

小土かぶりで河岸段丘を貫くNATMの施工計画 —北陸新幹線第2魚津トンネル—

Excavating Plan of the Tunnel with Little Over Burden, which Passes River Terrace
-Hokuriku Shinkansen, No.2 Uozu Tunnel-

玉本学也¹・北野仙之²・井浦智実³・藤野 晃⁴

Gakuya Tamamoto, Noriyuki Kitano, Tomomi Iura and Akira Fujino

¹正会員 工修 鉄道・運輸機構 北陸新幹線第二建設局 魚津鉄道建設所
(〒937-0066 魚津市北鬼江2丁目14番5号)

E-mail: gak.tamamoto@jrtt.go.jp

²鉄道・運輸機構 北陸新幹線第二建設局 魚津鉄道建設所 (同上)

³正会員 鉄道・運輸機構 北陸新幹線第二建設局 魚津鉄道建設所 (同上)

⁴正会員 清水・佐藤・アイサワ・丸新志鷹特定建設工事共同企業体 北陸新幹線第2魚津トンネル作業所
(〒937-0824 魚津市室田160)

The No.2 Uozu Tunnel of Hokuriku Shinkansen is a tunnel of overall 3 097, and is a geological feature composed mainly of any unconsolidated sand, silt and gravel of hills and river terrace in later Pliocene Territory to Pleistocene Quaternary. This paper proposes the excavating plan of this tunnel, whose burden is very small, adopting auxiliary methods according to the depth of the tunnel and the condition of surface of the ground. This plan is depending on the result of in situ measurement and FEM analysis

Key Words : NATM, little over burden, unconsolidated soil

1. はじめに

近年、小土かぶり未固結地山トンネルを山岳工法で掘削する事例が増加している。小土かぶりトンネルの施工では、地上部に道路・家屋などの重要構造物が存在するケースが多い。また、変状などの影響がダイレクトに地表部に伝わるため、過去にも多くの不具合が発生している。そのため、施工にあたっては高度な施工管理が要求される。

以上をふまえ、本稿では、未固結地山の河岸段丘をNATMで今後掘削する第2魚津トンネルの小土かぶり区間の施工計画について報告を行う。

2. 第2魚津トンネルの概要

北陸新幹線、第2魚津トンネルは、高崎起点260km897m～263km994m間に位置する延長3 097mの山岳トンネルである。(図-1) 富山県魚津市内の開析扇状地、河岸段丘で構成される台地を掘削する。トン

ネル掘削は終点方より7%の上り勾配で行っており、高位段丘面(土かぶり60～80m)、中位段丘面(土かぶり22～30m)、低位段丘面(土かぶり4～10m)を順に通過する。8月末現在、約2 300mの掘削を完了しており、今後は低位段丘面(小土かぶり区間)へ向けて掘削を行うことになる。

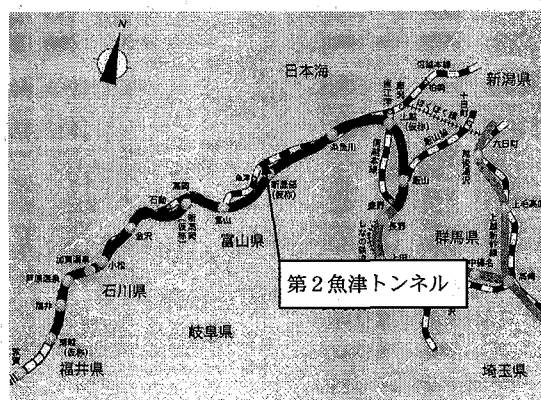


図-1 トンネル位置図



図-2 トンネル平面図

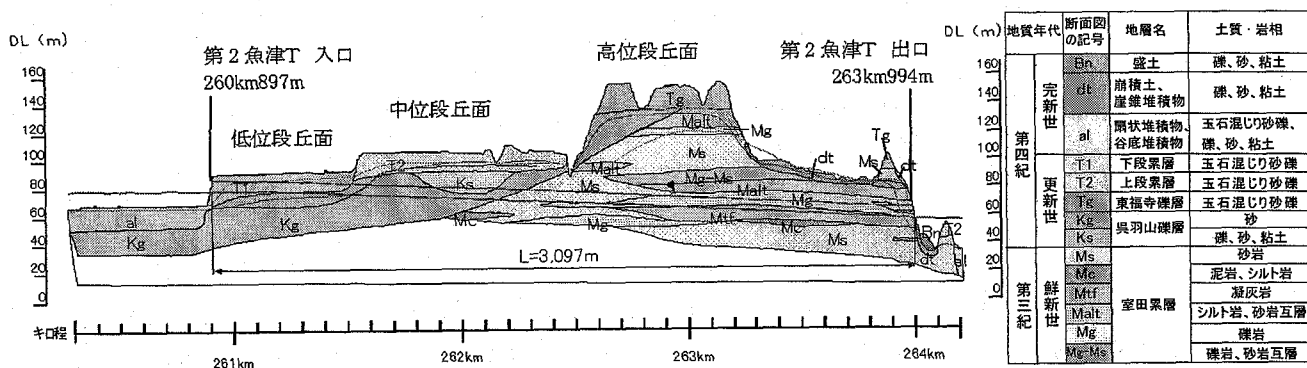


図-3 トンネル地質縦断図

3. 第2魚津トンネルの水利・地質構造

第2魚津トンネルは、図-2に示すとおり、開析扇状地、河岸段丘で構成される台地および丘陵地部を通過する。丘陵地部（高位段丘面）の土かぶりは約10～80mであり、地質は新第三紀鮮新世後期の室田累層の砂岩（Ms層）、礫岩（Mg層）、泥岩・シルト岩（Mc層）がトンネル断面内に出現する。（図-3）

台地である中位段丘面の土かぶりは22～28mであり、地質は第四紀更新世の玉石混じりの砂礫層が主体の下段累層（T1層）礫、砂、粘土が主体の呉羽山礫層（Ks層）、砂が主体の呉羽山礫層（Kg層）がトンネル断面内に出現する。

本稿で対象とする低位段丘部には、T1層とKgが存在する。前者は、地表面から層厚10～20mで分布し、その下位に後者が分布する。トンネルは、T1層とKg層の層境付近を掘削することになる。（図-4）

T1層は最大φ1m程度の巨礫を含むが比較的自立性が高いのが特徴である。一方、Kg層は礫層であるものの、基質に粘土分が多いため相対密度は密な状態にある。

どちらの層とも地下水位面が高い上に透水性が低い。T1層とKg層の層境付近に地下水が存在し、Kg層

にも層境からの地下水浸透により、局所的な水みちがあるものと予想される。

このような水利・地質構造であるため、トンネル掘削時には、以下の問題が懸念される。

- ・突発湧水による基質部（主に細粒分）の流出に伴う切羽の流出や崩壊
- ・切羽の不安定化に伴う地表面沈下の増大

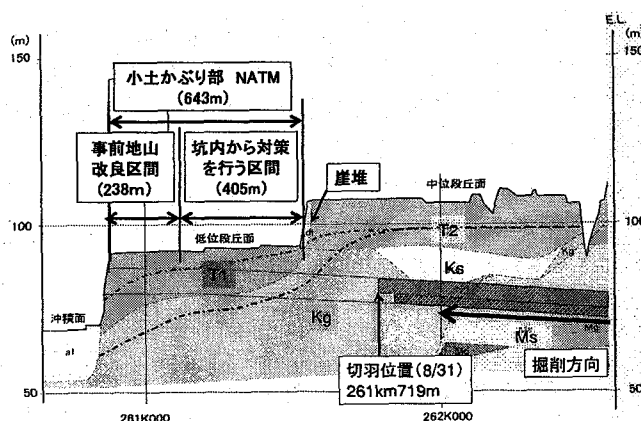


図-4 小土かぶり部地質縦断図

4. 中位段丘面における施工結果

中位段丘面においては土かぶり 22～28m で掘削を行っている。図-5、図-6 に中位段丘面における掘削のトンネルの変位計測結果を示す。262km040m 付近を境にして、終点側では砂岩の Ms 層、起点側では砂が主体の Kg 層を掘削している。

掘削の補助工法として注入式先受けボルト（18.5 本）と長尺鏡ボルトを採用している。ただし、掘削が終点側から起点側に進むにしたがって地山の条件が良くなったため、269km900m より起点側では長尺ボルトを省略している。また、269km829m より起点側ではさらに注入先受けボルトを 18.5 本から 12.5 本に減らしている。

トンネル掘削にともなうトンネルの変位計測結果によると、Ms 層掘削時は天端沈下が 20～60mm であり、脚部沈下は最大 100mm 以上を記録している。一方、Kg 層では変位量は激減し天端沈下、脚部沈下ともに 20mm 程度に収まっている。起点側に掘削が進むにしたがって、補助工法を軽くしているにもかかわらず変位が減少していることから、起点側が地山の状態が良いことが推察できる。

小土かぶり区間では主に Kg 層ならびに T1 層を掘削することになる。T1 層は Kg 層と同じく第四紀更新世に属し、砂礫を主体とする層である。そのため、掘削時の地層の正常は似通ったものと予想される。このことから、本トンネルの小土かぶり部の施工においても、切羽の安定性はある程度確保され、地下水位対策と切羽安定対策を十分に行う補助工法を採用すれば、NATM で掘削可能であると判断できる。

5. 小土かぶり区間の概要

小土かぶり区間である低位段丘面の地表面は大部分が水田である。中位段丘面と低位段丘面の境界には段丘崖が存在し、土かぶりが急減する。また、低位段丘面には表-1 に示すとおり、段丘崖、二級河川大座川、民家、県道、市道が存在し、それらの直下を土かぶり 5～7m でトンネルが通過する。

トンネル掘削に際しては、以下の3点に留意の上、施工計画を策定することが求められる。

- ①段丘崖部における地質、湧水状況の急激な変化に伴う、トンネル天端からの抜け落ち発生懸念
- ②地表面の構造物（河川、民家、県道）に対する、地表面沈下の発生を効果的に抑制するための補助工法の採用
- ③確実な切羽安定対策工と突発的な湧水などを防止するための有効な水抜き対策の実施

表-1 トンネル直上の構造物等

	土かぶり	特 徴
段丘崖	11～22m	崩壊地形、土かぶり急変
二級河川 大座川	5m (河床)	幅 3m×深さ 1.6m コンクリート二面張り
民家	7m	母屋と納屋有り コンクリート基礎
県道	7m	上水管（深さ 1.2m） 下水管（深さ 2m）
市道	5m	

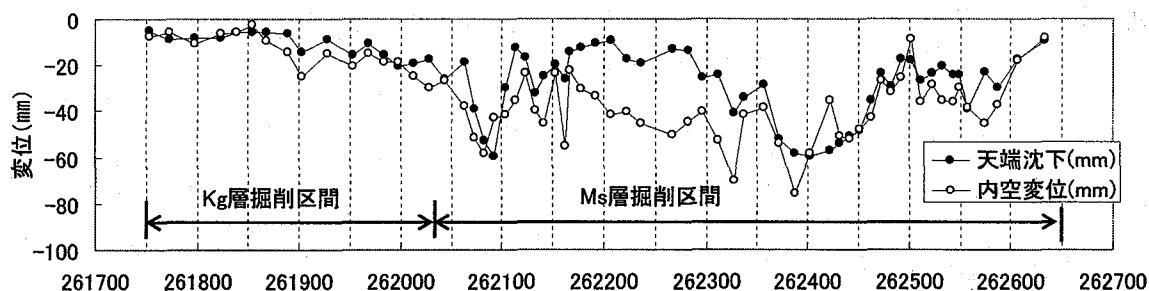


図-5 中位段丘面掘削時における水平内空、天端沈下の分布

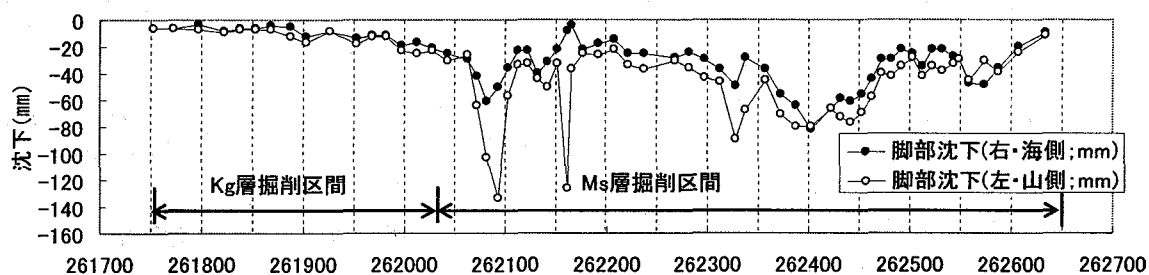


図-6 中位段丘面掘削時における脚部沈下の分布

6. 小土かぶり区間の施工計画

小土かぶり区間の施工にあたり、地上からの対策工（事前地山改良工）とトンネル坑内からの対策工を検討した。

地上からの対策工（事前地山改良工）とは図-7に示すとおり、あらかじめ地上より120°の範囲を開削した上で、セメント改良土により置換えをした後、NATMにより掘削を行う工法である。コストの検討を行う際には、地表に存在する道路の付替え、借地費、支障する倉庫の仮移設等を考慮に入れている。

一方、トンネル坑内からの対策工では、坑内からの注入式フォアポーリングを基本的な補助工法として検討を行うものである。

両工法について先に挙げた条件でコストを詳細に比較した結果、土かぶりが5m以下の場合については、事前地山改良工が安価であるという結果となった。これは、開削に伴う掘削・埋め戻し土量や借地範囲が低減するためである。一方、土かぶりが5m以上の場合は、坑内からの対策工の方が安価という結果となった。

また、前述したとおり、本トンネルの土かぶりがある5m以上の区間の直上には河川、民家、県道など重要構造物が位置している。そのため、地上からの開削を要する事前地山改良工では、地表部に大きな影響を与えることになる。そのため、構造物と交差する箇所については、坑内から対策を行うことが合理的である。

以上の検討により、起点側の土かぶり5m以下の区間(L=238m)については、事前地山改良工を実施した上でトンネル掘削を行うこととし、終点側の土かぶりが5m以上の区間(L=405m)では、坑内からの対策工によりトンネル掘削を実施することを決定した。

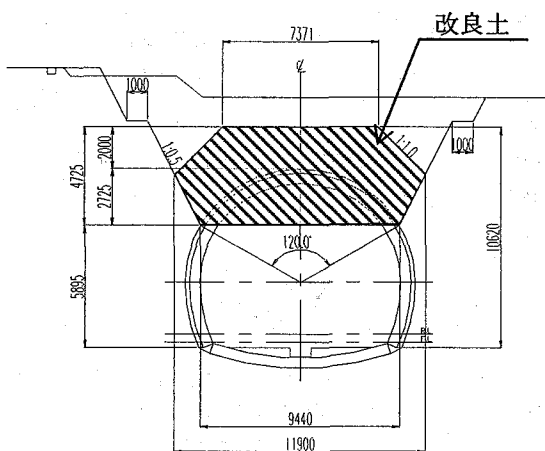


図-7 事前地山改良区間の断面図

7. 坑内からの対策工

坑内からの対策工を実施する区間については、切羽安定対策工、湧水対策工および早期閉合の3点に着目した補助工法を選定した。(図-8)

a) 切羽安定対策工

掘削対象の砂礫層は、切羽自立性が比較的高いと
考えられるものの、湧水が予想される未固結地山で
あるため、切羽安定対策としての先受け工の採用は
不可欠である。

先受け工として長尺鋼管先受け工 (AGF) と注入式
フォアポーリングの比較を行った。

長尺鋼管先受け工については、以下の理由から施工に適さないと判断した。

- ・小土かぶりの砂礫層で、径の大きい削孔を行った場合、地山を緩ませる可能性が高い
- ・玉石によって鋼管が曲がり、トンネル断面より離れることがあり、天端からの地山の剥落の危険性が増大する

一方、注入式フォアポーリングが以下の理由から有利であると判断し、先受け工として採用することとした。

- ・毎切羽で施工可能であり、地山の状況に応じて柔軟に対応が可能であること（本数・ピッチ・注入量を変更可能）
- ・毎切羽で確実に施工するため、先受け下部に残る地山が薄く、切羽作業時の天端からの地山剥落などの危険性が低い

注入式フォアポーリングのみで切羽安定性が確保できない場合には、適宜長尺鏡ボルトを施工して、切羽の安定を図ることとする。

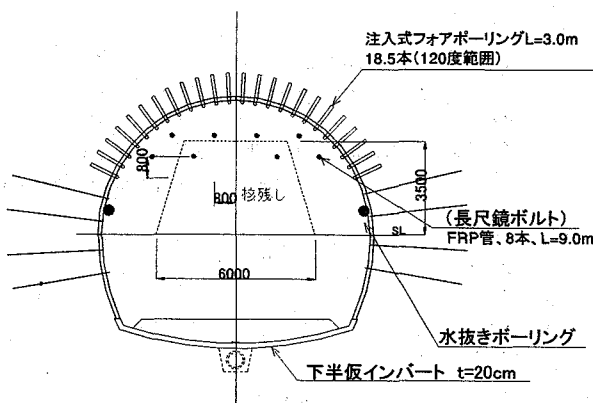


図-8 坑内対策区間の断面図

b) 湧水対策工

掘削の際に河川扇状地特有の突発湧水の影響によって、切羽の安定性が低下することが懸念される。天端付近に出現する層境に分布する地下水を有効に排水するために、坑内水抜きポーリングを基本とする。また、有効性を確認した上で地上からの揚水を実施する。

c) 早期閉合

小土かぶりトンネルにおける掘削では、地山の変形を抑制し、トンネルを早期に安定に導くため、下半仮インバート工を施工する。

8. 各交差個所の対策工

重要構造物と交差する個所では、施工段階での早期閉合をより徹底するため、補助工法に上半仮インバートを追加することとした。また、各交差部で綿密に検討を行い、表-2 に示す管理基準値を満足できるように、追加の補助工法の採用の可否を決定する。

表-2 交差個所の管理基準値²⁾

	管理基準値
民家	沈下勾配 $1 \sim 2 \times 10^{-3}$ rad
県道	絶対沈下量 40mm

(1) FEM解析

民家と県道との交差個所については、第三者災害を引き起こす可能性があり、とくに重要な個所であるため、FEM解析を行った上で、評価を行うこととした。解析ケースは表-3 のとおり3ケースとした。また、モデルは、図-9 に示すとおりである。

表-3 解析ケース

解析ケース	検討断面	補助工法
CASE-1	県道 261k400m	長尺鋼管 先受け工法
CASE-2.1	民家 261k420m	長尺鋼管 先受け工法
CASE-2.2		注入式フォア ポーリング

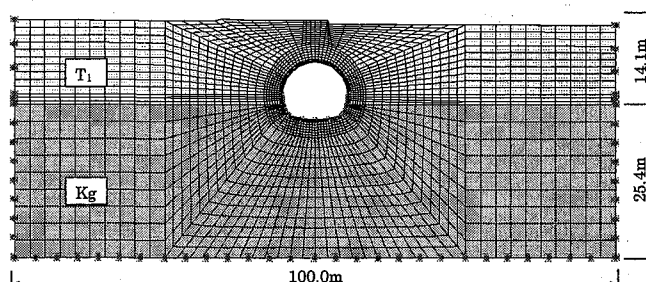


図-9 民家直下の有限要素分割図

表-4 地山の物性値

地質	初期変形係数 D0 (kN/m ²)	ポアソン比 ν_0	粘着力 C (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (deg)	単位体積重量 γt (kN/m ³)
T1	25,500	0.35	20	30	18
Kg	68,400	0.35	20	35	18

表-5 トンネルの各要素

	仕様	弾性係数 E (kN/m ²)	断面 2 次 モーメント I (cm ⁴)	断面積 A (cm ²)	断面係数 Z (cm ³)
鋼製支保工	H-150	2.1×10^8	1,620	39.65	216
吹付け コンクリート	t=20cm f'ck=18N/mm ²	3.4×10^6	—	1,960	—
ロックボルト	D22×8 本 L=3.0m	解析では考慮しない			
注入式フォア ポーリング	L=3.0m, 18.5 本 シカゲン注入	解析では考慮しない			
長尺鋼管先受 け工 (AGF)	L=9.5m (6.0m シフト) 鋼管φ114mm シカゲン注入	638,000	T1 層の変形係数×25 倍 (アンブレ工法技術資料より)		

解析は二次元弾性解析とした。変形係数は表-4に示す坑内水平載荷試験の値を用い、強度定数はNATM設計施工指針³⁾(日本鉄道建設公団)に基づき設定を行った。(表-5)

以上のFEM解析によって求められた結果をもとに、民家・県道直下を掘削する際の補助工法の決定を行う。

(2) 民家

トンネルは民家の端部の下を通過する。民家が影響範囲内にあるため、トンネル掘削時に変状を与える可能性がある。

FEM解析の結果を表-6、図-10から示す。この結果から、母屋は管理基準値内に収まるが、納屋については基準値を超過することが判明した。そのため、納屋については対策を行う必要がある。

納屋はトンネル掘削の影響範囲に入っているため、トンネルの掘削によって納屋に影響を与えることは不可避である。そのため、納屋と続いている母屋との縁切りを行うことによって、掘削後の家屋の補償費を減少させる方法を採用することとした。

表-6 民家直下における結果

補助工法	長尺鋼管先受け工 (AGF)	注入式フォアボーリング
土かぶり	7m	
地表面沈下	29.3mm	32.5mm
天端	36.8mm	43.2mm
納屋の傾き	2.45×10^{-3} rad	2.70×10^{-3} rad
母屋の傾き	0.12×10^{-3} rad	0.10×10^{-3} rad

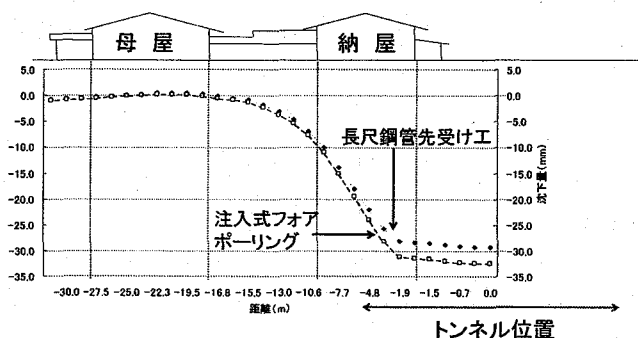


図-10 FEM解析による地表面沈下の結果

(3) 県道

県道直下の掘削では、

- ・地表面沈下により、道路交通に影響を与える
- ・陥没した場合、第三者災害を引き起こすという問題がある。

検討の結果、県道の直下では、先受け工によって切羽を安定させれば、地上の道路交通に影響を与えることなく掘削が可能であると判断した。

9. 追加調査

(1) B計測計画

小土かぶり部の各構造物との交差個所においてトンネル掘削を行う前に、事前の影響把握と対策工の妥当性検証するために、B計測を実施する予定である。場所は、段丘を通過したのち、河川・民家・県道と交差する手前の261km520m付近を計画している。計測項目は、地中鉛直変位、地中水平変位、地表面沈下とする。

(2) 追加地質調査

小土かぶり部での掘削する際の管理に用いるため、追加地質調査を実施する。

段丘部付近複雑な地質、地下水の状況を把握するために土質ボーリングを行う。低位段丘面の湧水対策としてのディープウェルの有効性を確認するために、段丘部で現場揚水試験を実施する。

10. おわりに

実施工では、計測結果、切羽観察結果などを施工に確実にフィードバックさせていく所存である。その上で、第一に安全を確保し、経済性にも配慮したトンネル掘削を行っていききたい。

参考文献

- 1) 久湊豊, 森近裕一郎, 山本一郎, 藤野晃: 未固結地山を小土かぶりで掘るー北陸新幹線 第2魚津トンネル, トンネルと地下, Vol.38, No.3, pp. 159-166, 2007
- 2) 日本トンネル技術協会: 地中構造物の建設に伴う近接施工指針, 1999
- 3) 日本鉄道建設公団: NATM設計施工指針, 1996