

連続した付加体（メランジュ）地質を呈する トンネル掘削

Tunnel Digging to Presents the Accretionary Prism(mélange) Geological Feature
that continued

中村友典¹・内山滋²・戸泉康晴²・森脇丈滋²・神田裕一²

Tomonori Nakamura, Shigeru Uchiyama, Yasuharu Toizumi, Takeshi Moriwaki

and Yuuichi Kanda

¹新潟県佐渡地域振興局 地域整備部（〒952-1555 新潟県佐渡市相川2丁目浜町20-1）

²飛島・大豊・本間特定共同企業体（〒952-0704 新潟県佐渡市荻場1676）

Ooda tunnel is extension 1,500m, section area about 50m² and two traffic lane road tunnels.

This report is the thing which compiled the exaction results of the accretionary prism(mélange) geological feature that continued, and because the good result was provided in exaction of a new face-bolt, I report this paper.

Key Words : accretionary prism, melange, face-bolt, steel pipe expansion type rock bolt

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碎屑岩が覆っており、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・頁岩互層となる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る。

しかし、実際のトンネル掘削による地質は、切羽には砂岩・頁岩互層となる地質が出現したものの、その性状は、想定されたものとは異なり、鱗片状～葉片状に破碎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・破碎

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。

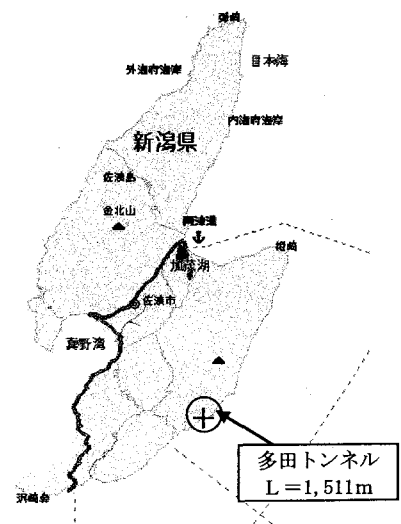


図-1 多田トンネル位置

2. 付加体（メランジュ）地質における問題点

(1) 付加体（メランジュ）の特徴

付加体地質とは、海洋プレートの沈み込みに伴って大陸側に底付け付加された地質構造である。付加体では、このプレートの移動に伴い、様々なスケール、多様な岩石類が著しいせん断作用を受けて片状破碎された「メランジュ」と称される特異な地質性状をもつ地質体となっている。

一般に付加体地質におけるトンネル工事で特に問題となるのは、混在相の泥質岩（泥岩、頁岩、粘板岩）であることが判明しており¹⁾、当初設計の2ランク程度重い支保パターンが採用されるケースが多く発生している。これは、掘削前の自然（3軸拘束）状態では弾性波速度も高い値を示すが、一旦、トンネル掘削により応力開放を受けると、急激に地山の緩みが進行し、地山強度が劣化する特性を有しているためである。また、切羽において弾性波速度の低下を確認した事例²⁾では、事前調査でのP波速度が4km/secの地質が2km/sec以下にまで低下していると報告されている。

(2) 施工状況とトンネル掘削時の問題点

坑口から約250m掘削した地点から、鏡肌の発達した細かく破碎されたメランジュとなる砂岩・頁岩互層（Pt_f）が切羽に出現し、シリカレジン注入式フォアボーリングを天端に打設して、モルタル定着式FRP鏡ボルト（L=4.0m）と鏡吹付けコンクリート、リングカット方式による掘削で切羽安定対策を行っていたが、切羽鏡面の剥離が連続し、天端崩落が発生した。

崩落部復旧工後の再掘削にあたり、シリカレジン注入式長尺鋼管フォアパイリングを採用していたが、再び強い鏡面の押出しと天端の抜け落ちと共に鋼管が破壊して、二回目の崩落が発生する事態となった。



写真-1 第二回崩落状況

このように、天端・鏡の自立性が不良で、容易に崩壊・崩落する地山特性をもち、また、地山の押出しが大きく、内空変位の増大と支保の変状が連続して発生し早期閉合を必要とした。

このメランジュ区間は延長360mにもおよび、長尺鋼管先受けを39シフト、長尺鏡ボルトを37シフト実施した。

3. 長尺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不明であったため、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が発生し、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

	ボーリング機械	工 法
1回目	ロータリー方式	普通工法
2回目	ロータリーパーカッション方式	ワイヤライン工法
3回目	ロータリー方式	二重管工法

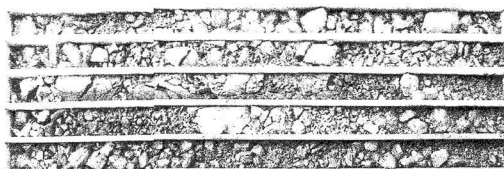


写真-2 ボーリングコア状況

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とトップドライブ・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（120～60mm）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。

4. 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、そして鏡面の押し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とした。

長尺鏡ボルトの定着材においても、①ル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湧水地山におい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。

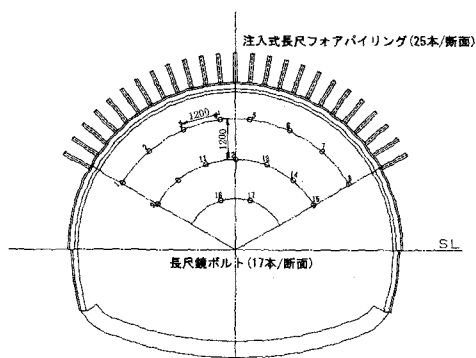


図-2 補助工法打設パターン図

(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 拡幅断面のため、掘削断面が大きくなる
- ③ 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、

- ・ 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位置を6.0mずらす方法を採用した。

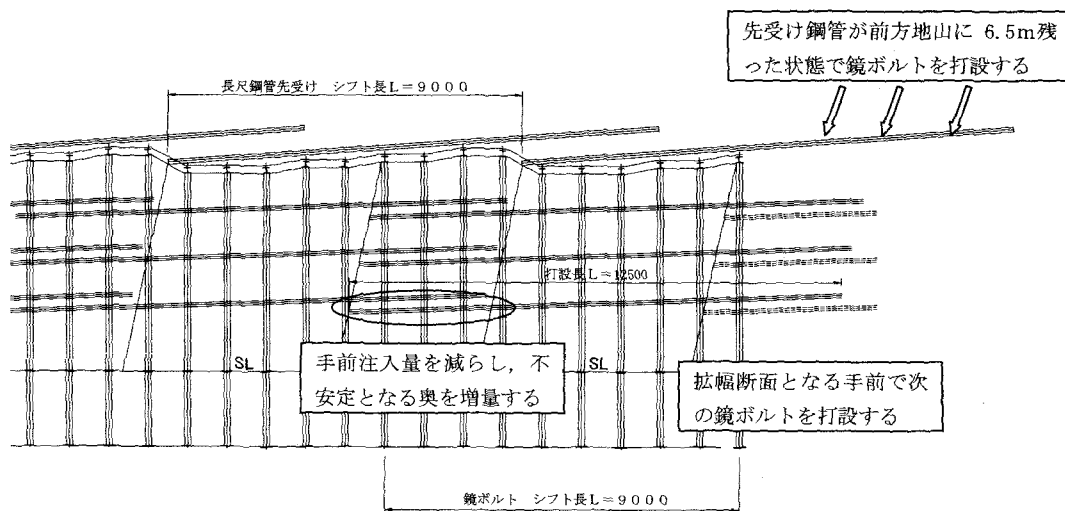


図-3 補助工法 変更打設位置図

これにより、拡幅断面となる手前で鏡ボルトを再打設・注入でき、先受け鋼管の残長が長く前方の押出しに対する抵抗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出しは低減し、打設本数やラップ長の増加となるパターンに変更することなく鏡面対策の強化が実施された。

(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、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下記（表－2）に示す。

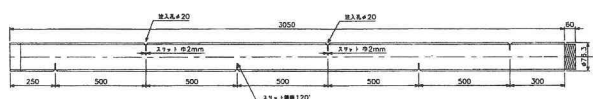


図-4 スリット式鋼管



写真-3 スリット鋼管式鏡ボルト



写真-4 掘削状況

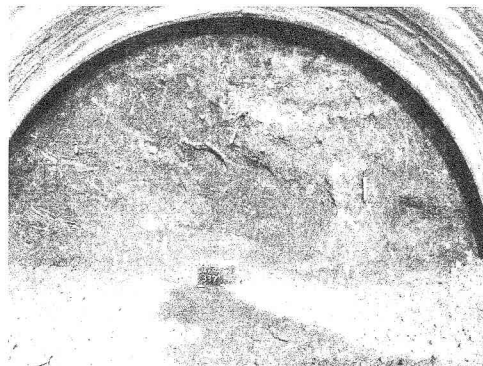


写真-5 掘削完了

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	・ 打撃を加えることが可能であり、硬質な転石混じりの地山においてもスムーズに削孔ができる ・ 切羽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 ・ 撤去材の仕分け作業がグラスファイバーと異なりバラバラにならず、ズリ仮置き場での仕分けが容易である
問題点	・ 鋼管重量が27kg/本となり、グラスファイバーよりも施工性に劣る

5. 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、核残しとなるショートベンチカット工法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、早期にインバートを構築しトンネルの安定性を確保した。

(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、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達していることが判明したため、ロックボルト（ツイストボルト L=4.0m）の本数を増加し、増しボルト（L=6.0m）を打設して対応していたが、支保の変状や変位の増加が見られるため、トンネルの安定性を確保するため支保パターンの見直しについて検討した。

支保部材の修正方法として（経済性および容易で速やかに変更が可能であることを考慮して）ロックボルトを変更する方法が初期段階として多く取り入れられている。そこで、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/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、モルタルが流出したり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、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を採用することにより、6.0mのボルトの挿入を可能とすることができた。

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のA計測の結果と変更直後の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 下半施工時において連続して発生していた吹付けコンクリートクラックが激減し、トンネル支保全体のバランスが良好になったと思われる
- 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判明した

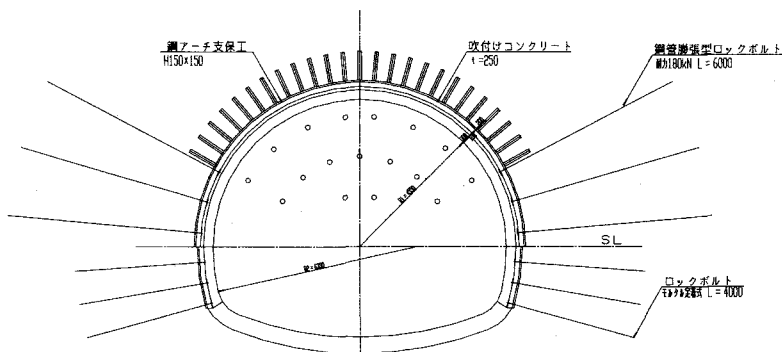


図-5 支保パターンDⅡ-L p u 4

表-4 計測データ最大値の断面分布

	管理限界	左側壁	左肩部	天端	右肩部	右側壁
R B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

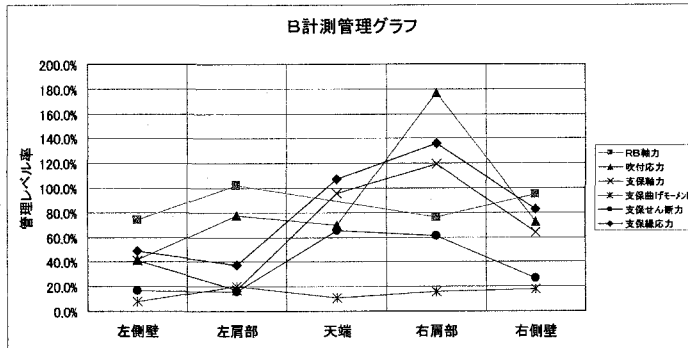


図-6 B計測結果グラフ

(3) 計測結果

支保パターン変更後に、支保の評価と支保変更前に行ったB計測の結果を比較する目的で、坑内B計測を追加計測し、その結果を（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。

グラフ（図-6）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大きな値を示している。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有効であったと考えられる。

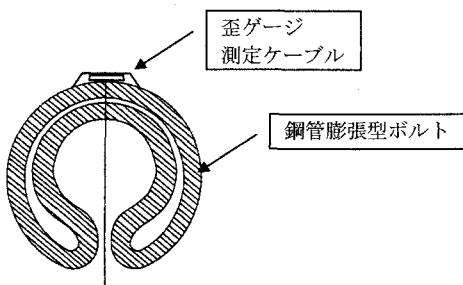


図-7 ロックボルト計測断面図

6. おわりに

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、坑内の水平ボーリングに頼らざるをえない状況にある。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を余儀なくされた結果となったが、あらゆる情報・技術を検討し、安全性、経済性、品質確保を考慮しての結果として報告させて頂くこととした。

なお、施工検討会にあたっては、新潟県、サンコーコンサルタント㈱、飛鳥建設㈱本社の方々にご指導をいただき、厚くお礼申し上げます。

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.