

(13) トンネルにおける初期設計と実施設計の比較

日本道路公団 正員 井上洋司
山口大学工学部 正員 鈴木昌次
山口大学工学部 正員 古川浩平
山口大学工学部 正員 中川浩二

A COMPARISON BETWEEN INITIAL DESIGN AND USED DESIGN IN TUNNELS

Yoji INOUE, J. H. P. C.
Shoji SUZUKI, Yamaguchi University
Kohei FURUKAWA, Yamaguchi University
Koji NAKAGAWA, Yamaguchi University

Abstract

This paper investigates the states of alteration between initial design and used design under construction of Tunnels by NATM. Investigation put into practice to the Granite, Slate and the Schist tunnels. For the granite tunnels, a detailed investigation was carried out. Followings are some of results obtained from the investigation.

- 1.Design pattern altered about a half of tunnel length.
- 2.The important reasons of alteration are the fracture states and the states of underground water.
- 3.Used design patterns under construction scarcely correlate to the elastic wave velocity of the ground.

1. はじめに

トンネルの事前設計における調査は、既往の記録、文献等の資料調査、地質調査、水文調査を経て地表踏査、ボーリング、弾性波探査等の精査段階までが一般に行われる。必要に応じて調査坑調査等も行われるが、一般には前記の調査結果をもとに地山評価を行い、特に施工上問題のないトンネルでは標準支保パターンに沿って設計が進められる。日本道路公団では、地山評価において地山判定基準によるガイドラインを設けている。ここでは、岩種に応じた弾性波速度、地山強度比、ボーリングコアの状態が判定の重要なファクターとなっている。しかしながら、弾性波探査には例えば、高弾性波速度層の下方に低速度層が分布する場合には低速度層に対する解析が不可能である等の問題点が指摘されている¹⁾。またボーリングも実際には坑口付近、沢部、もしくは断層破砕帯の明らかに存在する部分に限られ、さらに土被りの厚い部分での調査は現実的でないため実際にトンネル部分の地質構造を予測するには不十分であると考えられる。このようなことから、予測した地質と実際の地質との間に大きな差がみられることも少なくない。

この点に関する既往の研究例では土砂、軟岩、硬岩と言った地山分類に基づき、対象とした各々のトンネル毎に検討を加え、さらに各々の岩種を共通地山等級に換算した後に変更の度合を調べたものがある^{2), 3)}。本研究は、対象地山を硬岩盤に限定し、さらに岩種を花崗岩、粘板岩、片岩に区分した上で事前設計と実施工における支保パターンの変更状況を調査したものである。

2. 支保パターンの変更に係る比較

対象としたトンネルは日本道路公団の発注した中国地方のトンネルのうち花崗岩を主とする地山に施工されたトンネル14本（以下、花崗岩トンネルと言う）、粘板岩を主とする地山に施工されたトンネル6本（以下、粘板岩トンネルと言う）、片岩を主とする地山に施工されたトンネル10本（以下、片岩トンネルと言う）を取り出したものである。

尚、以下で支保パターンとは日本道路公団の定める標準支保設計を言い、表-1にその内容を示す⁴⁾。表-2は調査した各トンネル毎の調査区間の総延長と変更延長を示したものである。ここで言う延長距離は本研究の必要とする資料が得られた区間についての延長距離であり、実際のトンネル延長とは異なる。表より、花崗岩トンネルでは平均的に42%、粘板岩トンネルでは62%、片岩トンネルでは66%近い変更がなされている。これより、一般にトンネル延長の約半分で支保パターンの変更がなされていると考えることができよう。

次に、事前設計時の支保パターンがどのように変更されたかの比較を行うために(1)式による換算変更率を用いる。

$$\text{換算変更率} = (\text{各支保パターン毎変更距離} / \text{各支保パターンの事前設計時総延長距離}) \times 100 \quad (1)$$

表-3～5は、地山岩種別に各支保パターン毎の換算変更率を示したものである。表中、TLDNは地山等級が下位ランク側に変更された部分（以下、下位側と言う）、TLUPは地山等級が上位ランク側に変更された部分（以下、上位側と言う）の換算変更率の総和である。なお、表では、C₁、C₂パターンはC、D₁、D₂パターンはDパターンにまとめている。従って、C₁からC₂、D₁からD₂パターン等の変更は考慮していない。表-3～5より以下の点が指摘できる。

1) 支保パターンの変更は多くの場合、下位側になされている。花崗岩、粘板岩トンネルでは一部上位側への変更

表-1 標準支保パターン⁴⁾

地山 等級	掘削工法	一掘 進長 (上半) (m)	ロックボルト				鋼製支保工				吹付 厚 (cm)	覆工厚(cm)		変形余裕量(cm)			
			長さ (m)	施工間隔 周方向 (m)	延長 方向 (m)	上半部	下半部	達 間 (m)	厚 (cm)	アー チ・ 側壁 部		イン バー ト部	上半 部	下半 部	イン バー ト		
B	上半工法	2.0	3.0	1.5 (1.5以下)	2.0	なし	なし	—	5	30	0	0	0	0	0		
C ₁	上半工法	1.5	3.0	1.5	1.5	なし	なし	—	10	30	0	0	0	0	0		
C ₂	上半工法	1.2	3.0	1.5	1.2	H-125	なし	1.2	10	30	0	0	0	0	0		
D ₁	上半工法	1.0	4.0	1.2	1.0	H-125	H-125	1.0	15	30	45	0	0	0	0		
D ₂	上半工法	1.0以下	4.0	1.2	1.0以下	H-150	H-150	1.0以下	20	30	50	10	0	0	0		

表-2 調査トンネルでの調査延長距離と支保パターン変更距離

	花崗岩トンネル			粘板岩トンネル			片岩トンネル		
	総延長	変更長	変更率	総延長	変更長	変更率	総延長	変更長	変更率
1	782	139	17.8	1349	809	60.0	580	381	65.7
2	813	130	16.0	1360	914	67.2	690	341	49.4
3	619	204	33.0	415	161	38.8	420	372	88.6
4	805	398	49.4	376	95	25.3	492	422	85.8
5	1011	795	78.6	1381	963	69.7	363	74	20.4
6	1020	765	75.0	1766	1209	68.5	304	13	4.3
7	585	522	89.2				1001	788	78.7
8	558	344	61.6				1053	913	86.7
9	316	136	43.0				231	89	38.5
10	366	101	27.6				295	170	57.6
11	612	199	32.5						
12	879	170	19.3						
13	875	178	20.3						
14	758	69	9.1						
全	9999	4150	41.5	6647	4151	62.4	5429	3563	65.6

表-3 花崗岩トンネルの換算変更率

		変更後支保パターン				トータル	
		A	B	C	D	TLDN	TLUP
支保 パ タ ー ン	A	46.3	35.4	17.8	0.5	53.7	—
	B	9.8	47.6	42.0	0.6	42.6	9.8
	C	0.3	11.6	81.3	6.8	6.8	11.9
	D	0.0	0.0	21.8	78.2	—	21.8

表-4 粘板岩トンネルの換算変更率

		変更後支保パターン				トータル	
		A	B	C	D	TLDN	TLUP
支保 パ タ ー ン	A	0.0	17.8	54.2	28.1	100.	—
	B	0.0	17.7	72.1	10.2	82.3	0.0
	C	0.0	5.8	60.5	33.7	33.7	5.8
	D	0.0	2.9	29.1	68.0	—	32.0

表-5 片岩トンネルの換算変更率

		変更後支保パターン				トータル	
		A	B	C	D	TLDN	TLUP
支保 パ タ ー ン	A	—	—	—	—	—	—
	B	0.0	0.9	61.6	37.5	99.1	0.0
	C	0.0	0.0	74.4	25.6	25.6	0.0
	D	0.0	0.0	19.4	80.6	—	19.4

がなされているが、片岩トンネルでは非常に少ない。

2) 支保パターンの変更は特にA、Bパターンに多い。花崗岩トンネルでは、A、Bともに約50%が変更されている。粘板岩トンネルではAパターンについては100%が、Bパターンについても82%が変更されている。また、A、BパターンからCパターンへの変更が各々54、72%と、その多くを占めているのが特徴的である。さらに、片岩トンネルでは事前設計でAパターンとされたケースは無かったが粘板岩トンネル同様にBパターンの99%が変更されており、そのうちの62%がCパターンへ変更されているのが分かる。

3. 花崗岩トンネルにおける詳細な検討

ここでは、上記調査トンネルのうち花崗岩トンネルにおける変更箇所に関する詳細なデータを抽出し検討を試みた。抽出したデータは以下のようである。

- (1)支保パターン変更区間端部から最近坑口までの距離
- (2)支保パターン変更区間端部から最近垂直ボーリング位置までの距離
- (3)変更区間長
- (4)土被り厚
- (5)地質調査時の弾性波速度
- (6)坑内観察記録のうち切羽観察記録(図-1)
- (7)岩質判定記録、切羽観察記録に記載された判定記事

上記では、(4)、(5)、(6)の内容が大きく変わらない範囲で一区間とした。この結果、100組の区間データを得た。表-6はその内容を簡単に示したものである。例えば、事前設計においてBパターンであった区間は38区間であり、そのうち下位側へ30区間、上位側へ8区間の変更がなされている。このように、変更頻度の点からも上位側への変更は下位側への変更の1/3程度にすぎず、前記1)の結果がさらに説明付けられる。

ここでは、上記区間データ群に対して各種統計解析を試みたが統計上有意な結果は得られなかった。そこで、区間データ群から読み取ることでいくつかの点を以下に示す。

1) 表-7は垂直ボーリング位置と変更区間の位置関係についてまとめたものである。表中、第1列は上記(2)のデータを垂直ボーリング位置から水平方向に10m毎の範囲で示したものである。第2列は該当する区間数である。これより、ボーリング位置において、すでに支保パターン変更の行われているケースが3区間確認できた。また、10m以内での区間数も6と全体的にはボーリング位置から近距離の地点では変更頻度は低いようであるが、ボーリングを実施した地点においても必ずしも精度の良い予測が得られるわけではないことが分かる。

2) 切羽観察記録における⑩項目(湧水)と支保パターンの変更に関して明らかに対応関係がある。すなわち、変更が下位側になされた75区間における切羽観察記録中⑩項目の得点が2以上であったのが61区間(81.3%)、逆に上位側に変更された25区間中⑩項目の得点があるのが14区間(56%)であった。さらに上位側に変更された区間のうち⑩項目が2以上を示したのは当

⑥	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
⑦	素掘面の状態	1.自立(普請不要)	2.時間がたつと緩み肌落ちする(後普請)	3.自立困難箇所後早期に支保する(先普請)	4.掘削に先行して山を受けておく必要がある
⑧	圧縮強度	1. $\sigma_c \geq 1000 \text{ kgf/cm}^2$ ハンマー打撃はね返る	2. $1000 > \sigma_c \geq 200$ ハンマー打撃でくだける	3. $200 > \sigma_c \geq 50$ 軽い打撃でくだける	4. $50 \text{ kgf/cm}^2 > \sigma_c$ ハンマーで先くい込む
⑨	風化変質	1.なし・健全	2.岩目に沿って変色、強度やや低下	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
⑩	割れ目の頻度	1.間隔 $d \geq 1\text{m}$	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
⑪	割れ目の状態	1.密着	2.部分的に開口	3.開口	4.粘土をはきむ、当初より未固結
⑫	割れ目の形態	1.ランダム方形	2.柱状	3.層状、片状、板状	4.土砂状、細片状、当初より未固結
⑬	湧水	1.なし、湧水程度	2.湧水程度	3.集中湧水	4.全面湧水
⑭	水による劣化	1.なし	2.緩みを生ず	3.軟弱化	4.崩壊・流出

図-1 切羽観察記録

表-6 花崗岩トンネルにおける詳細データ調査区間数

	区間数	変更後支保パターン						下位変更	上位変更
		A	B	C ₁	C ₂	D ₁	D ₂		
支保パターン	A	20	14	0	6	0	0	20	—
	B	38	8	16	12	2	0	30	8
	C ₁	18	1	2	13	2	0	15	3
	C ₂	6	0	0	4	2	0	2	4
イン	D ₁	18	0	0	4	6	8	8	10
	D ₂	—	—	—	—	—	—	—	—

表-7 ボーリング位置と区間数

距離 m	区間数
0	3
0~10	3
10~20	8
20~30	7
30~40	7
40~	72

初より湧水が予測されていた地点とDパターンの設計がなされていた区間に限っている。このことから、明らかに湧水の影響と支保パターン変更の間に関連性があると考えられる。また、部分的に含水量の多い区間で湧水の予測が困難であった場合には、弾性波速度を基準として設計された場合、危険側の設計となる傾向にあると考えられる。

3) 図-2は縦軸に事前設計支保パターン、横軸に地質調査時の弾性波速度値をとったものである。○の大きさは該当する区間数に対応している。また、図中の実線は日本道路公団の地山分類⁵⁾に示されている弾性波速度の範囲である。同様に図-3は縦軸に変更後支保パターンをとったものである。図より、事前設計時の支保パターンは比較的、弾性波速度値に対応しているが変更後はばらつきが大きくなる。特に、A、Bパターンでこの傾向が顕著である。前述のように事前設計は弾性波速度のみで決定されるものではなく、多くの要因を考慮した総合判断による。しかしながら、図-2に見るように弾性波速度にかなりのウェイトがおかれていることが容易に想像できる。これに対し、図-3は弾性波速度値が多くの場合、岩盤の硬軟の判定は可能であってもトンネル施工における地山挙動を予測するには不十分であることを示している。

4) 支保パターンの変更は切羽状況、施工状況を考慮して行われ、その判定理由等は岩質判定記録に記載される。この判定は日本道路公団、施工業者双方の経験的判断に基づいて行われる。そのときの判定理由は多くの場合、数量的に表現することの困難な内容となる。以上のことから、岩質判定記録に記載された記事は定性的であるものの信頼性、重要性の高い貴重な資料であると思われる。そこで岩質判定記録の判定記事より、下位側、上位側各々の変更について、変更理由と考えられる同一記述内容の出現頻度を調べることにした。結果を以下に列記する。なお、()内は出現度数である。

下位側に変更された区間の記事

- ①. 割れ目に粘土をかむ (32)
- ②. 岩質は硬いが亀裂が多い (21)
- ③. 湧水が増加(発生)している (20)
- ④. 肌落ちが頻繁である (14)
- ⑤. 縦方向の節理が卓越している (6)

上位側に変更された区間の記事

- ⑥. 堅硬になってきた (11)
- ⑦. 亀裂にそって大きく割れる (4)

以上より、パターン変更の重要な要因は割れ目と湧水の状況であることが分かる。特に、記述②.は弾性波探査で堅硬であると判定された場合にも実際には割れ目の存在状況によって支保パターンの下位側への変更を必要とする場合が多いことを示しており、3)で示した内容を説明付けるものである。また、2.で述べたようにA、Bパターンの変更頻度が高いことの裏付けとなろう。なお、記述④、⑤から割れ目の状況の中でも特に卓越する縦方向割れ目が重要であると思われる。また記述③.に関しても上記2)で述べた内容をさらに説明付けるものである。

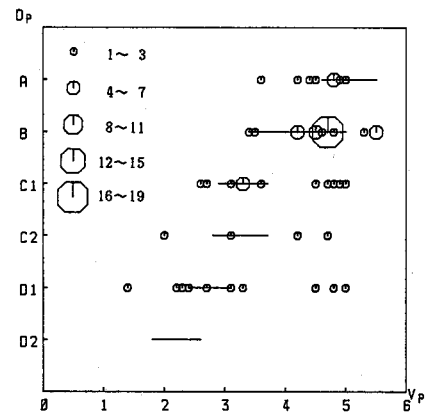


図-2 支保パターン（事前）－弾性波速度関係

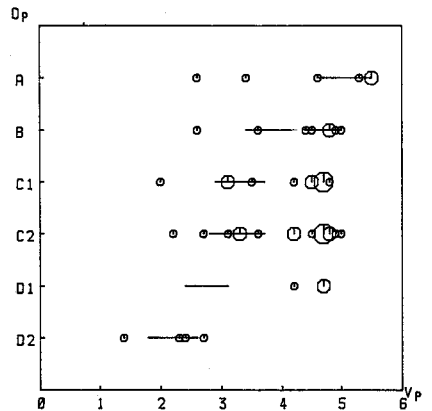


図-3 支保パターン（施工）－弾性波速度関係

4. おわりに

本研究ではNATMで施工された中国地方の道路トンネルについて対象を硬岩地山に限定し、さらに岩種を花崗岩、粘板岩、片岩に区別した上で、事前設計による支保パターンと実施工で採用された支保パターンの比較検討を行った。結論を以下に列記する。

- 1) 支保パターンの変更はトンネル延長の約半分について行われている。
- 2) 支保パターンの変更は多くの場合地山等級の下位側になされている。
- 3) 変更された支保パターンはA、Bパターンに多い。また、変更内容では特にCパターンに変更される場合が多い。また、粘板岩、片岩トンネルでは事前設計のA、Bパターンのほとんどが変更されている。
- 4) 垂直ボーリングがなされている地点における変更頻度は低い、必ずしも施工時の判定に一致はしない。
- 5) 支保パターン変更の判定理由は多くの場合、切羽における割れ目と湧水の状況である。
- 6) 施工時に採用された支保パターンはトンネルルートに該当する岩盤の亀裂、湧水がほとんど見られない健全な場合の他には地質調査時の弾性波速度との相関性は低いと考えられる。

以上のことから、今後は、トンネルルートにおける割れ目の状況、特に、卓越する鉛直方向割れ目の存在、および地下水の状況を可能な限りの確に予測するための調査方法を確立することが必要と考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネルにおける調査・計測の評価と利用、pp.52～53、1987.9
- 2) 吉川他：トンネルの事前設計と実績の対比、土木学会第39回年次学術講演海講演概要集Ⅲ-247、pp.49
34～94、1984.10
- 3) (社)日本トンネル技術協会編：NATMにおける事前調査のあり方に関する研究報告書、pp58～84、198
3.2
- 4) 日本道路公団：設計要領第三集第9編トンネル、pp.79、1985.10
- 5) 日本道路公団：設計要領第三集第9編トンネル、pp.34、1985.10