特集⋙ 鉄道 ┃┃

豊肥本線 坂の上トンネル災害復旧

豪雨で被災・崩落した鉄道トンネルの復旧

岡 照雄・坂 本 興 一

JR 九州豊肥本線は、平成 24年7月の九州北部豪雨で宮地~豊後竹田間(34.6 km)にわたり甚大な被害を受けた。本工事では、水害により一部崩落した坂の上トンネルの復旧と、流出した軌道路盤の撤去・復旧を行った(工区延長は約 2.3 km)。早期の運転再開が求められる中でトンネル復旧には、崩落部分を開削しコンクリート二次製品(モジュラーチ)を据え付けた。昼夜 24 時間体制で工事を行い、九州では珍しく、冬場は-16 $\mathbb C$ まで気温が下がる厳しい作業環境下でもあったが、実質 8 カ月という短工期で無事運転再開を迎えることができた。

キーワード:モジュラーチ,短工期,崩落原因

1. はじめに

JR 九州豊肥本線は、世界有数の規模を持つ阿蘇のカルデラの中を横切って九州中部を横断し、大分市と熊本市を結ぶ路線である。阿蘇や竹田は昔から多雨で知られ過去にも甚大な被害を受けてきた。平成24年7月の九州北部豪雨では時間雨量100mm以上、総雨量800mm以上を記録した。それにより豊肥本線はほぼ全線にわたり被害を受け、特に宮地~豊後竹田間においては坂の上トンネルの一部崩落をはじめとして、多数の築堤崩壊など、甚大な被害を受けた(写真一1~4)。

坂の上トンネルは、昭和3年に竣工した(施工業者 現存せず)全長2,283 m(平面線形:直線、勾配: 25‰)の単線非電化トンネルである。トンネル構造は、



写真-1 熊本方坑口でのレール流出状況

馬蹄形断面のアーチ部がブロック 2 層積み、側壁部が 場所打ちコンクリートとなっている。トンネル崩落箇



写真-2 坑内の被災状況



写真―3 トンネル崩落部の地表陥没状況



写真―4 トンネル崩落部からの土砂流入状況

所は大分方坑口から約70mの地点であり、崩落規模 は延長50m、幅20m、深さ5m程度であった。

本工事は、坂の上トンネルの復旧工事を主とする。 崩落した一部区間を国内ではあまり例がない土留め開 削工法で掘削してコンクリート二次製品(モジュラー チ)を据付ける方法により復旧し、既設トンネル内の 流出した軌道(レール、枕木、バラスト)の撤去・軌 道路盤の復旧を行った。

2. 工事概要

工 事 名 宮地·波野間 62 k795 m 付近外 3 災害復旧 工事場所 熊本県阿蘇市波野

工 期 平成 24 年 9 月 7 日 \sim 平成 25 年 10 月 29 日 工事数量

作業用トンネル:i=13%, NATM 小断面機械掘削, L=88.5 m, A=21.0 m² 薬液注入工:V=1.089.430 L

仮土留工: $A = 4.845 \text{ m}^2$,最大鋼矢板長: 23.5 m (鋼 矢板 $\mathbb{N} \cdot \mathbb{V}_1$ 型)

掘削工:V=17,556 m³ (1~4,8 段支保工:切梁 方式,5~7 段支保工:除去式アンカー)

コンクリート二次製品据付工: $L=66.0 \, \text{m}$ (モジュラーチ)

トンネル内路盤復旧工:L=2,283 m トンネル背面空洞充填工:V=667 m³

トンネル内面補強工:1式

計画段階で崩落部のトンネル復旧方法を3パターン 比較検討した結果、トンネルの崩落状況がわかり、崩 落箇所および崩落していない本坑内の軌道路盤を早期 に復旧できる方法として、表—1に示す②案が採用 された。

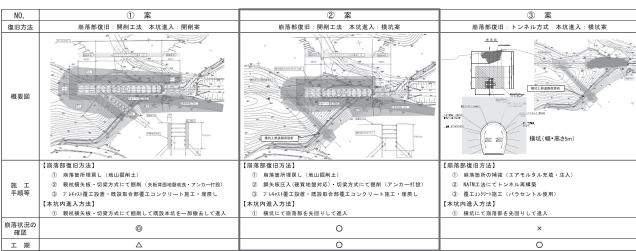
3. 地形・地質概要

(1) 地形概要

図―1に阿蘇周辺の地表地質図を示す。阿蘇は世界でも有数のカルデラ地形であり、今から30万年前からの4回の大噴火によって形成されたものである。施工箇所は、阿蘇外輪山の東部に位置しカルデラ縁から外側に傾く緩やかな傾斜になっており広大な草原が広がっている。今回トンネルが崩落した位置では第4期噴火による阿蘇4火砕流堆積物が分布し、その上に降下火山灰が厚く分布している。また、現場は標高約800mに位置し地下水位は観測されなかった。

(2) 地層・地質概要

施工箇所の代表的な地層は、上部よりローム層 (Lo),上部火山灰層 (Ash2),軽石層 (Kpfa),下部



表一1 復旧方法の比較検討案

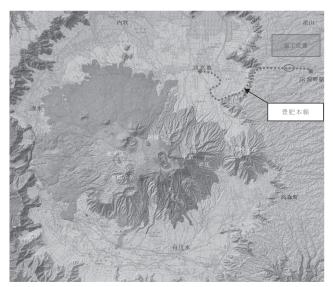


図-1 阿蘇周辺の地表地質図 1) (一部加筆)

火山灰層 (Ash1), 阿蘇 4 火砕流堆積物層となってい る。

- ・ローム層:1.3万年前から現在までに堆積した降 下火山灰が土壌化し黒ボク土となっている(地質: $\Box - \Delta$, $N = 1 \sim 4$)
- ・上部火山灰層:降下火山灰層で赤ボクと呼ばれる (地質:火山灰質シルト、N=1~10)。
- ・軽石層:3.1万年前に草千里ヶ浜火山から噴出し た草千里ヶ浜軽石層である(地質:風化軽石, N $=0\sim6$
- ・下部火山灰層:降下火山灰層で赤ボクと呼ばれる (地質:火山灰質シルト, N=1~50)。
- ・阿蘇4火砕流堆積物層:全体的に軽石を若干含ん だ溶結凝灰岩である。ただし、自然発生的な空洞 や亀裂が多数存在する(地質:溶結凝灰岩, N≥ 50)。

4. 土留め掘削工

(1) 概要

崩落箇所の開削工法による掘削深さは、最大 18 m と深いものになった。また、仮土留め鋼矢板(IV・VL 型, L=19.0~23.5 m) の施工は, 溶結凝灰岩 (N≥ 50) への根入も必要であったため、硬質地盤対応型圧 入機(クラッシュパイラー)にて行った。掘削工事は、 夜間に掘削し昼間で切梁・腹起しを設置することによ り工程の短縮を図った。1~4段目及び8段目支保工 は切梁・腹起し方式 (写真-5), 5~7 段目支保工は トンネル覆工を再構築する部分に相当するため、除去 式グラウンドアンカー方式(写真―6)とした。

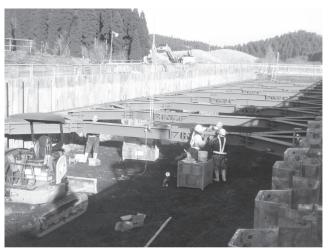
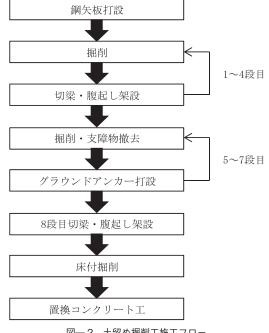


写真-5 切梁・腹起し架設状況



写真―6 グラウンドアンカー削孔状況



図一2 土留め掘削工施工フロー

(2) 施工フロー

図―2に土留め掘削工施工フローを示す。



写真一7 鋼矢板打設状況



写真一8 鋼矢板建込状況



写真-9 空洞部継矢板バイブロ打設

(a) 鋼矢板打設

硬質地盤対応型圧入機は、パイルオーガで最小限の 先行掘削を行った後に鋼矢板を圧入する方法によって 岩盤への施工が可能である。また、岩盤掘削と鋼矢板 圧入を1台の施工機械で行えるため、効率のよい施工 が行えた(写真一7、8)。図一3に圧入手順を示す。

溶結凝灰岩はまれに火山性ガスの通過に起因する空洞部が点在する場合がある。当現場でも何箇所かあり、特に鋼矢板先端部分に空洞が存在していた箇所については鋼矢板を継ぎ足して空洞を抜ける深さまで打ち込み対処した(写真一9)。

(b) 掘削工

主な掘削機械として、 $0.7 \,\mathrm{m}^3$ 級テレスコピック式クラムシェル×2台、 $0.7 \,\mathrm{m}^3$ 級ロングアームバックホウ×1台、 $0.2 \,\mathrm{m}^3$ 級バックホウ×3台を使用した(**写真** — 10、11)。掘削地山は降下火山灰が堆積した土質性状であり、また掘削深さが最大 $18 \,\mathrm{m}$ にもなることか



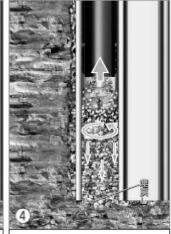
先行掘削(先行オーガヘッド)



パイルオーガ引抜き、埋戻し オーガ海南駅(株きにより最めに埋戻し



同時掘削圧入(圧入オーガヘッド) オーガヘッドを圧入用に交換



圧入完了、埋戻し E入完了後、オーガ逆回転引抜きにより環境し

図一3 硬質地盤クリア工法 先行掘削圧入フロー

ら土留め工に大きな土圧が作用することが想定された。そのため、土留め工の変状を確認するために切梁に土圧計を設置し、水平変位は下振りで確認したが、 結果的には大きな変状は観測されなかった。



写真-10 掘削全景



写真—11 掘削内部状況

また、床付面は岩着確認を目視で行いコンクリートにて置き換えた。床付面は溶結凝灰岩であり多くの浮石や亀裂が確認されたため(写真—12)、浮石については全て取り除き、亀裂については急結型のセメントミルクを注入して処理した(写真—13)。

(3) 崩落トンネルの状況

今回、開削工法を用いた理由の一つは、既設トンネルの崩落状況の確認と記録をすることであった。既設トンネルは、下半が場所打ちコンクリート側壁、上半がブロック積2層のアーチ構造で構築されている。崩落した箇所の基礎部分には、水分を多く含むシルト層が帯状に存在し、そこに下半のコンクリート側壁が食い込む形で倒壊していた(写真—14)。上半ブロック



写真— 12 床付完了



写真―13 亀裂箇所セメントミルク注入状況



写真—14 崩落部下半側壁倒壊状況

部分については、ほぼそのままの形で落下した状態で残っていた(写真—15,16)。取壊しは、崩落した部分(写真—17)はブレーカと圧砕機で行い、既設トンネルをそのまま利用する部分までの取壊しは、ワイヤーソーで縁切りを行い圧砕機で行った(写真—18,19)。



写真-15 崩落部上半アーチ部崩落状況



写真— 16 崩落境界部上半



写真―17 取壊し状況

崩落部の状況は、毎日スケッチと実測、写真とビデオ撮影により記録を取りまとめた。図—4に最終的に取りまとめた図面を示す。

大分方坑口から流入した雨水が,熊本方に向かって 25‰の下り勾配の坑内を大量に流下し,覆工側部コン クリートの基礎地盤を洗掘することにより、側部コン



写真-18 取合部取壊し状況



写真―19 切断および取壊し完了

クリートが倒壊, アーチ部分が落下, 上部地盤が陥没 したものと想定された。

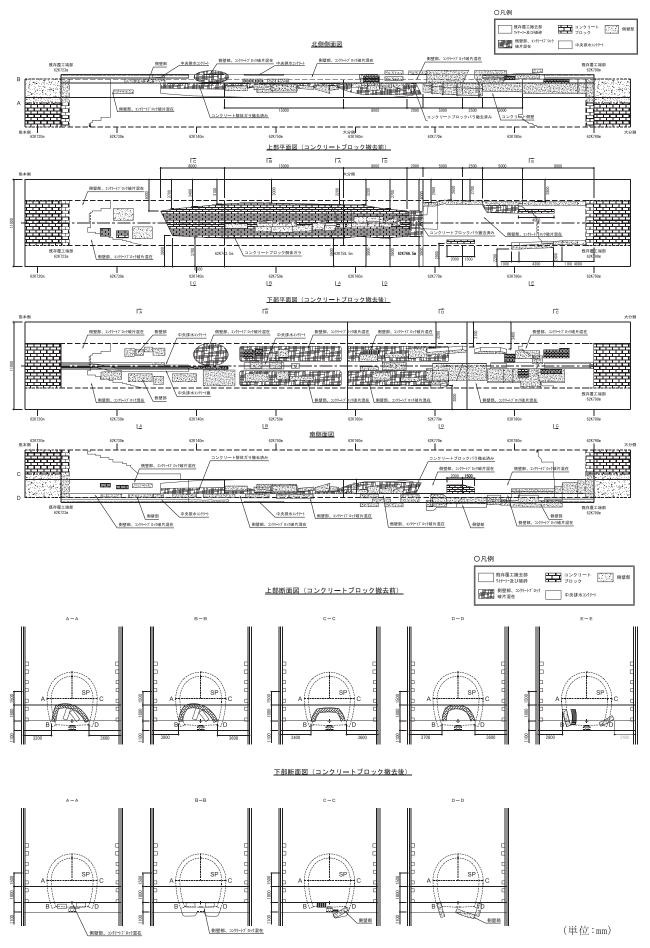
5. コンクリート二次製品敷設工

(1) 概要

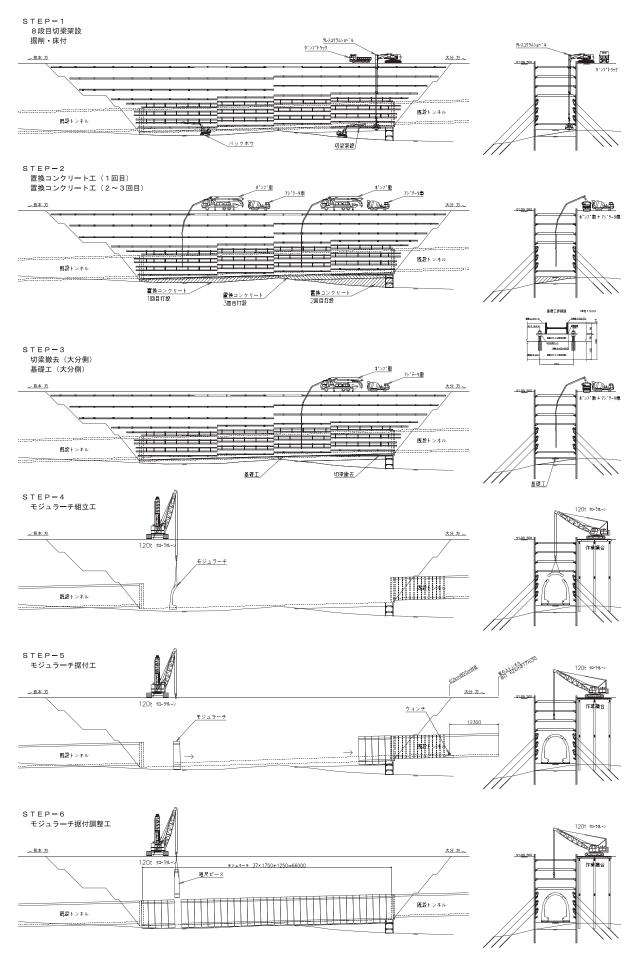
崩落箇所のトンネルは、コンクリート二次製品(モジュラーチ)を敷設し復旧した。部材重量は最大で約23 t であるため、使用クレーンの選定から土留め工への影響等を考慮しながら据付計画を作成した。

(2) 施工フロー

図―5にモジュラーチ敷設工ステップ図を示す。 岩盤面までの掘削・床付完了後に置換コンクリート(最大厚さt=2.0 m)を施工し(写真―20),その上にモジュラーチ横引用の基礎レールを高さ・位置精度5 mm 以内で配置し基礎コンクリートを施工した。土留め鋼矢板は引抜きを予定していたため、置換コンクリートと鋼矢板の接する箇所はラス金網とエラスタイ



図―4 崩落部トンネル露出状況図



図─5 モジュラーチ敷設工ステップ図



写真-20 置換コンクリート施工状況



写真—21 縁切型枠組立完了

トにて縁切りを施した(写真―21)。

モジュラーチ設置延長は $66 \, \mathrm{m}$, セット数は $38 \, \mathrm{基} \, \mathrm{m}$ あり,組立箇所を $1 \, \mathrm{箇所設け基礎レール上を横移動させ,所定の位置に設置した。架設には <math>120 \, \mathrm{t}$ クローラクレーンを使用したが,軟弱地盤であることと土留め鋼矢板に作用する土圧が増加することを考慮し,杭基礎方式の作業構台を設置し作業した(写真—22)。基礎レールの上には $\phi 11 \, \mathrm{mm}$ の鋼球を面積比で約 50% 敷き詰め(写真—23),その上に $3 \, \mathrm{分割}$ されたモジュラーチを組立て, $6 \, \mathrm{t}$ ウィンチ $2 \, \mathrm{d}$ で横引し所定の位置にセットした。

写真―24,25にモジュラーチ施工状況を示す。モジュラーチ据付完了箇所よりモジュラーチ接続部に外防水としてアスファルト系防水材を溶着し(写真―26)、吊穴等の切欠部の穴埋めをプレミックス型の無収縮モルタル(太平洋プレユーロックス)にて行った(写真―27)。写真―28,29にモジュラーチ据付完了状況を示す。



写真-22 120 t クレーン作業構台



写真―23 鋼球敷均し状況

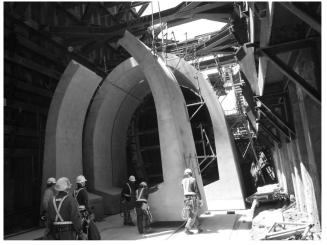


写真-24 モジュラーチ組立状況

(3) 取合躯体工・インバートエ

(a) 取合躯体工

既設トンネルと新設したモジュラーチとの接合部分は、新たに鉄筋を組立てコンクリートを施工し一体化させた(写真—30)。また、接合部分には既設トンネル部の凹凸が激しかったため吹付けアスファルト防水



写真-25 モジュラーチ横引状況



写真―28 モジュラーチ据付完了(上部)



写真―26 アスファルト系外防水



写真-29 モジュラーチ据付完了(側面)

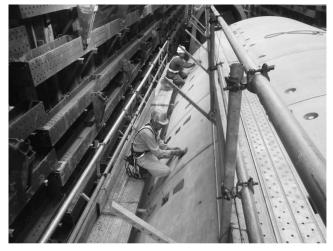


写真-27 切欠部への無収縮モルタル詰め

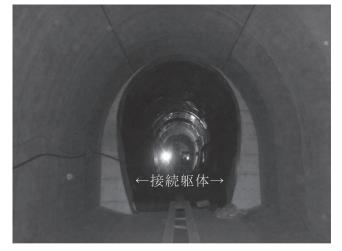


写真-30 取合躯体完了

を施し、既設トンネル内への雨水等の浸入防止対策を 行った(写真-31)。

(b) インバート工

モジュラーチ据付完了後, モジュラーチに写真― 32 のように機械式継手を取り付けて鉄筋を組立て(写 真一33)、一体化したインバートコンクリートの施工

を行った(**写真― 34**)。

(4) 埋戻し工

埋戻しは, 既設トンネルへの影響と狭隘部埋戻しの 時間効率を考慮し FCB 工法(軽量発泡モルタル)に て実施した。FCB工での埋戻しはモジュラーチ天端

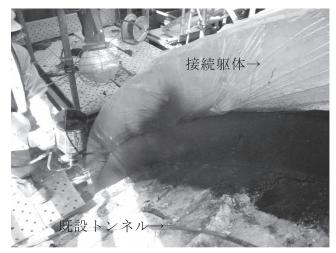


写真-31 吹付け外防水状況



写真―34 インバート施工完了



写真-32 機械式継手トルク管理



写真-35 試験練り状況



写真-33 インバート鉄筋組立完了



写真―36 発泡モルタル施工状況

表―2 発泡モルタル現場配合

21 2 356 2 1 1 35 35 35 35								
単位量(kg/m³)					品質管理 設計値			
セメント	細骨材	混練水	起泡剤	希釈水	生比重	フロー値	空気量	圧縮強度
						(mm)	(%)	(N/mm²)
(kg)	(kg)	(kg)	(1) y h n)	(kg)	± 0.05	± 20	±5	以上
280	800	250	1.19	16.7	1.35	200	33.0	2.5

から +600 mm, 両端部既設トンネル上部については +5.0 m までとした。この他の部分については発生土 を埋戻した。埋戻しに当たっては,本坑内部にひずみ 計を設置しひずみ計測とトンネル幅員の測定を行い,変状を確認しながら実施した。埋戻し土の設計単位体 積重量は 14 kN/m³ であるためエアモルタルの配合は 表—2 を満足するものとした。写真—35 に現場試験 練り状況を示す。施工は現地プラントを設置し施工厚 さ 1 m/日(施工量 30 m³/h)で行った(写真—36)。

6. おわりに

今回ここでは取り上げなかったが、既設トンネル内の流出した軌道の撤去や復旧、既設トンネルの補強についても工期内で可能な限り実施した。経験したことのない災害現場での施工であったため、本工事は短い工期・厳しい施工条件の中で、24時間体制で休みなく工事を進捗させた。毎日の作業の見極め、手配の遅れなどのちょっとしたミスも許されない状況の中で、軌道工事への引渡しギリギリまで高い緊張感を保ち、作業所員全員が一丸となって土木工事を完成させることができた。

平成25年8月に運行を再開し(**写真**—37), 現在 は本線上を豪華クルーズ列車が通過中である。

最後に現場サイドに多大な御尽力と御理解を示していただき、工事がスムーズに進められるように御協力をいただいた皆様をはじめ、現場支援をしていただきました関係各位に厚く御礼を申し上げます。



写真—37 運転再開一番列車(大分方坑口)

J C M A

《参考文献》

1) 地質調査所:阿蘇火山地質図 (5万分の1), 1985年



[筆者紹介] 岡 照雄(おか てるお) 九州旅客鉄道(株) 建設工事部 施設課 田当課長



坂本 興一 (さかもと こういち) 清水建設㈱ 九州支店 土木部 丁事長