

偏土圧の条件下で掘削したトンネルの変状原因の検討

島根米三郎¹・倉川哲志²・高橋昭宏³・笹尾春夫⁴

¹正会員 鉄建建設(株) エンジニアリング本部 (〒101-8366 東京都千代田区三崎町2-5-3)
E-mail: yonesaburou-shimane@tekken.co.jp

²正会員 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部 北陸新幹線建設局
(〒380-0936 長野県長野市大字中御所字岡田45-1)
E-mail: t.kurakawa@jrtt.go.jp

³鉄建建設(株) 経営戦略室 (〒101-8366 東京都千代田区三崎町2-5-3)
E-mail: akihiro-takahashi@tekken.co.jp

⁴フェロー 博(工) 鉄建建設(株) エンジニアリング本部 (〒101-8366 東京都千代田区三崎町2-5-3)
E-mail: haruo-sasao@tekken.co.jp

山岳トンネル工事において、坑口付近が偏圧や地すべり地形を呈する場合、トンネル掘削時に断面形状を保つことが困難となる場合がある。

本稿では、坑口から500mの地点においてトンネル施工時に変状が生じたため、応急対策を講じ、その後、坑内および地表から各種調査を行うとともに、トンネル計測結果から変位挙動の応答性を確認し、変状原因を特定して復旧対策を実施した事例について報告する。

Key Words : *unsymmetrical earth pressure, landslide, deformation factor*

1. はじめに

北陸新幹線は、長野、上越、富山、金沢、福井等の主要都市を経由し、東京と大阪を結ぶ延長約700kmの路線である。このうち東京・長野間は、平成9年10月に開業しており、現在、長野・金沢間は、平成26年度末の完成を目指し建設工事が進められている(図-1)。

松ノ木トンネルは、新潟県上越市から糸魚川市に向う延長6,777m、掘削断面積約80m²のトンネルである。施工箇所は、新潟県西端部で日本海から約10km内陸に位置し、日本でも有数の地すべり多発地帯である。

松ノ木トンネルの坑口から500m付近において、トンネル掘削後、切羽が5D以上進んだ時点で、内空変位の増大や支保部材の変状が発生したため、応急対策として内巻補強工を実施した。

トンネル上部は地すべり指定地「松ノ木」地区に指定されており、トンネル坑内および地表周辺部の各種調査が必要であると判断した^{1),2)}。

具体的には、地すべりブロックの滑動性やトンネルとの位置関係を把握し、トンネル変状との関連性が無いこ

とを確認した。また、トンネル計測結果から、偏土圧の傾向が確認されたため、数値解析により発生応力を検討した上で、縫い返しによる復旧対策を実施した。

本稿は、地すべり地帯におけるトンネル変状の原因について検討を行い、復旧対策を実施した結果を報告するものである。

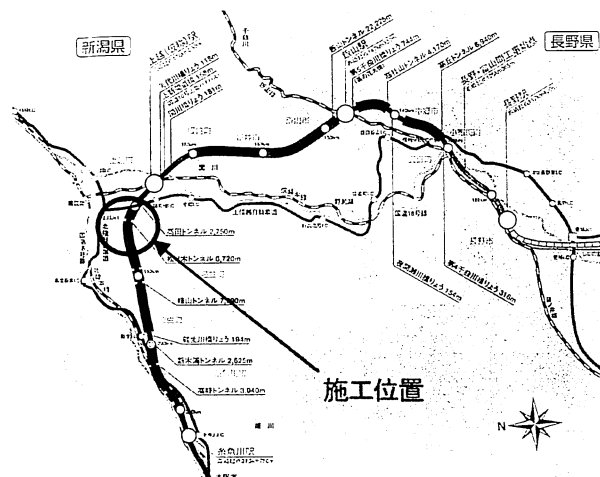


図-1 施工位置³⁾

2. 工事概要

(1) 地質概要

トンネルの地質は、新第三紀中新世の能生谷層を主体とした堆積岩で構成され、泥岩優勢であり部分的に砂岩を挟在する。泥岩の一軸圧縮強度は、最大10MN/m²程度を示し、軟岩に分類される。土被りは50～60m程度あり、地山強度比は3.7～9.1である。湧水は、支保工表面を部分的に濡らす程度の滲み出しがある程度であったが、融雪期にはやや増加する傾向にあった。

(2) 掘削・変状の経緯

坑口から500m～760m区間（図-2）の掘削は、平成15年11月～平成16年2月にかけて、機械掘削方式の補助ベンチ付き全断面掘削工法により行い、掘削時の切羽は比較的安定した状態であった。しかし、平成16年2月～3月の雪解け時期に、トンネル切羽が前方5D（50m）以上に達した時点においても内空変位が増大し、吹き付けコンクリート、ロックボルトプレート、鋼製支保工の変状

が発生し、最大で350mmの内空変位が発生した（写真-1）。

(3) 応急対策

一次支保への変状に対し、増しロックボルトや仮インバート吹付けを施工したものの、変状がさらに進行した（図-3）ことから、平成16年5月に応急対策として、内巻補強工（図-4）を実施した。

(4) 変状の特徴

当該区間に発生した変状の特徴を以下に示す。

- ・ 地山強度比が3.7～9.1と比較的大きい値を示しているにもかかわらず、トンネルの変位量が多い。
- ・ トンネルの変状が大きくなった時期は、掘削後1～3ヵ月程度経過して切羽が前方に5D以上進んだからの時期である（図-3）。
- ・ トンネル変状の時期は、融雪時期であった。
- ・ トンネル上部は、国土交通省所管の地すべり指定地「松ノ木」地区に指定されている。

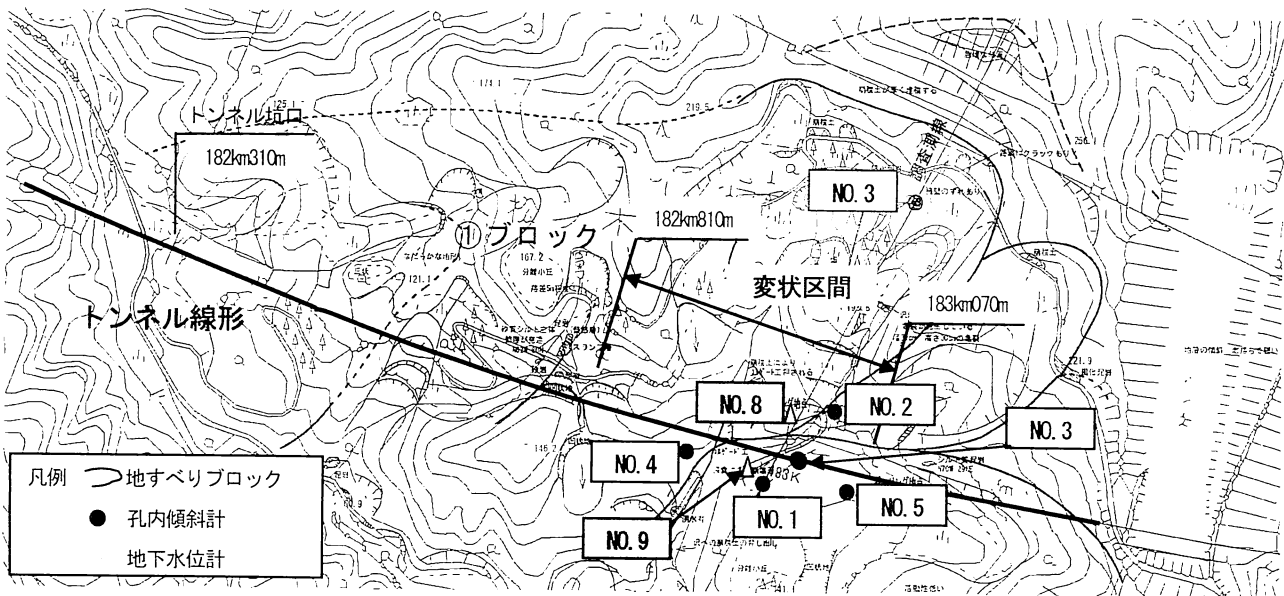


図-2 平面図¹⁾

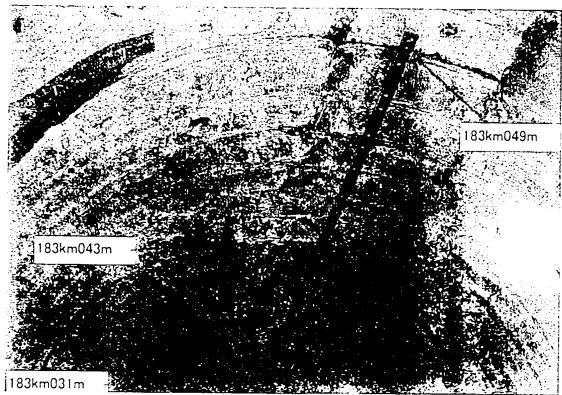


写真-1 変状の状況

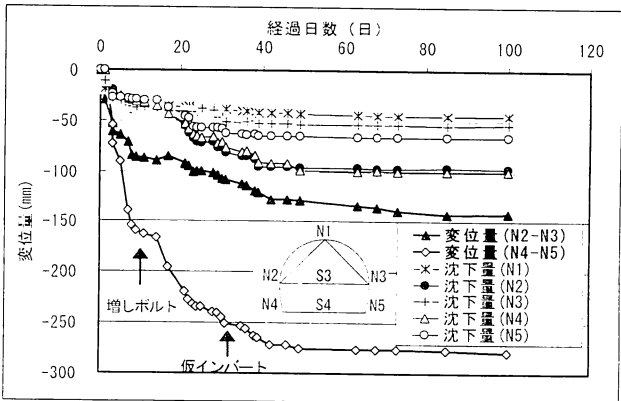


図-3 A 計測経時変化(183km010m)

以上のように、今回確認された変位は、比較的大きく、トンネル掘削に伴う変位とは異なるため、調査が必要と判断した。

3. トンネル変状原因の調査

(1) 調査方針・目的

地すべりの影響が懸念されたため、トンネル支保工の復旧を行うにあたり、トンネルの変状原因について調査を行った。

a)地すべりブロックの確認

トンネル上部には、地すべり地形が確認されるが、地表踏査・空中写真等による地表面の状況把握及びボーリング調査等により、地すべりブロックの分布、形状、地質およびトンネルとの位置関係について調査する。

b)地すべりブロックの滑動状況

ボーリングのコア状況や孔内傾斜計等により、想定されるすべり面を抽出し、地すべり基底位置と変位時期や変位速度を把握する。

c)トンネルの変状と地すべり滑動との関連性

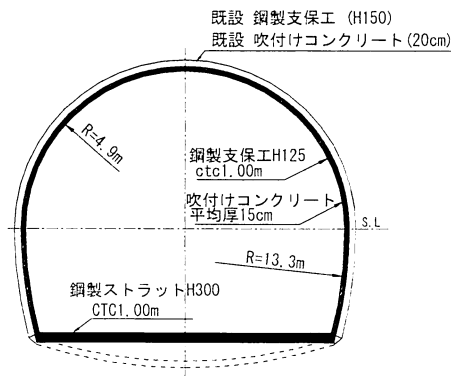


図-4 内巻補強工図(183km010m)

トンネルおよびその周辺の地山挙動をA計測およびB計測で確認し、想定される地すべりとの位置関係や滑動状況との相関性を確認し、地表部とトンネルへの対策の必要性を検討する。

(2) 調査項目

地表部調査では、地表踏査により地形確認やボーリング調査箇所を選定を行い、ボーリングコアによる弱層の確認、孔内傾斜計や地下水位計により変位時期や速度の把握を行った。トンネル調査では、内空変位、支保部材の応力や地中変位計による変形モードや変形時期の把握を行った。そして、すべり面とトンネルの位置関係の確認(図-5)や応答性を確認するため、以下の調査項目とした。また、今回の調査検討フローを図-6に示す。

①地表踏査・空中写真判読

想定地すべりブロックの抽出、地質状況の把握を目的とする。

②ボーリング調査

想定地すべり部分の地質状況の把握を目的とする(8箇所)。

③孔内傾斜計測定

想定地すべりの変位計測を目的とする(6箇所)。

④地下水位測定

孔内傾斜計やトンネル坑内の変位挙動との応答性確認を目的とする(2箇所)。

⑤坑内A計測

坑内の変形状態の監視を目的とする。

⑥坑内B計測

坑内の変形モード、変位速度および支保状態の把握を目的とする(吹付コンクリート応力、鋼製支保工応力:3断面、地中変位計:1断面)。

(3) 地表踏査・空中写真判読の結果

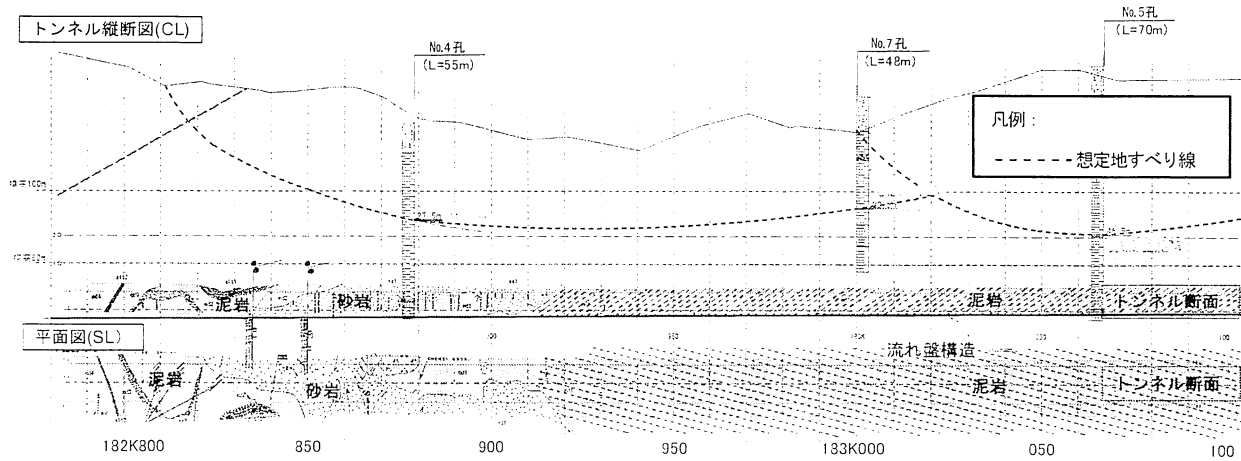


図-5 トンネル縦断面図

地表踏査や空中写真判読結果より、地すべり地形が想定される。想定される地すべりブロックの軸は、トンネルに対しほぼ直角方向に位置する。

しかし、地表踏査の結果は、そのブロック内に存在する市道のコンクリート舗装に亀裂等の変状は確認されず、また、新しい地すべりに伴う滑落崖等は確認されない。よって、当該地域にいくつか想定される地すべりブロックは、現在顕著に滑動していないと判断した。

(4) ボーリング調査

地表踏査や空中写真判読の結果より、想定される地すべりブロックの主測線に対し、ボーリング4箇所(No.1～No.3, No.7)およびトンネルへの影響範囲を目的として2箇所(No.4～No.5)、また地下水位測定のために2箇所(No.8, No.9)を実施した(図-2)。ボーリング結果の概要を以下に示す。

- ・棒状コアを主体とする砂岩、泥岩、凝灰岩が分布し、層理等の地質構造は明瞭に識別できる。
- ・ボーリングコアには、堅岩中に軟質な粘土の薄層(厚さ1～2cm程度)を挟むことや、岩質が劣化し細分化しやすく、部分的にクラックが集中することが確認された。
- ・弱層部の分布状況より、ボーリング調査段階においては、トンネル天端から2D程度上方、およびトンネル天端から5D程度上方に地すべり面が想定される(図-5)。

(5) 孔内傾斜計測定

孔内傾斜計測定は、ボーリング孔6箇所について、測点を鉛直方向50cm間隔にて、挿入式傾斜計による測定を1回/月の頻度にて実施した。

計測結果より、No.2孔-深度42.5m, No.4孔-深度27.5m, No.7孔-深度29.5m付近で若干の変位が認められたが、トンネル天端より2D以上であった。また、変位は平成16年6月～8月および10月頃増加したが、その後の観測では、ごく僅かな変位しか計測されず、平成18年10月時点(計測期間約2年)においては、最大3mm程度であった(図-7)。

(6) 地下水位測定

ボーリングNo.8, No.9にて行い、測定頻度は4回/日で

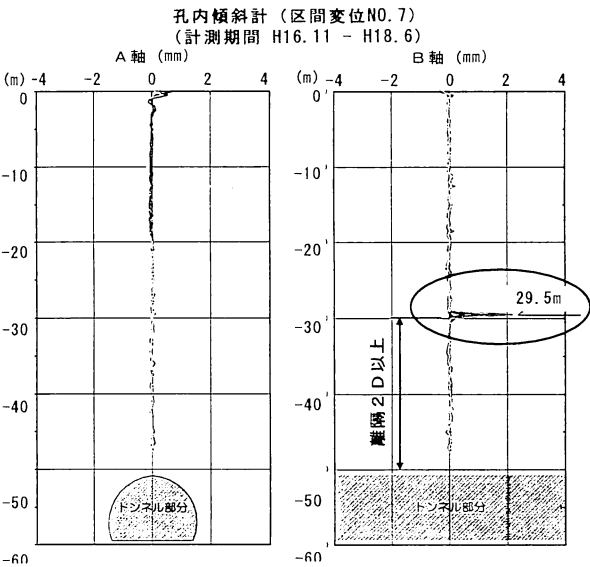


図-7 孔内傾斜計測定

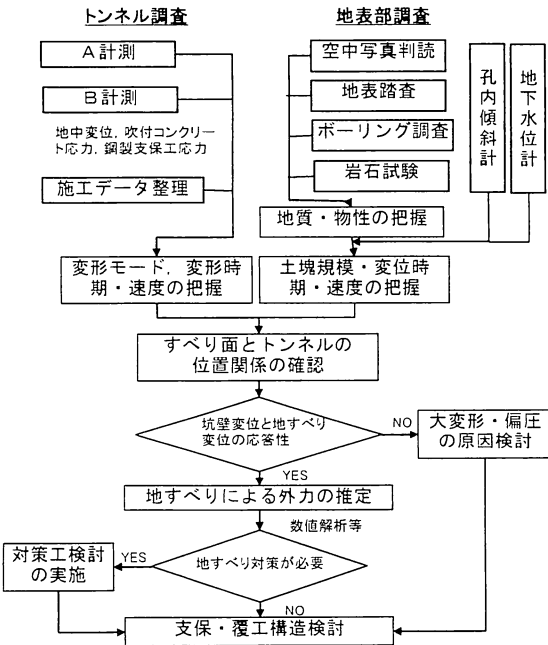


図-6 調査検討フロー

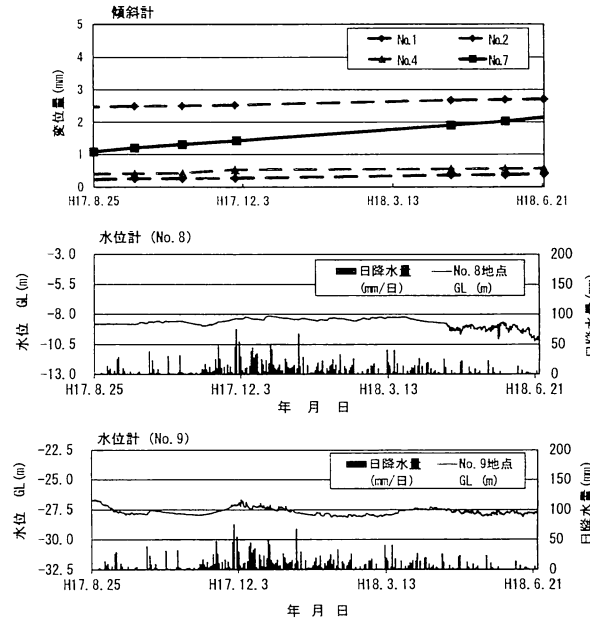


図-8 傾斜計・地下水位の経時変化

実施した。多少の季節変動は認められるが、著しい変化は認められない。また、孔内傾斜計No.7による僅かな変位1.5mm/年と水位変化との関連性は確認できない（図-8）。

(7) 坑内A計測

掘削直後のA計測結果は、最大で内空変位350mm程度、天端沈下130mm程度が発生した。また、掘削後3週間経過時を初期値として、その後の内空変位を断面測定機で測定した結果、数mm程度であるが、左肩から偏土圧を受ける傾向が確認された。また、孔内傾斜計No.2で2004年6月～10月にかけて、2mm程度の顕著な変位が発生した際（図-9），坑内A計測の変位量は変化しておらず、すべり面の動きとトンネルの変形の関連性は確認されなかった。

(8) 坑内B計測

吹付けコンクリート応力は、182km850m（図-10）および183km000mにおいて、右肩付近に圧縮応力が発生し、左側から偏土圧を受けている傾向が認められる。

地中変位計測は、各測点・深度ともに数mm程度の変位（図-11）が発生している。左側壁・左肩は内空側に僅かに変位（1mm程度）が認められるが、右肩は内空側に顕著な変位（5mm程度）が確認された。以上より、吹付けコンクリート応力と同様に、左側から偏土圧を受けている傾向が認められる。

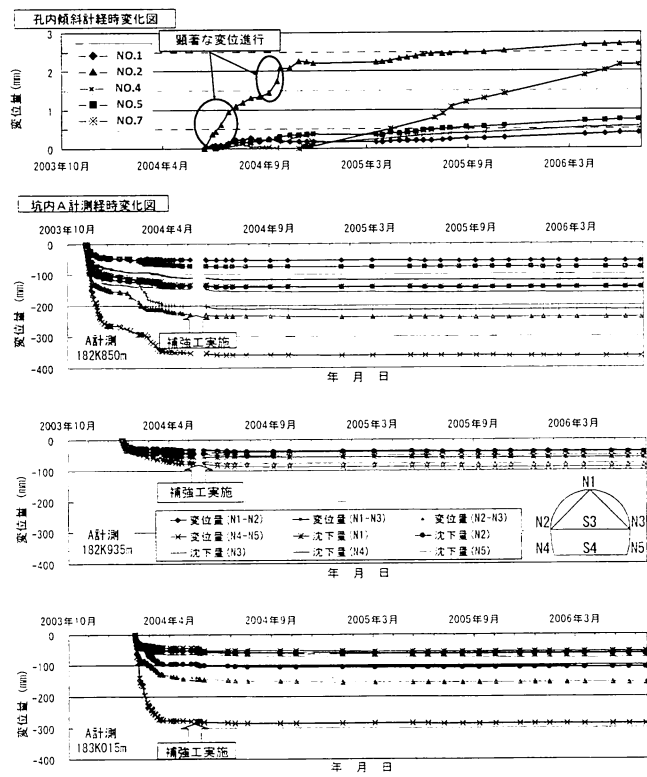


図-9 傾斜計とA計測との結果比較

(9) 変状原因の想定

各調査結果を以下に示す。

- ①地形的な状況から、地すべりブロックは想定されるが、現在顕著に滑動していることは確認されない。
- ②地質調査ボーリング結果から、すべり面は2箇所想定できるが、トンネルに最も近接するものでも、トンネル断面より2D以上上方にある。

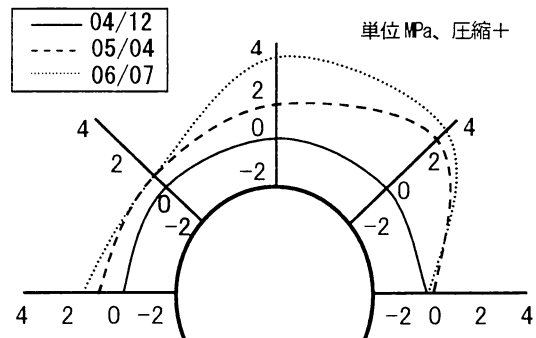


図-10 吹付けコンクリート応力測定(182km850m)

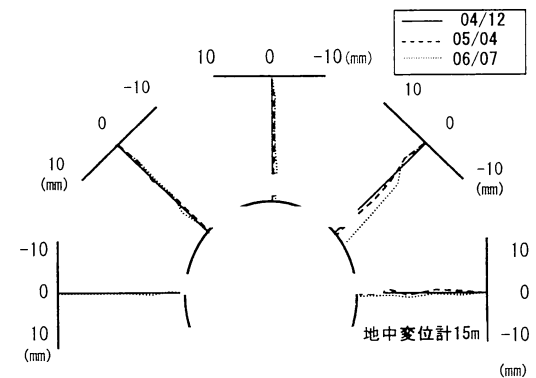


図-11 地中変位測定(183km000m)

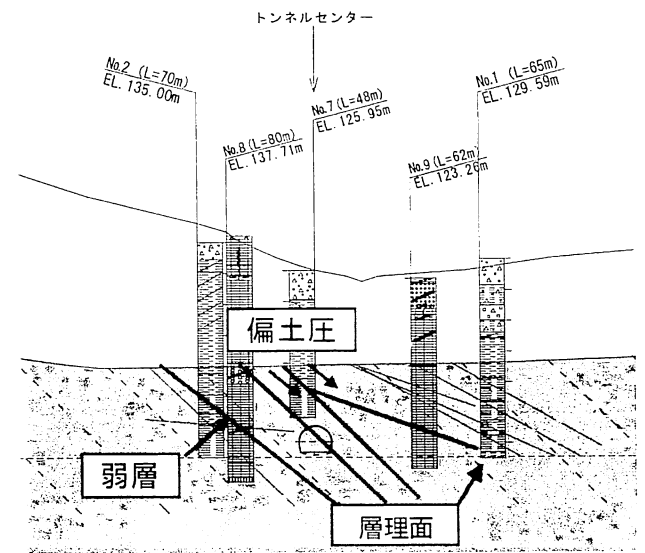


図-12 地質構造（推定）

③傾斜計の測定結果から変位量は小さく、またトンネル変状との関連性は低い。また、地下水位変化と傾斜計の変位との応答性は無い。

④トンネルの変形形状より、トンネルは山側から谷側に偏土圧を受けている可能性が高い。

以上より、地すべりブロックはトンネル断面付近に存在せず、最もトンネルに近い想定すべり面でも2D以上離れている。トンネルと地すべり面とが離れていることから、トンネルは直接せん断力を受けることは無い^{5),6)}。

また、ボーリングコアより、地層中に粘土の薄層が挟在することが確認されている。この薄層は比較的低角度であり、層理面に平行するものもある。層離面に平行する粘土層が挟在する場合、地上に傾斜地形が認められる場合、予想以上の偏土圧が発生する可能性がある。よって、変状原因は、地質および地形の影響で偏土圧を受けているものと判断した（図-12）。

4. 復旧対策の検討

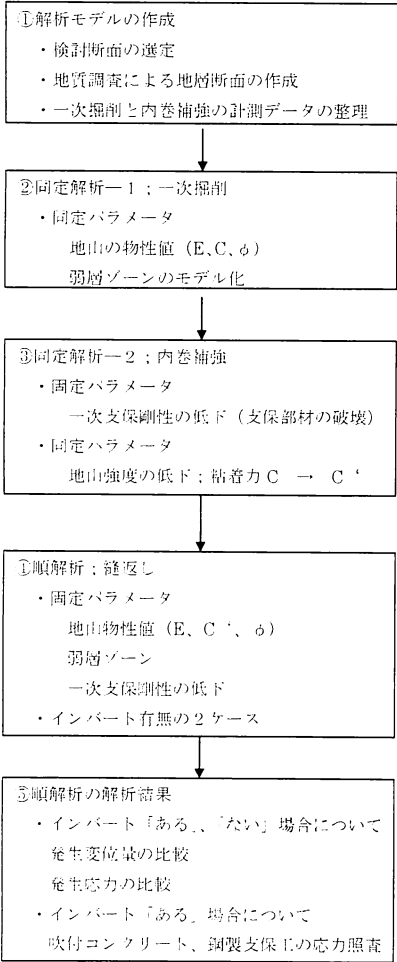


図-13 支保検討フロー

(1) 検討方針

復旧対策の検討として、地形を考慮した土圧メカニズムを数値解析によりモデル化し、変状の再現を行う。

解析検討の方針を以下に示す。

①地山の変位抑制は一次支保段階で極力抑制する。

②覆工巻厚は30cmを基本に検討する。

(2) 支保検討フロー

一次掘削時、内巻補強時にトンネルで発生した変形状況を基にそれぞれ同定解析1,2を行い、地山物性値を求め、順解析により縫返し（復旧時）に必要なトンネル支保構造を検討した。解析手順の検討フローを図-13に示す。なお、一次支保の破壊状態は支保剛性を低下することとした。

解析モデルは、地山の強度低下を考慮した弾塑性FEM解析を用いた（図-14）。偏土圧を再現するためにトンネル天端から左側に弱層ゾーンを設け、周辺地山の物性値より低い値とした（表-1）。

(3) 検討結果

上記の支保検討フローにより、変状区間における一次掘削および内巻補強工のA計測データを再現（図-15）し、縫返し支保パターンの検討を行なった。縫返し支保

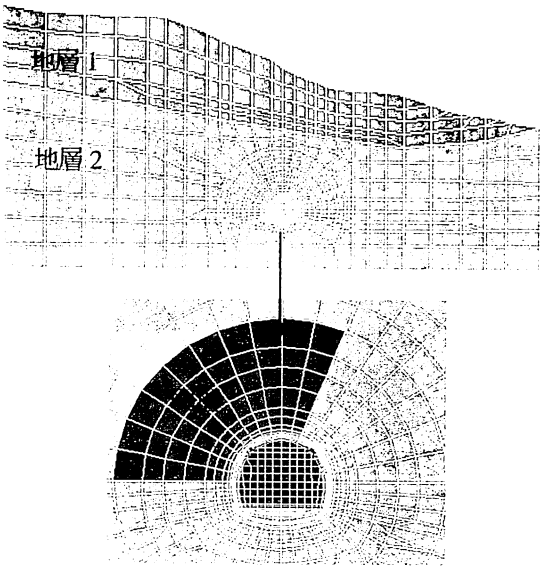


図-14 解析モデル

表-1 地山物性値

	解析段階	弾性係数 E (N/mm ²)	粘着力 C (N/mm ²)	内部摩擦角 Φ (°)
地層 1, 2	同定解析 1	100	0.22	26
	同定解析 2	100	0.19	26
	順解析	100	0.19	26
弱層	同定解析 1	50	0.18	16
	同定解析 2	50	0.14	16
	順解析	50	0.14	16

パターンは、鋼製支保工H200、吹付けコンクリート25cmとし、支保健全箇所は内巻補強を撤去して再び用いた。支保変形性能において、一次インバート（鋼製材H200）が無い場合は内空変位が150mm程度発生するのに比べて、有る場合は内空変位が50mm程度となる（図-16）。また、一次インバート（鋼製材）による変位抑制により一次支保の応力値も許容値以下に収まり、トンネル支保の安定を保つことが可能と考えた。

なお、部分的に凝灰質の薄層が確認されたことから、一次インバートによる断面閉合はトンネルの長期安定性にも寄与すると考えた。

5. 縫返し施工

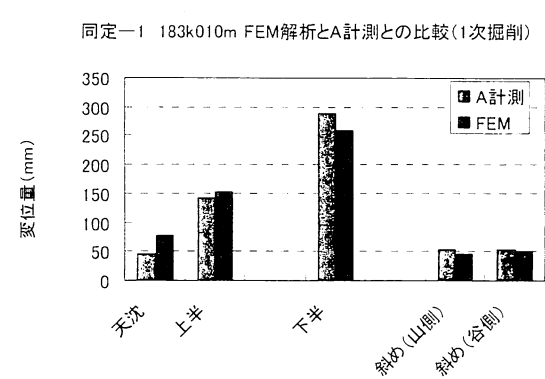


図-15 同定解析－1（一次掘削）

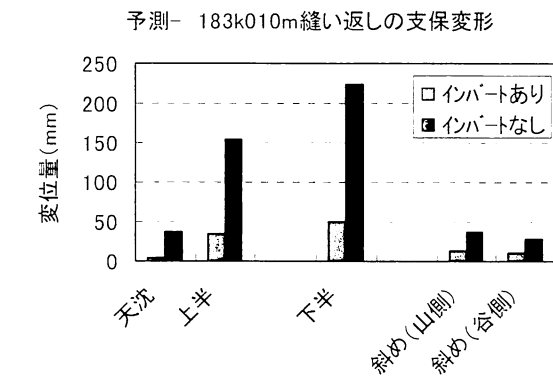


図-16 順解析（インバート有無の比較）

表-2 縫返し施工サイクル

1	鋼製ストラット撤去(L=10m)
2	高圧線, 排水管等の養生・移設
3	既設二重支保(上半)撤去 (L=1m)
4	新設一次支保(上半)設置 (L=1m)
5	既設二重支保(下半)撤去 (L=1m)
6	新設一次支保(下半)設置 (L=1m)
7	一次インバート(鋼製材)設置

(1) 施工方法

当該区間の調査・検討には約2年半を要した。その間に掘削を進めていたため、当該箇所の縫返し施工に先立ち、重機械、換気設備等の段取り替えを行った。縫返し施工方法は、上下半交互併進工法とし、施工順序は一次支保の健全性を確認し、表-2の施工サイクルとし変位進行状況を確認しながら進めることを基本とした。鋼製ストラット材（山留材H300）は材料長（L=5m）や施工性を考慮し10m毎の撤去とし、その後の既設支保の撤去および新設支保の設置は、1m毎に行った。

入念な施工管理を実施したこともあり、縫返し後のA計測結果は、縫返し直後に支保への馴染みとして数mm程度の変位が確認されたが、その後の変位進行は全く安定した状態であった。

6. おわりに

変状発生当初には、トンネル変状原因が、地すべりに直接起因するものと懸念された。しかし、その後の調査で、トンネル坑内の変位と地すべりに関連性がないことが確認され、変状原因は、偏圧地形によるものと判断した。

復旧に当たっては、偏圧地形の影響を踏まえた解析結果に基づき縫返しの支保を決定した。最終的に縫返し後に、支保の安定が確認されたため、覆工コンクリートを施工した。

今回は、トンネルの変状原因を特定するために、地表から各種調査を行い、2年にわたる長期計測を実施しており、比較的長期の挙動を確認の上、対処した事例と考える。本稿の実績が今後の同様な工事に寄与できれば幸いである。

最後になりますが、今回の施工・検討に際し、ご指導ご協力頂いた関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 田中健一，山口豊秋，上塘洋二郎，岡本典也；地すべり地帯で小土かぶりのトンネルを掘る，JTA，トンネルと地下，vol.387，no.2，pp.7-15，2007.2.
- 2) 川村俊一，島豊，河田孝志，金岡幹；大規模地すべり脆弱部を2重支保で突破，JTA，トンネルと地下，vol.37，no.2，pp.7-15，2006.12.
- 3) 日本鉄道建設公団北陸新幹線建設局；北陸新幹線[長野・上越間]，2001.
- 4) 松ノ木T(東)JV；北幹、松ノ木T(東)池1工事 松ノ木地区地表調査報告書，2006.10.
- 5) 地盤工学会；NATMにおける予測と実際，pp.257-261，1999.11.
- 6) 東・中・西日本高速道路株式会社；設計要領第一集土工編，

EXAMINATION OF DEFORMATION FACTOR IN THE TUNNEL EXCAVATION WHERE UNSYMMETRICAL EARTH PRESSURE.

Yonesaburou SHIMANE, Tetsushi KURAKAWA,
Akihiro TAKAHASHI and Haruo SASAO

In the mountains tunnel construction, it may become difficult for the portal area to keep a cross-section at the time of a case with unsymmetrical earth pressure and the landslide topography, tunnel excavation.

Because transformation occurred at the time of tunnel construction in this report in a spot of 500m from the entrance, I take measures temporarily and I conduct various investigations from a tunnel and earth surface and confirm responsiveness of the displacement behavior from a tunnel measurement result and report the example that I identify a transformation cause, and carried out restoration measures afterwards.