

現場条件の変化に対応したトンネル補助工法について

田中 優大¹・荒木 和政¹

¹九州地方整備局 北九州国道事務所 計画第二課 (〒802-0803 福岡県北九州市小倉南春ヶ丘10-10) .

岡垣トンネル、城山トンネルの工事は北九州市から福岡市までの間で唯一の2車線区間である国道3号岡垣バイパスの4車線化事業の一部としてⅡ期線トンネルを新設するものである。

岡垣トンネルでは掘削に先行して行った水平ボーリングや施工中の変位計測等の結果から、城山トンネルでは近接するⅠ期線トンネルへの影響を検討した結果から、補助工法を追加検討し、施工している。

本稿ではそれら事例の報告するとともに、現場条件の変化に対応したトンネル補助工法について考察する。

キーワード トンネル、小土被り部、近接施工、補助工法、FEM解析

1. はじめに

国道3号岡垣バイパスは、北九州市から福岡市までの間で唯一の2車線区間であるため、交通ボトルネックを解消し、信頼性の高い物流ネットワークの構築、交通安全の向上等を目的とした4車線化事業である(図-1)。

本稿は、この岡垣バイパス4車線化事業の岡垣トンネル(L=276m)、城山トンネル(L=462m)における調査・設計、施工時における現場条件の変化とその対応について報告する。



図-1 位置図

2. 岡垣トンネル、城山トンネルの地質概要

岡垣トンネル付近の地質は凝灰岩、凝灰角礫岩からなる関門層群で占められ、表層を崖錐堆積物が薄く被覆している。

城山トンネル周辺は、地質は、関門層群の中でも変質した安山岩質の溶岩、凝灰岩、凝灰角礫岩を主体として一部堆積岩を挟んでいる下関層群である(図-2)。

3. 現場条件の変化と対応策

(1) 岡垣トンネルの小土被り区間

岡垣トンネルのNo.227+17付近では、偏圧を伴う沢地形で、土被りが1D以下の小土被り部36.5mとなっている。

トンネル掘削に先行して行われた坑口部からの水平ボーリングではD級～風化したCL級の地山が分布することが想定され、地山の状態も想定より亀裂が多い状態であることが確認された。既存垂直ボーリングでは、広い範囲で確認されていたCM級岩盤が、今回の先進水平ボーリングでは確認できなかった(図-3)。この要因として鉛直に伸びる硬質部を主に掘削したためと考えられた。さらに偏圧を伴う小土被り部であり、地質も未固結地山で、風化岩が分布しているため、当該箇所における懸念事項として、偏圧地形および小土被りに伴うトンネルへの土圧の作用による支保部材の不安定化、未固結地山および亀裂が発達した風化地山のトンネル掘削における地山のゆるみ拡大、トンネル掘削時における天端の崩落に伴う過大な地表面沈下の発生が考えられた。そこで、切羽安定対策(天端の安定、鏡面の安定)、地表面沈下対策として、長尺鋼管フォアパイリングの追加を検討した。

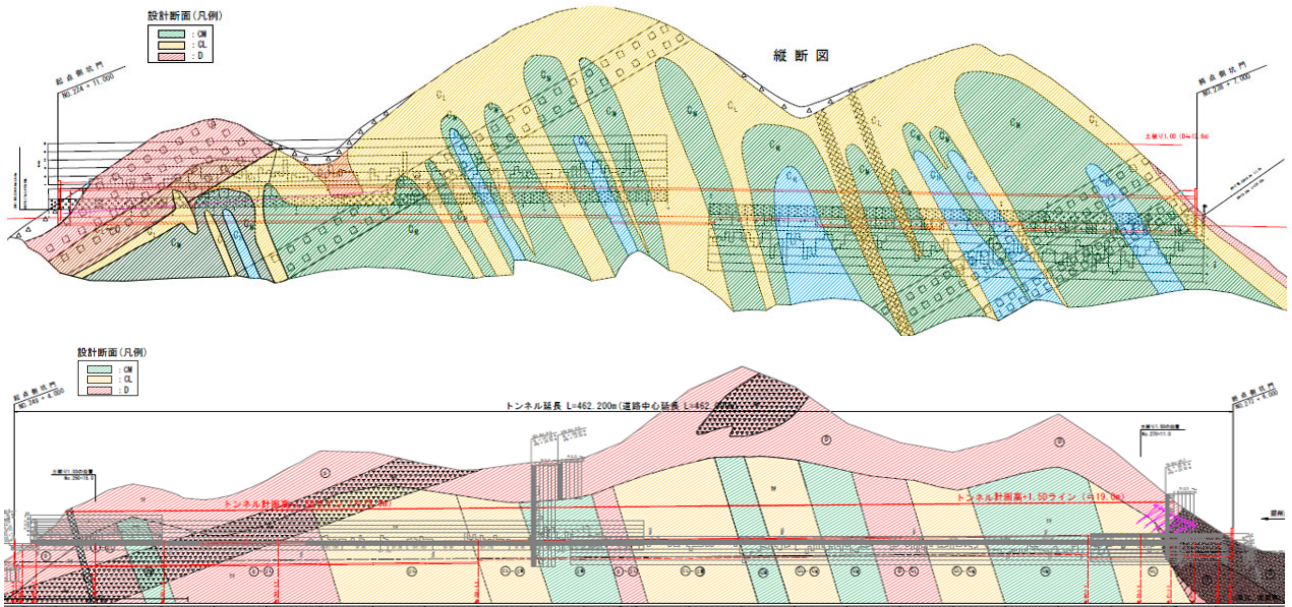


図2 地質縦断面図, 上: 岡垣トンネル, 下: 城山トンネル

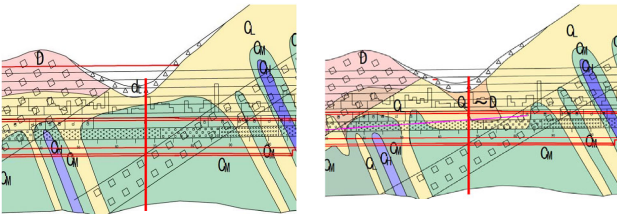


図3 小土盛り部地質縦断面図, 左: 既往調査, 右: 先行調査

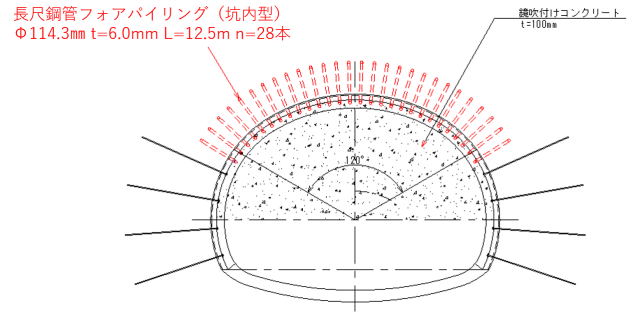


図4 補助工法パターン図

切羽の安定を確認するため、以下の補助工法について極限解析による評価を行った。

- ①先受け工がない場合
- ②短尺フォアポーリング (注入式)
- ③長尺フォアパイリング (注入式, $\phi 76.3$)
- ④長尺フォアパイリング (注入式, $\phi 114.3$)

その結果、CL 級地山では注入により切羽は安定する結果となったが、緩み荷重が鋼管に作用する場合に破断する結果となったため、④長尺フォアパイリング ($\phi 114.3$) を追加することとした。また、D 級地山ではいずれも先受け工だけでは切羽が不安定な結果となったため、緩み荷重の影響も考慮して、④長尺フォアパイリング ($\phi 114.3$) に加え、長尺鏡ボルト工を併用することとした (図4.5)。

さらに当初設計の支保パターンと補助工法を採用した支保パターンの2ケースについてFEM解析を行い、トンネル変位、支保部材の健全性、地山の安定性を評価した。トンネル変位については、天端沈下量が22.86mmから15.20mmとなり、補助工法の効果が得られている。支保部材の安全性については、どちらのケースでもトンネル掘削時の発生応力が許容応力および設計耐力を満足した。地山の安定性については、どちらのケースもやや不安定領域であったが、当初設計の場合では不安定領域に近く、補助工法を採用した場合は安定領域

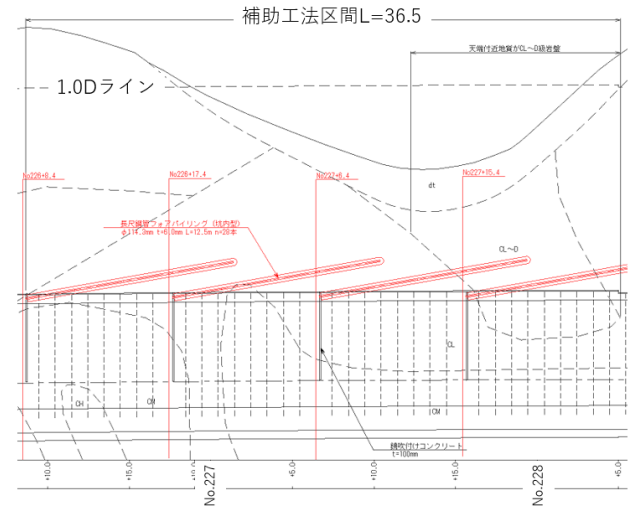


図5 補助工法施工位置図

に近づくため、補助工法が有効であることが確認できた。

(2) 岡垣トンネルの掘削に伴う変状

岡垣トンネルの No.225+15 から設計パターン DIIIで掘削を進めていたところ、AGF 工の範囲外の掘削が始ま



図-6 坑口右側 吹付クラック発生状況



図-7 ロックボルト座金変形状況

ると、地山の緩みから施工完了区間での吹付コンクリートクラックの発生（図-6）、ロックボルト座金が変形（図-7）した。さらに、No.225+00, 05, 10 で管理基準値Ⅲ（DⅢ）の天端沈下 30 mmを超え、No.225+10, 15 では地表面沈下 30 mmを超えたため、掘削を中止して対策工の検討を行った（図-8）。

地山の緩みの対策工として、増しロックボルトと仮インバートを選定し、対策工の効果について FEM 解析にて検証した。その結果として地表面沈下、天端沈下ともに 10 mm程度の抑制効果が確認された（図-10）。仮インバートの施工により、鋼製支保工および吹付コンクリートの発生応力度は、変状対策ありのほうが大きな値となったものの、許容応力度以下であることが確認された。ロックボルトの軸力については、増しロックボルトの補強により軸力が分散され、設計耐力に十分な余裕を確保することができた。

(3) 城山トンネルの既設トンネル近接施工

岡垣トンネルの坑口付近で地山の緩みによるトンネル天端付近の変位が確認されたことから、城山トンネルにおいても地質調査等の分析も踏まえ、I期線トンネルに対する緩み領域の干渉について近接度を検証した。

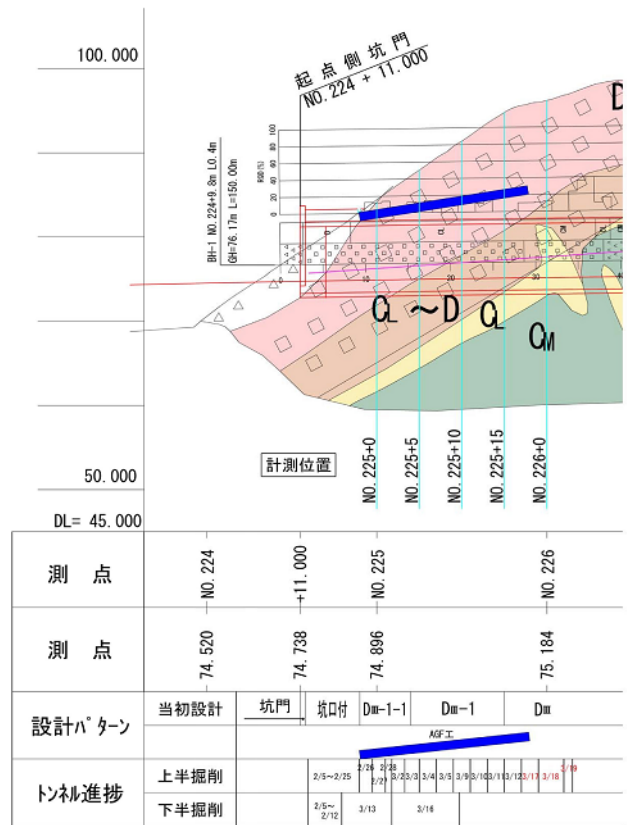


図-8 起点側坑口地質縦断面図

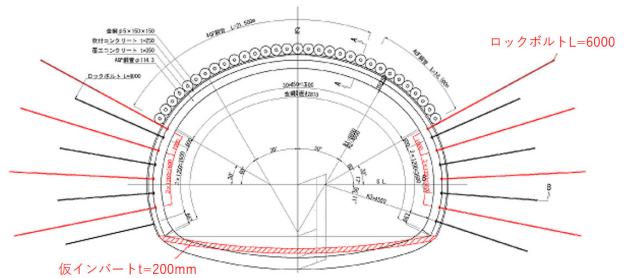


図-9 補助工法パターン図

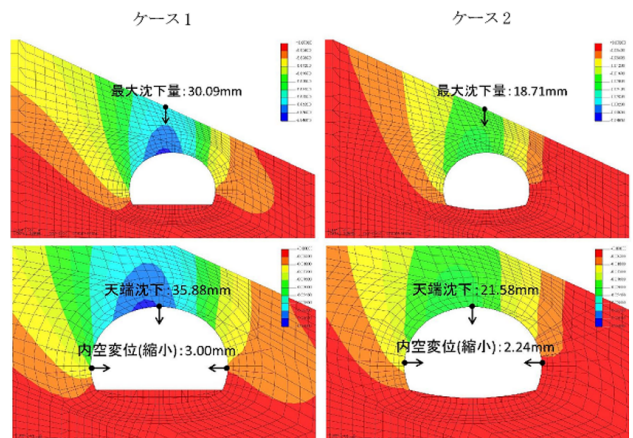


図-10 地表面最大沈下量、天端沈下量、左：変状対策なし、右：変状対策あり

その結果、直接影響領域（1.5D未満、D=1.5m）に該当することがわかった。さらにI期線トンネルの施工実績では、矢板工法により終点側坑口より15mまで掘進した

【アンカーとトンネルの離隔】
・ 2.6m (既設アンカーU-2、アンカー体端部)

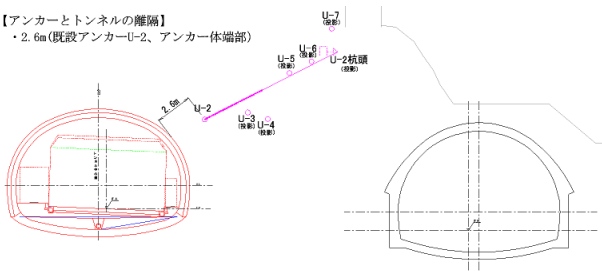


図-11 既設アンカーとII期線トンネルの位置 横断面

解析ケース	Case1		Case2		Case3		Case4	
	DIII標準支保パターン		DIII標準支保パターン+長尺鋼管先受け工(天端120°範囲)		DIII標準支保パターン+長尺鋼管先受け工(右側120°範囲)		DIII標準支保パターン+長尺鋼管先受け工(右側90°範囲)	
切羽の安定性評価	天端沈下量: 28.1mm <許容値 33.0mm	○	天端沈下量: 25.0mm <許容値 33.0mm	○	天端沈下量: 24.5mm <許容値 33.0mm	○	天端沈下量: 25.5mm <許容値 33.0mm	○
周辺地山の安定性	1期線切羽 ゆるみ安全率=1.0以上 >1.0	○	ゆるみ安全率=1.0以上 >1.0	○	ゆるみ安全率=1.0以上 >1.0	○	ゆるみ安全率=1.0以上 >1.0	○
	既設切羽 ゆるみ安全率=0.3~0.4 <1.0	×	ゆるみ安全率=0.6~0.7 <1.0	×	ゆるみ安全率=0.9~1.0 =1.0	○	ゆるみ安全率=0.7~0.8 <1.0	×
支保工の評価	軸力 σ = -0.88N/mm ² <許容値 -6.75N/mm ²	○	σ = -0.68N/mm ² <許容値 -13.5N/mm ²	○	σ = -0.83N/mm ² <許容値 -13.5N/mm ²	○	σ = -0.83N/mm ² <許容値 -13.5N/mm ²	○
	N=106.3kN 軸力 <許容値 170kN	○	N=104.1kN 軸力 <許容値 170kN	○	N=100.6kN 軸力 <許容値 170kN	○	N=101.3kN 軸力 <許容値 170kN	○
	脚付支保 σ (N±10) = 72.7N/mm ² <許容値 ±210.0N/mm ²	○	σ (N±10) = 82.7N/mm ² <許容値 ±210.0N/mm ²	○	σ (N±10) = 116.3N/mm ² <許容値 ±210.0N/mm ²	○	σ (N±10) = 116.3N/mm ² <許容値 ±210.0N/mm ²	○
I期線トンネル掘削の評価	最大引張 σ 0.72N/mm ² 応力増分 <許容値 1.68N/mm ²	○	0.78N/mm ² <許容値 1.68N/mm ²	○	0.60N/mm ² <許容値 1.68N/mm ²	○	0.57N/mm ² <許容値 1.68N/mm ²	○
	最大圧縮 σ -0.90N/mm ² 応力増分 <許容値 -5.4N/mm ²	○	-0.91N/mm ² <許容値 -5.4N/mm ²	○	-0.87N/mm ² <許容値 -5.4N/mm ²	○	-0.86N/mm ² <許容値 -5.4N/mm ²	○

図-12 FEM解析結果

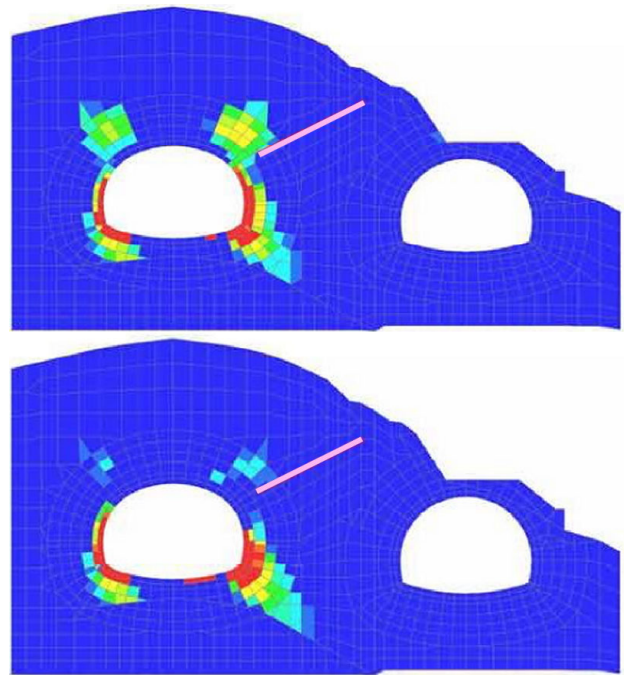


図-13 ゆるみ安全率コンタ図, 上: 補助工法なし, 下: 長尺鋼管先受け工(右側120°)

際に、表面すべりに伴う根巻コンクリートの亀裂や抱き擁壁の変位が発生したため、抑止杭工がトンネルに並行する形で施工されており、杭頭部の支点反力用アンカーがII期線トンネルと近接している(図-11)。そこで、FEM解析により近接施工が及ぼすI期線トンネルへの影響を予測し、補助工法の必要性について検討した。対策工の選定は、トンネル掘削に伴う緩み抑制効果として、長尺鋼管フォアパイリングの追加を検討した。

DIII標準支保パターンと長尺鋼管フォアパイリングを採用した場合でFEM解析を行い、評価した結果、DIII標準支保パターンの場合、天端沈下量、支保工の軸力・応力等も許容値以下であることがわかった(図-12)。しかし、II期線トンネル掘削に伴う既設アンカー近接部へのゆるみが安全率0.3~0.4となり、緩み拡大が懸念された。そこで、長尺鋼管先受け工(右側120°範囲)を採用することで既設アンカー周辺のゆるみを軽減することが確認できた(図-13)。

4. おわりに

本稿では、岡垣トンネルと城山トンネルにおける、現場条件の変化に対応した補助工法の追加について報告した。補助工法の追加によって岡垣トンネル、城山トンネルともに安全にトンネル掘削を行うことができ、工事も順調に進んでいる。トンネル工事は地質状況の変化に対応した追加工法が多い工種であり、工事費の増加や工事の中止による工期の延長につながる。これは現状におけるトンネル設計の課題である。本工事では、特に小土被り部に追加工法を必要とした。対策案にはFEM解析により工法を選定した。しかし、当初設計段階では、全断面を解析するのではなく、構造物近接箇所などの二次的災害が発生する特殊ケースでの検討事例が多い。

現在は、施工中の前方探査技術が多く開発されており、切羽からの弾性波探査により、地表からの事前調査に比べてより確実に前方の地山状況を把握できる。

今後は、地山劣化部による工事費増額だけでなく、当初より良好な地山の場合は支保や補助工法を低減させるなど、コスト削減に努めていきたい。