

地山の長期安定性の評価に基づく インバートの施工について

舛岡 慶一^{1*}

¹ 西松建設株式会社 三坂トンネル出張所 (〒791-1204 愛媛県上浮穴郡久万高原町東明神唐子 685 番地)
*E-mail:keiichi_masuoka@nishimatsu.co.jp

トンネル掘削時において、切羽に凝灰岩等の長期安定性に不安のある地質が出現したため、顕微鏡観察、浸水崩壊度試験、CEC 試験、一軸圧縮強度試験等を実施し、インバートの必要性を検討するとともに、電気比抵抗値と凝灰岩等の相関からその範囲を具体化した。

KeyWords : tuff, tuff breccia, long-term stability, invert arch, electric resistivity

1. 概要

三坂第1トンネルは「高知松山自動車道」の一環である「一般国道 33 号三坂道路」の起点に位置する自動車専用トンネルである。本工事は、全長 3,097m の三坂第1トンネルのうち、久万高原町側から 2,000m を施工する三坂第1トンネル工事に引き続き、残りの区間の 1,097m を施工するものである。

本報告は、地山の長期安定性を判断するために実施した調査・試験結果を基にインバートの設置範囲を検討した内容についてとりまとめた。

(1) 工事概要

- 工事名 平成16-18年度 三坂第1トンネル第2工事
- 発注者 国土交通省 四国地方整備局
- 工事場所 (自)愛媛県上浮穴郡久万高原町東明神
(至)愛媛県松山市久谷町つづら川
- 工期 平成17年3月24日～平成19年3月30日
- 施工形態 西松・鴻池特定建設工事共同企業体
- 工事内容
工事延長 L=1,570.0 m
トンネル掘削 L=1,097.0 m (全長 L=3,097m)
掘削断面積 $A=95.9\text{m}^2$ (D I - i)
(内空断面積) $A=73.6\text{m}^2$
覆工コンクリート L=1,397.0 m
トンネル掘削工法 NATM
補助ベンチ付全断面工法 (岩質区分C)
上半先進ベンチカット工法 (岩質区分D)
掘削方式 発破



図-1 位置図

(2) 地質概要

本トンネル付近の地質は、古第三紀の堆積岩類を主体とした久万層群と新第三紀の火山岩類・火山砕屑岩類を主体とした石鎚層群を基盤岩とし、これを第四紀の未固結堆積物（現河床堆積物、崖錐堆積物、段丘堆積物が覆っている。

久万層群は古第三紀始新世の堆積岩類からなり、礫岩主体で砂岩・泥岩を狭在し、三波川結晶片岩類を不整合で覆い、石鎚層群に不整合で覆われる。本層は下位の二名層と上位の明神層に区分され、このうちトンネル付近には明神層が分布する。明神層は花崗岩類の円礫を多量に含む礫岩を主体とする。

石鎚層群は新第三紀中新世の瀬戸内区の火山活動によ

り形成された地層で、凝灰岩類を主とする高野累層、安山岩類を主とする黒森峠累層、及びサヌカイト、デイサイト等からなる皿ヶ嶺累層に区分される。

第四紀の未固結堆積物は、現河川沿いに分布する現河床堆積物、山麓部に分布する崖錐堆積物、および部分的に平坦面から緩斜面を形成して分布する段丘堆積物からなる。

当初設計（地質縦断面図）でのトンネル区間の地質は、坑口付近（No.24）から黒森峠累層の安山岩（Ank）が分布し、No.60 付近（TD=720m）より高野累層の凝灰岩（Bt）主体となり、No.170 付近（TD=2,920m）から終点側坑口まで高野累層の安山岩（Ant）と予想されていた。

2. 問題点

一般に凝灰岩等の粘性土岩は長期安定性に問題があることが知られているが、対策としてインバートを設置する際には、以下の事項を明確にする必要がある。

- ・凝灰岩の長期安定性に問題があることの根拠
- ・対策範囲の決定根拠

現段階では、上記の事項に関して明確な判断基準がないため、基準となる指標の選定とその調査方法から検討する必要があった。

3. 凝灰岩等の出現状況

2,590m 程度掘進した時点で、初めて凝灰岩が出現した。No.153+10 付近（TD=2,590m）より No.167+00 付近（TD=2,860m）まで凝灰岩および凝灰角礫岩が出現し、その後 No.171+10 付近（TD=2,950m）より、再度出現した。凝灰岩等は上部から出現した後、全面に広がり、その後上部へ消えている。切羽状況の例を写真-1, 2 に示す。



写真-1 切羽状況 (No. 155+4. 4)



写真-2 切羽状況 (No. 166+18. 1)

4. 調査方法の検討

(1) 設計・施工の基準の確認

まず、凝灰岩等が長期安定性に問題があることの根拠付けとして、文献を整理した。

a) トンネル技術基準（構造編）・同解説¹⁾

当初設計段階では、「標準的な支保構造の組み合わせとして、地山の岩質が凝灰岩である場合には、支保パターンがCの場合でもインバートを施工する」となっているが、施工の段階においては「切羽の観察や計測に基づいて、そのトンネルに最も適したものへと修正・変更を加えることが必要である」となっている。

b) 日本道路公団 設計要領 第三集 トンネル²⁾

「地山の岩質が凝灰岩である場合には、支保パターンがCの場合でも長期耐久性を損なう恐れがあるため、原則としてインバートを施工すること」とされている。ただし、「いくつかの評価方法によって、トンネルの長期耐久性に対して十分安全であると判断される場合は省略してよい」となっている。

以上より、いずれの場合も必ずしもインバート設置ではなく、評価をする必要がある。

(2) 凝灰岩等の評価方法

凝灰岩等の評価方法について検討した。既往研究文献では判定基準が各種提案されているが、設計の基準として具体的に示されているものはない。「日本道路公団 設計要領 第三集 トンネル²⁾」には、浸水崩壊度試験を実施した後の岩片の強度がどの程度低下しているか等の方法も有効であるとあり、一つの判断基準となる。

既往研究文献では、「変状トンネルの要因分析に基づいたインバート設置基準の提案について³⁾」に JH 判定基準（案）として様々な判定指標があり、今回は特に表-1 に示す「盤膨れ変状における判定指標」を参考とした。

表-1 盤膨れ変状における判定指標³⁾

項目	細目	単位	JH判定基準 (案)	既往研究文献			
				※2日本鉄道建設公団(1977)	大塚ほか(1980)	佐藤ほか(1980)	新宮ほか(1982)
計測工	A計測	内空変位>天端沈下					
	切羽観察記録	湧水状況、水による劣化、風化変質(安山岩)≧3					
物理試験	単位体積重量	kN/m ³	≦21	—	≦20.5	≦18.0 (乾燥状態)	—
	自然含水比	%	≧20	—	≧20	≧20	—
	塑性指数	%	≧60	≧70(25)	≧70	—	—
	2μm以下の粒子の含有量	%	≧25	≧30(15)	≧30	—	—
	吸水膨張率	%	※1(≧2.0)	—	≧2.0	—	—
定性試験	浸水崩壊度試験	—	C, D	D	—	C, D	—
	簡易ルーペ試験	—	3, 4	—	—	—	—
科学試験	X線解析	—	フッ素含有量少量以上	主要粘土鉱物が認められ	—	フッ素含有量30%	フッ素含有量≧20%
	CEC試験	meq/100g	≧20	≧35(20)	≧35	—	—

※1: () は既往文献の管理値から採用するもの
 ※2: 膨圧の可能性が非常に大きい地質の判定基準。 () 内は膨圧の可能性がある地質の判定基準

(3) 凝灰岩等の調査項目

凝灰岩等を評価する調査として以下の項目について実施した。

a) 短期的安定性の確認

切羽評価点ではCII程度でありインバートは不要であるが、短期的に内空変位や吹付けコンクリート等に劣化がでる可能性が考えられた。そのため、A計測の強化と、吹付けコンクリートおよびロックボルトの観察の強化を行い、劣化が見られる場合には、A計測の管理測点を追加するようにした。

b) 薄片による顕微鏡観察およびX線分析

X線分析を行い、膨潤性鉱物等の含有量を調べた。また、薄片による顕微鏡観察より、正確な岩種の判定を行った。

c) 浸水崩壊度試験

長期安定性を最も直接的に示すと考えられる。浸水崩壊度試験の判定は下記による。

- A: ほとんど変化が認められないもの
- B: 岩塊として分離するが粒子が分散しないもの
- C: 稜角部が崩壊するもの
- D: 原形をとどめないもの

JH判定基準(案)により、C,Dの場合に問題ありと判断した。

d) CEC試験

岩の陽イオン交換容量を調べることで、膨張性を示す粘土鉱物の含有量を知ることができる。各種文献に陽イオン交換容量と膨張性地山の評価が示されているため、評価が容易である。また、浸水崩壊度試験との比較により、さらに確実な長期安定性の評価ができる。

JH判定基準(案)により、20meq/100g以上の場合に問題ありと判断した。

e) 浸水崩壊度試験後の一軸圧縮強度試験

c) で行う浸水崩壊度試験後に、一軸圧縮強度試験を行

い、一軸圧縮強さの変化を観察した。

f) 地山強度比

現状での地山強度比と浸水崩壊度試験後の試料による地山強度比を求め、長期安定性を推定できないか試みた。地山強度比は式(1a)のように定義されている。

$$\text{地山強度比} = \frac{q_u}{\gamma h} \quad (1a)$$

今回の地山の一軸圧縮強さ q_u は、亀裂等の存在を無視できないため、準岩盤強度 q_u' を用いた。

$$q_u' = \left(\frac{V_p}{U_p} \right)^2 \times q_u \quad (\text{kN/m}^2) \quad (1b)$$

一軸圧縮強さ q_u は、切羽より採取した岩塊からコアカッターにてテストピースを作成し、室内試験にて一軸圧縮強さを測定した。

地山の弾性波速度 V_p は、設計図書に示されている弾性波速度が、掘削時の地質状況と相違が見られるため、切羽にて簡易弾性波試験を行った。

試料の超音波伝播速度 U_p は q_u を求める際に作成したテストピースにて測定した。

表-2 に試料採取位置と室内試験項目を示す。

表-2 室内試験一覧表

試料番号	採取位置		岩種	浸水崩壊度試験	CEC試験	テストピースによる試験	顕微鏡観察(X線)
	No	TD(m)					
A	142+10	2,370	変質安山岩	○	○		○
B	144+00	2,400	変質安山岩	○	○		
C	149+00	2,500	変質安山岩	○	○	○	
D	151+00	2,540	安山岩質角礫岩	○	○		
E	156+07	2,647	凝灰角礫岩	○	○		○
F	157+05	2,665	変質安山岩	○	○		○ (○)
G	157+11	2,671	凝灰角礫岩	○	○		○
H	157+11	2,671	凝灰岩	○	○	○	
I	157+11	2,671	凝灰岩	○	○	○	
J	157+11	2,671	変質安山岩	○	○	○	
K	158+00	2,680	凝灰岩	○	○		
L	164+00	2,800	凝灰角礫岩	○	○	○	
M	156+00	2,640	凝灰角礫岩	○	○		○ (○)

5. 凝灰岩等の試験結果

(1) 短期的安定性

A計測の結果は、天端沈下、水平内空変位ともに20mm以下であり、凝灰岩の出現区間において変位が増大する傾向は見られなかった。

吹付けコンクリートおよびロックボルトの観察においてもクラック等の劣化はほとんど見られず、A計測と同様に凝灰岩出現区間であることによる特別な現象は確認されなかった。

以上より、短期的には全く問題ない状態であった。

(2) 顕微鏡観察およびX線分析結果

切羽にて試料をサンプリングし、顕微鏡観察を行うことで正確な岩種を判定した。以下に代表的な岩の特徴を示す。

a) 斜方輝石安山岩質凝灰角礫岩 : No. 156+6.9 切羽上部

初生構成破片は、岩片が斜方輝石安山岩および斜方輝石ヒン岩、結晶片が斜長石、斜方輝石（すべてスメクタイトによって置換）である。不透明鉱物および石英を含む。2次鉱物は、主にスメクタイトおよび褐鉄鉱である。スメクタイトを多量に含む。

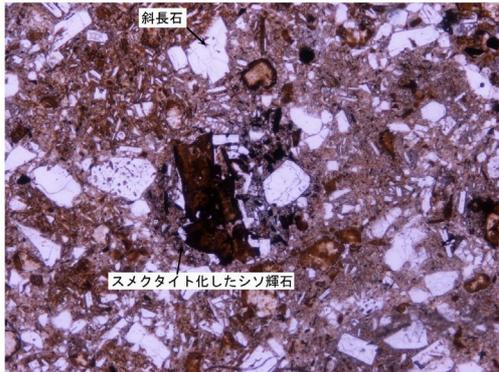


写真-3 スライス写真(斜方輝石安山岩質凝灰角礫岩)

b) 変質した斜方輝石安山岩 : No. 157+4.9 切羽下部

初生鉱物である斜長石、シソ輝石の斑晶が、熱水変質作用によりスメクタイト化していることが特徴である（とくにシソ輝石）。

X線分析は、安山岩質凝灰岩、黒雲母安山岩質凝灰角礫岩、淡緑色凝灰角礫岩について行なった。

3種類の試料において、ピーク位置、波形の多少の違いは観られるものの、スメクタイトを特徴づける $2\theta=5.2$ Å付近に最強ピークが出現している状況は共通しており、定性的にスメクタイトが多く含まれていると確認できた。

(3) 浸水崩壊度試験

全13試料について実施したが、Cの判定となったものは5試料(38%)であった。

(4) CEC試験

CEC試験も同様に全13試料で行った。20meq/100gを超えるものは、6試料(46%)で最大値は39.5と高い値を示した。

浸水崩壊度試験と対比すると、CEC試験結果で30meq/100g以上と高い値を示した場合(試料F,J)でも浸水崩壊度試験でA判定の場合があり、浸水崩壊度試験だけでは判断できない場合があることが分かった。

(5) 浸水崩壊度試験後の一軸圧縮強度試験

一軸圧縮試験結果では、試料Jおよび試料Lにおいて

明らかな強度低下が見られた。他の試料については、誤差の範囲であると考えられる(J: 63N/mm²→25N/mm², L: 124N/mm²→95N/mm²)。

テストピースによる室内試験結果一覧表を表-3に示す。

表-3 テストピースによる室内試験結果一覧表

試料No.	岩質	UP (km/sec)	浸水崩壊度 試験	浸水崩壊度試験前		浸水崩壊度試験後	
				qu N/mm ²	γ g/cm ³	qu N/mm ²	γ g/cm ³
C-1	凝灰角礫岩	3.40	A	97	2.48	74	2.50
C-2		3.58	A	73	2.46	87	2.49
C-3		2.87	A	57	2.46	83	2.49
平均		3.28		75.9	2.47	81.1	2.49
H-1	凝灰岩	2.80	A	85	2.23	98	2.33
H-2		3.22	A	153	2.29	120	2.31
H-3		2.65	A	87	2.22	85	2.29
平均		2.89		108	2.25	101	2.31
I-1	凝灰角礫岩	3.40	A	127	2.57	120	2.55
I-2		3.58	A	152	2.58	129	2.58
I-3		2.87	A	46	2.45	55	2.48
平均		3.28		108	2.53	101	2.54
J-1	変質安山岩	2.68	A	63	2.44	27	2.44
J-2		2.45	A	63	2.45	15	2.43
J-3		2.54	A	64	2.45	33	2.43
平均		2.56		63	2.45	25	2.44
L-1	凝灰岩	2.80	A	127	2.37	106	2.43
L-2		3.22	A	127	2.46	76	2.41
L-3		2.65	A	118	2.36	104	2.40
平均		2.89		124.0	2.40	95.3	2.41

(6) 地山強度比の算定

簡易弾性波試験を切羽にて行った。試験は切羽に測線を設け、1m毎に初動到達時間を測定した。その結果をグラフ化してその勾配から弾性波速度を求めた。結果を表-4に示す。

表-4 簡易弾性波速度試験結果

岩種	超音波伝播速度 Up (km/s)	弾性波速度 Vp (km/s)	Vp/Up
凝灰岩1 淡緑灰色 試料I	3.28	1.64	0.50
凝灰岩2 灰白色 試料H	2.89	2.3	0.80
安山岩 暗褐色 試料J	2.56	1.43	0.56

弾性波速度は、凝灰岩で1.64km/s~2.3km/s、変質安山岩で1.43km/sとかなり低い値を示した。ただし、切羽での測定のため、発破による緩みを考慮する必要がある。

自然状態での一軸圧縮強さをを用いた地山強度比の算定結果を表-5に、浸水崩壊度試験後の一軸圧縮強さをを用いた地山強度比を表-6に示す。

表-5 地山強度比算定結果(自然状態)

試料 番号	γ (kN/m ³)	土被り ZH (m)	qu (N/mm ²)	Vp/Up	qu' (N/mm ²)	地山強度比
C	24.7	176	76	0.56*	23.8	5.5
H	22.9	75	108	0.8	69.1	40.2
I	25.8	75	108	0.5	27	14
J	25	75	63	0.56	19.8	10.6
L	24	51	124	0.50*	31	25.3

*0はJ, LはIのVp/Upを使用

表-6 地山強度比算定結果（浸水崩壊試験後）

試料番号	γ (kN/m ³)	土被り ZH (m)	q_u (N/mm ²)	Vp/Up	q_u' (N/mm ²)	地山強度比
C	24.9	176	81	0.56*	25.4	5.8
H	22.9	75	101	0.8	64.6	37.6
I	25.8	75	101	0.5	25.3	13.1
J	25	75	25	0.56	7.8	4.2
L	24.1	51	95	0.50*	23.8	19.4

※CはJ, LはIのVp/Upを使用

自然状態の結果では、試料Cを除いて地山強度比は10以上であり、問題ない値である。試料Cについては、土被りが176mと他に比べて大きいため、5.5と低い値を示すが、発破の影響をどう評価するかによって地山の準岩盤強度が大きく変わってしまうため、注意が必要である。一軸圧縮強さをを用いた場合の地山強度比は17.5であり、実際の地山強度比は5.5から17.5の間にあると言える。

浸水崩壊試験後の結果では、試料Jにおいて4.2と低い値となっている。ただし、試料Cと同様に発破による影響があるため、実際の地山強度比は4.2～13.3の間にあると予想される。試験結果の一覧を表-7に示す。

6. 考察

(1) 凝灰岩（凝灰角礫岩）

7 試料のうち、長期安定性について何らかの問題が出たものは6 試料である。

今回の試験で特徴的であったのは、浸水崩壊試験で、5cm程度の岩から採取した2 試料(No.156+00 試料M)で異なる判定結果が出たことである。そのため、試料が少ない場合や試験項目が少ない場合には判断をあやまる可能性がある。

(2) 変質安山岩

No.142～No.151 付近の変質安山岩については、A の試料を除き全ての試験項目について長期安定性に問題ない結果となった。A の試料は切羽に局所的に出現した岩で

あるため、参考値として取り扱うものとした。

No.156～No.157+10 付近の変質安山岩については、CEC 試験結果が30meq/100g以上を示し、浸水崩壊試験や浸水崩壊試験後の一軸圧縮強度試験結果をみても長期安定性について問題があると考えられる。

7. インバート設置範囲の検討

(1) 概要

インバート設置範囲を安全側に決定するのは比較的容易であるが、経済性に影響するため、範囲の絞り込みを検討する必要がある。

インバート設置範囲はトンネル周辺の地質状況が影響するため、トンネル掘削時のデータだけでは情報が不足する。そこで、今回は、設計段階で行われた比抵抗値縦断面図に着目して範囲の絞り込みを実施した。

(2) 比抵抗値と凝灰岩等の相関

比抵抗値に影響を与える諸要因を表-8に示す。凝灰岩等は風化・変質が激しいこと、粘土鉱物が多いこと等により比抵抗値は低く測定されることが予想された。

表-8 比抵抗に影響を与える諸要因¹⁾

要 因	比抵抗	
	低 ……………	高
間隙率 (割れ目密度)	飽和状態	大きい 小さい
	乾燥状態	小さい 大きい
風化・変質	強	弱
粘土鉱物、伝導性鉱物含有量	多い	少ない
含水量 ※	多い	少ない
固結度	低い	高い
粒 径	小さい	大きい

※地質より地下水の比抵抗値が大きいと逆転する

今回の室内試験結果と比抵抗値が40Ω・m以下の低い部分は、かなり高い精度で相関が見られた。凝灰岩等の出現状況においても、切羽上方から現われ、その後全面となり、最後に上部に抜けており、比抵抗値の縦断面図と一致するものである。

以上より、比抵抗値が40Ω・m以下の区間が凝灰岩等

表-7 試験結果一覧表

試料番号	A	B	C	D	M	E	F	G	H	I	J	K	L
測点	No.142+10	No.144+00	No.149+00	No.151+00	No.156+00	No.156+06	No.157+05	No.157+10	No.157+10	No.157+10	No.157+10	No.158+00	No.164+00
岩種	変質安山岩	変質安山岩	変質安山岩	安山岩質角礫岩	凝灰角礫岩	凝灰角礫岩	変質安山岩	凝灰角礫岩	凝灰岩	凝灰岩	変質安山岩	凝灰岩	凝灰角礫岩
試料の状態	サンプル	サンプル	コア状	サンプル	サンプル	カット試料	カット試料	カット試料	コア状	コア状	コア状	サンプル	コア状
顕微鏡観察	スメクタイト				スライス作成困難	スメクタイト多量	スメクタイト多量	スメクタイト多量					
X線分析					膨潤性鉱物の確認			膨潤性鉱物の確認					
浸水前強度試験	CCC	AAA	AAA	AAA	CA	BC	AA	CC	AAA	AAA	AAA	CCC	AAA
CEC試験 Meq/100g	21.2		18.7	19.8	19.2	31.7	39.5	25.7	7.3	9.9	30.7	31.3	5.7
一軸圧縮試験 N/mm ²			75.9						108.0	108.0	63.0		124.0
一軸圧縮試験2 N/mm ²			81.1						101.0	101.0	25.0		95.3
超音波電波速度 km/s			2.90						2.25	2.53	2.45		2.40
密度			2.47						2.25	2.53	2.45		2.40
備考	切羽の一部に出現			切羽に部分的に出現							浸水前強度試験後に強度低下		浸水前強度試験後に強度低下

