

風化破碎地山における超大断面トンネルの施工

佐藤 大輔

本工事は、三陸沿岸道路整備事業の一環として気仙沼唐桑工区（約 11 km）のうち気仙沼第 2 号トンネル $L = 1,167$ m を建設するものである。

三陸沿岸道路は、宮城県と岩手県の県境に向かって北上する区間から成る。当トンネルはこの中間部に位置し、唐桑側坑口は唐桑南 IC（仙台方面）のオンランプにあたることから、坑口から 197.7 m の区間は加速車線を加えた 3 車線の拡幅断面となり、トンネル幅は標準部の 14.1 m から拡幅部最大の 19.7 m まで 3 段階に拡幅され、唐桑側坑口トンネル断面は日本有数の大きさとなる。

本報告は、超大断面トンネルの決定および中央導坑の施工実績、超大断面の施工について記述する。

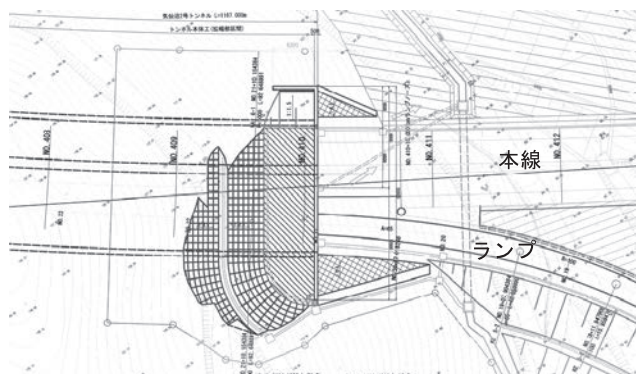
キーワード：超大断面、風化破碎帯、坑口部、偏圧、フットパイル、超長尺フォアパイリング

1. はじめに

本工事は、三陸沿岸道路整備事業の一環として気仙沼唐桑工区（約 11 km）のうち気仙沼第 2 号トンネル $L = 1,167$ m を建設するものである。

当現場の特徴として、終点側の唐桑側坑口は唐桑南 IC（仙台方面）のオンランプにあたり、トンネル坑内で本線と合流するための加速車線を加えた 3 車線の拡幅断面となる。そのため、トンネル幅は標準部の 14.1 m から拡幅部最大の 19.7 m まで 3 段階に拡幅されており、唐桑側坑口トンネル断面は日本有数の大きさとなる（図—1）。

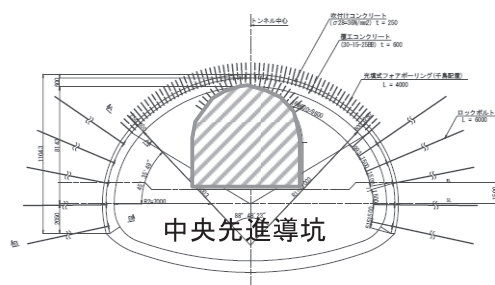
本報告では、中央導坑の施工実績、超大断面の施工について記述する。



図—1 終点側（唐桑側坑口）平面図

2. 施工順序

本トンネルは、トンネル断面が 200 m^2 を超える超大断面のため、上半中央に先進導坑を掘削し、切羽前方の地山を確認しながら施工を行う「中央導坑先進拡幅掘削工法」を採用している（図—2）。



D III a-L1 断面（内空縦横比：0.52）

中央導坑先進工法（掘削幅：7.9m）

図—2 D III a-L1 断面と中央導坑

超大断面区間の対策工（補助工法）の選定にあたり、中央導坑の施工実績を考慮し、トンネル掘削による周辺地山のゆるみ領域が広範囲にならないよう、必要な補助工法の検討を行った。

その結果、超大断面区間での補助工法選定フローを作成し、補助工法の種類、規模等の比較検討後、本坑掘削を開始した。

超大断面の施工にあたっては、掘削時の地山挙動が

重要となるため、本トンネルでは大断面区間での計測頻度を5m毎とし、断面あたりの計測点を7測点へと強化した。

超大断面掘削中も実績の収集と分析を随時行い、その評価を実施、試行しながら掘削を進めた。

3. 中央導坑の施工

受注時の設計における終点側坑口の地質は、崖錐層より下方に「健岩（DI～CI級）」が分布することから、天端の安定対策が必要ないと判断されていた。

受注後の鉛直ボーリングによる追加調査の結果、トンネル天端上部は土砂および強風化（CL～D級）が堆積しており、トンネル断面内は20%～30%の破碎礫を含む軟岩I（CM～CL級）であった。

(1) 地質（切羽観察記録）

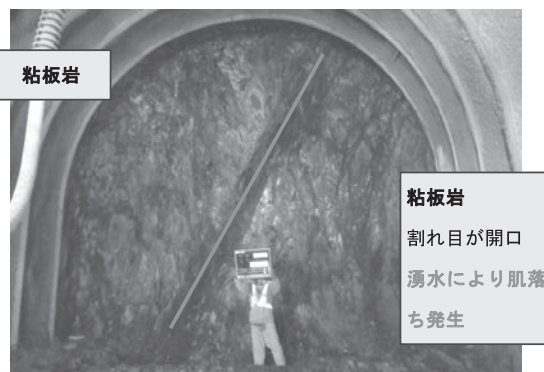
中央導坑掘削時の地質は、坑口から70m区間においては破碎粘板岩が連続的に出現し、特に支保No.11付近では、切羽左側で比較的堅硬な砂岩、切羽右側ではスレーキング性が高く、湧水により泥濘化する黒色を呈した粘板岩が出現した（写真—1）。



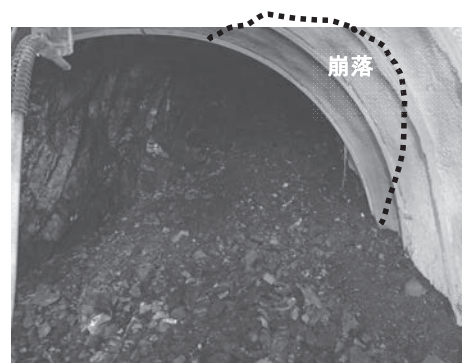
写真—1 支保No.11 切羽状況

支保No.11～支保No.25は茶色に風化した粘板岩と黒灰色の粘板岩で構成され、切羽の進行とともに右側から黒灰色の粘板岩が切羽全体に広がる。湧水は滴水程度ではあるが、開口した割れ目に湧水が入り込み、ゆるみを生じさせたため切羽の肌落ちが起きた（写真—2）。

支保No.25～支保No.67は粘板岩が主体で、地殻変動による大きな褶曲構造が存在し、岩片は非常に脆い。湧水もあり、湧水圧による切羽崩落が起きた（写真—3）。



写真—2 支保No.22 切羽状況



写真—3 湧水をともなう切羽崩落状況

(2) 湧水量

坑口から支保No.25までは滴水程度であったが、支保No.26掘削時に、200ℓ/min以上の湧水とともに切羽の天端が崩落した（写真—2）。

切羽の水位低下を目的として、水抜きボーリングを3本行った（φ76.3mm, L=12.5m）。水抜きボーリングのうち1本で30ℓ/minの湧水が層境で発生しており、坑口より30m付近まで10～20ℓ/minの湧水を確認している。以奥では、2～3ℓ/min程度の湧水が発生している。

(3) 計測結果

表—1によると、坑口部の脚部沈下量が最大22mmと大きい。これは脚部に出現した粘板岩が湧水による影響を受けて泥濘化し、支持力が低下したためと考えられる。切羽崩落した箇所（支保No.25）までの平均値は、天端沈下が-6.0mm、脚部沈下が-14.1mm、内空変位が-10.3mmであり、脚部沈下および内空変位が10mmを超える結果となった。

スレーキング性の高い粘板岩が主に占める区間（支保No.25～No.65）の平均値は、天端沈下が-4.2mm、脚部沈下が-5.1mm、内空変位が-4.9mmであった。この区間ではAGFや注入式鏡ボルトの施工により緩み領域を抑制して、変位が抑えられていると考えられ

表-1 計測結果一覧表

測点 (支保No)	天端 沈下	脚部 沈下	内空 変位	備考
No.409 + 15.5 (No.7)	-8.7	-22.4	-14.7	坑口部 ・右側脚部泥濘化 ・脚部が管理基準 値Iを超える。 ・内空変位も10mm を超えている
No.409 + 10.5 (No.12)	-6.2	-16.4	-10.2	
No.409 + 5.5 (No.17)	-5.2	-12.4	-8.6	
No.409 + 0.5 (No.22)	-3.8	-5.3	-7.5	
No.408 + 15.5 (No.27)	-3.6	-4.0	-1.0	崩落箇所～No.70 ・スレーキング性の高い 粘板岩主体 ・注入効果により 変位が抑えられ ている。 ・左側から右側に 向かって変位が 見られ、偏圧を 受けている。
No.408 + 11.5 (No.31)	-2.2	-5.4	-7.7	
No.408 + 6.5 (No.36)	-3.9	-2.9	-4.4	
No.408 + 2.5 (No.40)	-2.8	-7.2	-9.0	
No.407 + 17.5 (No.45)	-7.6	-5.2	-4.1	
No.407 + 12.5 (No.50)	-4.8	-5.1	-8.7	
No.407 + 7.5 (No.55)	-3.0	-4.3	-2.3	No.70 以奥 ・天端沈下、内空 変位ともに少な く安定してい る。
No.407 + 2.5 (No.60)	-9.4	-8.9	-6.7	
No.406 + 17.5 (No.65)	-0.6	-3.1	-2.2	
No.406 + 12.5 (No.70)	-2.5	-4.0	-3.5	
No.406 + 7.5 (No.75)	-5.0	-6.5	-4.6	
No.406 + 2.5 (No.80)	-1.6	-4.6	-3.2	
No.405 + 17.5 (No.85)	-2.4	-2.1	-2.6	
No.405 + 12.5 (No.90)	-3.4	-2.2	-3.4	
No.405 + 8.5 (No.95)	-6.2	-2.6	-4.6	

る。風化砂岩－粘板岩の互層である区間の平均値は、天端沈下が－3.5 mm、脚部沈下が－3.7 mm、内空変位が－3.7 mmであった。2区間（スレーキング性の高い粘板岩の区間、風化砂岩－粘板岩互層区間）に比べ、坑口部（切羽崩落した箇所までの区間）の変位が明らかに大きい。

天端沈下量と脚部沈下量は12 mm、内空変位量は21 mmを管理基準値Iとしていた。これに対し、実

際の天端沈下量の最大値は9 mm、内空変位量の最大値は15 mmであり、管理基準値I以下であったが、脚部沈下量の最大値は坑口部で22 mmであり、管理基準値Iを大きく超えて要注意体制となったため、計測頻度の強化を行った。

測定点の変位方向（変位ベクトル）は、坑口から84.5 mまでは切羽に向って左上から右下方向となっている（図-3）。これは、坑口付近の地形と一致しており、左から右へと偏圧を受けているためと思われる。

経時変化グラフでは、坑口部では切羽が3.5D～4D（D：トンネル掘削幅）進んだ時点で変位が収束している。また、変位の大きい右側脚部の変位速度は3 mm/日である。

スレーキング性の高い粘板岩の区間では、変位速度は1 mm/日、変位収束は切羽が2.5D～3D進んだ時点となっている。また、風化砂岩－粘板岩互層区間は、変位速度は1 mm/日、変位収束は切羽が1.5D進んだ時点となっている。このことにより、坑口部は、スレー

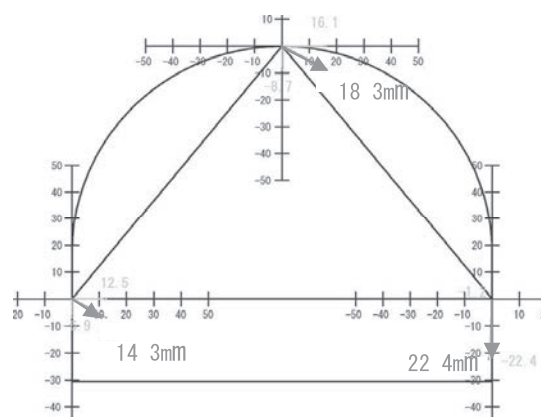


図-3 変位ベクトル図（支 No.7）

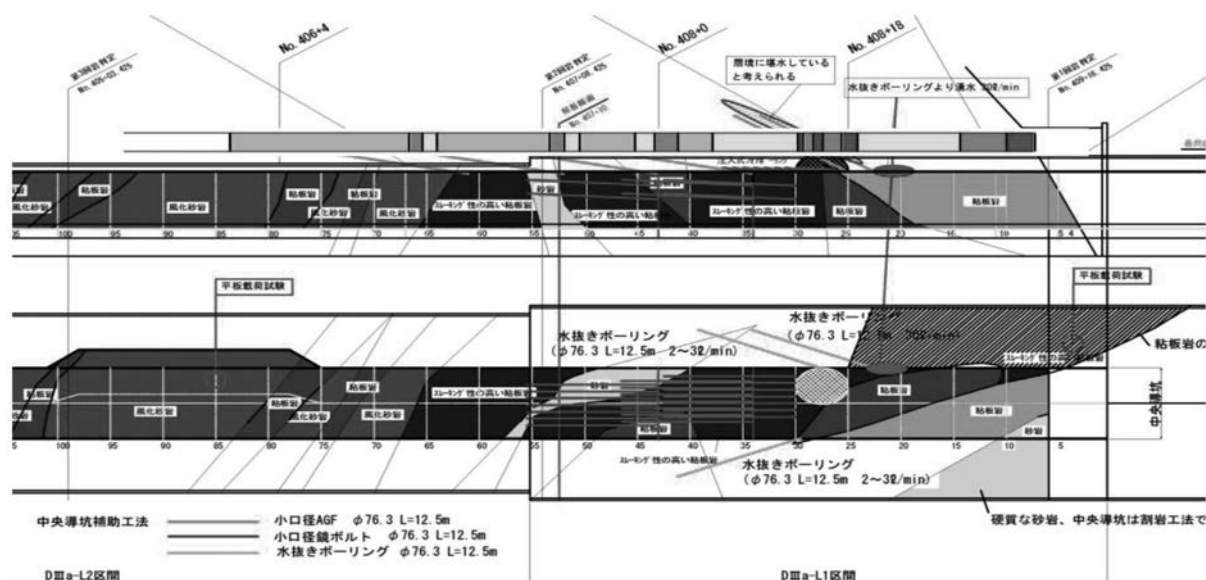


図-4 中央導坑の切羽観察記録による地質と水平ボーリングによる岩級区分

キング性の高い粘板岩および風化砂岩等に比べて変位収束が遅く、変位量も大きいことがわかった。

本トンネルの終点側の本坑断面は超大断面であり、ゆるみ領域が広範囲となることから、上記の中央導坑の施工実績に基き、十分な補助工法の検討を行った。特に中央導坑掘削時の記録から作成した図—4の地質平面、縦断面によると坑口から72m付近まではスレーキング性が高いと評価される地山が分布しており、明らかに「健岩」とは言い難いCL～D級と評価される区間が散在していることから、補助工法が必要であると判断した。

4. 補助工法の検討・選定

中央導坑の実績を基に補助工法の検討を行った結果、超大断面区間における補助工法選定フローを、平成24年度「気仙沼唐桑道路 気仙沼地区トンネル詳細設計業務 報告書」P4-1を参考にして作成し、当現場において有効な補助工法を3つ選定した。

(1) 長尺鋼管フォアパイリング (AGF工法, 図—5)

長尺鋼管フォアパイリングは、鋼管と注入材によってトンネル周辺地山を補強・改良する長尺先受工法である。有孔鋼管をトンネル掘削に使用するドリルジャンボで打設し、鋼管内にインサート管と中間パッカーを設置することにより、注入材のステップ注入が可能で、均等な注入効果が期待できる。鋼管周辺の地山を確実に固結改良することで、切羽天端の崩落防止および断層破碎帯などの不安定地山の緩み防止に高い効果を発揮する。

本工法を採用することにより、坑口から中央導坑の崩落箇所までの土被りの小さい区間において、安全な掘削作業を可能にするとともに、掘削に伴う先行変位抑制などの先受効果が期待された。

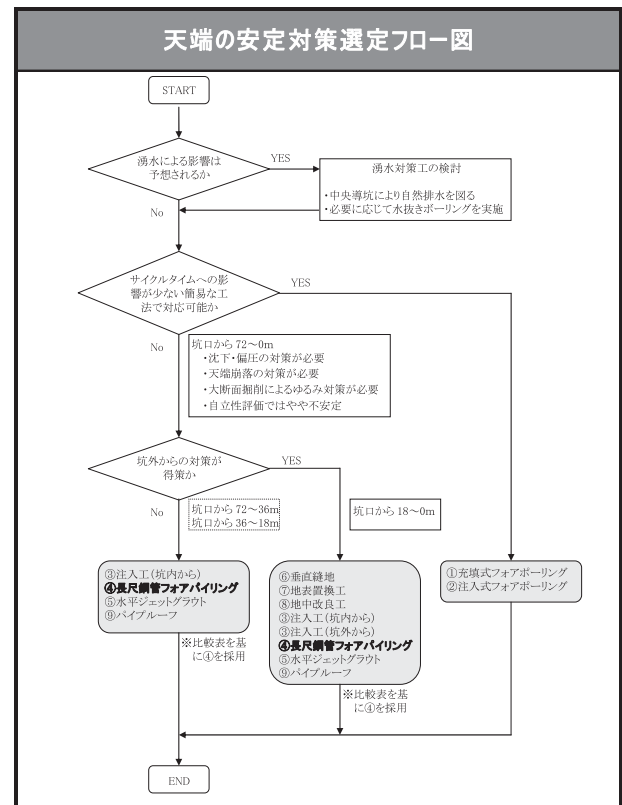
(2) 長尺鏡ボルト (図—6)

中央導坑施工時に発生した天端崩壊および切羽崩壊の対策として、本工法を採用した。

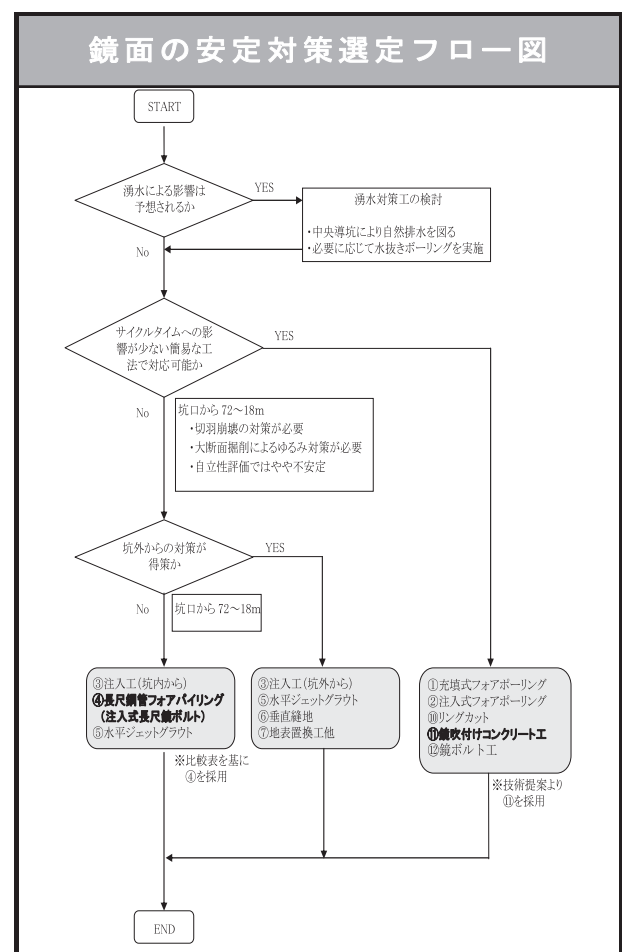
長尺鏡ボルトは掘削の進行に伴って切断可能な小口径スリット加工鋼管 ($\phi 76.3 \text{ mm}$, $L = 12.5 \text{ m}$) を用い、注入材との長尺改良効果により、切羽前方の補強による切羽崩壊防止、先行緩みの抑制効果に優れている工法である。

(3) 脚部補強パイル (図—7, 8)

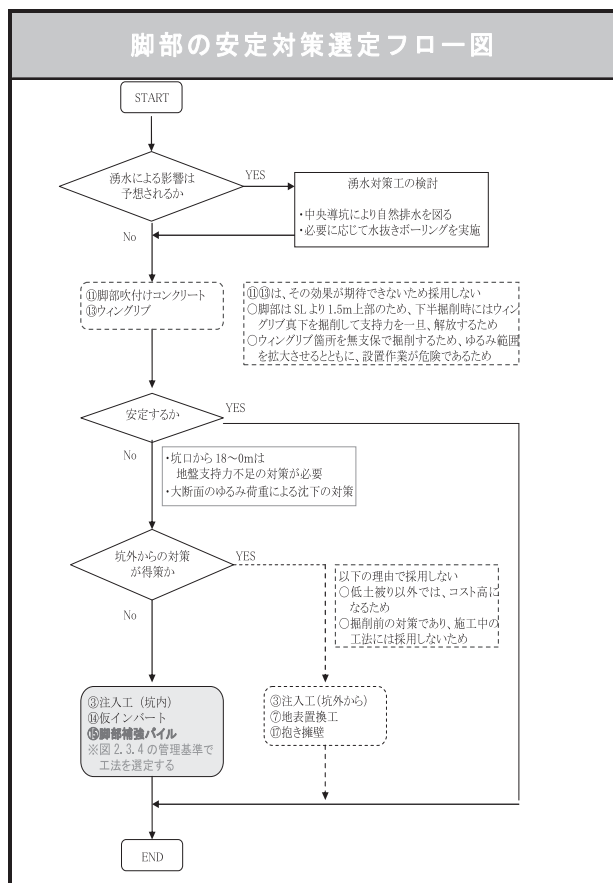
中央導坑実績により、右脚部にスレーキング性の高



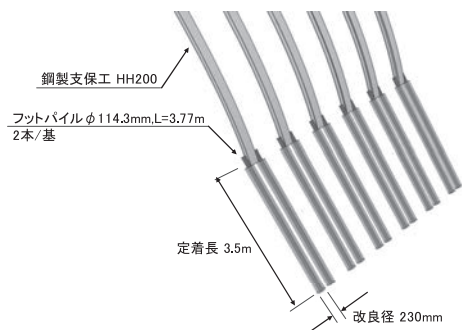
図—5 天端の安定対策選定フロー



図—6 鏡面の安定対策選定フロー



図一 脚部の安定対策選定フロー



図一 脚部補強工（フットパイル）概要図

い粘板岩が存在していたことから、地耐力不足によるトンネル脚部の沈下および脚部の沈下に伴う地表面への影響が懸念された。

脚部補強工は、鋼管と注入材により杭を構築し、脚部の沈下や内空変位の増大を抑制する工法であり、脚部に集中する地山荷重をフットパイルが摩擦杭として支持し、注入材による定着効果、改良効果により地耐力の向上を図る目的で採用した。

なお、各工法の注入材としては、確実な改良効果が期待でき、強度発現の早いウレタン系（シリカレジン）を採用した。

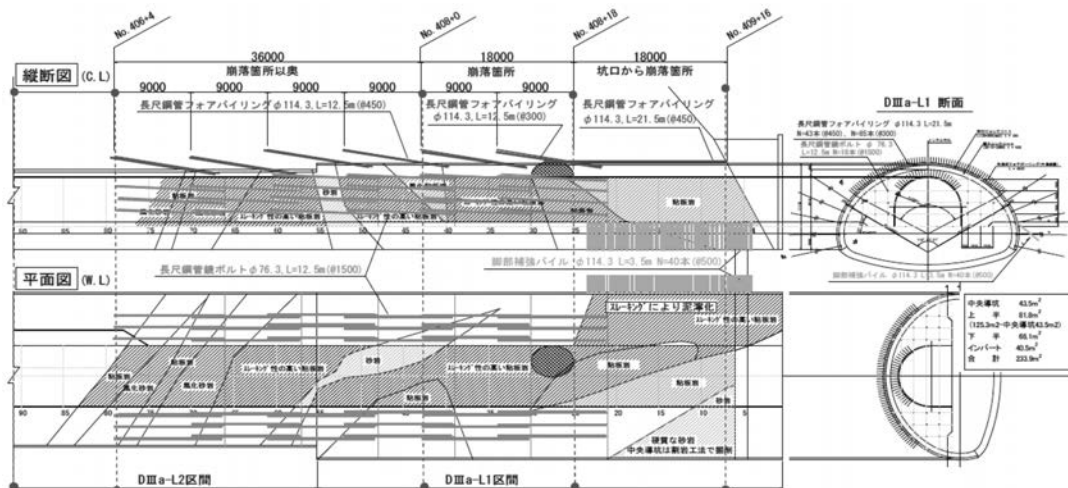
5. 超大断面の施工

(1) 施工実績（写真—4、図—9）

超大断面の施工実績として、天端の安定対策工は、坑口から崩落箇所までの18m区間を超長尺鋼管フォアパイリング（φ114.3 L=21.5m @450）にて対策工を施し、スレーキング性の高い粘板岩が広範囲に分布される奥の18m区間を長尺鋼管フォアパイリング



写真—4 補助工法施工状況（崩落箇所）



図—9 超大断面における補助工法施工計画図

(ϕ 114.3 L = 12.5 m @300) を 2 シフト, 崩落箇所は長尺鋼管フォアパイリング (ϕ 114.3 L = 12.5 m @450) を 4 シフト施工した。

また鏡面は, 長尺鏡ボルト ϕ 76.3 L = 12.5 m N = 18 本 @1,500) を 6 シフト施工した。

脚部では, 補強パイル (ϕ 114.3 L = 3.5 m) を 19 基施工した。

(2) 施工の評価

天端部および鏡面とも, 心配されていた崩落もなく安全に掘削を進めることが出来た。また, 計測の結果, 天端沈下で最大 29.6 mm (管理基準値 114 mm) また, 内空変位では最大 12.0 mm (管理基準値 228 mm) となった。脚部について, 坑口部では中央導坑で 22.4 mm に対して超大断面で 6.7 mm と, 対策した右側の沈下量が左側と同程度だった。また, 施工前検討時に削孔水により支持地盤を損傷し, 脚部補強の効果の損なわれることが懸念されていたが, 左右の脚部沈下量が同程度だったことから, 削孔水の影響は小さく, その効果が認められた。

以上の結果により, 補助工法の効果が超大断面において確認された。

6. おわりに

本報文では, 日本有数の超大断面トンネルの施工および補助工法について, 現場の実績を基に報告を行った。

平成 28 年現在, 拡幅断面掘削は完了し, 標準断面区間へと施工を進めている。今後, 拡幅断面区間の覆工および標準部の覆工, インバート半線施工等により工事は大きな繁忙期を迎える。超大断面トンネルならではの問題点など, 想定外の課題が発生することが考えられるが, 適切な検討をし, フローを作成することにより対策を行っていく予定である。

J C M A

《参考文献》

- 1) 土木学会：山岳トンネルの補助工法—2009 年版—
- 2) ジェオフロンテ研究会：ウレタン系注入式フォアボーリング
- 3) ジェオフロンテ研究会：注入式長尺先受工法 (AGF 工法)「標準積算資料」第六版
- 4) 土木学会：2006 年制定, トンネル標準示方書 (山岳工法・同解説)

〔筆者紹介〕

佐藤 大輔 (さとう だいすけ)
佐藤工業㈱東北支店
気仙沼第 2 トンネル作業所

