

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：砂金伸治，淡路動太，伊佐見和大

【要旨】

近年，不良地山におけるトンネル構造の安定化対策の一つとして採用されている早期断面閉合について，その実施効果や適用地山条件，支保構造等を検討するために，施工事例分析，計測データ分析，三次元数値解析および模型実験を実施した．その結果，早期断面閉合には，内空変位の抑制効果，脚部沈下の抑制効果，地山のゆるみ抑制効果，およびトンネル構造全体の耐力向上効果という4つの実施効果が認められた．また，早期断面閉合が効果的となる地山条件は，地山強度比が低く内部摩擦角の小さな地山条件であることが分かった．さらに，早期断面閉合のインバート部は，曲げ耐力を考慮した構造として設計を行うことが重要であることが分かった．

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，3次元数値解析，模型実験

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を確保するために，補助ベンチ付き全断面工法によって，インバートを切羽近傍で早期に設置し，トンネル断面をリング状に閉合する早期断面閉合（以下「早期断面閉合」という）の採用事例が増加している（図-1）．しかし，早期断面閉合における効果や採用すべき地山条件，インバート部の支保構造等が必ずしも明確になっていない．今後，公共投資が制約される中で，効率的かつ安全にトンネルの建設を行うためには，不良地山における早期断面閉合の効果을把握し，採用すべき諸条件を検討した上で工事に反映させる必要がある．

本研究では，早期断面閉合を実施したトンネルの施工事例分析および計測データの分析，早期断面閉合の掘削サイクルを再現した三次元数値解析，および断面閉合された支保構造に関する模型実験を行い，早期断面閉合の実施効果，適用地山条件，および支保構造の挙動特性について検討を行った．

2. 研究方法

2.1 早期断面閉合の実施効果に関する検討

早期断面閉合の施工事例分析を実施し，早期断面閉合の標準的な施工方法および適用条件等の整理を行った．これを踏まえて計測データの分析と数値解析を行うことで，早期断面閉合におけるトンネルの挙動特性を検証し，その実施効果について考察を行った．

2.1.1 施工事例の分析

早期断面閉合が実施されたトンネルの特徴を理解す

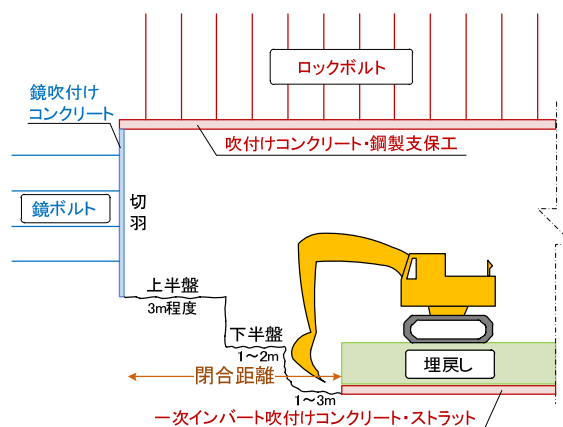


図-1 早期断面閉合の適用例

るために，上半切羽からトンネル掘削径 D に対して約 $2D$ 以内において補助ベンチ付き全断面工法によって断面閉合が実施された道路トンネルにおける事例分析を行った．調査対象としたトンネル数は 30 トンネルである．

2.1.2 計測データの分析

早期断面閉合の変位挙動に関する実施効果を検証するために，早期断面閉合の実施断面と未実施断面における変位データを比較し，その差異の検証を行った．分析対象とした早期断面閉合の計測断面数は約 200 である．また，早期断面閉合の未実施断面における計測データは日本道路協会「道路トンネル観察・計測指針」（1993 年）¹⁾（以下，H5 観察計測指針）で示されている実績値を対象とした．

2.1.3 実施効果に関する数値解析

早期断面閉合の実施効果を検証するために、三次元有限差分法によって掘削過程を模擬した数値解析を行った。図-2に解析モデルを示す。解析ではトンネル掘削径12.8m、土被り100mとし、地山はMohr-Coulombの破壊基準に従う完全弾塑性体の1層構造とした。解析領域は掘削の対称性を考慮した半断面とし、境界条件は、上面を自由面、側面をローラー境界、底面を固定境界とした。初期応力は側圧係数を1.0として、各要素に土被り100m相当の自重を作用させた。解析に用いた地山物性値および支保部材仕様を表-1、表-2に示す。この場合、地山強度比は0.33に相当する。吹付けコンクリートは、材令に応じた強度発現を考慮し、掘削ステップごとに弾性係数を変化させた。上下半およびインバート掘削は1mの逐次解析とし、切羽後方1mの位置から支保工を設置した。閉合距離がトンネル変位と支保部材の挙動に及ぼす影響を比較するために、閉合距離1m、4m、7m、11mの場合に加えて、上部半断面工法（閉合距離を30mと仮定）を模擬した5ケースについて解析を行った。

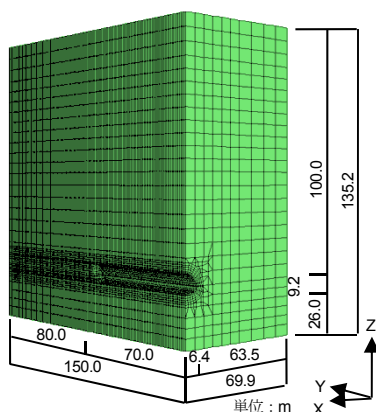


図-2 解析モデル図

表-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	粘着力 C (kN/m^2)	内部摩擦角 ϕ (deg)
21.0	150,000	0.35	200	30

表-2 支保部材仕様

	仕様	要素モデル	変形係数
吹付けコンクリート	t=250mm	Shell	強度発現考慮
鋼アーチ支保工	NH-200	Beam	2×10^5 MPa
ロックボルト	D25, L=4m	Beam	2×10^5 MPa

2.1.4 早期断面閉合の実施上の留意点に関する検討

(1) 早期断面閉合における施工時の安全性への配慮

早期断面閉合を実施するためには、補助ベンチ付き全断面掘削を行う必要がある。上下半切羽が近接することで掘削高が高くなることから、切羽の自立性を確保するために、補助工法が併用される事例が多い。そこで、事例分析を実施して早期断面閉合における補助工法の採用実績の整理を行った。また、早期断面閉合の実施による切羽の変形挙動を調べるために、大土被り脆弱地山において閉合距離を変化させた3次元数値解析(2.1.3の解析ケース)を用いて、閉合距離の違いによる切羽の押し出し量(トンネル軸方向変位)の比較を行った。

(2) 早期断面閉合における支保部材数量と工費の比較

早期断面閉合は、脆弱地山においてトンネル及び周辺地山を安定化し、一定の掘削工程を確保することができる工法である。一方、インバート部まで1次支保を実施することによるサイクルタイムや支保部材数量の増加および補助工法の併用等による工費の増大も想定される。そこで、早期断面閉合を実施したトンネルにおける支保部材数量と工費の増加量について事例分析を行った。

2.2 早期断面閉合の適用地山条件に関する検討

早期断面閉合は、リング状に閉合された剛な支保構造により地山への内圧効果を発揮して地山の塑性化を抑制し、トンネルの安定化を図る工法である。そのため、早期断面閉合が効果を発揮する地山条件はトンネル掘削に伴い塑性域が広く形成される条件下であることが想定される。したがって、これまでの多くの研究事例^{2)~5)}で指摘されているように、早期断面閉合は地山強度比が1を大きく下回るにつれて、より効果が発揮されると考えられる。ここでは、現場で比較的簡易に求めることができる一軸圧縮強度を基に換算される地山強度比が同一となる条件下において、内部摩擦角 ϕ と粘着力 c の変化により、どの程度挙動の違いが認められるかを数値解析により検証し、早期断面閉合における地山条件の適用範囲について考察を行った。

2.2.1 適用地山条件の事例分析

早期断面閉合が採用された地山条件の傾向を調べるために、竹林(2001)⁶⁾に従い、トンネルの岩種を内部摩擦角 $\phi 30^\circ$ を境とし、粘着力 c が顕著で $\phi 30^\circ$ 未満の粘土質もしくは層状の地山を c 系地山、内部摩擦角が概ね 30° 以上の砂質もしくは塊状の地山を ϕ 系地山として分類を行い、中・大土被り部と小土被り部における地山条件の適用傾向の整理を行った。

2.2.2 適用地山条件に関する数値解析

早期断面閉合において地山物性値の影響による挙動の違いを理解するために、閉合距離を変化させた3次元数値解析(2.1.3の解析ケース)を用いて検討を行った。解析に用いた地山物性値は $\phi=30^\circ$, $c=200\text{kPa}$ を基本ケースとし、同程度の一軸圧縮強度(約0.7MPa)となるように、c系地山では $\phi=15^\circ$, $c=260\text{kPa}$, ϕ 系地山では $\phi=45^\circ$, $c=160\text{kPa}$ を用いて解析を行った。

2.3 早期断面閉合のトンネル構造に関する検討

通常、山岳トンネルにおける下半からインバート部は上半アーチ部に比べて曲率半径が大きく、また下半とインバートの連結は隅角部となっていることが多い。そのため、標準的な断面において早期断面閉合を実施すると、上半アーチと下半およびインバート部では支保部材に発生する断面力の挙動や、部材としての役割に違いがあることが想定される。そこで、数値解析および模型実験を行うことで、早期断面閉合における支保部材の挙動特性と役割について検討を行い、早期断面閉合における望ましいトンネル構造について考察を行った。

2.3.1 支保部材挙動に関する数値解析

トンネル構造を早期に閉合することによる支保部材の断面力やその挙動への影響を理解するために、閉合距離の違いを再現した3次元有限差分法による数値解析(2.1.3の解析ケース)を用いて、支保部材の軸力および曲げモーメントの分布と閉合距離の関係について検討を行った。

2.3.2 インバート形状に関する数値解析

上半アーチ部とインバート部の曲率半径の違いによる支保部材の断面力挙動を検討するために、上半アーチ部とインバート部の構造半径比(インバート部 R /上半アーチ部 R)の違いを模擬した3次元有限差分法による再現解析を実施した。通常、インバート部の構造半径比は2.5~3.0Rとされる事例が多く、2.1.3で実施した数値解析では構造半径比約2.5Rを採用している。ここでは、トンネルの断面形状として、構造半径比2.5Rに加えて2.0R, 1.5R, 1.0Rに変化させた4ケースについて解析を行った。数値解析におけるモデル空間、境界条件、地山物性値(表-1)および支保部材仕様(表-2)は2.1.3における数値解析と同条件である。なお、閉合距離はすべてのケースにおいて7mとしている。

2.3.3 インバート形状に関する模型実験

早期断面閉合の支保部材挙動における断面形状の違いを検証するために、上半アーチ部とインバート部の

構造半径比(インバート部 R /上半アーチ部 R)の違いを模擬した模型実験を実施した。実験は、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。表-3に模型実験の諸元を示す。トンネル模型はモルタルを用いて概ね1/20の大きさで作製し、形状は2車線道路トンネル断面を模擬した。アーチ部の半径は300mmの単心円として、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、すり付け部の増厚は施していない。模型地山は、気乾状態の豊浦砂を用いて空中落下させ、

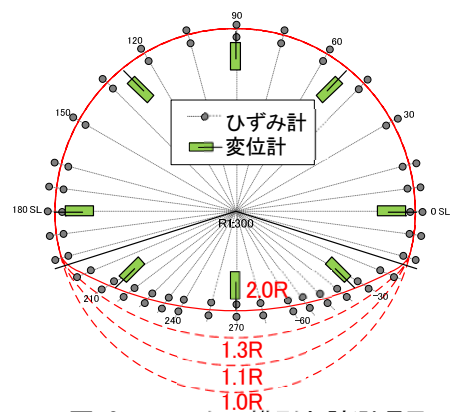


図-3 トンネル模型と計測項目

表-3 模型実験の諸元

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			
載荷方式					
模型形状					
構造半径比	CASE 1 2.0R	CASE 2 1.3R	CASE 3 1.1R	CASE 4 1.0R	CASE 5 無し

目標密度 1.40g/cm³程度となるように作製した。計測は、載荷板の荷重と変位に加えて、図-3に示すトンネル模型のひずみと変位について実施した。

実験は大土被りにおける側圧係数 1 の状態を模擬して 2 方向載荷により実施した。インバート形状は、半径を上半 R に対して 2.0R, 1.3R, 1.1R, 1.0R と変化させた 4 種類、およびインバート無しとする計 5 ケースについて実施した。

3. 研究結果

3.1 早期断面閉合の実施効果に関する検討結果

3.1.1 施工事例の分析結果

(1) 早期断面閉合の実施状況

図-4 (a) に事例分析を実施したトンネルの土被り区分について示す。対象トンネルのおよそ半数が、土被り 2D 以下となる小土被り部に相当し、残り半分が土被り 2D 以上の中～大土被り部（以下、土被り 2D 以上を中・大土被り部と称する）に相当している。したがって、早期断面閉合が小土被り部と中・大土被り部の両者で、脆弱地山におけるトンネルの安定化対策として採用されていることが分かる。

図-4 (b), (c) に早期断面閉合における閉合距離と閉合一施工長の傾向を示す。閉合距離とは、トンネル上半切羽から断面閉合が完了した位置までの最大の距離を示し、閉合一施工長とは、1 回あたりに断面閉合を行う施工長を示す。これによれば、閉合距離は 9 割以上の事例において 1.0D 以内であり、その中で特に約 3 割の事例では 0.5D 以内で断面閉合が行われている。したがって、上半切羽距離 1.0D 以内で断面閉合を行うことが早期断面閉合の標準的な施工事例であるといえる。一方、閉合一施工長については、1～3m の範囲でほぼ同程度の施工事例が認められ、施工状況に合わせた一施工長が各現場で採用されており、標準的な値の傾向は認められない。

早期断面閉合における支保部材は、すべての事例で

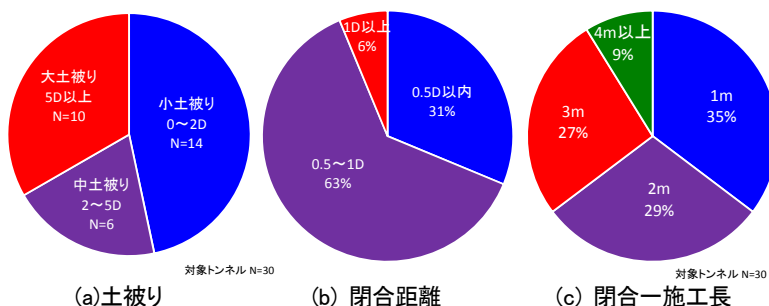


図-4 早期断面閉合の適用例

上半アーチ部に鋼アーチ支保工が採用されていたが、インバート部では図-5に示すように、鋼インバート支保工の採用率は小土被り部で約 4 割、中・大土被り部で約 9 割と異なっている。この違いは、中・大土被り部では小土被り部より、支保工に作用する土圧が高く、より剛な構造が採用されているためと考えられる。

(2) 早期断面閉合に期待される作用効果

事例調査の結果から、各トンネルにおいて早期断面閉合に期待された作用効果を、以下の 4 つに分類した。

1) 内空変位の抑制効果: 早期に支保構造をリング閉合することでトンネル構造の剛性を高め、内空変位を抑制する効果。中・大土被りの押し出し性地山などで過大な内空変位が生じる時に、建築限界の確保、支保工の変状発生防止を期待して採用されている。

2) 脚部沈下の抑制効果: 早期に支保構造をリング閉合し、支保工脚部での応力集中を緩和することで、地耐力不足地山における脚部の安定性を向上させる効果。小土被り部の脆弱地山などで脚部沈下の増大によってトンネルが不安定化することを防止すること、もしくは脚部沈下を抑制することで地表面沈下を抑制する効果を期待して採用されている。

3) 地山のゆるみ抑制効果: 早期に支保構造をリング閉合することで、支保の内圧効果を高め、地山のゆるみを抑制する効果。トンネル自体の安定性に加えて、トンネル周辺構造物や周辺環境、地すべりへの影響を極力抑制したいときに採用されている。

4) トンネル構造全体の耐力向上効果: 早期に支保構造をリング閉合することで、トンネル全体で軸力が支配的となる構造（以下、軸力構造）として、支保工の保有する耐力を有効に活用することで、トンネル構造全体の耐力の向上をもたらす効果。押し出し性地山などの過大な塑性土圧の作用により、トンネル構造が破壊されるのを防止する目的で採用されている。また、高強度吹付けコンクリートや高耐力鋼アーチ支保工、鋼インバート支保工の採用による支保部材自体の高耐力化

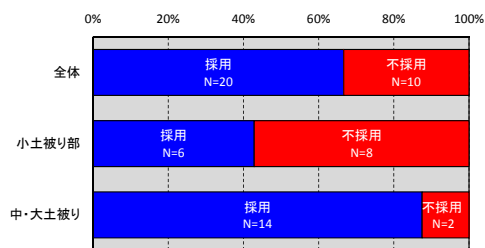


図-5 鋼インバート支保工の採用率

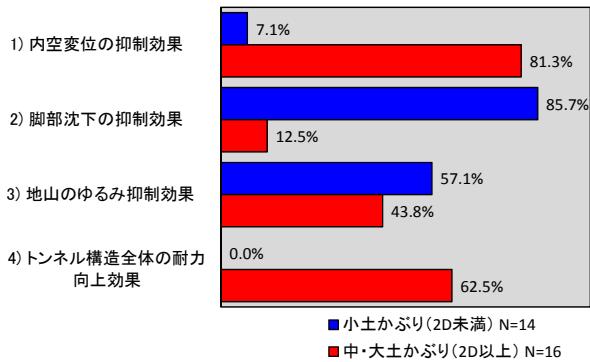


図-6 早期断面閉合に期待された実施効果の傾向

と合わせて実施されることが多い。

図-6に、中・大土被り部と小土被り部において、早期断面閉合に対し各現場で期待された作用効果の傾向を示す。中・大土被り部における大半のケースで、1) 内空変位の抑制効果と合わせて、4) トンネル構造全体の耐力向上効果を期待して早期断面閉合が採用されていることが分かる。一方、小土被り部では脚部沈下の増大や地表面沈下の抑制を目的として2) 脚部沈下の抑制効果を期待して早期断面閉合が採用されたケースが顕著となっている。また、トンネル自体の安定性に加え、トンネル周辺への影響を低減することを目的とした3) 地山のゆるみ抑制効果を期待して早期断面閉合を採用した事例が中・大土被り部と小土被り部の両

者で認められる。このように、早期断面閉合は、中・大土被り部と小土被り部で異なる実施効果が期待されていることが示唆される。

3.1.2 計測データの分析結果

早期断面閉合を実施した断面の各施工段階の変位量と最終変位量の関係を図-7に示す。図中の実線は早期断面閉合の実施断面における計測データの回帰結果を示している。図中の破線はH5観察計測指針で示されている早期断面閉合を実施していないと考えられる過去の施工実績を集積した各施工段階の変位量と最終変位量の関係における回帰結果を示している。なお、H5観察計測指針で示されている計測データは通常の2車線断面規模のトンネルにおいて支保構造が標準の支保パターンと大きく異ならず、さらに初期値測定時の切羽距離が5.5m以下の場合に限定している。また、計測断面の中には、上半先進工法を含んでおり、初期変位の段階で下半掘削が実施されていない計測データも含まれていることに注意を要する。

図-7(a), (b)に初期変位速度 (mm/1day) と最終変位量の関係を示す。これによれば、天端沈下量と上半内空変位量の両者でバラツキが大きいことが分かる。これは早期断面閉合が実施されるような地山条件では、インバート部の掘削や補助工法の併用などにより、掘進速度が遅く、また掘進ペースも一定ではないため、

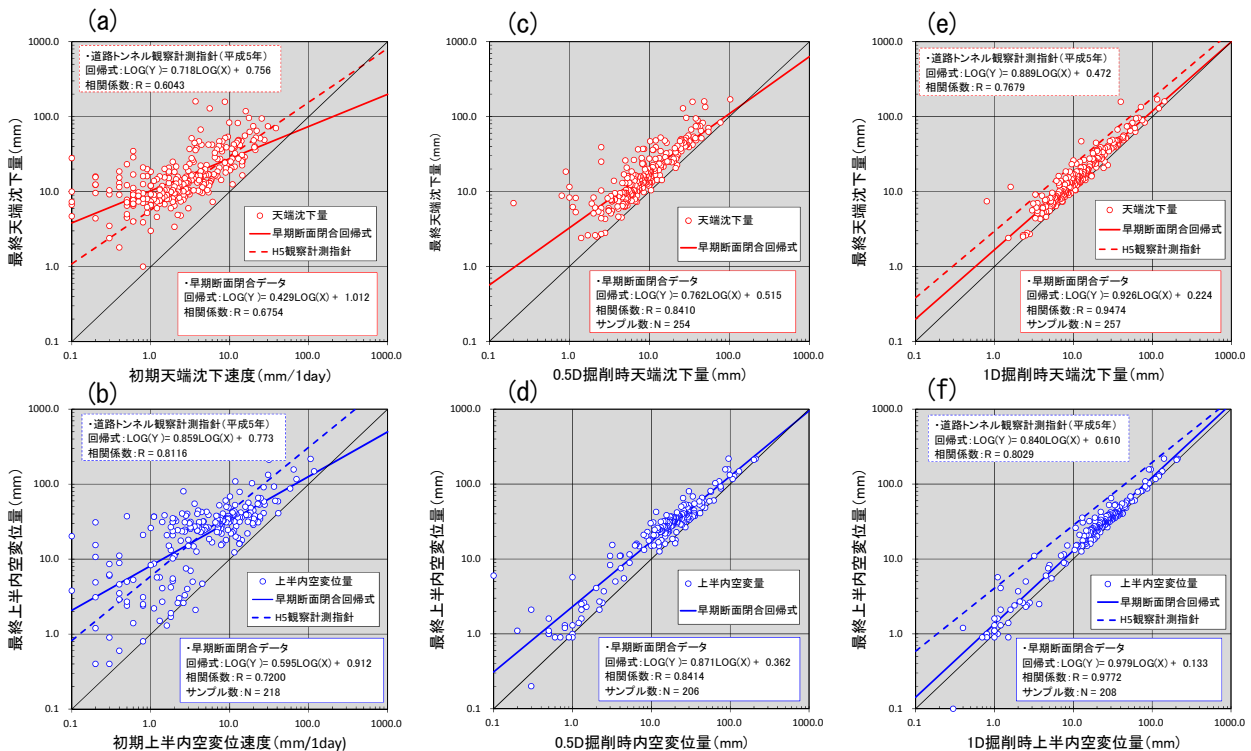


図-7 施工段階ごとの変位と最終変位の相関図

各断面間での一日後の上半切羽進行に差があり、初期変位速度 (mm/day) のバラツキが大きくなるためと考えられる。一方、図-7(c), (d)に示すように、0.5D 上半掘削時の変位量を横軸にとった時の最終変位量との関係は、初期変位速度 (mm/day) を横軸にとった時の関係 (図-7(a), (b)) より、相関係数が高くなっている。つまり、初期の変位量と最終値の関係を把握する際、早期断面閉合を実施するような地山条件下では、掘進ペースが一定ではない初期変位速度 (mm/day) を用いるより、断面間の掘進量を一定にした 0.5D 上半掘削時変位量を用いる方が最終値の予測精度が高いと考えられる。

図-7(e), (f)に横軸に 1D 掘削時の変位量をとった場合の最終変位量との関係を示す。早期断面閉合を実施した断面の計測データは図-4(b)に示したように、基本的に 1.0D 以内で閉合されている。これによれば、H5 観察計測指針における回帰式 (図中の破線) よりも、早期断面閉合を実施した計測データの回帰式 (図中の実線) の方が下側に位置している。つまり、早期断面閉合の実施断面では、早期断面閉合の未実施断面に比べて、初期の変位量に対する最終変位量の伸びが小さいことを示唆している。すなわち、早期断面閉合は、初期に発生した変位量に比較して、閉合後のトンネル変位を抑制する効果があると考えられる。

3.1.3 実施効果に関する数値解析結果

(1) トンネル変位

図-8 に断面閉合前と閉合後のトンネル変位における解析結果を示す。早期断面閉合では、上部半断面工法 (閉合距離 30m) と比較して天端沈下量, 脚部沈下量, 内空変位量のすべてにおいて変位の低減効果が認められる。また、閉合距離が短くなるほど、変位の最終値が小さくなっている。上半内空変位量における閉合前変位発生率は閉合距離によらず 95%以上となっている。これは、断面閉合後、直ちに内空変位の進行が抑制され、閉合後の増分変位が小さいことを示している。一方、天端・脚部沈下量については、断面閉合によって変位速度が急激に抑制される挙動は示さず、全体的に変位速度が緩やかになることで最終変位量が抑制される挙動を示すと考えられる。

(2) 支保部材軸力

図-9 に吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工を合成した支保部材の軸力に関する解析結果を示す。上半アーチ部では閉合距離によらず、ほぼ同程度の軸力が発生しているが、脚部からインバート部では、閉合距離が短いほど高い軸力が発生している。

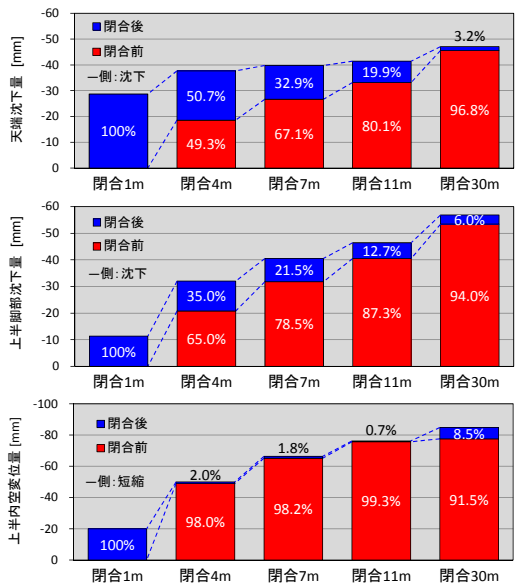


図-8 各閉合距離における変位発生率の比較

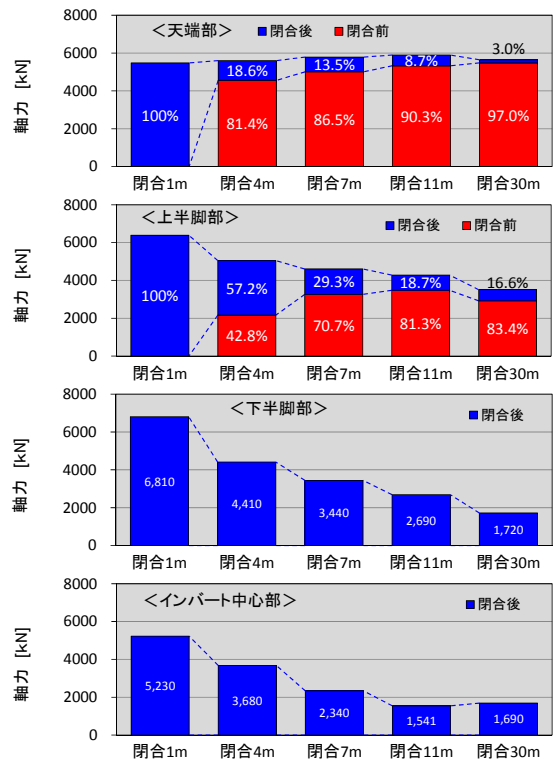
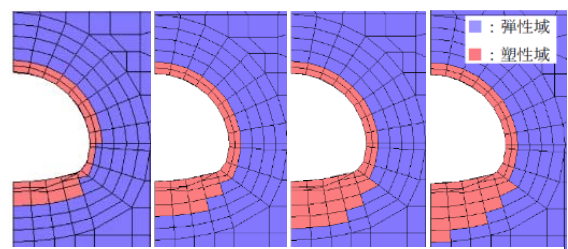


図-9 各閉合距離における軸力発生率の比較



(a) 閉合 1m (b) 閉合 4m (c) 閉合 7m (d) 閉合 11m

図-10 閉合距離の違いによる塑性域分布図

(3) トンネル周辺塑性域

図-10 にトンネル周辺の最終的な塑性域の発生状況を示す。塑性域の広がり、閉合距離が短くなるほど小さくなっている。トンネル掘削に伴う塑性域の拡大は、断面閉合と同時に収束傾向を示し、断面閉合後の塑性域の拡大は顕著ではない。これは、上半内空変位量の挙動と類似している。

以上の結果より、トンネル形状が同一の場合、閉合距離が短いほど、トンネル変位と塑性域は抑制されるが、支保部材に発生する軸力は下半～インバート部にかけて大きくなり、トンネル全周に渡ってほぼ一様に軸力が発生していることが分かる。つまり、トンネル断面の閉合距離を短くすることで、早期に支保工のリング構造が構築され、効率的に軸力を伝達することで、地山への内圧効果が高まっていると考えられる。すなわち、塑性域が発生すると考えられる大土被り脆弱地山における早期断面閉合の実施は、支保の内圧効果を効率的に発揮させることで、トンネル変位と塑性域の広がりを抑制し、トンネルの安定性を高めるメカニズムが期待できると考えられる。

3.1.4 早期断面閉合の実施上の留意点に関する検討結果

(1) 早期断面閉合における施工時の安全性への配慮

図-11 に早期断面閉合の実施時に併用された補助工法の事例分析結果を示す。これによれば、早期断面閉合の実施には大半のケースで、長尺先受け工と長尺鏡ボルト工が併用されていることが分かる。

大土被り部において閉合距離を変化させた3次元数値解析による切羽面のトンネル軸方向変位分布図を図-12 に示す。これによれば、上半切羽からインバート掘削までが5m以内となる閉合距離1mと4mのケースでは、トンネル軸方向変位が140mmを超えているが、それ以上の閉合距離から上半先進工法では110mm前後となり距離の影響は軽微となる。したがって、切羽からインバート掘削までの距離を極端に短くした場合は、切羽の押し出し量が大きくなり、切羽の自立性を低下させる懸念があるため、施工の安全性を確保するために、補助工法の必要数量が多くなることを考慮する必要が有ると考えられる。

(2) 早期断面閉合における支保部材数量と工費の比較

早期断面閉合の実施による支保部材数量と工費の増加量の例として、標準パターンDIIと早期断面閉合を採用したCase 1およびCase 2の数量・工費の比較表を表-4に示す。なお、工費には補助工法の増加分は含まれていない。このように、早期断面閉合の実施は、

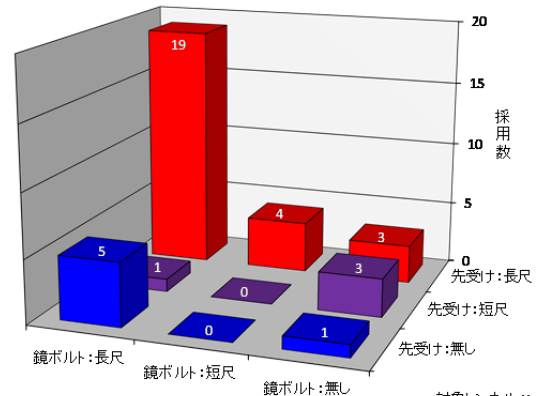


図-11 早期断面閉合が実施されたトンネルにおける補助工法の採用実績

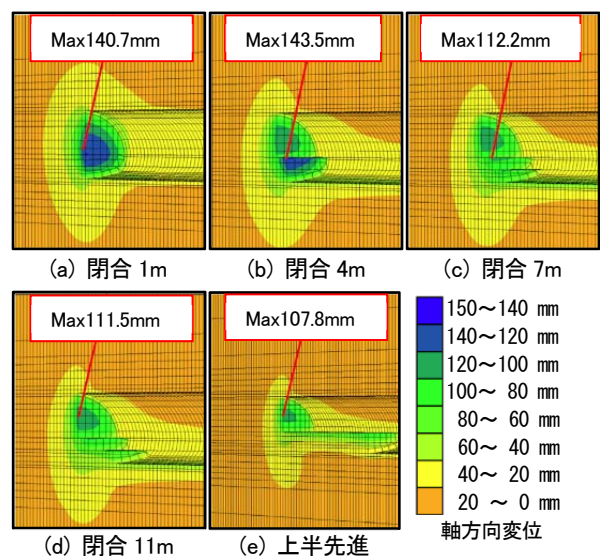


図-12 早期閉合距離を変化させた3次元数値解析結果における切羽の軸方向変位分布図

表-4 早期断面閉合における数量・工費の比較例

項目(1mあたり)		上半先進	早期断面閉合	
		D II	Case 1	Case 2
掘削	断面積 [m ²]	69.7	97.3	97.3
	比率	1.0	1.40	1.40
吹付けコンクリート	設計強度 [MPa]	18	18	36
	厚さ [mm]	200	250	250
	数量 [m ³]	7.7	14.1	14.3
	体積比率	1.00	1.83	1.86
鋼アーチ支保工	仕様	H150 上下	H200 上下	H200 全周
	長さ [m]	21.9	21.9	34.9
	重量 [kg]	682	1093	1742
	重量比率	1.00	1.60	2.55
ロックボルト	仕様	TD24	TD24	TD24
	長さ [m]	4	4	4
	本数 [本]	19	19	19
	延長比率	1.00	1.00	1.00
工費比較	上下半	1.00	1.27	1.41
	1次インバート	—	0.09	0.17
	比率	1.00	1.36	1.58
補助工法	鏡ボルト	—	12.5m × 15本	12.5-15.5m × 15本

単純に標準パターン DII と比較して、掘削 1m あたりの単価で約 1.3~1.6 倍の工費の増大が想定されるため、その実施効果と必要性について十分に検討した上で採用する必要があると考えられる。

3.2 早期断面閉合の適用地山条件に関する検討結果

3.2.1 適用地山条件の事例分析結果

図-13 に小土被り部と中・大土被り部における地山条件の事例分析結果を示す。これによれば、小土被り部ではφ系地山（特に未固結の砂質地山）での適用がやや優勢であるのに対し、中・大土被り部ではc系地山（特に層状の泥岩や粘板岩系）における適用事例が多いのが分かる。このように中・大土被り部では、同程度の地山強度比でも、拘束圧依存性が低く、塑性域の拡大が生じやすいc系地山で、早期断面閉合が採用される事例が多くなっていると考えられる。

3.2.2 適用地山条件に関する数値解析結果

(1) トンネルの変位挙動

図-14 に変位挙動に関する解析結果を示す。基本的にφ=30°のケースと比較して、φ系地山（φ=45°）では変位量が小さく、c系地山（φ=15°）で変位量が大きくなる傾向が認められる。天端沈下量、上半水平変位量はいずれの地盤定数でも閉合後に収束傾向を示しているが、上半切羽到達時点の先行変位量は、φの低下に伴って大きくなり、影響範囲が切羽前方の広い範囲に広がっていることが分かる。一方、上半脚部沈下の値は天端沈下および上半水平変位と比較して、その差は小さいことから、トンネルの変形モードは共下がり傾向は示さず、トンネル全周からの土圧の高まりにより、変形が増大していると考えられる。

(2) トンネル周辺の塑性域

図-15 にトンネル周辺の最終的な塑性域の発生状況を示す。トンネル周辺の塑性域は、φの低下と共に拡大しており、同一の地山強度比を示す地盤定数であっても、c系地山かφ系地山かによって、トンネル変位および塑性域の広がり方が大きく異なることが分かる。

以上の結果から、φ系地山は、同一の地山強度比であっても、変位量および塑性域が小さくなるため、トンネル安定上の問題は生じにくい地山条件であると考えられる。一方、c系地山では、トンネル周辺の塑性域が拡大しやすく、トンネルの安定上の問題が生じやすい地山条件であると考えられる。さらに、c系地山において早期断面閉合を実施する場合には、トンネル変位と塑性域の増大によって支保工の変形量も大きくなるため、トンネル構造全体の耐力を向上させることが必要になると考えられる。

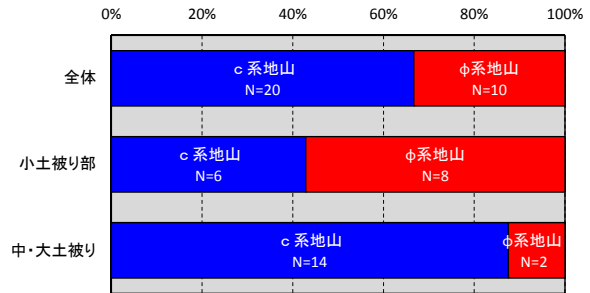


図-13 早期断面閉合の適用地山実績

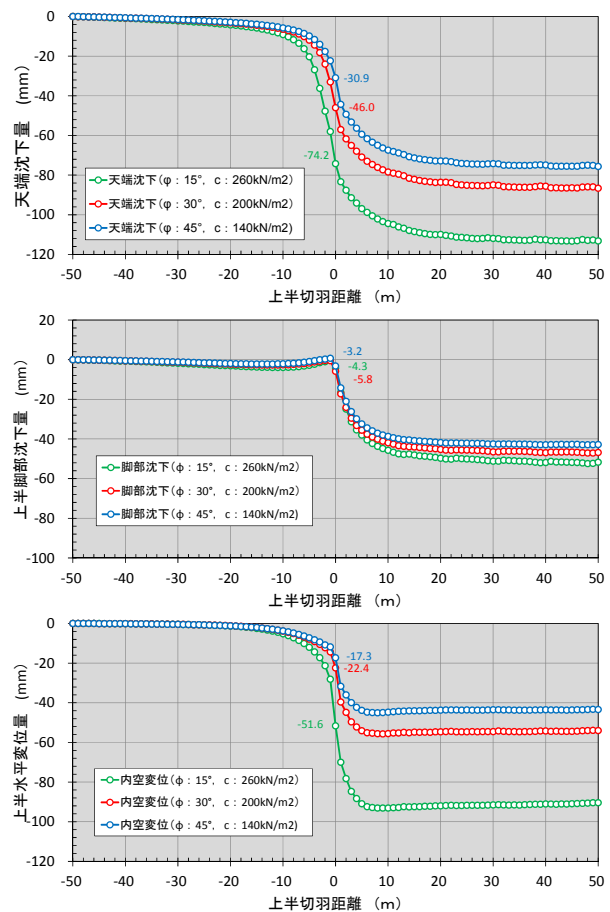


図-14 地盤定数の違いによる変位挙動の比較

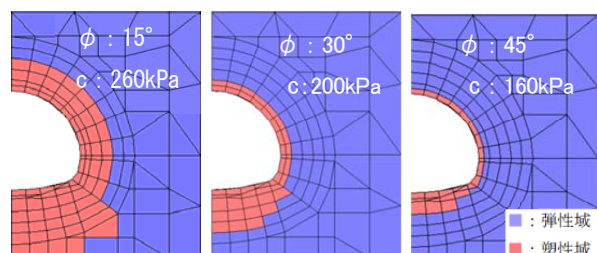


図-15 地盤定数の違いによる塑性域分布図

3.3 早期断面閉合のトンネル構造に関する検討結果

3.3.1 支保部材挙動に関する数値解析結果

(1) 支保部材の断面力分布

図-16 に吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工を合成した支保部材に発生する軸力と曲げモーメントの分布図を示す。上半アーチ部では曲げモーメントの発生が軽微で圧縮力が卓越した挙動（以下、圧縮部材と称する）が特徴的であるが、インバート部では、隅角部側とトンネル中心側で曲げモーメントの正負が反転し、閉合距離が短くなるほど圧縮力の増大と共に、大きな曲げモーメントが発生する挙動（以下、曲げ圧縮部材）が顕著となる。一方、上半脚部（測点 c）では、閉合距離が長くなるほど、地山側に凸となる曲げモーメントが大きく発生している。

図-17 は支保部材の各点における軸力と曲げモーメントの関係を、掘削に伴う挙動の観点から示したものである。天端部（測点 a）では、閉合距離によらず、曲げモーメントの発生は軽微で、圧縮部材としての挙動が認められる。上半脚部（測点 c）は、支保構造が閉合されるまでは曲げが卓越するが、断面閉合後には軸力が高まる挙動を示している。したがって、閉合距離が長いほど軸力は小さく、曲げモーメントは大きくなる傾向を示す。一方、インバート隅角部（測点 e）では、軸力と曲げモーメントの増加勾配は閉合距離によらず一定であり、閉合距離が短いほど軸力と曲げモーメントの両者の発生量が高くなる傾向を示している。

(2) トンネル構造全体の耐力向上効果

一般的な山岳トンネルの施工では、上半、下半、インバートの分割掘削を行い、支保工を設置している。このため、上半、下半、インバート部の接合部は、連結がなされるまで開放された形状となる。早期断面閉合が必要となるような大きな変位が発生する地山条件では、図-17 の上半脚部の断面力挙動で認められたように、リング閉合がなされるまで、部材に軸力が導入されず、曲げが卓越することになる。吹付けコンクリートのような圧縮部材として、その効果が発揮される支保部材では、断面閉合がなされないと解放された支保工連結部に曲げが発生し、トンネル構造が不安定化する懸念がある。したがって、早期断面閉合は、閉合距離が短くなるにつれて、支保部材に速やかに軸力を導入し圧縮部材としての断面力挙動に変化させることが可能となり、トンネル構造全体の耐力を高める効果があると考えられる。

(3) インバート部断面力挙動と支保部材としての役割

標準的なトンネル形状におけるインバート部は上半

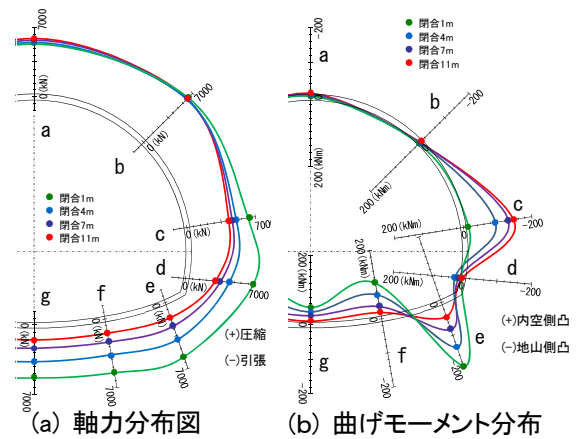


図-16 支保部材断面力分布図

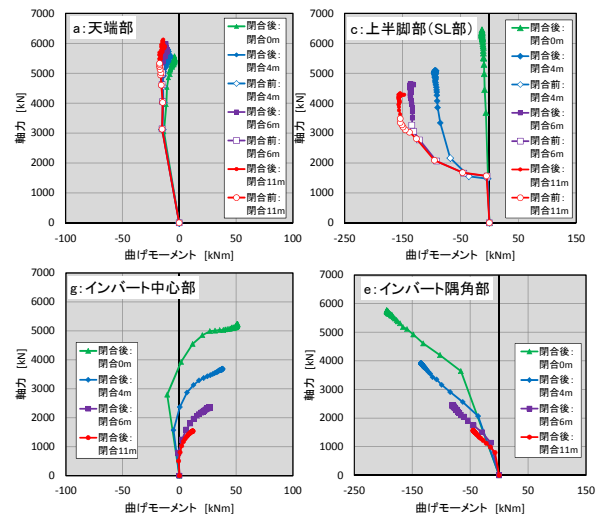


図-17 各閉合距離における断面力挙動の比較

アーチに対して、構造半径が大きく、また、接合部において隅角部をなすことが多いため、アーチアクションを得にくい。特に早期断面閉合を行う場合には、インバート部には図-16、図-17 に示したように圧縮力と同時に大きな曲げが発生し、曲げ圧縮部材としての特徴が顕著になる。したがって、標準的なトンネル形状において、早期断面閉合によるトンネル安定化を志向する場合には、インバート部に曲げ耐力が期待できる支保部材を採用することが重要になる。すなわち、標準的なトンネル形状で早期断面閉合を実施する際には、インバート部の曲げ圧縮部材としての特徴に配慮した設計および施工を行うことが望ましいと考えられる。

3.3.2 インバート形状に関する数値解析結果

(1) トンネル変位

各ケースにおける天端沈下量、上半脚部沈下量および上半内空変位量は構造半径比によらず、ほぼ同程度の変位量が発生しており、構造半径比の違いによる変位抑制効果は顕著ではない。ただし、図-18 に示すよ

うに、構造半径比の減少に伴ってインバート中心部の隆起量は減少傾向を示しており、構造半径比が小さいほど、その抑制効果は高いと考えられる。

(2) 支保部材断面力

各ケースにおける吹付けコンクリートと鋼アーチ支保工を合成した支保部材の軸力は、上半アーチから下半脚部までは、構造半径比によらず、ほぼ同程度の軸力である。一方、図-19 に示すようにインバート中心部は構造半径比の減少に伴い圧縮力が高くなっている。つまり、構造半径比の減少に伴いインバート中心部での隆起量が小さくなるにつれて、インバート中心部で高い圧縮力が発生していることが分かる。

図-20 に支保部材各点における軸力と曲げモーメントの掘削に伴う挙動を示す。天端～下半脚部では、構造半径比によらず類似した挙動を示すが、インバート隅角部（測点 e）およびインバート中心部（測点 g）では、軸力と曲げモーメントの増加勾配が構造半径比の減少に伴い、軸力側に傾斜してくる。つまり、構造半径比が小さくなるほど曲げモーメントが減少して圧縮力が高くなり、曲げ圧縮部材から圧縮部材としての特徴が顕著になってくることが分かる。

(3) トンネル周辺塑性域

図-21 にトンネル周辺の最終的な塑性域の発生状況を示す。構造半径の減少に伴いインバート部の掘削高さが深くなることで掘削する体積が大きくなるが、インバート中心部における塑性域の到達深さは、構造半径比の減少に伴って浅くなっている。また、インバート掘削面からの塑性域の幅は、構造半径比の減少に伴って薄くなっており、構造半径比が 1.0R の場合では上半アーチ部と同程度の塑性域の幅となっている。

以上の結果から、一般的な山岳トンネルにおけるインバート部の構造半径比が 2.5R の場合では、インバート部は曲げ圧縮部材としての特徴が顕著となるが、インバート部の構造半径を上半アーチ部に近づけていくことで曲げモーメントの発生は減少し、圧縮部材としての特徴が顕著となってくることが分かった。インバート部が圧縮部材となることで、底盤部での地山への内圧効果が高まり、インバート部の隆起量（盤ぶくれ）と地山の塑性化を抑制する効果が高くなる傾向が認められる。ただし、閉合距離が同程度の場合には、閉合後の変位の増分が少なくなるため、インバート部の構造半径比を減少させても、天端沈下量、脚部沈下量および内空変位量の最終値に対する変位抑制効果の向上は顕著ではない。したがって、早期断面閉合の実施において、トンネル形状をより真円に近づけるとい

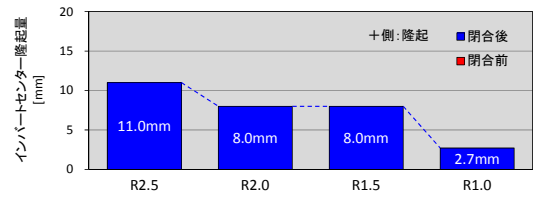


図-18 インバート中心部における隆起量の比較

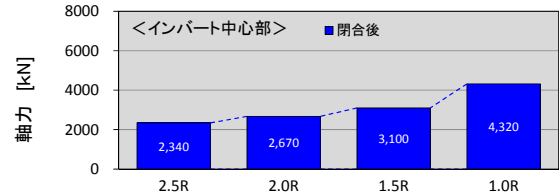


図-19 インバート中心部における軸力の比較

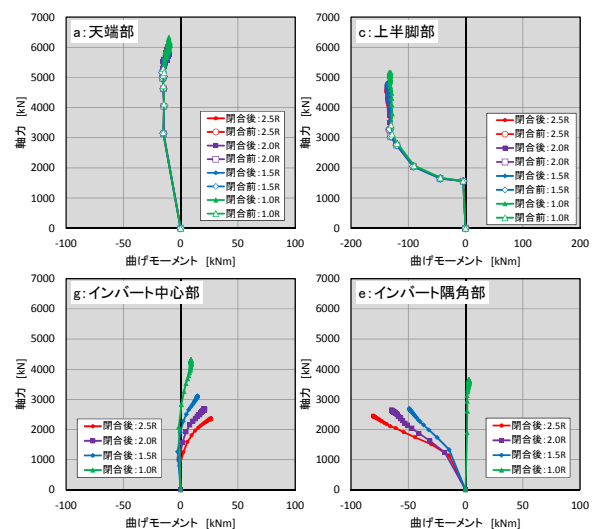


図-20 各閉合距離における軸力発生率の比較

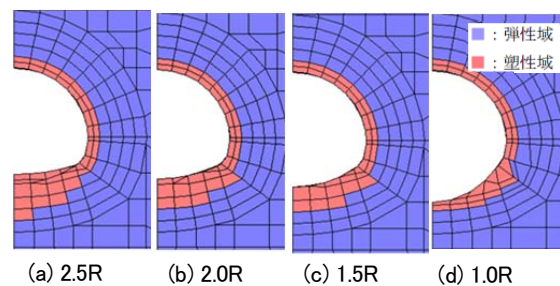


図-21 構造半径比(インバート R/上半 R)の違いにおける塑性域分布の比較

う対策は、盤ぶくれ対策、もしくは過大な変位に対するトンネル構造全体の耐力向上を目的とする時には、さらに有効な手段になると考えられる。

3.3.3 インバート形状に関する模型実験結果

(1) トンネル模型の変形モード

図-22 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、内空変位はインバート構造半径比 2.0R のケースで 3,500 μ 程度の圧縮ひ

ずみが発生した作用荷重 (600kN) の時点における値とした。計測結果は、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となり、2.0R から 1.0R に形状が変化するに伴い、水平方向、鉛直方向ともに変位が小さくなる傾向となった。このように、リング閉合が完了された支保構造では、同程度の載荷荷重において、インバートの構造半径比が小さいほど、トンネル変位の抑制効果は高くなると考えられる。一方、インバートの無いケースでは水平方向変位についても内空側へ変位する変形モードを示している。

(2) トンネル模型のひずみ分布

図-23、図-24 に、作用荷重 600kN の時点における中立軸ひずみと差分ひずみの分布図を示す。軸力の大小に相当する中立軸ひずみの値は、上半アーチ部では、インバート構造半径比によらず、ほぼ同程度の値を示し、基本的に圧縮側の値を示している。インバート部では、構造半径比の小さな 1.0R および 1.1R で曲げモーメントの大小に相当する差分ひずみの値も小さく、軸力が卓越する挙動を示す。一方、構造半径比の大きい 1.3R および 2.0R では、インバート部分で中立軸ひずみの値が低下し、差分ひずみ分布は正負が大きく反転している。したがって、構造半径比が大きくなるとインバート部に曲げ部材としての特徴が顕著となり、構造的に不利となっている。また、インバートの無いケースでは、上半アーチ部での断面力分布に断面閉合されたものと大きな差は認められないが、開放されている上半脚部近傍で局所的に外引張の差分ひずみが大きく発生している。

(3) 模型実験結果と数値解析結果の比較

インバート形状を変化させた効果について、模型実験結果と数値解析結果の両者において、インバート構造半径比が大きくなると圧縮部材から曲げ圧縮部材としての特徴が顕著となり構造的に不利になることが確認された。一方、変位の抑制効果は、解析ではインバート構造半径比の違いによる違いは軽微であるのに対し、模型実験結果では、同程度の荷重条件下において構造半径比が小さいほど、トンネル変位の抑制効果が高くなる結果となった。これは、数値解析では上半、下半、インバートを別掘削する施工条件を再現しており、インバート閉合後の変位の発生が軽微であるため、変位の抑制効果も顕著に表れなかったと考えられる。したがって、閉合後も時間の経過と共に大きな土圧が作用するような押出し性の地山条件であれば、インバートに作用する荷重も大きくなり、模型実験で示され

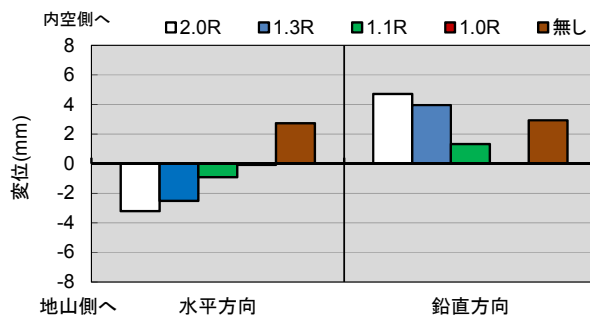


図-22 坑内変形モード (600kN 載荷時)

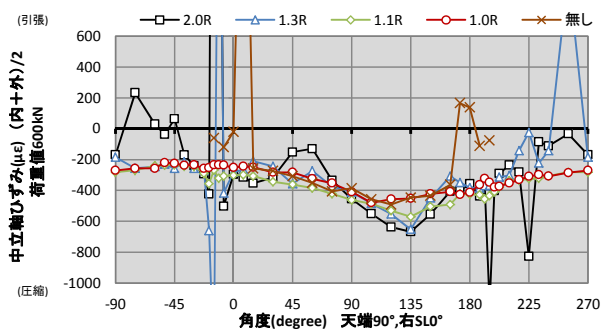


図-23 中立軸ひずみ分布図 (600kN 載荷時)

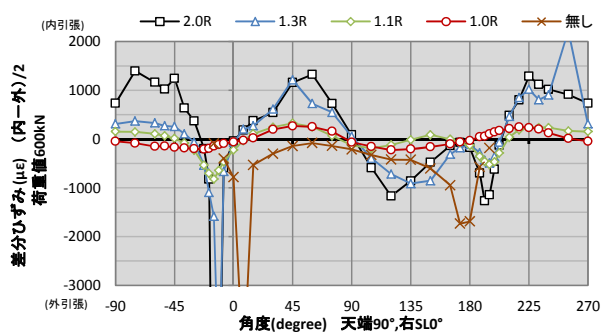


図-24 差分ひずみ分布図 (600kN 載荷時)

たように、構造として有利なインバート半径の小径化がトンネル構造全体の耐力向上に加えて、変位の抑制効果を得るためにも有効な手段になると考えられる。

4. まとめ

早期断面閉合に関して、施工事例分析、計測データ分析、数値解析および模型実験による検討結果から、以下の知見が得られた。

(1) 早期断面閉合の実施効果

早期断面閉合には、以下の 4 つの実施効果が認められた。

1) **内空変位の抑制効果**: 早期断面閉合は、リング状に断面閉合された剛な支保構造の構築により、閉合後、速やかに内空変位を抑制し、変位の収束性を高める効果がある。また、閉合距離を短くするほど、内空変位の抑制効果は高くなる

2) **脚部沈下の抑制効果**: 早期断面閉合は, 脚部沈下の全体的な変位速度を減じることで, 最終的な沈下を抑制する効果が認められる. また, 閉合距離を短くするほど, その効果は高くなる.

3) **地山のゆるみ抑制効果**: 早期断面閉合には, リング状に断面閉合された剛な支保構造に均一に軸力が発生することで, 地山への内圧効果を発揮し, 地山の塑性化を防ぎ, 地山のゆるみを抑制する効果が認められる. また, 閉合距離を短くするほど, 下半～インバート部の支保工に発生する軸力が高まり, より高い内圧効果を得ることができる.

4) **トンネル構造全体の耐力向上効果**: 断面閉合がなされるまで解放部となる支保部材接合部は, 部材に軸力が導入されにくく, 局所的な曲げが卓越することでトンネル構造が不安定化する懸念がある. 早期断面閉合は, 支保部材の連結部を速やかに軸力構造に近づけることで, トンネル構造全体の耐力を高める効果が認められる.

(2) 早期断面閉合の地山適用範囲

早期断面閉合は, 塑性域を生じる地山強度比が 1 を下回るような地山条件で効果を発揮する. また, 同一の地山強度比においても, 特に, 内部摩擦角の小さく, 粘着力の影響が大きい地山では変位および塑性域の増大が顕著となるため, 早期断面閉合を適用した場合の効果は高くなる.

(3) 早期断面閉合における支保構造

早期断面閉合における支保構造は標準断面に準じて閉合を行う場合, 支保部材の曲げ圧縮部材としての挙動が顕著となるため, 曲げ耐力を考慮した支保工の選択が重要となる. また, 閉合後も後荷が発生するような条件下では, インバート構造半径比を小さくとり, インバート部を圧縮部材に近づけることが有効となる.

参考文献

- 1) (社)日本道路協会:「道路トンネル観察・計測指針」, p.296, 1993年11月
- 2) 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」(社)土木学会トンネル工学報告集第17巻, pp.35~41, 2007年11月
- 3) 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」(社)土木学会論文集 F, Vol.64, No.3, pp.227~236, 2008年7月.
- 4) 中野清人・小川澄・楠本太・樽井稔:「早期閉合トンネルの現状と挙動分析」(社)土木学会トンネル工学報告集第20巻, pp.151~162, 2010年11月.
- 5) 林久資・青木一男・吉岡尚也・柳川麻彦・鬼頭夏樹:「押し出し性地山での数値解析および計測事例に基づいた変位抑制対策」(社)土木学会論文集 F1 (トンネル工学) 特集号, Vol.67, No.3, pp.9~24, 2011年11月.
- 6) 竹林亜夫・三上元弘・國村省吾・奥井裕三:「山岳トンネル工法における岩盤の強度定数と内空変位の関係に関する事例研究」(社)土木学会トンネル工学研究論文・報告集第11巻, pp.183~188, 2001年11月.

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 : ISAGO Nobuharu
AWAJI Dohta
ISAMI Kazuhiro

Abstract: Immediate ring closure, based on full face excavation with auxiliary bench and installation of invert at the short length from excavation surface, is adopted for the purpose of stabilization of the tunnel structure in poor geological condition. We conducted three-dimensional numerical analysis, model experiments and analysis of the measurement data in order to examine the implementation effects, applicable geological condition and reasonable support structure of immediate ring closure. As a result, immediate ring closure has four implementation effects: the constraint of the inner space displacement, the constraint of the settlement of support legs, the constraint of the ground loosening and the improvement of the bearing capacity of whole tunnel structure. Immediate ring closure is effective method for the ground condition which is low ground competence factor and small internal friction angle. It is important that the invert at the immediate ring closure is designed considering bending strength.

Keywords: Mountain tunnel, immediate ring closure, full face excavation method with auxiliary bench, three-dimensional numerical analysis, model experiments