

断層群における前方地山予測と施工

中本 大悟¹・吉森 佑介²・柏木 亮³・石濱 茂崇⁴・青木 宏一⁵

¹ (株) 熊谷組 土木事業本部 トンネル技術部 (〒162-8557 東京都新宿区津久戸町 2-1)
E-mail:dnakamot@ku.kumagaigumi.co.jp.

² 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 本社 設計部 設計第二課
(〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町 6-50-1 横浜アイランドタワー)
E-mail: yoshimori.yus-eh85@jrtr.go.jp

³ 正会員 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 大阪支社 敦賀鉄道建設所
(〒914-0055 福井県敦賀市鉄輪町一丁目 3 番 26 号)
E-mail: kashiwagi.ryo-p55b@jrtr.go.jp

⁴ 正会員 (株) 熊谷組 土木事業本部 地質技術部 (〒162-8557 東京都新宿区津久戸町 2-1)
E-mail:sishiham@ku.kumagaigumi.co.jp.

⁵ 正会員 (株) 熊谷組 土木事業本部 トンネル技術部 (〒162-8557 東京都新宿区津久戸町 2-1)
E-mail:koaoki@ku.kumagaigumi.co.jp.

一般に断層では、本断層の他に多くの副断層が存在し大規模な断層群を形成している場合がある。断層群のトンネル掘削では、脆弱な地山状況と高被圧湧水から、アクシデントの規模が大きく突発的であることが特徴であり、断層の位置、地山性状、帯水層の状況を把握し、事前に対策工を実施することが重要である。北陸新幹線、新北陸トンネル（大桐）では、柳ヶ瀬断層群が横断するために、突発的な湧水や地山の塑性化に伴う切羽の不安定化が懸念された。そのため、切羽前方探査として、弾性波トモグラフィ、水平調査コアボーリング（中尺）、ドリルジャンボによる削孔検層（短尺）を組合せて断層帯の位置、性状を捉え対策工へと反映させることで無事に掘削を完了させることができた。本稿では、前方地山予測方法と対策工について報告する。

Key Words : mountain tunnel, fault group, elastic wave tomography, core boring, drill junbo boring

1. はじめに

新北陸トンネルは、北陸新幹線（金沢・敦賀間）の白山総合車両所（石川県白山市）から敦賀駅（福井県敦賀市）間約 115km にて工事を進めている福井県南越前町から敦賀市に位置する延長約 20km の山岳トンネルであり、北陸新幹線としては長野県飯山市と新潟県上越市を結ぶ飯山トンネルに次ぐ 2 番目の長さとなっている（図-1）。当トンネルは、6 工区に分けて工事が進められている。大桐工区（トンネル延長 3,605m）は、事前調査の段階から柳ヶ瀬断層群と交差することが見込まれており、脆弱な地山状況と突発的な大量湧水が懸念されることから、弾性波トモグラフィと、中尺コアボーリング、ドリルジャンボを用いた短尺ノンコアボーリング（以下削孔検層）の前方探査技術を段階的に実施してその探査精度を上げていくことで適切な対策工（追加の水抜き工、補助工

法等）を実施して切羽周辺地山の安定を図った。本稿では、柳ヶ瀬断層群把握のために実施した前方探査とその区間に実施した対策工について報告する。



図-1 北陸新幹線位置図

2. 工事概要

新北陸トンネル（大桐工区）は、北陸新幹線、新北陸トンネルのうち、南越前町内の工事延長 3,605m の工区である。工事内容を表-1、掘削断面を図-2、地質縦断面を図-3に示す。2015年7月より本坑掘削を開始し、2019年8月に3,605m全ての掘削を無事完了させている。

3. 地形・地質概要

本工区の地質は、工事起点から大半の区間においては、美濃帯に属する古生代～中生代ジュラ紀の堆積岩で構成されており、砂岩、粘板岩、チャートおよび緑色岩類などの岩石、地層が発達している。砂岩を主体とした硬岩地山と亀裂が発達した砂岩・粘板岩互層が入れ替わり出現するとともに断層が断続的に表れる地質性状の変化が著しい地山である。工事終点の一部の区間においては、花崗岩や花崗閃緑岩で構成されている。また、中生層のため亀裂が発達しており、亀裂内に蓄積された湧水（帯水）や地表面を流れる川や沢からの供給水で多量の湧水の発生が予想される。新北陸トンネルにおいては、既往の調査より活断層との交差が予想されており、本工区では、柳ヶ瀬断層群との交差が予想されている（図-4）。

表-1 工事内容

工事名称	北陸新幹線、新北陸トンネル(大桐)
路線名	北陸新幹線(金沢・敦賀間)
工事場所	福井県南条郡南越前町地内
工期	2013年12月24日～2021年4月26日
発注者	(独)鉄道・運輸機構 大阪支社
受注者	熊谷・不動テトラ・梅林・轟 特定建設工事共同企業体
トンネル延長	本稿:3,605m 斜坑:483m
トンネル線形	直線、上り8‰
トンネル工法	NATM(発破)
掘削断面積	73.5m ² (図-2)

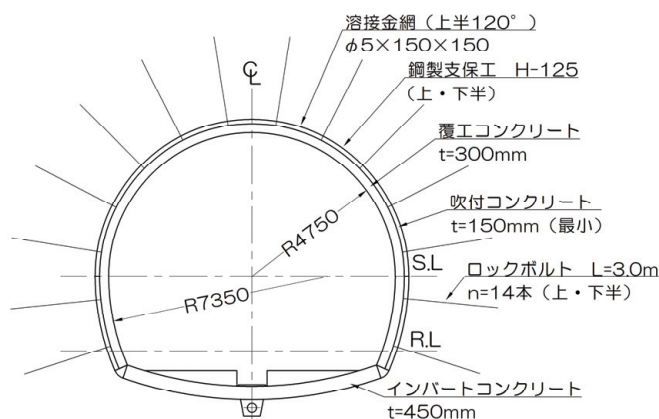


図-2 標準断面図

柳ヶ瀬断層は、日本海沿岸の福井県福井市鮎川から丹生郡越廼村越前岬沖の若狭湾東縁を通り、滋賀県伊香郡木之本町を経て、岐阜県不破郡垂井町に至る「柳ヶ瀬・関ヶ原断層帯主部」と、福井県敦賀市の立石岬付近から敦賀湾を横切り、滋賀県伊香郡余呉町に至る「浦底-柳ヶ瀬山断層帯」からなる。本報告で述べる柳ヶ瀬断層は「柳ヶ瀬・関ヶ原断層帯主部」に属している。

大桐工区では、工事の終点方で柳ヶ瀬断層群を通過し、その中で北陸自動車道と約40mの離隔で交差する。北陸自動車道の施工実績では、軟弱な地山と多量の湧水が確認された。

4. 前方探査の概要

前述のような地質条件を持つトンネルにおいては、急な地山状況の変化や突発湧水が安定した掘削へ与える影響が大きいと、前方探査により事前に地山状況を把握しながら掘削する必要がある。新北陸トンネル（大桐）では、当初よりトンネル全線においてドリルジャンボに

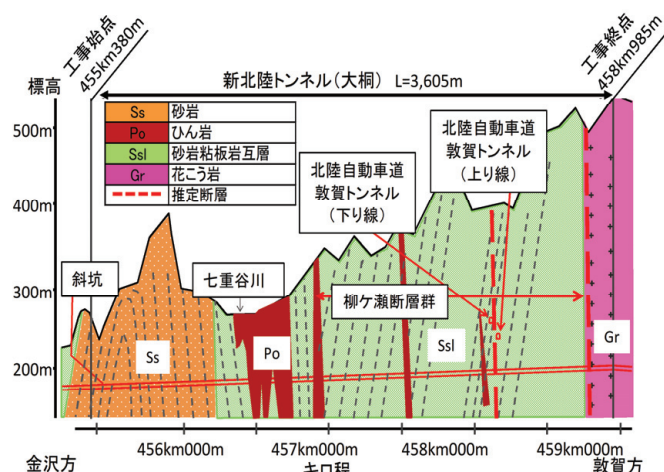


図-3 地質縦断面図

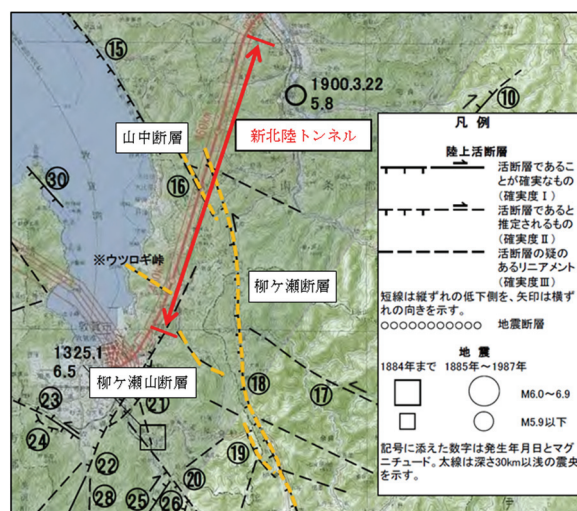


図-4 北陸新幹線、新北陸トンネル付近の活断層¹⁾

よる削孔検層を、地質縦断面図から予測される脆弱層や層境付近では、TSP 探査（弾性波反射法探査）を実施し、多量湧水が予測される地点では電磁波探査（FDEM 法）を実施し必要に応じて中尺水抜ボーリングを実施したが表-2に示すように精度に限界があること、水抜き効果が低いことから突発湧水や切羽の崩壊等が発生し掘削作業を一次中断せざるを得なくなった。以降もさらに多くの断層群が予想される地山状況であったために、この結果より、従来の前方探査に切羽の発破を利用した弾性波屈折法探査（以下弾性波トモグラフィ）と中尺コアボーリングの追加施工を実施することにした。

(1) 弾性波トモグラフィの概要

ロングスパンにおける前方地山の様相と性状を把握するために弾性波トモグラフィを実施した^{2), 3)}。

トンネル掘削時の発破振動を利用して、坑内と地表面間との連続発破トモグラフィを実施して切羽前方地山探査の高精度化を図った。探査範囲は 1,500m の区間で、地表面の受信点間隔は 10m とし、1 回の計測長が 470m のために探査は 4 回に分けて行った。

(2) 中尺コアボーリングの概要

中尺コアボーリングは、弾性波トモグラフィで判明した脆弱な地山状況と湧水状況の詳細の把握と水位低下を目的に実施した⁴⁾。本調査はボーリングマシンが必要になり、通常の掘削と並行して作業できないため、週末に施工して工程への影響を最小限に抑えている。調査は高速削孔が可能な PS-WL 工法を採用し、掘削径は 101mm、掘削長は 120m を基本とし、掘削位置は切羽後方の側壁

部（写真-1）、施工方向は外向き 10°、上向き 3° とした。事前調査より柳ヶ瀬断層は掘削方向の右から左へ変化する走向であることが想定されており、より早く地質変化を捉えるために掘削方向右側からの施工を実施した。

(3) 削孔検層の概要

削孔検層は、中尺コアボーリングで捉えた地山状況が出現する位置とその規模・湧水状況を捉えることや実際に切羽に出現する地山の硬軟を削孔エネルギーから定量的に把握することを目的に実施した⁴⁾。削孔径は 65mm、削孔長は 30m、削孔位置は切羽下半 2 箇所（写真-2）、施工方向は掘削方向前方とし、調査はトンネル全線で実施した。ボーリングビットは、対象地山が断層破碎帯であることからくりこのはげが良く、破碎帯での掘削に適したリトラックビットを用いた（写真-3）。

(4) 前方探査の併用効果

表-2に示したように前方探査には長所と短所がそれぞれある。規模の大きな断層破碎帯の存在や断層粘土背面に被圧湧水が存在する場合には、中尺コアボーリングや削孔検層では、探査深度が短いため、探査することができずに切羽の崩壊や突発湧水が発生するリスクがある。そこで、探査精度はボーリング調査には劣るもののロングスパンで前方地質の概略を把握できる弾性波トモグラフィを行い、中尺コアボーリングや短尺の削孔検層の短所部を補う効果的な前方探査とした。

図-5 に弾性波トモグラフィ結果を示す。①は 456km720m 付近で地山状況の急変と突発湧水（5t/min）が発生した場所であり、柳ヶ瀬断層群の影響域に入った

表-2 実施前方探査一覧

項目	探査深度	地質探査	湧水探査	水抜効果	施工(方)
①TSP探査 (弾性波反射法探査)	約100m	○	×	×	0.5
②電磁波探査 (FDEM法)	約40m	△	◎	×	0.5
③弾性波トモグラフィ	約500m	△	×	×	0
④中尺コアボーリング (PS-WL工法)	約120m	◎	◎	◎	5
⑤中尺水抜ボーリング	約120m	○	◎	◎	3
⑥短尺削孔検層	30m	◎	◎	◎	0.2



写真-1 中尺コアボーリングの施工位置



写真-2 削孔検層の施工位置



写真-3 リトラックビット

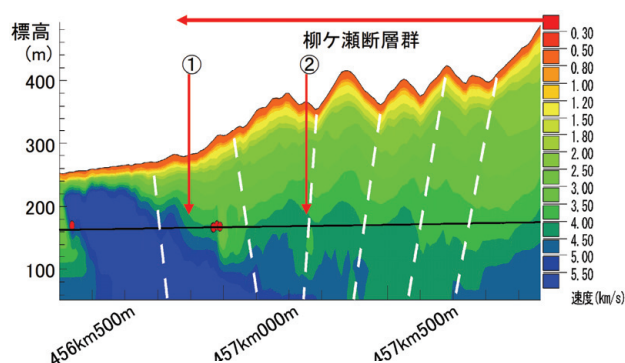


図-5 弾性波トモグラフィ結果

ことを捉えている。②は、457km100m 付近に出現した本トンネル中における最大規模の断層粘土を含む破碎帯であり、大小の破碎帯が約 100m 連続的に確認された場所であるが①で突発湧水を伴う切羽崩壊が発生したことから、地山状況と湧水状況の把握のために457km050mより中尺コアボーリングを実施した。(図-6) 中尺コアボーリングでは、457km090m 付近に幅 4m の断層粘土とその背面に被圧水を伴う破碎帯が確認された。

削孔検層は、457km097m より実施し(写真-4)、457km105m より断層粘土が出現することが判明するとともに、依然として被圧された大量湧水が確認されたが事前に前方地山の詳細が把握できたことから適切な対策工

を実施することができた。

このようなロングレンジからミドル、ショートレンジへ段階的に探查精度を上げて実施する前方探查の組み合わせは、柳ヶ瀬断層群のような規模の大きな断層群においてもその位置や地山状況の詳細の把握に非常に効果的であった。

5. 断層破碎帯の施工

断層破碎帯の施工では、各種ボーリングによって徹底的に湧水を排水して地下水位を低下させてから掘削することを基本とするが、地山状況は不良であり以下の点が懸念された。

- ・切羽天端部の不安定化
- ・鏡面の不安定化
- ・切羽周辺地山の塑性化による内空変位の増加

表-3 補助工法一覧

補助工法	天端安定対策	小口径長尺鋼管フォアパイリング(シリカレジン) (L=12.5m、φ76.3mm、17本@600mm)
		注入式フォアボーリング(シリカレジン) (L=3.0m、φ27.2mm、18.5本@600mm)
	鏡面安定対策	小口径長尺鋼管鏡ボルト(シリカレジン) (L=12.5m、φ76.3mm、5～10本@1200～1500mm)
	変位抑制対策	一次インバート(t=150mm)

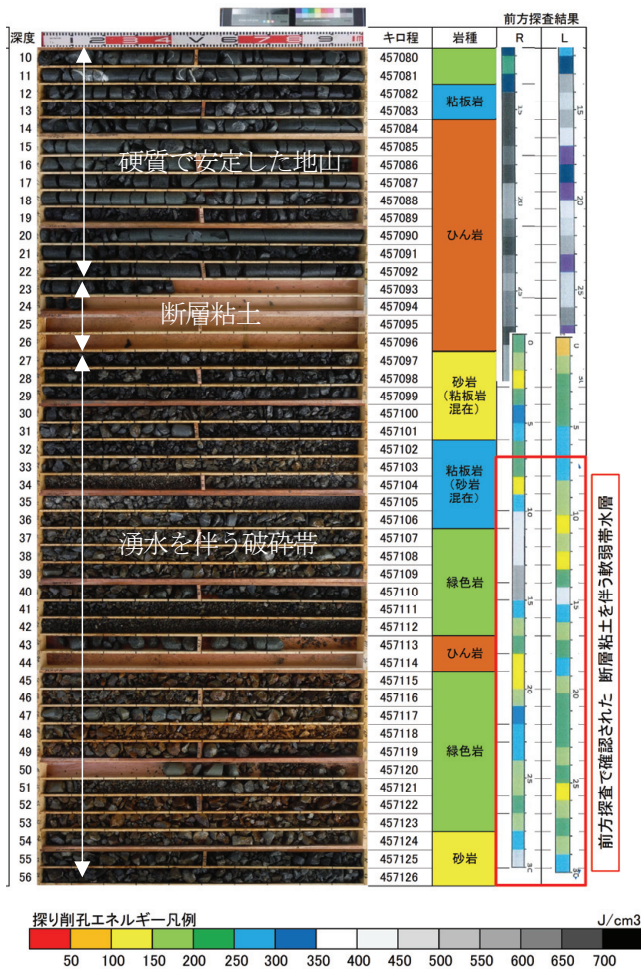


図-6 中尺コアボーリングと削孔検層結果

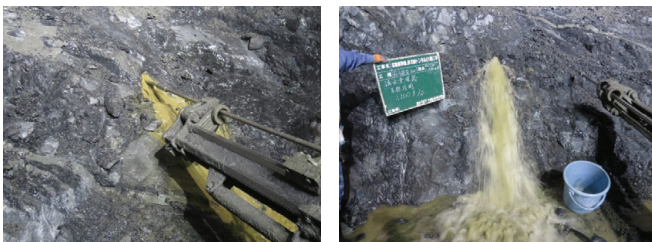


写真-4 断層粘土及び被圧湧水を削孔検層で検知

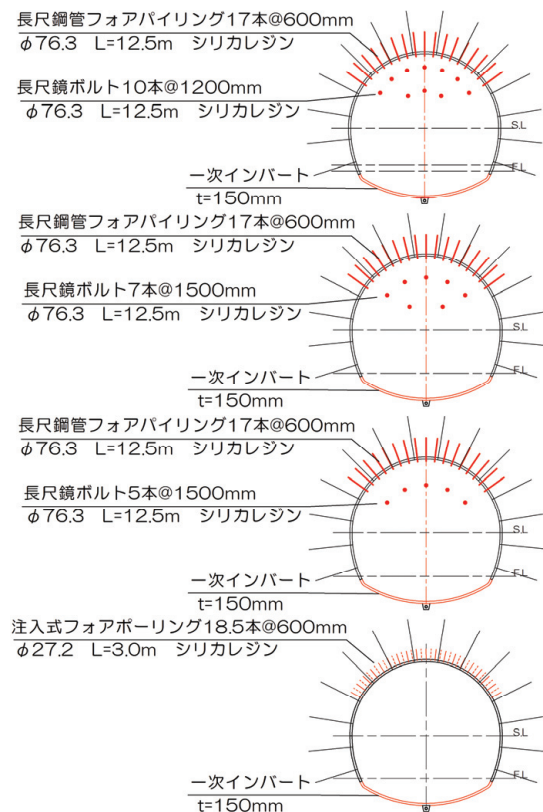


図-7 補助工法図

(1) 補助工法の選定及び適用

上述の懸案事項に対して、表-3、図-7 に示す補助工法を選定した。補助工法の適用は、中尺コアボーリング及び削孔検層から 4m 以上の天端対策工が必要と判断される場合には、注入式フォアボーリングよりも経済的に優位な小口径長尺鋼管フォアパイリングを選定することとした。

鏡ボルトの本数については、鏡の自立性・安定性から 5 本と 7 本を使い分けることとした。内空変位抑制対策では、最も変位抑制効果の高い一次インバートで早期併合することを選定したが、その適用は、初期変位を基準とし、後述の初期変位が管理基準値Ⅱを超過した場合に採用することとした。柳ヶ瀬断層群の断層粘土及び破碎帯部では、変位速度が非常に速く、一次インバート施工前（1D 時）において管理基準値Ⅱを超過することが予想された。このような場合には、長尺鏡ボルト工（10 本）によって先行地山を拘束して先行変位を抑制することで総変位量を低減する計画とした。

図-8 に補助工法選定フローを示す。

(2) 計測工の管理基準値について

新幹線トンネル断面においては、過去の事例から内空幅の 1.5%（150mm）以上の内空変位が発生するとトンネル周辺地山の塑性流動化が進行し不安定な状態になること⁵⁾から掘削内空幅の 1.5%である 150mm を内空変位の管理基準値Ⅲとする計画とした。また、このような地山では、初期変位量から最終変位量を予想して対策工に反映させることが重要である。大桐工区では、柳ヶ瀬断層群の掘削初期から計測間隔を 10～15m にしたことによって多くの計測データを取得した。データから初期変位（0.5day）と最終変位の関係を調べたところ概ね表-4 に示す初期変位（0.5day）と最終変位の関係を示したことから表-4 に示す初期変位（0.5day）の管理基準値においても管理することとした。

(3) 施工結果

写真-5 に断層粘土を含む破碎帯の切羽を示す。

断層粘土は、切羽において部分的な出現であったが、指圧で容易に潰せるほど強度が低下しており、大きな膨張性を示した。断層破碎帯では、細片化が進み角礫化しており塑性流動化しやすい状態であったことから非常に変位速度が速く水平変位が卓越していた。写真-6 に一次

インバートによる早期併合、写真-7 に先行変位抑制のための長尺鏡ボルト工の写真を示す。また、図-9 に①断面として小口径長尺鋼管フォアパイリングと一次インバートの対策工を実施した断面の計測工の経時変化図を、図-10 に②断面として①に加えて小口径鋼管長尺鏡ボルトを追加した断面の計測工の経時変化を、表-5 に対策工別の内空変位比較表を示す。①は非常に変位速度が速く、一次インバート施工前に管理基準値Ⅱを超過しており、切羽周辺地山の塑性領域の拡大から収束変位は管理基準値Ⅲを超過している。（掘削速度が遅いのは、塑性領域の拡大防止対策として上半仮併合や増しボルト等を行ったためである。）

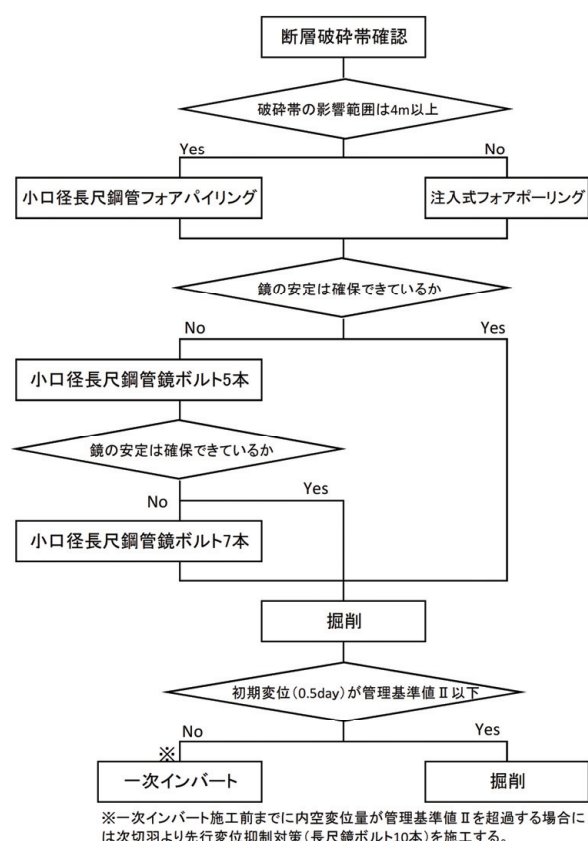


図-8 補助工法選定フロー



写真-5 断層粘土・破碎帯の切羽

表-4 柳ヶ瀬断層帯施工部の計測管理基準値

支保パターン		天端沈下量(mm)			内空変位量(mm)			備考
		I	II	III	I	II	III	
IS	初期変位量	-	-	-	20	35	50	0.5day時
	計測変位量	38	56	75	75	113	150	

図-8に示した補助工法選定フローに則り小口径鋼管長尺鏡ボルト（10本）を追加した結果、小口径鋼管長尺鏡ボルトによって切羽前方地山の先行変位を抑制し、初期変位（0.5day時）と下半掘削時において約45%程度の変位抑制効果が、一次インバート施工時や収束変位では、約27%程度の変位抑制効果が確認された。変位量は大きい上半施工完了時及び下半施工完了時に明確な収束傾向を示したことから塑性領域の拡大が継続するような異常な変位を防ぐことができた。柳ヶ瀬断層群のように断層粘土や破砕帯が連続するような変位速度の速い不良地山においては、天端安定対策や変位抑制対策と共に長尺鏡ボルトによって切羽前方地山を拘束して先行変位か

ら抑制することで切羽周辺地山の塑性領域の拡大を防止して安全に施工することが可能である。

6. まとめ

近年、周辺環境の保全、地表面利用の高度化、保守・安全の確保から長大トンネルの建設が増加傾向にある。トンネル工事の特性として、地山条件を事前に完全に把握することは経済的にも技術的にも難しい場合が多い。特に長大トンネルでは、線形の制約から規模の大きな断層と交差する場合が多い。規模の大きな断層は複数の断



写真-6 一次インバートによる早期併合状況



写真-7 長尺鏡ボルト施工状況

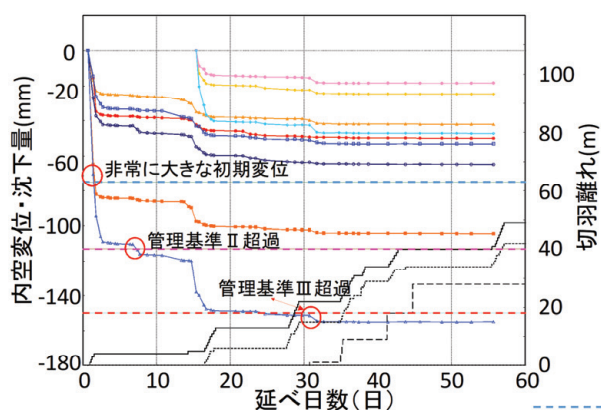


図-9 ①断面計測経時変化図
（フォアパイリング+早期併合）

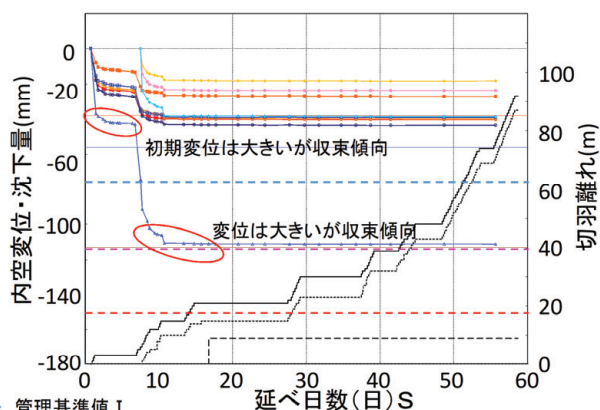


図-10 ②断面計測経時変化図
（フォアパイリング+長尺鏡ボルト+早期併合）

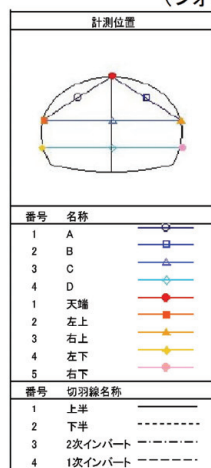


表-5 対策工別内空変位比較表

(mm)

	0.5day変位	下半掘削 施工時変位	一次インバート 施工時変位	収束変位
① ・小口径長尺 鋼管フォアパイリング ・一次インバート	65	138	151	155
② ・小口径長尺 鋼管フォアパイリング ・小口径鋼管長尺鏡ボルト ・一次インバート	37	74	111	111
②の①に対する水平変位低減率	43%低減	46%低減	27%低減	28%低減

層を伴う断層群となっている場合があることから断層群の規模と地山状況を把握することは経済的、合理的に施工するためには重要なことである。新北陸トンネル（大桐）では、ロングレンジからショートレンジまで段階的に各種前方探査を実施して断層群の規模、性状、出現位置を特定して適切な対策工を実施することで安全に合理的に掘削を終えることができた。今後増えるであろう長大トンネル工事の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 活断層研究会編：日本の活断層，分布図と資料，東京大学出版，1980.
 - 2) 小林寛明，滝沢日香里，若林功起，中本大悟，石濱茂崇，青木宏一：掘削時の発破を起震とした地山弾性波速度モデルの構築と施工の対比，第72回土木学会年次学術講演会概要集，VI-213，2017.
 - 3) 高原英彰，難波雅文，吉森佑介，濱田好弘，中本大悟，石濱茂崇：掘削時の発破振動を利用した弾性波トモグラフィ探査と施工実績の対比，日本応用地質学会平成29年度研究発表会講演論文集，pp.29-30，2017.
 - 4) 吉森佑介，高原英彰，鎌田和孝，中本大悟：中・短尺ボーリングを併用し得られた地質情報で断層破砕帯を施工，トンネルと地下，vol.48，no.11，2017，pp.7-13，日本トンネル技術協会誌，2017.
 - 5) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説，p326，2008.4.
- (2020.8.7 受付)

PREDICTION OF GROUND BEHAVIORS AHEAD OF THE CUTTING FACE IN THE FAULT GROUP

Daigo NAKAMOTO, Yusuke YOSHIMORI, Ryo KASHIWAGI,
Shigetaka ISHIHAMA and Koichi AOKI

In some fault areas, there is a master fault, with many secondary faults in the vicinity, which tends to form a large fault group. When boring a tunnel in such a fault group, especially when it is fragile and under high-pressure water inflow, the ground is prone to trigger a collapse over a large area. To cope with these issues, it is important to identify the location of faults, in-situ ground characteristics and aquifer conditions and to take preventive measures such as drainage, reinforcement, etc. The project of constructing the Shin-Hokuriku tunnel (at Ogiri) on the Hokuriku Shinkansen Line is planned to cross the Yanagase fault group. It was determined that the cutting face might become unstable due to occurrence of unanticipated water springs and ground plasticization. To overcome these difficulties, as part of the forepoling exploration into the ground ahead of the cutting face, we used the following combined approach: elastic wave tomography survey, horizontal survey core boring (middle length), and drill jambo boring logging (short length) to collect data of the faults that lay ahead and to identify their locations and characteristics, which were reflected in devising preventive measures. These approaches were shown to be very useful resulting in successful tunnel construction. This paper reports on the prediction of behaviors of the ground ahead of the cutting face and the preventive measures taken.