

平成29年度 土木学会技術賞 (Iグループ) 受賞

山岳トンネルの大量湧水を減水する「RPG (RING-POST-GROUTING) 工法」の開発

北薩トンネル (鹿児島県) での
“ヒ素を含んだ大量湧水”を減水制御

熊谷組
土木事業本部 トンネル技術部
手塚 仁

1. 北薩トンネルの工事概要

- ◆ トンネル掘削中に予期せぬ大量湧水 (最大1,200t/h) の発生
- ◆ 湧水に高濃度のヒ素が含まれることが判明
 - ➡ 放流先河川の環境基準を満足できない
 - 恒久的なヒ素処理設備の運用は、経済的に成立しない

湧水そのものを大幅に低減する減水対策が必要



掘削時の切羽からの大量湧水状況

トンネル掘削後の壁面からの湧水状況

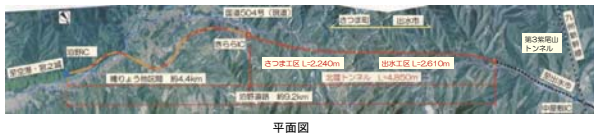
1. 北薩トンネルの工事概要

北薩トンネルは、

- ◆ 鹿児島県西北部と鹿児島空港を結ぶ地域高規格道路 (北薩横断道路) の延長4,850mの長大トンネル
- ◆ 最大土被り約370mの大土被りのトンネル
- ◆ トンネル工事は、出水工区 (延長2,610m) とさつま工区 (延長2,240m) に分割して両坑口から掘削
- ◆ 事前に、岩盤にはヒ素の含有が予測されていた
⇒ 坑外の残土処分場で封じ込め処理



位置図



平面図

1. 北薩トンネルの工事概要

ウレタン系注入材による一次減水対策

Minova社製 CarboPur (カーボプル) WF

- ✓ 長期的な止水、あるいは帯水弱層の補強を目的としたウレタン系注入材
- ✓ 水と接触し反応した場合に発泡する

製品名	CarboPur WF	
	A選	B選
成分	ポリオール 添加剤	ポリイソシアネート
外觀	淡黄色液体	褐色液体
粘度 (Mpa·s/25℃)	250±50	200±50
粘度 (Mpa·s/15℃)	550±80	500±100
比重 (25℃)	1.03±0.03	1.23±0.03
引火点 (℃)	>200	>200
配合	A:B=1:1 (体積比)	
反応時間 (秒/25℃)	約 60 (赤なし)	—
	約 120 (水あり)	(発泡倍率 約3倍)
引張強度 (MPa)	45	
圧縮強度 (MPa)	80±10	
粘着力 (湿潤面) (Mpa)	15分後に2.1	
梱包 (kg/缶)	20	24

※仕様を変更する場合があります。

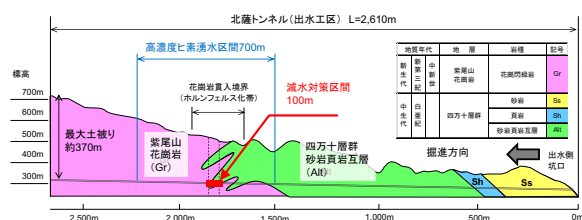


施工例 (注入前)

施工例 (注入後)

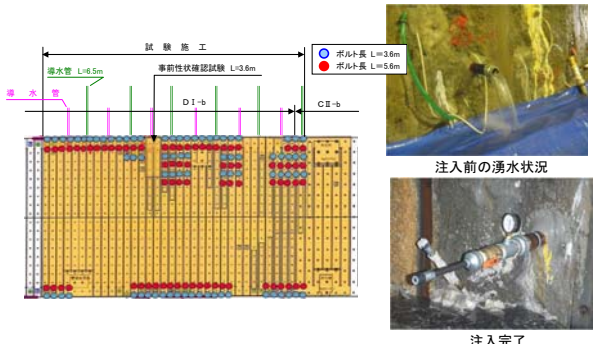
1. 北薩トンネルの工事概要

地質縦断面図および減水対策対象区間



1. 北薩トンネルの工事概要

ウレタン系注入材による一次減水対策



注入前の湧水状況

注入完了

1. 北薩トンネルの工事概要

ウレタン系注入材による一次減水対策



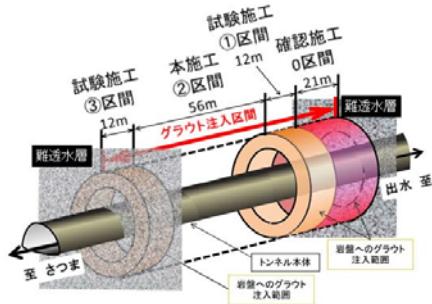
注入前の湧水状況



注入完了後の坑内状況

1. 北薩トンネルの工事概要

「RPG (RING-POST-GROUTING) 工法」の施工範囲



1. 北薩トンネルの工事概要

減水対策区間の地質状況



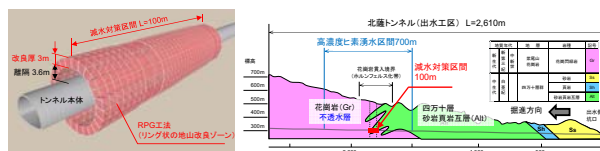
2. 「RPG工法」による減水対策

山岳トンネルの湧水対策

一般的なトンネル (排水型構造)	湧水対策	
	ウォータータイトトンネル (非排水型構造)	プレグラウティングによる 地盤改良
全ての湧水は防水シートから中央排水工を通じて、坑外へ排出される	全周に防水シートを設置するため、坑内に湧水は発生しない	トンネル切羽から前方地山に地盤改良する止水工法 (青函トンネル等で実績あり)
トンネルに水圧が作用しない	トンネルに水圧が作用する	改良外周部に水圧が作用する
	水圧の限界が100m相当と考えられたため、採用できない	掘削が完了しているため、採用できない

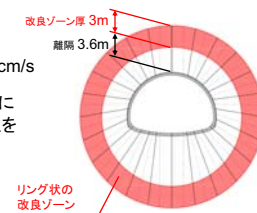
2. 「RPG工法」による減水対策

- ◆ 高濃度ヒ素湧水区間 (700m) のうち、ヒ素量の70%を占める多量湧水区間であり、前後に不透水層に挟まれた100m区間に、減水対策「RPG工法」を実施
- ◆ 地山の目標改良透水係数 $4 \times 10^{-6} \text{cm/s}$
改良厚さ3m、トンネルからの離隔3.6mのリング状の地山改良ゾーンを構築
 - ▶ 湧水量 150t/h から 40t/h に低減
 - ▶ ヒ素量 湧出量の大幅減少
 - ▶ 地下水位 最大160m上方まで回復
 - ▶ トンネルの安定性 地下水位回復後も安定

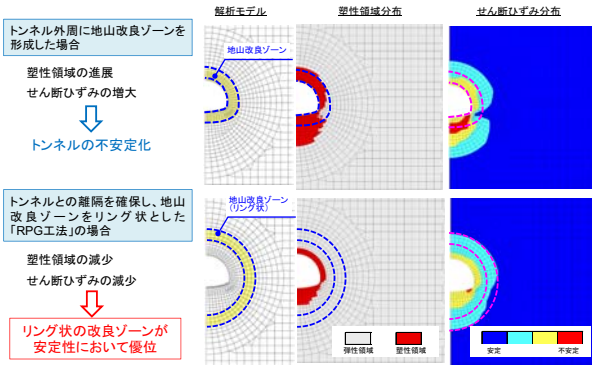


3. 設計手法の確立

- ◆ トンネルの止水を目的としたポストグラウティングの設計手法はこれまでにない
- ◆ トンネルの安定性の確認、水位挙動や間隙水圧の予測を行うために、変形・応力と浸透流の「連成解析」を用いる設計手法を確立
- ◆ 目標湧水量40t/h (対策前150t/h) を達成するため、地山改良ゾーンの厚さと透水係数のパラメータスタディを実施
- ◆ 最適な改良仕様の設定
改良ゾーン厚3m、透水係数 $4 \times 10^{-6} \text{cm/s}$
- ◆ トンネルからの離隔3.6mを確保した外側にリング形状の改良ゾーンの構築の優位性をパラメータスタディにより証明

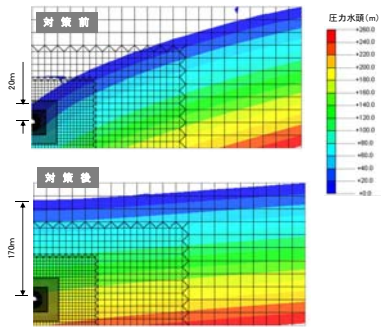


3. 設計手法の確立（解析結果）



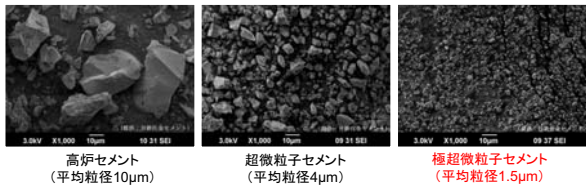
3. 設計手法の確立（解析結果）

減水対策前後の圧力水頭分布



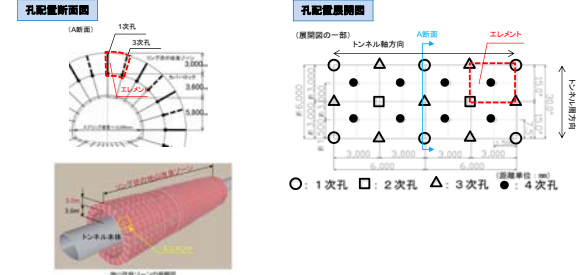
4. 新材料「極超微粒子セメント」の採用

- ◆ 目標とする地山改良後の透水系数 $4 \times 10^{-6} \text{cm/s}$
- ◆ 従来のグラウチング材料
 - 高炉セメント（平均粒径10 μm ）
 - 超微粒子セメント（平均粒径4 μm ）
 改良実績 10^{-5}cm/s オーダー
目標透水系数まで地山改良した事例なし
- ◆ より細かな亀裂にも浸透する新開発の「極超微粒子セメント（平均粒径1.5 μm ）」を岩盤亀裂への注入に初めて採用



5. ダムのグラウチング技術を採用した管理手法

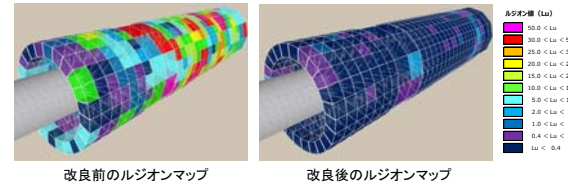
中央内挿法によるグラウチング



5. ダムのグラウチング技術を採用した管理手法

三次元ルジオンマップのエレメント表示

- ◆ 地山の改良状況を確認（ルジオンマップ表示）しながら施工することが可能
 - ➡ 岩盤性状に最適な注入量や注入方法を選定し、経済性を向上



6. 施工結果



6. 施工結果

減水対策「RPG工法」施工前後の坑内状況

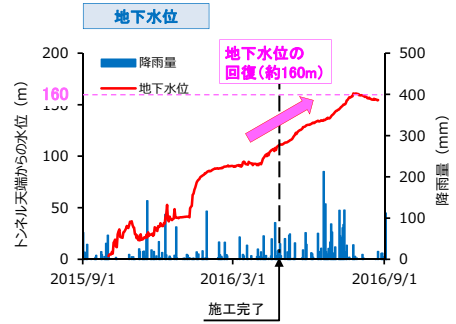


減水対策工実施前の坑内状況
(作業時には雨合羽が必要)

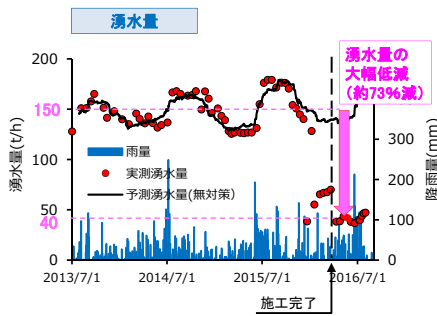


減水対策工実施後の坑内状況
(天端等からの滴水はほとんど見られない)

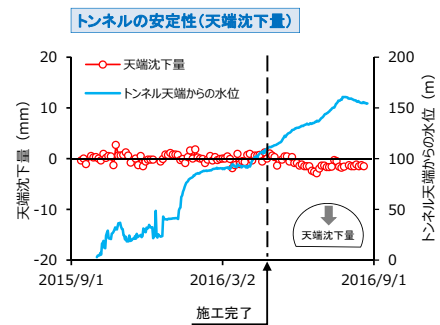
6. 施工結果 (モニタリング)



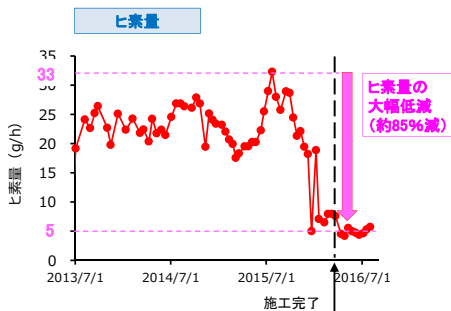
6. 施工結果 (モニタリング)



6. 施工結果 (モニタリング)



6. 施工結果 (モニタリング)



7. 今後のトンネル施工技術への貢献

- 水位低下や地下水問題を抱える山岳トンネルに対して、合理的なリング状のポストグラウチングを実施することにより、湧水量を制御できる「RPG工法」を確立した。
- 従来のウォータータイト構造の適用が困難である100mを超える高い地下水位においても適用が可能であることから、大土被り・高水圧下における山岳トンネルの地下水対策工として活用できる。
- 複雑な地質構造や環境要因、地形条件等から、事前に対策を完全に措置することが困難な場合が多いが、トンネル掘削後にも、合理的な地下水対策工として活用できる。
- 湧水状況やルジオンマップを踏まえて、ポストグラウチングの範囲やグラウトのパターンを決定できるため、最適な場所・規模の対策工が実施でき、工費の最小化が図れる。