解説から実務への活用までを想定した内容の構成となっている。

- § 1. 本書の概要
- § 2. 補助工法を必要とする地山の現象
- § 3. 補助工法の工法説明
- § 4. 補助工法の選定

§ 5. 参考資料

手引きは作成から 20 年近く経過しており、その間に、施工事例が増え、新工法が開発されていることに加え、補助工法の明快な選定指標が求められていることなどから、本検討結果や実績の収集結果を踏まえた改定を行った。

(2) 改定内容の概要

手引きの主な改定内容を以下に示す。

a) 近年実績の多い工法の追加

補助工法は、この 20 年で実績が増え、当初は様々な工法が用いられてきた。特に、今回切羽崩壊を対象とした長尺フォアパイリングの実績は多いが、その中でも採用事例の増えている長尺フォアパイリングよりも鋼管径の小さい小口径フォアパイリング工法に関する解説を加えた。また、不良地山に対する変位や近接構造物に対する変形抑制に対して事例が増えている早期閉合法（インバート施工までの距離を短くして変位を抑制する工法写真-2）に関する解説を追加した。



写真-2 早期閉合法

さらに、切羽崩壊への対策として用いられる注入材（セメント系、ウレタン系）の効果と留意事項について記載した。

b) 補助工法の単価の見直し

施工実績の多い、長尺フォアパイリング工法を中心に、積算事例が収集可能であった工法について参考単価の見直しを行った。ただし、あくまで固定された条件での参考であるため、実際の比較等を行う際には別途算出する必要がある。

c) 本検討結果から得られた選定指標の追加

当初の手引きでは、図-6 に示すように各地山状態に応じた補助工法の選定フローがあったものの、具体的な手法がなかった。そのため、切羽崩壊に対する対策に対して、本検討で示したボーリングコアによる選定指標を記載した。

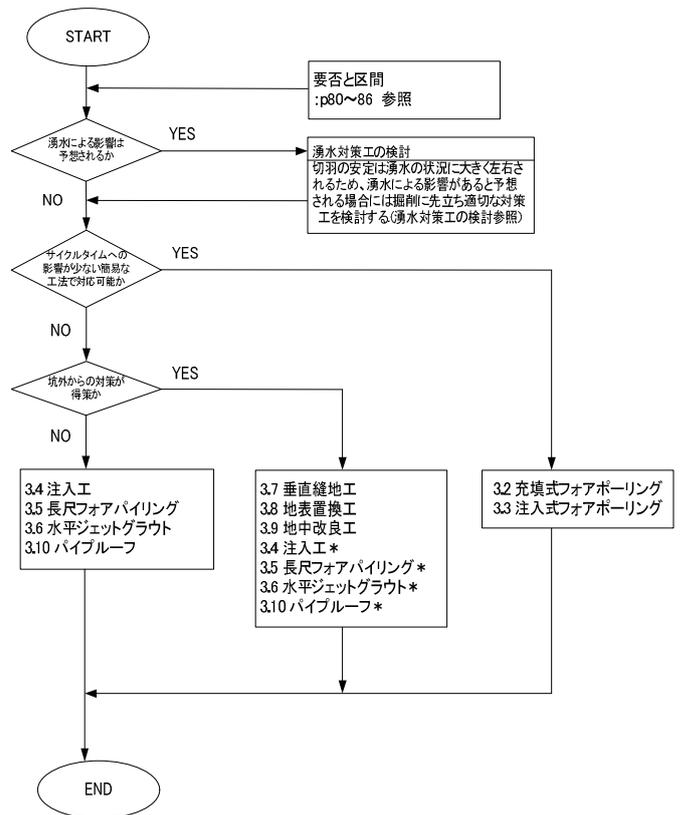


図-6 天端安定対策の補助工法の選定フローの例³⁾

d) 参考資料の追加

補助工法に対する地山現象と対策の検討の参考のため、変状事例（支保工変状、天端崩落、切羽崩壊、脚部沈下、湧水、地表面沈下、斜面崩壊、地滑り）について具体的なトンネル名と現象、対策の概要を示し、近畿地方整備局で整理しているトンネル技術誌を確認することで、さらに詳細が確認できるようにした。

また、本検討に用いたトンネル補助工法のデータベースによる補助工法の採用結果を示すとともに、補助工法に関する用語の解説、補助工法に関する参考資料を追加した。

e) その他わかりやすい解説図等への修正・追加

改定に当たって、最新の写真を収集し、差し替えるとともに、地山の現象等については、図-8 のような挿絵の追加を行った。

(3) 手引きの活用

本手引き³⁾は、(1)にも示した通り、初歩的な内容から補助工法の選定など、事業全体で活用できる内容となっており、適宜活用して頂ければ幸いである。

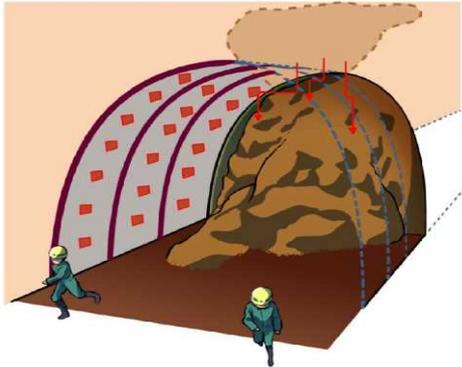


図-7 天端崩落の解説図の例

6. おわりに

本検討は、近畿地方整備局管内におけるトンネル工事の実績を分析したものであり、補助工法の採用の要否の判断において、ひとつの目安を与えるものである。しかし、地山の状態は複雑であるため、本指標の活用にあたっては、単純に評価点のみで判断することなく、現地条件等を踏まえた評価を行うことが望ましいと考えられる。

また、本検討では、岩石グループや岩種毎の分類や鏡面・脚部などの部位の違いなど、地質や目的の違うケースについては、標本数が少なく、有効な結果が出なかつ

たものもあった。これらの結果は、継続して施工事例を収集・蓄積することで、検討を進めて解決していきたいと考えている。

最後に、近畿地方整備局では本検討を含むトンネルに関する調査や検討を日々行っている。今後もこれらを継続し、トンネル事業を合理的に進めて参りたい。

謝辞：本手引きを取りまとめるにあたり、近畿地方整備局トンネル技術支援制度のアドバイザーである、京都大学大西有三名誉教授、神戸大学芥川真一教授、関西大学小山倫史准教授には、大変有益なご助言、ご指導を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省近畿地方整備局：トンネル地山等級判定マニュアル（案），平成28年7月
- 2) 社団法人日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針（平成21年度版），平成21年2月
- 3) 国土交通省近畿地方整備局：NATM補助工法の手引き（案），令和2年5月
- 4) 財団法人日本建設情報センター：ボーリング柱状図作成要領（案）解説書，平成11年5月
- 5) 濱本敬治，松田紀子：山岳トンネル補助工法の選定指標に関する一考察，第33回日本道路会議，No.6004，2019.