

供用中の送水用トンネル崩落に伴う緊急復旧工事

吉良義宣* 多田正樹* 森 康雄** 畔高伸一*** 片山政弘****

平成 18 年 8 月に広島県で供用中の送水用トンネルの一部が崩落し、大規模な断水が発生した。この予期せぬ緊急事態に送水用トンネルの崩落部分を当初目標より早期に復旧することができた。崩落部の状況・崩落原因、崩落部の復旧工事、およびその間に実施した緊急調査によって対策が必要となった補強工事について報告する。

キーワード：送水トンネル、緊急復旧、崩落、点検、補強

1. はじめに

広島県東部工業用水道事業により昭和 40 年に、広島～呉に敷設された工業用水路のうち、安芸郡海田町～広島市安芸区矢野に渡る西谷接合井～矢野開閉所間の送水用トンネル（延長約 2.95km）の一部が、平成 18 年 8 月崩落した。この崩落により、送水用トンネルが閉塞したため、呉市・江田島市へ送水ができない状態となり、最大約 3 万 2 千世帯の上水道および最大 5 社の工業用水に影響が及んだ。

緊急点検の結果、西谷接合井から下流に 2,568m、矢野開閉所から上流に 372m の間の 10.6m（当初崩落区間は約 40m 程度と想定していたが、その後の詳細調査により最終確定）において、トンネル上部の岩盤が崩落し、送水路が閉塞していることが明らかになった。Fig.1 に送水トンネルおよび崩落箇所の位置図を示す。

復旧工事は、緊急性を要しているため、上流および下流の両方から施工することを基本とした。さらに、崩落部の土被りは、約 18～25m 程度であり、地表部は主に畑として利用されていたため、地上からも対策を施工するものとした。なお、地表上のトンネルの影響範囲内には、民家等もなく、崩落の影響も及んでいなかった。

また、崩落に伴い、その前後の区間の覆工コンクリート一部にひび割れが発生していたため、まずその前後の崩落影響区間を補強し、崩落部の復旧を行った。

さらに、復旧までの間を利用して実施された西谷接合井～呉市二河接合井（約 15.6 km）の緊急点検結果に基づき、同様な崩落が懸念される区間の覆工背面空洞充填工事を実施した。

以下、工事概要、崩落の状況・崩落原因、崩落部復旧工事および緊急点検結果に基づく補強工事について報告する。

*	広島支店	土木事業部土木部
**	土木事業本部	環境・リニューアール技術部
***	土木事業本部	トンネル技術部
****	土木事業本部	土木設計部



Fig.1 送水トンネルおよび崩落箇所位置図

2. 工事概要

工事名 太田川東部工業用水道事業他 2 事業
西谷接合井～矢野開閉所送水隧道緊急復旧工事
発注者 広島県広島水道事務所
工事場所 広島県安芸郡海田町三迫～広島市安芸区矢野
工期 平成 18 年 8 月 25 日～12 月 28 日
(通水再開は崩落発生 17 日後の 9 月 11 日)
施工者 (株)熊谷組
トンネル諸元 幅 2.0m, 高さ 2.05m, 断面積 3.8m²

Table 1 主な工事内容

工種	数量	備考
崩落部掘削工	10.6 m	H-100 (鋼製支保工) 注入式フォアポーリング
クラック区間補強工	48 m	H-100 (鋼製支保工)
崩落影響区間補強工	17 m	H-100 (鋼製支保工)
薬液注入工	137 m ³	セメント系
モルタル吹付け工	77.6 m	T=10cm
支保工背面補強工	75.6 m	発泡ウレタン
吹付け表面円滑工	77.6 m	T=3mm
隔壁工	2 箇所	
仮設ポーリング	5 本	
覆工背面補強工	156 m ³	復旧工事および補強工事

3. 崩落状況および崩落原因

3.1 崩落状況

復旧工事前の崩落状況を Photo. 1 に、復旧工事中の崩落部切羽状況を Photo. 2 に、崩落状況の模式図を Fig. 2 に示す。トンネル天端の覆工コンクリートが、鉛直方向の力によりV字状に破壊され、覆工コンクリートおよび上部の岩盤（土砂状）が、トンネルを閉塞していた（掘削時の観察から、側壁コンクリートやインバートは破壊していなかった）。

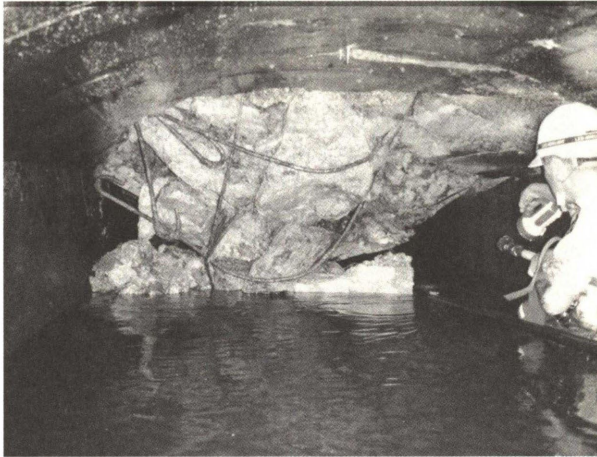


Photo. 1 崩落状況（上流側より）

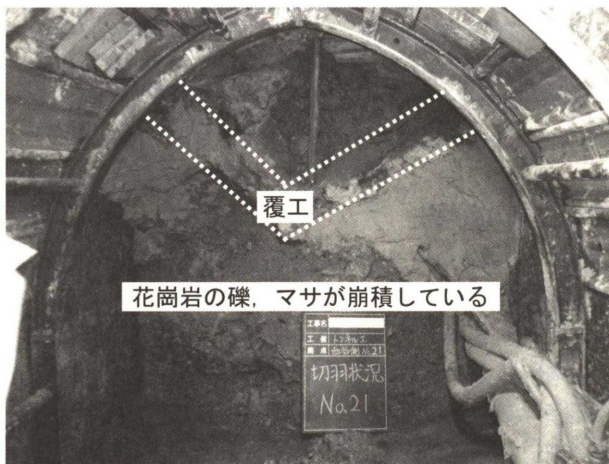


Photo. 2 掘削時に確認された崩落状況



Fig. 2 崩落状況模式図

3.2 地形・地質概要

送水トンネル付近の地質は、Fig. 3 に示すように、中生代白亜紀の広島花崗岩類が分布しており、土被りの小

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。このうち、崩落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断層や地質不連続帯の延長上に位置している。これらは活断層ではなく、地質時代の古い断層と想定されているが、断層活動に伴って花崗岩が破砕を受けている可能性が高い。

崩落部の土被りは約 18～25m 程度であるが、その周辺の地形は、なだらかな尾根と谷が分布している。Fig. 4 に示すような地下水の流が想定され、崩落部は谷から尾根にかけての斜面に位置しているため、地下水が流れ込みやすい地形となっている。

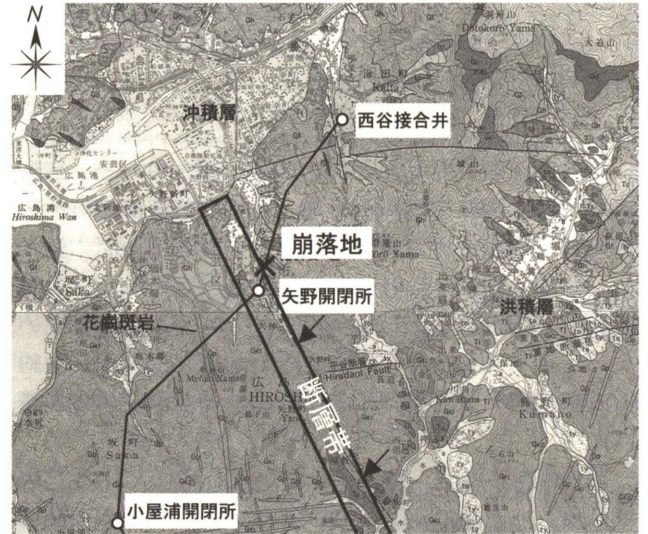


Fig. 3 崩落部付近地質概要

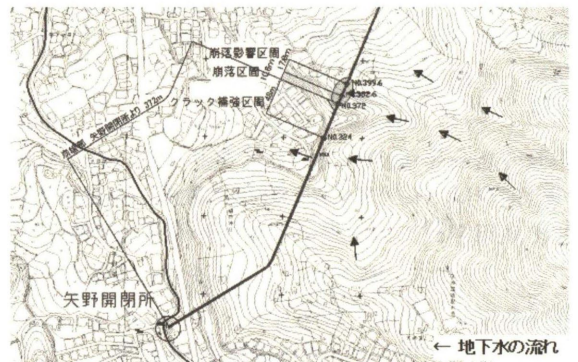


Fig. 4 崩落部付近の地形

3.3 崩落部付近の構成地質と地下水状況

復旧工事中の切羽観察結果、崩落部付近と崩落部への地表からの 4 本のボーリング調査および地下水位観測調査から、以下に示すようなことが明らかとなった。

- ① 崩落部には、破砕を著しく受けた「カタクラサイト^注」と呼ばれる特異な破砕構造を持つ花崗岩と閃緑岩が分布し、最も大きな崩落が発生した部分には閃緑岩が分布していることが確認された (Fig. 5～7 参照)。
- ② 崩落していない箇所には通常の花崗岩が分布していることが確認された (Fig. 5～7 参照)。
- ③ ボーリング試料の詳細調査により、崩落部のカタ

クラサイト化した花崗岩と閃緑岩には、いずれも潜在的な亀裂を多く含むことが確認された。

④ 花崗岩に比較して最も大きな崩落部に分布している閃緑岩の方が、亀裂密度が高く、劣化しやすいと想定された (Fig. 8 参照)。

⑤ 復旧工事完了後の水位観測結果では、崩落部付近はわずかな降雨にも、地下水位が鋭敏に反応して上下動する箇所であることが確認された。

注) カタクラサイトとは、断層による破砕を過去に受け、くさび型の落下が発生しやすい性質を持ち、一見硬質であるが外力を加えると簡単に割れるほど劣化した岩盤。

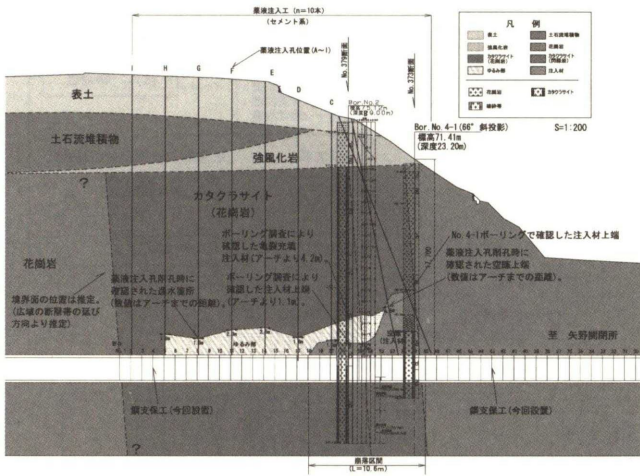


Fig. 5 崩落部付近推定トンネル地質縦断面図

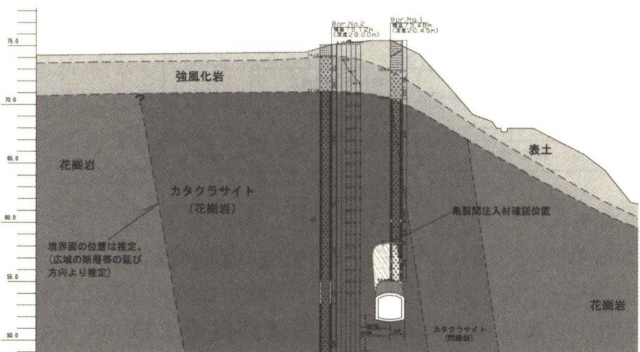


Fig. 6 崩落部付近推定トンネル地質横断面図 (NO. 379)

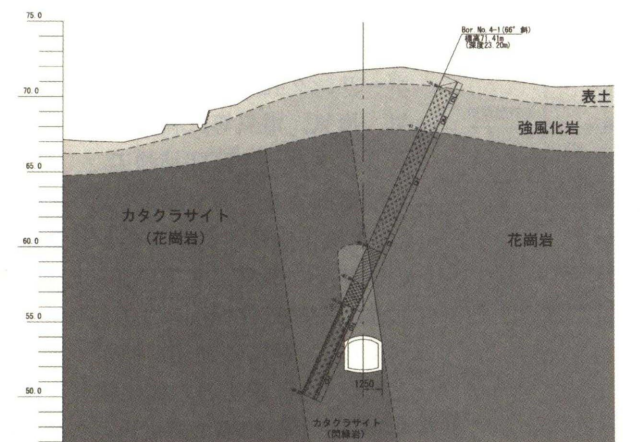


Fig. 7 崩落部付近推定トンネル地質横断面図 (NO. 373)

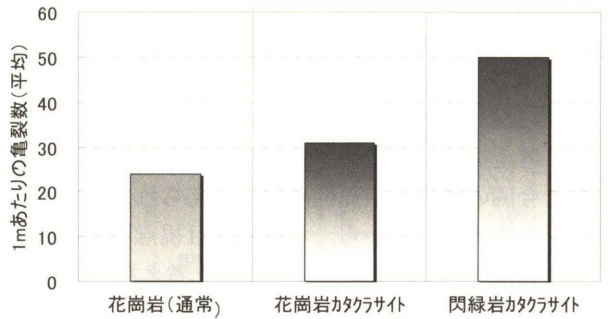


Fig. 8 1mあたりの亀裂数 (地質別)

3.4 建設時のトンネル施工法と覆工コンクリート

本トンネルは昭和37~40年に小断面であることから人力を主体とした矢板工法により施工されている。

支保は、当時の記録から地山状況に応じて、無普請、木製支保工および鋼製支保工が用いられていたようである。崩落部は、掘削時に木の残骸や「かすがい」が出現したが、その量や数が少ないことから、無普請を主体として施工されたものと推定される。このことから、掘削時には土砂崩壊や大量湧水もなく、切羽は比較的安定した状態で施工できたものと考えられる。

覆工コンクリートは、バラセントルを用い、人力で施工されている。特に天端については、幅20cmの型枠を順次掛けながら、「手ばね」で施工している。当時としては、裏込め注入も標準的でなかったため、天端を完全に充填することは困難な状態であったと推測される。

また、設計巻厚は25cmであったが、復旧時にほぼ巻厚が確保されていることが確認された。なお、天端付近の覆工コンクリートには、用心鉄筋と考えられるシングル鉄筋が確認された。

崩落原因として、覆工コンクリートの劣化も考えられたため、崩落部および崩落部以外の覆工コンクリートの中性化試験および圧縮強度試験を行ったが、どの地点でも材料劣化は確認されなかった。

3.5 崩落原因の推定

これまでに述べた調査結果等から、推定される崩落原因と発生メカニズムを以下に示す。

- ① 崩落部付近には、亀裂が多くわずかな外力で破壊しやすいカタクラサイト化した花崗岩と閃緑岩、特に亀裂密度の高い閃緑岩が脈状に分布していた。
- ② 本トンネルは、人力を主体とした矢板工法で施工されており、覆工コンクリートの打設方法からも、覆工背面には空隙が存在していたと推測される。
- ③ 降雨に伴う鋭敏な水位変動により、トンネル上部のカタクラサイト化した地山の劣化を促進し、覆工背面の空隙が拡大していたと考えられる。
- ④ その結果、トンネル周辺の地山が劣化し、アーチ部に荷重として作用し、覆工の突発性破壊に至ったと推定される。
- ⑤ 崩落部の覆工コンクリートは、中性化や強度低下

等の材料劣化は、認められなかった。

- ⑥ 覆工の破壊は、アーチ部だけで側壁部は健全であったことから、鉛直方向の荷重が作用したものと考えられる。
- ⑦ 今回の崩落は突発性崩壊と考えられ、覆工も健全であったことから、一般的な目視点検や打音検査等では、予測が困難であったと考えられる。

4. 崩落部の復旧

4.1 崩落部復旧工法の選定

復旧工法は、1) 3週間以内に復旧し、通水再開が可能な工法であること、2) 二次災害の恐れのない安全性が確保された工法であることを基本方針として、以下に示す方法で行うものとした。

- ① 施工方法は、山岳トンネル工法と推進工法を比較した結果、補助工法を併用すれば崩落部での復旧実績もあり、早期着工が可能な山岳工法を選定した。
- ② 早期復旧の必要性から、上下流の両方からの施工とする。
- ③ 復旧工事での二次災害を防止するためにも、事前に崩落部上部の空洞を充填する必要があった。小断面のため坑内からの対応には時間を要することが想定された。幸いにも崩落箇所の土被りは約25m程度で地表は畑であり、アクセスが可能なことから、地上部からの薬液注入を行うものとした。
- ④ トンネルが、幅2.0m、高さ2.05mという小断面であり、特に崩落部まで近い方の下流側矢野開閉所立坑の開口部は、約1m×2mと小さいことから、人力による施工を主体とするものとした（ずり、資機材の運搬はリヤカーで行った）。
- ⑤ 上流側西谷接合井の開口部は大きいものの、崩落

部まで約2.5kmと距離が長いので、動力、換気等は、薬液注入に先立ち、地上部からのφ136mmのボーリング孔（5本）を利用するものとした。

- ⑥ また、崩落に伴い、その前後の区間の一部にひび割れが発生していたため、まずその前後の崩落影響区間を補強するものとした。

4.2 崩落部復旧工事の流れ

崩落部復旧工事の施工の流れをFig. 9, 概要をFig. 10, 復旧断面をFig. 11に示す。

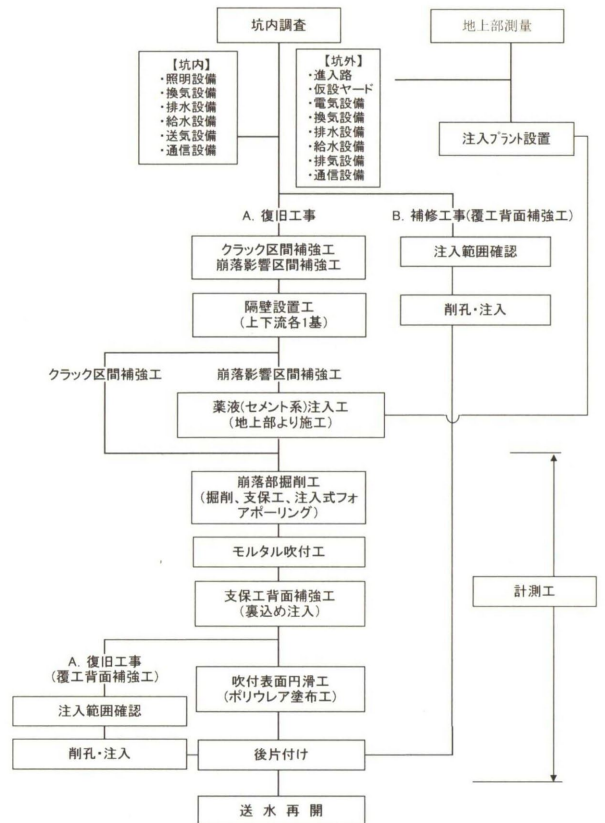


Fig. 9 復旧工事の流れ

4.3 崩落部復旧工事

(1) 仮設備工

Fig. 12 に仮設備配置図を示す。上流（西谷）側は、崩落位置までの距離が長いので、地上部より、φ136mmのボーリング孔5本を設置し、排水、給気、換気、電気等に利用した。

(2) クラック区間補強工

崩落部より下流（矢野）側48m間は、天端に崩落の影響と思われる新しいクラックが発生していた。地表からの注入や崩落部掘削により、クラックが進展し、崩落の範囲が広がる恐れがあったため、覆工の内側に鋼製支保工H-100を1m間隔で建て込み、補強した（Fig. 11 (b) 参照）。

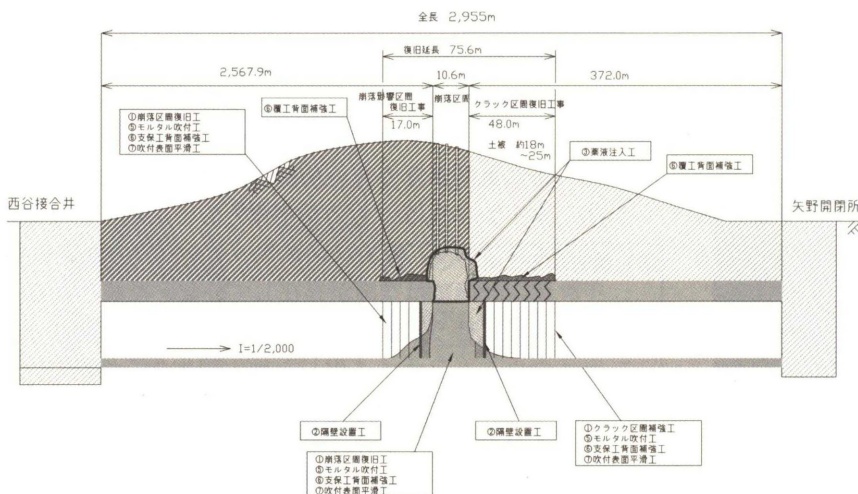


Fig. 10 復旧工事の概要

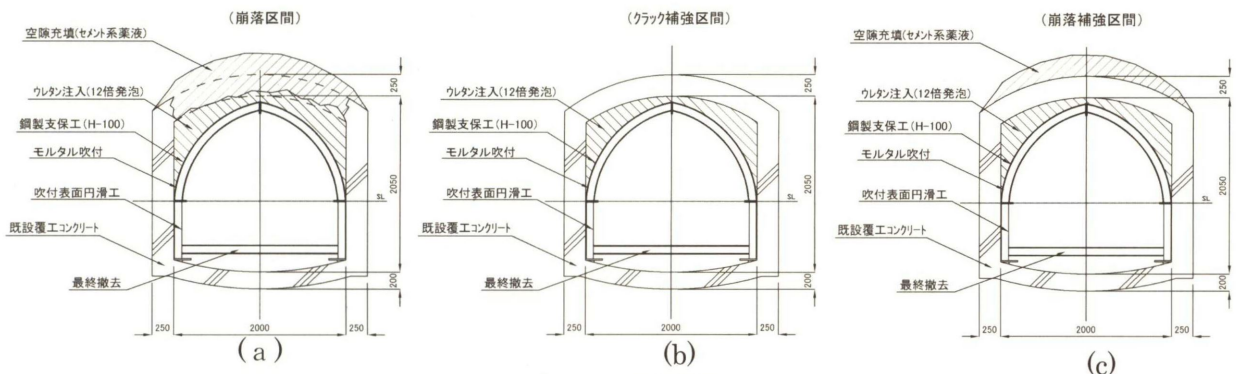


Fig. 11 復旧断面

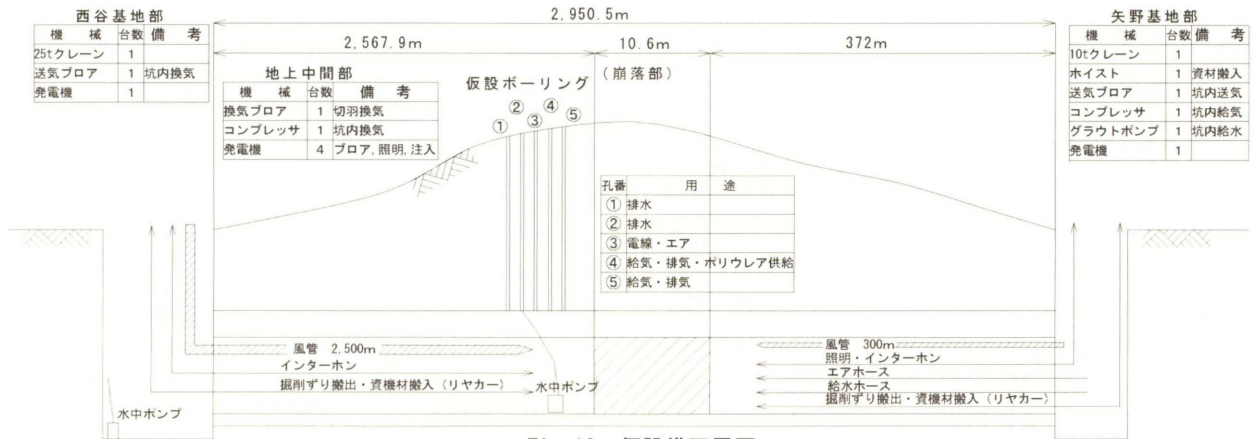


Fig. 12 仮設備配置図

(3) 崩落影響区間補強工

崩落部より上流（西谷）側は、崩落による新しいクラックは発生していなかったが、崩落部の掘削の影響を受けることが考えられたため、17 m間を下流側と同様な方法により補強を行った（Fig. 11 (c) 参照）。

(4) 隔壁工

地表からの薬液注入を確実にを行い、坑内への流入を防止するため、崩落部の上下流にそれぞれ隔壁を設置した。隔壁は、覆工内側に鋼製支保工（H-100）を建て込み、さらにその内部を土のうで充填した。崩落部を隔壁で閉塞するため、下流の下部に水抜きパイプを設置した。隔壁工の詳細を Fig. 13, Photo. 3 に示す。

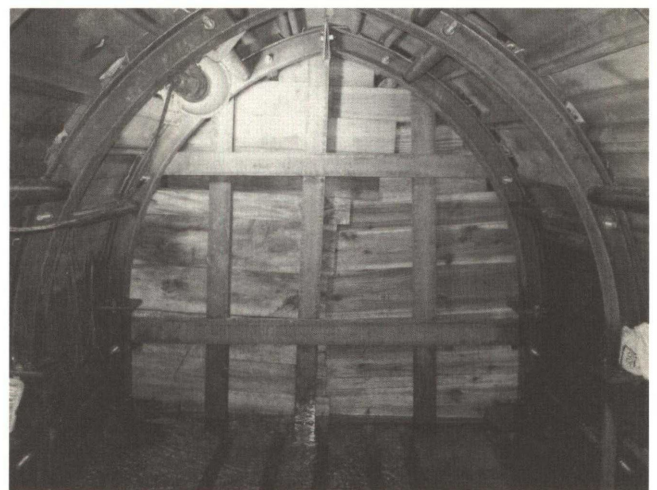


Photo. 3 隔壁工施工状況

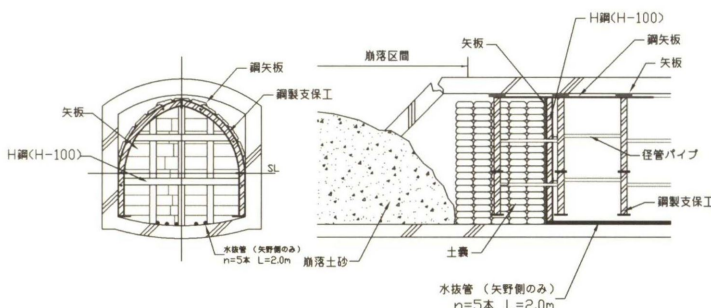


Fig. 13 隔壁工概要図

(5) 薬液注入工

崩落部掘削に先立ち、崩落部上部の空洞充填および緩んだ崩落部の地山を改良するため、地上からの薬液注入を行った。

恒久的な崩落岩盤の改良および空洞充填を目的とするため、懸濁型セメント系無機系の中から流出防止の可能なゲルタイムの短い「サンコーハードAQ2-10秒」を注入材として選定した。標準配合を Table 2 に示す。

注入は、二重管ストレナーナ方式（単相式）とし、トンネル延長方向に3 m間隔で、計10本（トンネルセンター）施工した。削孔はパーカッションドリル（φ96mm）によ

り先行削孔し、削孔完了後、二重管ロッドを挿入して注入を行った。なお、注入開始は削孔水の逸水が確認された深度（空隙の存在と想定）から開始し、覆工への影響を考慮して、初期圧+0.5MPa で完了した。注入量は合計で約 137 m³であった。

Table 2 標準配合（1 m³当たり）

A液			B液	
セメント	促進剤	水	硬化剤	水
312.5kg	30.0kg	388.0kg	60.0kg	490kg

(6) 崩落部掘削

薬液注入により空洞充填および崩落土砂を改良した後、上下流より掘削を開始した。

掘削はピック等による人力掘削による矢板工法によりH-100を1m間隔で建て込み、ずり搬出はリヤカーで行った。なお、搬出距離の長い上流側は坑内に仮置きし、貫通後搬出した。

地上からの薬液注入の効果が十分でない部分もあり、切羽の安定性が懸念された箇所に対しては、補助工法として注入式フォアポーリングを施工した。掘削状況を Photo. 4、注入式フォアポーリング施工状況を Photo. 5、坑内運搬状況を Photo. 6 に示す。



Photo. 4 掘削状況



Photo. 5 注入式フォアポーリング施工状況

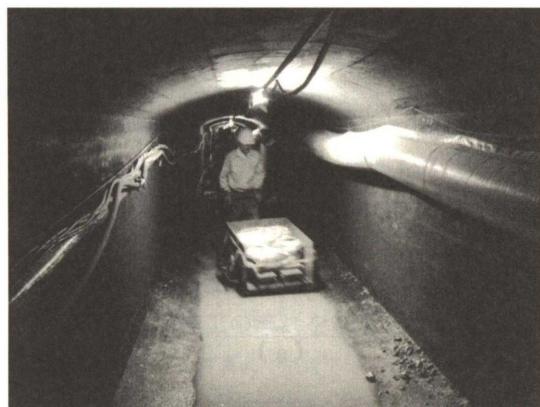


Photo. 6 坑内運搬状況

(7) モルタル吹付け

崩落部掘削完了後、鋼製支保工を覆工内面に建て込んだ崩落区間、クラック補強区間および崩落影響区間の内側に厚さ10cmのモルタルを吹付け、補強した。

吹付け材料は、高い曲げ強度と脆性の改善、靱性の向上、小断面での作業性を考慮し、プレミックスタイプの繊維補強モルタル（デンカPFモルタルTYPE-K）を使用した。吹付け材料の搬入は下流（矢野）側より人力で行い、坑内に設置した連続ミキシングポンプで水と練り混ぜ、液体急結剤を先端で添加して、湿式方式により吹き付けを行った。吹付け状況を Photo. 7 に示す。



Photo. 7 吹付け状況

(8) 支保工背面補強工（裏込め注入工）

崩落部に建て込んだ支保工と地山の間およびクラック補強区間・崩落影響区間に建て込んだ支保工と既設覆工の間の空隙を発泡ウレタン（セットフォーム、12倍発泡）により充填し、補強した。注入は吹付け前に肩部左右にトンネル延長方向3m間隔で設置した注入管より、初期圧+0.2MPaの圧力管理で行った。

(9) 吹付け表面円滑工

覆工内側に支保工を建て込み、吹付けにより復旧したため水路断面が小さくなり、粗度係数も大きくなった。このため、吹付け施工区間の表面にポリウレタ樹脂を吹付け（インパートを除く）、粗度係数を改良（小さく）

し、通水量を確保するものとした。

施工は、①下地調整（モルタルコテ塗り）、②プライマー塗布（ $t=0.2\text{mm}$ ）、③ポリウレア樹脂吹付け（平均厚さ $t=3\text{mm}$ ）の順序で行った。

ポリウレア吹付け後、ポリウレア樹脂の端部をフラットバーで押さえ、水流による塗膜の剥がれを防止した。

ポリウレア施工状況を、Photo. 8 に示す。



Photo. 8 ポリウレア施工状況

(10) 計測・観測結果

崩落部掘削時には、全ての切羽で切羽観察を実施し、切羽の安定性を確認するとともに、崩落状況を観察・記録した。崩落部全切羽のスケッチと写真を Fig. 14 に示す。

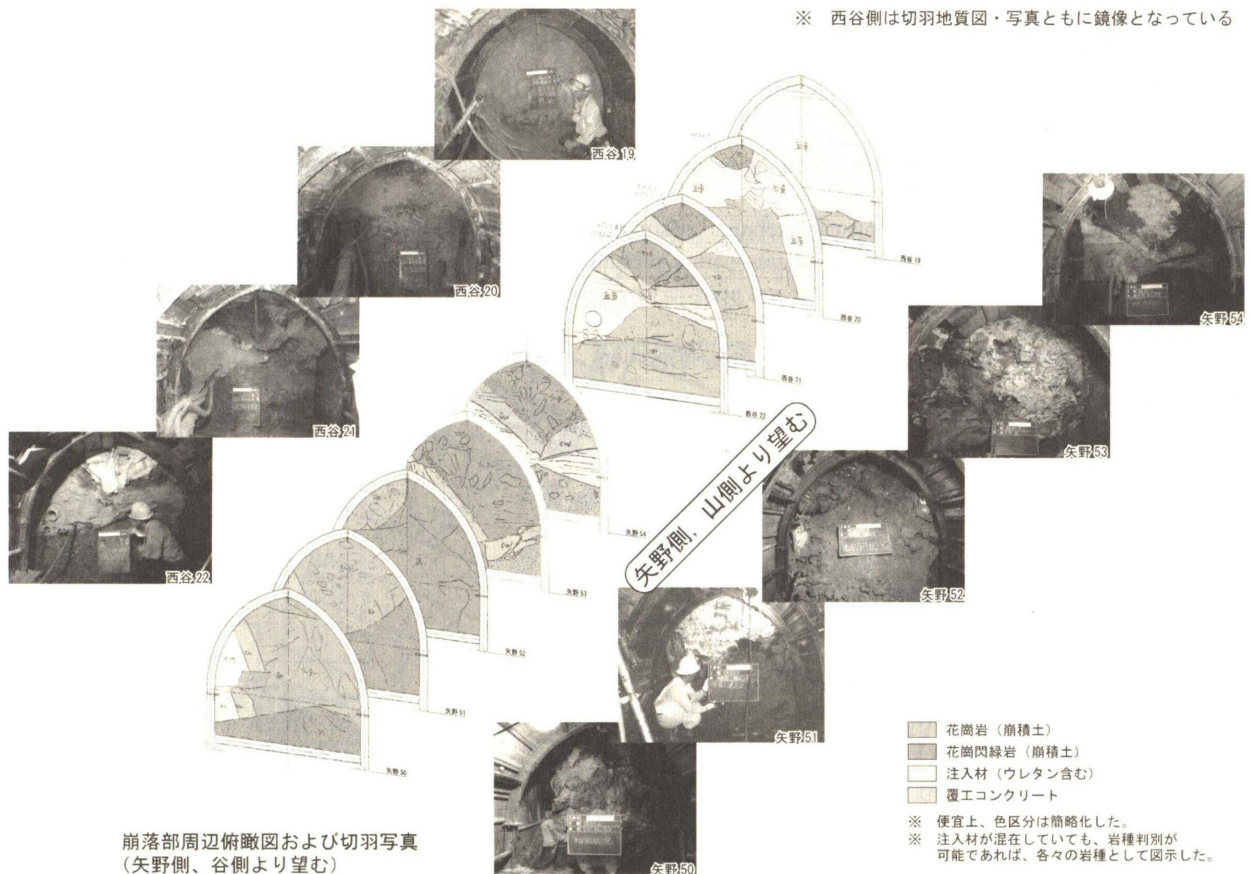
また、復旧工施工期間は、地表面沈下測定を実施し、地表への影響を観測した。なお、復旧工施工期間の地表面への影響は観測されなかった。

(11) 実施工程

平成 18 年 8 月 25 日に崩落が発生し、以上述べたような復旧工事を行うことにより、崩落発生から 17 日後の 9 月 11 日朝 5 時 50 分に、無事通水再開を行うことができた。復旧工事の実施工程を Fig. 15 に示す。

工種	8月						9月												
	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
準備・調査工																			
仮設工																			
クラック区間補強工																			
崩落影響区間補強工																			
薬液注人工																			
崩落部掘削工																			
モルタル吹付け工																			
支保工背面補強工																			
吹付け表面内滑工																			
覆工背面補強工																			
坑内片付け																			
坑外仮設撤去																			
通水再開																			

Fig. 15 実施工程



崩落部周辺俯瞰図および切羽写真 (矢野側、谷側より望む)

Fig. 14 崩落部切羽状況

5. 緊急点検結果と補強工事

復旧までの間を利用して実施された西谷接合井～呉市二河接合井（約 15.6km）の緊急点検結果に基づき、同様な崩落が懸念される区間の補強工事を実施した。

目視および打音検査により抽出された 50 箇所を、覆工レーダー探査およびファイバースコープによる覆工背面を詳細点検し、背面空洞や縦断方向のひび割れがあり、かつ背面の地山状態の悪い 4 箇所、計 85 m 間について、裏込め注入による補強を行った。

裏込め注入は、発泡ウレタン（セットフォーム、40 倍発泡）で充填した。注入管を天端にトンネル延長方向 3 m 間隔で、地山から 5cm 離れまで挿入し、初期圧 +0.2MPa の圧力管理で注入を行った。

6. おわりに

送水トンネルの崩落による断水という予期せぬ事態に、発生から 17 日後という早期に通水再開することができた。

当初想定していたより崩落区間が短かったことも幸いしたが、小断面のため、人力主体の施工となり、連日 100 余名体制で臨んだ。広島支店・本社だけでなく、他支店からの応援も含め、総力を結集することにより、早期復旧につながったと考える。

謝辞

復旧工事にあたっては、関連市町や近隣住民の方々のご理解とご協力、広島県公営企業部、広島水道事務所をはじめ関係者の方々から迅速かつ有益な助言ご指導をいただき、無事故無災害で早期に通水再開、竣工することができました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 広島県送水施設事故調査委員会報告資料（第 1 回），平成 18 年 10 月，広島県公営企業部
- 2) 広島県送水施設事故調査委員会報告資料（第 2 回），平成 18 年 12 月，広島県公営企業部
- 3) 広島県送水施設事故調査委員会の報告について，平成 19 年 3 月，広島県公営企業部水道整備室

A report of urgent restoration construction of water supply tunnel collapse in use

Yoshinobu KIRA, Masaki TADA, Yasuo MORI, Shinichi AZETAKA and Masahiro KATAYAMA

Abstract

The part of a water supply tunnel in Hiroshima prefecture collapsed in August 2006, and large-scale suspension of water supply occurred.

For this unexpected emergency, we completed restoration construction earlier than the aim at first.

This is the report about the situation of the collapse part, a presumed cause, contents of the restoration construction and about the additional reinforcement measures in other part that was necessary by the result of the command investigation carried out in the meantime.

Keywords: waterway tunnel, urgent restoration, collapse, inspection, reinforcement
