

送水トンネルの崩落事例とその原因について

A Case Study on Collapse of a Water Tunnel and Its Causes

小笠原 洋 Hiroshi OGASAHARA (復建調査設計 (株))
 門田 哲治 Tetsuji MONDEN (広島県公営企業部)
 小川 龍海 Tatsumi OGAWA (広島県公営企業部)
 新見 健 Ken NIIMI (復建調査設計 (株))
 来山 尚義 Naoyoshi KITAYAMA (復建調査設計 (株))

本報告は、平成 18 年 8 月 25 日に発生した送水トンネル岩盤崩落事故の状況を取りまとめるとともに、その原因について推定したものである。トンネルの崩落場所（延長 10.6m 間）の上部には、カタクラサイト化した（亀裂の発達した）花崗岩及び閃緑岩が分布していた。本トンネルには、覆工背面に在来工法の施工に伴う空隙があり、地下水変動とともに岩盤劣化や空隙拡大が進み、突発性崩壊に至ったと推察される。このような突発性崩壊について、通常のトンネル点検で徴候を捉えることは困難であったと考えられ、今後は、送水トンネルの特殊性も考慮しつつ、計画的な点検実施と新技術の積極的な採用が必要である。

キーワード：送水トンネル，崩落，地質，原因，突発性 (IGC：G-5, H-5, K-14)

1. はじめに

広島県では、水道用水供給事業・工業用水道事業として、昭和 37 年から現在まで送水施設の整備が行われてきた。そのうち、昭和 40 年に完成した西谷接合井（安芸郡海田町）～矢野開閉所（広島市安芸区矢野町）間の送水用トンネル（延長約 2.95km）の一部において、平成 18 年 8 月 25 日に岩盤崩落による送水路閉塞が発生し、呉市・江田島市への送水が 18 日間に渡って停止した（図-1）。その結果、水道用水受水者 32,050 世帯 72,100 人、及び工業用水受水者 5 社に影響が及んだ。

本報告は、崩落状況及びその崩落メカニズムについて述べるとともに、今後のトンネル点検のあり方についても述べる。

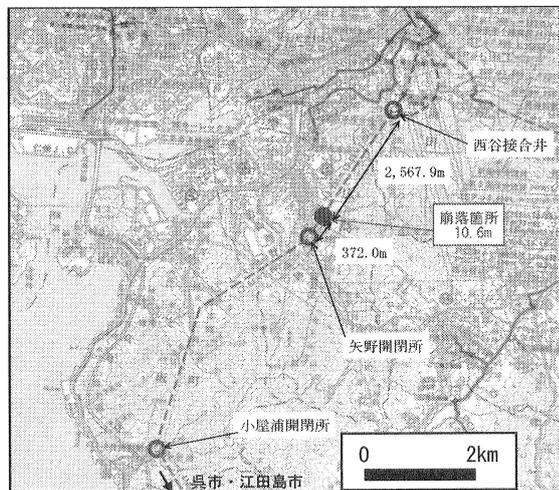


図-1 送水トンネルと崩落地点

2. 崩落の発生状況

平成 18 年 8 月 25 日（金）に、表-1 のようなトンネル内水位の変化により、異常が確認された。

このため、トンネル内の調査を行ったところ、図-2 に示す矢野開閉所から上流へ 372m 地点より延長 10.6m 区間でトンネル天端を突き破った岩盤崩落が確認された（写真-1）。また、岩盤崩落区間の上流側 17m、下流側 48m にわたってトンネル天端の覆工コンクリートに縦クラックが広がっていた。

表-1 崩壊発生当日の計測水位

時刻	12:00 (平常値)	12:26	12:27	12:45	13:04	13:25
西谷接合井 (上流側)	1.56m	—	—	1.90m	2.32m	3.13m
矢野開閉所 (下流側)	1.27m	1.20m	1.00m	0.60m	0.49m	0.50m

(トンネル底面からの水位)

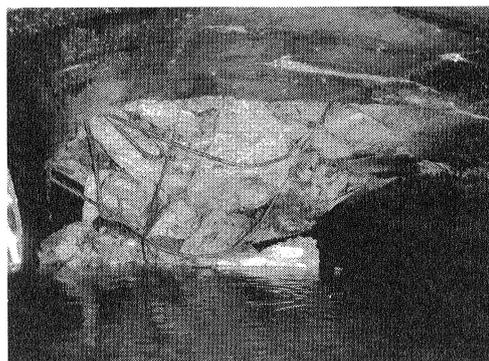


写真-1 崩落地点の状況（上流側より撮影）

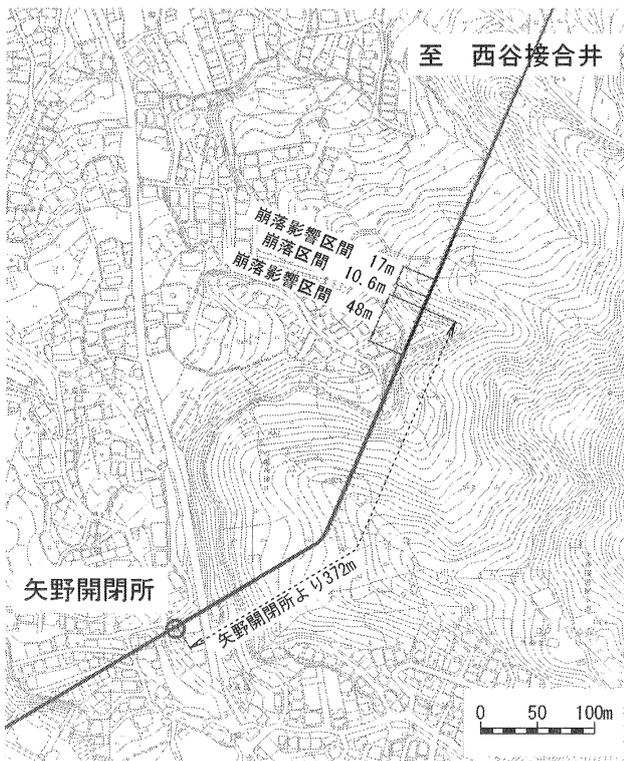


図-2 崩落地点の詳細状況

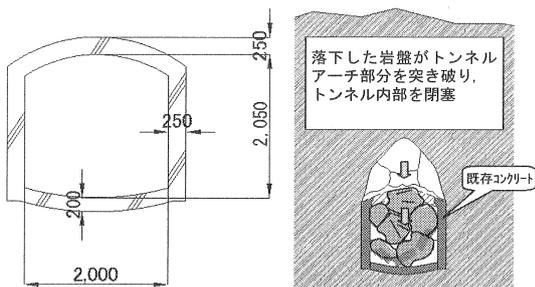


図-3 送水トンネルの標準断面及び崩落概況

なお、本トンネルは在来工法で施工されており、図-3に示すような形状であったが、崩落部はトンネルアーチ部分を岩盤が突き破っていた。

3. 復旧工事

3.1 復旧工法の選定

上述のような状況を受け、緊急復旧工事を行うこととしたが、基本方針は

- 1) 早期復旧が可能な工法であること
- 2) 安全性が確保される工法であること

とした。崩落の状況から、トンネル上部の岩盤が緩んでいることが想定されたため、復旧工法は二次災害防止に実績のある山岳トンネル工法が最適と判断した。

3.2 復旧工事結果

復旧工事は、以下の手順で進めた。

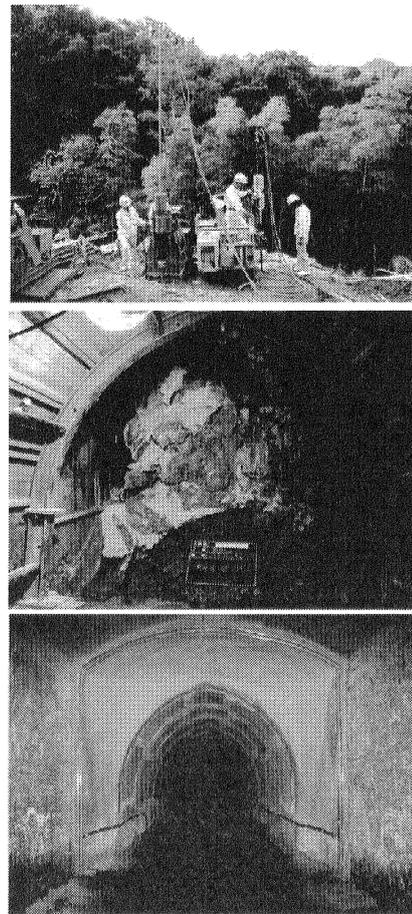


写真-2 復旧工事の状況

(上：薬液注入，中：覆工内の注入，下：ポリウレタ塗布後)

- 1) 覆工コンクリートクラック区間にH形支保工設置
- 2) 隔壁設置：崩落部の上下流端部リーク防止
- 3) 薬液注入：地上及びトンネル内部から崩落部に薬液注入 (写真-2 上・中)
- 4) 崩落部の掘削：H形支保工設置
- 5) 崩落復旧部へのモルタル吹き付け
- 6) 覆工背後の補強工：発砲ウレタン注入
- 7) 表面平滑工：ポリウレタ塗布 (写真-2 下)

復旧工事と並行し、原因究明を目的としたボーリング調査や未崩落地点の緊急点検もあわせて実施した。

これら一連の復旧工事により、平成18年9月11日5:50に通水再開となった。

4. 崩落地点の地質状況

4.1 崩落地点の概略地質

図-4 は地質図上に送水トンネルの位置を示したものであるが、トンネル付近の地質は主として花崗岩からなり、土被りの小さい谷部では崖錐堆積物などの土砂がその上部を覆っていることがわかる。このうち、崩落のあった矢野開閉所周辺地域は、呉から海田にかけて続く断層や地質不連続帯 (図中の矢印) の延長上に位置している。

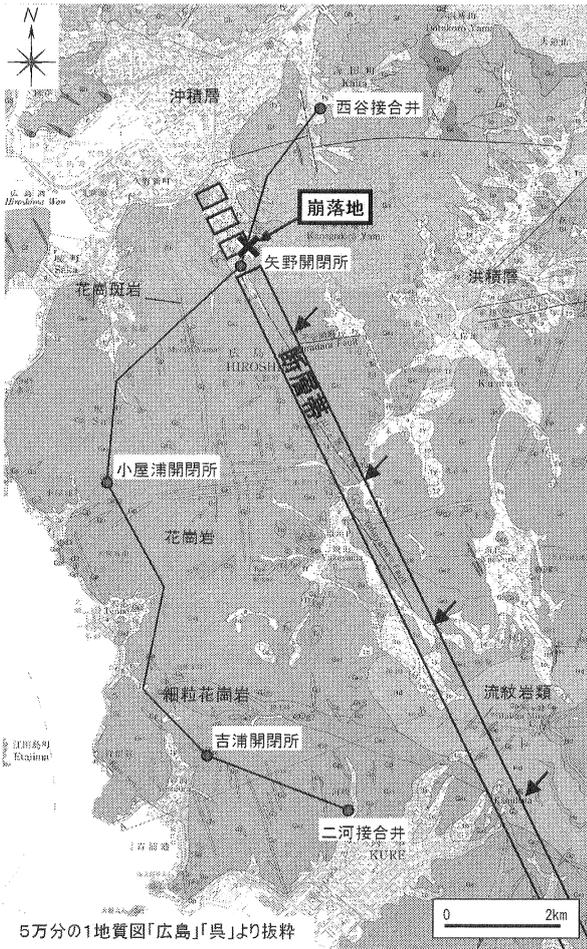


図-4 トンネル路線及び崩落地点の概略地質

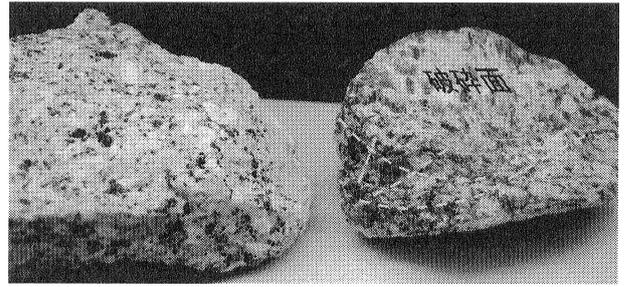


写真-3 通常の花崗岩 (左) と崩落地の花崗岩カタクラサイト (右)

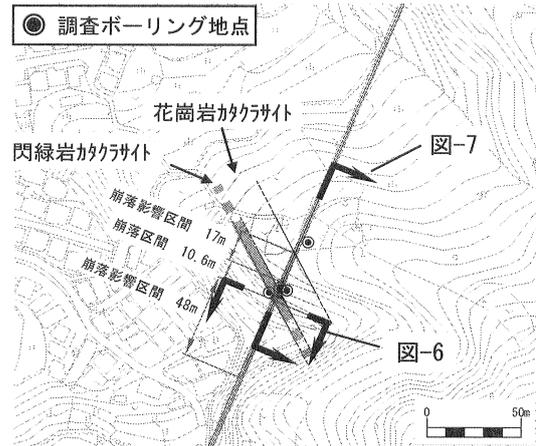


図-5 崩落地切羽から推測されるカタクラサイトの分布

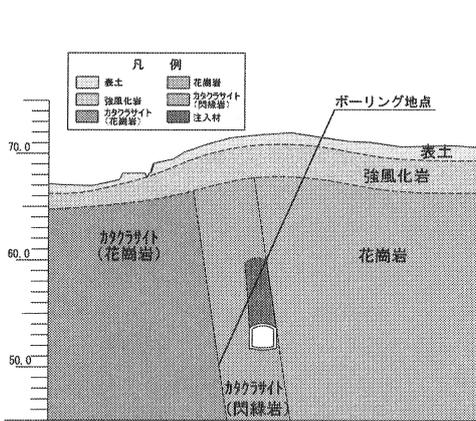


図-6 地質横断面図

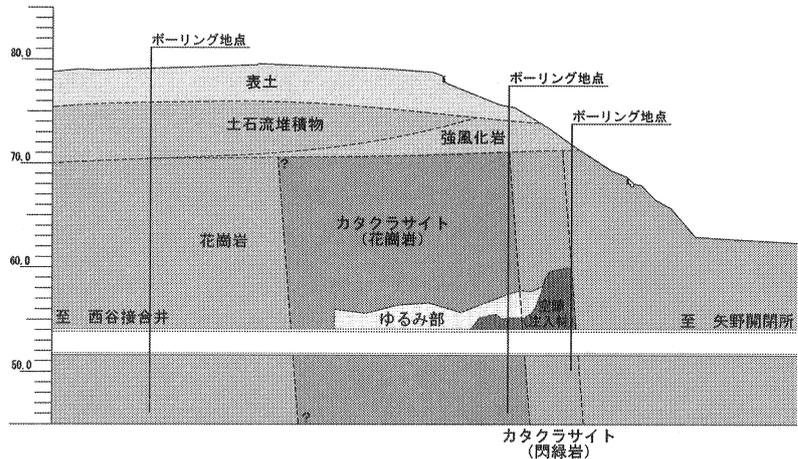


図-7 地質縦断面図

4.2 崩落地の地質状況

写真-3 は一般的な花崗岩と崩落地の花崗岩を比較したものである。一見すると大きな違いは見られないが、崩落地の花崗岩は潜在亀裂が発達する「花崗岩カタクラサイト」と呼ばれる特異な破碎構造を有していた。この岩石の成因は、過去に断層活動で破碎を被り、縦横方向に破碎面が形成された後、密着したことで、潜在的破碎面を多く持つようになったことによる。塊状のため、硬質に見えるが、

強く握ると潜在破碎面から簡単に割れる程度に外力に弱い。このように、崩落地にははく離による落下が発生しやすい岩盤が分布していた。また、崩落地切羽の状況、及びボーリング調査結果から、最も崩落の激しかった部分には閃緑岩のカタクラサイトが脈状に分布していることも明らかとなった。同時に、切羽に出現した閃緑岩と花崗岩の地質境界から、カタクラサイト帯は図-5のような向きと推定された。これは、図-4に示す「断層帯」の方向と概

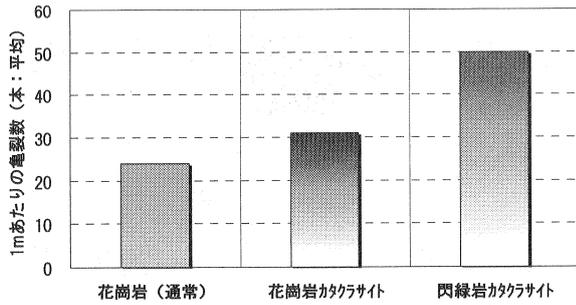


図-8 ボーリングコア 1mあたりにおける亀裂の数

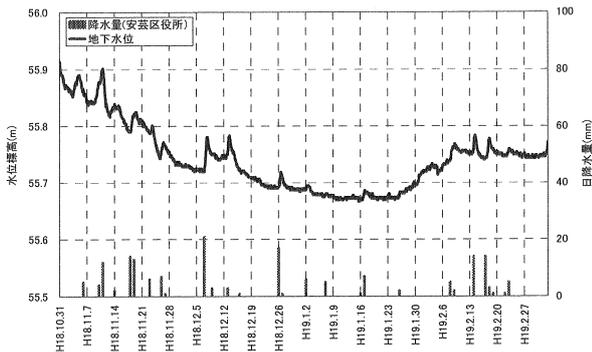


図-9 地下水位観測記録と降雨量

ね一致しており、大局的な地質構造に付随したものと推定される。図-6及び図-7は崩落地の推定地質断面である。

また、通常の花崗岩、花崗岩カタクラサイト、閃緑岩カタクラサイトについて、ボーリングコアの割れ目の発達度合いを「1mあたりの亀裂数」として計測したところ、カタクラサイトは亀裂が多く分布すること、特に閃緑岩カタクラサイトに亀裂が多いことが明らかになった(図-8)。

最も崩落の激しかった閃緑岩部における地下水位変動を図-9に示すが、水位は降雨に敏感に反応して上下を繰り返すことが確認された。水位変動量は数10cmのオーダーであるが、崩落後でもこの程度の変動を示すことから、ゆるみのない崩落前にもっと大きな変動を繰り返していたものと推察される。

4.3 地質状況のまとめ

崩落地点の地質状況をまとめると、以下の通りである。

- 1) 崩落地点は花崗岩と閃緑岩が分布し、いずれもカタクラサイト化している。
- 2) 最も大きく崩落した箇所は、脈状の閃緑岩であった。
- 3) 今回崩落しなかった箇所の花崗岩は、カタクラサイト化していない。
- 4) カタクラサイトは潜在のものを含めて亀裂が多い。特に閃緑岩は、本地域の周辺花崗岩に比べて倍以上の亀裂密度であった。

以上のように、亀裂の過多は地下水や空気との接触面となって岩盤劣化しやすいと考えられることから、本地点の閃緑岩は劣化し易かった可能性が高いと考えられる。

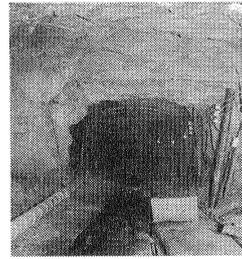


写真-4 無普請

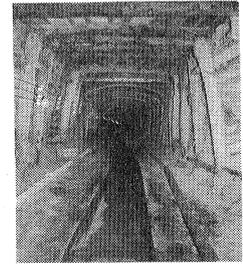


写真-5 木製支保工

5. 建設当時の状況及び現況

建設時のトンネル施工法、及びコンクリート覆工の状態について述べる。なお、施工記録は一部施工状況写真を除いて残存していなかったため、主に当時の施工担当者あるいは発注担当者へのヒアリング結果によりまとめたものである。

5.1 当時の一般的なトンネル施工法

本トンネルは昭和37年に着工し、昭和40年に完成している。トンネルの断面が小さいことから施工は人力主体で、以下のような施工手順であった。

1) 掘削・ズリ出し

掘削方式は発破掘削で、穿孔はレッグドリル(人力)を使用した。発破後の不足断面掘削はピックハンマー(人力)を使用した。ズリ運搬はトロッコを使用し、バッテリーカーにより牽引し、坑外へ搬出した。

2) 支保

地山状況に応じて無普請(素掘り、写真-4)、木製支保工(写真-5)、鋼製支保工等を用いて支保した。

3) 覆工

全線にわたって、生コンクリートをスコップで「ハネ込み」する工法が採用されており、アーチ部中央(天端部)も、鉄製型枠を奥側から順次トンネル延長方向に掛けながら、「ハネ込み」でコンクリートを積み上げていった。このような当時の施工方法から考えて、コンクリートと地山の間(特に天端部)に空隙が生じないように施工することは非常に困難であったと推定される。

5.2 推定される崩落地点の施工方法

崩落地には木製角材、コの字型固定金具がわずかに存在した。型枠を組み立てる際の型枠と地山との固定に使用されたものと思われる。また、天端部コンクリートに単鉄筋が配置されていたが側壁には無いことから、「用心鉄筋」として補強したと思われる。

したがって、大量の湧水や土砂崩壊等の掘削が困難な状況は無く、いわゆる掘りごろ(硬くなく、軟らかくなく、進行が出る)で、問題なく無普請で施工したものと推測さ

表-2 覆工コンクリート試験結果

位置	中性化深さ(mm)		圧縮強度 (N/mm ²)	密度 (g/cm ³)
	平均	最大		
西谷接合井	0.0	0.0	38.4	2.32
崩落地アーチ部	0.0	0.0	26.0	2.30
小屋浦開閉所	5.9	11.0	40.8	2.27
	4.3	5.5	28.8	2.40
吉浦開閉所	4.1	7.0	28.2	2.32
	5.8	8.5	23.1	2.28

れる。ただし、カタクラサイトが出現したことや、土被りが浅い等の理由で、覆工コンクリートに単鉄筋を天端部のみ用心鉄筋として入れたと推測される。

5.3 覆工コンクリートの状況

次に、覆工コンクリートの状況について述べる。崩落原因の可能性として「材質劣化」も考えられたため、崩落部並びにトンネル全線のなかから5箇所、合計6箇所の覆工コンクリートの中性化試験及び強度試験を行った。

試験結果は表-2のとおりで、試験結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) コンクリートの中性化深さは、最大でも11mmと小さく、崩落部では中性化ゼロであった。
 - 2) 圧縮強度は23~40 N/mm² (230~400kgf/cm²)を示し、どの地点のコンクリートも十分な強度を有していた。
 - 3) 密度についても、全地点はほぼ同等の値であった。
- 以上の試験結果から、崩落部覆工は健全なコンクリートであったと判断される。

6. 崩落の推定メカニズム

6.1 崩落の推定メカニズム

これまで、地質的観点、及び施工方法、材質の状態について述べてきたが、これらを総合して、今回の崩落原因及び発生メカニズムを以下の通りに推定した。

- 1) 崩落部及びその周辺の地質構成からみて、亀裂が多く剥離しやすいカタクラサイト化した花崗岩と閃緑岩、特に脈状の閃緑岩の存在が崩落の素因と考えられる。
- 2) 本トンネルは、人力を主体とした山岳トンネル在来工法（支保に木製あるいは鋼製材を用いて地山を支えながら掘削する工法）で建設されており、天端部の覆工背面には多少なりとも建設直後から空隙があったと推察される。
- 3) これら二つの素因に加えて、降雨に反応する地下水位の上下動などが亀裂の多いカタクラサイト化した岩石の劣化を早め、覆工背面の空隙を拡大させたと考えられる。
- 4) ただし、崩落部の覆工コンクリートには中性化がなく強度も十分で、新鮮な破断面のみが見られることから、材

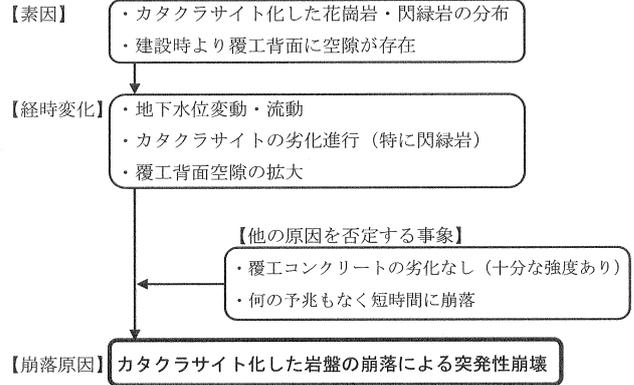


図-10 推定される崩落原因

質の劣化はなかったと判断される。

- 5) 脈状に分布する閃緑岩カタクラサイト部分が大きく崩落していることなどから、まず亀裂に沿って閃緑岩の一部が崩壊し、ついで花崗岩カタクラサイトにも波及する一連の突発性崩壊が生じ、最終的にトンネル天端の全面崩落に発展したと考えられる（図-10）。

6.2 今回の崩落の予測可能性

今回の崩落事故の原因と推定される突発性崩壊は、他の変状原因とは異なり、覆工コンクリートに異常がない状態でも突発的に生じる。このため、一般的なトンネル点検として実施される目視点検や打音調査では、その徴候を確認することは困難であったと推察され、今後のトンネル点検方法のあり方に工夫が必要と考えられる。

7. 今後のトンネル点検のあり方

7.1 他のトンネルでの事例

ここでは、他の道路トンネルで生じた突発性崩壊を原因とする崩落事例をまとめ、本送水トンネルの事例との比較を行う。

猪熊¹⁾は千葉県で生じた崩落事例について示している。また国田・竹俣・役田²⁾は石川県での事例を示しているが、前者の原因は予兆なしの突発性崩壊、後者は地震に伴う突発性崩壊であった。

報告されている状況を比較すると、表-3のとおりとなる。ここで注目されるのは、土被り厚さが比較的似通った数値であることで、このあたりが突発性崩壊の条件である可能性がある。

突発性崩壊は、予兆がないまま突如発生するため、通常のトンネル点検での予測可能性は低いことは先に述べたが、今回の事例や既往事例を踏まえれば、突発性崩壊を起こす要因について、表-4に示すような推定が出来る。

ただし、ここに示したものは現在ある数少ない知見をまとめたに過ぎず、他に突発性崩壊を引き起こす条件が残っている可能性はある。

表-3 突発性崩壊を原因とする崩落事例の比較

	小山野トンネル ¹⁾	木の浦トンネル ²⁾	本送水トンネル
土被り厚さ	約23m	最大26m	17~23m
地質	シルト岩砂岩互層	新第三紀凝灰岩泥岩互層	カタクラサイト
原因	不明	地震	岩盤劣化

表-4 突発性崩壊の要因

突発性崩壊の要因	突発性崩壊の可能性が高い
カタクラサイト断層	カタクラサイト、断層が存在する可能性がある(延長線上にある場合も含む) 場合
崩落しやすい地質・地層	崩落しやすい地質・地層が存在する可能性がある(延長線上にある場合も含む) 場合
土被りが小さい	土被りが30m程度以下である場合
地下水流の存在	地形勾配変換点(山部から平野部など)のように、地形的に地下水が大きく流動している可能性がある場合

7.2 これからの点検方針検討

今回の事例をこれからの点検に生かすためには、突発性崩壊とそれ以外の原因によるトンネル変状を包含する点検方針が必要となる。また、送水トンネルにより送水された水は、水道水用の原水や工業用水として利用されており、点検に伴う断水は受水者に多大な影響を及ぼす一方、不断水での点検技術は確立されていないため、日常点検が可能な、道路トンネルや鉄道トンネルと同列には扱えない特殊性を有している。

この点を踏まえ、表-5 に突発性崩壊とそれ以外を原因とする変状についての点検方針をまとめた。このうち、突発性崩壊は岩盤劣化や地震により発生するが、本事例のように徐々に岩盤劣化が進行する場合は、その進行状況を点検で確認することが非常に困難である。このため、まず、既存資料や地上部からのボーリングなどによって突発性崩壊を発生させる要因を有する区間を絞り込み、その後、トンネル内でレーダー探査や覆工背面空洞観察などを行って空洞の大きさや岩盤劣化の進行状況を確認することとしている。

併せて、今後の点検には、送水トンネルの特殊性を十分考慮した上での計画的な実施と、新技術の積極的な採用が必要である。

8. まとめ

今回生じた送水トンネルの崩落について、地質状況・建設当時の状況などから崩落の原因を推定し、その結果を踏まえ、今後のトンネル点検のあり方について整理した。

- 1) トンネル崩落部は土被り17~23mで、亀裂の多いカタクラサイト化した花崗岩及び閃緑岩が分布していた。また、地下水が変動する地山であったと推定される。

表-5 突発性崩壊とそれ以外の原因における点検方針の比較

区分	突発性崩壊	突発性崩壊以外
変状が生じる原因	・ 岩盤劣化	・ 突発性崩壊以外の外力(緩み土圧、偏土圧、地すべり、膨張性土圧、支持力不足など) ・ 材質劣化
主な点検項目	・ 崩落しやすい地質・地層やカタクラサイト・断層の有無 ・ 覆工背面の空洞の大きさ ・ 土被り厚	・ クラックの幅・長さ ・ コンクリートの劣化状況 ・ 覆工の変形の有無
変状の特徴	覆工に変状が見られず、短時間で破壊に至る。	覆工に変状が生じ、時間とともに進行して、破壊に至る。
点検時の課題	目視点検や打音調査での徴候確認は困難	目視点検や打音調査で変状確認できるが送水停止が必要
点検の方針	1) 既存資料をもとに突発性崩壊可能性区間の絞り込み 2) 地上部での調査(ボーリング等)・ついでトンネル内での調査(レーダー探査や覆工背面空洞観察など)を順次行い、突発性崩壊の可能性を判定	国道トンネルの基準などを参考に、送水トンネルの特殊性を考慮した点検方法及び実施基準を策定

(地震による変状については、地震後に臨時点検を行って確認する)

- 2) 本トンネルは在来工法で施工されており、覆工背面には建設直後から空隙があったと推定される。
- 3) 以上の条件下で地山劣化と空隙拡大が進行し、岩盤の突発性崩壊が発生した。そしてコンクリート覆工も突き破って全面崩壊に至ったものと推察される。なお、このような崩壊は打音調査や目視点検のような通常点検項目で予測することは難しい。
- 4) 今後は、同様の崩壊を防ぐため、通常点検に加えて突発性崩壊についての点検も行うこととした。なお、点検にあたっては、送水トンネルの特殊性を考慮した点検計画を立案するとともに、新技術の積極的な活用も必要である。

謝辞

送水トンネルの崩落原因を究明、今後のトンネル点検のあり方を検討するにあたり、山口大学の中川浩二名誉教授、広島大学大学院工学研究科の土田孝教授、広島工業大学大学院環境学研究科の今岡務教授、広島大学大学院工学研究科の河合研至准教授には、多大なるご助力をいただきました。また、(株)熊谷組には復旧工事に関する資料を提供いただきました。ここに記して、深く感謝の意を表す次第であります。

参考文献

- 1) 猪熊明：道路トンネルの緊急点検と今後の維持管理，トンネルと地下，Vol. 21, No. 10, pp. 791-796, 1990.
- 2) 国田雅人，竹俣隆一，役田徹：能登半島沖地震による被災トンネルを復旧，トンネルと地下，Vol. 24, No. 11, pp. 847-853, 1993.

(2007年6月29日 受付)