

全断面早期閉合における情報化施工の適用実績

鬼頭 夏樹¹・角湯 克典²・柳川 磨彦³・原島 大⁴・大谷 達彦⁵

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)

⁵正会員 西松建設株式会社 土木設計部設計課 (〒105-8401 東京都港区虎ノ門 1-20-10)

近年、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増加している。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や沈下を抑制することができる。

七尾トンネルでは、地山状況が複雑に変化したため、その状況に応じて全断面早期閉合を適用することが必要であった。そこで、計測データ等の施工実績をフィードバックして、全断面早期閉合の要否や、仕様のランクアップを判断する情報化施工を実施した。

Key Words : early crosssection closer, observation construction procedure, the effects of restraining deformation

1. はじめに

七尾トンネルは、当初、トンネル全線にわたり固結度の高い砂質岩が出現すると予想されていた。しかし、坑口から約 550m 付近より脆弱な地山が出現し、トンネル天端沈下および内空変位が増大した(以降、天端沈下と内空変位をあわせて坑内変位と称す)。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縫い返し掘削が必要となる箇所もあった。このような状況の中、変形を抑制するために、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。

全断面早期閉合は、トンネルの変形を抑制するために、近年、適用事例が増加している掘削工法である^{1)~7)}。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ことによって、トンネルの変形や沈下を抑制することができる。

本トンネルでは、最終的に合計 4 区間(適用総延長 366.6m)に対して全断面早期閉合を適用した。そのうち、1 回目および 3 回目区間では、全断面早期閉合の適用開始後に地山状況がさらに悪化し、全断面早期閉合の仕様をランクアップすることとなった。

本稿では、七尾トンネルにおける全断面早期閉合の施工実績を整理し、全断面早期閉合の効果を検証すると

ともに、地山悪化時の仕様のランクアップについて考察を加えた。

2. 七尾トンネルの概要

(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。能越自動車道は、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。

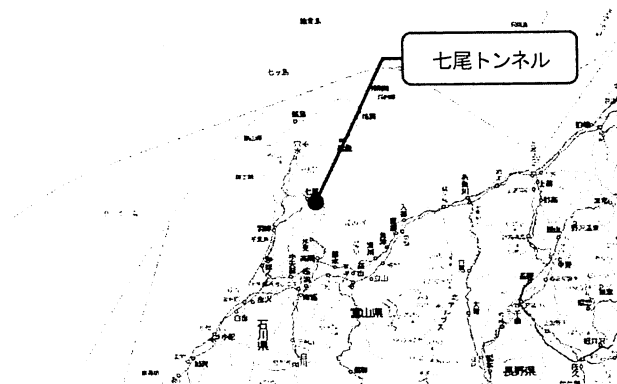
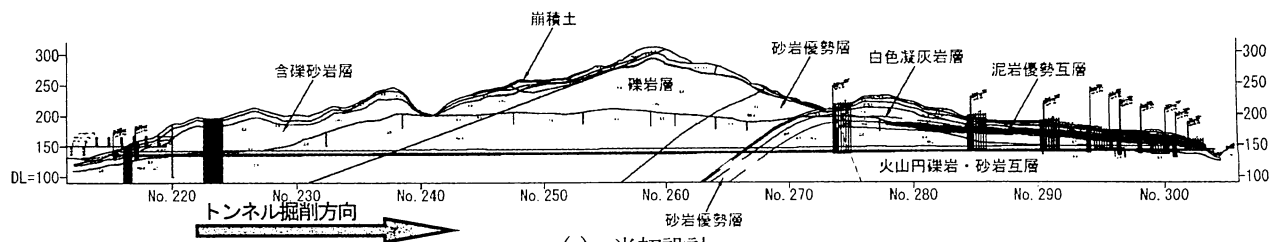
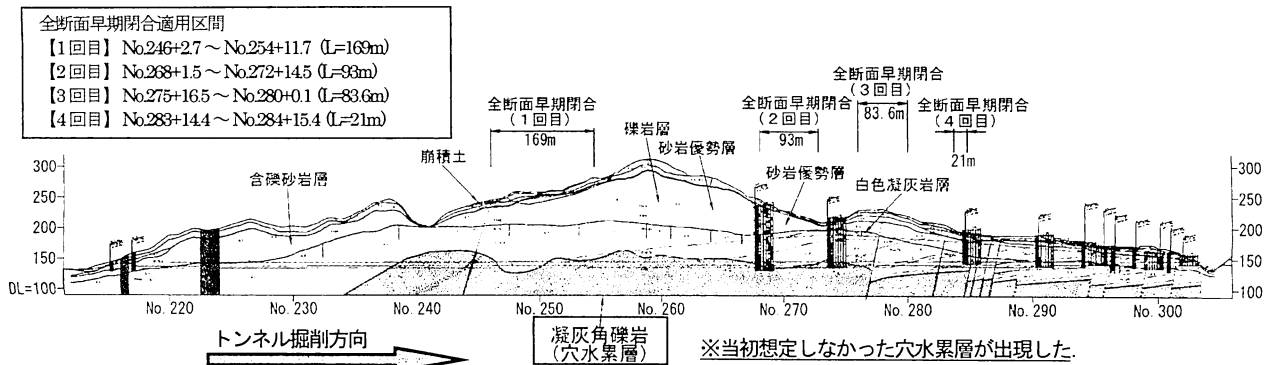


図-1 七尾トンネル位置図



(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

七尾トンネルは、この能越自動車道のうち、全長1760m、掘削断面積 73.7～118.3 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。当初設計時、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。

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断続的に出現した(図-2 参照)。この八尾累層と穴水累層の境界は、変質による粘土化が進行し、CEC 試験および X 線回折の結果より、膨張性を示すことがわかった(陽イオン交換容量：49.3-81meq/100g、スメクタイト含有量：16-48wt%)。また、変質区間中には断層破碎帯が頻繁に出現した。トンネル掘削中、これらの変質区間において坑内変位が増大したため、変形を抑制するために全断面早期閉合の適用が必要となった。

3. 全断面早期閉合区間への情報化施工の適用

(1) 七尾トンネルにおける全断面早期閉合

七尾トンネルでは、複雑な地山状況に対して、全断面早期閉合を適切に採用することが重要であった。そのためには、掘削実績をフィードバックしながら施工を行

表-1 全断面早期閉合の適用基準 (Ver. 1)

	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7チ 支保工	吹付け	鋼製 ストラット	
地山良化 (ランクアップ)	A-1	t=200mm $\sigma_{ck}=18\text{N/mm}^2$	H-150	t=200mm $\sigma_{ck}=18\text{N/mm}^2$	—	8m
	A-2	t=250mm $\sigma_{ck}=18\text{N/mm}^2$	H-200	t=250mm $\sigma_{ck}=18\text{N/mm}^2$	—	8m
	A-3	t=250mm $\sigma_{ck}=18\text{N/mm}^2$	H-200	t=250mm $\sigma_{ck}=18\text{N/mm}^2$	H-200	6m
地山悪化 (ランクダウン)	A-4	t=250mm $\sigma_{ck}=36\text{N/mm}^2$	H-200	t=250mm $\sigma_{ck}=36\text{N/mm}^2$	H-200	5m
仕様変更 基準	【ランクアップ基準】 1) 最終変位量 天端沈下：40mm 以上 内空変位：80mm 以上 2) 切羽通過後の初期変位速度 天端沈下：10mm/日 以上 内空変位：20mm/日 以上 3) 切羽評価点下降					
	【ランクダウン基準】 1) 最終変位量 天端沈下：25mm 未満 内空変位：50mm 未満 2) 切羽通過後の初期変位速度 天端沈下：10mm/日 未満 内空変位：20mm/日 未満 3) 切羽評価点上昇					

う情報化施工が有効である考えた。

ところが、情報化施工の実施にあたり、全断面早期閉合の適用基準や、仕様のランクアップおよびランクダウンの方法が確立されていないことが課題であった。そこで、七尾トンネルにおいては、坑内変位データと切羽観察結果を指標として用いる全断面早期閉合の適用基準を計画した(表-1 参照)。このとき、「坑内変位の最終変位量」、「坑内変位の初期変位速度」、「切羽評価点のトレンド」に対して、仕様変更の条件を設けた。そして、地山が悪化した場合には、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

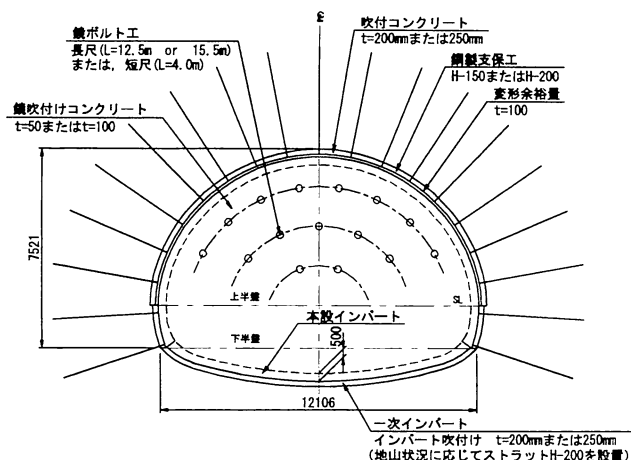


図-3 七尾トンネル横断面図（全断面早期閉合区間）

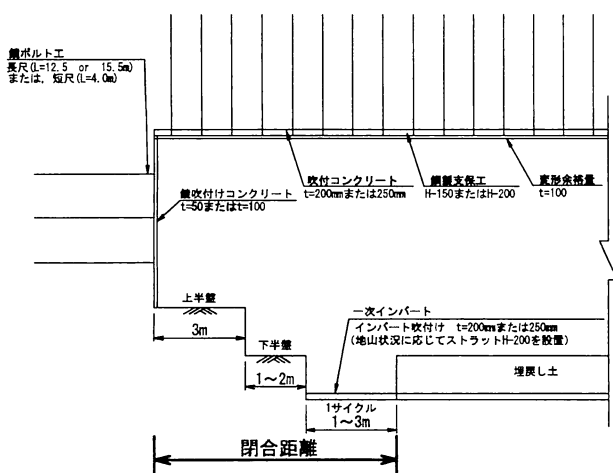


図-4 七尾トンネル縦断面図（全断面早期閉合区間）

て対応することにした。

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、注入材を選定することにした。基本的には短尺の鏡ボルト(L=4m)を用いるが、切羽の自立性の悪化に伴い長尺鏡ボルト(L=12.5m, L=15.5m)に変更することにした。注入材も、切羽状況に応じて、セメント系注入材からウレタン系注入材に変更することにした。ここで、七尾トンネルにおける全断面早期閉合区間の横断面図および縦断面を図-3および図-4に示す。

(2) 全断面早期閉合の適用基準の見直し

1回目区間(No.246+2.7~No.254+11.7)において、全断面早期閉合の適用後、地山がさらに悪化した。そこで、表-1にしたがってランクアップを行った。この1回目区間の施工実績については、既発表の報告書⁸⁾に示した。以下に、その報告書の内容を要約する。

- ・支保工および一次インバートのランクアップと、閉合距離の短縮により変形抑制効果が向上した。
- ・高強度吹付け($\sigma_{\alpha}=36\text{N/mm}^2$)の採用によって、トンネル支保の初期剛性が増加し、掘削直後の初期変位速

度の抑制効果が向上した。その結果、最終変位量が抑制された。

- ・鋼製ストラットの採用や閉合距離の短縮により、トンネル閉合後の変位増加を抑制することができた。その結果、最終変位量が抑制された。
- ・全断面早期閉合区間では、支保工が大きな荷重を負担し、鋼アーチ支保工(H-150)、吹付けコンクリート($t=200\text{mm}$, $\sigma_{\alpha}=18\text{N/mm}^2$)のいずれも、許容値を超える大きな応力が生じた。
- ・切羽の自立性が悪い区間で、鏡補強ボルトを長尺化した。また、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、ウレタン系注入材を用いることによって亀裂間の結合力が増加し、切羽の安定性が向上した。

これらの知見を踏まえ、下記のとおり適用基準を見直し、2回目区間以降に適用した(表-2参照)。

- ・全断面早期閉合では支保工が大きな荷重を負担するため、支保工、一次インバート部材には十分な断面性能を持たせることが必要である。そのために、鋼アーチ支保工および鋼製ストラットは H-200、吹付けコンクリートは $t=250\text{mm}$ を標準とする。
- ・高強度吹付け($\sigma_{\alpha}=36\text{N/mm}^2$)を採用することにより、変形抑制効果が向上することが確認できた。そこで、施工性を向上させるために、「鋼製ストラット」および「閉合距離の短縮」に優先して、高強度吹付けを採用する。
- ・鏡補強工のランクアップにより、切羽の安定性が向上することが確認できた。そこで、見直し後についても、切羽の自立性を考慮して、鏡ボルト長、注入材を選定する。

表-2 全断面早期閉合の適用基準(Ver. 2)

	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)	B-1	$t=250\text{mm}$ $\sigma_{\alpha}=18\text{N/mm}^2$	H-200	$t=250\text{mm}$ $\sigma_{\alpha}=18\text{N/mm}^2$	—	8m
	B-2	$t=250\text{mm}$ $\sigma_{\alpha}=36\text{N/mm}^2$	H-200	$t=250\text{mm}$ $\sigma_{\alpha}=36\text{N/mm}^2$	—	8m
	B-3	$t=250\text{mm}$ $\sigma_{\alpha}=36\text{N/mm}^2$	H-200	$t=250\text{mm}$ $\sigma_{\alpha}=36\text{N/mm}^2$	H-200	6m
地山悪化 (ランクダウン)	B-4	$t=250\text{mm}$ $\sigma_{\alpha}=36\text{N/mm}^2$	H-200	$t=250\text{mm}$ $\sigma_{\alpha}=36\text{N/mm}^2$	H-200	5m
仕様変更 基準	[ランクアップ基準]		[ランクダウン基準]			
	1) 最終変位量 天端沈下: 40mm 以上 内空変位: 80mm 以上		1) 最終変位量 天端沈下: 25mm 未満 内空変位: 50mm 未満			
	2) 切羽通過後の初期変位速度 天端沈下: 10mm/日以上 内空変位: 20mm/日以上		2) 切羽通過後の初期変位速度 天端沈下: 10mm/日未満 内空変位: 20mm/日未満			
	3) 切羽評価点下降		3) 切羽評価点上昇			

※下線付き文字は、Ver.1 に対する主な見直し箇所である。

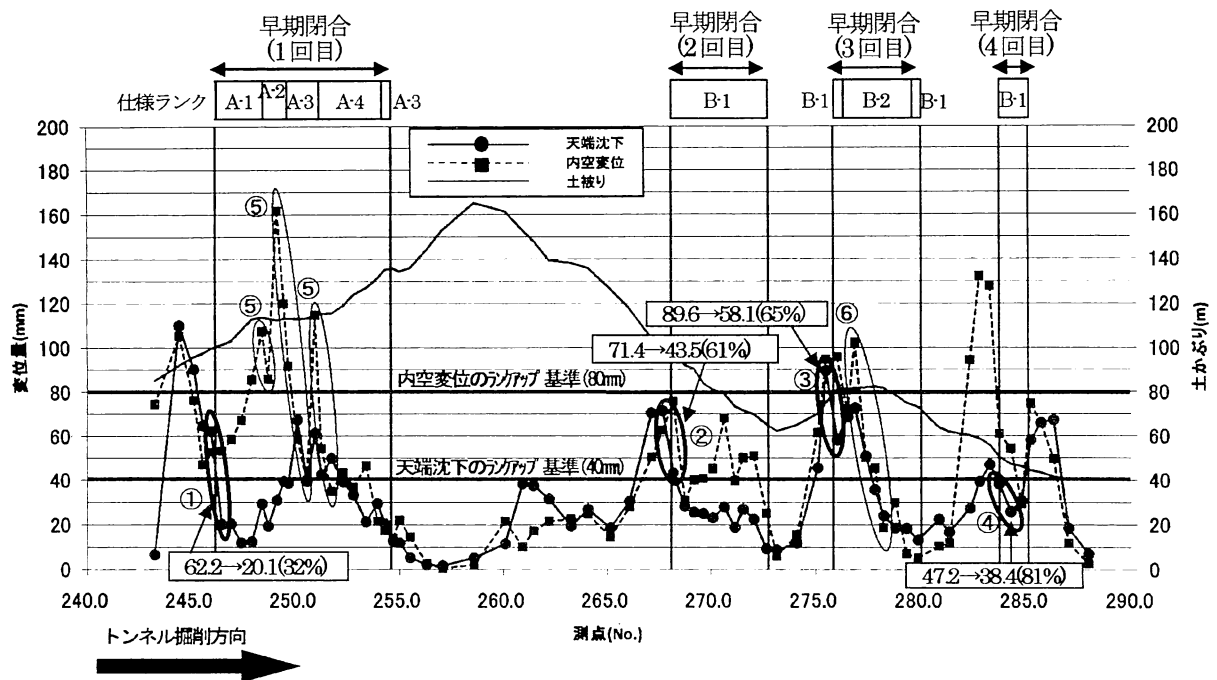


図-5 トンネル掘削時の変位量(最終変位) (No.243+4.6～287+19.15)

4. 施工実績の分析

(1) トンネル掘削時の最終変位量

全断面早期閉合を採用した4区間を含むNo.243+4.6～287+19.15の坑内変位データ(最終変位量)を図-5に示す。この変位量は、トンネル掘削により発生した最終変位量であり、後述する本設インバート施工時に発生した変位量は含んでいない。また、図中には、適用した早期閉合の仕様ランクをあわせて示した。これは、表-1～表-2 および後述する表-4 の閉合仕様ランクに対応している。

この図より、上半先進ベンチカット工法から全断面早期閉合に変更することによって、天端沈下、内空変位が減少傾向を示したことがわかる。特に、天端沈下については、適用開始後、直ちに沈下抑制効果がみられ、適用後の沈下量は、適用前の32～81%に抑制された(図-5中の①～④)。

一方、全断面早期閉合の適用開始後に地山状況が悪化した場合には、内空変位が顕著に増大傾向を示す結果となった。そして、しばしばランクアップ基準(最終変位80mm)を超過したため、閉合仕様をランクアップした。その結果、図-5中の⑤～⑥に示すように、内空変位を抑制することができた。

このように、全断面早期閉合に情報化施工を適用することによって、坑内変位を抑制することができた。そして、全断面早期閉合の適用開始後は、縫い返し掘削が必要となる状況は生じなかった。

(2) 一次インバートの構造について

一次インバートの構造は、全断面早期閉合の効果および施工性に大きな影響を与える。よって、全断面早期閉合を合理的に適用するためには、一次インバートの構造を適切に選定することが重要となる。ここでは、七尾トンネルの施工実績を分析して、一次インバートの設定方法について考察を加える。

全断面早期閉合適用区間のうち、3回目区間では、1回目区間の施工実績を踏まえて、鋼製ストラットに優先して高強度吹付けコンクリートを採用した。その結果、期待したとおりに、天端沈下、内空変位の初期変位速度が減少し、最終変位量も減少傾向を示した(図-5中の⑥)。この結果から、鋼製ストラットを設置せずに、高強度吹付けコンクリートのみをランクアップした場合でも、変形抑制効果が向上することが確認できた。

しかし、高強度吹付けを優先させた区間において、留意すべき変形挙動がみられた。図-6は、高強度吹付けの適用開始後の坑内変位データである。この変位データから、一次インバート施工後に、内空変位は直ちに収束傾向を示したことがわかる(図-6中のA)。しかし、天端沈下には収束傾向はみられず、内空変位についても、切羽が30m程度離れたときに再び増加し始めた(図-6中のB)。

このような状況となった原因を把握するために、当該箇所を観察したところ、トンネル脚部において吹付けコンクリートにクラックが発生していることが確認できた。この変状現象と坑内変位データの傾向から、

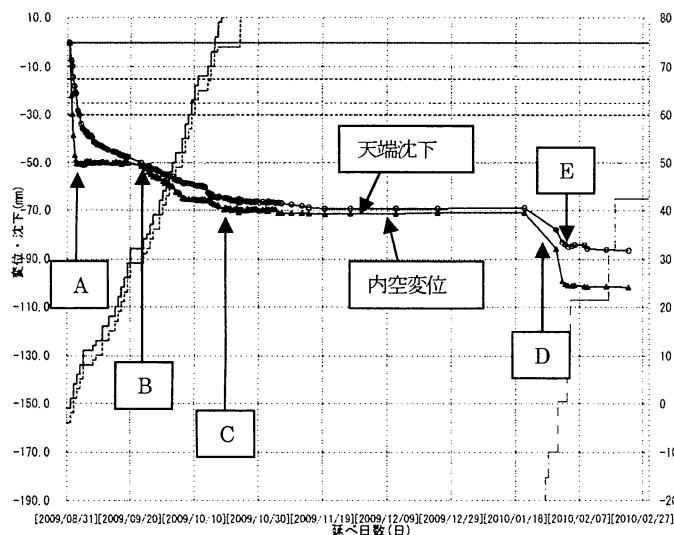


図-6 坑内変位データ (No.276+10)

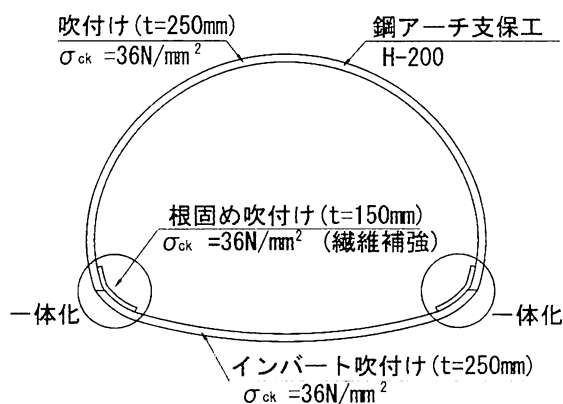


図-7 根固め吹付けによる対策

トンネル脚部に大きな沈下が生じ、一次インバートとの連続性が損なわれたことが原因であると考えた。そこで、トンネル脚部を一体化させて閉合効果を確実に発揮させるために、図-7に示す根固め吹付けコンクリート($\sigma_{ck}=36\text{N/mm}^2$)を実施した。この根固め吹付けの効果によって、坑内変位は収束した(図-6中のC)。

ところが、根固め吹付けを実施した区間において、後日、本設インバートを施工する際に、坑内変位が再び増加した(図-6中のD、および図-8参照)。この変位増加は、埋戻し土を撤去した際に発生した。このことから、インバート吹付け、根固め吹付けの効果に加えて、埋め戻し土もストラット効果等を発揮して、トンネルの安定性が確保できていたものと推察される。

当該箇所においては、この埋戻し土撤去時に発生した変位量を考慮しても、縫い返し掘削は必要としない状況であった。そこで、剛性の高い本設インバートを迅速に設置することがトンネルの安定確保に適していると判断して、本設インバートを打設した。その結果、坑内変位は収束した(図-6中のE)。

今回の施工実績は、本設インバート施工時にも、縫い返し掘削が必要となる状況や、トンネル崩壊が生じ

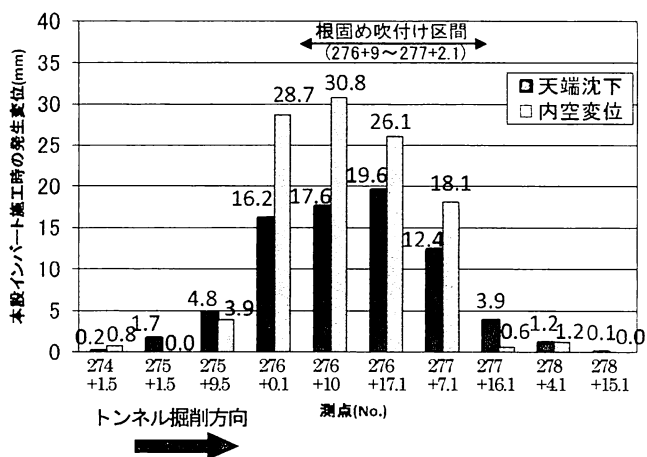


図-8 本設インバート施工時の発生変位量

表-3 一次インバート閉合直後の変位速度

測点 (No.)	一次インバート閉合直後の変位速度 (mm/日)		備考
	天端沈下	内空変位	
276+0.1	3.2	-0.1	
276+10.0	8.9	0.2	根固め吹付け実施
276+17.1	5.1	0.4	根固め吹付け実施
277+7.1	5.0	0.6	根固め吹付け実施
277+16.1	4.0	2.6	
278+4.1	1.9	0.8	
278+15.1	0.9	-0.2	
279+6.1	2.1	0.7	
279+17.1	1.4	0.5	

る可能性があることを示唆している。もし、そのような事態を招いた場合には、安全性、工程、工事費への影響は非常に大きいものとなる。そのため、本設インバート施工時の安定性も考慮して、一次インバートの構造を選定する必要があると考えた。

そこで、1回目区間の鋼製ストラット設置箇所に着目した。当該箇所では、本設インバート施工時に、問題となる変位が生じることがなかった。これは、鋼アーチ支保工と鋼製ストラットが強固に接続することによって、トンネル脚部の一体化が確保できたためであると考えられる。このことから、地山条件がより悪化した時には、鋼製ストラットが必要不可欠となり、その必要性を的確に判断して、迅速に採用することが重要であると判断した。

ここで、鋼製ストラットの適用基準を設定するにあたり、早期に判断できる基準とすることが重要である。そこで、一次インバートにより断面閉合を行った直後の変位速度に着目した。表-3が、その変位速度を整理したものである。この表より、本設インバート施工時に大きな変位が生じた箇所(根固め吹付け箇所)は、一次インバート閉合直後に5mm/日以上の変位速度が発生したことがわかる。このことから、一次インバート閉合後の変位速度が5mm/日以上となった場合には、鋼製ストラットを設置して、トンネル脚部の一体化を図る必

表-4 全断面早期閉合の適用基準(Ver. 3)

	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 ストラット	
地山良化 (ラングアップ)	B-1	t=250mm $\sigma_{ck}=18\text{N/mm}^2$	H-200	t=250mm $\sigma_{ck}=18\text{N/mm}^2$	—	8m
	B-2	t=250mm $\sigma_{ck}=36\text{N/mm}^2$	H-200	t=250mm $\sigma_{ck}=36\text{N/mm}^2$	—	8m
	B-3	t=250mm $\sigma_{ck}=36\text{N/mm}^2$	H-200	t=250mm $\sigma_{ck}=36\text{N/mm}^2$	H-200	6m
地山悪化 (ラングダウン)	B-4	t=250mm $\sigma_{ck}=36\text{N/mm}^2$	H-200	t=250mm $\sigma_{ck}=36\text{N/mm}^2$	H-200	5m
仕様変更 基準	【ランクアップ基準】					
	【ランクダウン基準】					

1) 最終変位量
天端沈下: 40mm 以上
内空変位: 80mm 以上

2) 切羽通過後の初期変位速度
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) 閉合直後の初期変位速度
(B-2→B-3 のランクアップ
の際に適用)
天端沈下: 5mm/日以上
内空変位: 5mm/日以上

1) 最終変位量
天端沈下: 25mm 未満
内空変位: 50mm 未満

2) 切羽通過後の初期変位速度
天端沈下: 10mm/日未満
内空変位: 20mm/日未満

3) 切羽評価点上昇

※下線付き文字は、Ver.2に対する見直し箇所である。

要があると判断した。

この結果を踏まえ、全断面早期閉合の適用基準を表-4
のとおりに見直し、4回目区間に適用した。

5. まとめ

七尾トンネルでは、地山変質区間(4区間、適用総延長
366.6m)に全断面早期閉合を適用した。その際、複雑に
変化する地山状況に対応するために、全断面早期閉合
に情報化施工を適用した。

今回の施工実績より、高強度吹付けを採用すること
によって、変形抑制効果が向上することが確認できた。
そこで、本工事では、施工性に勝る高強度吹付けを優
先して採用することを試みた。その結果、地山条件が
より悪化した場合には、鋼製ストラットの設置が必要
不可欠となり、その要否を判断するために、一次閉合
直後の変位速度が指標となることがわかった。

今後、より安全かつ合理的に全断面早期閉合を適用
するためには、「支保工および一次インバートの構
造」や「閉合距離」が変形抑制効果に与える影響につ
いて、定量的に評価することが必要であると考えてい
る。また、今回の施工では、切羽の安定確保を目的と
して「鏡補強工」を用いたが、長尺鏡ボルトの変形抑
制効果を把握して、変形抑制対策工としても活用した
いと考えている。そのために、解析的手法を用いて分
析を加えていくつもりである。

既往の文献では、施工実績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)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.

3)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.

4)平野幸幸、臼田芳彦、清水則一、神澤幸治、宮田和：長尺鏡
ボルトと早期断面閉合を用いた地すべり地直下のトンネル
施工、第 12 回岩の力学国内シンポジウム 併催：第 29 回西
日本岩盤工学シンポジウム, pp.903-907, 2008.1.

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.

6)寺山徹、津野和宏、内野貴志、蛭川愛志：補助ベンチ付き全
断面掘削・早期閉合で都市トンネルを掘る一岸谷生麦線(生
麦方向行き)トンネル工事―、トンネルと地下、第 39 巻 5 号、
pp.7-17, 2008.5.

7)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―、
トンネルと地下、第 41 巻 3 号, pp.7-16, 2010.3.

8)鬼頭夏樹、角湯克典、柳川磨彦、明石健、大谷達彦：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、トン
ネル工学報告集 第 19 巻, pp.119-124, 2009.11.

OBSERVATIONAL CONSTRUCTION PROCEDURE OF EARLY CROSSSECTION CLOSER

Natsuki KITO, Katsunori KADOYU, Kiyohiko YANAGAWA,
Masaru HARASHIMA 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, 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.