

トンネル工事におけるトラブル事例の分析

日下 敦^{1*}・砂金 伸治¹・真下 英人¹・角湯 克典¹

¹独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ（〒305-8516 つくば市南原1-6）

*E-mail: kusaka@pwri.go.jp

トンネル工事においては、地質調査や現地踏査等による地山の情報収集結果に基づき、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、工事着手後に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トラブルに遭遇する場合があります。工期・工費の増大を招く要因となる。このようなトラブルに関しては、これまでも地山条件等との関連性について定性的に論じられることはあったが、横断的かつ定量的にはほとんど議論されてこなかったのが現状である。本稿では、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や、施工時調査や補助工法等の実績と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。

Key Words : mountain tunnel, construction cost, ground, auxiliary method, survey on site

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状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。本稿では、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や、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。

2. 分析方法

(1) 分析対象

本検討では、1996 年以降に竣工した道路トンネル工事で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 66 トンネル、総延長にして約 50 km である。

(2) 地山状況と工事費の傾向に関する分析

まず、地山の状況や切羽前方探査の実施の有無と、トンネル工事費増減率の関連性について分析を行った。工事費は表-1 に示す仮定単価にもとづき算定した。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。

$$\begin{aligned} \text{当初工事費} &= \Sigma(\text{当初支保パターン単価} \times \text{予定延長}) \\ \text{施工後工事費} &= \Sigma(\text{実施支保パターン単価} \times \text{実施延長} \\ &\quad + \text{施工時調査単価} \times \text{実施延長} \\ &\quad + \text{補助工法単価} \times \text{実施延長}) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、支保パターン毎の施工延長や、施工時調査や補助工法を実施した区間延長については、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

表-1 掘進1mあたりの仮定単価

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
		パイプルーフ	1,700
		長尺鋼管FP	1,600
		垂直縫地	1,800
		薬液注入	4,000
	切羽安定	鏡吹付け	180
		鏡ボルト	680
		増ボルト	200
	脚部安定	脚部補強ボルト	80
		フットパイル	480
		ウイングリブ	100
	湧水対策	水抜きボーリング	50

表-2 トラブル事例分析における組み合わせとケース名

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

握し、切羽観察表に記載された項目で補完する形で特定した。つまり、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。

$$\text{工事費増減率}(\%) = \frac{\text{施工後工事費}}{\text{当初工事費}} \times 100 \quad (2)$$

この工事費増減率について、岩種等およびトンネル延長に対する傾向を分析した。

なお、工事費等の単価は、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、平均増減率の解釈にあたっては、例えばトンネルの工事費が増加する場合は、事前調査結果をもとに設定された支保パターンが変更される場合と、調査等では予期し得ない不良地山等に遭遇して補助工法を採用せざるを得なかった場合の

2つの要因を含んだ形で平均増減率が算定されていることに注意を要する。

(3) トラブル発生傾向に関する分析

次に、工事費の増減の要因になり得ると考えられる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との関連性について分析した。

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¹⁾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。

$$\text{崩落確率}(\%) = \frac{\text{崩落箇所の施工延長}}{\text{対象区間の全施工延長}} \times 100 \quad (3)$$

補助工法は、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。

なお、切羽観察記録が無い区間は、直前の観察箇所と同様の施工条件が次の観察箇所まで続くものと仮定して集計した。

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、切羽の崩落の有無に着目して、表-2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²⁾に分けた場合で実施した。

3. 分析結果

(1) 地山状況と工事費の傾向に関する分析

a) 岩種と工事費増減率の傾向

図-1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

それぞれで切り分けて工事費を算出した。図-1 より、岩種等の観点で考えた場合は、花崗岩、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、凝灰岩、泥岩、片岩といった軟質岩では増減率が

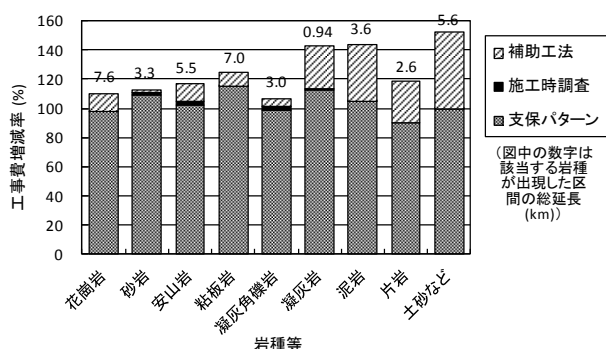


図-1 岩種等と平均増減率の関係

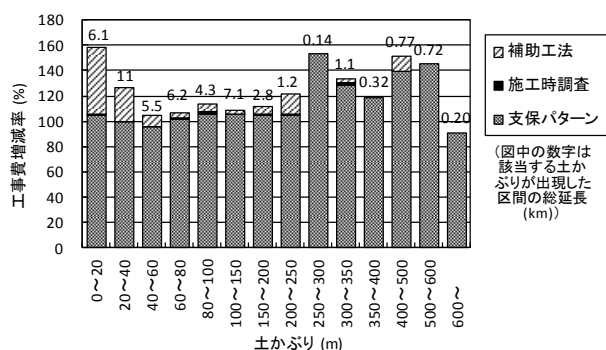


図-2 土かぶりと平均増減率の関係

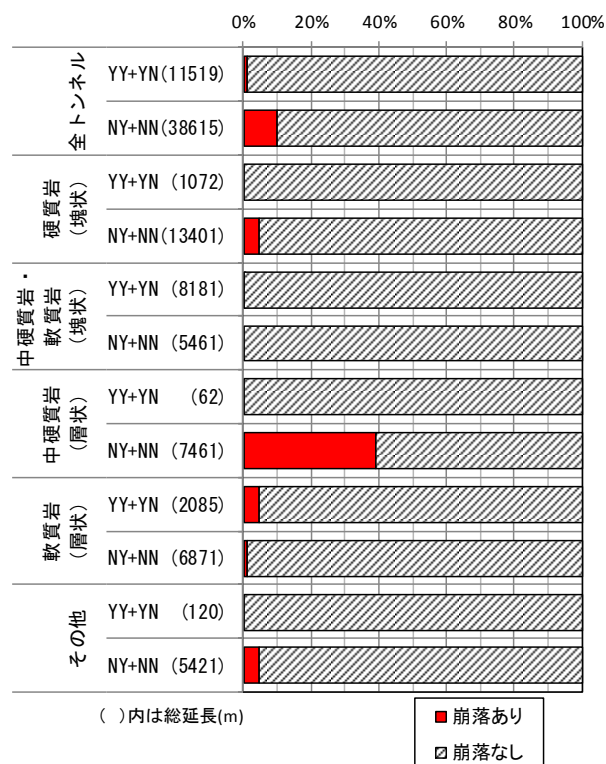


図-3 施工時調査の有無による崩落発生確率

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。

b) 土かぶりと工事費増減率の傾向

図-2 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。

(2) トラブル発生傾向に関する分析

図-3 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-4 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。

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

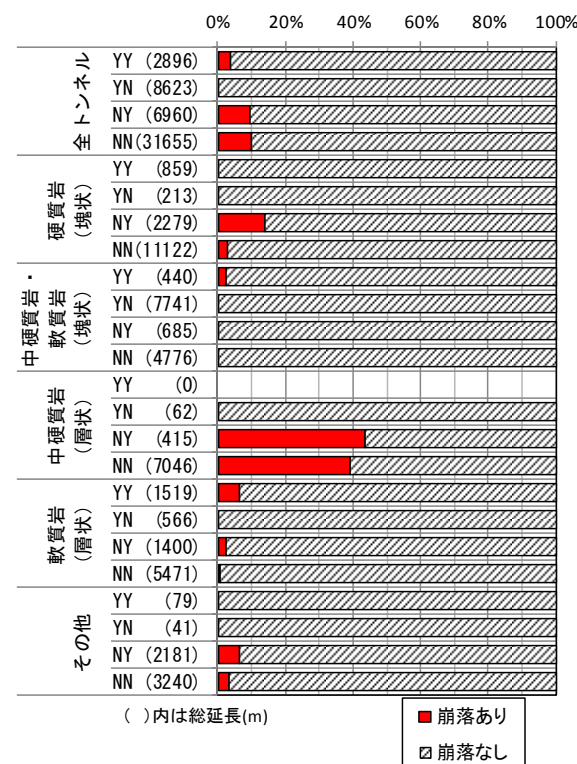


図-4 施工時調査と補助工法の有無による崩落発生確率

率が 1%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 1%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、施工時調査を実施した場合のうち、補助工法を実施しなかった場合（YN）の崩落確率はゼロであり、本稿における分析ではこの事例が約 18%（総延長 50,135 m 中でケース YN が 8,623 m）を占めている。このことは、何らかのトラブルを想定して施工時調査を実施したものの、結果として補助工法を必要とせず、トラブルも発生しなかった事例も相当数あることを示していると考えられる。

b) 岩質ごとの傾向

岩質ごとの傾向を見ると、中硬質岩（層状）では、施工時調査を実施しない場合（NY+NN）は約 39%の崩落確率であるのに対し、事例数は少ないものの施工時調査を実施した場合（YY+YN）の崩落確率はゼロとなった。一方で、硬質岩（塊状）やその他では、施工時調査を実施することで崩落確率が低減されているものの、施工時調査を実施しない場合の崩落確率がそもそも 5%程度と比較的小さい。また、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減少していない。このように、非常に大雑把な分類ではあるが、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、硬質岩（塊状）やその他では施工時調査の実施により崩落確率が大きく減少しているのに対し、それ以外の岩質では崩落確率の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、施工時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。

4. おわりに

本稿では、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、施工時調査等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。さらに、岩種や支保パターン、土かぶりといった諸条件を考慮することと精度の良い分析が行える可能性があり、これらの事項は今後の課題といえる。

今後は地山条件等の絞込みやデータ数の拡充、諸条件の詳細な検討を踏まえ、施工時の調査の必要性や効果を評価する指標の検討を行いたいと考えている。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針（平成 21 年改訂版），pp.21-26, 2009.
- 2) 日本道路協会：道路トンネル技術基準（構造編）・同解説，p.80, 2003.

TROUBLE TRENDS DURING CONSTRUCTION OF MOUNTAIN TUNNEL

Atsushi KUSAKA, Nobuharu ISAGO, Hideto MASHIMO and Katsunori KADOYU

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 should be established. In this study, relations between construction cost and ground condition, such as overburden and rock kind, and trends in construction trouble were analyzed.