

# 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が外力作用時の覆工応力に及ぼす影響

日下 敦・砂金伸治・真下英人

## 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、覆工の背面に空洞(図-1)が残存することが避けられない場合が多い。この覆工背面空洞は、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、トンネルの耐荷力の向上を図る
- (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が重要であり、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<sup>1),2)</sup>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<sup>3)</sup>、トンネルの耐荷力に直結すると考えられる覆工の応力状態と、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。

本検討では、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、天端部の背面空洞に充填する裏込め注入材の弾性係数が、覆工の応力状態に及ぼす影響について数値解析により検討した。

## 2. 数値解析モデル

解析は線形弾性材料を用いた二次元有限要素法によるものとした。図-2は、解析で仮定した覆工形状と背面空洞の範囲および解析上のメッシュを示したものである。覆工は幅 $D = 11.2\text{m}$ で、天端部 $60^\circ$ の背面に空洞が存在し、この背面空洞に

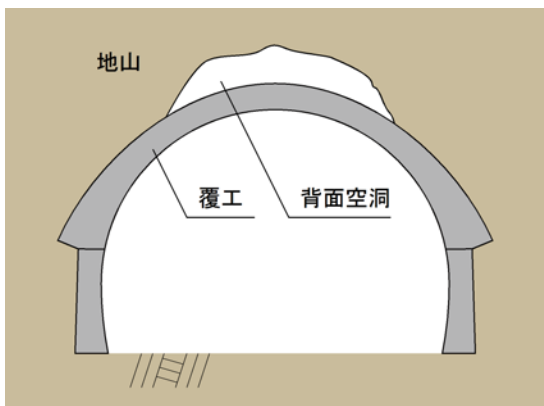


図-1 山岳トンネルにおける覆工背面空洞の模式図

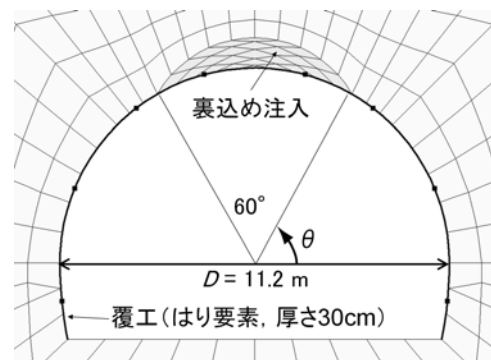


図-2 覆工形状と背面空洞の範囲

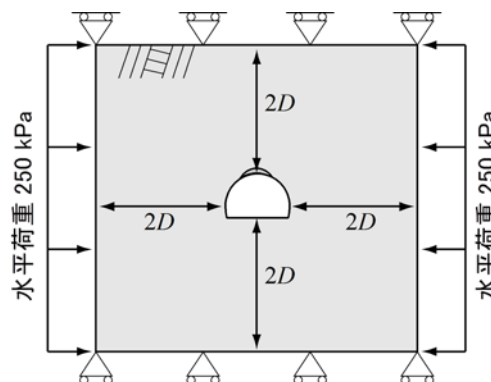


図-3 解析における境界条件

裏込め注入材を充填するものと仮定した。図-3は境界条件を示したものである。荷重条件としては水平方向の荷重が卓越する場合は想定し、土被り荷重に換算すると約1D分に相当する、250kPaの水平荷重を作用させた。

表-1に、地山、覆工、裏込め注入工に適用した物性値を示す。地山は軟質な地山を想定した地山等級DII相当のものと、硬質な地山を想定した地山等級B相当のものとした。覆工については、背面空洞が問題となることの多い矢板工法においては、設計巻厚を40~60cm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と等を考慮し、本検討では厚さ30cmのプレーンコンクリート相当と仮定した。裏込め注入材は、ヤング係数 $E_g$ をパラメータとして変化させた。また、裏込め注入を実施せず、空洞が存在する場合についても解析を行った。なお、裏込め注入材は種々のものが開発されているが、ヤング係数としては発泡ウレタンの場合3~40MPa程度のもの等が、セメント系の場合1,000MPa程度のもの等がある。

表-1 用いた要素と材料物性値

要素	地山		覆工	裏込め注入
	地山等級DII (軟質地山)	地山等級B (硬質地山)		
	平面ひずみ	平面ひずみ	はり	平面ひずみ
ヤング係数(MPa)	150	5,000	22,000	0~1,000
ポアソン比	0.35	0.20	0.20	0.20

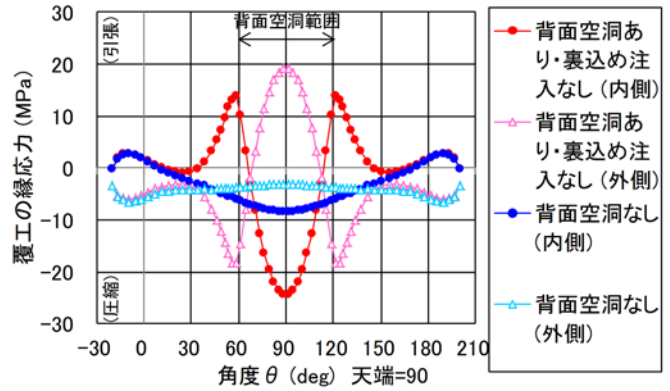


図-4 背面空洞の存在が覆工応力に及ぼす影響 (軟質地山)

### 3. 軟質地山における裏込め注入材の剛性の影響

#### 3.1 背面空洞の存在自体の影響

まず、上述した荷重条件の場合に、背面空洞の存在自体が覆工の応力状態に及ぼす影響について検討した。図-4は、地山等級DII相当 (ヤング係数150MPa) の軟質地山において、背面空洞が存在しない場合 (青色) と、背面空洞が存在し、裏込め注入も行っていない場合 (赤色) について、覆工の内側および外側の縁応力の分布を示したものである。

背面空洞が存在しない場合は、覆工天端部は全圧縮状態となっており、発生している応力も比較的小さい。一方、背面空洞が存在する場合は、特に天端付近および肩部付近において曲げモーメントが卓越し、引張側・圧縮側双方に大きな応力が発生した。このことから、比較的軟質地山において水平方向からの荷重がトンネルに作用する場合には、背面空洞が存在すると、その周辺で地盤反力が得られず大きな曲げモーメントが発生し、それにもなって覆工の縁応力も増加することが分かる。

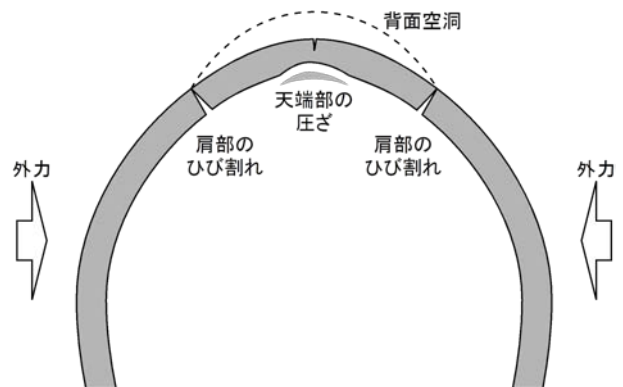
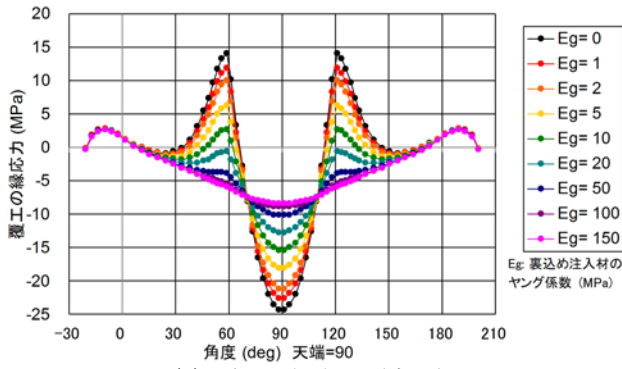


図-5 背面空洞が存在する場合の覆工の破壊形態の例

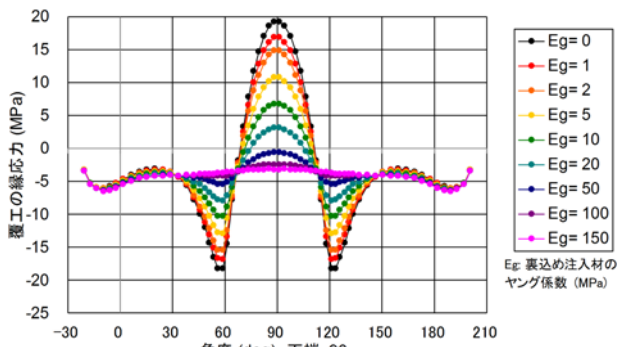
すなわち、背面空洞が存在し、裏込め注入も行っていない場合において、覆工に水平方向からの荷重が作用すると、図-5に示すように、覆工内側において、天端部に圧縮 (曲げモーメントの影響を大きく受けた圧縮破壊) が発生するとともに、肩部に曲げ引張ひび割れが発生するような変状が生じる懸念がある。なお、天端の覆工外側にも曲げ引張ひび割れが発生すると考えられる。

#### 3.2 裏込め注入材の剛性の影響

続いて、裏込め注入材のヤング係数 $E_g$ が、覆工の縁応力に及ぼす影響について検討を行った。図-6は、 $E_g$ を0MPa (裏込め注入を行わない場合に相当) から150MPa (周辺地山と同等の剛性) の範囲で変化させた場合の、覆工の縁応力の変化を示したものである。また、図-7は、代表的な値として天端部の縁応力に着目し、 $E_g$ を0~



(a) 覆工の縁応力 (内側)



(b) 覆工の縁応力 (外側)

図-6 裏込め注入材の剛性が覆工縁応力に及ぼす影響

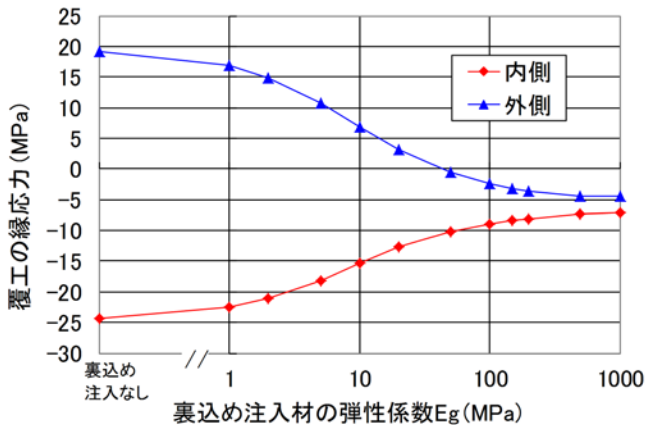


図-7 裏込め注入材の剛性が覆工の縁応力 (天端部) に及ぼす影響

1,000MPaの範囲で変化させた場合の影響を示したものである。なお、 $E_g = 0$ は、裏込め注入工を行わない場合を示す。

裏込め注入工を行わない場合は、先述の通り、圧縮側、引張側ともに大きな縁応力が発生した。裏込め注入を施工した場合は、 $E_g = 1$ MPa程度の軟質な材料では縁応力の低減がほとんど見られないが、 $E_g$ が大きくなるにつれて覆工外側の引張応力が減少し、圧縮側に転じるとともに、覆工内側の圧縮応力も減少している。すなわち、 $E_g$ の大きな裏込め注入材を用いることで、曲げモーメ

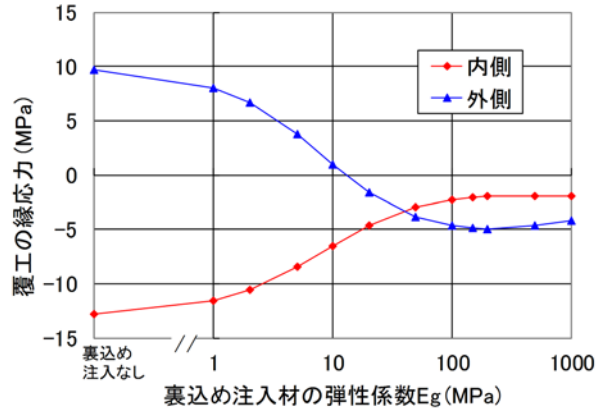


図-8 裏込め注入材の剛性が覆工の縁応力 (天端部) に及ぼす影響 (鉛直方向の荷重が卓越する場合)

ントが減少して全圧縮状態となるとともに、縁応力も小さなものとなった。一方で、本検討における条件においては、 $E_g$ が100MPaを超えた付近から縁応力の減少も緩やかとなり、以降 $E_g$ を大きくしても縁応力の大幅な減少は見られなかった。

これらのことから、背面空洞が存在し、かつ覆工に外力が作用する条件下において、裏込め注入工により覆工応力の低減を期待する場合は、十分な剛性を有する裏込め注入材を用いる必要があるとともに、極端に剛性の大きな注入材を用いても大幅な応力低減を見込めない可能性があることが分かった。

なお、上記は水平方向の荷重が卓越する場合について述べたものであるが、鉛直方向の荷重が卓越する場合を想定して同様の検討を行っても図-8のように類似した傾向を示した。すなわち、鉛直方向の荷重が卓越する場合においても、同様に、裏込め注入工により覆工応力の低減を期待する場合は、十分な剛性を有する裏込め注入材を用いる必要があるとともに、極端に剛性の大きな注入材を用いても大幅な応力低減を見込めない可能性があると言える。

#### 4. 硬質な地山における裏込め注入材の剛性の影響

図-9は、地山等級B相当 (ヤング係数5,000 MPa) の硬質な地山において、背面空洞が存置されている場合 (赤色) および $E_g = 150$ MPaの裏込め注入を施工した場合 (青色) について、覆工の縁応力の分布を示したものである。背面空洞が存在する場合は曲げモーメントの影響により引

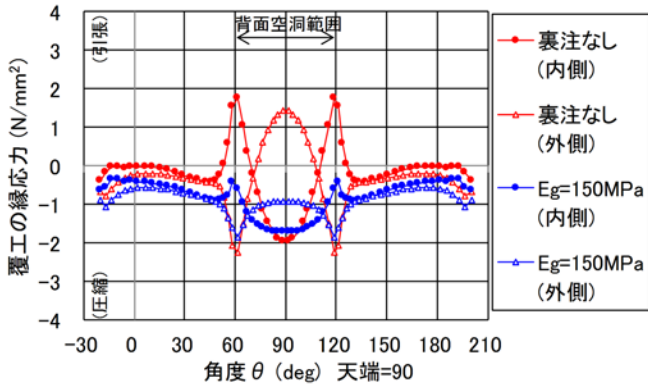


図-9 背面空洞の存在が覆工応力に及ぼす影響 (硬質地山)

張の縁応力が発生しているが、裏込め注入の施工により覆工が全圧縮状態となった。すなわち、硬質地山においては、地山よりも大幅に剛性の小さい裏込め注入材を用いても、覆工における引張縁応力の発生を解消できる場合があることが分かった。

ただし、本検討における荷重条件においては、背面空洞が存在したとしても、覆工に発生する応力の値はそもそも小さく、背面空洞が構造全体の耐力に及ぼす影響は比較的小さいと考えられる。また、硬質地山においては、1.の(b)で記したような、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を防止する目的で裏込め注入を施工することが多いので、目的に応じた裏込め注入材を選定する必要があると考えられる。

## 5. おわりに

本検討では、背面空洞に充填する裏込め注入材の剛性が覆工の応力に及ぼす影響を数値解析により検討した。その結果、軟質地山において外力が作用する場合は、十分な剛性を有する裏込め注入材を用いる必要があるとともに、極端に剛性の大きな注入材を用いても大幅な応力低減を見込め

ない可能性があると考えられる。また、地山が硬質な場合は、十分な剛性を有する裏込め注入材を用いることにより覆工の引張応力の発生を解消できる場合があるものの、背面空洞が存在していたとしても覆工に発生する応力は比較的小さい。このような場合は、亀裂による岩塊の崩落等を防止することを目的とした裏込め注入材を選定することが必要となる場合が多いと考えられる。

ただし、ここで示したデータは、限られた条件における検討結果でしかない。上述の現象は、荷重のモードや覆工巻厚、背面空洞幅、背面空洞高さ、地山の剛性等により変化すると考えられるため、実務上の設計を行う際には、個別の条件を反映した検討を行い、その効果を確認することが必要になると考えられる。

上述の現象は、経験上すでに知られていることではあるが、本検討の数値解析により、明確に示されたものである。裏込め注入工の設計において、裏込め注入材の剛性が覆工応力に及ぼす影響を十分に考慮しないまま材料を選定する事例も見受けられるが、設計の適切性を担保するためには、現場の技術者がその目的と地山条件等を把握し、それに応じた裏込め注入材を選定することが肝要と言える。

## 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) 独立行政法人土木研究所：道路トンネル変状対策工マニュアル(案)、土木研究所資料、第3877号、2003

日下 敦



土木研究所道路技術研究  
グループトンネルチーム  
主任研究員  
Atsushi KUSAKA

砂金伸治



土木研究所道路技術研究  
グループトンネルチーム  
上席研究員、博(工)  
Dr.Nobuharu ISAGO

真下英人



国土交通省国土技術政策  
総合研究所道路構造物研究  
部長、博(工)  
Dr. Hideto MASHIMO