

山岳トンネルにおける覆工背面空洞の 裏込め注入材の剛性と効果に関する一考察

日下 敦¹・岸田 展明²・砂金 伸治³・河田 皓介⁴

¹正会員 国立研究開発法人 土木研究所道路技術研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail:kusaka@pwri.go.jp

²正会員 国立研究開発法人 土木研究所道路技術研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail: n-kishida44@pwri.go.jp

³正会員 国立研究開発法人 土木研究所道路技術研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail:n-isago@pwri.go.jp

⁴正会員 株式会社 オリエンタルコンサルタンツ関西支店 (〒530-0005 大阪市北区中之島3-2-18)
(元 国立研究開発法人土木研究所道路技術研究グループ)
E-mail: kawata@oriconsul.com

山岳トンネルにおける覆工背面空洞は、地山条件等によっては構造上の弱点となる場合があり、その対策として裏込め注入を行うことがある。裏込め注入材は種々のものが開発されているが、特に外力の作用が懸念される条件においては、裏込め注入により地盤反力を確保することが重要であると考えられる一方で、裏込め注入材の剛性が対策工の効果に及ぼす影響について議論された事例は少ないのが現状である。本研究では、覆工の天端部付近に背面空洞が存在する山岳トンネルにおいて外力が作用する条件を想定し、背面空洞に充填する裏込め注入材の弾性係数が、覆工の破壊時荷重に及ぼす影響について、数値解析により検討した。その結果、外力対策として覆工背面空洞の裏込め注入を行う場合は、ある程度の剛性を有する裏込め注入材を用いることにより背面空洞の無い場合に近い値まで覆工の破壊時荷重を確保できる可能性があることや、それらの効果の程度が背面空洞の規模によって変わると考えられることが明らかとなった。

Key Words : back-fill grouting, void above lining, numerical analysis, mountain tunnel

1. はじめに

山岳工法により建設されたトンネルのうち、特に矢板工法で建設されたトンネルでは、その施工方法の特徴から、図-1のように覆工の背面に空洞が残存することが避けられない場合が多い。この背面空洞は、地山条件等によっては構造上の弱点となる場合があり、その対策として裏込め注入を行うことがある。

裏込め注入の目的は、主として、

- (a) トンネルに外力が作用し、覆工が変形する場合に、地山からの均等な反力を確保し、トンネルの耐力の向上を図る
- (b) 空洞上方の地山の亀裂による岩塊崩落に起因する突発性の崩壊や、地山の緩み拡大等を防止するというものが挙げられる。(b)においては、空洞が充填されることにより、岩塊崩落による衝撃荷重が覆工に直

接作用しないことが重要であると考えられ、裏込め注入材の剛性が議論されることは少ない。一方、(a)において

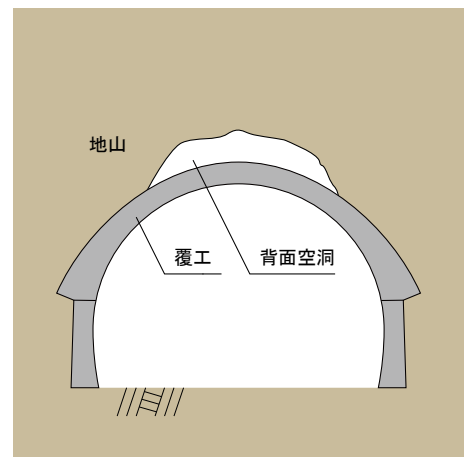


図-1 覆工背面空洞の模式図

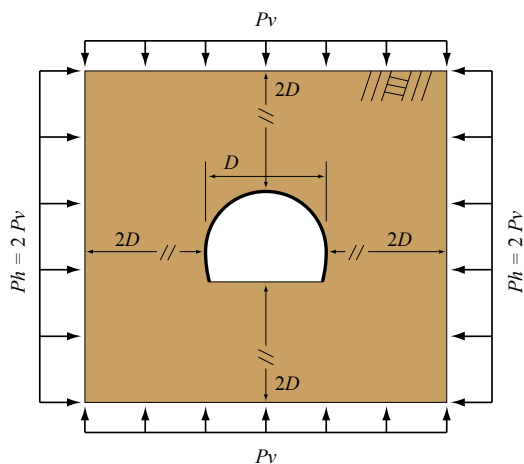


図-2 作用させる荷重

は、適切な反力が得られるよう、裏込め注入材としてある程度の剛性を有するものが選定されるべきであると考えられ、既往の研究^{1), 2), 3)}においても裏込め注入材の剛性と覆工の変形性の関係等について論じられている。しかしながら、実務上は、マニュアル類において品質管理上の理由から規定された設計基準強度を満足するように裏込め注入材の配合を決定する場合が多く⁴⁾、覆工の応力状態や覆工の破壊に至る荷重の大きさと、裏込め注入材の剛性の関係について議論された事例は少ないのが現状である。

本研究では、上述(a)を対象とし、トンネル覆工に外力が作用する場合において、天端部の覆工背面空洞に充填する裏込め注入材の弾性係数が、覆工の破壊時荷重に及ぼす影響について、数値解析により検討した。

2. 数値解析の概要

(1) 対象とする荷重のモード

トンネルに外力が作用する場合の荷重のモードは多岐にわたり、全てを網羅することは困難であるが、覆工背面空洞の影響がもっとも顕著に現れるケースのひとつに、側方からの荷重が卓越するモードが考えられる。これは、地山の塑性圧や凍上圧が作用する場合等に想定される荷重モードであり、天端部に背面空洞が存在する場合は、天端部において地山からの反力が得られず、大きな曲げモーメントが発生することとなる。さらに変形が進展すると、天端部の覆工内側において曲げによる圧縮破壊（圧ざ）が発生し、部材の断面破壊につながる危険性があるとともに、はく離したコンクリート片が落下してトンネルの利用者の安全性にも影響を及ぼすこととなる。

本研究では、以上のような観点から、側方からの荷重が卓越する場合について検討を行うこととし、図-2に示すように鉛直荷重 P_v と、側圧係数2の水平荷重 P_h によりモデル化することとした。解析上は、 P_h が1ステップあ

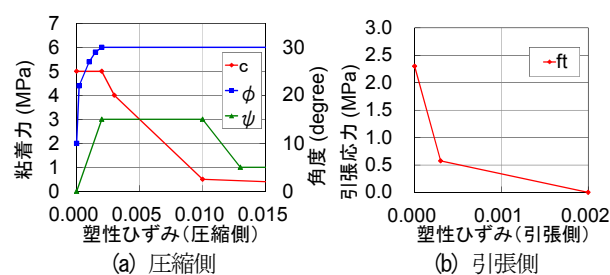


図-3 解析で用いた覆工材料のひずみ軟化/硬化特性

たり0.01 MPaずつ増加するように载荷した。

(2) 地山のモデル化

地山の剛性は、覆工にも外力が作用する可能性が高い、軟質な地山を想定し、地山等級DII相当のヤング係数150 MPa、ポアソン比0.35とした。なお、本研究においては、地山は覆工へ荷重を作用させたり地盤反力を得たりするための媒体であり、地山の破壊過程を詳細に検討することを主な目的としていないことから、簡便のため、地山は線形弾性体と仮定した。

(3) 覆工のモデル化

本研究は、覆工背面空洞が維持管理上の問題となる場合が比較的多い、矢板工法により建設されたトンネルに主眼を置いており、精緻な検討を行うためには、アーチ部と側壁部の打継目や、いわゆる「ふんばり」と呼ばれる上半アーチ脚部の増厚部の影響を考慮する必要がある場合がある。しかし、上述したような荷重のモードを考える場合、応力が集中するのは天端部付近となり、側壁の形状やインバートの有無は天端部の応力状態に大きな影響を及ぼさないことが別途実施した数値解析から明らかとなっている^{5), 6)}。また、矢板工法では、覆工の設計巻厚を40～60 cm程度とする事例が多いが、経年劣化によって有効巻厚が減少する場合がある。

これらの事を踏まえ、数値解析モデルを簡略化するため、覆工は一律の30 cm厚のプレーンコンクリート相当と仮定し、また、外径 $D=10$ mとした。

覆工材料は、線形弾性モデルとすると、上記の荷重モデルでは側壁部に引張強度を大きく超える引張応力が発生する場合があり、必ずしも天端部の圧縮破壊が支配的であると結論づけにくい場合もあるため、非線形材料を用いることとした。覆工材料の破壊はMohr-Coulombの破壊規準にしたがうものと仮定した。破壊後はひずみ軟化/硬化モデルを適用し、粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ 、ダイレーション角 ψ について、文献⁷⁾における考え方を参考に、図-3(a)に示すとおり、塑性圧縮ひずみの関数と仮定した。引張強度 f_t については、既往の実大規模の覆工載荷実験におけるコンクリート材料の物性試験結果を参考に決定し、破壊後の挙動はコンクリート標準示方書の

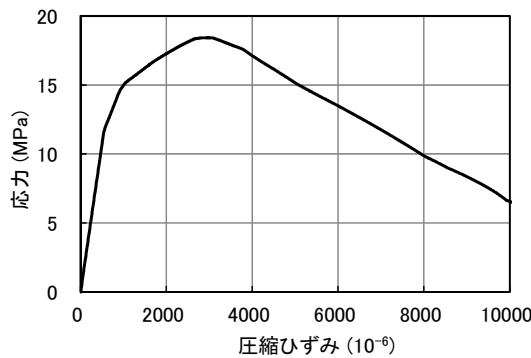


図-4 覆工材料の応力-ひずみ関係

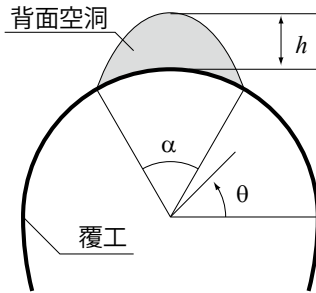


図-5 背面空洞のモデル化

引張軟化曲線を参考に、図-3(b)に示すように塑性引張ひずみの関数と仮定した。このような考え方に基づいた非線形パラメータを用いることで、一軸圧縮状態におけるプレーンコンクリートの耐荷力およびポストピーク強度において、要素実験レベルの再現が可能であること⁸⁾や、軸力と曲げモーメントが作用するトンネル覆工の耐荷力に関して、実大規模の載荷実験の再現が可能であること⁹⁾、地山の水平圧縮変形が卓越する荷重状態を模擬した 1/20 スケールの模型実験における覆工天端の圧縮破壊等の再現が可能であること¹⁰⁾が示されている。

図-4は、上記の材料特性を適用し、メッシュサイズ5 cmのソリッド要素を用いて一軸圧縮試験を行った場合の、応力-ひずみ関係を示したものである。約3,000 μ のひずみにおいて、最大応力18 MPaに達し、その後はひずみ軟化特性を示すことが分かる。

(4) 背面空洞および裏込め注入材のモデル化

背面空洞は、図-5に示すように、範囲 α (天端 ($\theta = 90^\circ$) を中心に $\pm\alpha/2$) と深さ h をパラメータとして変動させた。裏込め注入を実施せず、背面空洞が存置されているケースについては、該当部分の要素の剛性をゼロとしてモデル化した。

裏込め注入を実施したケースについては、背面空洞の部分の要素の弾性係数を裏込め注入材相当のものとする事でモデル化した。

裏込め注入材のヤング係数 E_g は、セメント系注入材を想定した $E_g = 1,000$ MPa、比較的発泡倍率の低いウレタン系注入材を想定した $E_g = 50$ MPa、比較的発泡倍率の

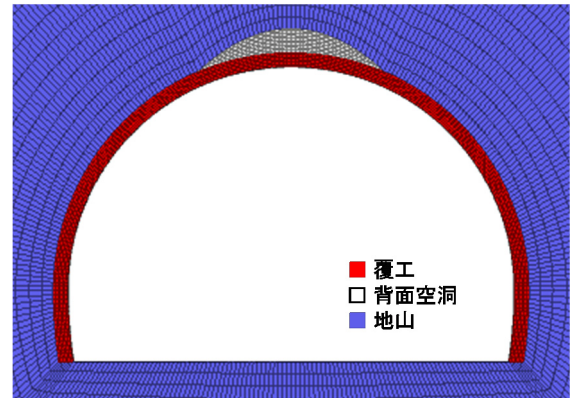


図-6 覆工周辺のメッシュ

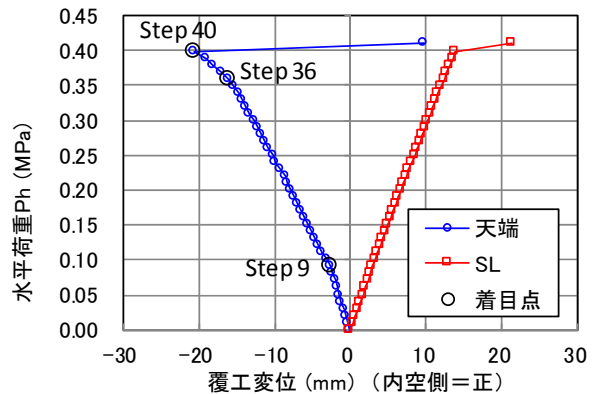


図-7 $\alpha=30^\circ$, $h=0.5$ m, 裏込め注入なしのケースにおける荷重-変位関係

高いウレタン系注入材を想定した $E_g = 2$ MPaとした。ポアソン比はいずれも0.2とした。なお、裏込め注入材の剛性については、メーカーヒアリングによる値を参考に、数値解析結果として差異が出やすいように設定したものである。

(5) その他の解析条件

本研究では、覆工の非線形性を考慮した数値解析を行うことから、解の収束性が比較的良いとされている有限差分法による計算を行った (解析コードはFLAC3D)。

解析用のメッシュは、地山、覆工、裏込め注入材、いずれも三次元ソリッド要素を用いているが、トンネル軸方向の変位を固定しているため、平面ひずみ問題として扱われるものである。覆工のメッシュは、非線形モデルにおける形状の影響を避けるため、なるべく一辺が5 cmの立方体に近くなるように設定した (図-6)。

3. 覆工の破壊に関する本研究における定義

(1) 覆工の圧縮破壊に至るまでの挙動

図-7に、本研究において覆工が圧縮破壊を示すケースの例として、背面空洞範囲 $\alpha = 30^\circ$ 、背面空洞深さ $h = 0.5$ m、裏込め注入を実施しないケースの荷重変位関係を示す。図中、○は水平荷重 Ph と覆工天端内側の節点の変

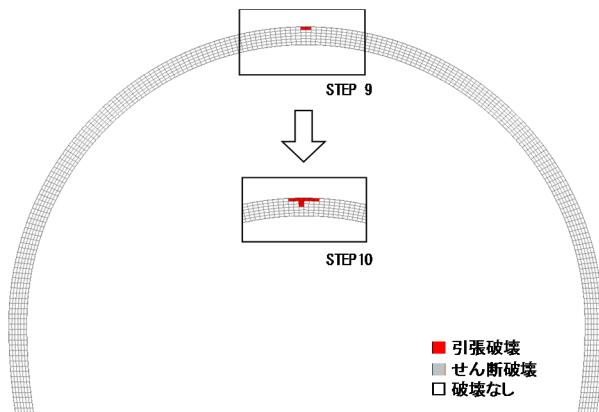


図-8 ステップ9～10における覆工の破壊領域図 ($\alpha=30^\circ$, $h=0.5\text{ m}$, 裏込め注入なしのケース)

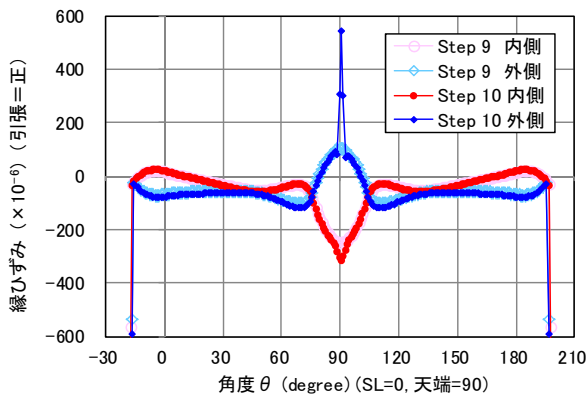


図-9 ステップ9～10における覆工の緑ひずみ分布 ($\alpha=30^\circ$, $h=0.5\text{ m}$, 裏込め注入なしのケース)

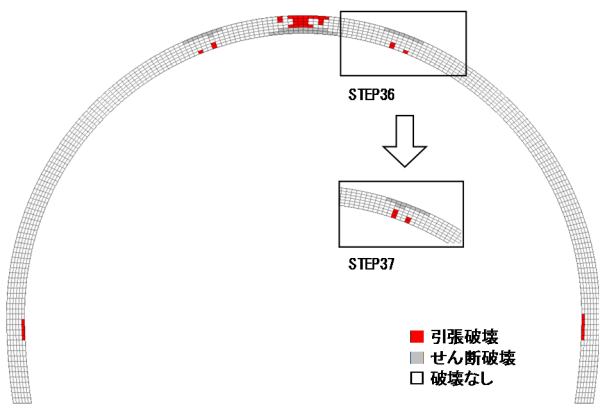


図-10 ステップ36～37における覆工の破壊領域図 ($\alpha=30^\circ$, $h=0.5\text{ m}$, 裏込め注入なしのケース)

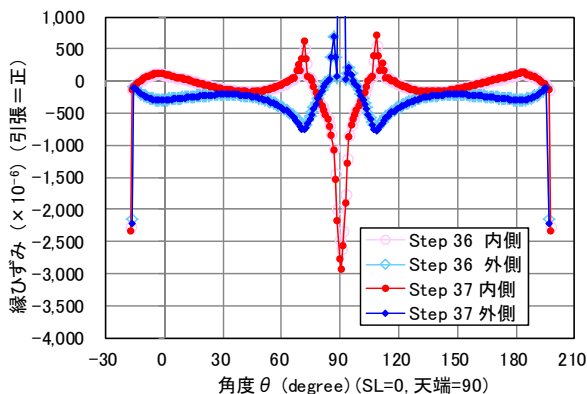


図-11 ステップ36～37における覆工の緑ひずみ分布 ($\alpha=30^\circ$, $h=0.5\text{ m}$, 裏込め注入なしのケース)

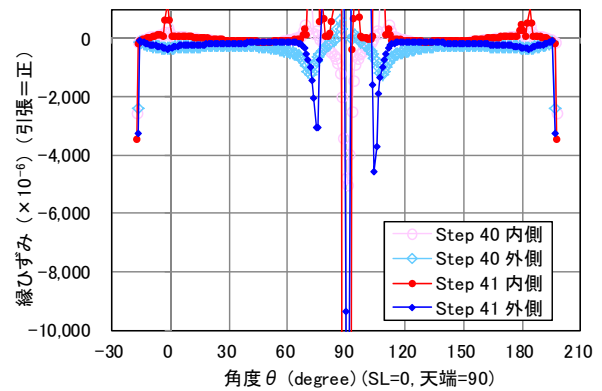


図-12 ステップ40～41における覆工の緑ひずみ分布 ($\alpha=30^\circ$, $h=0.5\text{ m}$, 裏込め注入なしのケース)

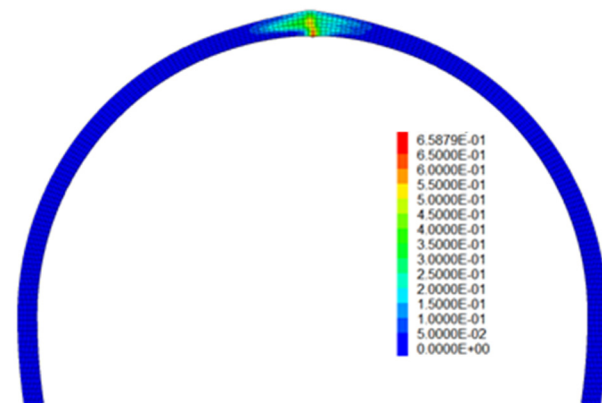


図-13 ステップ41における覆工の最大せん断ひずみコンター ($\alpha=30^\circ$, $h=0.5\text{ m}$, 裏込め注入なしのケース)

位の関係, □は水平荷重 Ph と覆工SL内側の節点の変位の関係を示す. 荷重を増加させると, SLの節点は内側に, 天端の節点は外側に変位していることが分かる. 一方, 荷重 0.4 MPa を超えると, モードが大きく変わり, 天端の節点が内側に変位した.

途中段階のステップ9～10に着目すると, 破壊領域図を図-8に示すように, まず天端部外側に引張ひび割れが発生し, 荷重 0.10 MPa (ステップ10)において断面の50%までひび割れが進展していることが分かる. 図-9に示す覆工のひずみ分布を見ても分かるように, 天端部 ($\theta=90^\circ$) 外側において引張強度を超えるひずみ (引張強度 2.3 MPa をヤング係数 22 GPa で除して求まる値である 105×10^6 を超える引張ひずみ) が発生している.

ステップ36～37においては, 肩部 ($\theta=70^\circ$ 付近) 内側において, 同様に断面の50%までひび割れが進展していることが分かる (図-10, 図-11). 天端部内側には $3,000 \times 10^6$ に近い圧縮ひずみが発生している.

ステップ40においては, 図-12に示すように天端部内側で $5,000 \times 10^6$ に近い圧縮ひずみが発生するとともに, 次のステップ41において急激に圧縮ひずみが増加した. また, 図-13に最大せん断ひずみコンターを示すように, 天端部付近の破壊が卓越していることが分かる. 図-7に

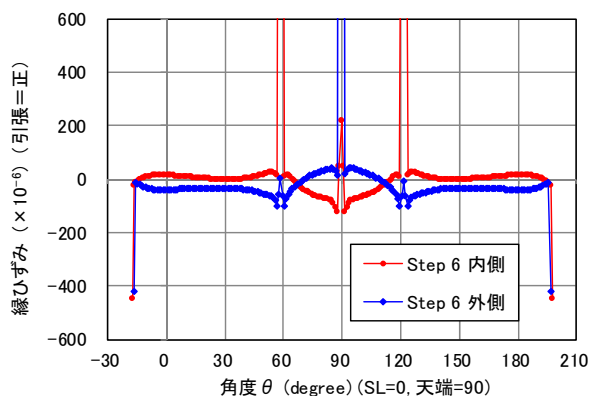


図-14 ステップ6 (荷重 0.06MPa) における覆工の縁ひずみ分布 ($\alpha=60^\circ$, $h=1.0\text{m}$, 裏込め注入なしのケース)

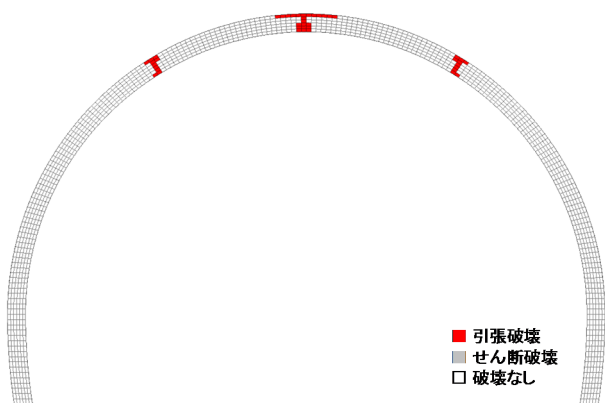


図-15 ステップ6 (荷重 0.06MPa) における覆工の破壊領域図 ($\alpha=60^\circ$, $h=1.0\text{m}$, 裏込め注入なしのケース)

荷重変位図を示したように、これらのステップにおいて変位のモードが大きく変化した。これは天端部の圧縮破壊に起因するものと考えられる。

以上の経過を集約すると、天端部において圧縮破壊が発生する以前に、天端部外側や肩部内側において引張りひび割れが発生しているものの、荷重変位関係には大きな影響を与えていないことが分かる。また、天端部の圧縮ひずみが $5,000 \times 10^{-6}$ を超えたところで天端部の圧縮ひずみが急激に増加するとともに、変位のモードが大きく変化した。これらのことから、本研究においては、 $5,000 \times 10^{-6}$ を超える圧縮ひずみが発生するとともに、変位のモードが大きく変化した時点を、覆工の破壊と見なすこととする。

(2) 覆工の圧縮破壊に至らない場合の挙動

上述のような覆工の圧縮破壊に至らないケースの例として、背面空洞範囲 $\alpha = 60^\circ$ 、背面空洞深さ $h = 1.0\text{m}$ 、裏込め注入を実施しないケースの結果を示す。このケースにおいては、ひずみ分布を図-14に示すように、荷重 0.06 MPa の時点で天端部 ($\theta = 90^\circ$ 付近) および両肩部 ($\theta = 60, 120^\circ$ 付近) において、覆工内側・外側とも引張強度を超えるひずみ (前述のとおり 105×10^{-6} を超える引張り

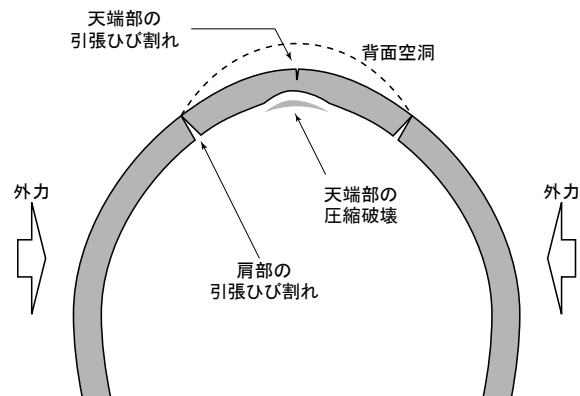


図-16 覆工の断面破壊の概念図

ひずみ) が生じており、貫通ひび割れが発生したことを示している。これは、図-15に示す覆工の破壊領域図からも分かる。

このようなひび割れは、覆工コンクリートのブロック化を誘発し、落下してトンネルの利用者へ影響を及ぼす懸念があると考えられる。このような観点から、覆工に2箇所以上の貫通ひび割れが発生した時点、すなわち、両肩部に貫通ひび割れ、あるいは天端部と肩部双方に貫通ひび割れが発生した時点を、覆工の破壊と見なすこととする。

(3) 覆工の破壊時荷重の定義

上述の覆工の断面破壊を概念的に示すと図-16のようになる。すなわち、本研究においては、天端部内側の圧縮破壊、天端部外側の引張りひび割れ、肩部内側の引張りひび割れが特徴的な現象である。

本研究では、先に述べたような観点から、以下いずれかの現象が生じる荷重を、覆工の破壊時荷重と定義する。

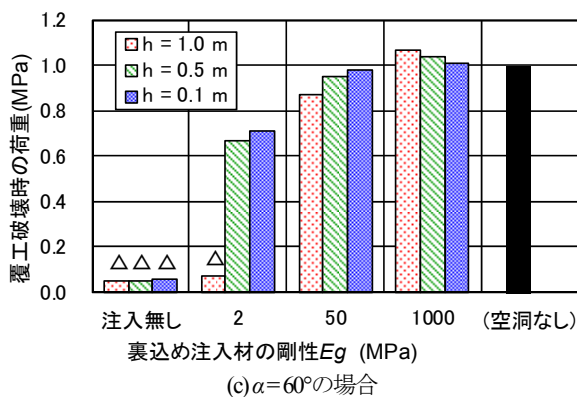
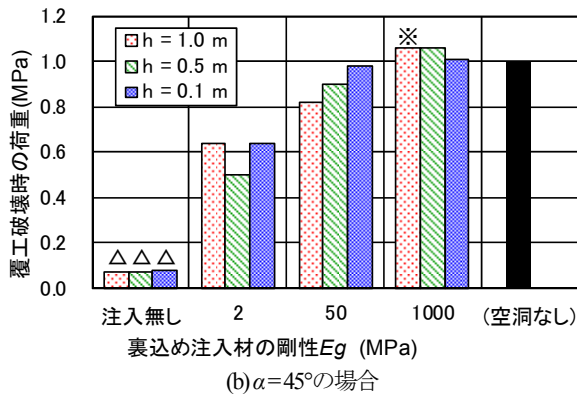
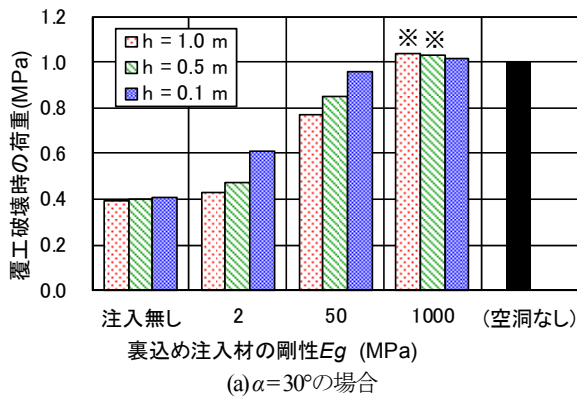
- ① 覆工天端付近の内側の圧縮ひずみが $5,000 \times 10^{-6}$ を超えるとともに、変位モードが大きく変化する場合
- ② 両肩部に貫通ひび割れ、あるいは天端部と肩部双方に貫通ひび割れが発生する場合 (後述の図-17において「Δ」で記す)

なお、裏込め注入材として剛性の大きいものを用いた場合は、天端部 ($\theta = 90^\circ$) よりもやや両肩部に寄った、背面空洞端部付近 ($\theta = 70 \sim 80^\circ$ 付近) で覆工の圧縮破壊が生じたケースもあったが、圧縮ひずみの値や変位モードの変化の類似性から、①と同様に扱うこととした (後述の図-17において「※」で記す)。

4. 覆工の破壊時荷重

以上述べてきた方法により算定した覆工の破壊時荷重を図-17に示す。なお、比較対象として、背面空洞が存在しない場合の覆工の破壊時荷重も併せて示す。

同図(a)に示すように、 $\alpha = 30^\circ$ の場合で、背面空洞が存



(注) 図中、△は両肩部に貫通ひび割れ、あるいは天端部と肩部双方に貫通ひび割れが発生して覆工の破壊に至ったことを示す。また、※は天端部 ($\theta = 90^\circ$) よりもやや両肩部に寄った、背面空洞端部付近 ($\theta = 70 \sim 80^\circ$ 付近) で覆工の圧縮破壊が生じたことを示す。

図-17 覆工破壊時の荷重

在して裏込め注入を行わない場合は、背面空洞が存在しない場合に比べて破壊時荷重は 40%以上となる。比較的剛性の低い $E_g = 2$ MPa の裏込め注入材で空洞を充填した場合は、破壊時荷重は大きくは変わらないが、背面空洞深さが小さい場合 ($h = 0.1$ m) は破壊時荷重は 60%程度となる結果となった。一方、比較的剛性の高い $E_g = 50$ MPa の裏込め注入材で空洞を充填すると破壊時荷重は 80%程度以上、さらに剛性の高い $E_g = 1000$ MPa の裏込め注入材で空洞を充填すると 100%程度まで確保できる

結果となった。

背面空洞の範囲を広げ、 $\alpha = 45^\circ$ とすると、同図(b)に示すように、裏込め注入を行わない場合は引張りひ割れが卓越した破壊形態となり、背面空洞が存在しない場合に比べて 10%にも満たない荷重で破壊した。比較的剛性の低い $E_g = 2$ MPa の裏込め注入材で空洞を充填した場合は、50%程度まで確保できる結果となった。さらに比較的剛性の高い $E_g = 50$ MPa や $E_g = 1000$ MPa の裏込め注入材を用いた場合は、80%以上を確保できる結果となった。

さらに背面の範囲を広げ、 $\alpha = 60^\circ$ とすると、同図(c)に示すように、裏込め注入を行わない場合はやはり引張りひ割れが卓越した破壊形態となり、背面空洞が存在しない場合に比べて 5%程度の荷重で破壊した。比較的剛性の低い $E_g = 2$ MPa の裏込め注入材で空洞を充填した場合は、 $h = 0.5$ m と比較的背面空洞の深さが小さいケースにおいては、貫通ひび割れの発生を抑制し、背面空洞が存在しない場合に比べて破壊時荷重は 60%を超えるものとなった。一方で $h = 1.0$ m と比較的背面空洞の深さが大きいケースにおいては、背面空洞を充填しない場合と破壊モードは同様になり、破壊時荷重も同等のものであった。比較的剛性の高い $E_g = 50$ MPa や $E_g = 1000$ MPa の裏込め注入材を用いた場合は、80%以上を確保できる結果となった。

これらの結果から、外力が作用する条件下において覆工の背面空洞が存在し、裏込め注入により対策を実施する場合においては、ある程度の剛性を有する裏込め注入材を用いる必要があると考えられる。これは、背面空洞の範囲や深さによって程度が変わり、空洞の規模が大きいほど、その裏込め注入材の剛性の影響が顕著に現れると考えられる。

5. おわりに

本研究では、天端付近に覆工背面空洞が存在する山岳トンネルにおいて外力が作用する条件を想定し、背面空洞に充填する裏込め注入材の弾性係数が、覆工の破壊時荷重に及ぼす影響について、数値解析により検討した。

その結果、外力対策として覆工背面空洞の裏込め注入を行う場合は、ある程度の剛性を有する裏込め注入材を用いることにより、背面空洞の無い場合に近い値まで覆工の破壊時荷重を確保できる可能性があることが明らかとなった。これは、背面空洞の範囲や深さによって程度が変わり、空洞の規模が大きいほど、その裏込め注入材の剛性の影響が顕著に現れると考えられる。

ただし、これらの検討結果は、限られた荷重条件下において、限られた物性値等を用いて分析を行ったものに過ぎない。実際の現場における背面空洞の形状や地山物性値は複雑であり、裏込め注入材も種々のものがこれま

でに開発されてきていることから、現場条件を見極めたうえで、実際に適用することが重要である。また、本研究では検討対象外とした、亀裂性の岩盤に建設されたトンネルにおいて突発性崩壊を防止するといった目的で覆工背面空洞を充填する場合は、別途検討が必要である。加えて、裏込め注入を実施する際は、注入圧や注入材の自重により既設の覆工に悪影響を及ぼさないか、空洞の充填性は十分確保できるか、裏込め注入の施工により既存の排水構造に悪影響を及ぼさないかなど、施工上の配慮も必要である。これらの事項も踏まえたうえで、適切な剛性を有する裏込め注入材を選定する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 朝倉俊弘, 安東豊弘, 小俣富士夫, 若菜和之, 松浦章夫: 欠陥を有するトンネル覆工の変形挙動と内面補強工の効果, 土木学会論文集, No.493, III-27, pp.89-98, 1994.
- 2) 佐藤文法, 嶋本敬介, 朝倉俊弘: 山岳トンネルの背面空洞に対する裏込め注入材の剛性に関する検討, 地盤工学研究発表会, 第47回, pp.1267-1268, 2012.
- 3) 日下敦, 砂金伸治, 真下英人: 外力が作用する山岳トンネルにおける覆工背面空洞裏込め注入材の剛性の影響に関する一考察, 地盤工学研究発表会, 第49回, No.652, pp.1303-1304, 2014.
- 4) (独)土木研究所: 道路トンネル変状対策工マニュアル(案), 土木研究所資料, No.3877, 2003.
- 5) 岸田展明, 日下敦, 砂金伸治: 山岳トンネル覆工の破壊時荷重における覆工形状の影響に関する数値解析的検討, トンネル工学報告集, 第26巻, 2016. (投稿中)
- 6) 日下敦, 真下英人, 砂金伸治, 角湯克典: 山岳トンネルにおける覆工構造と地震時挙動の関係に関する一考察, トンネル工学報告集, 第20巻, pp.1-8, 2010.
- 7) Vermeer, P. A., R. de Borst: Non-Associated Plasticity for Soils, Concrete and Rock, Heron, Vol.29, No.3, pp.3-64, 1984.
- 8) 日下敦, 砂金伸治, 真下英人: 内巻き補強された覆工の全体耐力に関する要素実験の再現解析, 土木学会第68回年次学術講演会, III-250, pp.499-500, 2013.
- 9) 日下敦, 砂金伸治, 河田浩介, 真下英人: 軸力と曲げモーメントが作用するトンネル覆工の耐荷力に関する数値解析的検討, 土木学会第69回年次学術講演会, III-220, pp.439-440, 2014.
- 10) Kusaka, A.; Kawata, K.; Isago, N.; and Mashimo, H.: Static Loading Tests and Numerical Analysis of the Effects of Risk Mitigation Measures for Rock Tunnels against Earthquakes, The 8th Asian Rock Mechanics Symposium, No.OS3-1, pp.1-8, 2014.

(2016. 8. 5 受付)

EFFECT OF STIFFNESS OF BACK-FILL GROUTING MATERIAL AGAINST VOID ABOVE TUNNEL LINING UPON LOAD-BEARING CAPACITY FOR LINING FRACTURE

Atsushi KUSAKA, Noriaki KISHIDA, Nobuharu ISAGO and Kosuke KAWATA

Void above a tunnel lining may be harmful to a tunnel structure especially in poor ground conditions. The void often exists in old tunnels constructed with the steel rib and lagging method, and a back-fill grouting is one of the most effective countermeasures against the void. Stiffness of back-fill grouting material is an important factor and should be examined appropriately to obtain enough ground reaction force to the lining. However, for a practical use, a choice is made between the grouting materials comparing their pros and cons pertaining to constraints of construction and costs. The stiffness is not taken into account so seriously and is determined on the basis of our empirical knowledge in many cases.

In this study, a series of numerical analysis is performed to examine stress circumstances of tunnel lining where a back-fill grout is carried out. A tunnel lining is set in soft rock and external force is applied to the model. Major conclusions include: Influence of stiffness of back-fill grouting material on mechanical behavior is clarified. A high expansion ratio material for back-fill grouting could be too soft to secure enough reaction force to tunnel lining under external force acting conditions.