

# 送水トンネル崩落事故と今後の点検のあり方について

A water supply tunnel collapse and its maintenance check in future

藤元利夫\*, 今井田敏宏\*\*, 吉浪康行\*\*\*, 来山尚義\*\*\*\*  
Toshio Fujimoto, Toshihiro Imaida, Yasuyuki Yoshinami, Naoyoshi Kitayama

\*広島県公営企業部 (〒730-8511 広島市中区基町 10-52)  
\*\*復建調査設計株式会社, 水工技術部 (〒732-0052 広島市東区光町 2-10-11)  
\*\*\* 工博 復建調査設計株式会社, 水工技術部 (〒732-0052 広島市東区光町 2-10-11)  
\*\*\*\* 工博 復建調査設計株式会社, 技術研究所 (〒732-0052 広島市東区光町 2-10-11)

A water-supply tunnel of 300,000 tons a day of Hiroshima Prefecture collapsed on August 25, 2006. An investigation committee was formed and reported that there was a high possibility of the cause of the tunnel collapse being a sudden collapse of weathered granite on the back of the tunnel lining. Reported in this paper are the results of various investigations for the cause of the tunnel collapse and how to maintain tunnels in future.

Key Words: water supply tunnel, tunnel collapse, maintenance

キーワード: 送水トンネル, トンネル崩壊, 維持管理

## 1. はじめに

広島県では水道用水・工業用水供給事業の一環として、県内に広く送水施設の整備が行われてきた。それらのうち、昭和37年に着工、昭和40年に完成した安芸郡海田町～広島市安芸区矢野町の西谷接合井～矢野開閉所間の送水トンネル(図-1:送水量30万トン,延長約2.95km)の一部で、平成18年8月25日、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停止状態となった。

広島県は事故対策本部を設置し、事故状況の把握と早期復旧、送水停止となった送水トンネルの緊急点検、受水団体への給水の確保、を最優先課題の3本柱として緊急時対応を実施した。その結果、関係諸機関の昼夜を問わない協力により、送水停止から17日後の9月11日早朝、送水が再開された。その後、有識者による「広島県送水施設事故調査委員会」が設置され、トンネル崩落事故の原因とメカニズムを解明するとともに、今後の送水トンネル点検のあり方について審議がなされた。その中で、今回のトンネル崩落事故原因は、トンネルの覆工背面岩盤の突発性崩壊の可能性が高い。これまでの一般的なトンネル点検方法では、この突発性崩壊を予見することが困難であった。今後のトンネル点検は、覆工内面の点検調査にとどまらず、地盤状況に応じた覆工背面地山の調査が重要である、と報告された。本論文では、トンネル崩落・送水停止に伴う緊急時の対応の概要を述べるとともに、「事故調査委員会」で討議された



図 - 1 広島水道用水供給事業 概要図

崩落原因の推定と今後の維持管理・点検のあり方について報告する。

## 2. 崩落事故の発生状況

平成18年8月25日(金)12:26、常時監視しているトンネル内の水位(表-1)が急激に変化し、送水トンネルに

異常が発生したため、直ちに送水を停止した。

表-1 崩壊発生当日の計測水位<sup>1)</sup>

時刻 場所	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)

同日深夜、トンネル内の水位の低下を待って点検員が入坑し目視点検したところ、西谷接合井から下流へ2,568m地点、矢野開閉所から上流へ372m地点の間で、トンネル頂版を突き破る形で岩盤が崩落していた(写真-1)崩落区間の延長は、事故発生当初の段階では45mと推測された。(実際の崩落延長は10.6m)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。本トンネルは在来工法で施工されているが、その断面形状と崩落部の概要を図-2に示す。



写真-1 崩落地点の状況<sup>1)</sup>(上流側より撮影)

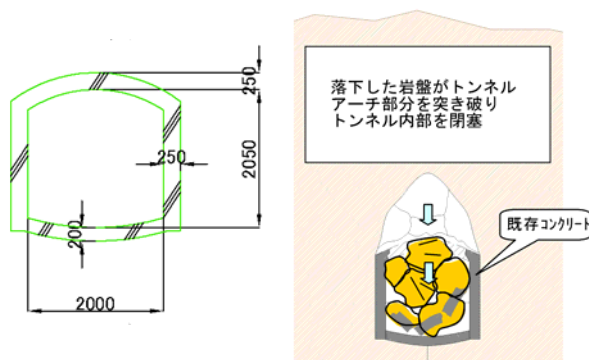


図-2 送水トンネルの標準断面および崩落状況

### 3. 送水停止による影響と対応

#### 3.1 送水停止による影響

事故発生 平成18年8月25日(金) 12:26  
 送水再開 平成18年9月11日(月) 05:50  
 送水量 275千m<sup>3</sup>/日(平成17年度日平均使用水量)

水道用水等 119千m<sup>3</sup>/日  
 (呉市, 江田島市, 大崎上島町)  
 工業用水 156千m<sup>3</sup>/日 (4社)

表-2 送水停止による影響<sup>2)</sup>(最大時)

用水種別	受水団体	影響世帯数	断水期間
水道用水	呉市	20,100世帯 (48,200人)	8/26~9/2
	江田島市	11,950世帯 (23,900人)	8/26~9/5
工業用水	各企業	4社(県工水 受水企業)	8/26~9/11

#### 3.2 送水停止への対応

送水停止にともなう緊急時対応として、表-3の措置がとられた。

表-3 送水停止にともなう緊急時対応<sup>2)</sup>

日時	対応
8/25 12:26	送水トンネル崩落事故発生
13:00頃	職員が現地で水位の異常を確認
14:00頃	受水団体に受水停止を依頼 呉市, 江田島市, 企業
16:00	県庁に対策本部を設置 崩落部上流側のトンネル内の排水を開始
16:30	記者発表(事故発生の第一報)
19:50	竹原市側から呉市方向に、緊急時送水ルートによる逆送を開始
21:30	上流側の西谷接合井からトンネル内の調査を開始
8/26 01:00頃	西谷接合井から約2.5km下流の地点で岩盤崩落によるトンネル閉塞を確認
04:55	下流側の矢野開閉所からトンネル内の調査を開始
05:28	矢野開閉所から約370m上流の地点で岩盤崩落によるトンネル閉塞を確認
07:00	トンネル復旧工法の決定
10:30	記者発表(事故の概要, 復旧工事の概要, 復旧まで概ね3週間程度必要)
17:00	トンネル復旧工事開始
8/27 午前	災害派遣要請(8/26)に基づき、自衛隊による給水支援開始(給水車22両, 給水船2隻) トンネル緊急調査を開始(矢野開閉所~呉二河接合井間の送水トンネル12.7km区間)
8/29 午前	広島県公営企業部のチャーター船により、江田島市への給水を開始

9/11 05:00	送水トンネル復旧工事完了
05:50	西谷接合井のゲートを開き送水を再開

#### 4. 崩落部分の復旧工事

##### 4.1 復旧工法の選定

緊急復旧工事のため、下記項目を主眼に工法を選定し、山岳トンネル工法を採用した。

- 1) 3週間以内の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

崩落箇所におけるトンネル掘削となる状況から、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。

##### 4.2 復旧工事の手順と概要

復旧工事は、以下の手順で進めた。

- 1) 崩落区間の上下流部の覆工コンクリートのクラック発生区間にH形支保工を設置
- 2) 薬液注入：地上およびトンネル内部から崩落部に薬液を注入し固化処理を実施
- 3) 崩落部の掘削：薬液注入により固化処理した崩落部分を掘削しH形鋼＋横矢板支保工を設置(写真-2)
- 4) 崩落復旧部内面へのモルタル吹き付け
- 5) 覆工背後の補強工：発砲ウレタン注入
- 6) 表面平滑工：トンネル内面のモルタル吹き付け部へのポリウレタ塗布(写真-2)



写真-2 復旧工事の状況

(上：崩落部支保状況，下：ポリウレタ塗布部)

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。

#### 5. 崩落事故の原因

##### 5.1 地質的要因

###### (1) 地質概要

図-3は地質図上に送水トンネルの位置を示したものである。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。崩落事故が発生した矢野開閉所周辺地域は、呉から海田にかけて続く焼山断層(図中の矢印)の延長上に位置しており、地質的不連続地帯である。

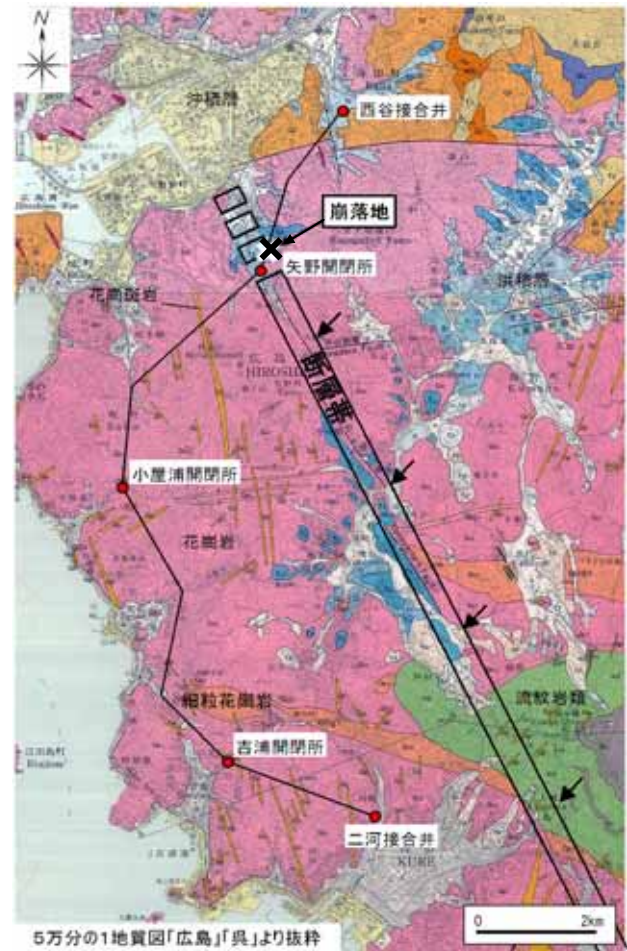


図-3 トンネル路線および崩落地点の概略地質<sup>1)</sup>

###### (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、力をかけると潜在破碎面から簡単に割れる程度に外力に弱い特徴を持つ。

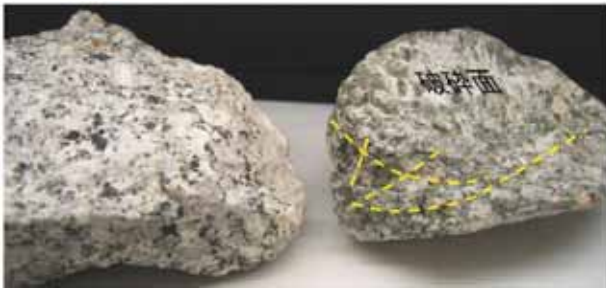


写真-3 通常の花崗岩（左）と崩落地の花崗岩カタクラサイト（右）

復旧工事で確認した崩落地切羽の状況および4本のボーリング調査結果等から、崩落の最も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が明らかとなった。

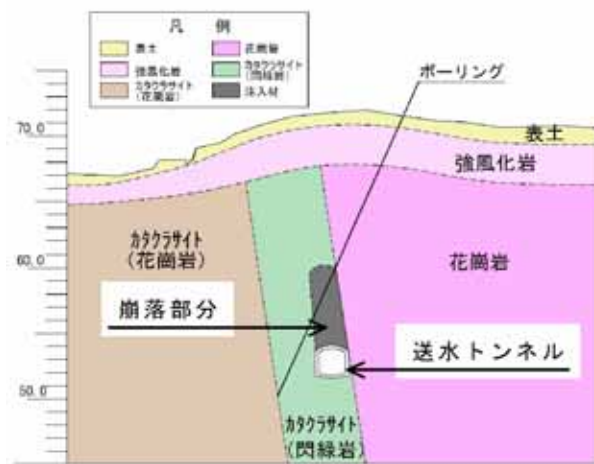


図-4 地質横断面図

### (3) 崩落地の地下水位の状況

崩落地の閃緑岩部の地下水位の変動を、ボーリング調査孔を利用して計測した。その結果、地下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。崩落後の水位変動量が数10cmのオーダーのため、ゆるみのない崩落前は、より大きな変動を繰り返していたものと推察される。

### (4) 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) 崩落地点は焼山断層の延長線上に位置し、カタクラサイト化した(亀裂が多い)花崗岩と閃緑岩が分布している。
- 2) トンネル内の崩落土砂より、脈状の閃緑岩が確認された。
- 3) 崩落地点の地下水位は、降雨に敏感に反応して上下を繰り返していた。

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を生じ易いと考えられるので、本地点のカタクラサイト化した岩盤は劣化し易い環境にあったと推定できる。

## 5.2 水路トンネルの施工法と覆工コンクリートの状況

### (1) 水路トンネルの施工法

本トンネルは昭和37年に工事着手し、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、掘削・ズリ出し・支保・覆工の施工は人力主体の工事であった。

覆工コンクリートの打設は、型枠建込後、スコップによるハネ込み打設となっており、トンネル頂版部において地山との空隙を完全に充填することは困難であったと推測される。頂版コンクリートには、用心鉄筋程度の単鉄筋が配置されていたことが確認されているが、大きな外圧強度に耐えるための配筋ではなく、ライニングの補強を目的としたものと推定される。

### (2) 覆工コンクリートの状況

崩落原因の可能性として「覆工コンクリートの材質劣化」も考えられたため、崩落部なら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コアを採取し強度試験及び中性化試験を行った。

試験結果は表-4のとおりで、まとめると下記となる。

- 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  $23 \sim 40 \text{ N/mm}^2$  ( $230 \sim 400 \text{ kg/cm}^2$ ) 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。

表-4 覆工コンクリート試験結果<sup>1)</sup>

位置	中性化深さ(mm)		圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	密度 g/cm <sup>3</sup>
	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	5.9	11.0	40.8	2.27
	4.3	5.5	28.8	2.40
吉浦	4.1	7.0	28.2	2.32
	5.8	8.5	23.1	2.28

## 5.3 崩落原因の推定

前述の内容を総合して、今回の崩落事故の原因及び発生メカニズムを推定した。

- (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)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、亀裂に沿って閃緑岩の一部が崩落し、最終的にトンネル天端の全面崩落（突発性崩壊）に発展したと推測される。

#### 5.4 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、他のトンネル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。

### 6. 今後の水路トンネル点検のあり方

#### 6.1 トンネル点検の基本的な考え方

送水トンネルにおいて、崩落や覆工面の変状によって送水機能が低下もしくは停止すると、水の利用者に多大な影響を及ぼすことになる。このため、長期間にわたって送水トンネルの機能を維持していくためには、計画的に点検などを行い、安全かつ合理的に運営していくことが必要である。

#### 6.2 突発性崩壊の発生要因（トンネル事故の事例から）

ここでは、他の道路トンネルで生じた突発性崩壊事例をまとめ、本送水トンネルの事例との比較を行なうことで突発性崩壊が発生しうる要因について検証を行なう。猪熊<sup>3)</sup>は千葉県で生じた崩壊事例について示している。また国田・竹俣・役田<sup>4)</sup>は石川県での事例を示しているが、前者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-5のとおりとなる。特記事項として、土被り厚さが比較的似通っており、突発性崩壊の必要条件である可能性を指摘することができる。

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-6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これら以外に残っている可能性はある。

表-5 突発性崩壊事例の比較

	小山野 トンネル <sup>3)</sup>	木の浦 トンネル <sup>4)</sup>	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-6 突発性崩壊の要因<sup>1)</sup>

点検箇所	突発性崩壊の要因	突発性崩壊の可能性が高い
覆工 背面 地山	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（山地部から平野部など）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

#### 6.3 今後の水路トンネルの点検の概要

今回の事例をこれからの点検に生かす上では、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。

トンネル点検における基本的なフローチャートを図-5に示す。

#### 6.5 点検の周期

点検の周期は、2～6年間隔で定期点検を実施している事例が多く、概ね5年周期で一次点検-2を実施するものとした。他方、突発性崩壊可能性区間に於いては概ね10年周期の点検が妥当とした。

臨時点検は、トンネルに影響を及ぼすような地震など、外的要因や環境変化があった場合に実施する。

### 7. まとめ

本報告は、平成18年8月25日に生じた送水トンネル岩盤崩落事故の発生状況と緊急時対応について概要を報告するとともに、トンネル崩落原因とメカニズムを推定し、今後の水路トンネル点検のあり方について考察を行ったものである。

- 1) トンネル崩落部は、断層の延長線上に位置しており、カタクラサイト化した花崗岩及び閃緑岩が分布する地盤であった。
- 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察される。
- 3) 1)及び2)に加えて、地下水が変動することにより地山の劣化が進行し、突発性崩壊が生じた。
- 4) 突発性崩壊は通常の見視点検や打音調査でその徴候を確認することは困難であったと考えられる。

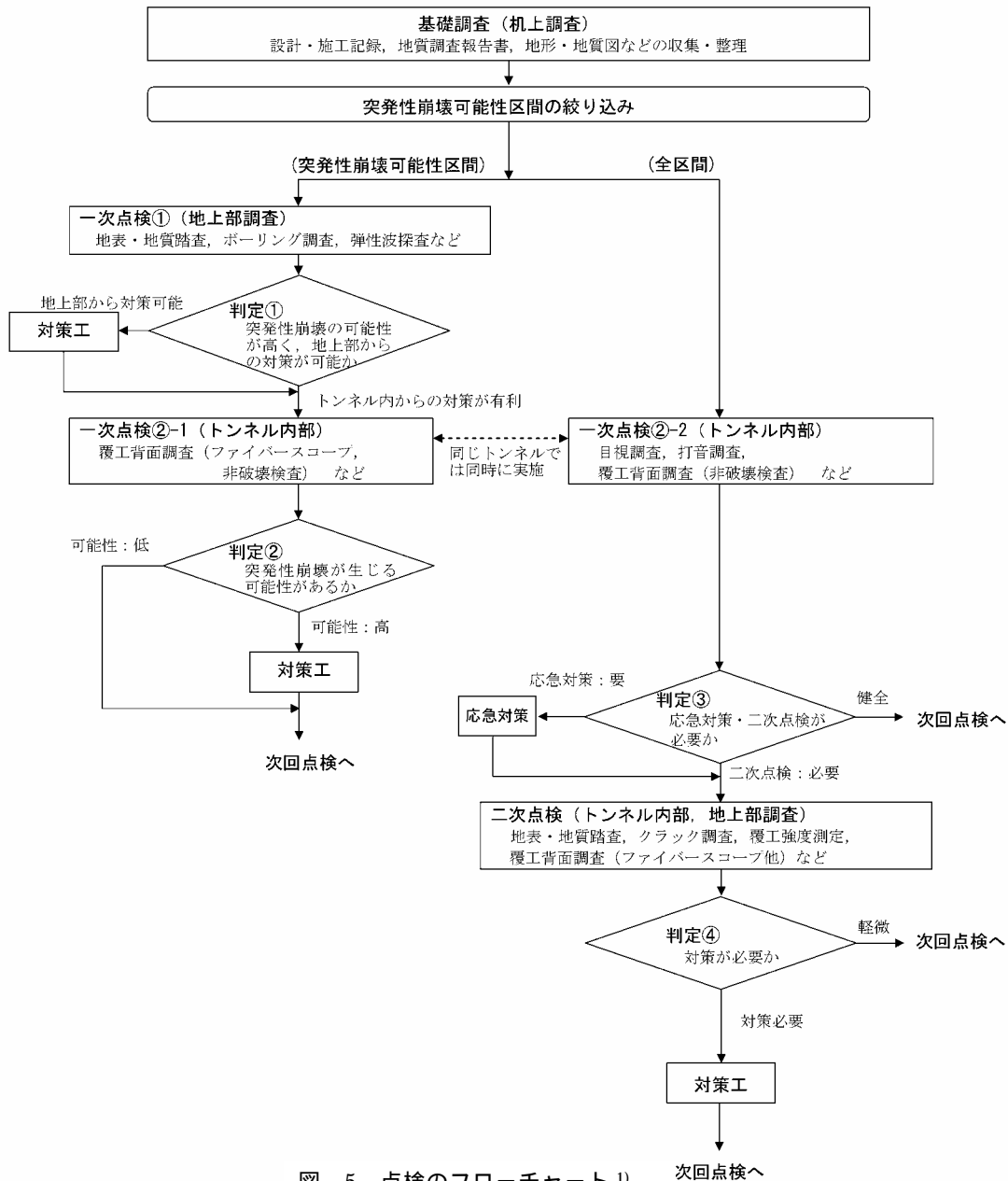


図 - 5 点検のフローチャート 1)

5) 今後は、計画的な点検の実施，ならびに点検方法に関して新技術の積極的な採用が重要である。

トンネルによる輸送水は様々の利用者に供給されており，点検に伴う断水は受益者に多大な影響を及ぼす．一方で，通水した状態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．

したがって，今後はこうした送水トンネルの特殊性および送水トンネルが位置している地域の地盤状況等を十分吟味した上で，新技術を活用した計画的・定期的な点検が必要であると思われる．

#### 参考文献

- 1) 広島県送水施設事故調査委員会：報告書，平成 19 年 3 月
- 2) 広島県公営企業部：送水トンネル崩落事故について，水道協会雑誌，平成 19 年 7 月，pp.36-43
- 3) 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．
- 4) 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 8 月 17 日受付)