

地すべり跡地形を呈する坑口部における 軟弱地山対策の設計と施工

**Design and Construction of Countermeasure in Poor Rock Condition
regarding Tunnel Entrance Work at Portion with Experience of Landslide**

山田 浩幸¹・大谷 朋彦²・斎藤 泰信³

Hiroyuki Yamada, Tomohiko Ootani and Yasunobu Saitou

¹正会員 株式会社 鴻池組 大阪本店土木技術部 (〒541-0057 大阪市中央区北久宝寺町3-6-1)

E-mail:yamada_hy@konoike.co.jp

²鉄道建設・運輸施設整備支援機構 能生鉄道建設所 (〒943-1345 新潟県西頸城郡能生町桜木94)

³株式会社 鴻池組 桑取トンネル工事事務所 (〒942-1735 新潟県上越市大字土口字下川原557)

On Kuwadori tunnel, there is poor ground condition with talus at the entrance portion, and the entrance portion has the experience with landslide. Therefore, it is possible that the landslide occurs at the entrance portion because of loose ground condition due to excavation.

The fore-pilling method with hybrid injection (AGF-HITM) was applied for protecting against loose ground condition during excavation as a countermeasure. Additionally, the arch-end portion was supported in advance and the long rock-bolts were installed at the cutting face.

In this paper, the design and consideration regarding applied countermeasures are described.

In addition, the effect regarding is verified based on the monitoring data.

Key Words : *Landslide, Auxiliary Method, Umbrella Method, AGF-HITM, Monitoring*

1. はじめに

桑取トンネル他工事は北陸新幹線、長野から糸魚川間(工事延長 約88.4km)のうち、山岳トンネル区間L=1,685mを含む全区間L=2,047mの新幹線新設工事である。

山岳トンネルの施工は、標準工法であるNATMで施工を実施しているが、NATMの施工においては、地山自身のアーチアクションを利用するため、坑口部や破碎帯等の地山強度が低い部分では補助工法を採用し、作業の安全性と合理的な施工を進めることが重要となる。

今回、報告する桑取トンネル起点側坑口部においては、地形的に地すべり跡地の末端に坑口が計画され、滑落崖が多数存在し、土かぶりが薄い上に、地質的にも崖錐が厚く堆積し、軟弱な地山での施工となった。

これらの厳しい施工条件の下での坑口部の施工にあたり、トンネル掘削に伴う地すべり抑止対策として、複合注入式多段フォアパイルリング(AGF-HITM, 以下、AGF-HITMと称す。)を採用し、軟弱地山対策として前方脚部補強パイルならびに長尺鏡ボルトを併用することで地すべりを誘発することなく安全かつ経済的な施工の実現が図れた。

本論文では、軟弱地山対策として採用したこれらの補助工法の選定および設計について述べるとともに、施工時に得られた計測データに基づき、補助工法の効果に関しての知見を述べるものである。

2. 工事概要

桑取トンネルは新潟県上越市増沢より富山側へ向け片押しでトンネルL=1,685mをNATMで施工するものである。工事概要としては以下の通りである。

(工事概要)

- ・ 工事名：北幹，桑取トンネル他工事
- ・ 工事場所：新潟県上越市増沢～西頸城郡名立町平谷
- ・ 工事内容：山岳トンネル 延長 $L=1,685\text{m}$
- ・ 掘削断面積：約 82m^2 （インバート含む）
- ・ 縦断勾配： $4/1,000$
- ・ 掘削工法：上半先進交互併進工法
（ショートベンチカット工法）
- ・ 掘削方式：機械掘削方式

3. 地形・地質概要

事前の地質調査結果及び追加調査（鉛直，水平ボーリング）から，坑口部では地形的に滑落崖が多数存在した地すべり地形を呈しており，坑口位置が地すべり値の末端に位置していること，地質的には，基盤が新第三紀の泥岩（一軸圧縮強度 $5.7\sim 7.2\text{Mpa}$ ）であるものの，坑口部付近では崖錐（ N 値 5 程度）が厚く堆積していることが確認された。

さらに，坑口部のボーリング調査結果と空中写真判読ならびに現地踏査結果から図-1に示すように泥岩中に介在する薄い凝灰岩層（ $GL-7\text{m}$ 付近）がすべり層となり大規模な地すべりの発生が想定された。現状では地すべりは滑動していないものの，トンネルの掘削によるすべり面や地下水位の変化に伴い，地すべりを誘発することが懸念された。

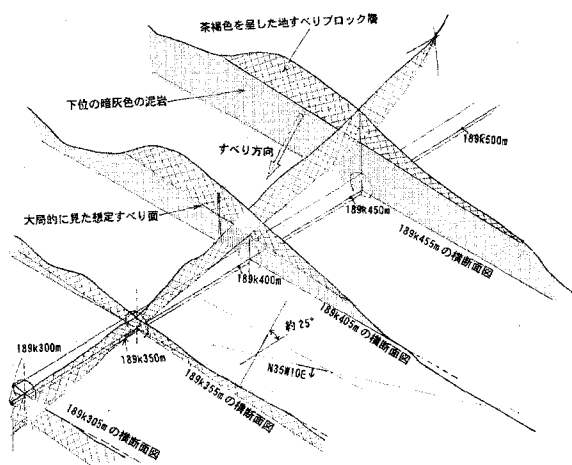


図-1 坑口部地質構造図

4. 補助工法の選定と設計

起点側坑口部におけるトンネルの施工を安全かつ合理的に実施するにあたり，前述の地質状況より地すべり対策をふまえた上で，軟弱地山における切羽安定対策としての補助工法の検討を実施した。

当該箇所における，トンネル施工上の課題を整理すると次のとおりである。

- ①切羽の不安定化（崩壊，鏡面の押出し等）
- ②偏土圧の作用
- ③地すべりの誘発
- ④支保工脚部沈下とゆるみの助長

補助工法の選定にあたっては，上記の課題に対して，工法の確実性や効果，経済性，施工性といった観点から目的毎に比較検討を実施し，以下に示す工法を選定した。

- ①天端の安定：AGF-HITM（複合注入式多段フォアパイリング，PU-IF（注入式フォアボーリング））
 - ②鏡面の安定：長尺鏡ボルト（自穿孔FRPボルト）
 - ③支保工沈下抑制：脚部補強パイル（前方打設）
 - ④湧水および前方地山探査（先行水平ボーリング）
- 以下にそれぞれの選定及び設計の考え方を示す。

(1) 天端の安定対策

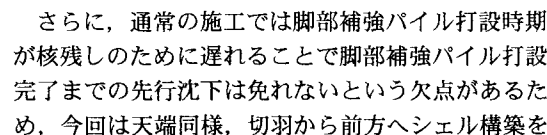
天端の安定に関しては図-3に示すフローに示すとおり，鉄道建設・運輸施設整備支援機構の長尺先受け工の設計指針¹⁾に基づき，まず，長尺先受けの必要性に関して検討を行った後，費用対効果の検討を表-1に示す比較検討表により実施した。

検討の結果，長尺先受け工の採用を決定し，長尺先受け工を実施した際の切羽の安定性に関する確認を行った。

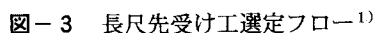
なお，今回採用したAGF-HITMでは，通常のAGF工法と比較して以下の利点がある。

- ①地質の変化に応じて打設範囲の変更が容易であり，多段打設を実施することで先受け効果が高まる。
- ②無拡幅工法で鋼管の打設を千鳥に行うことで，鋼管間の地山の抜け落ちが少なく，拡幅に伴う過大なゆるみの発生が少ない。
- ③覆工コンクリートとして断面変化を生じないことから，背面空洞やひびわれの発生を抑制でき，覆工コンクリートの品質向上が図れる。
- ④削孔方式が牽引方式であるため，施工精度が高く，鋼管径が $\phi 89.1\text{mm}$ と通常のAGF工法に比べひと回り小さいため施工性が優れる。

なお、AGF-HITMでは、セメント系とウレタン系の材料を複合注入は可能であるが、事前検討の結果、確実な注入効果を図る目的で本トンネルでは、注入材としてシリカレジン（ウレタン系）を採用した。

[illegible]

なお、脚部の補強という観点から、坑口部で実施した押さえ盛土（ソイルセメント）施工区間に関しても脚部補強パイルの打設を実施している。



(4) 湧水対策および前方地山探査

トンネル施工時に湧水により切羽の安定が損なわれたり、作業性が低下することを防止する目的とメタンガスの検知を実施するため、前方地山確認を兼ねた先行水平コアボーリングを実施した。

トンネルの事前調査では、トンネルが地下線状構造物であるという特殊性と経済的な問題から、主として弾性波探査およびポイント的な鉛直ボーリングにより実施されることが一般的である。

しかしながら、褶曲や地下水等の影響で想定された地山と実際の地山が異なることがまま見られる。

本トンネルにおいて、先行水平コアボーリングにより前方地山を分析・評価する事で地質の変化を確認し、対策工を事前に検討できたことは大変有意義であったと考える。

5. 補助工法の施工

(1) 押さえ盛土

地すべり対策の一貫として偏圧対策をかねて押さえ盛土を施工した。

盛土材料は現地発生土（シルト質粘性土）を使用し、固化材としては六価クロム対応型の材料を用いた。なお、施工範囲としては、偏圧の発生を抑止する目的で、用地内でできるだけ沢地形を埋め込む形となるように表層の崖錐は1：0.7で切り込み確実な置き換えを実施した。配合に関しては、表-2に示す配合試験を実施し、（現場強さ／室内強さ）を1/2と設定し、現場強度 $1\text{N}/\text{mm}^2$ 、室内目標強度 $2\text{N}/\text{mm}^2$ を確保できるよう $C=125\text{kg}/\text{m}^3$ を採用した。

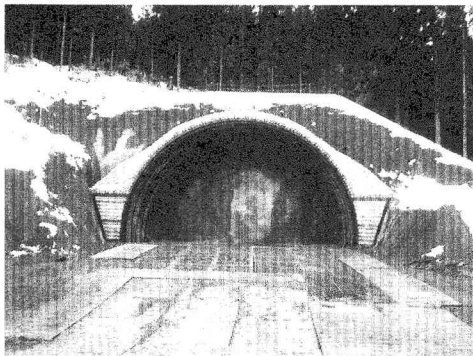


写真-1 坑口押さえ盛土完了状況

表-2 ソイルセメント配合と強度

固化材添加量 (kg/m^3)	一軸圧縮強度 (N/mm^2)
100	0.6
200	1.5
300	2.4
400	3.1

(2) AGF-HITMの施工

土被り1D以下の部分ではAGF-HITMを計画したが、当該区間の地質構造が前述の通り、横断面、縦断面とも傾斜しているため、切羽では複雑な地層構成となった。したがって、日常の切羽観察に基づき切羽状況を確認した上で鋼管の打設範囲や本数を変更した。

AGF-HITMの施工は、原則として天端 120° の範囲に $f=89.1\text{mm}$ 、 $L=13.86\text{m}$ のHITM鋼管を5m毎に打設することで、切羽面ではダブル配置となり、地質の好転により打設範囲を狭め、比較的地山の良い山側から徐々に短尺のPU-IFに移行した。

実際の施工では土被り1.5D ($L=74\text{m}$) 付近から補助工法無しの標準区間に移行できた。

AGF-HITMの施工では、当初の目的通り、地山確認に基づく打設範囲や規模の変更により経済的かつ合理的な補助工法の施工ができたと考えている。

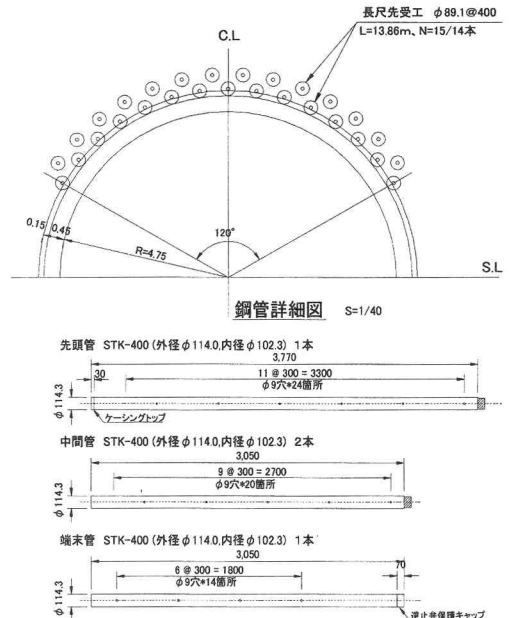


図-4 AGF-HITM 打設位置及び鋼管詳細図

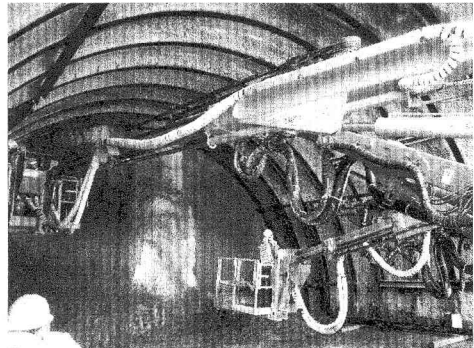


写真-2 AGF-HITM 鋼管打設状況

長尺鏡ボルトに関しては、定尺 $L=3\text{m}$ ものを2本または3本つなぎ、6mおよび9mの長尺鏡ボルトとして打設した。ラップ長としては2m確保した。

(4) 脚部補強工

脚部補強パイルに関しては、4章でも述べたとおり、穿孔沈下を抑止する目的で上半盤から側壁前方に片側2本ずつ計4本/1断面を3m毎に打設した。

これにより、切羽前方約5mに天端同様シェルを構築し、先行沈下の抑制を図った。

脚部補強パイルの削孔においては、当該区間の地質が粘性土であり、前方下向きの削孔となるため、当初、粘土分が排水孔につまり、閉塞することが懸念されたが、今回採用した削孔方式では、仮に閉塞を生じても左右に回転した状態で空打ちが可能であるため、粘土分を分離、排出することでくり粉の排出が可能となること、エアーを併用して調整することで支障なく施工が完了できた。

写真-3, 4に脚部補強工施工状況ならびに掘削時のステムビットの状況を示す。

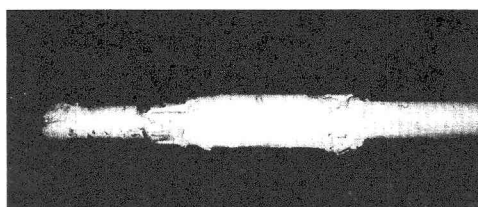


写真-4 掘削時ステムビット状況

以上述べた各種補助工法の施工実績を図-5にまとめた。現場においては施工の進捗にあわせて得られたデータの関連を実績図としてまとめ支保パターン等の変更等の参考資料とした。

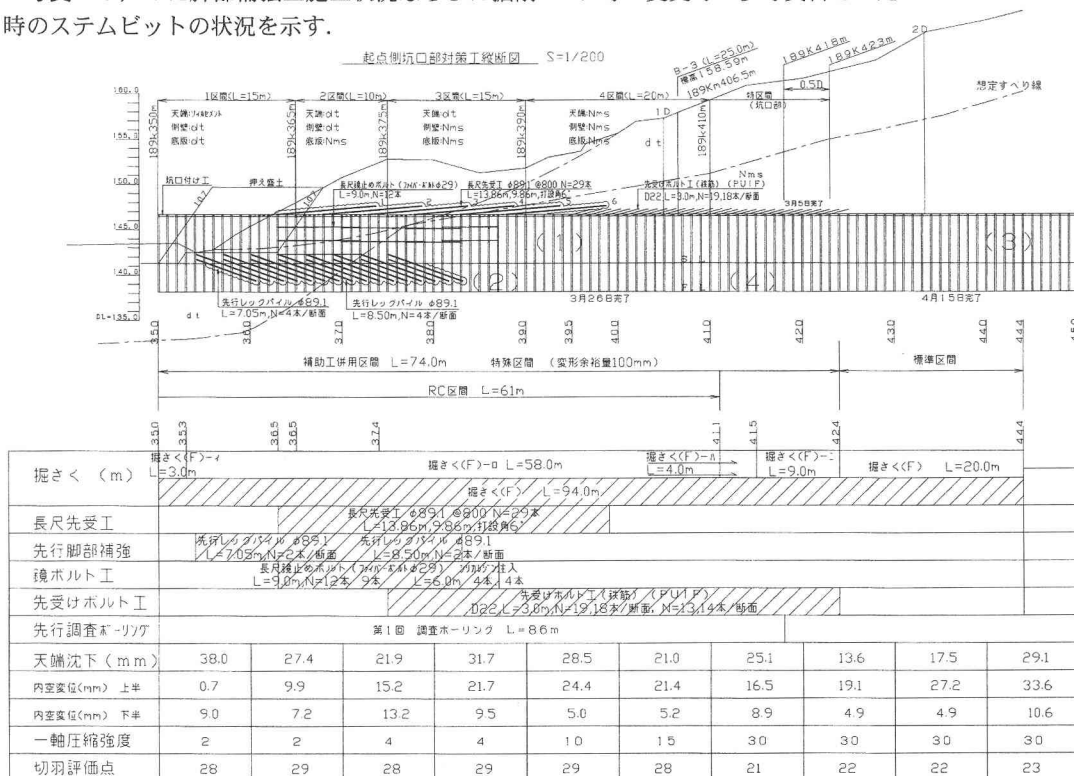


図-5 施工実績図

6. 計測結果と補助工法の効果

坑口部のトンネル施工時期が12月～2月の積雪時期にあたり、当該箇所が例年数mの積雪がある地域でもあり、地表面における計測が制限された。

したがって、地表面沈下に関しては、単管パイプを打設し、根固めを十分行った後、頭部（地表より約1m）に反射シートを貼付し、マンモスにより測定を実施した。

さらに、最も地すべりの発生しやすいと考えられるラインに孔内傾斜計を設置して地中の変位を測定することで地すべり傾向を把握した。なお、トンネル側壁との離れは約7mであった。図-6に坑口部で実施した各計測工の測点配置図を示す。

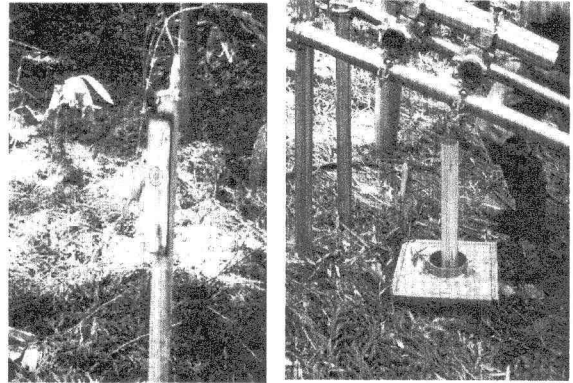


写真-5 地表面沈下および傾斜計測点

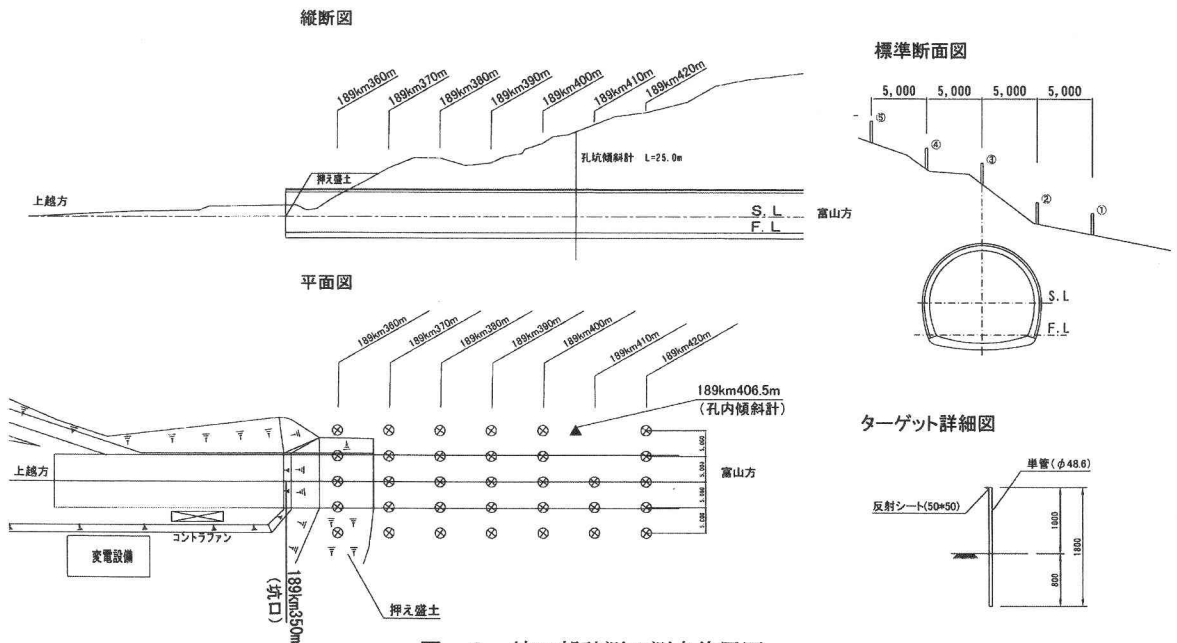


図-6 坑口部計測工測点位置図

計測結果から得られた知見を以下にまとめる。

(1) 地表面沈下測定

地表面沈下の測定結果の一例を図-7に示す。

経時変化を見ると、切羽離れ2D（D：10m）手前付近から先行変位が発生し、切羽通過後、1.5D～2Dで収束している。

土被りの違いによる影響も見られるが、トンネル天端直上付近が最も沈下が大きくなっていた。

図-8は土被り高さと地表面沈下の実績をまとめたものであるが、この図に本トンネル起点側坑口部における計測データをプロットすると太枠で囲んだ範囲に分布しており、データのばらつきはあるもの

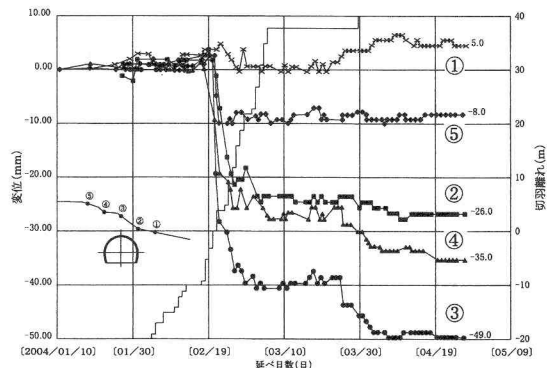


図-7 地表面沈下経時変化図

の、これまでの実績の範囲内で収束していることがわかる。このことから、AGF-HITMや脚部補強パイル、長尺鏡ボルトの効果により、過大な沈下を発生させずに施工できたものと考えられる。

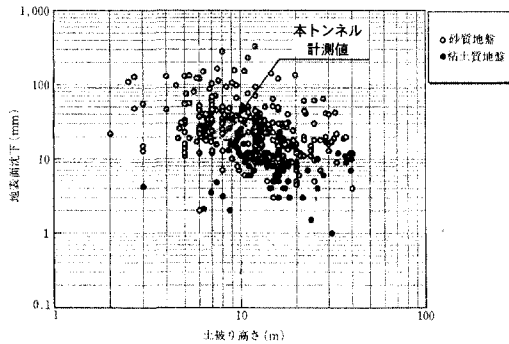


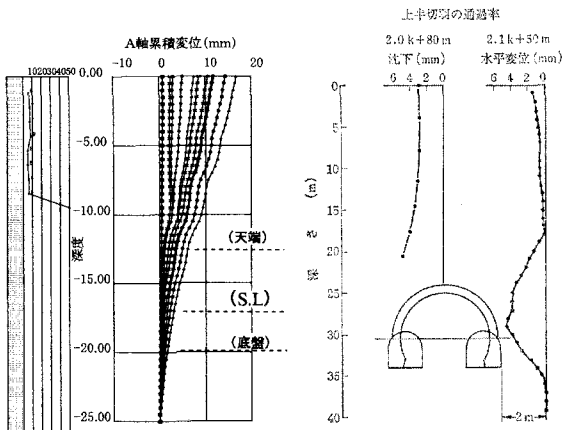
図-8 土被り高さと地表面沈下²⁾

(2) 孔内傾斜計測定

孔内傾斜計測定に関しては、採取されたコアから、深度7m付近に崖錐と基盤(泥岩)の境界が確認されており、コアの観察結果から、7m~9mまでのコアは指圧で変形するほど軟質(N値10以下)であったため、すべり面の深度としてGL-8.45mを想定していた。孔内傾斜計による測定結果を図-9に示す。

各深度毎の変位を累積して分布状況を見ると、進行に応じて変位は増加したが、想定していた深度8.45m付近においてせん断的な変位は見られず、層境の7m付近においても変位は0.5mm程度と小さな変位で収束している。

さらに、通常の軟弱地盤で観測されるようなトンネル掘削に伴うはらみだし(b)も見られず、補助工法の採用により、周辺地山へのゆるみが発生が抑制できたものと判断される。



(a) 地中変位分布

(b) 軟弱地山での変位モード³⁾

図-9 地中変位図と軟弱地山での変位モード

(3) 天端沈下・内空変位測定(A計測)

トンネルのA計測の結果を図-10, 11に示す。

全体的な変形モードとしては、土被りの薄い箇所で見られる天端沈下が卓越したひしゃげるモードとなっていた。また、内空変位の測定結果からは山側が伸び、川側が縮む偏圧モードも認められた。

変位量は天端沈下に関しては上・下半の掘削時に変位が増加するが速やかに収束傾向となり、最終的に1D程度で管理基準値③内(22.4mm)で収束した。

内空変位に関しては天端沈下より小さく、管理基準値①を少し越えた(13.8mm)で収束している。

なお、今回、脚部沈下に関しても測定したが、概ね6mm以下であり、今回採用した前方打設の脚部補強パイルの効果が得られたものと考えられる。

以上の計測結果から全般的に判断すると、補助工法の採用により、今回のような軟弱地山においても、地山は通常のトンネル同様の挙動を示し、ゆるみの発生を抑制するとともに、上部斜面の地すべりを発生させることなく施工を実現できたものとする。

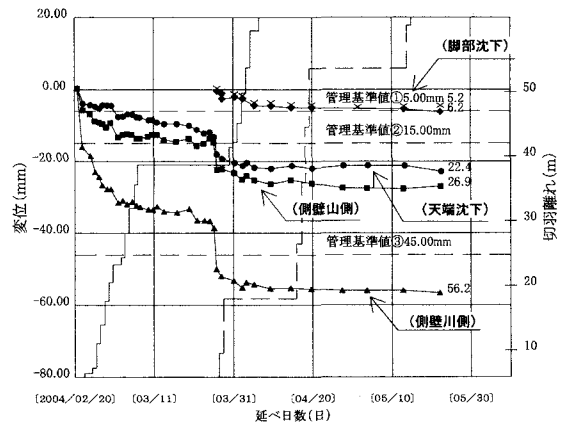


図-10 天端沈下経時変化図

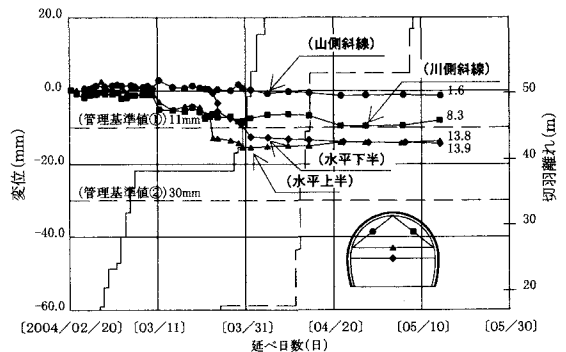


図-11 内空変位経時変化図

7. まとめ

今回、地すべり跡地形を呈する軟弱地山における坑口部の山岳トンネル施工にあたり、地すべり抑止対策をふまえて、天端安定対策として複合注入式多段フォアパイリング（AGF-HITM）と注入式フォアポーリング（PU-IF）、鏡面安定対策として自穿孔FRP長尺鏡ボルト、沈下対策として前方脚部補強パイルといった種々の補助工法を駆使することで上部斜面への影響を最小限に押え、掘削を完了できた。

施工時に実施した各種計測結果によれば、土被りが1D以下と薄い箇所では変位モード的にはひしゃげモードや偏圧傾向は見られたものの、過度のゆるみや地すべりといった不測の事態の発生を抑制することができた。

近年、補助工法の進歩につれて、本トンネルのように厳しい施工条件下でも安全に施工を実現することが可能となったが、NATMでは地山自身も支保の一部であるため、アーチアクションを形成させ、うまく利用する必要がある。

したがって、補助工法の検討においては、目的を整理したうえで、対象となる地山にあった適切な工法の選定が重要となる。

また、一方で補助工法の採用に当たっては、費用対効果の検討に関しても忘れてはならない。

今回採用したAGF-HITMは複雑な地質構造においても、実際の地山状況を確認しながら施工範囲や先受け規模（剛性）を容易に変更できるため、確実かつ、経済的である。

さらに、前方脚部補強パイルの効果により、脚部の沈下量が6mm以下という非常に小さな値で収束したことも確認でき、それぞれの対策の目的に応じて今回採用した補助工法の組み合わせが適切であったものと判断される。

今回は報告できなかったが、当該箇所においては覆工コンクリートの構造に関しても検討を実施しており、坑口部に関しては耐久性の確保といった観点から、覆工コンクリートに力学的な機能を付加させるため、RC構造により設計を実施している。

今後、さらに偏平大断面や都市部での山岳トンネルの施工が増加するものと考えられるが、今回報告した補助工法の選定や計測結果に基づく対策効果の実績が同種工事の参考となれば幸いである。

最後に、今回の補助工法の検討・採用に当たり、ご指導いただいた能生鉄道建設所はじめ鉄道建設・運輸施設整備支援機構の関係者の方々に深く感謝の意を表します。

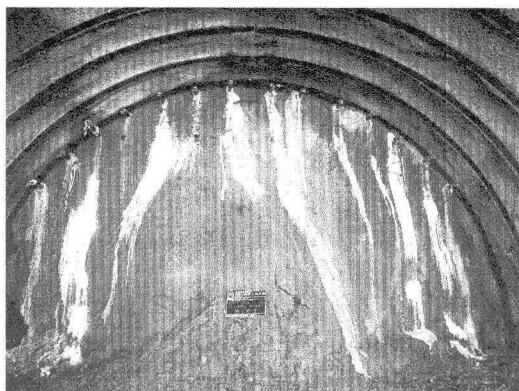


写真-6 補助工法施工完了状況

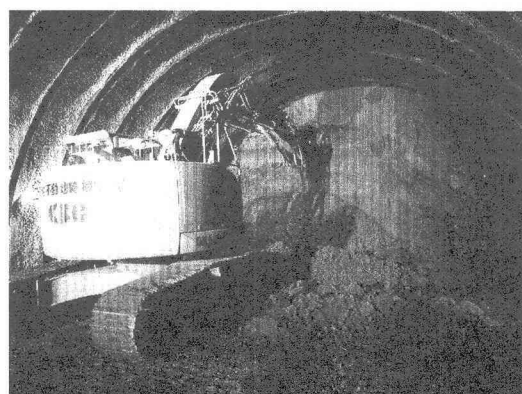


写真-7 掘削状況

参考文献

- 1) 長尺先受け工の設計法, 日本鉄道建設公団 山岳トンネル分科会, 2001
- 2) 都市トンネルの実際, 合理的な設計・施工をめざして, 桜井春輔編著, p 62, 1998
- 3) 土質基礎工学ライブラリー34, 近接施工, 土質工学会編, :土質工学会, p 259, 1989
- 4) NATM設計施工指針, 日本鉄道建設公団, 1996
- 5) 脚部補強工技術資料(改訂版), ジェオフロンテ研究会, アンブレラ工法分科会, 脚部補強WG, 2000
- 6) トンネルライブラリー, 第5号, 山岳トンネルの補助工法, 1994
- 7) 地すべり地形の坑口部における複合注入式多段フォアパイリングの設計と効果, :第11回トンネル工学研究発表会, pp75~80, 2001