■平根地すべりにおける排水トンネル工事について

Drainage tunnel works in Hirane Landslide

国土交通省東北地方整備局新庄河川事務所／佐藤一幸*¹
Shinjo Office of River, Tohoku Regional Development Bureau,
Ministry of Land, Infrastructure and Transport / Kazuyuki SATOU

国土交通省東北地方整備局新庄河川事務所／三原金吾
Shinjo Office of River, Tohoku Regional Development Bureau,
Ministry of Land, Infrastructure and Transport / Kingo MIHARA

国土交通省東北地方整備局新庄河川事務所／半田清美*²
Shinjo Office of River, Tohoku Regional Development Bureau,
Ministry of Land, Infrastructure and Transport / Kiyomi HANDA

日本工営株式会社／神田重雄
Nippon Koei Co., Ltd. / Shigeo KANDA

キーワード：地すべり，排水トンネル，機械掘削，NATM工法，乾式吹付コンクリート，粉塵

Key words: landslide, drainage tunnel, mechanical excavation, New Austrian Tunneling Method, dry mixed shotcrete, dusts

1. はじめに

平根地すべり地は，月山及びその南側の葉山から続く出羽丘陵に属し，JR陸羽西線古口駅の南方約8kmに位置する。

当地すべり地は，昭和37年3月1日建設省告示389号で「平根地すべり防止区域」に指定され，山形県によって対策工が実施されていたが，昭和45年に活発化した地すべり活動を機に，昭和47年3月4日の建設省告示により直轄編入され，地すべり機構の解明のための調査・対策工事が実施されてきた。

また，当地すべり地は，昭和57年に区域が拡大され（昭和57年3月27日建設省告示第835号），これにより「平根地すべり防止区域」は指定面積が301.9haとなり，大きく区分して北，中央，東南，南の4つのブロックに分類されている（写真－1）。

2. 地すべり地の概要

2.1 地すべり履歴

平根地区における地すべり履歴は，記録に残る大規模なものだけでも明治32年以降十数回にわたり，人家や田畑，道路等に多大な被害を与えている。近年の地すべり活動としては，中央ブロックでの昭和45年，49年の地すべり発生や，発生時期は不明だが東南ブロックや南ブロックでの頭部滑落崖などが顕著である。

2.2 地形・地質概要

平根地区周辺は，南方約5kmに位置する肘折カルデラ形成に伴う火砕流により堆積した，いわゆるシラス台地に該当する。平根地すべり地の上部斜面はシラス台地の面影を留めているが，中間～末端においては地すべり，沢の開析の影響により，複雑な地形を成し，他のシラス分布地域と明瞭な地形差異を生じさせている。また，平根地域は東側で沢内川，西側は栃山川に開析され凸状地形を呈している。

写真－1 平根地すべり

2.3 地すべり発生の誘因

平根地区は典型的な日本海型気候区に属する東北でも有数な豪雪地帯であり，年間の降水量は平均約2,750mm，冬期間の最大積雪深は平均で338cmに及んでいる（S57～H10年肘折気象データによる）。地すべり発生の誘因として，地下水が豊富なことが挙げられる。豪雪地帯特有の多量の融雪水がシラスを浸透して地下水となり，風化岩中の地すべり面の間隙水圧を上昇させているものと考えられる。融雪水と地すべりとの関係は，地下水が高

*1 現所属：勘河川情報センター河川情報研究所研究第二部主任研究員

*2 現所属：国土交通省東北地方整備局能代河川国道事務所

水位を示す融雪時期に地すべり履歴・変動が多いことで裏付けられる。

3. 平根排水トンネルの必要性

平根地すべり対策は、抑制工を主体とし、地表水排除工、集水井工による地下水排除工が行われ効果を上げている。しかしながら、東南ブロックにおいては他のブロックに比べ、地すべり規模が大きく（幅約500m、奥行1,000m）、推定される地すべり面も深く（地すべり頭部～中間で30～40m）、また、計画安全率を確保するためには大幅な地下水位の低下（10m程度）が必要となる。このブロックにおいて集水井工による地下水排除を計画した場合、地すべり面積が大きいことから多数の集水井が必要となり、地形が緩勾配なことから、集水井からの排水は集水井群を排水管で連結した連結排水経路を取らざるを得ないこととなる（図-1）。地すべり面より深い連結管は地すべり活動を伴う管の切断による影響が大きいので極力避けるべきであり、また連結排水管の縦断条件から流末側の集水井深度が深くなる傾向がある。更に平根地区はシラス分布地域であり、ボーリングによる集水井の施工困難や吸出による閉塞も考えられた。

以上のような技術的困難性により「平根地すべり対策委員会（以下「委員会」と称す）」が行われ、東南ブロックにおいては排水トンネルを排水基幹とし、これとトンネル内からの集水ボーリングもしくは集水井工を組み合わせた立体排水形態をとった集水施設の設置が最適であると判断され、平成3年度から排水トンネル工事が施工された。

4. 排水トンネル計画概要

排水トンネルの計画・設計は、図-2のフロー図に沿って行った。

4.1 平面形

排水トンネル工の平面線形は「委員会」の助言を受けて定められ、水位低下シミュレーション（図-3）の結果からAライン、Bラインからなる集水施設が決められた。主な決定経緯は以下のとおりである。

- (1) Aラインは東南ブロックを東西に横切る形とし、ブロック下方に流下する地下水をこのラインで遮断するような配置とする。
- (2) Bラインは東南ブロック頭部を通るもので、地すべ

図-2 平根排水トンネル計画決定フロー

図-1 集水井案と排水トンネル案との概略比較図

図-3 水位低下シミュレーション

り地背後部から供給される地下水を遮断し、かつ地すべり頭部から東部湿地帯に流下する地下水流下経路に沿って集水させる配置とする。

- (3) トンネル坑口は、基岩が認められている沢内川側の安定斜面とする。
- (4) 平面二次元モデルの定常流解析で水位低下予測シミュレーションが実施され、その結果、8基の集水施設を設けることによって計画安全率が確保された。

4.2 縦断形

排水トンネルは、その目的が集水された地下水を速やかに地すべり地外へ排水するものであり、恒久的施設として機能し、かつ維持管理が容易であること、及び施工時においても安全性が高いことが要求される。本トンネル位置での地質は、地表より10～30mの厚さでシラス層が分布し、その下位には砂岩が分布する。この砂岩は、上位より強風化層、風化層、基岩層に区分され、基岩層までの深度は概ね50～80mとなっている。トンネルの縦断線形を計画するにあたっては、安定した基岩層内に設置するものとし、下記事項に考慮し縦断勾配1.5%に決定した。

- (1) トンネル位置…地すべり面に最も近いことが、トンネルからの集水ボーリングの面で経済的に有利であるが、トンネル天端からの緩み領域が地すべり下底面に影響を及ぼさないこと。

- (2) 縦断勾配…施工時及び完成後の排水及びズリ運搬車の安全性。(急勾配だとズリ運搬車が自然に動き出す危険があり、また速度の出し過ぎによる脱線も考えられる)
- (3) 坑口位置…坑口(坑外仮設ヤード予定地)はズリ鋼車より1方の掘削土砂を排出できる高さとして、ヤード面からの高さ2～3m以上の確保が必要。

4.3 断面形状

馬蹄形・円形・ホロ形で検討した結果、排水トンネル工計画位置の地質状態は部分的に弱い箇所もあるが、ほとんどが良好なことからホロ形断面に決定した。本工事における最も経済的な断面決定の検討フロー及び結果を図-4に示す。

断面形状決定にあたっては、トンネル内での作業スペース、施工機械及びサイクルタイムから検討すると「ズリ鋼車」が一番有利な施工機材となった。以下に検討内容を述べる。

図-4 断面決定フロー

4.3.1 ブリ運搬方式の検討

ブリ運搬は、タイヤ式，レール式，ベルトコンベアー式が考えられる。

- (1) タイヤ式…大断面及び小断面で延長が短い場合に用いられる（断面内で2台が自由にすれ違いができる。もしくは往復の時間がサイクルタイムに影響しない程度の距離）。
 - (2) ベルトコンベアー式…ベルトコンベアースペース以外に資機材運搬のスペースが必要となる。
- 以上より，本トンネルのような小断面で延長の長いトンネルにはタイヤ式，ベルトコンベアー式では不適と考えられ，一般的かつ経済的なレール式を採用した。

4.3.2 ブリ運搬機械の検討

ブリ運搬がレール式となった場合，ブリ運搬機械は
機関車＋ブリ鋼車
機関車＋シャトルカー

の2種類がある。双方の比較の結果，シャトルカーはトンネル断面が大きくなるため検討外とし，「機関車＋ブリ鋼車」について牽引力等の検討を行った結果，
機関車4t＋2m³鋼車7台 となった。

4.4 掘削方法

一般にトンネル掘削方法は機械掘削，発破掘削，人力掘削の3つである（表－1）。これらの適用地質・利点・欠点は以下の表のとおりであり，本トンネルでは地質が第三紀の砂岩で，比較的均質な軟岩となっていることや作業の安全性から機械掘削を採用した。

掘削機械の選定にあたっては，本トンネル全体の地質が比較的变化に富み，一軸圧縮強度が3N/mm²程度の強風化帯から14～18N/mm²の基岩帯とが分布していること，及びトンネル断面（B2.1×H2.2）での走行が可

表－1 掘削方法比較

掘削方式	利点	欠点	本トンネルに対する評価	判定
人力掘削	・岩質の変化には対応しやすい	・余掘が増える ・工事が長期化する ・最も不経済	・地すべりに対する安全性は高いが、工期・経済性・施工性で最も不利である。	△
発破掘削	・中硬岩（一軸圧縮強度200kg/cm ² 以上）では経済的である ・岩質の変化には対応しやすい	・周辺地山の緩みが発生する ・余掘が増える ・騒音、振動等問題が発生する ・火薬を取り扱うため、危険性が高い ・発破ガスが発生し、坑内作業環境が悪い	・地すべりに対する安全性を確保するため、薬量を少なくする等の制限発破を行う必要があり、機械掘削工法に比べ工期、経済性の点で不利である	○
機械掘削	・連続作業ができる ・余掘が少ない ・周辺地山を緩めることが少なく支保を軽減できる ・騒音、振動等の環境問題が少ない ・発破ガスが少なく坑内作業環境が良い ・省力化が可能で安全性に優れている ・他の工法に比べ工程が短い	・地質の変化（特に硬岩質になった場合）に対応しない ・機械費が高いため地質に適合しない場合は不経済になる ・機械の故障で切羽全体が停止する ・地質、転石の有無、その他の条件で適用範囲が狭い ・湧水が多い場合は不適	・ほぼ均質な軟岩が分布し大規模な断層もなく、湧水も少ない地質状況から本トンネルへの適用は問題なく、工期短縮、経済性の点でも最も有利である。また、地すべりに対する安全性も高い	◎

表－2 ロードヘッダ規格

掘削機械	幅	高	20N/mm ² 実績
ロードヘッダ65KW級	1,800	1,500	17.5m ³ /hr

能で，一軸圧縮強度20N/mm²以下の掘削実績の最もあるロードヘッダ65KW級（表－2）を採用した。

4.5 トンネル支保

小断面トンネルの支保構造においては，一般に次の3つの工法がある（表－3）。

- (1) ライナープレート工法…一般に地すべり対策工における排水トンネルで採用される。
- (2) 矢板工法…山岳，丘陵地帯の小断面トンネルに適用。鋼製支保工と木矢板で支保。
- (3) NATM工法…現在主流となっている工法で比較的大きな断面に適用。吹付コンクリートとロックボルト及び鋼製支保工で支保。

下表の結果より，安全性を考慮（地山のゆるみやモン

表－3 トンネル支保構造比較

工 法	利 点	欠 点	評 価	判定
ライナープレート工法	・ボルトの緊結が内側で施工できるので、外側の空間を必要とせず余掘量が少ない。 ・補強材が簡単に組立てられる。 ・施工速度が速い ・坑内作業環境がよい	・経済的に高価であり不経済 ・断面変化時の特注製品の納入に時間がかかる。 ・ライナープレート背面にグラウト注入が多量に必要となる。 ・掘削後トンネルにかかる荷重変化が発生した場合、クラックによる応力開放が不可能で、ライナープレートの変形がどんどん進行する。 ・地質的に不安定な箇所、振幅部、分岐部における支保強度に問題がある。	・地質が一定の場合は施工速度が速いが、安全性、経済性の面で矢板工法及びNATM工法に比べ劣る。	△
矢板工法	・吹付コンクリートやロックボルトの施工が困難な高圧多量の湧水を伴う地山においても比較的施工可能性が高く、崩落箇所等の特不安定な地山の応急対策が可能 ・坑内作業環境がよい	・覆工背面に空隙が残るため、地山を緩め荷重を増大させるとともに支保工構造部材に集中的な応力が発生し、アーチ構造としての耐力を低下させる ・裏込注入を行っても地山との間の空隙を完全に充填することが難しい ・施工上、完全な止水が難しい	・本トンネルの基岩である凝灰質砂岩にモンモリナイトが含まれていること、地すべり地帯であること等を考慮するとNATM工法に比べて安全面で劣る	○
NATM工法	・膨張性砂岩、軟岩地山等でも吹付コンクリートを地山に密着して施工することにより、風化や劣化に伴う地山の膨張、緩みを最小限に抑止できる ・トンネルの止水性を高め、漏水の少ないトンネルが可能となる ・矢板工法に比べ掘削断面が小さくて済む	・高圧多量の湧水を伴う地山、切り羽が直立しない地山では施工が困難となる ・吹付コンクリートに伴う坑内の粉塵、水質汚濁防止等の問題があり、坑内作業環境が悪い	・小断面での実績が少なく、吹付コンクリートに伴う作業環境の問題はあるが、本トンネルの地質からモンモリナイトを含む泥質部の膨張風化、また地すべり地帯であるため、地山の緩み等を考慮すると、防止実績のあるNATM工法は、断面変化に素早く対応でき安全面で優れ、かつ工期短縮及び経済性からも有利である	◎

モリロナイトの膨張等）して，作業環境には若干の問題はあるが，NATM工法を採用することとした。

4.6 その他検討事項

保安立坑はトンネル完成後の換気用も兼ねてAライン

図-5 平根排水トンネルイメージパース

末端部に設けることとした。またBラインには集水井が施工されることからこれを換気用として併用した。

5. トンネル工事概要

5.1 トンネル諸元

トンネル工事は機械掘削及びNATM工法による地山支保を中心として工事が進められたが、特にNATM工法については、国内初の長距離乾式吹付として施工すること及び建設省（現国土交通省）初の極小断面のNATM工法であったことからパイロット事業として実施された。主なトンネル諸元は以下のとおりである。

- (1) トンネル延長：AラインL=621.5m
BラインL=524.2m 計1,145.7m
- (2) 集水施設：Aライン4箇所、Bライン4箇所
- (3) 縦断勾配：15/1,000
- (4) トンネルの形状：ホロ形
- (5) 内空断面：W2.1×H2.2m

5.2 コンクリート吹付設備

コンクリートの乾式吹付機械は、長距離圧送可能な機械としたが、本施工に入る前に坑外にて吹付試験（圧送能力・粉塵測定・吹付リバウンド量測定）を実施した。

試験内容	圧送距離	L=700m
	骨材最大寸法	15mm
	砂の表面水	3%, 5%, 7%
	コンクリート呼び強度	18N/mm ²
	水セメント比（上限値）	45%
	単位セメント量	360kg

また、国内で初めての長距離圧送なので使用するコンプレッサーの消費エア量の検討を行った結果、吹付用コンプレッサーは31.2m³/分以上必要であり、75KW級が12m³/分より3台の使用となった。

試験の結果、砂の表面水が多いと閉塞・脈動が生じることから3～4%の表面水が適当と判断され、表面水の

管理のために冬期の骨材乾燥設備（ジェットヒーター）を計画した。また、700m地点で粉塵濃度は50mg/m³以上と多く、リバウンド量も吹付総量に対し約30%であった。

5.3 粉塵処理

機械掘削及び吹付コンクリート施工時の粉塵量が多いことは当初から想定していたが、当初計画の換気設備（送気式、ファン40m³/min、風管φ300mm）では粉塵量が多く、切羽への散水及び排気ファンの増設等を行った。しかしながら、目標濃度5mg/m³を達成出来なかった。

機械掘削時の削岩開始及び停止後の粉塵量測定の結果を図-6、7に示す。

図-6 粉塵測定（削岩開始後）

図-7 粉塵測定（削岩停止後）

試験時の条件 送風量 $40\text{m}^3/\text{min}$

排気量 $52\text{m}^3/\text{min}$

施工時の粉塵としては，機械掘削時とコンクリート吹付時の2通りあり，各々目標値を上回り，機械掘削時 $100\text{mg}/\text{m}^3$ 以上，吹付時 $25\text{mg}/\text{m}^3$ となり，工事が度々ストップすることとなった。吹付については，粉塵低減剤の使用を試み改善を図ったが，目標値を達成出来なかったことから抜本的な換気対策の検討を行い，吸気式に大幅変更した。

〔当初計画〕

〔変更計画〕

送気式 風量 $40\text{m}^3/\text{min}$ → 吸気式 風量 $120\text{m}^3/\text{min}$

風管 $\phi 300\text{mm}$ → 風管 $\phi 400\text{mm}$

上記の換気設備に変更し施工したところ機械掘削時 $1.8\text{mg}/\text{m}^3$ ，吹付時 $3.9\text{mg}/\text{m}^3$ に改善された（写真－2）。

5.4 地質による掘削工法の変更

(1) 転石処理（泥質砂岩の硬質部）

トンネル計画に記載のとおり機械掘削は一軸圧縮強度が $20\text{N}/\text{mm}^2$ 以下の岩に計画されており，施工途中には $60\text{N}/\text{mm}^2$ を越える中硬岩クラスの岩が層状に出現したことから，静的破碎材による掘削と機械掘削を併用して行われた。発破工法も検討したが，振動が多いことと掘削機械の待避が伴うことから採用しなかった。

(2) 制御発破（珪質泥岩）

岩質によっては機械掘削は可能であるが多量の粉塵を出すものがあり，換気計画の検討期間を長時間要することから一部に発破工法を採用した。転石処理時に採用した静的破碎材の使用については，一軸圧縮強度が低く破碎効果が得られないことから採用しなかった。発破工法の採用にあたっては，トンネル上部が地すべり地内であ

写真－2 吹付コンクリート施工状況

ることから地山にむやみな振動を与えないように低振動の「制御発破爆薬」を使用した。

6. まとめ

新庄河川事務所管内での排水トンネル施工は，豊牧地区地すべり地内の豊牧排水トンネル（昭和55～63年）に続いて2件目である。断面についてはほぼ同様な大きさ（高さは同じ，幅 10cm 小）であるが，掘削方法及び支保構造は，人力掘削＋発破掘削から機械掘削へ，そして矢板工法からNATM工法へと変わっている。機械掘削もNATM工法もトンネル掘削工法として大断面では一般的に使用されてきているが，小断面トンネルとしてはその実績が少なく，多くの試験施工や検討を行い，設備変更を繰り返しながら，平成9年に排水トンネルは完成した。

現在，良好な排水状況を維持しており，平成10年度からは「特定地下水関連地すべり対策事業」として，排出される地下水を利用して地すべり対策事業地内の平根地区をはじめとする地区を対象とした簡易水道の水源として有効利用されており，地域社会の活性化に寄与している。

7. おわりに

現在，新庄河川事務所管内の豊牧地すべり横道沢ブロックにおいて3例目の横道沢排水トンネルが施工されている。

横道沢排水トンネル設計・施工にあたっては，平根排水トンネルでの実績が大いに活かされ，また，建設省（現国土交通省）で最初の「入札時VE（設計・施工提案型）方式」により発注された。本入札方式により新技術や施工業者の有するノウハウ等，民間の技術開発の成果を活用することにより，工事目的物に必要とされる機能を低下させることなくコスト縮減が図られた。

最後に本報告が地すべり対策工の設計・施工に携わっておられる方々の業務の参考となれば幸いである。

参考文献

- 1) 田子秀徳・千葉昭宏・高橋芳成（1991）：平根地区排水トンネルについて，国土交通省新庄工事事務所内業務報告会論文集，pp.9～18.
- 2) 高橋芳成・大沼秀幸・千葉和民（1993）：小断面NATMトンネルの工事施工状況（平根排水トンネル），国土交通省新庄工事事務所内業務報告会論文集，pp.92～100.

（原稿受付2003年3月14日，原稿受理2003年8月6日）