

地すべり斜面でのトンネル坑口施工について

佐々木 祥次¹・本藤 敦²・小熊 登³・東田 正樹⁴・徳永 俊夫⁴

¹前田建設工業株式会社 北陸支店 (〒930-0858 富山市牛島町 18-7)

²前田建設工業株式会社 北海道支店 (〒064-8552 札幌市中央区南 11 西 11-2-1)

³前田建設工業株式会社 土木部設計 G (〒179-8903 東京都練馬区高松 5-8-20)

⁴国際航業株式会社 関西技術所 (〒660-0805 尼崎市西長洲町 1-1-15)

丹波綾部道路橋上トンネル(延長 1,096m)は、京都縦貫自動車道のうち現在供用中の綾部安国寺 IC より、約 5km 東側に位置している。橋上トンネルの到達側坑口は、地すべり斜面の下部に位置しているため、トンネル掘削に当たっての問題点が多く、種々の対策工を実施している。

本文は、この坑口部施工の問題点の検討および、対策工の施工について述べる。

キーワード：地すべり，押え盛土，垂直縫地ボルト

1. はじめに

丹波綾部道路は、京都縦貫自動車道の一部区間を構成し、現在、京都沓掛 IC～丹波 IC、綾部安国寺 IC～宮津 IC は暫定供用されており、図-1 に示すように丹波綾部道路(丹波 IC～綾部 JCT 間 延長 29.2km)の 26.6km が未供用区間となっている。未供用区間のうち、橋上トンネルが位置する和知 IC～綾部安国寺 IC 間は、平成 20 年夏頃に部分供用される予定である。

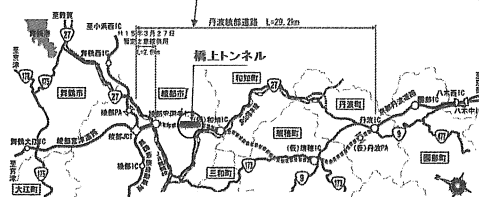
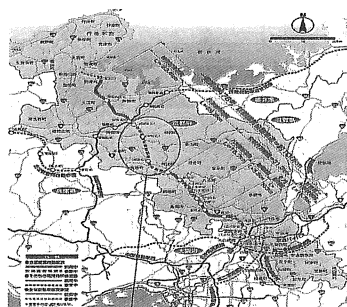


図-1 位置図

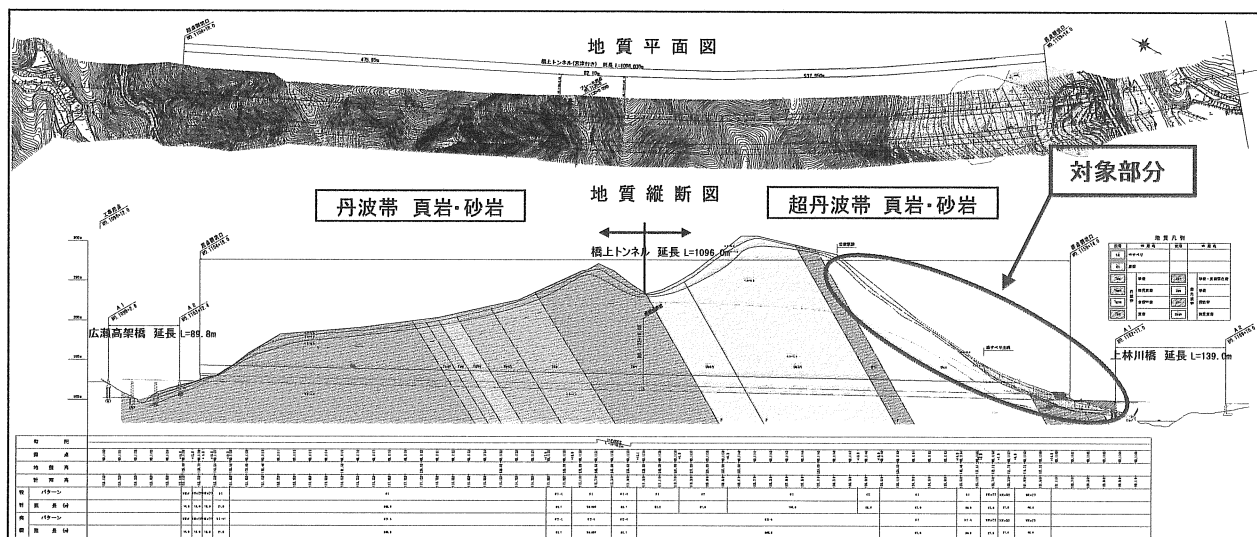
橋上トンネルの到達側坑口部は、北東から南西方向に流下する河川の攻撃斜面にあたり、既往調査により地すべり地形を示し崩積土が厚く分布することが判っている。

当初計画では、トンネル掘削により不安定化する恐れのある崩積土をすべり土塊として設定し、これをほぼ排土する〔切土案〕が採用されている。しかし、後述するように、トンネル軸方向斜面の切土面の上部には、風化が進み転石状に岩露頭が分布する急傾斜斜面(最大 45° 以上)が控えている。

現況の坑口部斜面では明瞭な変位は確認されておらず、安定していると考えられるが、切土掘削により押え盛土の役割を果たしていると想定される斜面根脚部の土塊(崩積土)を除去することや、トンネル掘削によって発生するゆるみにより不安定化することが想定された。

本文は、この坑口部施工の問題点について調査と安定解析の実施結果、および、対策工の施工について述べる。

2. 地形・地質概要



圖—2 地質縱斷圖

図-2 に橋上トンネルの地質縦断図を示す。

到達側坑口部は、概ね南西方向に蛇行しながら流下する河川の屈曲する左岸側の攻撃斜面にあたり、地形コンターには遷緩線が確認され崩積土が分布する特徴が現れている。坑口付近の植生は、含水比の高い崩積土層に植生するとされる竹が繁茂し、その上位に杉林が分布している(写真-1)。一部には地すべり地で特徴的である樹木の規則的な根曲がり現象、小規模な滑落崖(最大 50cm 程度)が認められる。

坑口の斜面は、トンネル計画高の低標高部から高標高部にかけて、緩斜面（ $15\sim 20^{\circ}$ ）から急斜面（ $30\sim 45^{\circ}$ 以上）となり、尾根付近では再び緩斜面となっている。下部の緩斜面の表層部では細粒分が豊富な土質とともに数 cm の礫片（砂岩主体）が多く分布しており、侵食前線と想定される上位の急斜面にも同じ砂岩の露頭がみられる。図-3 に示すように坑口付近は、河川侵食を繰り返し受けながら地山が削剥されるとともに、上位斜面が風化侵食を受け崩落し低標高部に堆積し現況の緩斜面を形成しているものと想定される。



写真-1 到達側斜面状況

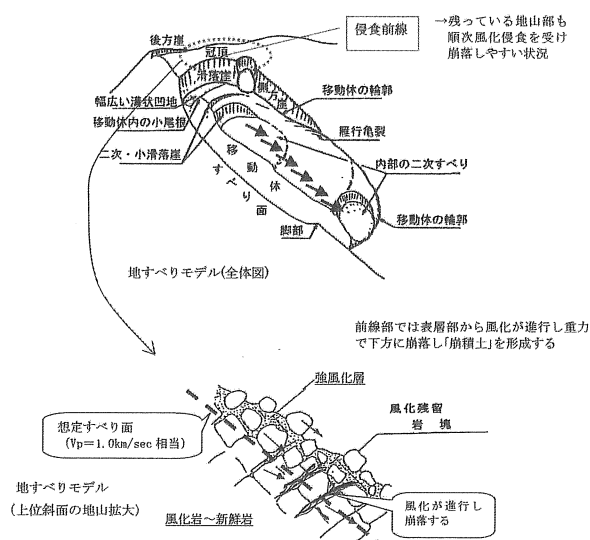


図-3 侵食前線の模式図

3. 施工上の問題点

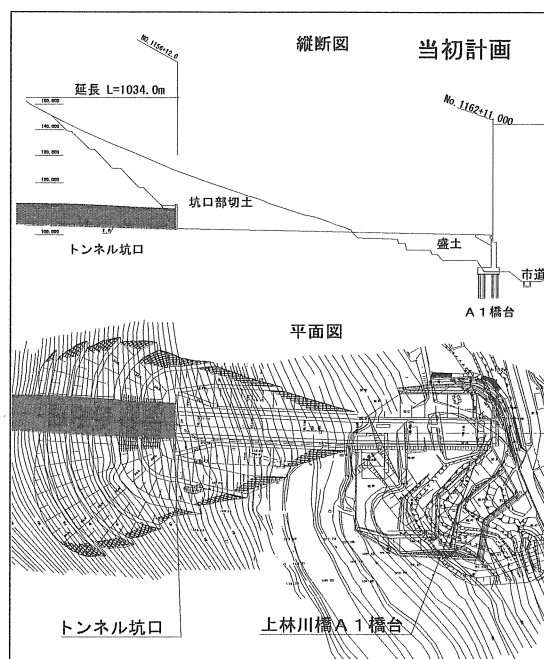


図-4 到達側坑口図

当初計画を図-4に示すが、この「切土案」では以下の問題点が考えられた。

- ① 法高約 50m の長大法面となることから、一旦変状が起これば広範囲に影響がおよぶ懸念がある。
- ② 急傾斜地が上部にあり、砂岩の露頭が見られることから、落石の懸念がある。
- ③ 地すべり土塊の抵抗部分を切土することから、さらに上位斜面の安定性が損なわれる。
- ④ 東側斜面は、すべり地形を呈していることから、将来のⅡ期線の施工時に活動する可能性が考えられる。

そこで、斜面の安定性、将来の維持管理面、経済性、工期を主とした施工性を勘案した最適な坑口位置、対策工を含む施工方法を決定するための追加調査・斜面の安定に対する検討が必要と考えた。

4. 追加調査

追加調査ボーリングの位置を選定するため、既往調査（屈折法弾性波探査）の結果を用いて「高精度弾性波解析」を実施した。

解析結果を図-5に示す。不安定化する可能性の高いルーズな崩積土～強風化層が、既往調査で想定された範囲より上部斜面まで連続しており、数 m 程度の低速度帯がほぼ地表面に平行して分布していることが判った。以下の目的および方針により追加の調査ボーリング位置を選定し、調査を実施した。

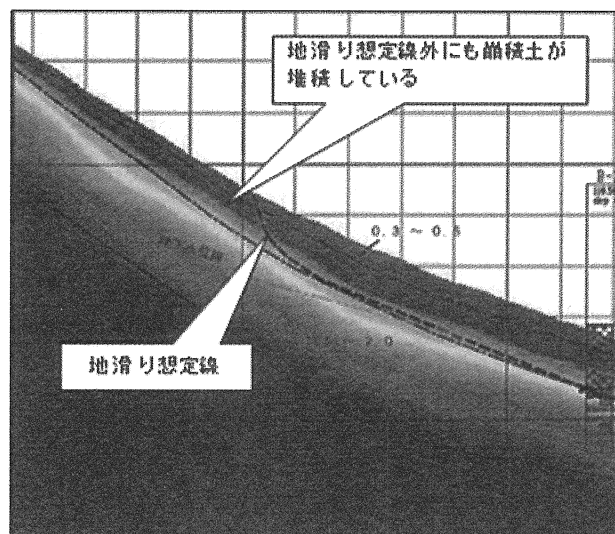


図-5 高精度弾性波解析図

(1) 調査の目的

- ① 地すべり頭部の土塊の厚さ、性状および下位の岩盤の風化状況、抑止工定着層の岩盤状況。
- ② 切土上部の土砂層の厚さ、性状および下位の岩盤の風化状況、抑止工定着層の岩盤状況。
- ③ 切土掘削時の地すべり土塊・斜面・法面の変動状況、およびトンネル掘削時の地すべり土塊・斜面・切土法面の変動状況。

(2) 調査位置の設定方針

調査目的は、地すべり地および切土による影響を受ける可能性のある斜面の土質・岩盤状況を確認することと、切土工事を安全に遂行するために、斜面・法面の変動状況を監視することである。切土後にトンネル掘削が行われることから、トンネル掘削中における斜面・法面の変動状況を監視することも可能となるように調査位置を設定した。

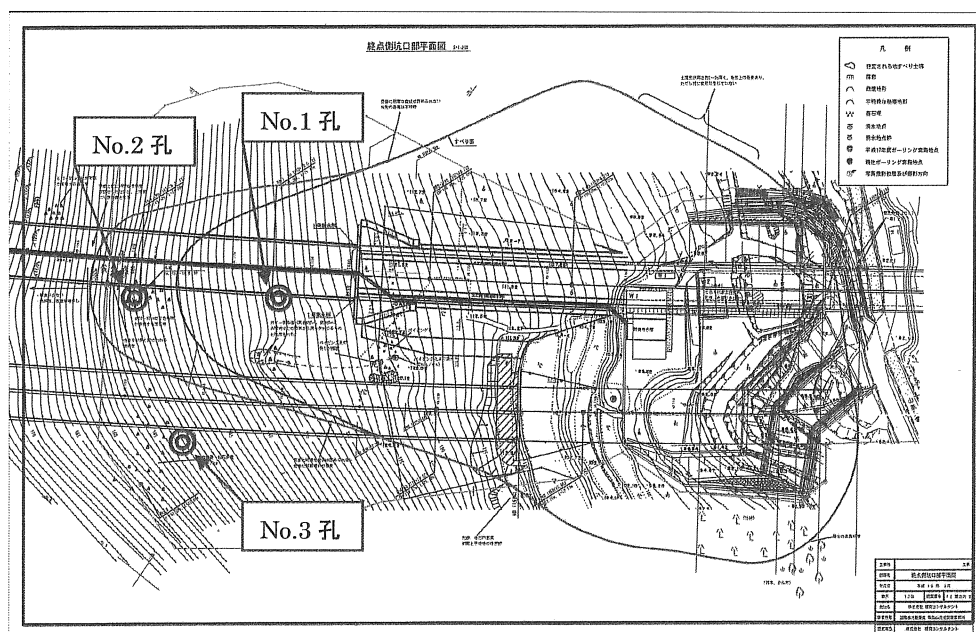


図-6 想定地すべり位置図 1)

(3) 調査結果

追加調査ボーリングにより図-6に示すとおり、地すべり土塊は標高 160m 付近を頭部として河川にかかる橋梁の起点側橋台付近を末端とした長さ 190m、幅 54m、深さ 10～15m 程度の規模が想定された。また、地質構造についても、以下のことが判明した。

- ① N 値 10～20 程度の崩積土層の層厚は、当初想定よりやや厚く分布している。

(No. 1 孔位置で、約 2m 崩積土層が厚い)

- ② 斜面上部にも、崩積土層相当の地質が連続して分布している。

(No. 2 孔位置で、崩積土層の深度 4.9m、強度の差異がない強風化層を含む深度 6.8m となり、概ね弾性波速度 1.0km/sec 層に相当している。よって、斜面上位の地質分布を弾性波速度で評価することが可能であった。)

- ③ 東側斜面の崩積土層相当の分布は少ない。

(No. 3 孔位置で、深度 1.4m)

- ④ 地下水位は、当初想定に近い位置にあるが、No. 2 孔位置で孔口-9.5m とやや高い。概ね基盤地形なりに分布する。

以上より、

- ・ 法面掘削時はもちろん、トンネル掘削時を含めて斜面の安定性を確保する対策が必要と判断される。

- ・ その対策規模は、崩積土層および同様の性状である強風化層を対象にする必要がある。

(No. 1 孔位置で 13.0m、No. 2 孔位置で 6.9m。斜面上方は弾性波速度値を参考にし、ほぼ地形なりにルーズな地層が分布)

(4) 地すべりの発生機構

地すべり土塊は、礫混じり粘性土を主体とした崩積土層から構成されている。崩積土層は崩壊により斜面から落下した土砂で、自らの安定勾配で堆積するが、堆積後の河川の浸食により末端部除荷となるため、安定性が低下する。

同時に斜面上方から雨水が流入し、相対的に透水性が高い地すべり土塊内は、地下水として流下する。その際に、土砂内の細粒分の流出（地中洗掘）や斜面上方からの落下により粉砕された岩塊の粘土化が進行し、地すべりの土塊内の地盤強度が劣化する。

現在の状態は、このような状況が長期にわたり土塊の滑動力と抵抗力が均衡した状態となっていると考えられる。このような状態において長雨や豪雨などにより、一時的に滑動力が抵抗力を上回る状態と考えられる。

(5) 現況安全率の設定

地すべり地を対象とした現地調査では、想定される地すべり地に植生する樹木のうち、樹幹の大きいものに限られた根曲りや頭部付近および末端付近には明瞭な湧水箇所が認められたが、現在の地すべり活動を示す変動あるいは兆候は認められなかった。また、地すべり地を対象として行った追加調査ボーリングや地表地質の分布状況から想定される地すべりは、崩積土層を対象とした「崩積土地すべり」であると想定される。

地すべり地は、上記のとおり現在の地すべり活動を示す変状は認められなかった。そこで、表-1に示す地すべり分類による現況安全率の設定例により、現況安全率を推定する。本地すべり地における現況安全率を $F_s=1.05$ と評価した。

表-1 現況安全率の設定例²⁾

分類	岩盤地すべり	風化岩地すべり	崩積土地すべり	粘質土地すべり
運動停止中	1.10	1.05~1.10	1.03~1.05	1.00~1.03
活動中	0.99	0.95~0.99	0.93~0.95	0.90~0.93

5. 対策工の検討

(1) 地すべり安定解析¹⁾

a) すべり面の強度推定

現況安全率からすべり面強度を逆計算した。すべり面強度の諸元は、以下のとおりである。

地すべり土塊の単位体積重量： $\gamma_t=18\text{kN/m}^3$

すべり面の粘着力： $C=10\text{kN/m}^2$

すべり面の内部摩擦角： $\phi=20.61^\circ$

b) 押え盛土による効果の判定

地すべり土塊の末端部にて計画されている本線盛土(押え盛土の効果)による安定性の向上を検討し、計画安全率が $F_s=1.166$ に向上することを確認した。

c) 自然斜面の安定性

地すべり地内および地すべり地の上部斜面の安定性を評価した。

追加調査ボーリングの標準貫入試験の N 値より算出した内部摩擦角 $\phi=34^\circ$ ($c=0\text{kN/m}^2$) により安定解析を行うと、自然斜面は概ね $20\sim25^\circ$ 程度であるこ

とから、地すべり地内における最小安全率は $F_s=1.324$ となり、斜面は安定していると判断した。

地すべり地の上部斜面では最小安全率 $F_s=0.944$ の結果が得られたことから、トンネル坑口への崩土の到達が懸念されるため、崩土の到達距離を算定し、測点 No. 1158+7 より坑口位置を終点側にすれば崩土が坑口まで到達しないと判断した。

d) トンネル断面欠損の影響検討

トンネルが貫通することによって地すべり土塊の応力バランスが崩れることを考慮する。なお、安定解析の手法は「トンネル坑口周辺地すべり・斜面安定解析に関する研究報告書」(高速道路調査会)に示される方法を用いた。

①地すべりの横断面の中で、トンネル断面により欠損する重量を、二次元断面上の地すべり層厚の減少に置き換えて計算する。

②トンネルが切断するすべり面の抵抗力を、横断形状と縦断形状から適切な重みをつけて除去して計算する。

この結果、坑口位置が測点 No. 1159+14 では、トンネル掘削により、計画安全率が $F_s=0.049$ 低下することが懸念された。

(2) 最適な坑口位置の選定¹⁾

見直した地すべり規模および地質条件により、坑口位置の選定を行った(次頁、図-7 参照)。

設計条件として、切土時 ($F_s=1.10$) およびトンネル貫通時 ($F_s=1.20$) の安全率を確保することとした。

設計条件を満足し、施工性・経済性に優れる坑口位置を「測点 No. 1159+14」とした。選定理由として以下の項目があげられる。

①施工性に優れていること。

- ・切土量が少なく、工期が最も短くなる。
- ・トンネル掘削時の崩落・地すべり対策工として垂直縫地ボルトが必要となるが、斜面勾配が約 20° と緩やかで、クローラ式ドリルによる施工が可能となる。

②構造安定性が高いこと。

- ・トンネル到達側坑口を押え盛土で抑えてからトンネルが貫通するため、抜け上がりすべりを最も誘発させ難い構造である。

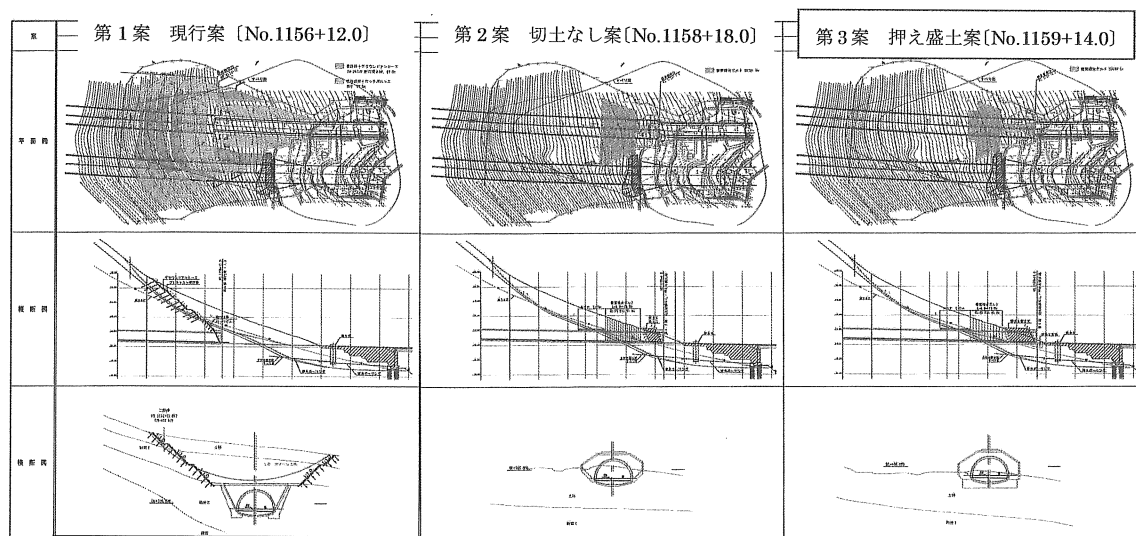


図-7 坑口位置比較図 1)

③経済性で最も優れていること。

- ・比較した案の中で最も経済的な案である。

(3) トンネル補助工法の検討

補助工法(長尺先受け工)の範囲は、トンネル掘削時の地山のゆるみをできるだけ発生させないため、トンネル上部に「地すべり土塊が位置する区間+トンネル上方に比較的安定した岩盤が約 3.0m 出現する区間」までを対象範囲とした。

(4) 垂直縫地ボルトの検討

トンネル掘削時に押え盛土端に抜け上がるすべり面に対する抵抗力不足分を補強ボルトのせん断抵抗力により補うこととした。また、トンネル掘削時の地山崩落防止も兼ねることとした。

垂直縫地ボルトは、掘削作業と競合せずに施工でき、トンネル掘削時における地山の变形ゆるみをモルタルを介して鉄筋に負担させるとともに、地山のせん断強度を改良する効果がある。

ただ設計手法については、確立されていないのが現状であり、以下の方法を用いて検討した。

- ・トンネル掘削時の地山崩落防止対策
→過去の類似地山での実績を参考
- ・抜け上がりすべりの対策
→すべり面に対して、鉄筋をせん断抵抗杭として評価する方法
比較検討の結果、D32 の鉄筋を 2.0m×2.0m、トン

ネルの荷重影響範囲の 45° の配置で抜け上がりすべりに対応し、その背後のトンネル掘削時の天端崩落防止対策としての垂直縫地ボルトと長尺先受け工を組み合わせる施工する案が、経済性に優れる結果となった。

(5) 対策工のまとめ

調査結果に基づく安定解析により決定した対策工を表-2 に示す。

表-2 対策工一覧表

工 種	単位	数 量
トンネル工	m	62.0
集水井(φ3.5)	基	1(12.5m)
集排水ホースリンク	式	1(415.4m)
長尺先受け	m	21.0(58本)
垂直縫地ボルト	本	206(2550m)
押え盛土	m ³	1,942.6

- ・全体すべりについては、押え盛土の効果を見込んだ本線盛土と地下水排除工により安定化を図った。
- ・抜け上がりすべりについては、到達側坑口の斜面崩壊の防止を兼ねたソイルセメント盛土工と垂直縫地ボルトにより安定化を図った。
- ・トンネル掘削による地山のゆるみ(天端崩落など)と地すべりの誘発を防止するための長尺先受け工と垂直縫地ボルトを施工した。

6. 対策工の施工

地すべりを最も誘発させ難い、図-8 に示す施工順序と施工時・完成時の目標安全率に対する各対策工施工時の安全率(表-3)を以下に示す。

(1) 施工順序と安全率

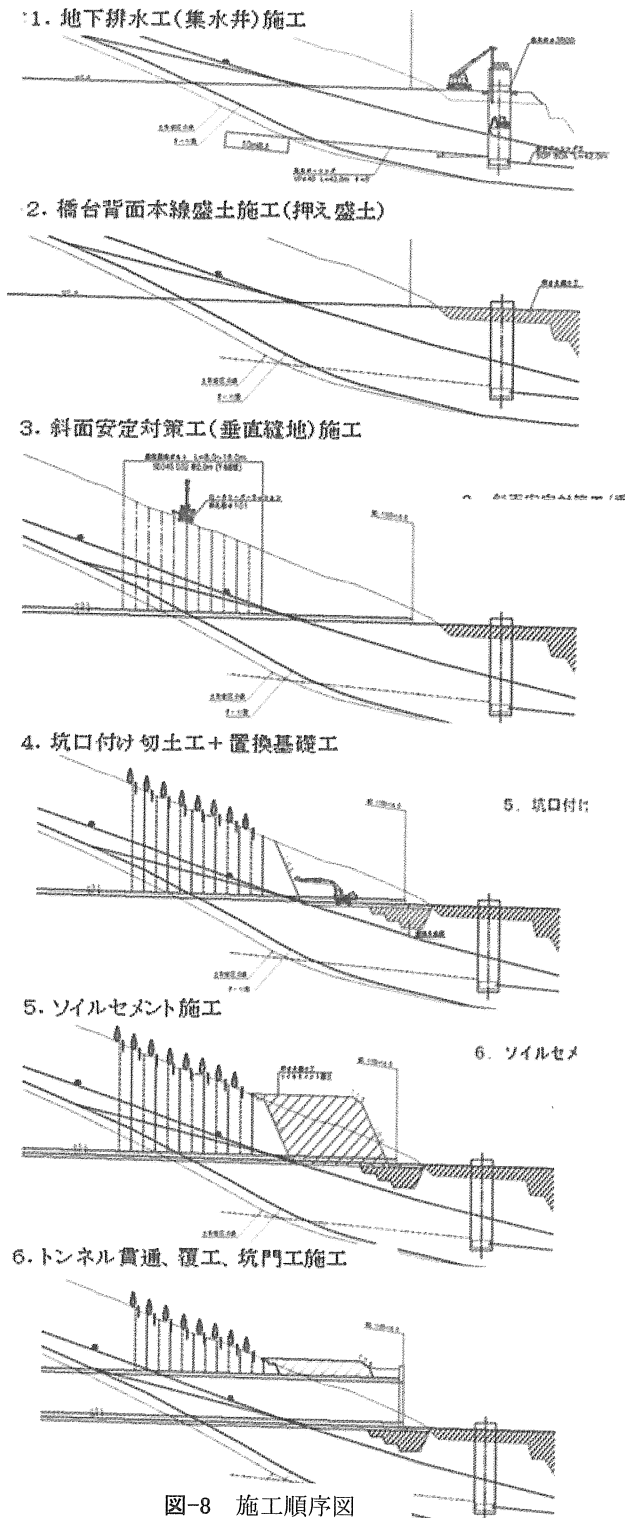


図-8 施工順序図

表-3 施工順序と安全率

順序	全体	抜け上がり
現況	1.05	1.05
1 集水井	1.10 (+0.05)	1.10 (+0.05)
2 押え盛土	1.216 (+0.116)	—
3 垂直縫地	—	1.153 (+0.053)
4 坑口切土	1.220 (+0.004)	1.106 (-0.047)
5 ソイルセメント		1.249 (+0.143)
6 貫通	1.210 (-0.010)	1.200 (-0.049)

※目標安全率

施工時 1.100

完成時 1.200

(2) 計測結果

トンネル縦断方向のA計測結果は、崩積土がトンネルの下半盤に位置する3測線(測定間隔10m)で、天端沈下の平均値11.8mm、脚部沈下の平均値11.6mmと脚部の地耐力不足による共下がり状態であった。

地表面の動態観測4測点においては、変位の傾向がみられなかったことから、対策工の効果により崩積土の変位(地すべりの誘発)はなかったと判断した。

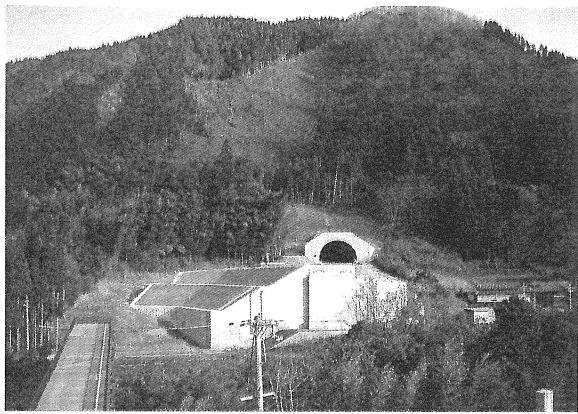


写真-2 到達側坑口部の完成状況

7. おわりに

対策工の施工区間では，トンネル切羽の崩落，斜

面の変状などのトラブルも無くトンネル掘削を完了できた。調査，対策工の検討に時間を要したが，最終段階でのトンネル掘削工程への支障を回避でき，施工トラブルの未然防止と恒久的な維持管理を考慮したトンネル坑口部を築造できた（写真-2）。ここに誌面をお借りして，多くのご指導を賜りました関係各位の皆様に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省近畿地方整備局福知山河川国道事務所
：平成 18 年度丹波綾部道路橋上法面詳細設計業務
報告書，2006 年 7 月
- 2) 藤原明敏：地すべりの解析と防止対策，理工図書，
p. 425