

連続した付加体（メランジュ）地質におけるトンネル掘削 佐渡多田トンネル

Excavation in an Accretionary Prism (Mélange) for Oota Tunnel, Sado

内山 滋^{※1} 戸泉 康 晴^{※2} 森 脇 丈 滋^{※1} 今 井 行 範^{※1}
Shigeru Utiyama Yashuharu Toizumi Takeshi Moriwaki Yukinori Imai
地 濃 健 治^{※1} 神 田 裕 一^{※3} 柳 森 豊^{※4}
Kenji Chinou Yuiti Kanda Yutaka Yanagimori

【要旨】

多田トンネルは、延長 1,511m、内空断面積 50m²となる主要地方道佐渡一周線の2車線道路トンネルである。本報告は、当初想定されていた地質と相違した、著しい破砕作用を受けた付加体（メランジュ）地質区間の問題点と、それらに対する設計・施工および計測結果をまとめたものである。また、新しい長尺鏡ボルトの施工において良好な結果が得られたことから、これらをあわせて報告するものである。

【キーワード】 付加体 メランジュ 鏡ボルト 鋼管膨張型ロックボルト

1. はじめに

新潟県佐渡ヶ島の南東側に位置する多田トンネルは、海岸沿いの急峻な地形に存在する現道を回避する目的で計画され、延長1,511m、内空断面積50m²となる佐渡一周線の2車線道路トンネルである。

事前調査における多田トンネルの主な地質は、硬質～中硬質となる中古生層の砂岩、頁岩、砂岩・頁岩互層、凝灰岩等から構成され、その上部を新第三紀の火山砕屑岩が覆っており、途中、4箇所の断層が想定されていた。

本報告にて問題となった砂岩・頁岩互層区間は、弾性波速度が 3.4km/sec と比較的高い値を示しており、当該区間以外に確認された砂岩・頁岩互層のボーリングコアと弾性波速度を比較した結果から、地山区分はD I 相当であると判断されていた。

しかし、実際の地質は、切羽には砂岩・頁岩互層が出現したものの、その性状は、想定されたものとは異なり、鱗片状～葉片状に破砕された過褶曲構造で、鏡肌の発達した極めて剥離・崩壊しやすい地質性状をもつ付加体（メランジュ）地質であった。

近年、この付加体地質において難航したトンネルの掘削事例が幾つか挙げられているが、地質学的にも複雑で

あり、従来の地質調査手法では正確に地質状態を把握することができず、また、著しい褶曲・破砕作用を受けているため、切羽の自立性に乏しいといった問題点を有している。

本報告は、この連続した付加体（メランジュ）地質区間の問題点と、それらに対する設計・施工および計測結果をまとめたものである。また、新しい長尺鏡ボルトの施工において良好な結果が得られたことから、これらをあわせて報告する。

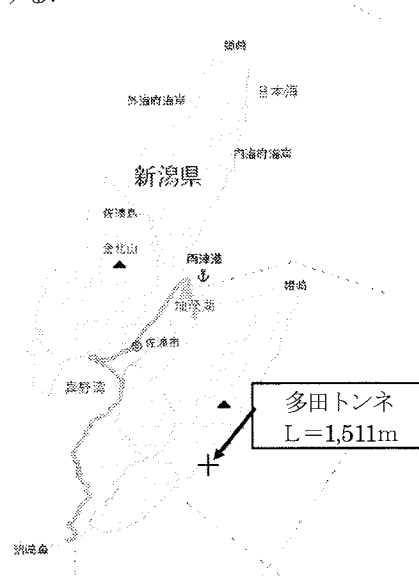


図-1 多田トンネル位置面

1. 北陸支店 佐渡多田トンネル作業所 2. 大阪支店 石樽トンネル作業所 3. 北陸支店 JR足羽川橋りょう作業所
4. 土木本部 トンネルグループ

4. 坑内水平ボーリングによる前方地質確認

事前調査と相違したメランジュがどこまで連続するのか予測できないため、切羽前方の地質状況の把握と水抜きを目的として、坑内から水平調査ボーリングを実施することとした。

ボーリングは、以下の表に示す機械と工法による組合せで行ったが、崩落性地山のため、いずれもロッドに大きな締め付けトルクが生じ、20m程度で削孔不能となった。ボーリングコア状態は、粘土を挟む細かく破碎された頁岩と角礫状の砂岩で、RQDは0であった。

表-1 ボーリング工法比較表

	ボーリング方式	工法
1回目	ローラー方式	普通工法
2回目	ローラーパカッション方式	ワイヤライン工法
3回目	ローラー方式	二重管工法

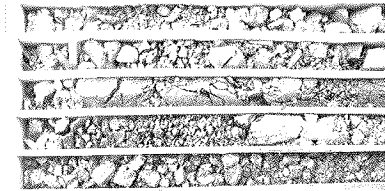


写真-2 ボーリングコア状況

この連続した崩落性地山に対して確実にボーリングを可能とするため、高トルク大口径ボーリングマシンで順次削孔径をダウンすることができるトップドライブ・二重管方式としたシールドリバース工法によるオールコアボーリングを実施することとした。削孔プログラムは2段階(120⇒90mm)の径落しで計画した。

その結果、ケーシングパイプの締め付けが予想以上に大きく、トルクが上昇したが、削孔径をさらに1ランクダウンして3段階(120⇒90⇒60mm)として延長150mのボーリングを実施することができ、断層区間の延長と地質状況が把握された。また、僅かな湧水で容易に崩れやすい状況であったことから水抜きを兼ねた長尺ボーリングは有効であったと判断している。

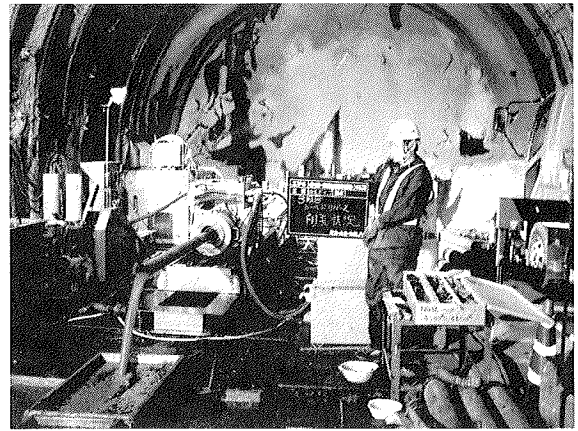


写真-3 長尺水平ボーリング状況

5. 切羽安定対策

(1) 補助工法の選定

二回目の崩落後の掘削にあたって、天端の安定対策としてシリカレジン注入式長尺鋼管先受け工(シフト長9.0m, ラップ長3.5m, 45cmピッチ, 25本/断面, 断面拡幅タイプ)を、そして鏡面の押出しと切羽前方の緩み崩壊の防止を目的として注入式長尺鏡ボルト(GFRP, シフト長9.0m, ラップ長3.5m, 17本/断面)を併用する補助工法を採用した。

長尺鏡ボルトの定着材においても、①レーズで崩れやすい地山において、ある程度の地山改良を期待する、②鏡ボルト施工後直ちに掘削が可能である、③湧水があっても効果が発揮される、等を考慮してシリカレジン注入方式とした。注入量の計画は、当初計画において注入率は先受け工と同じ12%、改良径300mmとして、地山状況や掘削時の注入効果を確認し、適宜修正していく計画とした。

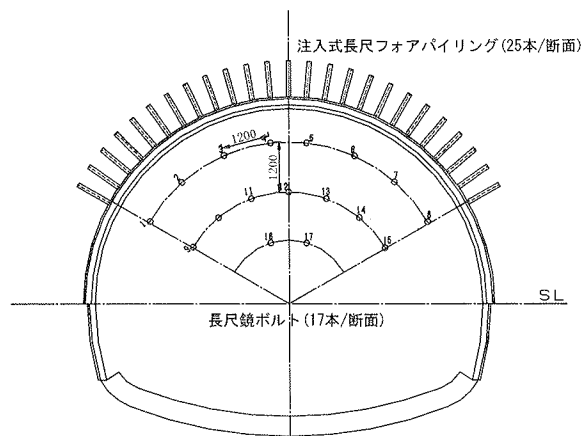


図-3 補助工法打設パターン図

(2) 鏡ボルト打設パターンの変更

長尺鏡ボルト採用後の切羽は、大規模な崩落こそなくなったものの、小崩落や鏡吹付けコンクリートが破壊される鏡の押し出しが発生し、注入量を1.2倍程度まで増量して対応していたが、分割掘削や繰り返し増鏡吹付けを余儀なくされた。

この切羽が不安定となる傾向は、先受けおよび鏡ボルトを打設した切羽から7m程度進行した位置から急激に不安定になる傾向が連続して確認された。

打設切羽から7m以降の切羽が不安定になる原因として、以下の点が考えられる。

- ① 一度は改良された切羽前方の地山が、繰り返し掘削される切羽進行の影響により、徐々に強度が低下する
- ② 拡幅タイプとなる注入式長尺鋼管先受け工のため、掘削断面が大きくなる
- ③ 前シフトで打設した鏡ボルトとのラップ区間がなくなり、切羽前方の改良効果が低下する

ここで、鏡面の補強・強化方法として一般的に採用される対策として、

- ・ 注入量を増加する
- ・ ラップ長を長くする
- ・ 1断面当りの本数を増やす

等の方策が採用されるケースが多く見られる。(鏡の押し出しに対して剛な補強を実施する)

しかし、これらの対策は確実ではあるが、経済性にお

いて劣ることから、現状の数量のまま改善できる手法として、先受け鋼管と鏡ボルトの打設シフト開始位置を6.0mずらすこととした。(図-4参照)

これにより、拡幅断面となる手前で鏡ボルトを再打設・注入することとなり、(先受け鋼管の残長が長く)前方の押し出しに対する抵抗力と天端地山の強度低下前に鏡ボルト打設位置に到達し、前述の問題点を解消することができた。同時に総注入量を同じとしたまま、パッカーで区切られた注入室を利用して手前の注入量を少なくし、切羽不安定となる奥の注入量の割合を増加した。

これらの対策の結果、鏡ボルト打設後7m付近で発生していた鏡面の押し出しは低減し、打設本数やラップ長の増加とするパターンに変更することなく鏡面対策の強化が実施できた。

(3) スリット鋼管式長尺鏡ボルトの採用

現在、長尺鏡ボルトの材質は、実績として、切羽面での切削が可能となるガラス繊維補強プラスチック(GFRP)がほぼ100%(試験施工を除く)採用されており³⁾、多田トンネルにおいても1~7シフト目のボルト材質はGFRPを用いていた。しかし、GFRP製の長尺鏡ボルトにおいて、鏡の安定対策としては十分な効果が得られたものの、転石部の削孔や、切羽面での切断、ファイバー片の飛散等、幾つかの問題点、トラブルも発生した。

ここで、鋼管にスリットを一定間隔で設け、切羽でのボルト切断が可能となるように開発された、スリット鋼

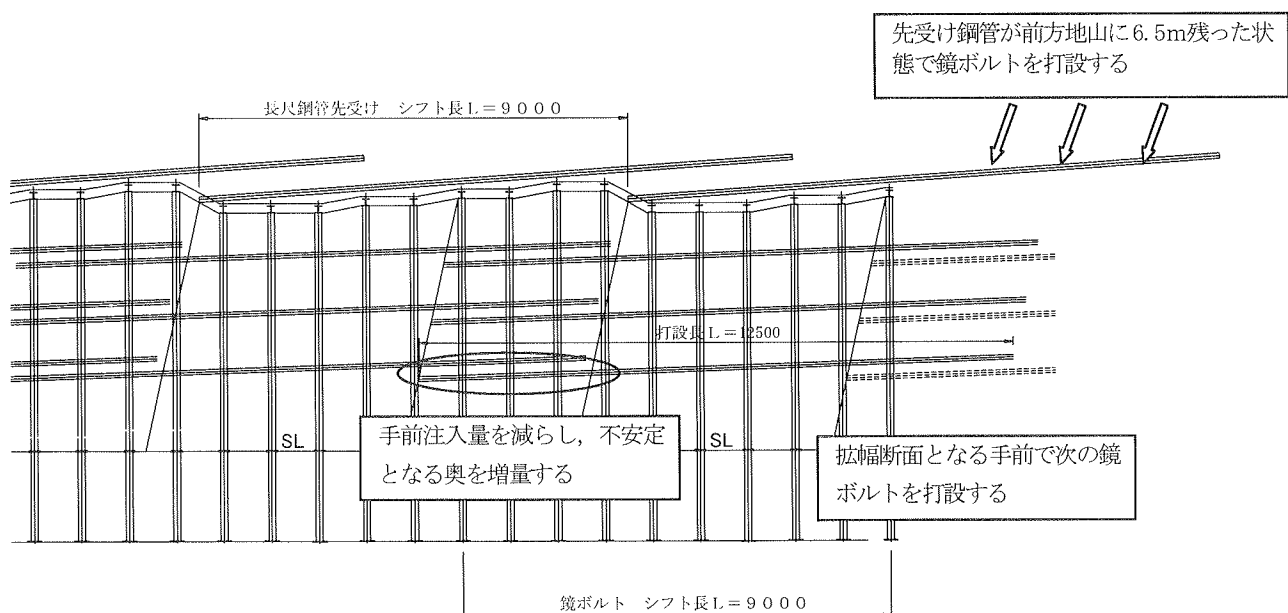


図-4 補助工法 変更打設位置図

管式長尺鏡ボルトの試験施工を実施して、①鏡補強としての効果、②施工性、③安全・環境、④経済性等を比較検討した結果、当該トンネルにおける鏡補強対策としてスリット鋼管式長尺鏡ボルトが適当であると判断して本工法を採用することとした。試験施工から得られた知見を表-2に示す。

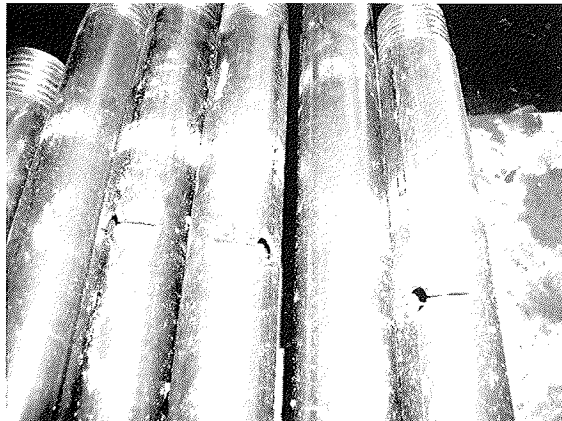


写真-4 スリット鋼管式鏡ボルト



写真-5 掘削状況

6. 施工方法と支保パターンの見直し

(1) 掘削サイクル

掘削工法は、切羽が不安定なことから、ショートベンチカット工法（リングカット）を基本としていたが、上半断面での変位速度が急激であるため、上半切羽鏡面に影響がでない範囲内で、且つ施工サイクルのバランスを考慮してできるだけ早い時期に下半の施工にかかり、早期に本設構造物のインバートを構築し、トンネルの掘削断面を閉合することで安定性を確保した。

(2) 鋼管膨張型ロックボルト（L=6.0m）を用いた支保パターンの採用と効果

管理基準値を上回る内空変位の発生と、坑内B計測の結果から、掘削による切羽解放直後から支保背面の広い範囲で地山の緩みが発生していることや、全ての支保応力が限界レベルにほぼ達していることが判明したため、ロックボルトの本数を8本から12本に増加し、長さを4.0mから6.0mとした。ボルト材は、以下の状況を考慮して、切羽面で瞬時に定着可能な鋼管膨張型ロックボルトを採用することとした。

- ・ 初期変位速度が20mm/日以上（最大61mm/日）と大きく、切羽近傍で支保の変状が発生する（モルタル定着式では強度発現までにある程度の時間を必要とする）
- ・ ボルト削孔、打設後に湧水が確認されるため、モルタルの流出や、強度が低下し所定の品質が確保できない

また、鋼管膨張型ロックボルト採用にあたっては、

表-2 長尺鏡ボルト試験施工結果表

スリット鋼管式長尺鏡ボルト	
規格	材質 STK400, 外径φ76.3mm,
システム概要	ロストビット, 先端部牽引推進型, 二重管削孔, ネジ式ジョイント
引張強度	ネジ部 229 kN, スリット部 235kN
利点	<ul style="list-style-type: none"> ・ 削孔時に打撃を加えることが可能で、硬質な転石混じりの地山においても適用できる ・ 切羽面でのボルト切断が容易である ・ 切断時にグラスファイバー繊維が飛び散らずに坑内作業員の安全性が確保できる ・ 掘削時に撤去されたボルト材のズリ仮置き場での仕分け作業がグラスファイバーと異なり容易である
問題点	<ul style="list-style-type: none"> ・ 鋼管重量が 27kg/本とやや重く、グラスファイバーよりも施工性に劣る

- ① 削孔時、崩落性地山のため孔壁の自立が困難である。
- ② 定着を確保するため削孔径とボルト径のクリアランスが小さい。
- ③ 打撃を加えたり無理な挿入を行うことができない。といった問題点があった。そこで、孔壁保護材を利用した泡削孔システム（NJD）を採用することにより、6.0mのボルトの挿入を可能とした。

支保パターンを変更した評価として、以下の点で効果が見られた

- ① 地山条件がほぼ同等である、支保パターン変更前と変更直後のA計測結果を比較すると、初期変位速度、収束値ともに約70%まで低減されている

表-3 支保パターン変更前後A計測比較表

		変更前 (mm)	変更後 (mm)	比較
天端沈下	初期変位	31-42	25	68%
	収束値	104-114	84	77%
内空変位	初期変位	37-61	32	65%
	収束値	93-127	67	61%

- ② トンネル下半施工時において連続して発生していた上半吹付けコンクリートクラックが激減した
- ③ 湧水が多く確認されるにもかかわらず、前日打設したボルトのプレートが翌日には変形しており、打設直後に確実な定着が確保されていることが証明された

(3) 当初支保パターンと実績パターンの比較

図-6にNo.75+10～No.40+13区間の当初と実績支保パターンの比較を示す。

付加体区間は主に砂岩頁岩区間（本報告書対象区間）と緑色岩（Ptf）で構成される区間に区別されるが、緑色岩よりも砂岩頁岩区間のほうが、切羽の自立性が悪く、地山の押出しが発生することから、重い支保パターンを採用した結果となっている。

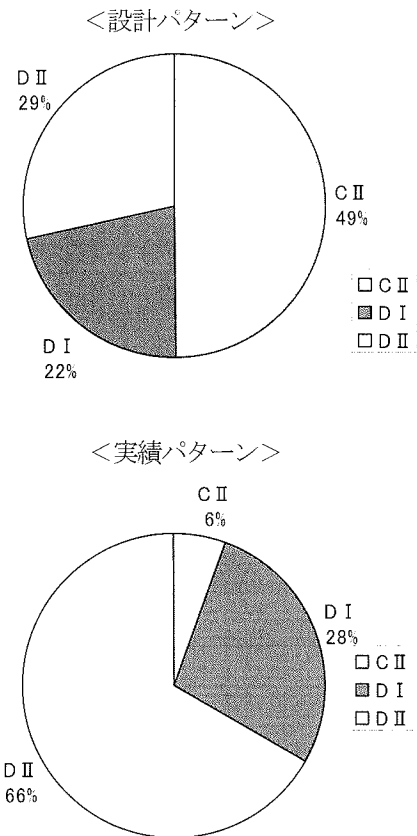


図-6 当初設計と実績支保パターン構成比率

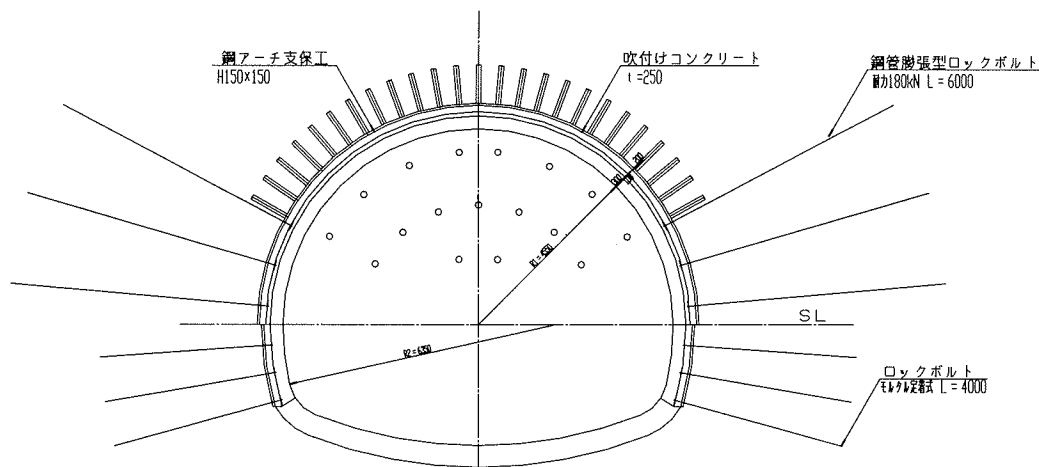
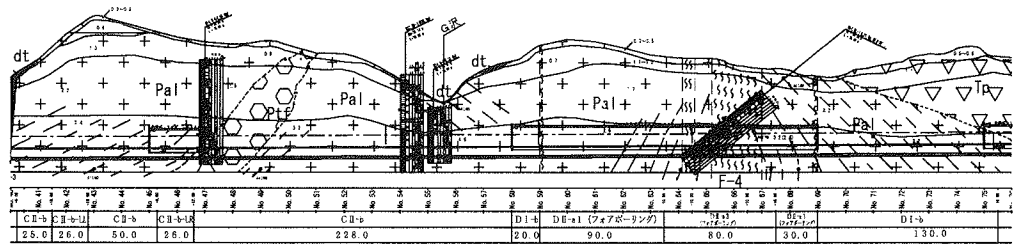
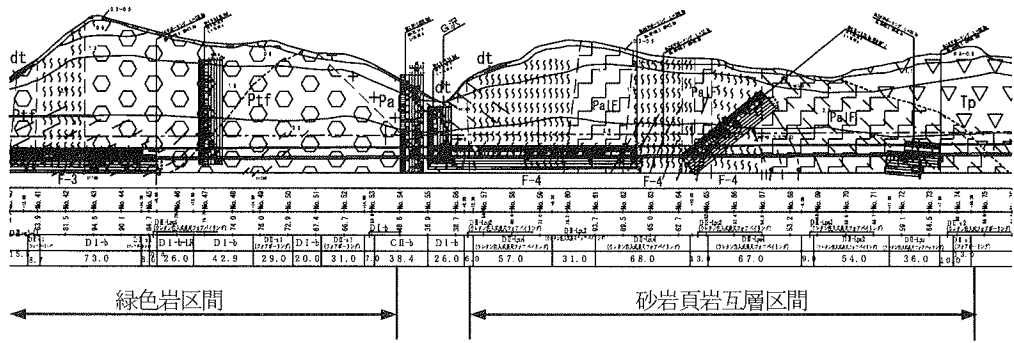


図-5 支保パターンD II-L p u 4

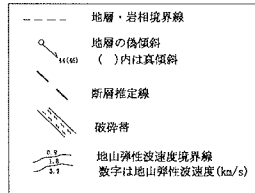
当初地質縦断図 S=1:1000



施工実績による地質縦断図 S=1:1000

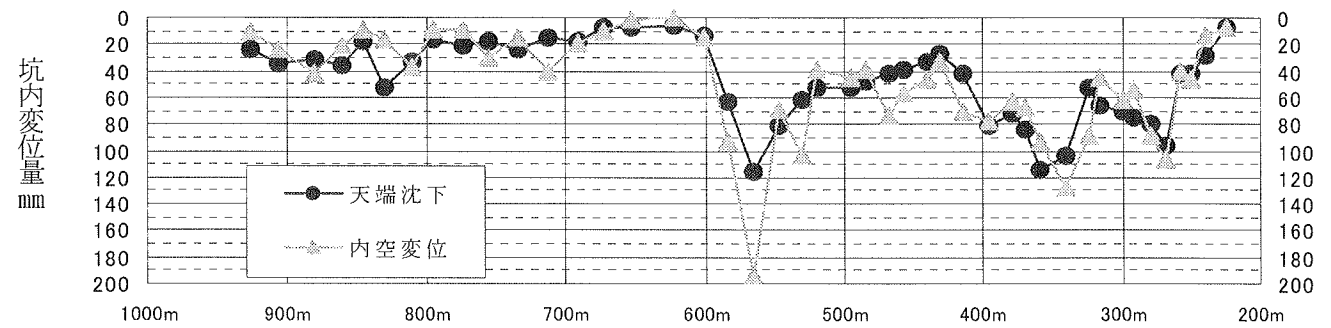
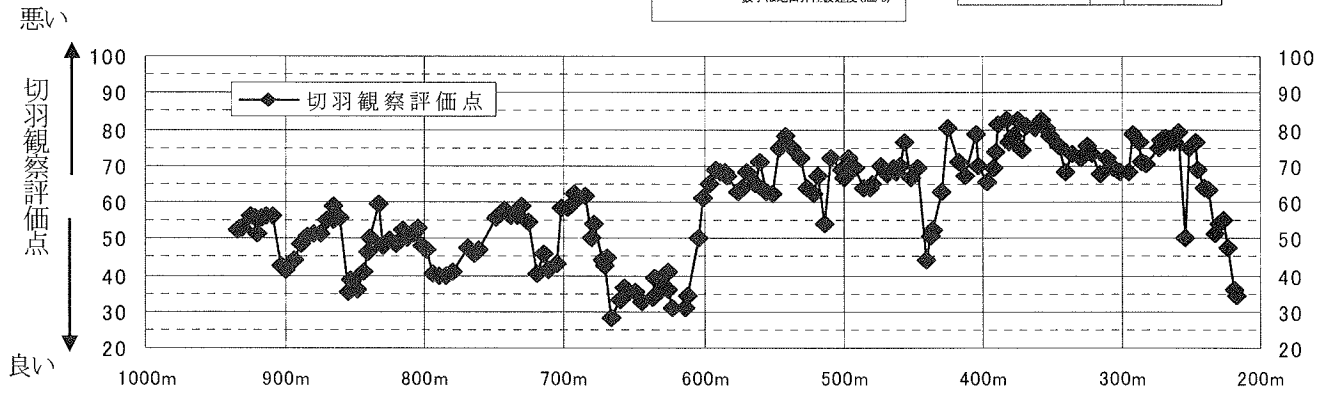


[記号凡例]



[地質凡例]

地層名	記号
火山碎屑岩	Tp
凝灰岩	Ptf
砂岩頁岩互層	Pal



沈下・縮み

図-7 当初・実績地質縦断比較図 坑内変位量

7. 計測結果

(1) 坑内A計測

坑内A計測の結果を「図-7」に示す。

砂岩頁岩互層では、インバート早期閉合を実施しているものの、初期変位速度が（管理基準値 12 mm/日に対して）20 mm/日以上（最大 61 mm/日）と大きく、収束値は天端沈下、内空変位ともに 60 mm~120 mm（最大 194 mm）となり、管理基準値③（限界状態を指す）を越える大きな変位量が発生している。また、吹付けコンクリート、ロックボルト等の支保変状が発生し、増しボルトや鋼製プレートによる補強を実施した。

砂岩優勢部および緑色岩区間の変位量は、概ね 20 mm~40 mmとなり、F4 断層の砂岩頁岩と比較すると小さな値となっており、支保の変状も発生せず施工できた。

(2) 坑内B計測

砂岩頁岩互層部のNo.70+11 (D II-Lpu2) とNo.63+18 (D II-Lpu4) の2断面において、周辺地盤と支保部材の挙動計測、断層区間の支保パターン検証を目的として坑内B計測を実施した。

No.63+18 (D II-Lpu4) で実施した計測項目と結果を（表-4）に示す。

鋼管膨張型ロックボルトの軸力測定は、（加圧時に膨張しない）ボルト背面側に歪ゲージと測定用ケーブルを配置し、ボルト挿入時に破損しないよう特殊コーティングで保護して測定を可能とした。（図-8参照）

グラフは、各支保部材の許容値を 100%として計測結果をプロットしたものである。ロックボルト、吹付けコンクリート、鋼製支保工の全ての支保部材で最終的に管理基準値を越える値を示している。また、地中変位計ではトンネル壁面より 8.0m奥の不動点とした地山でも緩みが発生している結果となり、広範囲にわたるトンネル周辺地山の緩みに対して、ロックボルトの本数・長さ・定着方法を変更した支保パターンは計測結果からも妥当であったことが伺える。

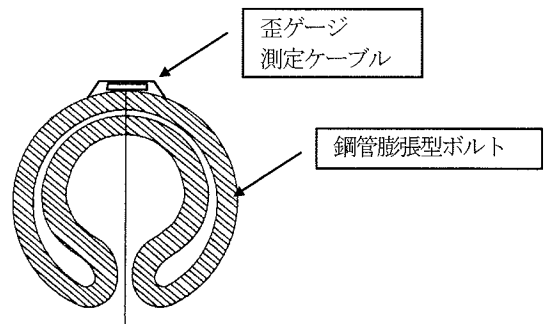


図-8 鋼管膨張型ロックボルト計測断面図

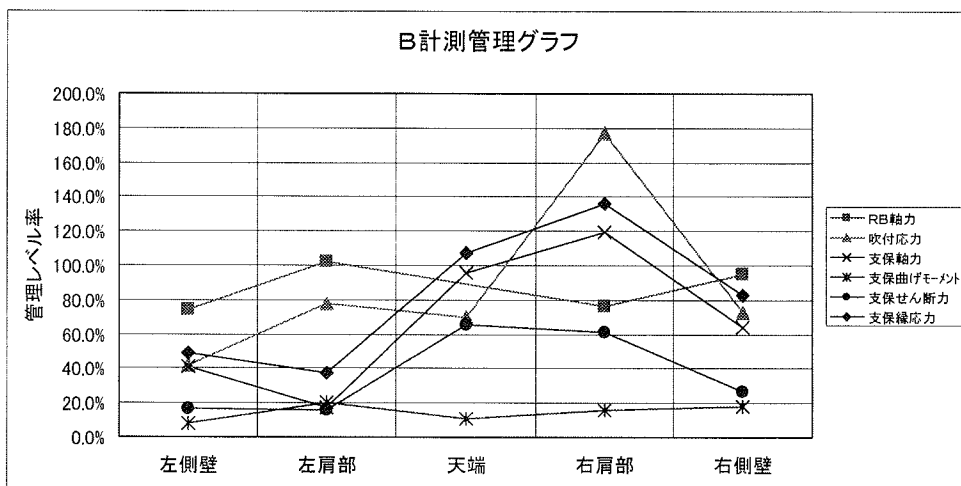


図-9 No.63+18 坑内B計測結果

表-4 No.63+18 坑内B計測結果

	管理限界	左側壁	左肩部	天端	右肩部	右側壁
RB軸力	170.0kN	125.9kN	173.4kN	—	129.2kN	161.8kN
吹付応力	9.0N/mm ²	3.8N/mm ²	7.0N/mm ²	6.3N/mm ²	15.9N/mm ²	6.6N/mm ²
支保軸力	971.0kN	395.8kN	165.0kN	931.0kN	1157.5kN	621.4kN
支保曲げモーメント	52.9kN・m	4.3kN・m	10.8kN・m	5.6kN・m	8.3kN・m	9.5kN・m
支保せん断力	82.0kN	13.7kN	12.7kN	54.0kN	49.9kN	21.5kN
支保縁応力	240.0N/mm ²	118.1N/mm ²	90.5N/mm ²	257.3N/mm ²	326.4N/mm ²	198.3N/mm ²

8. まとめ

(1) 多田トンネル施工実績から得られた知見

今回の掘削状況から得られた知見・成果をまとめると、以下ようになる。

- ① 付加体地質における施工前の弾性波探査による地山評価には限界があると思われる。
- ② 砂岩頁岩互層 (Pal) 区間と緑色岩 (Ptf) 主体となる区間を比較すると、切羽状況 (地山の自立性、押出し) や支保の変状、計測結果、ボーリングパイプへの締め付け等、砂岩頁岩互層 (Pal) 区間のほうが不良であり、緑色岩 (Ptf) 区間のほうが、支保パターンおよび補助工法のランクが2ランクほど軽く施工できた。
- ③ 坑内からの水平調査ボーリングは、削孔時の締めつめによる高トルクに対応できるシールドリバース工法を用いることにより、長尺のオールコアボーリングが可能であり、また、水抜きの効果も大きく発揮された。(※切羽作業との競合が難)
- ④ 初期変位速度が大きく、湧水を含むF4断層区間では、掘削による切羽開放直後から周辺地山のゆるみが拡大すると考えられ、直ちに支保効果が得られる瞬時に定着可能な鋼管膨張型ロックボルトが有効であった。
- ⑤ 上半断面での変位速度が大きく、早期にインバートを構築することで、トンネル断面を閉合して安定性を確保することができた。
- ⑥ 鏡面の押出しと切羽前方の緩み崩壊の防止には、注入式長尺鏡ボルトでの切羽前方地山補強効果が有効であった。

(2) 今後の付加体地質におけるトンネル施工方法

現在、付加体地質において、弾性波速度や通常の事前調査ではその地質性状を予測することは困難であり、直接地山を確認するボーリング調査の本数を増やす必要があるが、調査期間や調査費の関係、土被りが厚い場合はボーリングが困難となる等、坑内の水平ボーリングに頼らざるをえない状況にあるといえる。

今回、この付加体地質に遭遇し、補助工法については当初と比較して大幅な設計変更となり、工事費増大となったが、あらゆる情報・技術を検討し、安全性、経済性、品質確保を考慮した結果として報告させて頂くこととした。

【参考文献】

- 1) ジェオフロンテ研究会:付加体地質とトンネル施工, pp. 102-109, 2004.
- 2) 田中崇生, 古谷栄治郎, 石井正之:付加体頁岩中で発生したトンネル掘削後の割れ目によるゆるみ性状, トンネル工学研究論文・報告集第12巻, pp. 183-188, 2002.
- 3) ジェオフロンテ研究会:長尺鏡ボルトの施工実績実態調査とその分析その2, pp. 186, 2000.

Summary The construction of Oota Tunnel, a two-lane road tunnel in Sado Island 1,500m in length and 50 m² in cross-sectional area, included excavation in an accretionary prism (mélange), which was not expected in the preliminary survey. This paper reports on the problems of excavation, design and execution measures against the problems, and results of measurement. The use of long face-bolts was proven effective in excavating mélange zones.

【Keywords】 accretionary prism, mélange, face-bolt, steel pipe expansion-type rock bolt