

3. 四国南部の花崗岩地山におけるトンネル工事の水文調査事例

○大矢基弘・露口耕治・田村栄治（株式会社四電技術コンサルタント）
池添央・西岡亮太（高知県幡多土木事務所 土佐清水事務所）

1. はじめに

四国南部の主に花崗岩からなる地山において延長約 1km の道路トンネルが施工され、トンネル掘削に伴う周辺水源の枯渇等の影響を把握する目的で水文調査を実施した。当該トンネルでは周辺水源の減少量を予測するにあたって、「高橋の水文学的手法（以下、高橋の手法とする）」による集水範囲を用いた事前評価を行い、トンネル掘削完了後には観測データに基づいたトンネル掘削後の減少量を検討した。

事前に水源等の減少量を検討する場合、高橋の手法を用いて検討する実績が多いにも関わらず、掘削後のデータとの検証事例については少ない。ここでは、日本の地質で多く分布する花崗岩（結晶質岩）を対象とした山岳トンネルの水文調査事例として、高橋の手法による水源の減水量の事前の予測」と「トンネル掘削後の流量観測実測データ」を比較し、湧水予測方法の妥当性を検討する。

2. トンネル・地形・地質の概要

当該トンネルは四国の南西部にあたる足摺岬半島の西岸付近を北西－南東方向に貫く延長約 1km の道路トンネルで、掘削半径が 6.5m、北側坑口に向かって 3% の下り勾配となる大断面トンネルであり NATM 工法を採用している。最大の土被り厚は 150m 程度であり南坑口から 250m 区間にかけては 2 溪流がトンネルルートを横断するため土被りが 10~20m と非常薄くなる。

足摺岬周辺の地形は標高 100~250m 前後の比較的平坦な台地地形となっており、海岸線は狭小な谷や急斜面がそのまま海に連続しているため入り組んだ海岸地形となっている。また、海岸沿いに海成段丘が発達しており、段丘面の分布と形成年代から太田ら(1994)はこの周辺が 0.55m/ka 程度で隆起しているとしている。

足摺岬の先端付近には、後期始新世から後期漸新世に堆積した清水層が形成された後に、閃長岩やはんれい岩を伴う中新世の新しい花崗岩類が分布している。

また、弾性波探査やボーリング結果によると尾根部において地表から深度約 100m まで 2.6km/sec 以下となっており、深部まで亀裂が多く風化が及んでいることが示唆されている。



日本の地質 8 四国地方 (甲藤・村上, 1977)

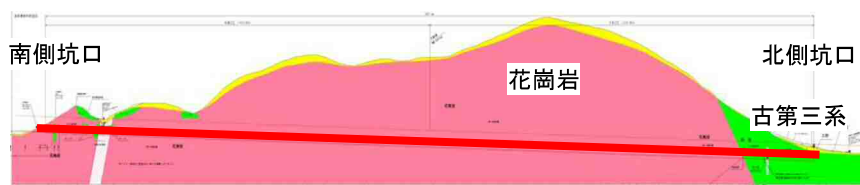


図-1 地質図・地質推定縦断面図

3. トンネル掘削に伴う湧水影響予測

3.1 影響予測方針

山岳トンネルの掘削に伴う周辺水源への影響を予測する方法としては、集水範囲を現在の地形がある程度地下水の流動に順応して形成されたものと考えて、トンネルに流出した湧水の流出範囲を求めるとした「①高橋の手法」の他、多くの類似トンネルの湧水量を整理・分析し、トンネルの湧水量を統計的に予測する「②統計的方法」や、トンネル周辺の水文地質をモデル化し、地下水の運動を工事計画にもとづきシミュレートする「③水収支シミュレーション」等がある。

当該トンネルは花崗岩類を主体とし、特異な地下水流動が少ないと考えられる一般的な透水性を示す地山であることから、多くのトンネルで実績がある高橋の手法を用いて検討を行った。

3.2 影響予測検討結果

(1) トンネル集水範囲

高橋の手法によるトンネル周辺の4流域の平均透水性を求めた結果、 $kt=90\sim 290$ であり、影響予測においては安全側（集水範囲が広い）で、かつトンネル直上流域である図-2のA・B流域の平均透水性（ $kt=290$ ）を採用した。これにより求めたトンネル集水（影響）範囲は 0.84km^2 、片側最大集水幅は550mとなった。

(2) トンネル恒常湧水量の予測

トンネル恒常湧水量の予測は沢水の基底流量＝地下水流出として、少雨時期・多雨時期の沢水流量（トンネル周辺5流域）の平均比流量にトンネル集水面積を乗じて求めた。通常、トンネル恒常湧水量は概ね一定とされているが、本業務地においては小雨時期と多雨時期の沢水の基底流量に大きな違いが認められたことから地下水の循環が速いと想定され、恒常湧水量の予測においては $800\sim 1,500\text{L/分}$ と最低湧水量の約2倍の幅を有するものと想定した。



図-2 トンネル集水範囲

表-1 トンネル恒常湧水量の予測

	H24.2.19 (小雨時期)	H24.8.8～9 (多雨時期)
流域面積(周辺5流域)[km^2]	1.133	
沢水流量(周辺5流域)[L/分]	1071	1917
平均比流量[L/sec/ km^2]	15	28
トンネル集水面積[km^2]	0.839	
トンネル恒常湧水量[L/分]	755	1410

図-2の流域の下に示す%は各流域面積に占める集水範囲の割合(集水割合)

(3) トンネル掘削による沢水流量の減少量の予測

第一段階として各流域の掘削前の沢水流量を4段タンクモデルで再現した。第二段階として掘削後の流量減少分を、地下水流出分を担う3,4段タンクからの流出量のうち各流域面積に占める集水範囲の割合（以下、集水割合）分を差し引いたものと仮定した。その結果A流域では集水割合が98%を占めることから掘削前の流量 290L/分 が掘削後 10L/分 以下となり、B流域では57%を占めることから 200L/分 以下と想定された（図-3）。なお、C流域では集水範囲と重複しないため掘削後についても流量はほとんど変化せず、影響がないものと想定した。

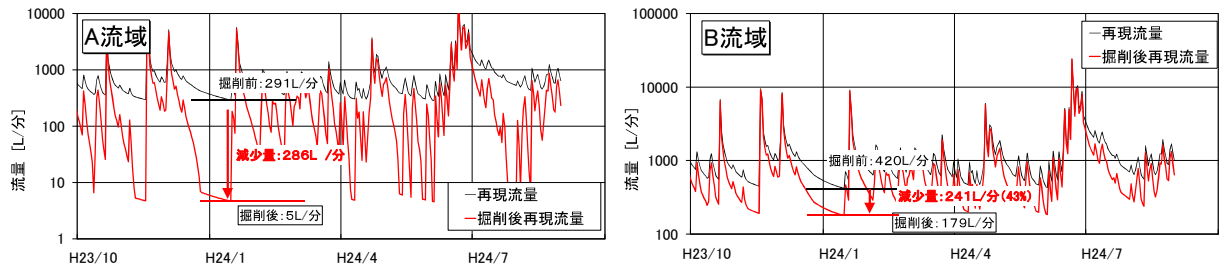


図-3 タンクモデルによる影響予測

4. 掘削後の湧水影響の実態

4.1 掘削に伴う流量変化

(1) トンネル集水範囲（比流量による比較）

掘削前後における流域毎の少雨時期の沢水流量について比較したものを表-2 に示す。この2 時期については降雨状況が異なるため掘削前後の流量にばらつく傾向が認められるものの、集水割合が流域の50%を超える流域の平均流量は、74%減少している（C 流域を除く流域の67%が集水範囲）。特に、集水割合が大きい流域は減少が顕著となっている。

(2) トンネル恒常湧水量

トンネル掘削は南側坑口と北側坑口からの掘削が2 工期に分割して実施され、南側坑口からの掘削が先行した。貫通後の恒常湧水量は、1,200~2,500L/分であり、多雨時期に増加する傾向が認められた。

(3) 沢水流量

トンネルルート約70%を占めるA 流域では、掘削前において基底流量が300L/分程度であったが、掘削に伴って減少し、南工区の掘削完了後、少雨時期に枯渇する状況となった。B, C 流域についても、少雨時期において掘削前よりやや少ない傾向となった。

4.2 掘削後の沢水流量減少量（タンクモデルによる評価）

当該地の年間降水量は1,500~3,600mm でありバラツキが大きいことから、トンネル掘削による沢水流量への影響を評価するにあたっては、掘削前後の流量の単純比較では

表-2 観測比流量による比較

流域	比流量(L/s/km ²)		減少率	集水* 割合
	掘削前 (H24.2)	掘削後 (H27.2)		
A	19	0	100%	98%
B	15	9	40%	57%
C	23	15	35%	0%
D	17	3	82%	55%
E	16	1	94%	91%
F	10	2	80%	57%
平均(C流域を除く)			74%	67%

*集水割合:各流域面積に占める高橋の手法による集水面積の割合

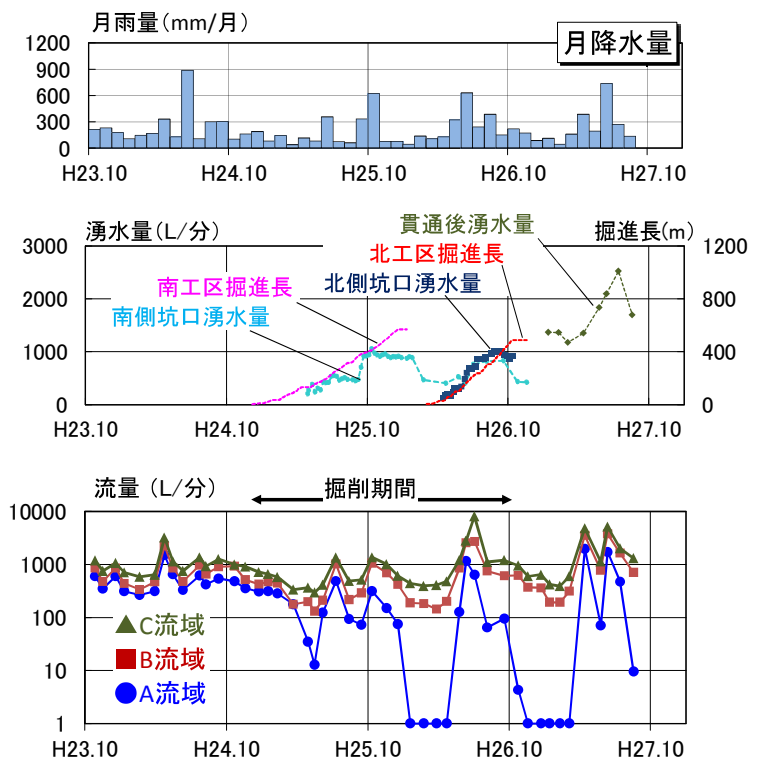


図-4 トンネル湧水量と沢水

適切な評価ができない場合がある。このため、B、C 流域については掘削後の流量をタンクモデルで再現し、少雨時期の実測流量と比較することにより定量的な減少量を検討した（図-5）。B 流域では、掘削後の再現流量、356L/分に対し掘削後 192L/分で、減少量（その差分）は 164L/分となり、少雨時期において 46%減少した。一方、C 流域では掘削後の再現流量と実測流量でその差がほとんど認められず、トンネル掘削による影響がないことがわかる。

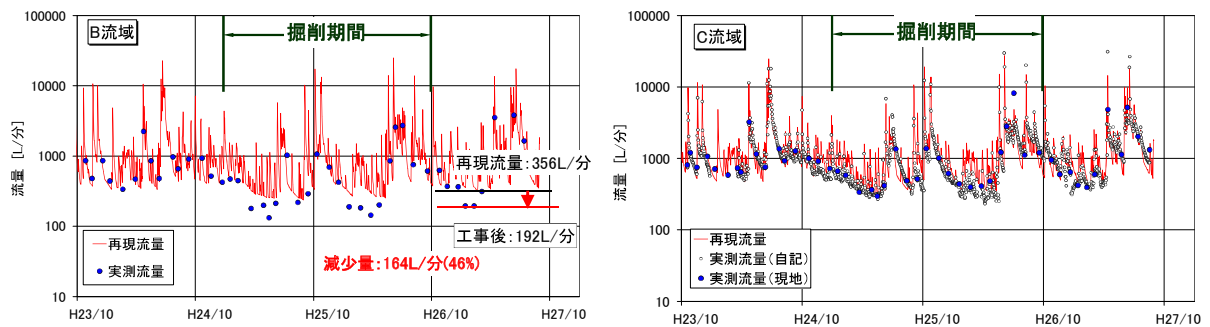


図-5 タンクモデルによる再現流量と実測流量の比較

5. 影響評価の総括および妥当性

トンネル掘削に伴う沢水流量の減少量の評価について、集水範囲に重複する全流域でみると実測値（74%）と集水割合（67%）は概ね近似している。流域単位でみると集水割合が 90%を超過する流域においては明瞭な減少が認められ、実測値による評価が比較的容易であった。一方、集水割合が 50%~60%となるとばらつく傾向があり、実測値による評価が困難となる流域があったが、タンクモデルによる再現流量と実測流量の比較を行うことによって影響量を見積もることが可能であった。

また、トンネル掘削後の恒常湧水量においては、予測値をはるかに上回る湧水量が認められた。この原因としては工事前後の降雨状況、地山深部での透水性の割れ目系（節理）や四万十層との地質境界による特異な集水状況等が考えられるが不明瞭である。

これまでの検討結果から、「高橋の手法」は、第三系の花崗岩（結晶質岩）地山を対象とした場合、予測値と実測値は概ね近似しており、実務の範囲内での評価手法として妥当性を確認した。一方で、恒常湧水量の差異については事前データの採取期間が少なかったことに起因すると考えられ、年間降水量が大きく変化する地域において評価を行う場合には、その地域の降水特性に応じて事前データの採取期間を計画する必要がある。また、本論での集水範囲設定は安全側を考慮したにもかかわらず予測値と実測値が概ね近似したことから、集水範囲や調査範囲は可能な範囲で最大限とすることが望まれる。

6. 謝辞

本論文の作成にあたり、ご指導いただいた合同会社水文 LLC 代表 栢木智明氏、寺本光伸氏に謝意を表します。

引用文献

- ・高知県（2015）：道交地防安(改築)第 101-011-28 号 県道足摺岬公園線防炎・安全交付金水文調査委託業務．高知県，（報告書）．
- ・太田陽子・小田切聡子（1994）：土佐湾南西岸の海成段丘と第四期後期の地殻変動．地学雑誌，Vol.103，No.3，pp.243-267．