

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, 砂金伸治, 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などのために、インバートを早期に設置しトンネル断面をリング状に閉合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。しかし、本工法について、早期断面閉合の採用による効果や採用すべき地山条件等が必ずしも明確になっていない。また、インバートの設計を行う場合においては、形状の違いによる効果など不明な点が多く残されている。

本稿では、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、早期断面閉合の掘削サイクルを忠実に再現した三次元数値解析を実施しその効果について検討を行った。また、インバート部の形状を変化させた模型実験を行い、早期断面閉合採用による効果や変位収束・抑制メカニズムならびに設計・施工上の留意点を検討し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

近年、不良地山においてトンネル構造の安定性の確保などのために、インバートを早期に設置しトンネル断面をリング状に閉合する補助ベンチ付き全断面工法による早期断面閉合（以下「早期断面閉合」という）（図-1.1）が採用されつつある。しかし、本工法について、早期断面閉合の採用による効果や採用すべき地山条件等が必ずしも明確になっていない。また、インバートの設計を行う場合においては、形状の違いによる効果など不明な点が多く残されている。

本稿では、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、早期断面閉合の掘削サイクルを忠実に再現した三次元数値解析を実施しその効果について検討を行った。また、インバート部の形状を変化させた模型実験を行い、早期断面閉合採用による効果や変位収束・抑制メカニズムならびに設計・施工上の留意点を検討した結果について報告する。

2. 早期断面閉合を採用する地山条件の事例分析

早期断面閉合による補助ベンチ付き全断面工法により施工されたトンネルについて、文献等による事例収集を行った。収集したトンネル数は 43 トンネルであった。早期断面閉合の採用理由は、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、

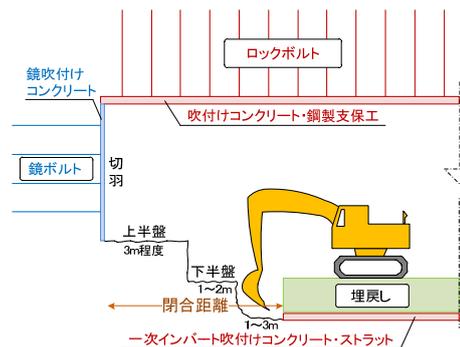
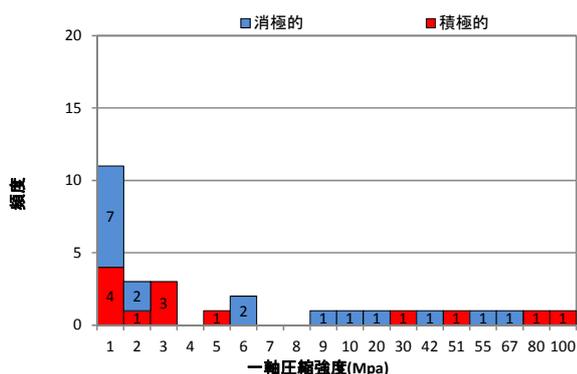


図-1.1 早期断面閉合適用例

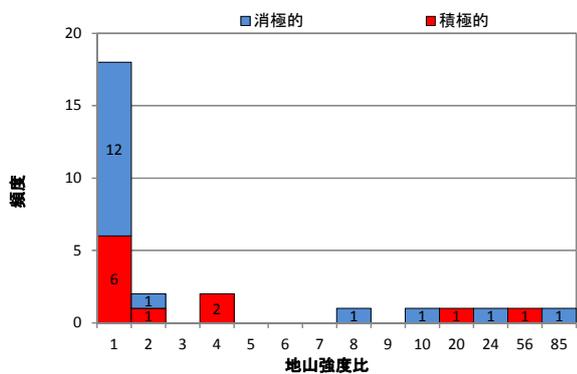
3) 土被りが小さく重要構造物が存在する地表面の沈下を抑制するための 3 種類に分類された。

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。早期断面閉合を適用する際に、1) では不良地山における標準工法である上部半断面工法による施工時に坑内変位が増大した場合、または、収束しない場合等において消極的に採用され、2) および 3) では、事前に周辺地山への影響抑止や地表面沈下の抑制を期待して、予め早期断面閉合を積極的に採用するケースが多い。

ここでは、早期断面閉合を適用するに際し不良地山における標準工法である上部半断面工法による施工時に坑内変位が増大し消極的に適用した事例と、事前に周辺地山への影響抑止や地表面沈下の抑制を期待して



(a) 一軸圧縮強度



(b) 地山強度比

図-2.1 早期断面閉合を適用する地山条件

積極的に適用した事例に分類し、地山の一軸圧縮強度、および地山強度比に着目してそれらの傾向について分析を行った。

図-2.1 に早期断面閉合を採用した地山の一軸圧縮強度、および地山強度比の分布を示す。早期断面閉合を適用する事例は、地山の一軸圧縮強度が 3MPa を下回り、また地山強度比が 1 を下回る領域において多く見られた。

3. 早期断面閉合の効果に関する解析的検討

3.1 概要

早期断面閉合の採用による効果について把握するため、トンネルの掘削サイクルを忠実に再現した三次元数値解析を実施した。解析では、掘削工法を上部半断面工法と早期断面閉合について行った。図-3.1 に解析モデルを示す。本解析では、トンネルの掘削径は 12.7m とし、土被り 100m とした。地山は 1 層構造とし、Mohr-Coulomb の破壊基準に従う完全弾塑性体とした。解析領域は掘削の対称性を考慮して半断面とし、

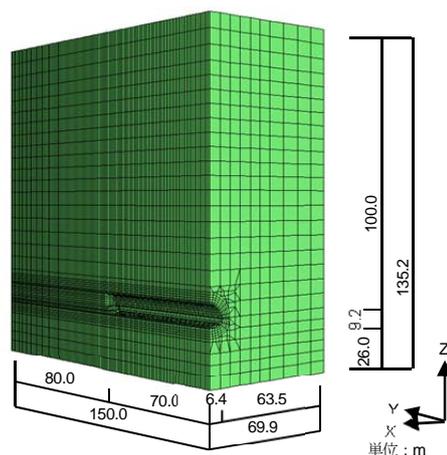


図-3.1 三次元解析モデル

表-3.1 地山物性値

単位体積重量 γ (kN/m ³)	変形係数 E (kN/m ²)	ポアソン比 ν
21.0	150,000	0.35
内部摩擦角 ϕ (°)	粘着力 C (kN/m ²)	側圧係数
20.0	100	K0

表-3.2 構造物物性値

構造物	吹付けコンクリート	鋼アーチ支保工
仕様	t=250cm 18N/mm ²	H-200 @1.0m
要素モデル	シェル要素	ビーム要素
変形係数 E(MN/m ²)	4.0 × 10 ³	2.0 × 10 ⁶
断面積 A(m ²)	0.25	63.53 × 10 ⁻⁴
断面 2 次 I(m ⁴)	—	4720 × 10 ⁻⁸
断面係数 Z(m ³)	—	472 × 10 ⁻⁶

表-3.3 解析ステップ

段階	備考
1	・まず、初期応力計算
2	・上半 0.0m~1.0m 掘削 ・0.0m 位置の H 鋼モデル化
3	・上半 1.0m~2.0m 掘削 ・1.0m 位置の H 鋼モデル化 ・吹付けコンクリート 0.0m~1.0m モデル化 ・ロックボルト 1.5m 位置にモデル化
...	※1.0m 掘削・1.0m 後方に支保設置
51	・全断面 69.0m~70.0m 掘削 ・H 鋼 69.0m モデル化 ・吹付けコンクリート 68.0m~69.0m モデル化 ・ロックボルト 69.5m 位置にモデル化

境界条件は、上面を地表面として自由面、4 方向の側面をローラー境界、底面は固定境界とした。初期応力は、側圧係数を 1.0 として、各要素に土被り厚さ相当

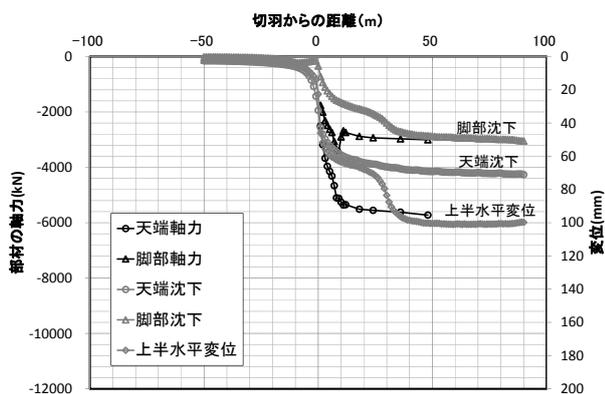
の自重を作用させた。

表-3.1に地山物性値, 表-3.2に構造物物性値, 表-3.3に解析ステップ, 表-3.4に解析ケースについて示す。

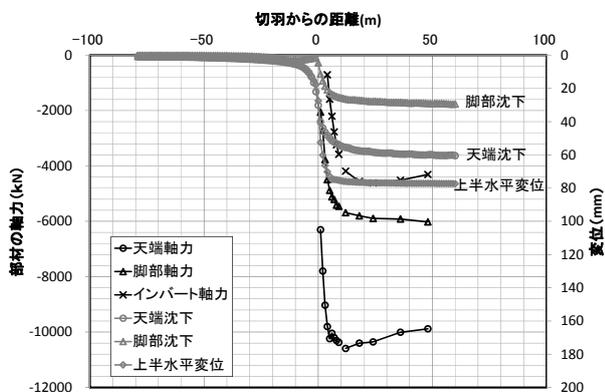
表-3.4 解析ケース

	掘削工法	ベンチ長 (m)	吹付け コンクリート強度	インバート ストラット
1	上部半断面	-	18	-
2	補助ベンチ付き 全断面	8	18	H-150

3.2 解析結果



(1)上部半断面工法



(2)補助ベンチ付き全断面工法 (早期閉合)

図-3.1 解析結果

図-3.1に解析結果を示す。上部半断面工法により施工し早期閉合を行わない場合と、補助ベンチ付き全断面工法により施工しインバートに鋼材を入れて早期閉合した場合を比較すると、早期閉合した場合に天端沈下・脚部沈下・上半部水平変位を抑制する効果が見られた。しかし、トンネル断面において、インバート部・脚部・天端部に働く全軸力、すなわち吹付けコンクリートと鋼アーチ支保に働く荷重を合わせた軸力値は、

上部半断面工法に比べてより大きな値となり、注意を要する場合のあることが分かった。

ただし、今回の検討では解析における入力値の扱いなどまだ不明な点が多く今後とも検証が必要である。

4. 模型実験による断面形状に関する検討

4.1 概要

表-4.1 模擬地盤とトンネル模型の諸元

模擬地盤	材料	豊浦砂(気乾状態)
	密度	1.40g/cm ³ 目標
トンネル模型	材料	モルタル
	巻厚	20mm
	奥行き	295mm
	打継目	なし

表-4.2 载荷方式

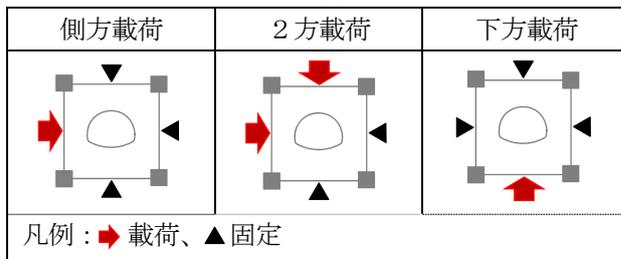


表-4.3 実験ケース

	インバート形状				
	2.0R1	1.3R1	1.1R1	1.0R1	無し
側方	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4	CASE 5
2方	CASE 6	CASE 7	CASE 8	CASE 9	CASE10
下方	CASE11	CASE12	CASE13	CASE14	-

インバート部の形状を変化させた際に、坑内変位や支保に発生する応力の影響について検討するため、トンネルに作用する荷重の方向を3種類変化させた模型実験を実施した。

実験は、図-4.1に示す二次元载荷試験装置を使用して行った。本装置は载荷板、载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の载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。表-4.1にトンネル模型と模擬地山の諸元を示す。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

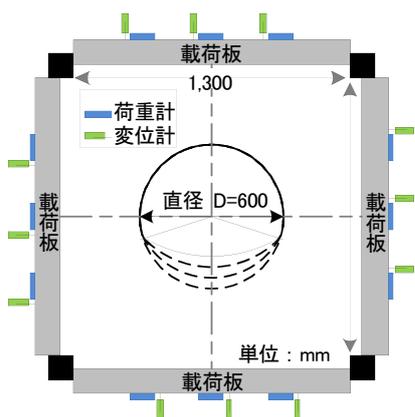


図-4.1 載荷装置と計測項目

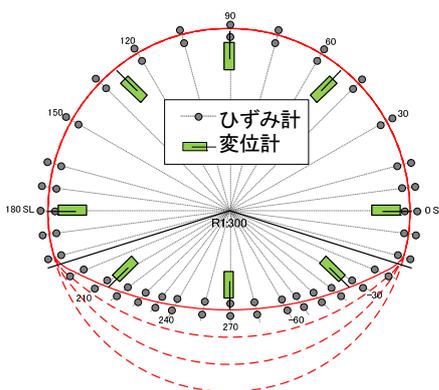


図-4.2 トンネル模型と計測項目

開始
トンネル模型作成
ひずみゲージ貼付 (模型内外面)
トンネル内に変位計を設置
トンネル模型を土槽内に設置
模擬地盤作成
載荷
終了

表-4.4 実験手順

し、形状は2車線道路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。模型地山は、気乾状態の標準砂を用いて空中落下させ、目標密度1.40g/cm³程度となるように作製した。計測は、図-4.2に示すトンネル模型のひずみおよび変位と、載荷板および行程盤の荷重と変位について行った。また、供試体の内面のひび割れも併せて観察した。

実験は表-4.2に示す3種類の載荷方式について行った。表-4.3に示すようにインバート形状は、半径をR1に対して2.0、1.3、1.1、1.0と変化させた4種類、およびインバート無しとし、計14ケース実験を実施した。実験の手順を表-4.4に示す。

4.2 トンネルの変形モード

図-4.3にトンネル模型の水平方向、および鉛直方向の内空変位の関係を示す。ここで、内空変位は各載荷方式において、インバート半径2.0Rのケースが3,500μ程度の圧縮ひずみが発生した時点における作用荷重(側方載荷250kN、2方載荷600kN、下方載荷200kN)の時点における値とした。まず、側方載荷では、水平方向は内空側へ、鉛直方向は地盤側へ変形し、横に縮み縦に伸びる変形モードとなった。形状による影響は、円形となる1.0Rが水平方向、鉛直方向ともに最も大きく変形し、梁盤形状に近い2.0Rが水平方向、直方向ともに最も小さくなった。2方載荷では、梁盤形状に近い2.0Rから円形となる1.0Rに形状が変化するに伴い、水平方向、鉛直方向変位ともに小さくなる傾向となった。下方載荷では、水平方向は地山側へ、鉛直方向は内空側へ変形し、横に伸び縦に縮む変形モード

なった。形状による影響は、水平方向については大差がなく、鉛直方向については梁盤形状から円形に変化するに伴い小さくなる傾向にあった。

実験結果から、側方からの荷重が卓越する場合には、インバートの形状を上半と同じ径にしても荷重作用方向の変位抑制効果はそれほど認められないが、下方から突き上げられるような荷重が作用する場合には、インバートの形状を上半と同じ径にすれば、荷重作用方向の変位抑制効果がある程度認められた。このことから、インバート形状を検討する際は、トンネルに作用する荷重の方向等を把握することが重要であると考えられる。

4.3 トンネル模型のひずみ分布

図-4.4に、各載荷方式において、インバート半径2.0Rのケースが3,500μ程度の圧縮ひずみが発生した時点における作用荷重(側方載荷250kN、2方載荷600kN、下方載荷200kN)の時点における内面と外面のひずみ分布図を示す。側方載荷の場合、SL付近およびすり付け部に注目すると、2.0Rから1.1Rでは局所的な曲げによりひずみの正負が反転している。一方、1.0Rは、このような局所的な曲げによる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2,800μから1,500μ程度の圧縮ひずみが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1.0Rに一部3,500μ程度を示す値があるが、それ以外は1,500μ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かった。

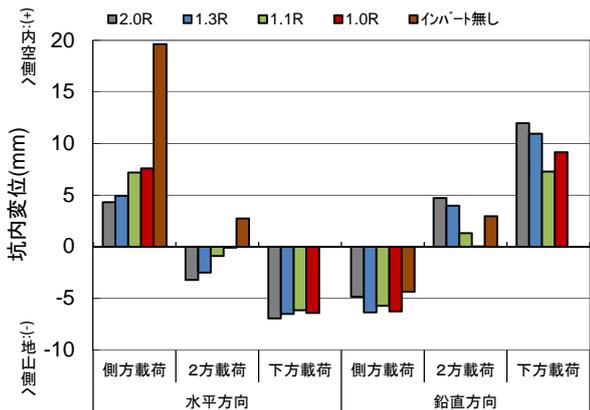
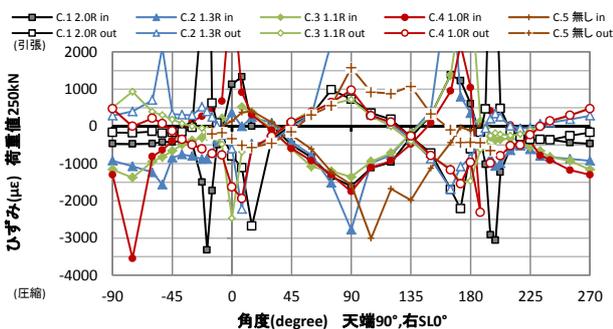
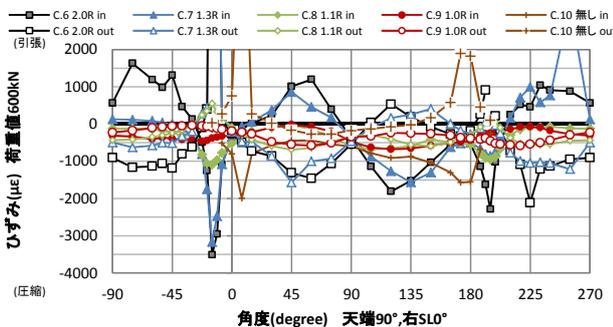


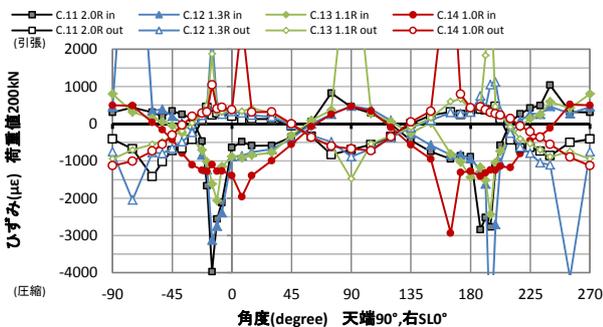
図-4.3 坑内変位の変形モードの比較



(a) 側方載荷 (CASE1~5)



(b) 2方載荷 (CASE6~10)



(c) 下方載荷 (CASE11~14)

図-4.4 ひずみ分布図

一方、2方載荷の場合、SL付近およびすり付け部に着目すると、2.0R、1.3Rでは局所的な曲げによりひずみの正負が反転している一方、1.1Rおよび1.0Rでは内外面ともに圧縮となっており、ひずみの値は小さい結果となった。

下方載荷の場合、SL付近およびすり付け部に着目すると、2.0R、1.3Rは局所的な曲げの正負が反転している。アーチ部においては、各ケースとも同程度のひずみの大きさとなったが、ひずみの正負は側方載荷と比較して逆になっている。また、インバート部においても、ひずみの大きさに有意な差は確認できないが、ひずみの正負はアーチ同様側方載荷と比較して逆になっている。

以上のことから、側方から荷重が作用する場合、インバート形状が梁盤に近い方が水平方向の変形を抑制できる。一方で、インバートの半径が大きくなるとSL付近およびすり付け部で曲げによりひずみの正負が反転し、構造的に不利になる。また、上半部に着目すると、模型に発生するひずみの大きさや分布はインバートの形状による影響はあまり受けない。下方から荷重が作用する場合、インバート形状が上半と同じ、つまりトンネル形状が円形の方が鉛直方向の変形を抑制できる。また、インバートの半径が小さくなるとS.L.付近およびすり付け部での曲げによるひずみの正負もなくなり、構造的にも有利となる。

5. まとめ

本稿では、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、早期断面閉合の掘削サイクルを忠実に再現した三次元数値解析を実施しその効果について検討を行った。また、インバート部の形状を変化させた模型実験を行い、早期断面閉合採用による効果や変位収束・抑制メカニズムならびに設計・施工上の留意点を検討した。

- (1) 地山の一軸圧縮強度が3MPa、地山強度比が1を下回るような地山においては、早期断面閉合を採用する事例が多く見られた。
- (2) 上部半断面工法とインバートに鋼材を入れて早期閉合した場合を比較すると、早期閉合した場合に変位を抑制する効果が見られた。しかし、部材に働く力が大きくなる可能性があり注意を要する。
- (3) インバート形状を検討する際は、トンネルに作用する荷重の方向等を把握することが重要である。