

非溶結凝灰岩におけるトンネル掘削について

前田建設工業(株)	○横田 裕一
前田建設工業(株)	金子 和己
前田建設工業(株) 正会員	森田 篤
前田建設工業(株) 正会員	賀川 昌純

1. はじめに

東九州自動車道は福岡県北九州市を起点として大分県・宮崎県を經由し、鹿児島県鹿児島市に至る、延長約 436 km の高速自動車国道である。山口第 1 トンネルは大分県南部の佐伯 IC～蒲江 IC 間（区間延長 20.4 km）の中間部に位置する、延長 341m の 2 車線トンネルで、起点側坑口部には軟質で鋭敏性の高い阿蘇 4 火砕流堆積物非溶結凝灰岩（Aso-4）が堆積し、トンネル掘削時の切羽不安定および地表面への影響が懸念された。本報告では山口第 1 トンネル坑口部で実施した、地質調査、施工計画および施工結果の概要を報告する。



図 1.1 東九州自動車道（佐伯～蒲江）位置図

2. 起点側坑口部の地質概要

終点側坑口からトンネル中央部における地山は基盤の砂岩・砂岩優勢層および頁岩・頁岩優勢層で、起点側坑口部では阿蘇 4 火砕流堆積物（Aso-4）の非溶結凝灰岩、溶結凝灰岩が分布する（図 2.1）。非溶結凝灰岩層は火山灰質粘性土からなり、含水比が高く、指圧で容易に流動化するほどの超鋭敏性を示す非常に軟質な層であり、起点側坑口より延長 105m 区間に土被り 1.5D（22m）以下で分布する。非溶結凝灰岩の下位に分布する溶結凝灰岩はハンマーピックで削ることができる程度の硬さの軟岩（岩級区分 CL 級）主体の層である。

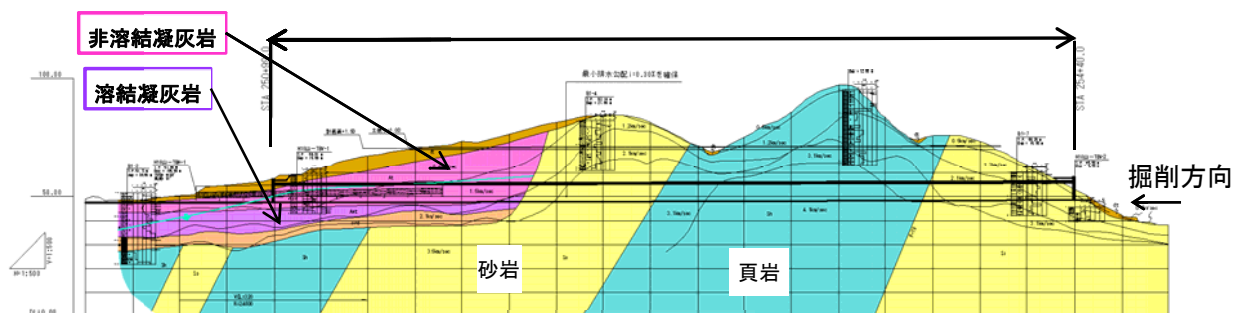


図 2.1 地質縦断面図

キーワード 山岳トンネル、非溶結凝灰岩、補助工法、調査ボーリング

連絡先 〒102-8151 東京都千代田区富士見 2-10-2 前田建設工業(株)土木事業本部土木部施工 Gr TEL 03-5276-5164

3. 阿蘇火砕流堆積物について

阿蘇火砕流堆積物は堅田川および山口川沿いに僅かに分布する。阿蘇火砕流堆積物は 30 万年前から 7～8 万年前にわたる阿蘇カルデラ形成時に発生した大規模な噴火サイクルによって生成されたもので、下位より Aso-1、Aso-2、Aso-3、Aso-4 に区分される。Aso-1 は、約 28 万年前に噴出した最も古い火砕流でほとんど全域において強く溶結している。Aso-2 は、下部は黒色の強溶結凝灰岩、上部はスコリアと火山灰を主とする弱溶結～非溶結を伴う。Aso-3 は白色の軽石や斑晶に富む黒色のスコリアからなる強溶結～非溶結の堆積物である。Aso-4 は約 8 万年前の噴出物で、石質岩片と白色や黄褐色の軽石からなる強溶結～非溶結の堆積物よりなる。これらのうち、山口第一トンネル起点側坑口部に出現するのは Aso-4 である。

4. 既往調査ボーリング結果

起点側坑口の対象区間では事前調査において鉛直調査ボーリングおよび、水平調査ボーリングが実施されている（図 4. 1）。鉛直調査ボーリングはトンネル坑口部付近のみで実施され、水平調査ボーリングは非溶結凝灰岩層の途中で終了している。非溶結凝灰岩層と砂岩層との境界は弾性波探査で推定され、その結果、起点側坑口の 102.5m 区間（TD233m～TD335.5m）を非溶結凝灰岩として計画されている。

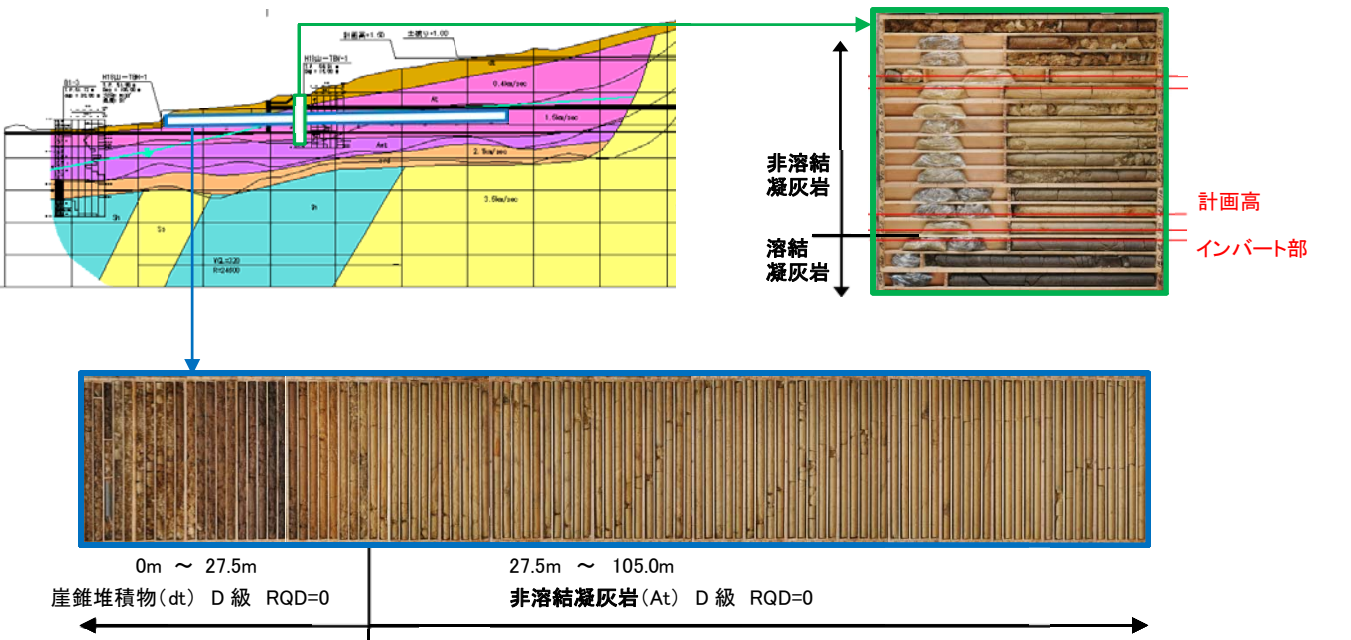


図 4. 1 既往調査ボーリング柱状図

非溶結凝灰岩（At）は火山灰質粘性土～砂質土からなり、RQD＝0、N 値は 10 以下の D 級岩盤である。室内試験結果は表 4. 1 の通りで、含水比が平均で 83.1%と高く、指圧でつぶれてドロドロになるような超鋭敏性（最大鋭敏比：437）を示す。そのため、非溶結凝灰岩は特殊土として扱われる。鉛直ボーリングではトンネル計画高付近に坑内水位が確認されているが、湧水量は 1 L/分程度と少量である。

5. 隣接工区の非溶結凝灰岩

山口第一トンネルに隣接する工区のトンネル切羽において非溶結凝灰岩が部分的に出現した。層厚 20～50 cm 程度のレンズ状ではあるが、ボーリングコアではなく、地山状態の非溶結凝灰岩を観察するこ

表 4. 1 土質試験結果

特 性	項 目	単 位	試 験 結 果
物理特性 一般	土粒子の密度	g/cm3	2.563 ～ 2.704
	土の湿潤密度	g/cm3	1.384 ～ 1.459
	自然含水比	%	75.3 ～ 105.3
粒 度	礫分	%	0 ～ 5.8
	砂分	%	22.9 ～ 41.5
	シルト分	%	17.6 ～ 37.3
	粘土分	%	27.1 ～ 48.6
	最大粒径	mm	2.0 ～ 4.8
コンシステンシー 特性	液性限界	%	69.4 ～ 71.0
	塑性限界	%	42.0 ～ 44.0
	塑性指数		26.3 ～ 29.7
強 度	一軸圧縮強さ	kN/m2	48.0 ～ 297.0
	せん断強さ	kN/m2	0.14 ～ 0.34
	鋭敏比		171 ～ 437
補助工法 検討条件	単位体積重量（非溶結）	kN/m3	14.0
	粘着力（非溶結）	kN/m2	30.0（一般値）
	内部摩擦角（非溶結）	°	30.0（一般値）
	N 値（非溶結）		10以下

とができた。この非溶結凝灰岩は乱さない状態であれば強度の小さな粘性土であるが、掘削機により乱してしまうと流動化し、切羽より流出する。含水比が高く流動性があり、強度はほとんど期待出来ない性状で(写真 5.1)、既往調査で採取され、乾燥してコア形状を保持している試料から想像される地山性状とは大きく相違していた。

山口第1トンネルでは、同種の非溶結凝灰岩が切羽全面に出現することが懸念され、施工には補助工法の適用のみでなく、トンネルの掘削方法を見直す必要性も生じた。



写真 5.1 非溶結凝灰岩の性状

6. 追加調査の実施および結果

非溶結凝灰岩におけるトンネル掘削の実績が乏しいため、非溶結凝灰岩の地山性状および堆積範囲を詳細に調査し、トンネル掘削計画を見直した。追加調査として、非溶結凝灰岩堆積部の地表面より3箇所の鉛直ボーリングを実施した(図 6.1)。

追加調査ボーリングでは、室内試験用試料はトリプルサンプリングにて採取し、また、孔内水平載荷試験を実施するなど、乱さない試料や原位置での性状や変形性を調査した。その結果、土質性状は当初調査と大きな差異が無いことが判明し、

また、トンネル掘削時の挙動予測検討に必要な物性値を得た(表 6.1)。また、非溶結凝灰岩の堆積範囲は当初の想定よりも小さい(砂岩との地層境界が起点側へ約 12.5m ずれる)ことが判明した。さらに、非溶結凝灰岩層下位の溶結凝灰岩層の層上端は当初予測よりも約 3.5m 上部に位置することが判明した(図 6.2)。

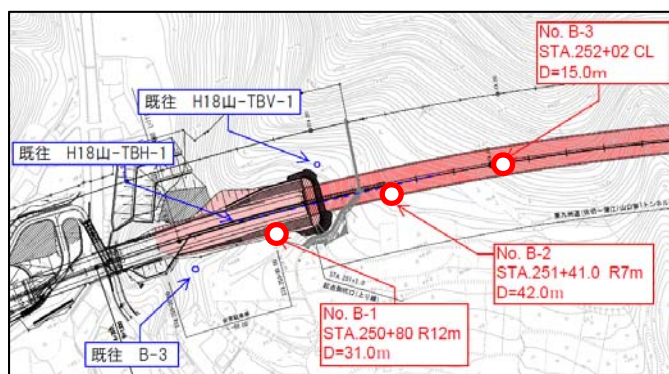


図 6.1 追加調査平面図

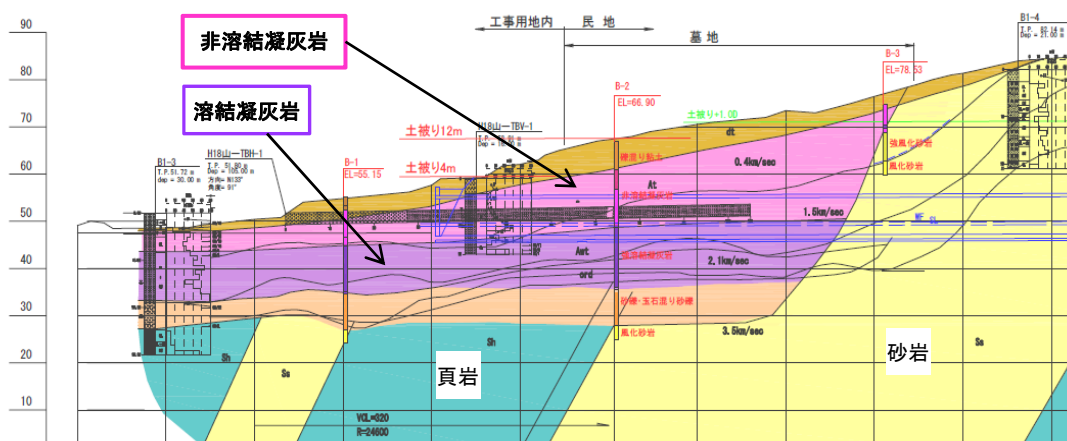


図 6.2 追加調査後の地質縦断面図

表 6.1 追加調査後の土質試験結果

特 性	項 目	単 位	試 験 結 果	
			当初	追加調査後
物理特性一般	土粒子の密度	g/cm ³	2.563 ~ 2.704	2.618 ~ 2.714
	土の湿潤密度	g/cm ³	1.384 ~ 1.459	1.320 ~ 1.651
	自然含水比	%	75.3 ~ 105.3	100.6 ~ 111.5
粒度	礫分	%	0 ~ 5.8	1.3 ~ 6.4
	砂分	%	22.9 ~ 41.5	25.2 ~ 62.8
	シルト分	%	17.6 ~ 37.3	26.7 ~ 38.6
	粘土分	%	27.1 ~ 48.6	9.1 ~ 41.7
	最大粒径	mm	2.0 ~ 4.8	9.5 ~ 4.8
コンステンシー特性	液性限界	%	69.4 ~ 71.0	52.5 ~ 88.7
	塑性限界	%	42.0 ~ 44.0	25.6 ~ 34.6
	塑性指数		26.3 ~ 29.7	26.9 ~ 54.1
強度	一軸圧縮強さ	kN/m ²	48.0 ~ 297.0	80.7 ~ 226.0
	せん断強さ	kN/m ²	0.14 ~ 0.34	0.14 ~ 0.34
	鋭敏比		171 ~ 437	-
補助工法検討条件	単位体積重量（非溶結）	kN/m ³	14.0	16.5
	粘着力（非溶結）	kN/m ²	30.0（一般値）	121
	内部摩擦角（非溶結）	°	30.0（一般値）	4.8
	N値（非溶結）		10以下	10以下
	変形係数（非溶結）	kN/m ²	-	6,035 ~ 32,610
	単位体積重量（溶結）	kN/m ³	-	17.4
	粘着力（溶結）	kN/m ²	-	337
	内部摩擦角（溶結）	°	-	21.0
	N値（溶結）		-	50以下

当初設計では、補助工法として注入式長尺鋼管先受工・注入式長尺鏡補強工およびレッグパイル工が計画されていた。補助工法の検討に関連して当初設計時点の地山条件と追加調査で新たに判明した地山条件を整理すると表 6.2 の通りである。

表 6.2 補助工法検討比較表

項 目		当 初 設 計	追 加 地 質 調 査 結 果		備 考
地質分布状況 (上位より順に)	礫混り粘土層	表層部より5m程度	同 左		
	非溶結凝灰岩	トンネル周辺ならびにトンネル基盤下方まで分布	当初想定よりも層厚が薄く、SL付近より上位に分布		
	溶結凝灰岩	トンネル基盤より下方に分布	当初想定よりも層厚が厚く、SL付近まで分布		
	砂 岩	STA.252+10付近でトンネル天端と交差	STA.251+95付近でトンネル天端と交差		
補助工法の採用理由		天端・切羽の安定対策 上半脚部の支持力不足対策(N＝10以下)	同 左 固結度の高い溶結凝灰岩(N値＝50以上)がSL付近に分布する区間では上半脚部対策不要		
補助工法採用区間		起点側坑口102.5m区間	起点側坑口90m区間(△12.5m)		
補助工法検討条件	ゆるみ荷重	全土被り荷重	同 左		
	地下水位	考慮しない	同 左		
	土質定数	非溶結凝灰岩(At層)	非溶結凝灰岩(At層) 溶結凝灰岩(Awt層)		
	単位体積重量	14.0kN/m ³	16.5kN/m ³	17.4kN/m ³	
	粘着力	30.0kN/m ²	121kN/m ²	337kN/m ²	
	内部摩擦角	30.0°	4.8°	21°	
	N値	10以下	10以下	50以上	
総 評		○当初地質想定との大きな相違点は、非溶結凝灰岩ならびに溶結凝灰岩の分布厚さ、分布高さである。 ○室内試験の結果、単位体積重量、粘着力が大きくなり、内部摩擦角が小さくなったことから、先受け鋼管に作用する荷重は大きくなる。 ○固結度の高いN値50以上の層が当初推定よりも高い位置に分布することが確認されたため、脚部補強対象範囲を小さくすることが可能となる。			→先受け工の剛性アップ →加背割り変更のみ区間 →脚部補強仕様変更

7. 補助工法の検討

追加調査によって、非溶結凝灰岩と溶結凝灰岩との境界位置が当初想定より高い、トンネル SL 付近に位置することが判ったため、トンネル掘削計画では上半盤の高さを SL まで下げ、上半支保工を固結度の高い溶結凝灰岩に支持させることにした（加背割の変更）。また、非溶結凝灰岩の物性値は当初想定に比べて単位体積重量が大きく、強度は小さいことが判ったため、注入式長尺鋼管先受工の剛性を高めて（鋼管径φ114.3mmに変更）天端および地表面の沈下抑制を図り、鏡補強工については注入材を粒子が細かな粘性土へも入りやすいシリカレジンに変更して、切羽前方地山の補強を図ることとした（図 7.1）。

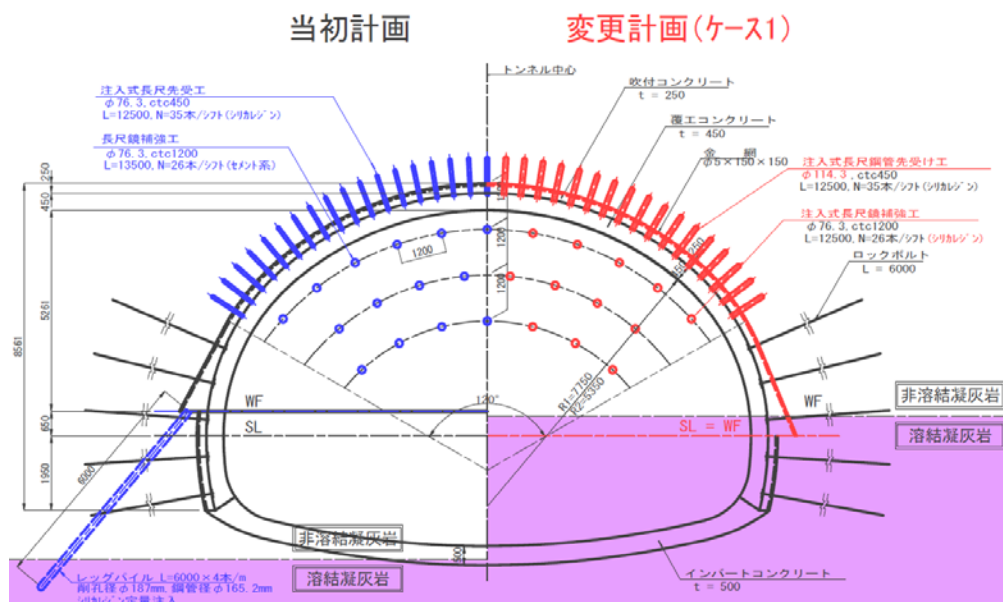


図 7.1 補助工法変更比較図

追加調査結果を反映して見直した、掘削加背割および補助工法をまとめると以下の通りで、この変更計画を「ケース 1」とした。

- ①加背割り変更で、上半盤＝SL とする。
- ②注入式長尺先受工の鋼管径を $\phi 114.3$ mm とする。
- ③注入式長尺鋼管補強工の注入材をシリカレジンをとする。

見直した計画におけるトンネル掘削時の挙動を FEM 解析にて予測したところ、地表面沈下量は 39 mm で、目安値の 50 mm を下回る結果となった。追加調査の結果、特に溶結凝灰岩層が上半支保脚部を直接支持できる高さにあることが判明したおかげで、当初計画されていたレグパイル工を施工しなくても、切羽の安定を保つことができる経済的な施工を計画することができた。

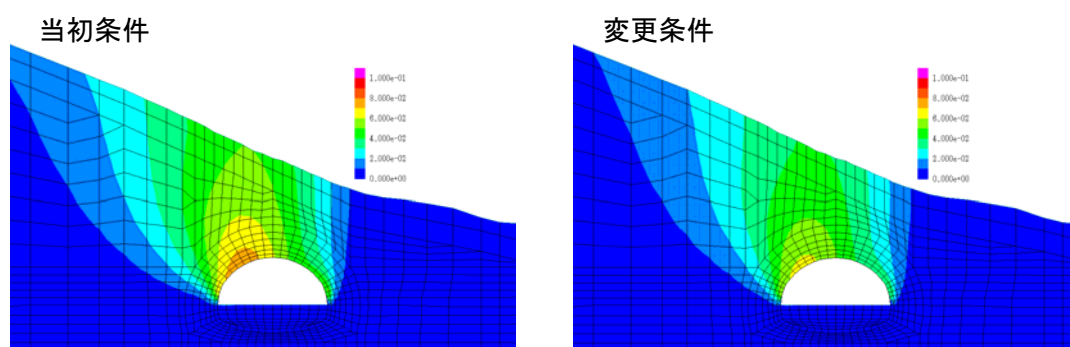


図 7.2 沈下量解析比較図

溶結凝灰岩はほぼ水平に堆積していると想定し、上記のケース 1 を計画したもの、実際の溶結凝灰岩層の境界は不陸があることも想定される。そこで、ケース 1 の計画に加えて、非溶結凝灰岩と溶結凝灰岩の境界位置が SL より下位(下半部)に出現する場合および、さらに下位のインバート部に推移する場合を想定し、ケース 2 およびケース 3 としてそれぞれに必要となる対策を検討した。

ケース 2 およびケース 3 では、支保工の脚部沈下が最も大きな懸念事項となる。脚部沈下の対策はトンネル掘削機械および設備を変更せず、地山状況に応じて迅速に対応できる方法を検討した。ケース 2 およびケ

ケース3では上半支保脚部沈下対策として、上半脚部先行補強工を検討した。（レッグパイルは資機材の調達に時間を要するため検討から外した）（図7.3）。上半脚部先行補強工は、上半脚部下の地山（上半支保工脚部を支える地山）を上半掘削前に注入式の先受鋼管により補強する方法である。さらにケース3では上半切羽から後方10m程度以内の離れで、ストラットおよび吹付けコンクリートによりインバートを閉合することとした（早期断面閉合）。

- ・ケース2：溶結凝灰岩層上端がSLより下位（下半部）にある場合

ケース1の対策に加え、上半脚部先行補強工（鋼管径 $\phi 114.3$ mm, ctc450 mm, L=12.5m, 注入材：シリカレジン）を施工する（層境界位置に応じて最大6本）。

- ・ケース3：溶結凝灰岩層上端がインバート部にある場合

ケース2の対策に加え、仮インバート工（ストラット：H-200, 吹付厚25 cm）による早期断面閉合を実施する。

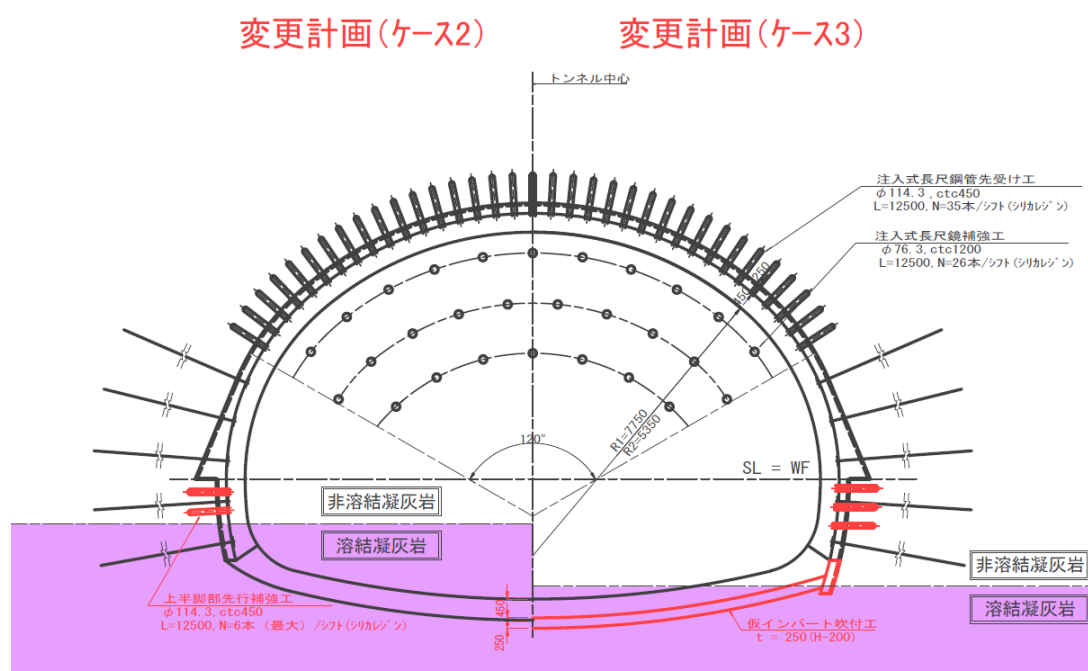


図 7.3 補助工法変更計画図（ケース2、ケース3）

溶結凝灰岩層上端がインバート部にある場合（ケース3）について、FEM解析でトンネル周辺の地山挙動を予測したところ、塑性化しやすいトンネル下部の地山が早期断面閉合により、塑性化が大きく抑制される結果となった。

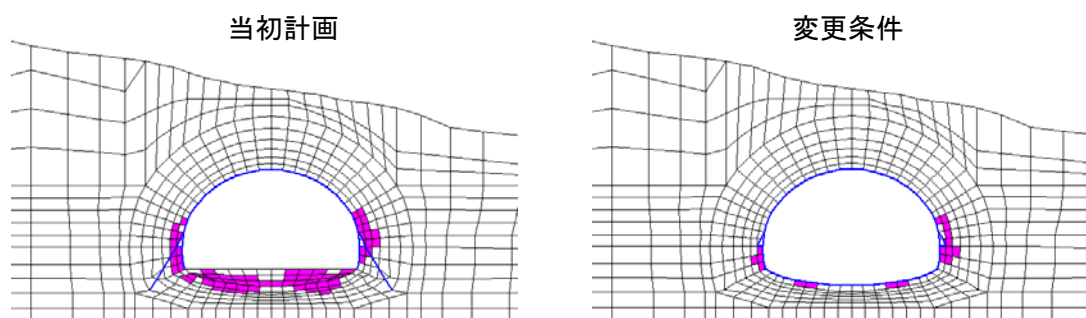


図 7.4 塑性化領域比較図

8. 非溶結凝灰岩の施工

TD262.8mにおいて砂岩主体の切羽天端から溶結凝灰岩を介在し非溶結凝灰岩が出現した（写真 8.1）. 外周部の探りボーリングの結果では約4m前方で非溶結凝灰岩が天端120° 範囲に展開することが予測されたことから、「ケース1」の上半加背割り変更，注入式長尺先受工，注入式長尺鏡補強工を実施した. 非溶結凝灰岩は，掘削延長約9m（掘削補助工1ｼﾌﾄ）で上半切羽全面を支配した（写真 8.2）.



写真 8.1 切羽状況 TD262.8m

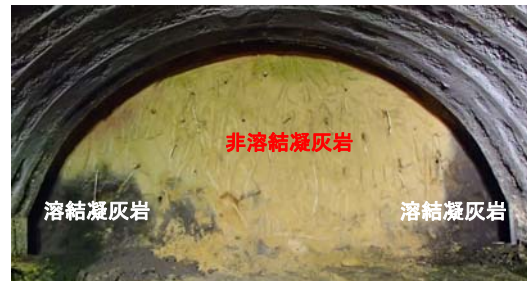


写真 8.2 切羽状況 TD271.8m

その後の非溶結凝灰岩と溶結凝灰岩の境界に関して，追加調査ボーリングの結果では，SL 付近で水平に推移すると予想しているものの，特に上半支保工脚部の地山状況は切羽安定上の要となる. そのため，上半支保工脚部の探りボーリングを実施し（写真 8.3），地質を事前に確認しながら掘削を続けた. 右側脚部は概ね溶結凝灰岩であったのに対し，左側脚部は非溶結凝灰岩がしばしば観察された. 結果的には，非溶結凝灰岩が切羽に出現した TD262.8mから出口側坑口の TD335.5mまで上半支保工脚部を溶結凝灰岩で支持できたため，ケース2，ケース3を用いることは無く掘削することができた（写真 8.4～8.7）.



写真 8.3 上半脚部探りボーリング状況



写真 8.4 切羽状況 TD292.8m



写真 8.5 切羽状況 TD312.8m



写真 8.6 切羽状況 TD322.8m



写真 8.7 切羽状況 TD335.8m

9. 補助工法の施工

TD262.8mにて非溶結凝灰岩が出現してから、注入式長尺先受工を全8シフト(9m/シフト)280本(3395m)、および注入式長尺鏡補強工を208本(2522m)施工した(写真8.8)。注入材にシリカレジンを使用し、その注入実績は、注入式長尺先受(改良径45cm)で14.0kg/m(計画の114%)、注入式鏡補強(改良径20cm)で3.4kg/m(計画の100%)となった。

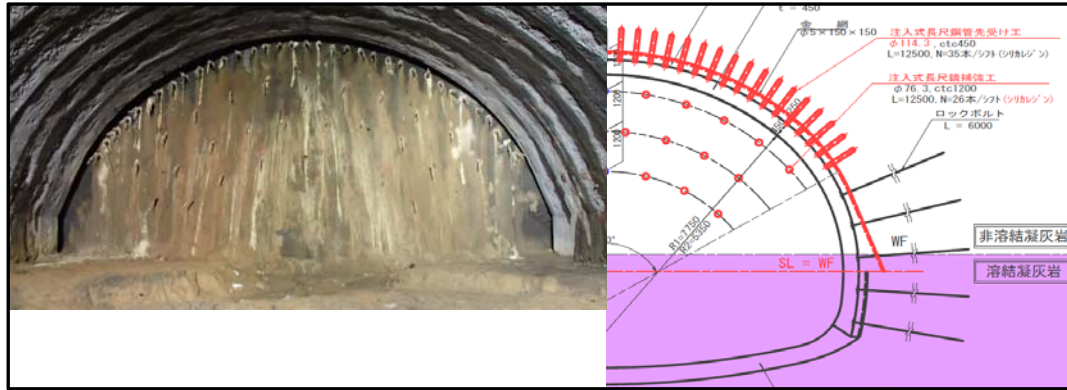


写真 8.8 補助工法実施状況

10. おわりに

特殊土である阿蘇4火砕流堆積物非溶結凝灰岩をNATMで施工する実績は少く、掘削には何らかの補助工法が必要となる。また、地質分布状況や地質物性値に関するより詳細な情報を事前に得ることはより重要かつ有用になると思われる。今回の追加調査の実施は、地質分布状況および物性値の精度を向上し、経済的な補助工法の立案に活用することができたため、有効な調査であった。幸いにも非溶結凝灰岩の分布範囲は上半のみであり、非溶結凝灰岩が下半やインバート部にも出現する場合の「ケース2」「ケース3」を実施することなく、掘削を完了することができた。今後、「ケース2」「ケース3」を実践できる機会があれば、検討結果を検証したいと考える次第である。