

地山状況に応じた全断面早期閉合の仕様の選定

Selection of the Specification of Early Cross Section Closure Method based on Ground Conditions

鬼頭 夏樹*

Natsuki Kito

明石 健**

Takeshi Akashi

原島 大*

Masaru Harashima

大谷 達彦**

Tatsuhiko Ootani

要 約

近年、山岳トンネルにおいて、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、早期にトンネル断面を閉合するものであり、地山不良部でのトンネルの変形抑制に高い効果が期待できる。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、七尾トンネル工事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。本トンネル工事では、中央区間において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。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. トンネル概要
- § 3. 全断面早期閉合の適用
- § 4. 全断面早期閉合の効果検証
- § 5. まとめ

§ 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。掘削直後に、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。本トンネルでは、掘削当初より上半先進ベンチカット工法で掘削を進めていた。しかし、坑口より 550 m 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、掘削工法を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さらに悪化し、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

2-1 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 100 km の高規格幹線道路である。能越自動車道

* 関東土木（支）北陸支店七尾トンネル（出）

** 土木設計部設計課

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1760 m、掘削断面積 $73.7 \text{ m}^2 \sim 118.3 \text{ m}^2$ 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。

2-2 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が確認された（陽イオン交換容量：

81 meq/100 g、スメクタイト含有量：48 wt.%）。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。

§3. 全断面早期閉合の適用

3-1 適用経緯

坑口より約200 m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550 m (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（100 mm）を超過したため、再掘削（縫返し掘削）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620 m (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、トンネルの沈下を抑制することも期待した（図-4参照）。



図-1 七尾トンネル位置図

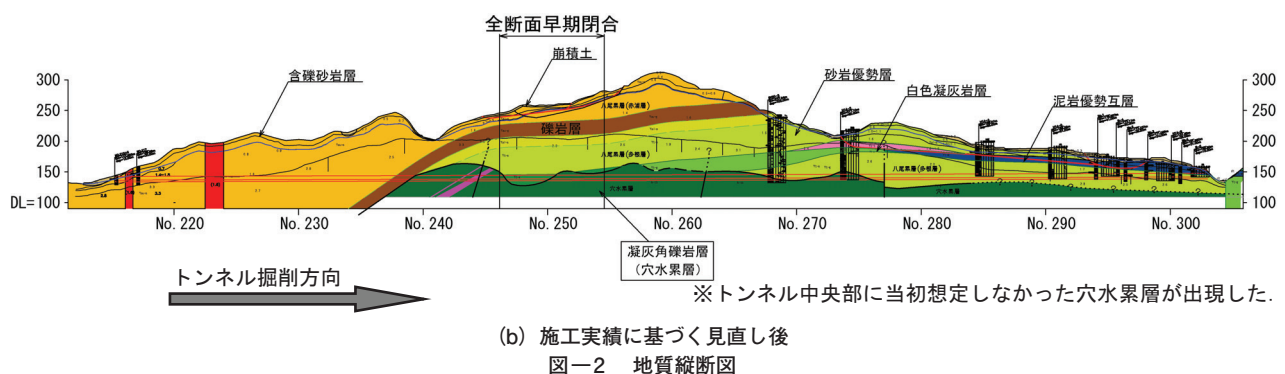
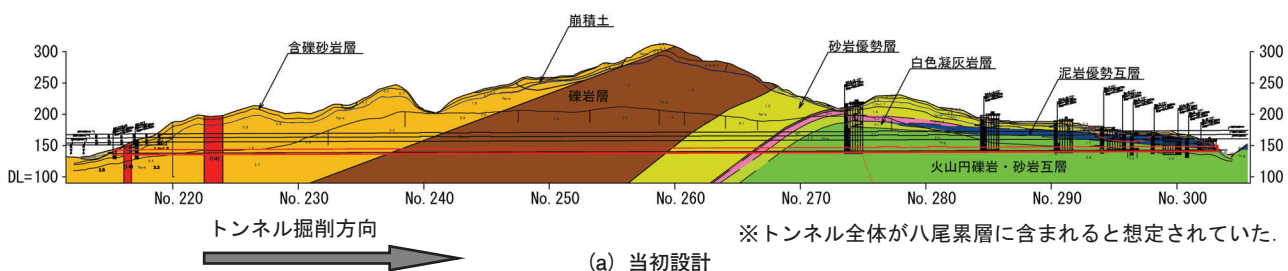


図-2 地質縦断面図

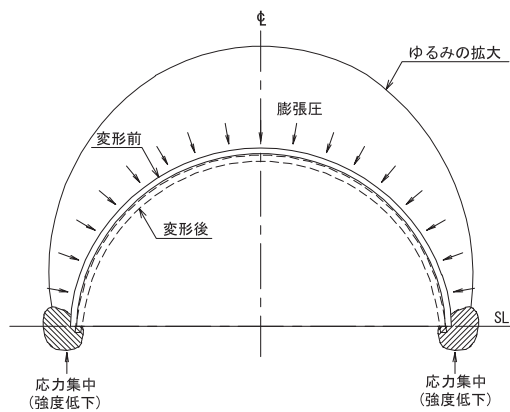


図-3 変状発生メカニズムの推定

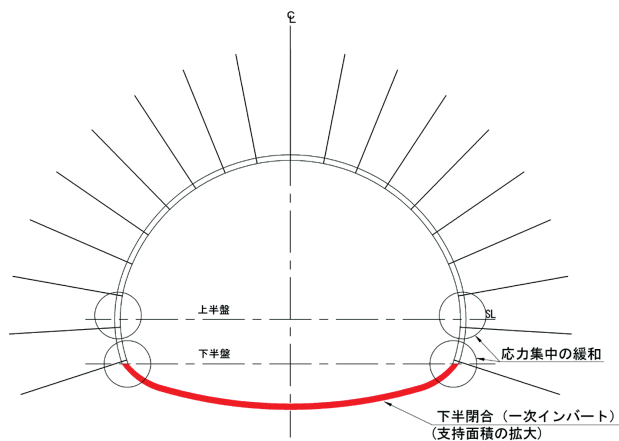


図-4 全断面早期閉合の効果

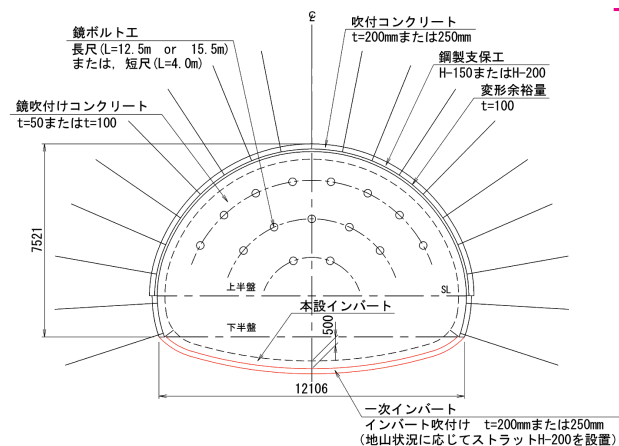


図-5 横断面図 (全断面早期閉合区間)

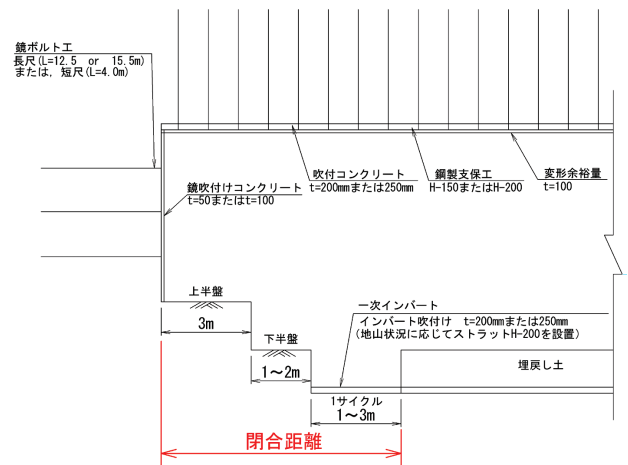


図-6 縦断面図 (全断面早期閉合区間)

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	鋼アチ 支保工	吹付け	鋼製 スラット	
地山良化 (ランクアップ)	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 (ランクアップ)	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			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/日以上 内空変位: 20mm/日以上			2) 初期変位量 天端沈下: 10mm/日以下 内空変位: 20mm/日以下		
	3) 切羽評価点下降			3) 切羽評価点上昇		

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、本トンネルでは、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^{7),8)}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においては、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、より早期に安定性および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。

3-2 七尾トンネルにおける全断面早期閉合

本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。

3-3 地山状況に応じた仕様の選定

全断面早期閉合の適用後、さらなる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

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（ $L=4\text{ m}$ ）を用いたが、切羽の自立性の悪化に伴い、長尺鏡ボルト（ $L=12.5\text{ m}$, 15.5 m ）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頻発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。

3-4 施工実績

(1) 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： 40 mm 、内空変位： 80 mm ）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

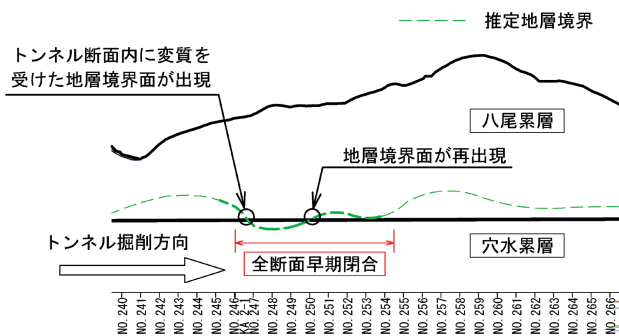


図-7 変状区間の地層境界推定図

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 400 N/mm^2 程度、吹付けコンクリートは、設計基準強度である 18 N/mm^2 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られる。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（ $8\text{ m} \rightarrow 6\text{ m}$ ）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（ $\sigma_{ck}=36\text{ N/mm}^2$ ）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。

(2) 地山良化時のランクダウン

坑口より 770 m （No.253+16）付近において、切羽より多量の湧水（約 200 l/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。これにより、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。

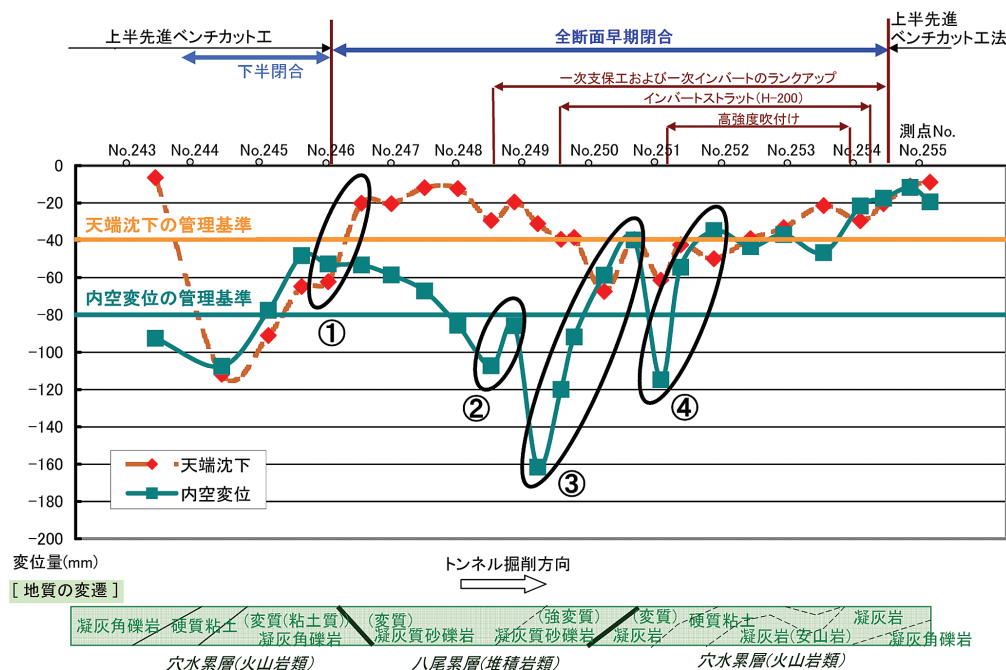


図-8 全断面早期閉合区間の坑内変位データ（最終変位量）

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、かつ湧水も存在したことから、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

4-1 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を分析する上で、有効なデータであると考えたためである。

4-2 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

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) (A)	最終変位 (mm) (b)	閉合後 増加率 (B/A)	初期変位 速度 (mm/日)	閉合前 (mm) (A)	最終変位 (mm) (b)	閉合後 増加率 (B/A)	
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	85.5	3.2	
248+7.7	11.4	12.4	29.4	2.4	28.8	55.5	107.3	1.9	2
248+13.7	8.2	10.1	19.5	1.9	32.4	42.0	85.8	2.0	
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。

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。

4-3 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

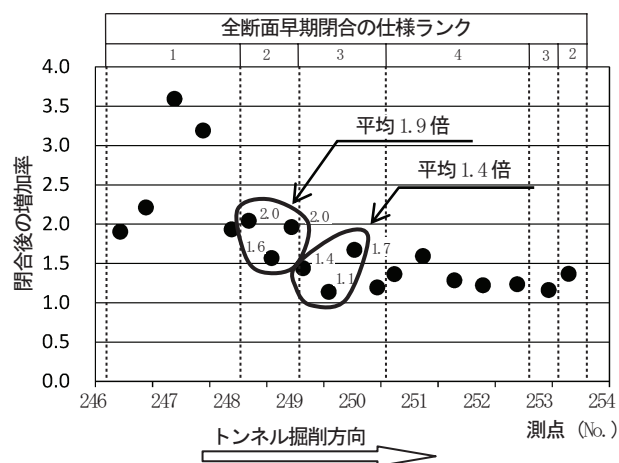


図-9 一次インバート閉合後の内空変位の増加率

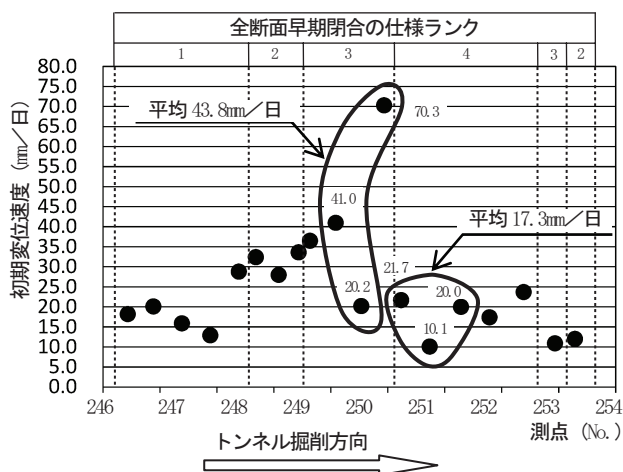


図-10 初期変位速度

ったのに対し、強度増加後は 17.3 mm/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する。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、高強度吹付けが大きな変形抑制効果を有することが確認できた。

§5. まとめ

本トンネルでは、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。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の抑制に寄与する、というメカニズムを確認することができた。

なお、本報告における第1回全断面早期閉合適用区間においては、早期に安定性および剛性の高いトンネルを形成する観点から、ランク2において「閉合距離の短縮」と「インバートストラット」を採用したが、第2回適用区間以降には、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」を優先して採用している。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、および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 $t=250\text{ mm}$ を標準としている。

この結果、高強度吹付けを優先して採用した区間において、下半支保工脚部と一次インバートとの接合部に、過大な応力が発生し、支保工としての連続性が損なわれたことにより、鋼製支保工が沈下し、さらには収束傾向を示していた内空変位が再び増大する現象が確認された。

当該区間における計測結果を精査した結果、一次インバート閉合直後の初期変位速度として、5 mm/日を超過する変位速度を有する断面において、上述した通り、変位が再発することが判明した。そこで、インバートストラットの採用を迅速に行えるように、高強度吹付けを採用したパターンにおいて、閉合直後の初期変位速度が 5 mm/日を超過した場合に、インバートストラットを採用する条件を追加した（表一3 参照）。

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。

表一3 全断面早期閉合の仕様一覧表（改訂）

	閉合仕様 ランク	支保工		一次インバート		閉合 距離
		吹付け	鋼アーチ 支保工	吹付け	鋼製 ストラット	
地山良化 (ランクアップ) ↑↓	ランク1	$t=250\text{mm}$ $\alpha_k=18\text{N/mm}^2$	H-200	$t=250\text{mm}$ $\alpha_k=18\text{N/mm}^2$	—	8m
	ランク2	$t=250\text{mm}$ $\alpha_k=36\text{N/mm}^2$	H-200	$t=250\text{mm}$ $\alpha_k=36\text{N/mm}^2$	—	6m
地山悪化 (ランクアップ)	ランク3	$t=250\text{mm}$ $\alpha_k=36\text{N/mm}^2$	H-200	$t=250\text{mm}$ $\alpha_k=36\text{N/mm}^2$	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 4) 閉合直後における 初期変位速度：5mm/日以上※ ※4)については、 ランク2⇒ランク3の際に適用			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		

謝辞. 最後に、工法および仕様の選定で多大なるご助力を頂きました（独）土木研究所角湯上席研究員をはじめ、社内外における関係各位に、心より御礼と感謝の意を表します。

参考文献

- 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事例，トンネルと地下 第38巻9号，pp.51-61，2007.9.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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一三遠南信自動車道 三遠トンネル—，トンネルと地下 第39巻10号，pp.17-27，2008.10.
- 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.
- 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.
- 森崎泰隆，御手洗良夫，蔭宇静：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.