

先進ボーリングの地質情報を考慮したトンネル変位予測方法の検討

Examination of predicting method for tunnel displacement using geological information of boring

(独)土木研究所寒地発土木研究所 ○正会員 岡崎健治 (Kenji Okazaki)
同 上 正会員 伊東佳彦 (Yoshihiko Ito)

1. まえがき

トンネルの事前調査では、一般に地表踏査、屈折法弾性波探査およびボーリング調査により、地山の評価（地質的問題点の抽出）と設計が行われる。しかし、設計と施工時の地山評価に乖離が生じる場合が多く、事業費の増大や工期の延伸が課題となっている。そのため、事前調査の結果と施工時の計測データを合理的かつ経済的に組み合わせた、より精度の高い地山の評価方法の構築や体系化が求められている。

本文では、北海道の国道トンネルの建設事例において、調査設計から施工段階における地質情報と計測データをもとに統計分析を行うとともに、トンネルの最終的な変位量の予測手法に関して検討を行ったので、その結果について報告する。

2. 調査概要

調査は、北海道北見市北西部に建設された延長4.1km、最大土被り360mの国道トンネルで実施した。

トンネル周辺地域の地質は、付加体である常呂帯仁頃層群¹⁾である。仁頃層群は、主に緑色岩類の再堆積によって形成された火山碎屑性堆積岩類とハイアロクラスタイトを主体に玄武岩、枕状溶岩、赤色頁岩、チャートおよびそれらの混在岩（ここでは海洋起源の緑色岩やチャートなどがプレート運動によって沈み込む際に陸源の碎屑物（砂岩泥岩、頁岩、粘板岩など）と混合してできた岩石）からなる。本トンネルでの先進ボーリングならびに切羽観察記録においても同様な岩石が確認されている。

表-1 にトンネル掘削で判明した岩石とその割合を示す。トンネル掘削で確認された主な岩石は、玄武岩、混在岩およびチャートであり、全体の8割以上を占める。

本調査では、トンネルの地質情報と施工計測データとの関係について整理するとともに、トンネル地質調査で取得できる地質区分、RQD、土被り厚ならびにトンネル施工時の計測データである初期内空変位速度および初

期天端沈下速度を説明変数として、トンネル変位量（最終内空変位量と最終天端沈下量）を目的変数とした数量化Ⅰ類²⁾により分析を行った。

3. 調査結果

3. 1 変位量と沈下量

図-1、2 に地質別の最終内空変位量と最終天端沈下量の関係、支保工パターン別の内空と天端の初期変位速度と最終量の関係を示す。

最終内空変位量の最大値は78mm、最終天端沈下量は36mmであり、両者に相関性が伺える。地質別には、玄武岩、赤色頁岩およびチャートにおいて各変位量が大い傾向がみられ、地質に応じた違いを確認できる。なお、本トンネルの支保工パターンは、CⅡが78%（このうち駐車帯パターンの施工が4%、インバートパターンの施工が6%）、DⅠが13%、DⅡが6%および坑口パターンが3%である。

トンネル掘削で確認された岩石と支保工パターンを比較した場合、CⅡでの主な地質は、玄武岩、混在岩およびチャートである。支保工パターン別に各変位量を比較した場合、CⅡのうちインバートを施工した箇所では、各変位量が大い傾向を確認できる。また、DⅠとDⅡの区間では、CⅡ（インバートを施工した区間を除くCⅡ-bと駐車帯の区間）より各変位量が大い傾向を確認できる。このことは、初期の変位量に応じた適切な支保構造が選定された結果であるといえる。なお、各変位量における初期値と最終値の平均値（図中の線部）を比較した場合、最終値／初期値の比率は、概ね1.5～2.0程度を示すことが確認できる。

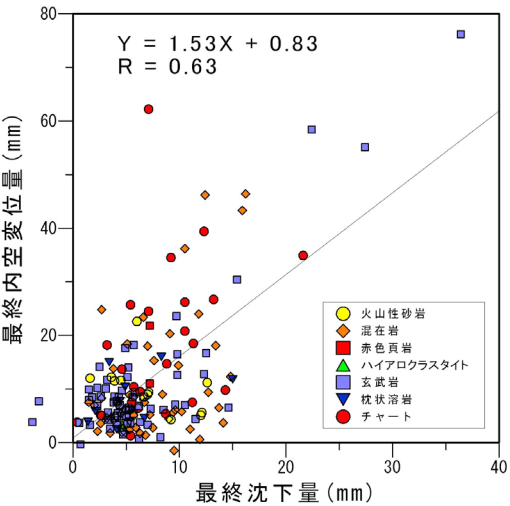


図-1 地質別の最終内空変位量と最終天端沈下量

表-1 トンネル掘削で判明した岩石と割合

岩石		割合
1	火山碎屑性堆積岩類	8%
2	混在岩	32%
3	赤色頁岩	1%
4	ハイアロクラスタイト	2%
5	玄武岩	36%
6	枕状溶岩	7%
7	チャート	14%

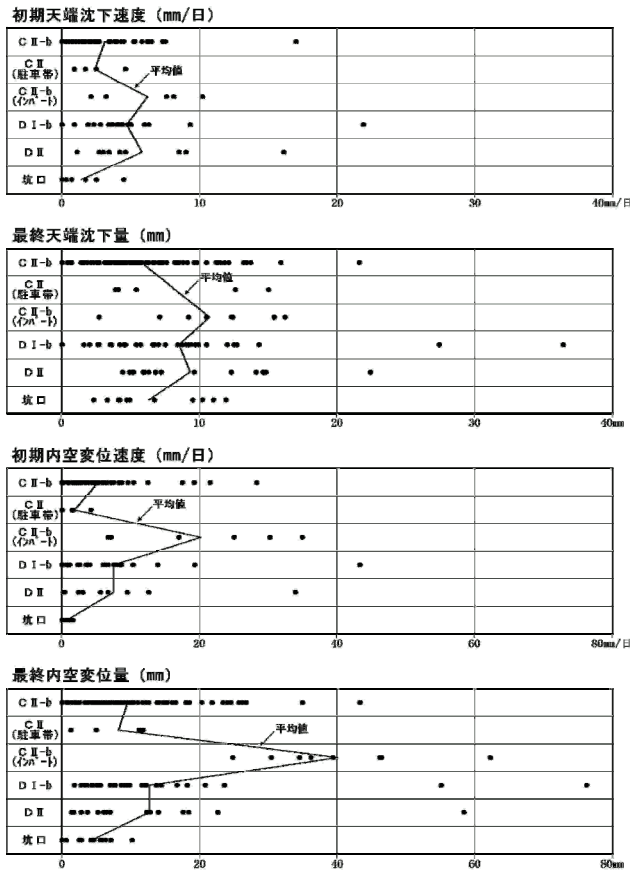


図-2 支保工パターンと各変位量

表-2 RQD(5)と各変位量との単相関

	RQD(5)			
	後方5m	後方3m	前後5m	前後3m
初期内空変位速度(mm/日)	0.24	0.20	0.24	0.22
最終内空変位量(mm)	0.14	0.10	0.11	0.09
初期天端沈下速度(mm/日)	0.29	0.26	0.25	0.20
最終天端沈下量(mm)	0.24	0.22	0.21	0.19

3. 2 先進ボーリングコアのRQD

先進ボーリングコアのRQDは、計測時の最小寸法を 5 cm^3 として、RQD(5)とした。また、変位量の計測断面と一致させるとともに、計測断面を中心として、後方5m(0.5D:ここでDはトンネル掘削幅であり、概ね10mとして扱った)、後方3m(補助ベンチ長に対応)、前後5m(1D)および前後3m(補助ベンチ長の2倍)の範囲における平均値とした。

表-2にRQD(5)と内空と天端の初期変位速度と最終量の関係を示す。RQD(5)と各変位量の相関係数は0.09~0.29と低い値を示す。RQD(5)と沈下量、変位量の相関係数を比較した場合、沈下量は変位量より相関係数がやや高い。また本トンネルでは、後方5mのRQD(5)が各変位量と相関係数の高いことを確認できる。

図-3に後方5mのRQD(5)と最終内空変位量の関係を地質別に示す。RQD(5)と最終内空変位量は、反

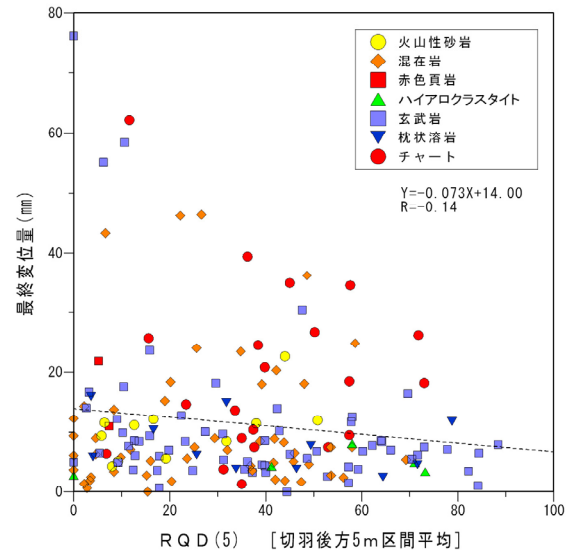


図-3 後方5m区間のRQD(5)と最終内空変位量

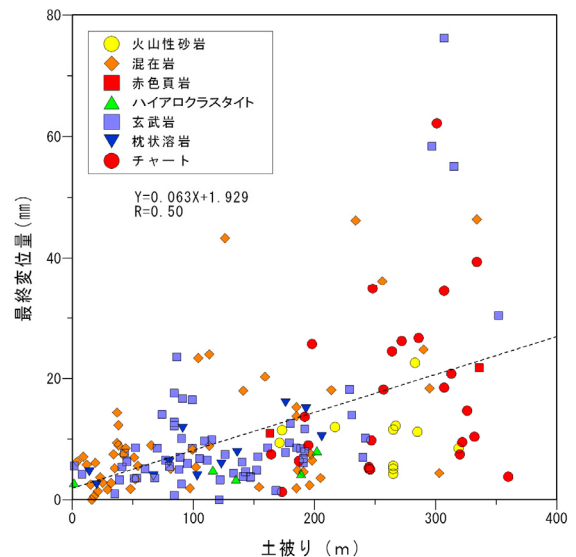


図-4 トンネルの土被りと最終内空変位量

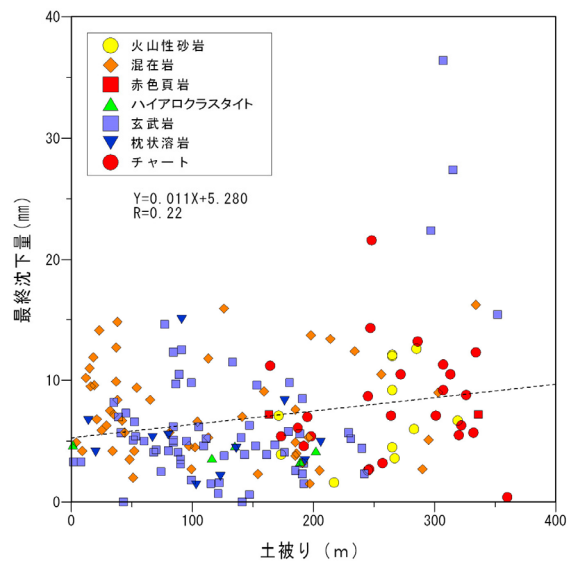


図-5 トンネルの土被りと最終天端沈下量

表-3 分析ケース

目的変数	説明変数	ケース①-1	ケース①-2	ケース②-1	ケース②-2
		最終内空 変位量(mm)	最終天端 沈下量(mm)	最終内空 変位量(mm)	最終天端 沈下量(mm)
説明変数	地質区分	○	○	○	○
	RQD(%)	○	○	○	○
	土被り厚(m)	○	○	○	○
	初期内空変位速度(mm/日)			○	○
	初期天端沈下速度(mm/日)			○	○

比例の関係が認められる。また地質別のRQD(5)は、玄武岩では0～90%に分布するのに対し、混在岩は概ね60%以下であるなど、地質に応じた違いを確認した。

3. 3 土被りに応じた変位量と沈下量

図-4、5にトンネルの土被りと最終内空変位量、最終天端沈下量の関係を地質別に示す。土被りと各変位量の相関係数は低い、比例関係がみられる。

最終内空変位量は、概ね20mm以下を示すが、土被りが100mを超えると20mm以上の値を示す場合の多いことが確認できる。このうち玄武岩、混在岩およびチャートでは、特に土被りが大きくなると最終内空変位量が大きくなることが確認できる。また最終天端沈下量は概ね15mm程度を示すが、玄武岩やチャートにおいて、同様に土被りが大きくなると最終天端沈下量も大きくなることが確認できるとともに、地質に応じた違いについても確認することができる。

4. 数値化Ⅰ類による分析

4. 1 分析での検討ケース

本調査では、トンネル掘削により生じる変位量の予測方法を数値化Ⅰ類での分析によって検討を行った。表-3に分析での検討ケースを示す。

分析における説明変数は、地質情報と施工計測データとし、目的変数をトンネル変位量（最終内空変位量と最終天端沈下量）とした。

説明変数とした地質情報は「地質区分」「RQD(5)」および「土被り」である。前二者は、トンネル掘削前に北海道開発局網走開発建設部が実施した先進ボーリング調査から得た情報であり、後者はトンネルの地形情報である。分析に用いた地質情報は、いずれもトンネル地質調査結果から容易に取得できる情報である。また、前述のデータ整理では、内空変位量と天端沈下量は地質に応じた違いや関連性を有することを確認でき、地質の違いを説明変数として扱うことは有効であると考えられる。

説明変数とした施工計測データは「初期内空変位速度」と「初期天端沈下速度」であり、いずれも変位の計測開始から24時間後（±3時間）の読み取り値とした。なおケース①は、説明変数のうち地質情報だけを用いて分析した。ケース②では、地質情報に施工計測データを付け加えて分析した。各検討ケースのサンプル数（トンネル断面数）はケース①で169、ケース②で100である。

表-4に説明変数のカテゴリ区分を示す。このうち、

表-4 説明変数のカテゴリ区分

カテゴリ No.	説明変数				
	地質区分	RQD(5)%	土被り(m)	初期内空 変位速度 (mm/日)	初期天端 沈下速度 (mm/日)
1	火山砕屑性 堆積岩類	0～10	0～20	0.0～2.5	0.0～2.5
2	混在岩	11～20	21～40	2.6～5.0	2.6～5.0
3	赤色頁岩	21～30	41～80	5.1～7.5	5.1～7.5
4	ハイアロ クラストイト	31～40	81～120	7.6～10.0	7.6～10.0
5	玄武岩	41～50	121～160	10.1～12.5	10.1～15.0
6	枕状溶岩	51～60	161～200	12.6～15.0	15.1～20.0
7	チャート	61～70	201～240	15.1～17.5	20.1～
8		71～80	241～280	17.6～20.0	
9		81～90	281～320	20.1～22.5	
10		91～100	321～360	22.6～25.0	
11			361～	25.1～30.0	
12				30.1～35.0	
13				35.1～40.0	
14				40.1～	

地質区分のカテゴリは、トンネル掘削で明らかとなった地質を選定している。またRQD(5)は、本トンネルでの変位量と沈下量に対して、最も相関係数が高く得られた後方5mの平均値を使用するとともに、カテゴリを10%刻みに区分した。また各カテゴリの区分では、土被りはおよそ40m刻みとした。初期内空変位速度は10.0mm/日までを2.5mm/日刻みとし、その後は5.0mm/日刻みとした。初期天端沈下速度は25.0mm/日までを2.5mm/日刻みとし、その後は5.0mm/日刻みに区分した。これらの区分では、サンプル数が偏らないよう、かつ規則性を配慮して設定した。

4. 2 分析結果

表-5に各検討ケースの分析結果を示す。ケース①の検討結果、最終内空変位量については、数値化Ⅰ類によ

表-5 各検討ケースの分析結果

ケース①-1 説明変数	目的変数:最終内空変位量		
	レンジ	単相関	偏相関
地質区分	12.67	-0.05	0.32
RQD(5)	10.26	0.16	0.33
土被り	31.89	0.58	0.66
重相関係数	0.68		
ケース①-2 説明変数	目的変数:最終天端沈下量		
	レンジ	単相関	偏相関
地質区分	4.64	-0.02	0.26
RQD(5)	5.53	0.31	0.42
土被り	9.50	0.40	0.51
重相関係数	0.58		
ケース②-1 説明変数	目的変数:最終内空変位量		
	レンジ	単相関	偏相関
地質区分	6.09	0.17	0.25
RQD(5)	8.99	0.22	0.47
土被り	15.34	0.58	0.63
初期内空変位速度	58.48	0.88	0.88
重相関係数	0.93		
ケース②-2 説明変数	目的変数:最終天端沈下量		
	レンジ	単相関	偏相関
地質区分	4.19	-0.02	0.33
RQD(5)	4.66	0.37	0.57
土被り	6.46	0.50	0.57
初期天端沈下速度	24.99	0.83	0.85
重相関係数	0.91		

る予測値と「地質区分」「RQD(5)」および「土被り」の実測値との相関性を示す重相関係数が0.68であった。また「土被り」のレンジが最も高く、説明変数の各項目のうち、要因として最も強い結果となった。一方、最終天端沈下量に対する分析結果では、重相関係数が0.58と前者よりも低い値となったが「土被り」のレンジは同様に最も高い値として得られた。これらの結果は、各変位量と各説明変数の項目との単相関よりも相関係数が高いことから、各説明変数の項目が複合的に関連した結果であるといえる。

ケース②の検討結果、最終内空変位量については、重相関係数が0.93である。初期内空変位速度の項目を付加することで、ケース①の結果よりも高い値を示していることから予測精度が向上したといえる。このことは、初期内空変位速度のレンジが高いこと、また初期内空変位速度と最終内空変位量の単相関が高いことに起因するものと考えられる。一方、最終天端沈下量に対する分析結果では、重相関係数が0.91と前者よりも低い値となったが、同様にケース①における検討結果よりも、初期天端沈下速度を付加することで精度が向上した結果となった。

以上のように、数量化Ⅰ類による予測値と、説明変数である各項目の実測値の関係から、最終的な変位量や沈

下量を予測することが可能と考えられる。しかし、個々のトンネルでの状況や施工方法によっては、関連性が異なるものと考えられることから、施工の初期段階において計測データの収集、整理および随時修正した関係式を構築し、状況を明らかにすることで、その後の施工管理に役立てることが可能と考えられる。

5. まとめ

北海道の国道トンネルの建設事例において、調査設計から施工段階における地質情報と計測データを整理するとともに統計分析を行い、最終的な変位量と沈下量の予測手法について検討することで以下の知見を得た。

- 1) 本トンネルの掘削で確認した地質区分は、火山砕屑性堆積岩類、ハイアロクラスタイト、玄武岩、枕状溶岩、赤色頁岩、チャートおよびそれらの混在岩である。
- 2) RQD(5)は、玄武岩では0~90%、混在岩で概ね60%以下など、地質に応じた違いを確認した。
- 3) 最終内空変位量と最終天端沈下量に相関関係がみられ、変位量と沈下量は玄武岩、赤色頁岩およびチャートで大きい傾向を確認した。
- 4) また、土被りの増加にともない最終天端沈下量も増加することを確認した。
- 5) 以上のように、地質区分、RQD(5)および土被りと変位量と沈下量の関係を整理した結果、変位量と沈下量は地質に応じた関連性を有することが確認でき、分析での説明変数としての扱いが有効と考えられる。
- 6) 数量化Ⅰ類による統計分析の結果、地質区分、RQD(5)および土被りを説明変数としたケースより、初期内空変位速度および初期天端沈下速度の項目を付加することで予測精度が向上することを確認した。

6. あとがき

本調査では、定性的である地質の違いを加味した分析を行いトンネルの変位量や沈下量の収束値を予想する方法について検討することで、いくつかの知見を得ることができた。

本方法によって予測される最終変位量や最終沈下量とトンネル施工時の管理基準値を比較し、その超過を予想することで、増しボルトやフォアポーリングなどの補助工法の早期導入を検討する際の目安を立てる方法として活用されると幸いである。

今後は、今回の検討で扱っていない切羽観察記録や支保工の変更状況などの資料を整理することで、支保工パターンを決定する際の検討についても進めていきたい。

最後に、調査にご協力いただいた、北海道開発局網走開発建設部の関係各位に記して厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 例えば、多変量解析入門、森北出版、1974
- 2) 常呂帯研究グループ、常呂帯仁頃層群の岩石構造と佐呂間層群基底の不整合:地球科学, vol138, no. 6, pp408~419, 1984
- 3) 道路設計要領・第4集トンネル:北海道開発局建設部道路建設課、平成20年4月