

戦-42 山岳トンネルの早期断面閉合の適用性に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 22～平 24

担当チーム：道路技術研究グループ（トンネル）

研究担当者：角湯克典，森本智，日下敦

【要旨】

近年、不良地山においてトンネル構造の安定性の確保，施工時の安全性の改善などのために，補助ベンチ付き全断面工法による早期断面閉合が採用されつつある。しかし，本工法の施工事例は少なく早期閉合断面の採用による効果や採用すべき地山条件等を明確にする必要がある。本稿では，補助ベンチ付き全断面工法による早期断面閉合により施工したトンネルの計測データについて分析するとともに，インバート部の形状を変化させトンネルの耐荷力を比較する模型実験を行った結果について報告する。

キーワード：山岳トンネル，補助ベンチ付き全断面工法，早期断面閉合，模型実験，断面形状

1. はじめに

これまで不良地山においては上部半断面工法を用いて，適切な支保パターンの選定，および必要に応じて補助工法を併用するなどの対策により施工が行われてきたが，近年，早期に断面を閉合することで，トンネルの変形抑制，構造の安定性確保，施工時の安全性の改善などの効果に期待する，補助ベンチ付き全断面工法による早期断面閉合が採用されつつある（図-1.1）。しかし，早期閉合断面の採用による効果や採用すべき地山条件等について不明確な部分が多い。

本稿では，補助ベンチ付き全断面工法による早期断面閉合を採用した事例について分析するとともに，インバート部の形状を変化させトンネルの耐荷力を比較する模型実験を行った結果について報告する。

2. 早期断面閉合実施トンネルの事例収集

文献等による事例収集を行い国土交通省直轄事業で早期断面閉合による補助ベンチ付全断面工法により施工されたトンネルについて事例収集を行った。表-2.1 に収集した事例，および主な採用理由について示す。本工法を採用したトンネルは7事例あり，その採用理由は，1）土被りが大きい不良地山で坑内変位を抑制するため，2）坑口部の地すべり対策として周辺地山への影響を抑制するため，3）土被りが小さく重要構造物が存在する地表面沈下を抑制するための主に3種類に分類された。いずれのトンネルにおいても，早期に断面を閉合し支保構造を安定化することで，周辺地山のゆるみを極力抑制することを目的としていると考えられる。また，インバート部の形状について，一般的な構造半径比($r3/r1$) ($r1$:上半半径， $r3$:インバート半径)は2.5以上の場合が多い傾向にある。表には含まれないが国土交通省直轄事業以外の現場における押出し性地山など劣悪地山において，1.4程度とし円形に近づけることで構造的に有利となる形状を採用する事例があった。

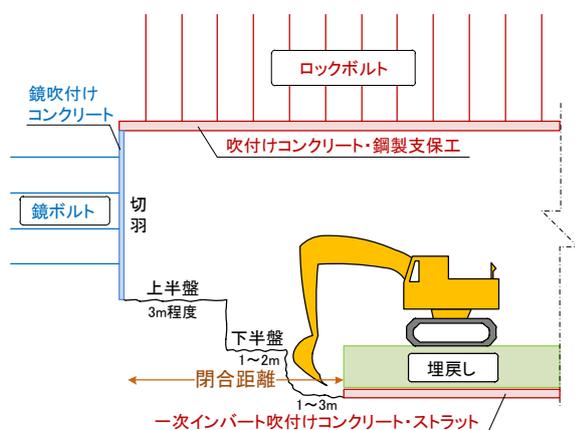


図-1.1 早期断面閉合適用例

表-2.1 早期断面閉合の採用理由等

トンネル	土被り(m)	主な地質	採用理由	構造半径比
A	100~136	凝灰角礫岩	坑内変位抑制	2.62
B	199~239	粘板岩	坑内変位抑制	2.43
C	25~35	崖錘堆積物	地すべり対策	2.62
D	1~27	堆積物	地表面沈下抑制	3.00
E	6~17	崖錘堆積物	地表面沈下抑制	2.65
F	3~20	まさ土	地表面沈下抑制	2.53
G	4~21	泥岩	地表面沈下抑制	2.50

3. 早期断面閉合による効果の分析

3.1 早期断面閉合による変位抑制効果

補助ベンチ付き全断面工法による早期断面閉合の変位抑制効果について把握するため、Aトンネルにおいて施工時に計測されたデータの分析を行った。Aトンネルは、上部半断面工法による施工を実施していたが、地山状況の変化などから掘削による坑内変位量が増加したため、一部の断面においては補助ベンチ付き全断面工法による早期断面閉合により掘削した。また、支保工の仕様は切羽評価点、および掘削時の初期変位速度、天端沈下と水平内空変位の最終変位量などから基準値を設け決定した。

補助ベンチ付き全断面工法による早期断面閉合の坑内変位抑制効果の確認は、地山条件に差が出にくいよう早期断面閉合を実施する直前の上部半断面工法により施工した断面と、その直後の早期断面閉合により施工した断面について坑内変位を比較することにより行った。当該断面は土被りが100m程度であり、岩種は凝灰角礫岩、礫岩、砂岩などからなり地山分類はDIおよびDIIであった。早期断面閉合を実施する直前の上部半断面工法の断面の支保パターンはDI-b3でアーチ部の吹付けコンクリートは呼び強度18N/mm²で厚さ150mm、鋼製支保工はH-125となっており、一次インバートの施工は行われておらず、変位の収束確認後に本設インバートを設置している。一方、その直後の早期断面閉合による断面の支保パターンはDII-b4でアーチ部の吹付けコンクリートは呼び強度18N/mm²で厚さ200mm、鋼製支保工はH-150となっている。また、インバート部の吹付けコンクリートは呼び強度18N/mm²で厚さ250mm、鋼製ストラットは設置されていない。また、切羽を安定させるため鏡ボルトによる補強を実施している。

図-3.1に早期断面閉合を実施する直前の上部半断面工法により施工した断面と、その直後の早期断面閉合により施工した断面について、計測開始から30日間における天端沈下、水平内空変位、脚部沈下の結果について示す。まず、上部半断面工法による断面の坑内変位は、上半掘削時と下半掘削時にそれぞれ変位量が増大する。天端沈下の値は上半掘削時に40mm程度、下半掘削時にさらに30mm程度増加して収束し、最終沈下量は70mm程度となった。また、水平内空変位と脚部沈下についても掘削後の変位は同様の傾向であり、最終沈下量は水平内空変位が60mm、脚部沈下が55mm程度となった。

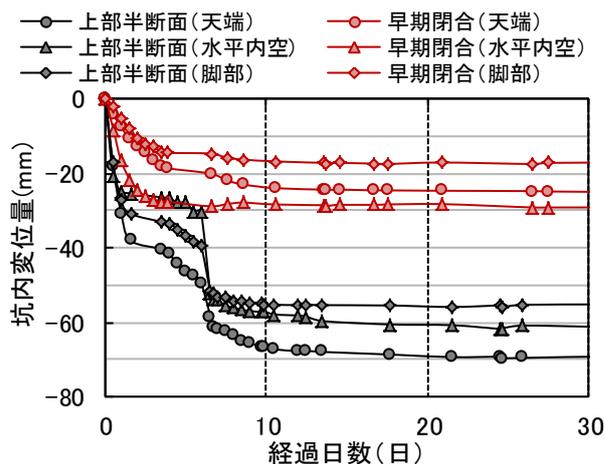


図-3.1 坑内変位の抑制

一方、補助ベンチ付き全断面工法による早期断面閉合の場合、掘削から比較的短い期間で上半・下半・インバートと掘削し閉合するため、掘削期間中は変位が増加するものの、その後比較的早い時期に収束する。天端沈下は掘削開始から10日以内に収束し、最終沈下量は25mm程度であった。また、水平内空変位と脚部沈下についても掘削後の変位は同様の傾向であり、最終沈下量は水平内空変位が30mm、脚部沈下が15mm程度となった。

当該区間においては、上部半断面工法から早期断面閉合に切り替えることにより坑内変位は減少し、天端で45mm程度、水平内空で30mm程度、脚部で40mm程度の変位抑制効果が確認された。

3.2 変位収束までの挙動

図-3.2にAトンネルにおける切羽評価点が30日未満の上部半断面工法と早期断面閉合で施工した断面について、収束時の坑内変位量に対する各段階の坑内変位量の割合（各段階の変位量/収束時の変位量）の経時変化について示す。上部半断面工法と早期断面閉合で施工した断面について表-3.1に示すとおり分類し整理した。なお、収束時とは変位量の変化がほとんどみられなくなる約100日経過時点とした。

表-3.1 インバート部の支保構造

断面	工法	インバート部		凡例
		吹付け (N/mm ²)	鋼製ストラット	
A-0	上部半断面	18	-	●
A-1	早期断面閉合	18	無	▲
A-2	早期断面閉合	18	有	△
A-3	早期断面閉合	36	無	◆
A-4	早期断面閉合	36	有	◇

天端沈下は、上部半断面工法による A-0 断面では変位の収束が遅く、また A-0 の各断面の値はばらつきが大きい傾向にある。一方、早期断面閉合では、A-0 断面と比較し変位が早く収束することが確認でき、特にインバートストラットを設置した A-2 と A-4 断面は、インバートストラットを設置していない A-1 と A-3 断面と比較し変位が早く収束している。水平内空変位は、A-0 断面では変位の収束までに切羽掘削から 1 箇月程度要するが、早期断面閉合の場合概ね 10 日程度で収束する傾向にある。脚部沈下においても A-0 断面では変位の収束までに切羽掘削から 1 箇月程度要するが、早期断面閉合の場合 20 日程度で収束する傾向にある。

3.3 初期変位速度と最終変位量の関係

図-3.3 に A トンネルにおける支保パターンが DI および DII で施工された断面について、天端沈下、および水平内空変位、脚部沈下における初期変位速度（計測開始から 24 時間までの変位）と最終変位量の関係について示す。全体的な傾向として、各坑内変位は各断面とも初期変位速度が増加するに伴い最終沈下量が増加する傾向にある。各断面の違いによる影響については、天端沈下、脚部沈下においては有意な差は確認できず、水平内空変位においてはインバートストラットを設置した A-2,4 について若干その傾きが小さくなる傾向を示した。

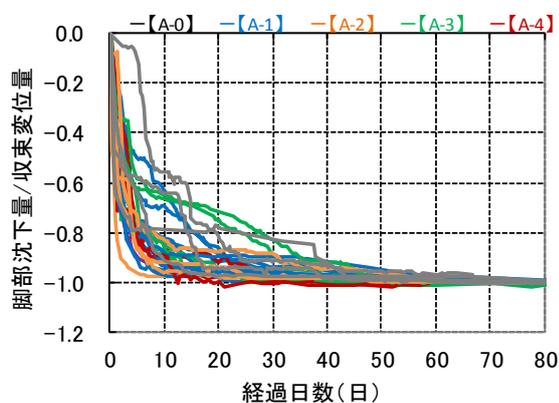
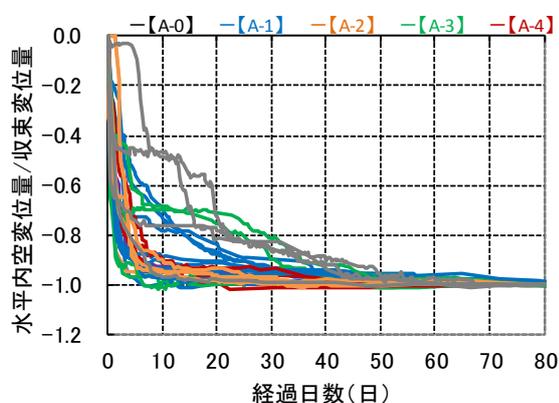
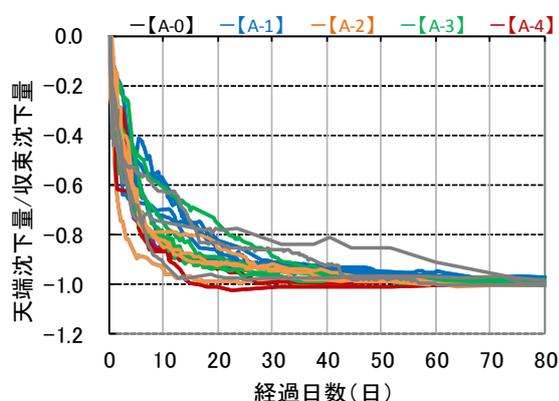


図-3.2 各段階の変位量/収束時の変位量（経時変化）

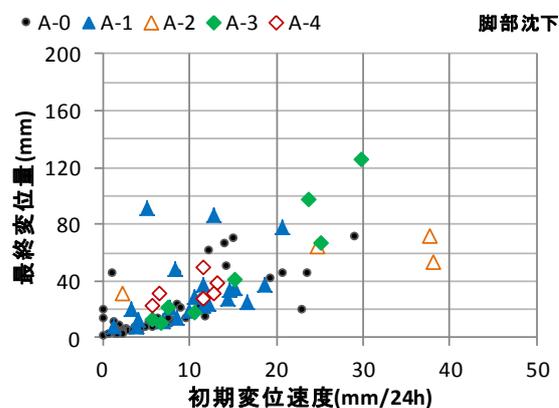
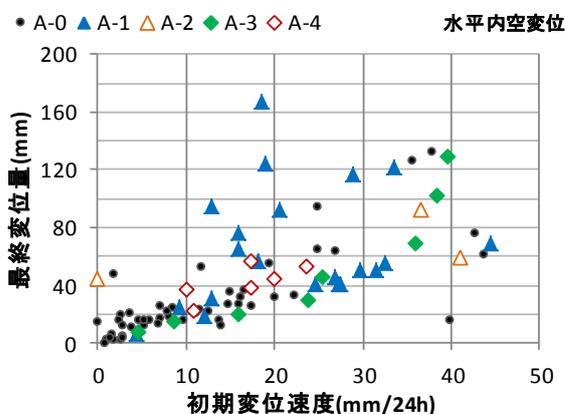
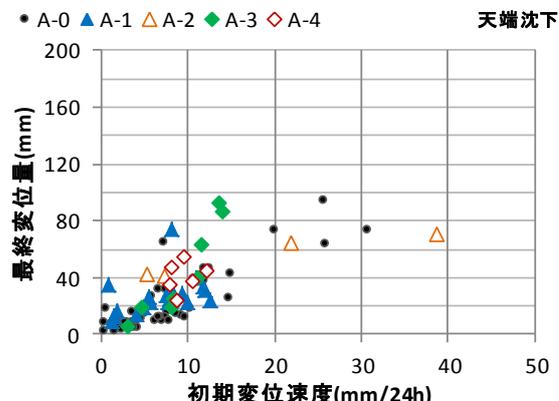


図-3.3 変位速度と変位最終値の関係

3.4 断面閉合後の坑内変位の挙動

図-3.4 にインバート閉合前の坑内変位量に対する最終変位量の割合（最終変位量/閉合直前の変位量）と、初期変位の速度の関係を示す。閉合前の坑内変位量に対する最終変位量の割合は、天端沈下は、各断面とも初期変位速度との関係性はあまり見られず、インバートストラットを設置していない A-1,3 断面は 1.1 から 2.4 程度とばらつくが、インバートストラットを設置した A-2,4 断面は 1.3 から 1.7 程度と A-1,3 断面と比較して小さくなり、閉合後の変位の増加を抑制する傾向にある。水平内空変位は、天端沈下と同様に初期変位速度との関係性はあまり見られず、その値は A-1 断面において大きくばらつく傾向にある。一方、A-2,3,4 断面においては概ね 1.5 未満と小さくなっており閉合後の変位の増加を抑制する傾向にある。脚部沈下は、天端沈下と同様に初期変位速度との関係性はあまりみられず、インバートストラットを設置していない A-1,3 断面は 1.1 から 1.7 程度とばらつくが、インバートストラットを設置した A-2,4 断面は 1.1 から 1.3 程度と A-1,3 断面と比較して小さくなり、閉合後の変位の増加を抑制する傾向にある。

4. 模型実験による断面形状に関する検討

4.1 実験の概要

本実験は、図-4.1 に示す二次元載荷試験装置を使用して行った。本装置は載荷板、載荷用油圧ジャッキなどから構成され、土槽は内寸 1,200mm、高さ 300mm の載荷板および固定板に囲まれている。土槽中央部にトンネル模型を設置し、その外側に模型地山を作製した。模型地山は、気乾状態の標準砂を用いて目標密度 1.40g/cm³ 程度となるよう空中落下させて作製した。図-2 にトンネル模型の寸法等を示す。トンネル模型はモルタルを用いて概ね 1/20 の大きさで作製し、形状は 2 車線トンネル断面を模擬し、アーチ部の半径 R1 を 300mm の単心円、インバート部の半径を 4 種類に変化させた。トンネル模型の厚さは 20mm、アーチからインバートへのすり付け部はなるべく滑らかになるようにし、すり付け増厚は施していない。実験は、側方から過大な荷重が作用する場合を想定し、トンネル模型に対して側面に位置する可動壁 1 面から荷重を行い、荷重を行わない固定板 3 面については外側に鋼製柱を設置し変位しない構造とした。なお、実験時の固定板の反力は載荷板の荷重値に対して 3 辺ともに 0.3 程度となっている。計測は図-4.1 に示す載荷板および固定

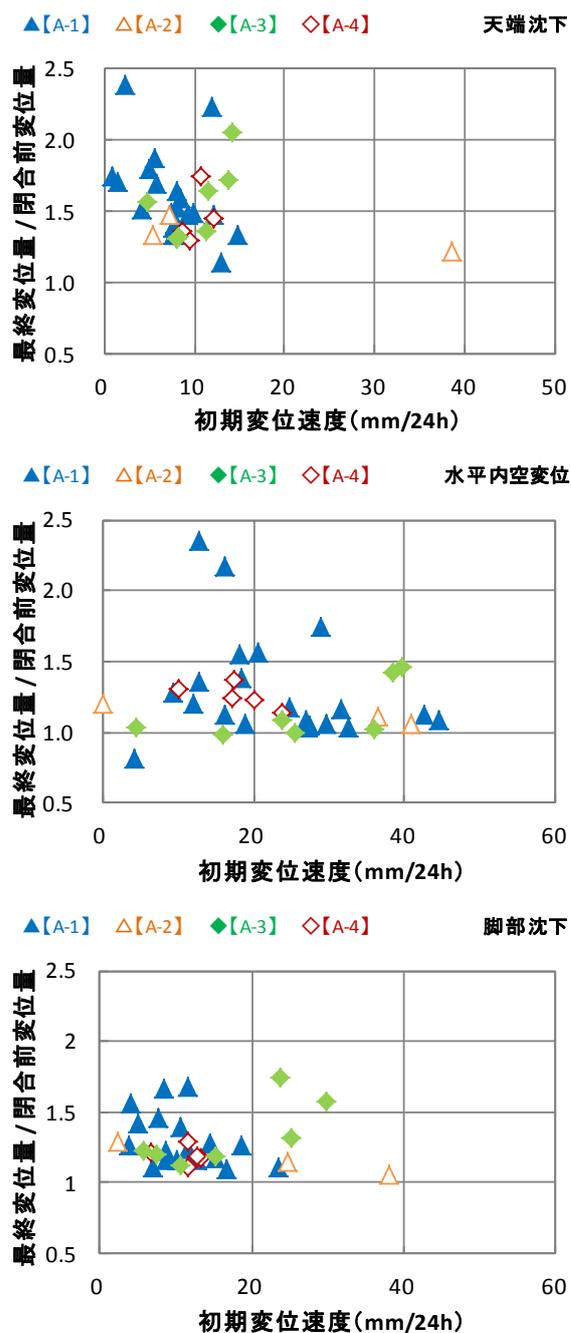


図-3.4 初期変位速度と閉合前の坑内変位量に対する最終変位量の割合

板の荷重と変位、図-4.2 に示すトンネル模型のひずみについて行った。また、供試体のひび割れについて観察が可能な覆工内面について行った。実験ケースは、インバートの曲率を R1 に対して 2.0 とした形状を基本 (CASE1) とし、1.3 (CASE2), 1.1 (CASE3), 1.0 (CASE4) と変化させた計 4 ケースとした。

4.2 実験結果

図-4.3 に載荷板に作用させた荷重と変位の関係を示す。基本となる CASE1 の最大荷重は 1,050kN であった。CASE2 は 1,192kN, CASE3 は 1,215kN, CASE4 は載荷装置の限界である 1,212kN まで達したため破壊に至る前に載荷を中止した。これらの結果から、形状が円形に近いほど耐力が高い結果となったがその差はわずかであった。

図-4.4 に CASE1 における計測したひずみ値、および観察結果から得られた代表的なひびわれ発生時の荷重における、内面および外面のひずみ分布図を示す。まず、30kN 程度で内面の SL 付近 (7.5~30 度, 165

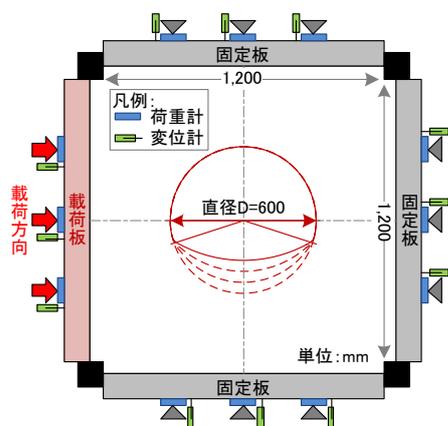


図-4.1 二次元載荷試験装置

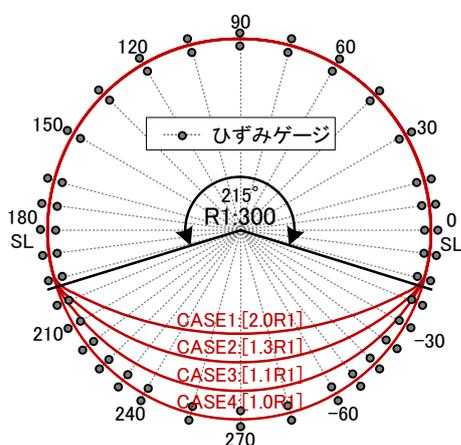


図-4.2 トンネル模型

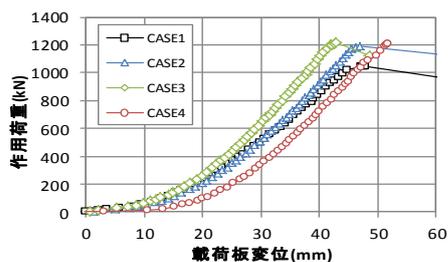
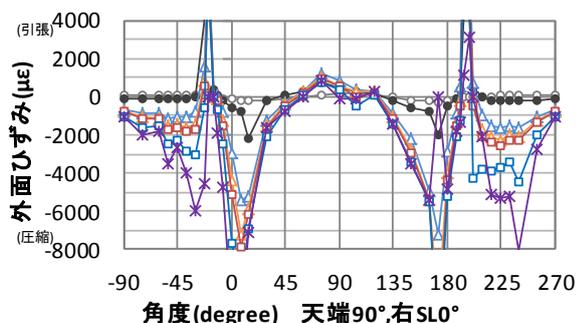
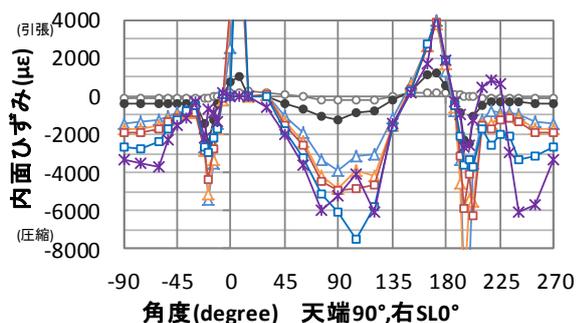


図-4.3 荷重と変位

~180 度), 60kN 程度で外面のすりつけ部付近 (-15 ~22.5 度, 195~202.5 度) と外面の天端に 200 μ 程度の引張りが発生しており、この段階で初期のひび割れが発生していると考えられ、観察からも内面の SL 付近において 40kN 程度の段階でひび割れが確認できた。次に、250kN 程度で内面のすりつけ部付近に、350kN 程度で外面の SL 付近にそれぞれ 3,500 μ 程度の圧縮となった。この時点において断面に発生しているひずみは、SL 付近は内面は引張り、外面は圧縮、すりつけ部付近は内面は圧縮、外面は引張りの大きな値が発生し、局所的に曲げの正負が反転していることがわかる。その後、観察から 750kN 程度で内面すりつけ部付近にひび割れの発生を確認、970kN 程度で左側の肩部 (135 度付近) からインバート部 (225 度付近) にかけて周方向にひび割れを確認、1,000kN 程度で周方向のひび割れがインバート中央部付近 (270 度) まで進展し破壊に至った。また、CASE2 と CASE3 においても最大荷重を迎えるまでのひび割れ進展はほぼ同様の状況であった。

図-4.5 に CASE1 において、内面のすりつけ部付近の値が 3,500 μ 程度の圧縮を示した 250kN の段階における各ケースの内面と外面のひずみ分布図を示す。SL 付近およびすりつけ部に着目すると、CASE1~CASE3 では局所的に曲げの正負が反転し、ひずみの値はすりつけ部の内側において CASE1 が 3,300 μ を超えているのに対し、CASE2 が 1,000 μ 程度、CASE3 が 200 μ 程度の圧縮ひずみであり小さくなる傾向にある。また、SL 付近の外側において CASE1 が 2,700 μ 程度であるのに対し、CASE2 が 2,500 μ 程度、CASE3 が 2,200 μ 程度の圧縮ひずみでありすりつけ部ほどではないが、小さくなる傾向にあった。このことから、SL 付近およびすりつけ部におけるひずみの発生については、形状による影響を受け、その値は円形に近いほど小さくなる傾向にある。一方、CASE4 は、このような局所的な曲げの正負の反転はみられず、ひずみ分布は比較的滑らかである。

アーチ部においては、各ケースとも天端 (90 度) 付近の値が一番大きく、内面側で 2,800 μ から 1,500 μ 程度の圧縮ひずみが大差なく生じており形状による影響は小さい。また、インバート部においては、内面側で CASE4 に一部 3,500 μ 程度を示す値があるが、それ以外は 1,500 μ 程度以下の圧縮ひずみとなっており、形状が円形に近づくほどその値は大きくなる傾向にあるものの、アーチ部と同様に形状による影響は小さいと考えられる。



凡例	荷重(kN)	ひび割れの発生箇所
○	30	内面SL、外面すりつけ部
●	250	内面すりつけ部3,500μ
△	350	外面SL3,500μ
▲	750	インバート(-20度)
□	800	インバート(195度)
◇	970	周方向(135度から225度)
※	1,050	最大荷重

図-4.4 ひずみ分布図(CASE1)

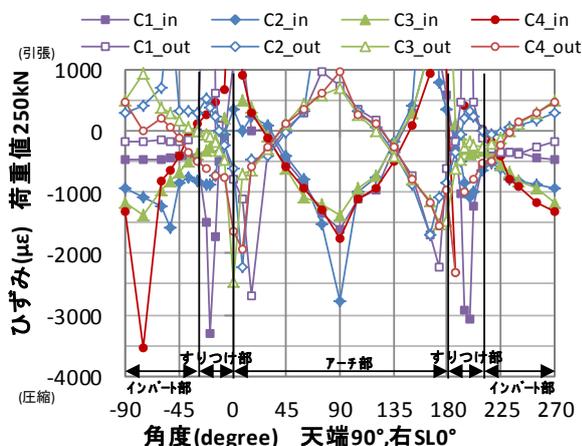


図-4.5 ひずみ分布図(CASE1~4)

4.3 実験結果のまとめ

本実験の結果、インバートの形状は円形に近いほうが同一の荷重に対して支保工のひずみが低減されることがわかった。一方で、形状を円形に近づけることができない場合は、SL 付近およびすりつけ部において曲げ応力の正負が局所的に反転し大きな値となることから、特に形状による影響が大きいすりつけ部については、よりすりつけを滑らかにすることや部材を増厚

するなどの対策が必要であると考えられる。

5. まとめ

本稿では、補助ベンチ付き全断面工法による早期断面閉合を採用した事例について分析するとともに、インバート部の形状を変化させトンネルの耐荷力を比較する模型実験を行った。その結果得られた主な結論は以下のとおりである。

- (1) 補助ベンチ付き全断面工法による早期断面閉合を採用する理由は主に3種類に分類され、1) 土被りが大きい不良地山で坑内変位を抑制するため、2) 坑口部の地すべり対策として周辺地山への影響を抑制するため、3) 土被りが小さく重要構造物が存在する地表面沈下を抑制するためなどであり、いずれも、早期に断面を閉合し支保構造を安定化することで、周辺地山のゆるみを極力抑制することを目的としている。
- (2) 上部半断面工法と早期断面閉合により施工したそれぞれの断面について坑内変位の比較を行った。その結果、今回検討を行ったAトンネルにおいては早期断面閉合により変位の抑制効果が確認できた。また、複数の断面において変位収束までの挙動を比較した結果、早期断面閉合により早期に変位が収束する効果が確認できた。さらに、断面閉合後の坑内変位の挙動を比較した結果、インバートストラットを設置すること、または高強度の吹付けコンクリートを採用することにより、閉合後の変位の増加を抑制することが確認できた。
- (3) 本実験の結果、インバートの形状は円形に近いほうが同一の荷重に対して支保工のひずみが低減されることがわかった。一方で、形状を円形に近づけることができない場合は、SL 付近およびすりつけ部において曲げ応力の正負が局所的に反転し大きな値となることから、特に形状による影響が大きいすりつけ部については、よりすりつけを滑らかにすることや部材を増厚などの対策が必要であると考えられる。

Research on applicability of immediate ring closure for mountain tunnel

Budget : Grants for operating expenses General account

Research Period : FY2010-2012

Research Team : Road Technology Research Group (Tunnel)

Authors : KADOYU Katsunori, SATOSHI Morimoto,
KUSAKA Atsushi

Abstract: This study aims to clarify the applicability of immediate ring closure method for mountain tunnel. The method has been increasingly adopted for the purpose to restrict tunnel deformation, ensure stability of support structure, improve the operational safety, etc. However, the effect of ring closure and the applicability of the method have not been clarified.

In FY 2010, case study of immediate ring closure was performed to study applicability of the method. Also, model experiment was conducted to study appropriate invert shape. The results were acquired as follows:

(1) The reasons why the method is adopted are categorized into three groups: 1) to restrict tunnel deformation in the case with large overburden, 2) to diminish the influence of tunnel excavation on landslide and 3) to prevent harmful subsidence around surface structures in the case of shallow tunnel excavation.

(2) A tunnel, in which the deformation trend was analyzed, shows that the method is effective to restrict tunnel displacement and to converge the displacement in early stage. Besides, invert strut or high-strength sprayed concrete is effective to restrict the displacement after ring closure.

(3) From the experiment, invert with more circular shape is more advantageous in regard to support strain. In the case with flat invert, junction of invert with support should be reinforced because stress concentration occurs around support foot.

Keywords: Mountain tunnel, immediate ring closure, invert