

トンネル工事等における地質リスクマネジメント手法に関する研究②

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 21～平 23

担当チーム：トンネルチーム

研究担当者：角湯克典，砂金伸治，日下敦

【要旨】

トンネル工事等においては、既往の調査結果に基づいて地形・地質上の問題点を抽出し、対策を事前に検討した上で工事に着手している。しかし、当初想定より大規模な地形・地質上の問題等に遭遇し、工事費の増大等、追加投資を招いている例が見られる。本研究では既存のトンネル工事等において、この種の大規模な問題が発生した事例を地質リスクが顕在化したと捉え、計画から施工までの各段階における地質リスクを回避、低減するために必要な内容等について検討を行うものである。

キーワード：地質リスク，施工時トラブル

1. はじめに

トンネル工事においては、地質調査結果や現地調査による地盤情報の収集結果に基づき、施工時に想定される問題点への対策を事前に検討した上で工事に着手している。しかしながら、工事着手後に、当初想定と大きく異なる地質が出現する場合や、想定以上の大規模な地質上の問題等に遭遇する場合があります。結果として工期・工費の増大を招く要因となっている。これは、計画から施工までの各段階における地質条件の不確実性やそれに起因する事業コスト損失の想定に限界がある結果であることも考えられるが、適切な精度による調査や適切な項目による対処を事前に行うことにより、ある程度まではそれらに関する問題を回避出来る可能性も残されていると考えられる。そのためには、当初の想定とは異なる事象をリスクとして捉え、その発現に対して、なるべく精度良く評価するための調査手法や、事前に得られる情報等の効果的な利用方法等を含むマネジメント手法の確立が望まれている。

本研究では、当初想定した支保パターンに対する施工時の変更確率および工事費の増減や、土かぶりや岩種といった地山条件等と工事費の相関関係、施工時調査や補助工法等の実績と施工時トラブル発生傾向について、ある一定の仮定の下ではあるが、実トンネルにおける施工時記録をもとに分析したので、その結果について報告する。

なお、トンネルの支保構造は岩種・土かぶり等の地山条件に大きく依存するため、それらを細分化した分析を行うのが適切であると考えられるが、本稿

では紙面の都合上、大まかな分類により分析した結果のみを示す。

2. 分析対象

本研究では、1996年以降に竣工した道路トンネル工事から得られた実施工時の情報をもとに分析を行った。分析の対象は約180トンネルであり、総延長にして約160km、切羽観察記録の総数約4,800枚である。

なお、本研究で分析対象としたデータは、収集した施工完了後の資料をもとに、地質縦断図等から施工区間等を把握し、切羽観察表（表-1）に記載された項目で補完する形で特定した。

3. 工事費増減に関する分析

山岳トンネルは、一般に、事前の調査に基づき設計時に地山等級や、それに応じた支保パターンを設定しているが、事前に得られる地山の情報が常に十分なものであるとは言い難く、設計段階では支保構造を精度良く決定するのは困難である場合が多い。したがって、施工時に地山の状況を確認した上で、支保構造の経済性、安全性等を現場で判断し、必要に応じて支保パターンの変更や補助工法の採用等を行うことがある。これらは、施工時において工事費等の増減を誘発する要因のひとつとなる。

本章では、当初支保パターンから想定される施工費（当初工事費）と、実際の施工に要した費用（施工後工事費）の増減について分析を行った。

表-1 切羽観察表の例

土 か ぶり	m 観 合 判 断				地 山 区 分 有 り は
岩 種	a, b, c, d, e				地 山 区 分 有 り は
特 殊 条 件 状	膨 脹・偏 圧・流 動 性・土 か ぶり 小 () m・重 要 構 造 近 接・谷 の 直 下・(其 他)				地 山 区 分 有 り は
掘削地点の地山の状態と挙動					
A 切羽の状態	1. 安定	2. 鏡面から岩塊が抜け落ちる	3. 鏡面の押し出しを生じる	4. 鏡面は自立せず崩れあるいは流出	5. その他
B 素掘り状態	1. 自立 (普通不要)	2. 時間がたつと緩み崩れ落ちる (後音請)	3. 自立困難掘削後早期に支保する (先音請)	4. 掘削に先行して山を受けておく必要がある	5. その他
C 圧縮率	1. $\sigma_c \geq 1000 \text{ kgf/cm}^2$ ハンマー一打撃はね返る	2. $1000 > \sigma_c \geq 200$ ハンマー一打撃でくだける	3. $200 > \sigma_c \geq 50$ 軽い打撃でくだける	4. $50 \text{ kgf/cm}^2 > \sigma_c$ ハンマー一打撃でくだける	5. その他
D 風変質	1. なし・健全	2. 岩目に沿って変色、強度や低下	3. 全体に変色、強度相当に低下	4. 土砂状、粘土状、破砕、当初より未固結	5. その他
E 割れ目の開閉	1. 開閉 $d \geq 1\text{m}$ 割れ目なし	2. $1\text{m} > d \geq 20\text{cm}$	3. $20\text{cm} > d \geq 5\text{cm}$	4. $5\text{cm} > d$ 破砕、当初より未固結	5. その他
F 割れ目の形状	1. 密着	2. 部分的に開口	3. 開口	4. 粘土をはさむ、当初より未固結	5. その他
G 割れ目の方向	1. ランダム形状	2. 柱状	3. 層状、片状、板状	4. 土砂状、細片状、当初より未固結	5. その他
H 湧水	1. なし、湧水程度	2. 湧水程度	3. 堰中湧水	4. 全面湧水	5. その他
I 水による劣化	1. なし	2. ゆるみを生ず	3. 軟弱化	4. 崩壊・流出	5. その他
割れ目の方向性 (卓越する向きをみて)	断 断 断	1. 水平 ($10^\circ > \theta > 0^\circ$) 2. さし目 ($30^\circ > \theta \geq 10^\circ, 80^\circ > \theta \geq 60^\circ$) 3. さし目 ($60^\circ > \theta \geq 30^\circ$) 4. 流れ目 ($60^\circ > \theta \geq 30^\circ$) 5. 流れ目 ($30^\circ > \theta \geq 10^\circ, 80^\circ > \theta \geq 60^\circ$) 6. 垂直 ($\theta \geq 80^\circ$) (最大傾斜角をとる)			
	横 断 断	1. 水平 ($10^\circ > \theta > 0^\circ$) 2. 右から左 ($30^\circ > \theta \geq 10^\circ, 80^\circ > \theta \geq 60^\circ$) 3. 右から左 ($60^\circ > \theta \geq 30^\circ$) 4. 左から右 ($60^\circ > \theta \geq 30^\circ$) 5. 左から右 ($30^\circ > \theta \geq 10^\circ, 80^\circ > \theta \geq 60^\circ$) 6. 垂直 ($\theta \geq 80^\circ$) (切羽面のみかけの傾斜角をとる)			
記 事					

表-2 工事費算定における仮定単価

カテゴリ	工種等	単価 (千円/m)	
支保パターン (掘削、支保工、覆工に要する費用)	B	800	
	CI	900	
	CII	1,000	
	DI	1,400	
	DII	1,500	
	DIIIa	1,700	
施工時調査	先進ボーリング	50	
補助工法	天端安定	ウレタン注入式FP	1,500
		充填式FP	230
		パイプーフ	1,700
		長尺鋼管FP	1,600
		垂直縫地	1,800
	切羽安定	薬液注入	4,000
		鏡吹付け	180
		鏡ボルト	680
	脚部安定	増ボルト	200
		脚部補強ボルト	80
湧水対策	フットパイル	480	
	ウイングリブ	100	
	水抜きボーリング	50	

(1) 分析方法

当初工事費については、事前の設計段階で得られている支保パターンに応じた掘削等に要する単価に実施予定延長を乗じ、それを合計することによって算定した。施工後工事費については、実際に施工した支保パターンの単価、実施した施工時調査の単価、実施した補助工法の単価に、それぞれの実施延長を乗じ、それぞれを合計することによって算定した。すなわち、次式により工事費を算定した。

$$\text{当初工事費} = \Sigma(\text{当初支保パターン単価} \times \text{予定延長})$$

$$\text{施工後工事費} = \Sigma(\text{実施支保パターン単価} \times \text{実施延長} + \text{施工時調査単価} \times \text{実施延長} + \text{補助工法単価} \times \text{実施延長})$$

(1)

ここで、本報では最終的に精算された事業費や工事費等を検討に使用したのではないことに注意を要する。

このようにして算出した当初工事費と施工後工事費の比を取り、次式により工事費の増減率を算定した。

$$\text{工事費増減率} = \frac{\text{施工後工事費}}{\text{当初工事費}} \quad (2)$$

ここで、工事費は表-2に示す仮定単価（直接工事費を想定）に基づき算定した。工事費の単価は、工事の延長、トンネル断面の大きさ、地域、施工状況等により大きく異なり、また、補助工法の単価も地山状況に応じて規模が異なるため、これらの単価で施工が可能になるとは限らない。しかし、全体の傾向を把握するためにデータを簡略化して取り扱う必要があったことから、すべて一律の単価と仮定した。また、施工着手前の設計に用いるボーリング等による調査の費用、付属施設、付帯工事などに要する費用等は含めておらず、支保パターン、施工時調査、補助工法といったトンネル掘削等に関わる部分のみを対象としているため、プロジェクト全体でのコストの比較にはなっていないことに留意する必要がある。さらに、補助工法の費用については、設計段階から不良地山を想定していたのか、想定外の不良地山に遭遇して工法を採用していたのかの区別が困難であったため、施工後費用のみで考慮している。すなわち、式(2)右辺の分母が小さめに見積もられており、工事費増減率が大きめの評価となっていることに注意を要する。

(2) 支保パターン変更等による工事費増減の傾向

図-1に、設計時に設定されていた当初支保パターンごとの、実施工における各支保パターン採用割合を示す。いずれの当初支保パターンにおいても、施

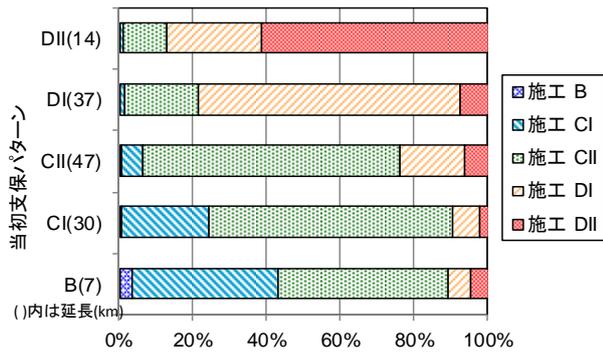


図-1 当初支保パターンごとの実施工支保パターン割合

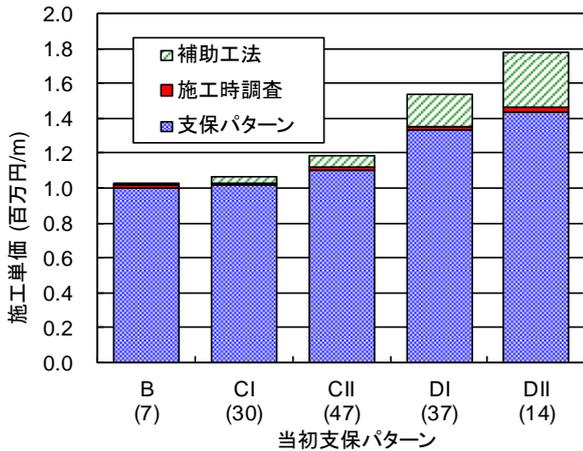


図-2 当初支保パターンごとの実施工費

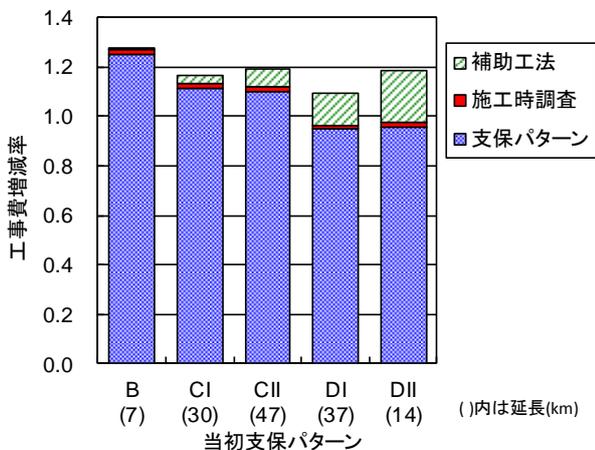


図-3 当初支保パターンごとの工事費増減率

工支保パターンは当初支保パターンと同等か、重い支保パターンとなる傾向にあり、当初設計に対して実施工の工費が増加する一因となっていることが分かる。

図-2は、式(1)により求めた施工後工事費を延長で除して施工単価を算定し、当初支保パターンごとに示したものである。当初想定していた地山等級が悪くなるほど支保パターンに要する費用が増加するのは当然であるが、補助工法に要する費用も増加していることが分かる。

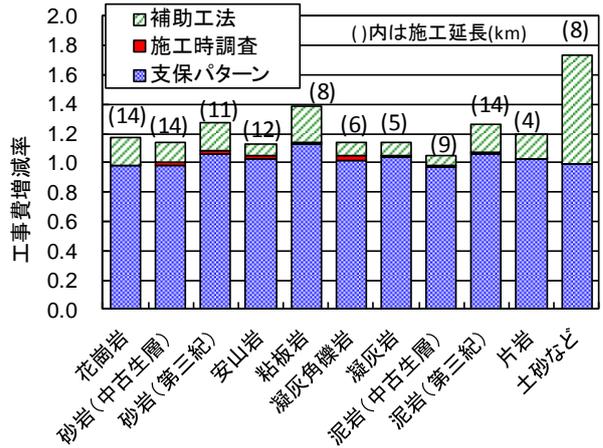


図-4 岩種ごとの工事費増減率

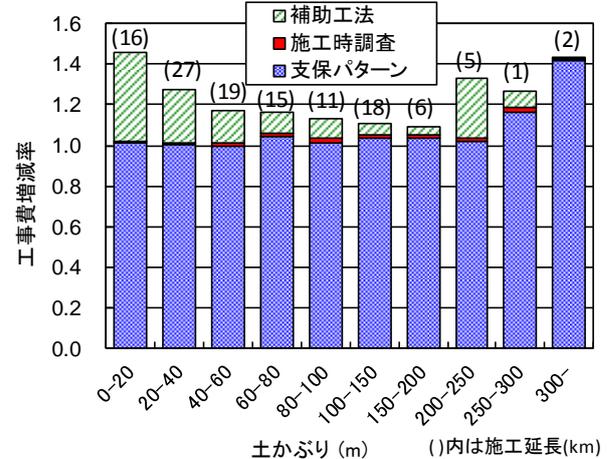


図-5 土被りごとの工事費増減率

図-3は、式(2)により求めた工事費の増減率を当初支保パターンごと示したものである。この図からも、地山等級が悪くなるほど補助工法の採用に要する工事費増加の影響が大きくなっていることが分かる。しかし、いずれの当初支保パターンにおいても工事費増減率は1~3割程度であり、施工時に問題となる場合がある3割を越す施工費の増加とはなっていない。このことから、トンネル工事で問題視される施工費の大幅な増加が、支保パターンの変更や補助工法の採用だけではなく、突発湧水や大規模な崩落等が複合的に発生して誘発されるものと考えられ、今後さらなる分析を要するものと考えられる。

(3) 地山状況と工事費増減の傾向

図-4に代表的な岩種等と平均工事費増減率の関係を示した結果を示す。図中には、工事費増減率における支保パターン変更、施工時調査の実施および補助工法の実施によるものが区分できるように記載している。なお、同一のトンネルの中で複数の岩種が

存在する場合は、それぞれで切り分けて工事費を算出した。この図より、岩種等の観点で考えた場合は、花崗岩、中生層砂岩といった硬質岩では工事費増減率が低く抑えられていることが分かる。また、粘板岩、第三紀泥岩といった軟質岩では増減率が高くなり、その中でも補助工法の採用による影響が大きくなる傾向が見られた。またシルトや砂、粘土に関して、本分析においては「土砂など」として取り扱ったが、この場合も工事費増減率が高くなる傾向が見られた。

図-5に土かぶりと工事費増減率の関係を示した結果を示す。これより土かぶりが 20m 以下、または 20~40m の断面では、補助工法の採用により工事費増減率が高くなる傾向が分かる。また、土かぶりが大きい場合についても工事費増加率が高くなる場合が多い傾向が見られるが、他の土被りの部分と比較してサンプル数が少ないことが考えられ、今後もデータの蓄積を図ったうえでの検討が必要である。

4. トラブルの発生傾向に関する分析

前述のとおり山岳トンネルは事前に得られる地山の情報が常に十分なものであるとは言い難く、設計時には想定していなかったトラブルが施工時に発生する可能性がある。このようなトラブルは、規模によっては著しい工事費等の増加を招く要因になると考えられる。

本章では、施工時トラブルの発生確率について、施工時調査や補助工法の有無、切羽観察記録との関連性について分析を行った。

(1) 分析方法

a) 崩落確率の算定方法

トラブルの事例としては施工中の切羽の崩落の有無に着目した。ここで「崩落あり」とは、道路トンネルで汎用的に用いられている切羽観察記録の中で崩落の情報が記載されている断面とした。また、崩落の中には、吹付けコンクリートによる充填で対応できるような小規模の崩落から、切羽を停止させて空洞充填や支保構造の増強といった対策が必要な比較的大規模の崩落まで存在するが、ここでは分別することなく画一的に取り扱うこととした。このような前提で、崩落確率を次式により算定した。

$$\text{崩落確率} = \frac{\text{「崩落あり」の切羽観察枚数}}{\text{対象区間の切羽観察枚数}} \quad (3)$$

表-3 分析事例の組み合わせ

施工時調査の実施	補助工法の採用	ケース名
Yes	Yes	YY
	No	YN
No	Yes	NY
	No	NN

b) 施工時調査および補助工法の採用との関連性

まず、施工時調査や補助工法の採用の有無と、崩落確率の関係について分析を行った。

補助工法は、表-2に示したように、その目的に応じて種々の工法が存在し、設計時に採用が決定していた場合や、切羽等の状況に応じて現場で採用が決定した場合など、採用の経緯も多岐にわたるが、ここでは傾向分析のために細分化は行わず、実施の有無のみで画一的に取り扱うこととした。

施工時調査としては、坑内より実施する切羽前方探査を取り扱い、その中でも比較的实施件数の多い先進ボーリングを対象とし、実施の有無のみで区分して画一的に取り扱うこととした。

上述の前提に基づき、施工時のトラブル事例の分析として、施工時調査の有無、補助工法の有無と切羽の崩落確率に着目して、表-3の組み合わせでそれぞれの事例数を分析した。また、分析は、全トンネルのデータを画一的に取り扱った場合と、岩質ごとに分けた場合で実施した。

c) 切羽観察結果との関連性

次に、表-1に示した切羽観察項目と、崩落確率の関係について分析した。切羽観察表における A~I の各項目は、1~4 の 4 段階の評価点で記録される様式となっており、評価点が大きくなるほど地山の状態が悪いことを意味する。

ここでは、切羽評価点が 3 または 4 と記録されている場合を抽出し、崩落確率との関連性を分析した。

(2) 施工時調査および補助工法の採用との関連性

図-6に、施工時調査の有無と、施工時の崩落確率の関係を示す。また、施工時調査の有無に加え、補助工法の有無によっても細分化した施工時の崩落確率を図-7に示す。いずれの図も、最上段は全てのトンネルを画一的に集計したもので、岩質ごとの内訳をその下に示している。

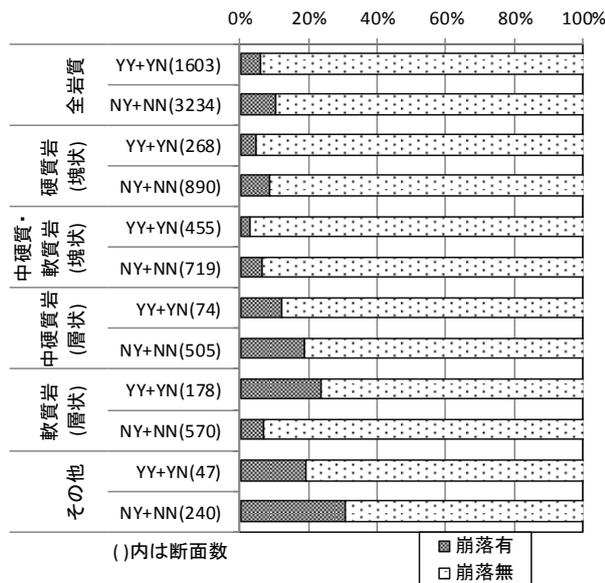


図-6 施工時調査の有無による崩落発生確率

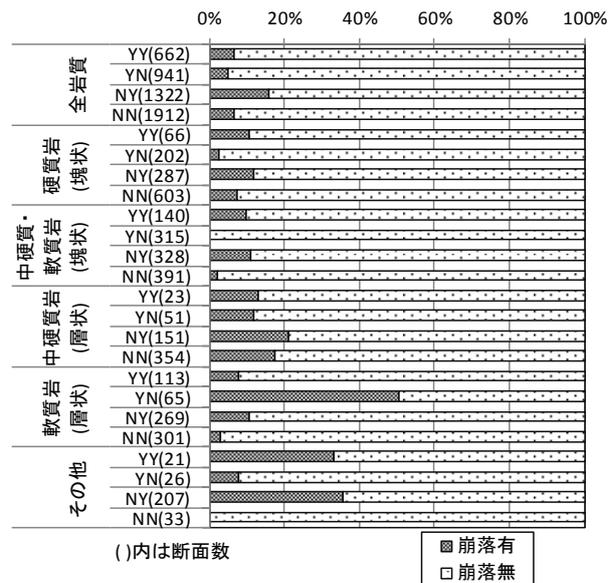


図-7 施工時調査と補助工法の有無による崩落発生確率

a) 全体の傾向

全トンネルに着目すると、施工時調査を実施しない場合（ケース：NY+NN）は崩落確率が約 10%であるのに対し、施工時調査を実施した場合（YY+YN）は崩落確率が 6%程度にまで低下している。このことは、施工時調査を実施することで、施工時のトラブルを 10%程度から 6%程度にまで低減できる可能性があることを示していると考えられる。

ただし、本検討で用いたデータからは、施工時調査の目的、すなわち切羽の崩落に関連する情報を事前に得ようとしたのか、それ以外の情報を得ようとしたのか等の情報を読み取ることができなかつたため、施工時調査が直接的あるいは間接的にでも切羽の崩落を防ぐのにどの程度寄与したのかは不明確である。さらに、本稿ではデータを示していないが、本検討において施工時調査を行っている事例には地域的な偏りがあり、崩落確率が施工時調査の有無による影響を受けているものなのか、地質的な地域特性を反映しているものなのかについても区別ができていないことに注意を要する。

b) 岩質ごとの傾向

岩質ごとの傾向を見ると、施工時調査を実施しない場合（NY+NN）に比べて施工時調査を実施した場合（YY+YN）の崩落確率が減少する傾向があるが、一方で、軟質岩（層状）では、施工時調査を実施した場合の崩落確率は実施しない場合と比較しても増大している。このように、非常に大雑把な分類では

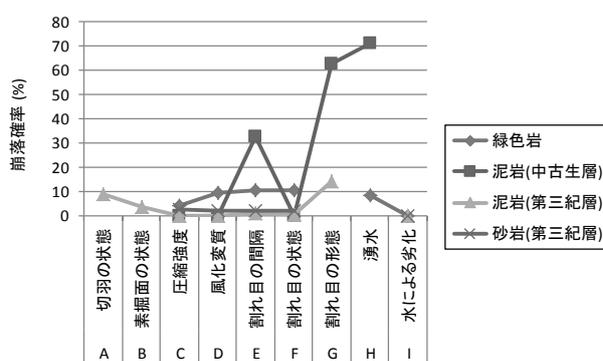


図-8 切羽評価点が悪い断面と崩落確率

表-4 分析対象断面数

	切羽観察項目								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
緑色岩			145	405	511	519		24	22
泥岩(中生層)			15	15	58	34	83	14	
泥岩(第三紀層)	23	27	450	447	492	482	42		50
砂岩(第三紀層)			200	238	292	295			22

あるが、施工時調査によりトラブル発生確率の減少が期待できる場合と、それほど期待できない場合があり、岩質によって異なる傾向にあることが分かった。

また、補助工法を実施した場合で、施工時調査が行われていた場合（YY）と行われていない場合（NY）を比較すると、中硬質岩（層状）や軟質岩（層状）では施工時調査の実施により崩落確率が減少しているのに対し、それ以外の岩質では崩落確率の大幅な減少は見られなかった。これは、施工時に補助工法が必要となるような不良地山が出現した場合に、施

工事調査により事前に地山状態を把握しておくことでトラブルの発生を未然に防止できる場合と、その効果があまり期待できない場合があり、岩質によってもその傾向が現れる可能性があることを示していると考えられる。

ただし、これらの傾向についても、前述したように施工時調査の有無による影響なのか、地質的な地域特性を反映しているだけのものかが不明確であるため、今後さらなる検討が必要である。

(3) 切羽観察結果との関連性

図-8 は、切羽観察表における各項目の評価点が 3 または 4 と記録されている断面の崩落確率を岩種ごとに示したものである。なお、対象断面数が 10 枚以下の少数データについては表示しておらず、表-4 の断面数構成となっている。

この図から、中生層の泥岩地山においては、割れ目の間隔や割れ目の形態、湧水の評価点が悪ければ崩落確率が高い傾向にあることなどが分かる。すなわち、岩種によっては特定の切羽観察項目の評価点と崩落確率に一定程度の相関がある可能性があり、施工現場において得られたデータと比較することにより崩落を未然に防ぐ対策が可能となる場合があると考えられる。

5. おわりに

本研究では、既存の山岳トンネル工事において、地山の状況とトンネル工事費の関連性について、工事費が増加する可能性がある要因に着目して基礎的な考察を行った。その結果、岩種等や土被りと工事費の増加の関係や、施工時調査や切羽観察結果と施工時トラブルの発生確率の関係について、ある一定の傾向を把握できる可能性があることを示すことができた。

ただし、今回は諸現象を非常に簡略化して分類、検討を行ったものであり、工事費増加の個別の要因に関する詳細な分析は行っていない。また、先進ボーリングが水抜き工としても効果を発揮したためにトラブルを未然に防止できたのではないかといった分析や、施工時調査や補助工法を行ったがトラブルを完全には防ぎきれなかったのか、それともこれらを行ったために比較的規模の小さなトラブルで済んだのかといった分析も行っていない。本稿で示した結果は、限られたトンネルにおける分析によるものであるため、一般化した議論のためにはさらなる事

例の蓄積が必要と考えられる。

参考文献

- 1) 日下敦, 砂金伸治, 真下英人, 角湯克典: トンネル工事におけるトラブル事例の分析, 岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 第 41 回, pp.19-22, 2012.

Research of geological risk management method in tunnel construction

Budget: Grants for operating expenses
General account

Research Period: FY2009-2011

Research Team: Road Technology Research Group
(Tunnel)

Authors: Katsunori KADOYU
Nobuharu ISAGO
Atsushi KUSAKA

Abstract: Tunnel construction starts after the examination of countermeasure against the geographical and geological problems derived from the result of various investigations. However the examples which needed the additional investment for construction were found due to the encounter of the severer problems than expected. The cases that the geological risk emerged in tunnel construction were defined in these problems, and the content and method to reduce or avoid the risk in the stages from plan to construction has been discussed in this study.

Keywords: geological risk, construction trouble