

計測データに基づく全断面早期閉合の 効果に関する一考察

鬼頭 夏樹¹・角湯 克典²・柳川 磨彦³・明石 健⁴・大谷 達彦⁴

¹正会員 西松建設株式会社 七尾トンネル出張所 (〒926-0014 石川県七尾市矢田町 25 雉子曾)

E-mail:natsuki_kitou@nishimatsu.co.jp

²独立行政法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

³国土交通省 金沢河川国道事務所 (〒920-8648 石川県金沢市西念 4-23-5)

⁴正会員 西松建設株式会社 土木技術部設計課 (〒105-8401 東京都港区虎ノ門 1-20-10)

近年、山岳トンネルの変形を抑制するために、全断面早期閉合を適用する施工事例が多くなってきている。この掘削工法は、切羽から近い位置で一次インバートを施工して早期にトンネルを閉合するものであり、地山不良部でのトンネルの変形を抑制することができる。また、一次インバートによって、トンネルの支持面積が拡大するため、トンネルの沈下を抑制する効果もある。

本稿では、この適用事例の一つとして、七尾トンネルにおける実施例と得られたデータの分析結果を紹介する。七尾トンネル工事では、山塊の中央部で当初調査で想定されていなかった膨張性地山が出現して大きな変位が生じた。そこで、トンネルの変形および沈下を抑制するために、全断面早期閉合を採用した。

Key Words : early crosssection closer, the effects of restraining deformation ,squeezing

1. はじめに

近年、トンネルの変形を抑制するために、地山不良部や小土被り部で全断面早期閉合が適用される事例が多くなってきている^{1)~5)}。この掘削工法は、切羽から近い位置で一次インバートを施工して、早期にトンネル断面を閉合するものである。掘削直後、安定性の高いトンネル形状を形成することによって、トンネルの変形を抑制することができる。また、一次インバートの施工によりトンネル全体の支持面積が拡大するため、沈下を抑制する効果もある。

山岳トンネルにおいては、施工中に当初想定していなかった望ましくない地質現象に遭遇することがしばしばある。この場合においては、顕在化したリスクを如何にマネジメントするかが重要になる⁶⁾。このような課題を解決するに際して、全断面早期閉合は、有用かつ現実的な対処法となり得る掘削工法であるといえる。

本稿で報告する七尾トンネル工事は、まさにその典型的な事例である。七尾トンネルでは、掘削当初より上半先進ベンチカット工法でトンネル掘削を進めていた。しかし、坑口より 550m 付近より、当初設計で想定されていなかった膨張性地山が出現し、それとともに坑内変位

が増大した。そこで、増しボルト、ウィングリブ付き鋼製支保工等の対策工を実施したが、坑内変位は収束せず、変形余裕量を超過する変形が生じる状況となった。このような状況に対して、上半先進ベンチカット工法から全断面早期閉合に変更した。

全断面早期閉合の適用後、坑内変位は抑制されたが、トンネル掘削を進めるに従って地山状況が悪化し、再度、坑内変位が増加する傾向を示した。そこで、変形を抑制するために、全断面早期閉合の仕様をランクアップすることが必要となった。

本稿では、このような地山条件の変化に応じた全断面早期閉合の施工実績を示す。そして、今回の計測データに基づく全断面早期閉合の効果検証結果について述べる。

2. トンネル概要

(1) 工事概要

能越自動車道は、石川県輪島市と富山県砺波市を結ぶ延長約 100km の高規格幹線道路である。能越自動車道が完成し、北陸自動車道や東海北陸自動車道と接続することによって、能登地域の産業、経済、文化の発展を促

進することが期待されている。

七尾トンネルは、この能越自動車道に含まれる全長1760m、掘削断面積73.7m²～118.3 m²の二車線道路トンネルである。七尾トンネルの位置図を図-1に示す。

(2) 地質概要

トンネル周辺の地質は、新第三紀中新世前期に形成された穴水累層の上位に、新第三紀中新世中期の八尾累層が広く分布している。当初、八尾累層がトンネル全線にわたって出現し、八尾累層より下位の穴水累層は出現しないと想定されていた(図-2 (a)参照)。

しかし、実際は、当初設計時の想定と異なりトンネル位置に穴水累層が出現した(図-2 (b)参照)。また、八尾累層と穴水累層との地層境界部は、変質による粘土化が進行し、CEC 試験および X 線回折の結果から、著しい膨張性を示す値を示した(陽イオン交換容量：81meq/100g、スメクタイト含有量：48wt%)。本稿で述べる全断面早期閉合区間は、この地層境界部に対応する。

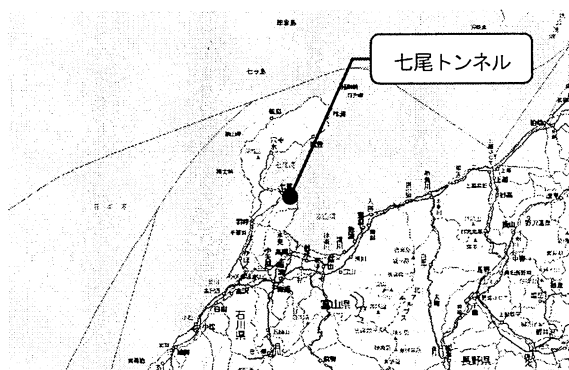
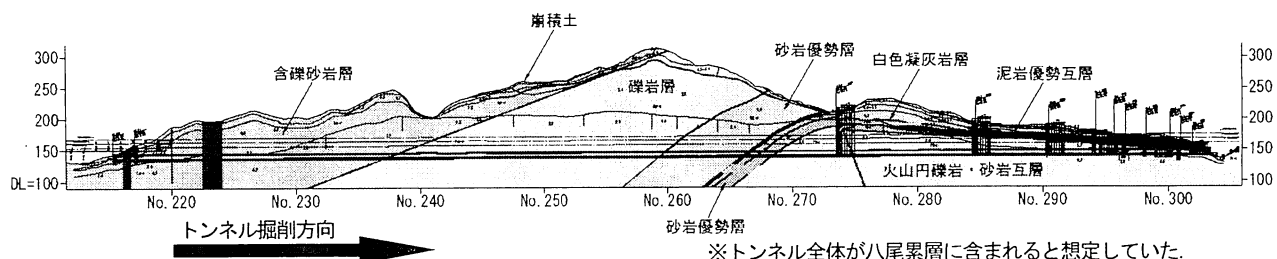
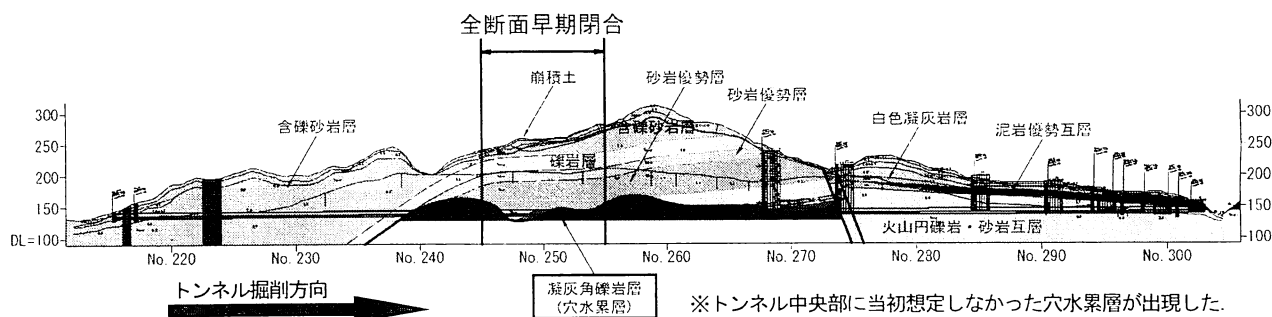


図-1 七尾トンネル位置図



(a)当初設計



(b)施工実績に基づく見直し後

図-2 七尾トンネル地質縦断面図

3. 七尾トンネルにおける全断面早期閉合の適用

(1) 適用経緯

坑口より 200m 地点から、八尾累層の硬質の礫を含む締まりの良い砂質岩(砂岩優勢層、礫岩層、含礫砂岩等)が切羽を占めていた。しかし、坑口より 550m (No.242+19.8)付近より、硬質粘土が出現し、天端沈下、内空変位が増加した。そこで、増しボルト、ウィングリブ付き鋼製支保工等の対策工を実施したが、坑内変位は収束せず、変形余裕量(100mm)を超過したため、再掘削(縫い返し掘削)が必要となった。

当該変状部で大きな変位が生じた原因は、ゆるみの拡大によって鉛直荷重が増大するとともに、膨張圧も作用したためであると考え(図-3 参照)。これらの荷重が相乗的に作用することによって、トンネルが内空側に変形するとともに、応力集中により強度が低下したトンネル脚部の支持力が不足して、トンネル全体が沈下したと推測された。

そこで、坑口より 620m (No.246+2.7) 付近より、上半先進ベンチカット工法から全断面早期閉合に変更した。全断面早期閉合により、早期に安定性の高いトンネルを形成することによって、トンネルの変形が抑制できることを期待した。また、一次インバートにより、トンネルの支持面積を拡大することによって、トンネルの沈下が抑制できることを期待した(図-4 参照)。

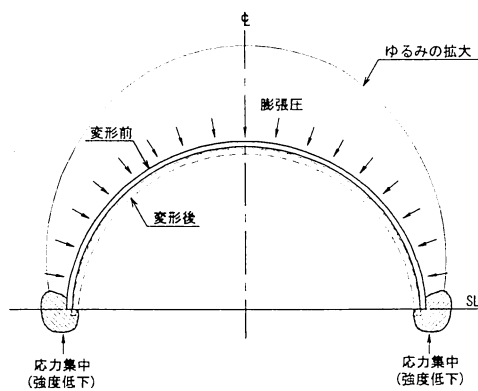


図 - 3 変状発生メカニズムの推定

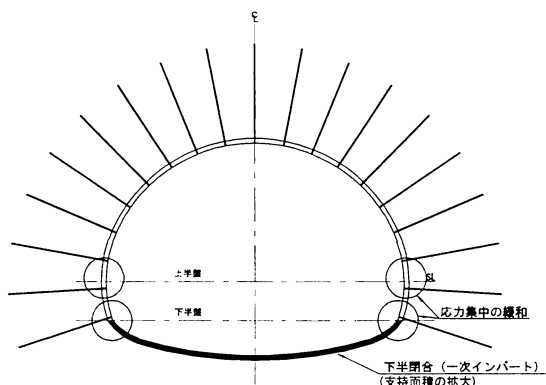


図 - 4 全断面早期閉合の効果

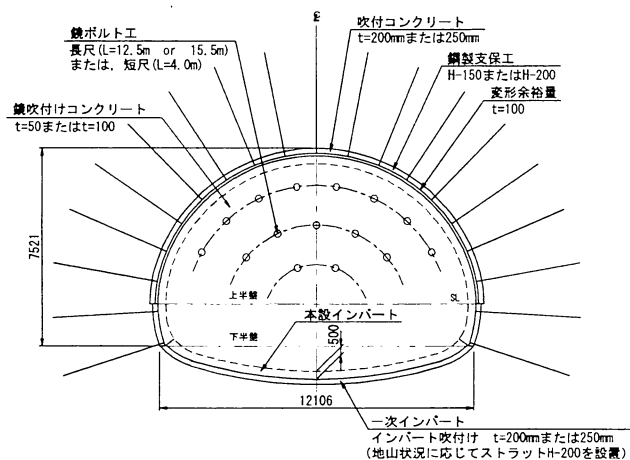


図 - 5 七尾トンネル横断面図(全断面早期閉合区間)

(2) 七尾トンネルにおける全断面早期閉合

七尾トンネルにおける全断面早期閉合区間の代表横断面図および縦断面図を、図 - 5 および図 - 6 に示す。当初は、DIIパターンにおいて閉合距離 8m(表 - 1 のランク 1)を採用した。

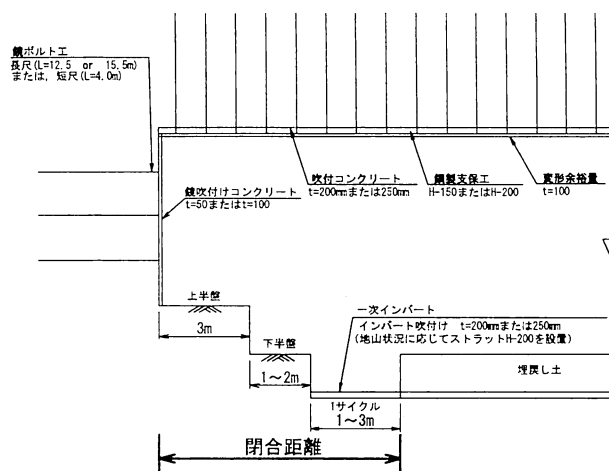


図 - 6 七尾トンネル縦断面図(全断面早期閉合区間)

表 - 1 全断面早期閉合の仕様一覧表

	閉合仕様 ランク	支保工		一次インバート		閉合 距離
		吹付け	鋼材 支保工	吹付け	鋼製 スラット	
地山良化 (シグダウ)	ランク 1	t=200mm $\sigma_{sk}=18\text{N/mm}^2$	H-150	t=200mm $\sigma_{sk}=18\text{N/mm}^2$	—	8m
	ランク 2	t=250mm $\sigma_{sk}=18\text{N/mm}^2$	H-200	t=250mm $\sigma_{sk}=18\text{N/mm}^2$	—	8m
	ランク 3	t=250mm $\sigma_{sk}=18\text{N/mm}^2$	H-200	t=250mm $\sigma_{sk}=18\text{N/mm}^2$	H-200	6m
地山悪化 (シグアップ)	ランク 4	t=250mm $\sigma_{sk}=36\text{N/mm}^2$	H-200	t=250mm $\sigma_{sk}=36\text{N/mm}^2$	H-200	5m
仕様 変更 の条件	[ランクアップの条件]			[ランクダウンの条件]		
	1) 全変位量 天端沈下: 40mm 以上 内空変位: 80mm 以上 2) 初期変位量 天端沈下: 10mm/日以上 内空変位: 20mm/日以上 3) 切羽評価点下降			1) 全変位量 天端沈下: 25mm 以下 内空変位: 50mm 以下 2) 初期変位量 天端沈下: 10mm/日以下 内空変位: 20mm/日以下 3) 切羽評価点上昇		

(3) 地山状況に応じた仕様選定

全断面早期閉合の適用後、地山条件の悪化に伴い、再び坑内変位が増加する傾向を示した。これは、地山の悪化を招く八尾累層と穴水累層との地層境界部がトンネル近傍にあり、かつ亀裂が増加したことによる(図 - 7 参照)。

このような状況の中、変形を抑制するために、全断面早期閉合の仕様をランクアップすることが必要となった。そこで、七尾トンネルでは、支保工および一次インバートの構造のランクアップと閉合距離の短縮を組み合わせで対応することとした(表 - 1 参照)。この表を作成するにあたっては、既往の研究成果⁷⁸⁾を参考にするとともに、後述する考え方に従った。まず、ランク 2 においてより大きな耐力を有する支保工を採用し、次にランク 3 においてより早期に安定性・剛性の高いトンネルを形成するという観点から閉合距離を短縮するとともにインバ

ートストラットを採用した。さらに、ランク 4 では早期安定性の確保に重点をおいて高強度吹付けと閉合距離の短縮を採用した。なお、仕様を変更するか否かは、A 計測データの結果と切羽評価点のトレンドにより判断した。

また、鏡補強工については、切羽の自立性を考慮して、ボルト長、注入材を選定した。当初、短尺の鏡ボルト(L=4m)を用いたが、切羽の自立性の悪化に伴い、長尺鏡ボルト(L=12.5m, 15.5m)に変更した。また、注入材については、主にセメント系注入材を用いたが、切羽に油目亀裂が発達し肌落ちが発生した箇所については、亀裂を接着するためにウレタン系注入材を用いた。

なお、施工時には、切羽前方探査(DRISS)を実施して、切羽前方地山の良否を判断するための目安とした。

(4) 施工実績

a) 地山悪化時のランクアップ

図 - 8 に、全断面早期閉合適用区間のトンネル坑内変位データ(最終変位量)を示す。この図には、全断面早期閉合のランクアップの基準(天端沈下: 40mm, 内空変位

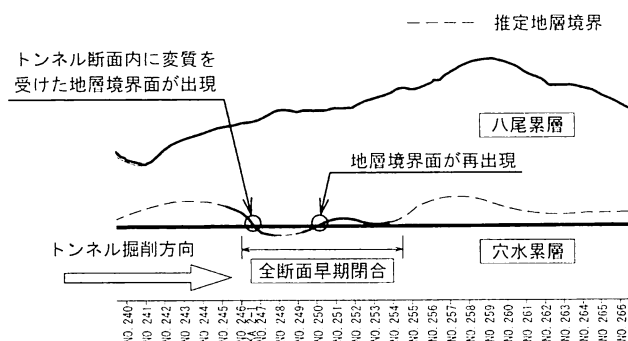


図 - 7 変状区間の地層境界推定図

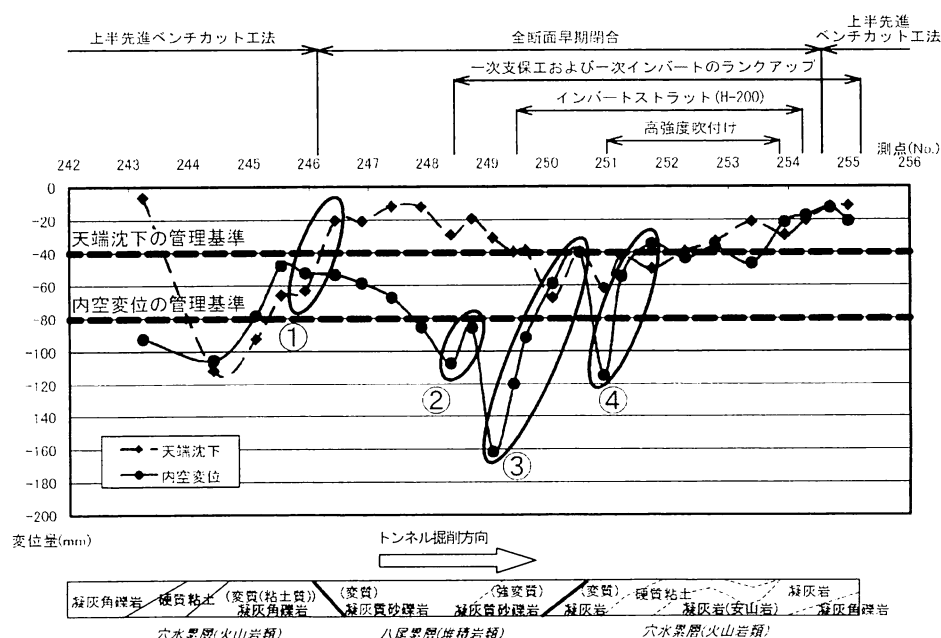


図 - 8 全断面早期閉合区間の坑内変位データ(最終変位量)

: 80mm)をあわせて示した。以下に、ランクアップ箇所(図 - 8 中の①~④)について説明を加える。文中のランク 1~4 については、表 - 1 を参照されたい。

①全断面早期閉合の適用(「ランク 1」の適用)

上半先進ベンチカット工法から全断面早期閉合に変更することにより、天端沈下が減少し、管理基準値以下に抑制することができた。

②「ランク 2」へのランクアップ

全断面早期閉合後、地山状況の悪化に伴い内空変位が増大し管理基準値を超過した。また、B 計測結果より、鋼アーチ支保工は圧縮強度(400N/mm²)程度、吹付けコンクリートは設計基準強度(18N/mm²)程度の大きな圧縮応力状態であることが確認された。これは、変形を抑制するために、支保工が大きな荷重を負担したためであると考え。そこで、変形を抑制するためには、より大きな耐力を有する支保工を採用することが必要であると考え、支保部材をランクアップした。

③「ランク 3」へのランクアップ

強変質部の出現に伴い、地山状況がさらに悪化し、内空変位が管理基準値を大きく超過した。そこで、インバートストラット(H-200)を適用するとともに、一次インバートの閉合距離を短縮(8m→6m)して、内空変位を管理基準値以下に抑制した。

④「ランク 4」へのランクアップ

八尾累層と穴水累層の境界部で、再度、内空変位が増加し管理基準値を超過した。そこで、トンネル全周に高強度吹付け($\sigma_k=36\text{N/mm}^2$)を採用することによって、内空変位を管理基準値以下に抑制した。

b) 地山良化時のランクダウン

坑口より 770m(No.253+16)付近において、切羽より多量の湧水(200ℓ/min)が生じるとともに、切羽から粘土分が減少する傾向を見せた。地山状況が良化したため、表 - 1 に従って、ランク 2 までランクダウンした。

ところが、その後、インバート部の地山のみが急激に硬化し、かつ湧水もあることから、一次インバートの施工に多大な時間を要するようになった。そこで、ランク 1 を省略して、坑口から 785m(No.254+11)付近で、全断面早期閉合から上半先進ベンチカット工法へ変更した。

結果的に、当該変状区間での全断面早期閉合区間は、約 170m (No.246+2.7～No.254+11) となった。

4. 全断面早期閉合の効果検証

(1) 七尾トンネルにおける A 計測データ

全断面早期閉合区間の計測データを表 - 2 に示す。この計測データを用いて、全断面早期閉合の効果について考察を行う。このとき使用したデータは、ランクアップ時の内空変位データである。これは、図 - 8 の坑内変位データに示したとおり、内空変位の方が天端沈下に比べて地山状況の影響を大きく受け、全断面早期閉合の効果进行分析の上で、有効なデータであると考えたためである。

表 - 2 A 計測データ

測点 No.	天端沈下				上半内空変位				閉合仕様ランク
	初期変位速度 (mm/日)	閉合前 (mm)	最終変位 (mm)	閉合後増加率 (%)	初期変位速度 (mm/日)	閉合前 (mm)	最終変位 (mm)	閉合後増加率 (%)	
246+ 8.7	9.9	11.1	20.1	1.8	18.2	28.0	53.3	1.9	1
246+17.7	9.0	12.0	20.4	1.7	20.1	26.5	58.6	2.2	
247+ 7.7	1.5	1.1	11.8	10.7	15.9	18.7	67.2	3.6	
247+17.7	2.0	4.5	12.3	2.7	12.9	26.8	65.5	3.2	
248+ 7.7	11.4	12.4	29.4	2.4	28.8	55.5	107.3	1.9	
248+13.7	8.2	10.1	19.5	1.9	32.4	42.0	85.8	2.0	2
249+ 1.7	6.1	14.9	31.1	2.1	28.0	103.1	161.6	1.6	
249+ 8.7	11.1	18.2	39.5	2.2	33.6	61.1	119.9	2.0	
249+12.7	7.3	16.2	38.5	2.4	36.5	63.8	91.8	1.4	3
250+ 1.7	38.6	49.8	67.4	1.4	41.0	51.6	58.7	1.1	
250+10.7	10.9	18.7	39.6	2.1	20.2	23.8	39.8	1.7	
250+18.7	22.0	36.3	61.4	1.7	70.3	96.1	114.7	1.2	
251+ 4.7	8.3	28.0	42.4	1.5	21.7	39.9	54.4	1.4	4
251+14.7	9.5	28.2	49.9	1.8	10.1	21.9	34.9	1.6	
252+ 5.7	12.2	22.5	39.1	1.7	20.0	33.8	43.4	1.3	
252+15.7	10.6	24.8	33.2	1.3	17.4	30.2	36.9	1.2	
253+ 7.7	8.7	12.8	21.4	1.7	23.7	37.7	46.6	1.2	3
253+18.7	8.0	20.7	29.5	1.4	10.9	18.6	21.6	1.2	
254+ 5.7	12.7	16.1	20.4	1.3	12.0	12.8	17.5	1.4	2

※ハッチング部は、図 - 9、図 - 10 に値を示したデータである。

(2) 一次インバート閉合後の上半内空変位の増加率

閉合後の内空変位の増加率(最終変位量／閉合前の変位量)を図 - 9 に示す。この図から、ランク 3 にランクアップした後、一次インバートによる閉合後の内空変位の増加率が減少したことがわかる。ランク 3 では、インバートストラットを採用するとともに、一次インバートの閉合距離を 8m から 6m に短縮した。

ここで、ランクアップ前後の内空変位の増加率(それぞれ 3 計測断面の平均値)を比較する。その結果、ランクアップ前は、閉合後の内空変位の増加率が 1.9 倍であるのに対し、ランクアップ後は 1.4 倍に抑制できたことがわかる。このデータから、インバートストラットの採用および閉合距離の短縮によって、トンネル閉合後の変位増加が抑制されたことがわかる。閉合後の変位増加を抑制することによって、全変位量も抑制され、インバートストラット、閉合距離の短縮が大きな変形抑制効果を有することが確認できた。

(3) 初期変位速度

次に、内空変位の初期変位速度を図 - 10 に示す。初期変位速度は、計測を開始してから 1 日(24 時間)後の計測値とした。この図から、吹付けコンクリートの強度を 36N/mm² に向上した後(ランク 4 にランクアップした後)、内空変位の初期変位速度が減少したことがわかる。

ここで、吹付けコンクリートの強度増加前後の初期変位速度(それぞれ 3 計測断面の平均値)を比較する。その結果、強度増加前は、初期変位速度が 43.8mm/日であったのに対し、強度増加後は 17.3mm/日に抑制できたことがわかる。このデータから、高強度吹付けコンクリートを適用することによって、トンネル支保の初期段階の剛性が向上し、掘削直後の初期変位が抑制できたものと考ええる。初期変位速度を抑制することによって、全変位量も抑制され、高強度吹付けコンクリートが大きな変形抑制効果を有することが確認できた。

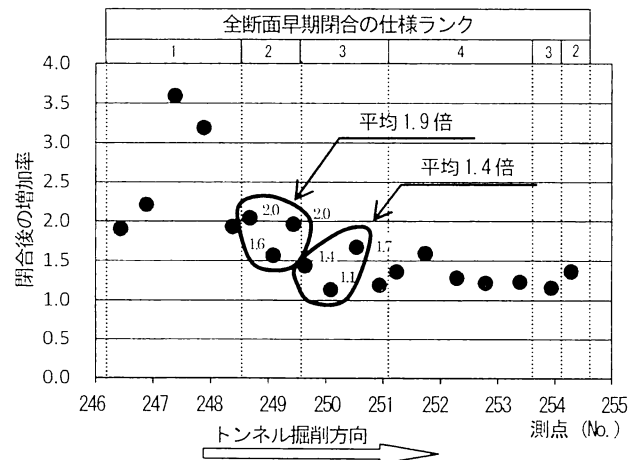


図 - 9 一次インバート閉合後の内空変位の増加率

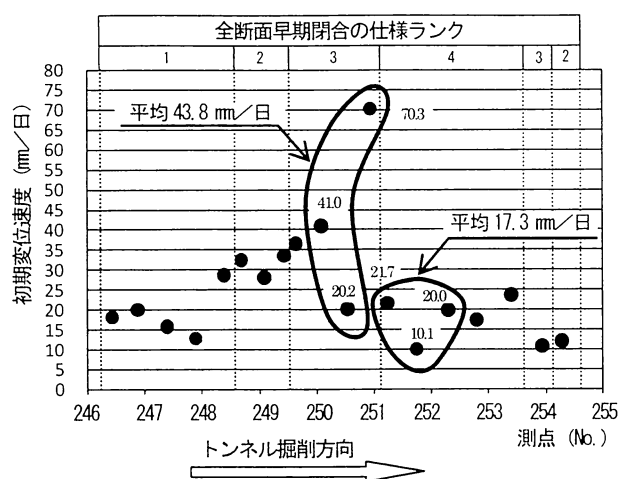


図 - 10 初期変位速度

5. まとめ

七尾トンネルでは、全断面早期閉合の適用を開始した後、トンネルの変形が抑制され、縫い返し掘削が必要となる状況は生じていない。このことから、全断面早期閉合による変形抑制効果、および沈下抑制効果を確認することができたと考える。今回の施工実績から、①支保構造のランクアップと閉合距離の短縮により変形抑制効果が向上する、②インバートストラットの採用や閉合距離の短縮はトンネル閉合後の変位増加を抑制し全変位量抑制に寄与する、③高強度吹付けは初期変位速度を抑制し全変位量抑制に寄与する、というメカニズムを確認することができた。

なお、全断面早期閉合完了地点より 260m 前方 (No.267+13.0) で実施した追加ボーリング結果から、再度、地山状況が悪化することが予測されている。本報告の全断面早期閉合区間においては、早期に安定性・剛性の高いトンネルを形成する観点から「閉合距離の短縮」と「インバートストラット」をまず採用したが、これらに

比べて施工性に勝り、初期変位速度抑制により全変位量が抑制できる「高強度吹付け」を優先して採用することを考えている。また、全断面早期閉合では、支保工が大きな荷重を負担することと、今回の施工実績においてランク 1 の仕様では閉合後の内空変位の増加率が大きい値を示したことを考慮して、全断面早期閉合を再び実施する際には、鋼アーチ支保工 H-200、吹付けコンクリート $t=250\text{mm}$ を標準とする計画である。

既往の文献では、計測データ等の施工データをフィードバックして全断面早期閉合の仕様を選定している施工事例の報告は少ない。今回の施工報告が、類似の施工の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 御手洗良夫, 森崎泰隆, 今田徹: 全断面早期閉合による施工法の考え方とその実例, トンネルと地下 第 38 巻 9 号, pp.51-61, 2007.9.
- 2) 徳留修, 大津敏郎, 広瀬雅明, 澤田一也: 断層・褶曲作用を受けた脆弱泥岩地山における変位抑制対策, トンネル工学報告集 第 17 巻, pp.29-34, 2007.11.
- 3) 浜野善治, 宮崎俊英, 熊谷幸博: 膨張性地山での坑口部の対策工法 ―ふるさと農道整備工事 七海トンネル工事―, 土木技術 60 巻 10 号, pp.28-34, 2005.10.
- 4) 河邊信之, 久保田良司, 海老子川啓, 日野道雄: 未固結な土石流堆積物におけるトンネル断面早期閉合の効果について, 土木学会第 62 回年次学術講演会, pp.279-280, 2007.9.
- 5) 秋田修, 真弓英大, 玉井昭雄, 岡山徹: 中央構造線擾乱帯を貫く―三遠南信自動車道 三遠トンネル―, トンネルと地下 第 39 巻 10 号, pp.17-27, 2008.10.
- 6) 角湯克典: 道路事業において地質リスク低減のために求められる方策, 地質と調査, pp.9-12, 2008.6.
- 7) 真下英人, 水川雅之, 日下敦: トンネル早期閉合効果に関する解析的検討, トンネル工学報告集 第 17 巻, pp.35-41, 2007.11.
- 8) 森崎泰隆, 御手洗良夫, 蔣宇静: 一次インバートの閉合距離が地表面沈下に与える影響に関する解析的検討と適用事例, 土木学会論文集 F Vol.64 No.3, pp.227-236, 2008.7.

A STUDY ON THE EFFECTS OF EARLY CROSSSECTION CLOSER BASED ON FIELD MEASUREMENTS

Natsuki KITO, Katsunori KADOYU, Kiyohiko YANAGAWA,
Takeshi AKASHI and Tatsuhiko OTANI

Recently, the early crosssection closer is adopted for restraining deformation of tunnel. In this method the early invert closer in a short distance from tunnel face could restrain deformation and subsidence of tunnel.

In the construction of the NaNao Tunnel, the squeezing rocks appeared. And large displacement was observed during the excavation of tunnel. Therefore, the early crosssection closer is depoted for restraining deformation of tunnel. In this paper, construction results of the Nanao tunnel is described. And the results of study on the effects of early closssection closer based on field measurements is described.