

蛇紋岩粘性土に施工した早期閉合の効果 に関する一考察

中野 清人¹・佐藤 諭一²・本藤 敦³

¹正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 トンネル研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)

E-mail:k.nakano.aa@ri-nexco.co.jp

²正会員 東日本高速道路株式会社 千歳工事事務所 (〒066-0037 北海道千歳市新富1-2-14)

³正会員 前田建設工業株式会社 土木本部 (〒179-8903 東京都練馬区高松5-8)

本トンネルは、地すべり地で蛇紋岩粘性土を通過する延長 816m のトンネルである。地山強度比 1 以下で大きな変形が生じかつクリープ的に継続するため、上半先進ショートベンチカット工法から補助ベンチ付全断面掘削工法による早期に断面閉合する方法に変更した。この断面閉合する効果について計測・観察データを整理・分析し考察したものである。

Key Words : landslide, immediate ring closure, serpentine clay, settlement-control-method, auxiliary-method

1. はじめに

筆者ら¹⁾はこれまで大規模地すべり地の脆弱な地山において地すべり対策を実施した後、観測施工を強化して早期に断面閉合する工法（以下「早期閉合」という。）により地山の変形を効果的に収めてトンネルを掘削してきた。これまでの研究においても早期閉合の効果については、現地施工における計測結果の分析や数値解析の手法によるアプローチなどで研究が行われてきている。本報告は、高速道路のトンネルの施工プロセスを通して観察・計測データを整理・分析し、早期閉合の効果について考察したものである。

比は 0.5～1.5 程度であった。さらに、ボーリング孔の地下水位は、脆弱部と隣接する蛇紋岩区間では図のとおりに地表面に近い位置にあった。脆弱部の支保構造は周辺トンネルの施工事例を参考にして FEM 解析を用いて検討した結果、高強度吹付けコンクリートや高規格 H 鋼など、高強度材料を用いた特殊支保 E パターン（図-2）とし、地すべりの兆候が見られたため長尺鋼管先受け工法（以下「先受工」という。）を併用することとした。

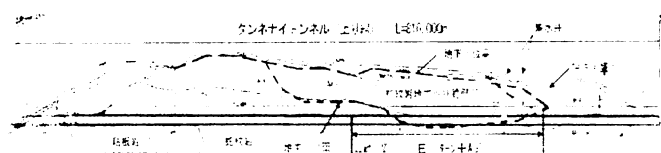


図-1 トンネル地質縦断面図

2. トンネル概要

地形は比較的傾斜の緩い丘陵地であり、地質調査時に図-1 に示すように中央部付近にトンネルに対して大規模な複合地すべりブロックが存在することが確認された。土被りは全般的に小さく最大約 60m 程度である。地質の主な構成は粘板岩・砂岩、および蛇紋岩であり、その上に地すべり堆積物・崖錐堆積物が分布する。粘板岩・砂岩は亀裂の発達した粘板岩が主体であり、蛇紋岩は葉片状の中に部分的に塊状を内含し、粘土化した状態であった。これらは全般的に脆弱な粘性土であり、RQD はほぼ 0（写真-1）、一部に角礫状の岩片を含むルーズな状態で比較的厚く分布していた。地山強度

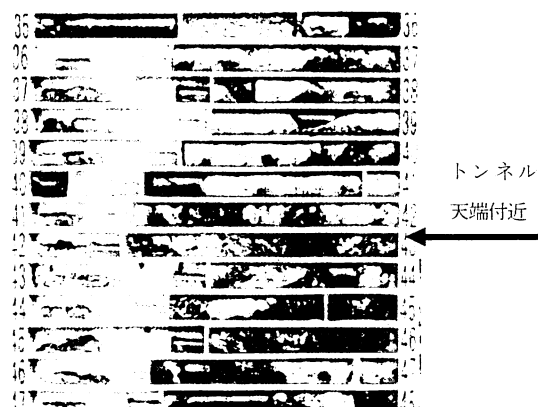
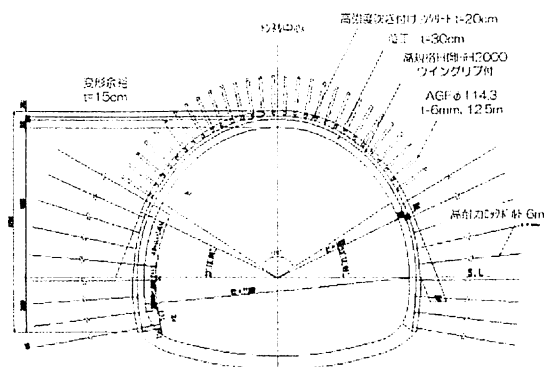
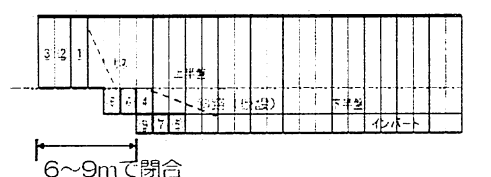


写真-1 脆弱部でのボーリングコア



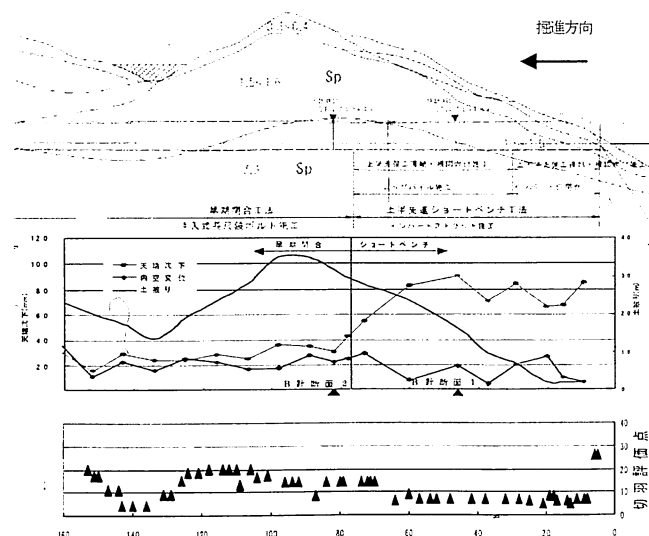
3. 上半先進ショートベンチカット工法の変更

上半先進ショートベンチカット工法（以下「上半工法」という。）の計画であったが、上半盤（粘性土系地山）での支保の沈下がクリープ的に継続し、下半掘削で更に大きく沈下したため、早期閉合に変更した¹⁾。掘削手順は図-3 に示すとおり、ブレイカーにて上半盤で掘削後、下半とインバートの交互掘削にて閉合距離 6 ～ 9m で鋼アーチ支保工と吹付けコンクリートで閉合した。補助工法については、上半工法は図-4 に示す沈下対策として様々な工法を用いたが、早期閉合は切羽最上部にボルト 5 本を追加した。



①②、…⑨；掘削順序

圖-3 早期閉合施工順序



(1) 変形挙動

上半工法と早期閉合の各々の区間の変形状況の比較を図-4 に示す。土被りが少ないため典型的な坑口部の変形挙動で全般的に内空変位は少ない。土被りや切羽状況の違いは多少あるものの、天端沈下は上半工法で大きく、早期閉合では小さくなった。図-5 に初期変位速度と天端沈下（最終）の関係で比較したものを示す。初期変位速度は両区間ともに幅広く分布しているが、上半工法では初期変位速度に関わらず天端沈下は大きくなっている反面、早期閉合は初期変位速度に関わらず天端沈下を 20～40mm の小さな範囲に抑制することができた。

(2) 支保部材応力

上半工法および早期閉合の図-4 に示す地点で測定した各々の支保部材応力を図-6, 図-7 に示す。土被りや切羽状況は異なるため直接的に比較できないが、計測から求めた鋼アーチ支保工軸力と吹付けコンクリート軸力の合計値は両地点とも結果的にほぼ 1,600kN であった。土被りに換算すると 11.5m 程度の高さとなる。早期閉合の鋼アーチ支保工軸力が上半工法より大きくなっているのは、初期の段階で断面閉合した結果、天端沈下を抑制したためと考えられる。早期閉合の吹付け応力が小さいのは、初期の段階で鋼アーチ支保工が大部分の荷重を受けたためとも考えられる。両地点ともに二つの支保部材ともに耐力に比べて余裕がある。

(3) まとめ

上記 (1), (2) から下記のことが考察できる.

- ・切羽状況は上半区間で評価点 0～10 点，早期閉合区間は 10～20 点でやや良好であった。
- ・低土被りの区間で天端沈下が卓越する現象が生じたが，早期閉合は天端沈下を 20～40mm の少ない範囲に効果的に収めることができた。

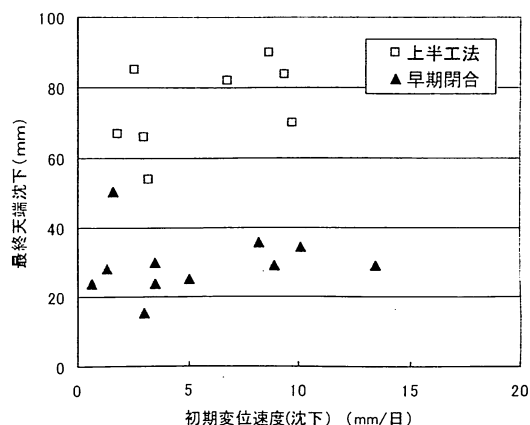
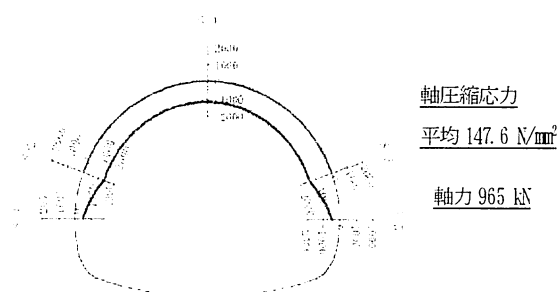


図5 初期変位速度と天端沈下（最終）の関係

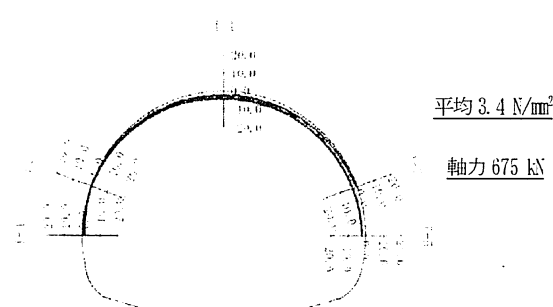
- ・このような粘性土地山においては上半工法は上半盤

での沈下がクリープ的に継続，更に下半掘削の際，更に沈下が拡大する。

- ・上半工法は沈下が長い期間継続，様々な沈下対策を実施したが完全には止まらず，鋼アーチによるリン

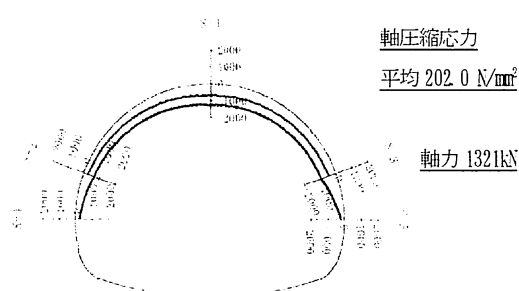


(a) 鋼アーチ支保工軸力 (kN)

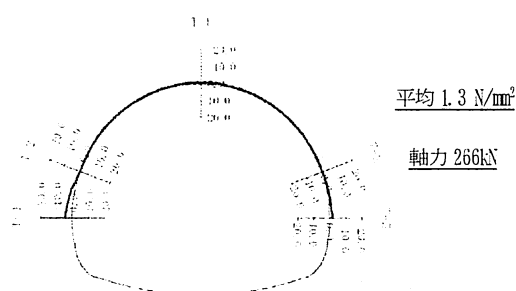


(b) 吹付けコンクリート応力 (N/mm²)

図-6 上半工法区間 (STA 743+34)



(a) 鋼アーチ支保工軸力 (kN)



(b) 吹付けコンクリート応力 (N/mm²)

図-7 早期閉合区間 (STA 742+98)

グ閉合でやっと収束した。

- ・早期閉合の沈下量は少ないが，鋼アーチ支保工に発生する軸力は大きくなった。結果的に総軸力はほぼ同じであった。

このようなことから，早期閉合の適用によって効果的に変形を収めることができ，進捗が確実に向上することになった。

4. 蛇紋岩粘性土（地すべり）区間

本区間は図-2 に示す支保構造とし，坑口部での早期閉合の効果確認した後，早期閉合を継続して実施することにした。

(1) 切羽状況

地すべり区間の蛇紋岩粘性土の代表的切羽の状況を写真-2 に示す。写真-1 のボーリングコアのようなルーズな粘性土とは異なり，比較的密実な蛇紋岩粘性土が概ね8割以上を占め，塊状の蛇紋岩などが部分的に見られるような状況であった。水は切羽に部分的に付き，多量量は増減する程度であった。地すべり区間の切羽状況を切羽評価点として図-8 に示す。評価点は図-4 に示す坑口部よりも悪くなり，0～20 点の範囲で中央部付近では長い区間に渡り 0 点が連続し最も悪い評価であった。

(2) 変形挙動

本地すべり区間におけるトンネルの変形状況を図-8 に示す。土被りは徐々に増加しているが全般的に低土被りであり，内空変位は 320m 付近で 60mm 以上となっているがそれ以外は小さい範囲に収まっている。天端沈下は，240～360m の間は 60mm 以上で中でも 250m 付近，290m 付近および 310～340m では 90mm 以上の大きな沈下



写真-2 蛇紋岩粘性土

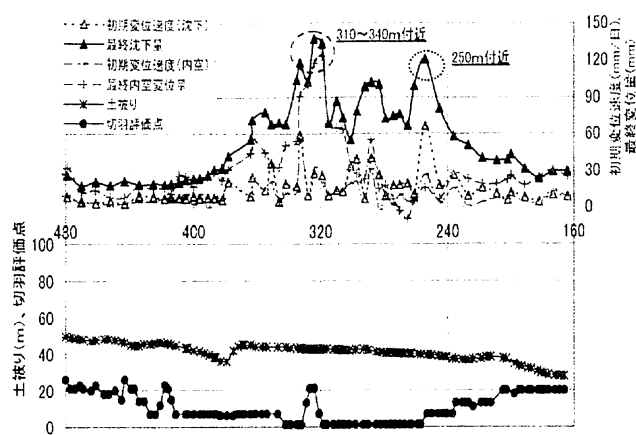


図-8 蛇紋岩粘性土（地すべり）区間の変位状況

が発生している。沈下の大きさは土被りや切羽の評価との相関は見られない。250m付近は初期変位速度（天端沈下）が60mm/日以上の最大値を示した。310～340mでは初期変位速度（天端沈下）は小さいが、内空変位が100mm以上の最大値を示した。これら二つの区間は挙動が各々異なるが、この傾向を確認した後、直に図-9に示すサイドパイルを打設し、効果的に変形を収めることができた。図-10に蛇紋岩粘性土区間における天端沈下の初期変位速度と最終沈下量の関係を示す。結果的ではあるが、早期閉合のみの箇所は100mmに収まっており、サイドパイルを施した箇所においても140mmに収めていることがわかる。

サイドパイルは長尺鋼管を半分に切断して左右3本ずつ設置し、サイドパイルの口元をH鋼で受けこのH鋼を縦断方向に渡してトンネル構造の一体化を図った。

鏡対策については図-11に示すとおりであるが、フェイスボルトは当初5本を基本として、切羽の状況が悪くなれば、7本もしくは13本へ変更することとした。また、先受工を施工していることもあり、水貫き孔も7孔設けることとした。先受工と鏡対策により、切羽崩落は滴水などにより小規模なものは繰り返し生じたが、天端崩落は一度も発生することにはなかった。先受工がしっかりと天端の地山を保持でき、かつ切羽状況に応じたフェイスボルトの対策が有効だと思われる。

(3) 支保部材応力

図-12より鋼アーチ支保工は上半には大きな圧縮力が作用することになったが、当初に検討した結果から高規格支保工を採用したことの効果について検証することができた。インバート部では上半の40%程度の圧縮力となっていた。

吹付けコンクリート応力にも上半およびインバートに大きな軸圧縮力が作用することになったが、同様に当初に検討した結果から高強度吹付けコンクリートを

採用した効果についても検証することができた。しかし、吹付けコンクリートの外観はひび割れも部分的にまとまって発生してきている状況であった。

坑口部付近の応力測定結果と比較すると鋼アーチ支保工の応力が大きくなっている以上に吹付けコンクリートの応力が増加し、分担率が大きくなり上半ではほぼ50%程度となっている。インバート部では上半よりも

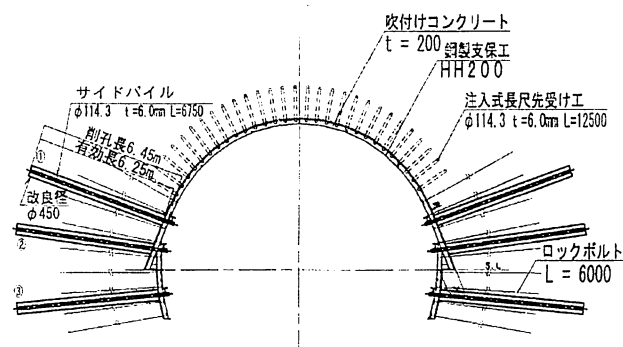


図-9 サイドパイル配置図

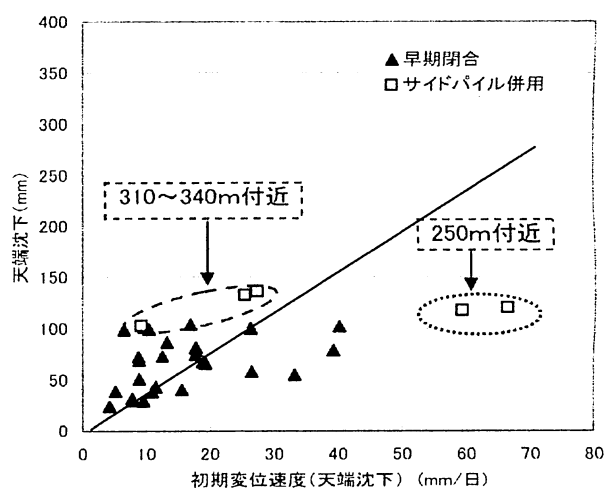


図-10 初期変位（天端沈下）と最終変位の関係

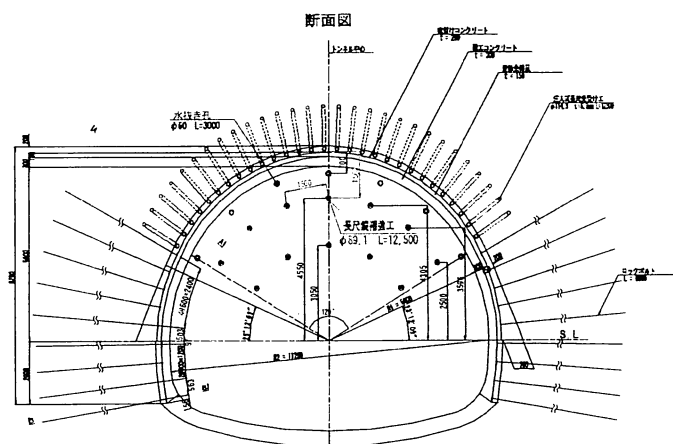


図-11 鏡対策配置図

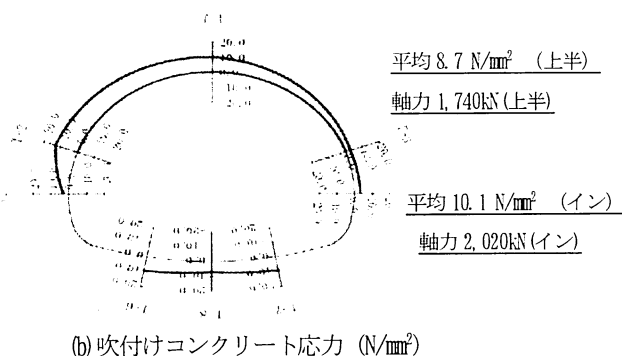
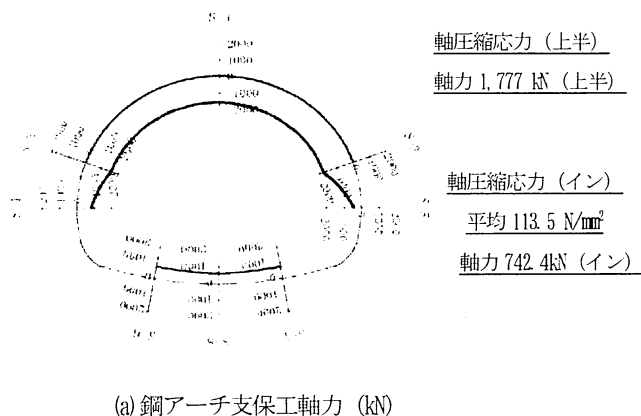


図-12 蛇紋岩粘性土区間 (STA 741+72)

大きな圧縮力が作用し、吹付けコンクリートの分担率が 75%程度で耐力に対する余裕も少ない。軸力モデルとして計算すると全土被り 36.5m のうち 70%が支保に荷重として掛かっていることになる。

(4) インバートの損傷

図-10 に示すサイドパイルで対策した大変位区間で早期閉合インバートに盤膨れが発生し、写真-3 のように吹付けコンクリートにも大きなひび割れが確認された。ストラット中央付近で最大 10cm 程度持ち上げられ内空が侵されていた。変位計測では収束の確認はとれていたにも関わらず、インバートのみが変形し変状を受けていた。このような地山の一般的な変状については次章 5 で述べることとする。

原位置試料を試験した結果、一部に膨張性鉱物を含んでおり、強度劣化による塑性地圧に加え膨張圧が作用したと思われる。もう一つの理由として、早期閉合は早く構築されるリングによって変形を収めることが最大の特徴である反面、通常より支保部材に大きな荷重が作用することが一般に言われている。本区間においても大きな沈下量が生じ、大きな断面力が作用していたことからこのような現象が生じたと思われる。

過去の事例から復旧するインバートの半径を検討し、



写真-3 インバートの変状

最も実績の多い上半半径の 2 倍とした。これは D II 地山を想定し、ゆるみ範囲や側方土圧係数など条件設定した解析でアーチ部とインバート部の引張応力度が同等となる半径である²⁾。従って断面の構造変更を行い、試行区間で変位がないことを十分に確認し、変状区間全体を縫い返した。このようなことから、早期閉合で大きな変位や応力が作用したと判断される際は、変位計測で変位の収束を確認した場合であっても、早期閉合したインバートの健全性については定期的に確認する必要があると思われる。

(5) まとめ

上記 (1) ～ (4) から、蛇紋岩粘性土 (地すべり) 区間の考察をまとめると以下のとおりである。

- 早期閉合で対応した区間の天端沈下はほぼ 100mm 以内となった。サイドパイルの施工により、主に初期変位速度 50mm/日以上以上の区間においても最終沈下量 140mm 程度で変形余裕量内に収めることができた。
- 切羽評価と天端沈下など変位量との間には明確な関係は見られなかった。
- 切羽評価とフェイスボルト本数との間には明確な関係は見られなかった。滴水によって切羽崩壊が生じたため、その状況に応じて 7, 15 本とした。
- 坑口部と比べて鋼アーチ支保工と吹付けコンクリートに大きな応力が作用した。両部材の軸力の和は上半、インバート部ともに 3,000kN を越えている。
- 荷重分担率は上半部で 50:50、インバート部で 75:25 であり、吹付けコンクリートが大きく分担している。
- 沈下量が大きかったサイドパイル区間はインバート部が全体的に押し上げられ中央部で 10cm 以上の盤膨れ現象が生じた。また、大きな荷重を受けていたことも確認された。

5. 施工実績データとの比較

施工実績データとは、平成2年から山岳トンネル工法のトンネルについて切羽観察や変位・応力計測の結果など試験所の時代より収集し、データベースとして蓄積してきたものである。このデータベースは現在、NEXCO 東日本・中日本・西日本の共有システムとして新・NATM データベースとしてNEXCO 総研で継続してデータ蓄積し、かつ研究などで活用している。

今回の結果をこのシステムに登録されているデータと比較することにより、早期閉合の効果を定性的に考察する。図-13にDIIと特殊なEパターンのみ抽出し、天端沈下の初期変位速度と最終沈下で整理した。これらは二車線トンネのデータであり、ほぼ全てが上半工法で施工されている。バラツキが大きいですが、天端沈下100mmを越える、もしくは初期変位速度25mm/日を越えると変状の比率が高くなることがわかる。変状はロックボルト、鋼アーチ支保工および吹付けコンクリートの変状の3種類で、全体の22%は変状が発生している。変状の原因としてDII以下の脆弱な地山を上半工法で変形を許してしまう施工法そのものが一つの主な原因として考えられる。図-10の早期閉合の結果と比較すると、早期閉合は最終の天端沈下を小さい変位に収めている。今回、インバートの変状であったが、これは図-13に示す変状とは形態が異なる。このような形態の場合は、インバートRの形状変更も含めた対応を考慮する必要がある。

6. おわりに

今回の蛇紋岩粘性土のような地山強度比が1.0以下でのクリープ変形が卓越するような地山においては、以下のような理由で早期閉合が有効であることが考えられる。

- ・天端沈下など変形量を上半工法より小さい範囲に収め、

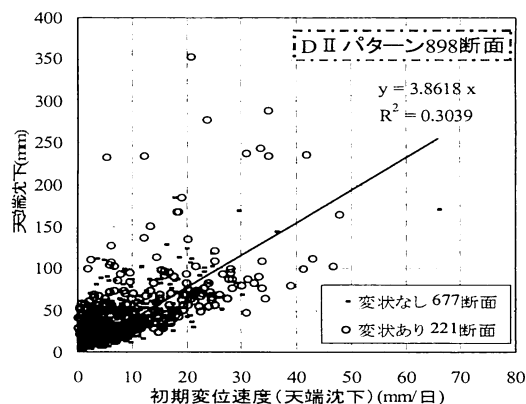


図-13 初期変位（天端沈下）と最終沈下の関係
(NEXCO 総研データベース)

地山のゆるみの進行を早く抑えることができる。

- ・初期変位速度が特に速い地山でも、早い段階で補助的な対策の判断を行うことができる。
- ・早期閉合で変形量大きい場合は、大きな断面力が生じる場合もあり、変位の収束だけでなく閉合インバートの健全性には注意を要する。状況によりインバート半径の構造変更を含めた検討が必要である。
- ・過去のNEXCOのDII以下データ（上半工法）と比べても早期閉合は変形を抑制できる可能性が高い。

謝辞：検討委員会でご指導頂いた三上委員長（北海道大学教授）並びに関係委員、また（社）日本トンネル技術協会特別小委員会でご意見を頂いた西村委員長（首都大学東京教授）並びに関係委員に感謝を表します。

参考文献

- 1) 中野清人, 佐藤諭一, 本藤敦 蛇紋岩地すべり脆弱部を早期閉合で掘削～北海道横断自動車道 タンネナイトンネルへ、トンネルと地下, Vol. 41 No. 3 2010年3月
- 2) 中田正夫, 伊藤洋, 供用トンネルにおける変状と対策～上信越自動車道 浅間山トンネルへトンネルと地下, Vol. 31 No. 4 2000年4月

STUDY ON IMMEDIATE RING CLOSURE EFFECT IN SERPENTINE CLAY TUNNEL THROUGH CURRENT PRACTICE

Kiyoto NAKANO, Yuuichi SATO, Atsushi HONDO

The settlement of the tunnel, however, did not cease while the top heading and bench method was used. Then, the immediate ring closure method was implemented on a trial basis. As a result, the method proved effective as the settlement was held to one-third of that during the excavation by the top heading and bench method. The early ring closure method was subsequently applied on a full scale.