

山岳トンネルの裏込め注入に関する研究

松尾 知明¹・嶋本 敬介²・朝倉 俊弘³・内藤 繁⁴・田川 謙一⁵

¹学生会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: matsuo.tomoaki.67x@st.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学大学院助教 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: shimamoto.keisuke.4u@kyoto-u.ac.jp

³正会員 京都大学大学院教授 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: asakura@kumst.kyoto-u.ac.jp

⁴正会員 東海旅客鉄道株式会社 総合技術本部 技術開発部 (〒485-0801 愛知県小牧市大山 1545-33)

E-mail: sigeru.naitou@jr-central.co.jp

⁵正会員 東海旅客鉄道株式会社 新幹線鉄道事業本部 掛川保線所 (〒436-0056 静岡県掛川市中央 1-6-1)

E-mail: kenichi.tagawa@jr-central.co.jp

我が国には覆工背面に空隙を有する山岳トンネルが多く存在する。そのようなトンネルの補強方法としては裏込め注入が有効であるが、空隙範囲および巻厚不足が覆工耐力に与える影響や、裏込め注入において注入圧が覆工背面に作用することによる覆工への影響について検討した事例は少ない。本論文では、まず背面空隙の存在範囲と巻厚不足が地震時に覆工耐力に与える影響について数値解析により検討した。次に、実験により覆工に作用する注入圧の検証を行い、その結果を用いた数値解析により適切な注入方法について検討を行った。その結果、巻厚が不足している箇所に裏込め注入を施工する際は、注入圧が覆工背面に作用することで覆工に破壊が生じる可能性があるが、注入管の配置ピッチを短くすることで、覆工に作用する注入圧を下げる事が可能であることが分かった。

Key Words : *mountain tunnel, seismic performance, backfill grouting, numerical analysis, injection pressure, opening behind the lining*

1. 緒言

現在、我が国には矢板工法によって建設されたトンネルが多く存在する。矢板工法では、施工段階において、覆工背面と地山との間に空間が残りやすく、特にアーチ天端部では空間が生じる場合が多い¹⁾。この空間が存在する場合には、外力が覆工に作用する時、荷重が不均等に作用する上、十分な地盤反力が期待できないために、覆工に変状が生じやすい。そのような変状の対策としては、覆工背面空隙への注入（以下、裏込め注入）を実施し、空間をくまなく充填することが効果的である。本研究では規模の大きな空間を「空洞」、小さな隙間程度の空間を「空隙」と定義し、空隙を主な研究対象とした。

山岳トンネルの背面空隙とトンネル変状の関係については過去にいくつかの研究^{2,3)}がなされており、例えば朝倉らは模型実験により背面空隙が覆工耐力に与える影響を検討し、背面空隙が存在すると外力に対する覆工の耐力が大きく低下することを明らかにしている。しかし、背面空隙の存在による覆工耐力の低下においては、空隙の範囲や、覆工巻厚が大きく影響すると考えられるが、それについて詳細に検討をした事例は少ない。

裏込め注入については、注入圧200kPa程度を管理値⁶⁾として施工されることが多いが、特に巻厚が不足している箇所に施工する際に、200kPaの注入圧が覆工背面に作用すると、注入圧によって変状が発生する可能性が考えられる。裏込め注入施工の際、注入圧によって覆工背面に作用する圧力は、宮瀬ら⁷⁾の計測事例によると、注入

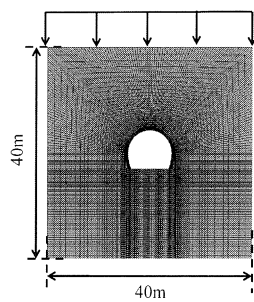


図-1 解析モデル

表-1 入力物性値一覧

物性値	地山	覆工
ヤング率	200MPa	22GPa
ポアソン比	0.30	0.20
一軸圧縮強度	1.15MPa	18.0MPa
内部摩擦角	35度	30度
粘着力	0.30MPa	5.2MPa
引張強度	0.06MPa	1.8MPa
単位体積重量	19kN/m ³	23kN/m ³
巻厚	—	70cm
破壊規準	Mohr-Coulomb の破壊規準	

圧が200kPaに達した時点でも4kPa程度であった。しかしこの事例においては注入前後の覆工背面の状況は十分には確認されていない。すなわち、文献6)は一つの計測事例であり、実際に最大でどの程度の注入圧が覆工に作用し得るのかについては現状では不明確である。

これらの課題に対し、本研究では、まず数値解析により背面空隙の存在範囲と覆工の巻厚不足が覆工耐力に及ぼす影響の定量的な評価を行った。次に、注入圧によって覆工に作用し得る圧力を実験により検証し、巻厚不足箇所を実験で把握した圧力が作用した場合においても覆工の変状を防ぐための対策について検討を行った。

2. 裏込め注入が必要となる条件の検討

本研究では設定外力を地震による地盤のせん断変形に設定した。本来トンネルは耐震性に富んだ構造物であるとされてきたが、吉川ら⁸⁾により、次の条件がそろえば山岳トンネルも地震被害を受ける可能性が高いことを指摘されている。

- ①地震の規模が大きい
- ②トンネルが震央もしくは地震断層の近傍にある(気象庁マグニチュードでM7の地震では10km以内、M8では30km以内)
- ③特殊条件が介在する(例えば、坑口周囲の斜面が不安定な場合、地山に何らかの欠陥がある場合、トンネルを横切る地震断層がある場合等)

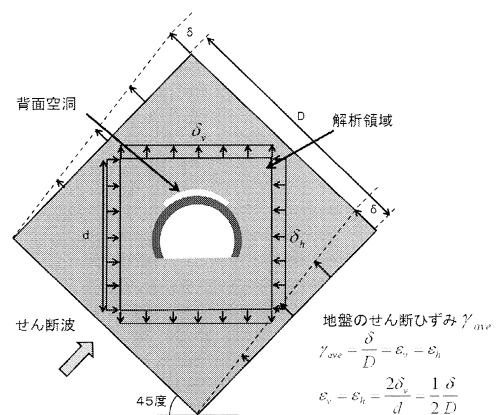


図-2 鉛直下方向から45度の角度を持ってせん断波が入射するときの模式図

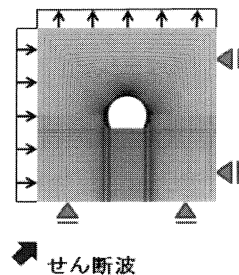


図-3 鉛直下方向から45度の角度を持ってせん断波が入射するときの境界条件

本研究ではこの条件のうち、特に③における背面空隙に着目して研究を行った。

(1) 解析概要

地震時においてトンネルは圧縮波によるよりも、せん断波によってより大きな被害を受けると考えられるので、本研究の数値解析においては地震によるせん断波の影響に着目した。ここでは、地震によるせん断波がトンネル軸に垂直に山岳トンネルを有する地山に入射し、地盤のせん断変形が発生することを想定し、その時の覆工耐力を検討する。

境界条件として、解析領域の境界に変位を与えて地盤のせん断ひずみを徐々に増加させることで、地震時の地盤の変形を静的に模擬した。解析には有限差分コードFLAC3Dを用いた。覆工はMohr-Coulombの破壊基準に基づく完全弾塑性体としモールクーロンの破壊包絡線を越えたものをせん断破壊、引張破壊に関しては、引張応力が引張強度に達したものを引張破壊とする。地震時の覆工コンクリートの破壊形態にはせん断破壊のほか、圧縮(曲げ圧縮破壊)や曲げ引張ひび割れがあるが、解析上、曲げ圧縮破壊が発生するときの覆工縁部の要素の応力状態は破壊規準で考えるとせん断破壊と同じ状況にあり、言い換えると曲げ圧縮破壊は縁部で局所的にせん断破壊が発生しているともいえる。よって、本論文でせん断破壊と表現しているものの中には圧縮も含まれている。

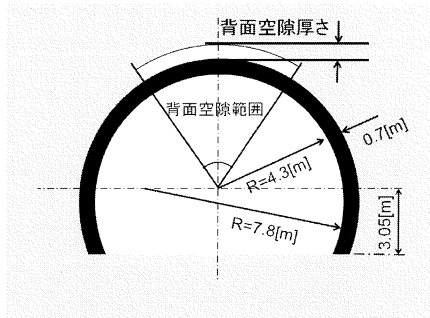


図4 トンネルおよび背面空隙概要

表-2 解析ケース一覧

空隙範囲	空隙無し	10度	20度
	ケース1	ケース2	ケース3
30度	60度	90度	120度
ケース4	ケース5	ケース6	ケース7

トンネル覆工の地震に対する耐力は、覆工内面にせん断破壊が生じるときの地盤のせん断ひずみをもって比較する。これは覆工内面のせん断破壊は覆工コンクリートの剥落に直結すると考えられるためである。

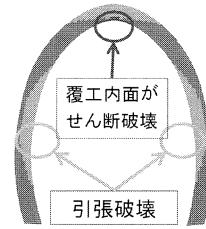
(2) 解析モデル

解析は簡単のため二次元平面ひずみ状態を考える。図-1に示すように、解析領域は40m×40mとしている。山岳トンネルの地震被害は、①坑口部の被害、②不良地山区間の被害、③断層のずれによる被害の3つに大別される¹⁰⁾。不良地山区間の地震被害の方が、健全部よりも地震被害が大きくなることが予想されるので、本論文では運行がより安全側となるように、覆工に初期土圧を作用させる。土被りを115mと設定し、矢板工法で施工されたトンネルを想定して応力解放率を95%に設定し、初期地圧の5%を覆工に作用させている。

解析における各種物性値¹⁰⁾⁻¹⁵⁾を表-1に示す。覆工の一軸圧縮強度は18.0MPaである。地山はソリッド要素を用い、Mohr-Coulombの破壊基準に基づく完全弾塑性体とし、ヤング率は軟岩相当の200MPaとした。覆工は無筋コンクリートを想定し、ソリッド要素を用いて地山と同様の完全弾塑性体とした。なお、巻厚は地山の物性と対応させて在来工法で施工された新幹線トンネルにおいて施工例が多い70cmに設定している。

(3) せん断波の入射角と位相の設定

ここではせん断波の入射角と位相について述べる。一般に地層は水平に堆積し、地山は地表面に近いほど軟らかい場合が多いため、スネルの法則より地震波は基本的に鉛直下方向から入射するものと考えられるが、特に山岳トンネルにおいては、断層や破碎帯、褶曲などの複雑な地質構造のため、常に鉛直下方向から入射するとは限



変形量を30倍に拡大して表示
地盤のせん断ひずみ0.30%時

図5 覆工の塑性領域：ケース5

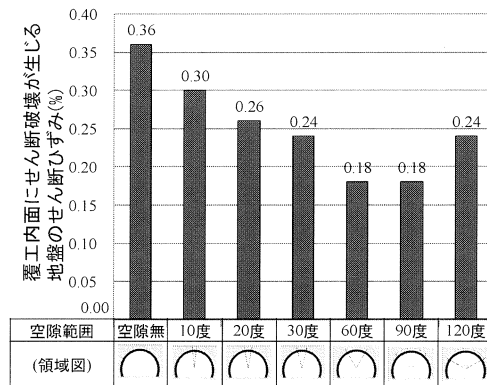


図6 解析結果

らない。また、それぞれの入射角において覆工の被害箇所や変状は異なる。

真下ら¹¹⁾の研究によると、覆工背面に空隙を有する矢板工法トンネルの代表的な地震被害箇所と変状は、以下のa)-b)の4つに分類できる。

- a)アーチ肩部：せん断破壊、圧ぎ(曲げ圧縮破壊)
- b)アーチ天端部：せん断破壊、圧ぎ
- c)側壁部：せん断破壊、押し出し
- d)盤膨れ

ここで、a)の事象は鉛直下方向から入射の地震波によるせん断変形の影響が大きい、b)の事象は鉛直下方向から斜め入射の地震波による水平方向の圧縮変形の影響が大きい、c)の事象は鉛直下方向から斜め入射の地震波による鉛直方向の圧縮変形の影響が大きい¹¹⁾。

本論文では、b)の事象に着目した。図-2に、せん断波入射時においてトンネルに作用する増分荷重の作用方向の模式図を示す¹⁰⁾。ここで、せん断波が鉛直下方向から45度の角度を持ってトンネルに入射するときは、図-2に示す他に、領域境界に作用する鉛直力と水平力の組み合わせが逆になる位相が発生する。研究では、天端においてせん断破壊が発生しうる、トンネル内空が水平方向に減少し、鉛直方向に増加するような変形挙動を示す図-2の位相に着目し、数値解析を行った。

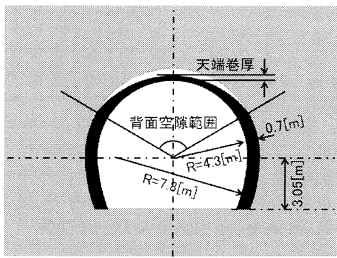


図-7 トンネルおよび背面空隙概要

表-3 解析ケース一覧

空隙範囲	60度			
天端巻厚	14cm	28cm	42cm	56cm
	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4

(4) 境界条件

境界条件を、図-3に示す。鉛直下方向から45度の角度を持って入射することを想定して、図-3に示すように、右边と下辺をローラー支持とし、上辺と左辺から一様な変位を与えた。

(5) 解析手順

解析は以下の手順で行うこととした。

- ①初期地圧解析：領域上辺に土被り100m分の応力を鉛直方向に作用させる。左右両辺の境界条件はスライダーとする¹⁶⁾。
- ②掘削解析：矢板工法による全断面掘削で施工されたことを考慮し、掘削部分の要素を抜き取り、応力解放率を95%として解析を実施する。その後、覆工コンクリート部分の要素を挿入し、残り5%を解放する。
- ③地震時のせん断変形解析：図-3のように境界に変位を与えることで、せん断ひずみを覆工にせん断破壊が生じるまで1ステップあたり0.02%ずつ与える。

(6) 背面空隙範囲が覆工耐力に与える影響の検討

背面空隙範囲の違いが覆工耐力に与える影響を検討するために、空隙範囲を10度から120度までの7ケースを設定した。

トンネルおよび背面空隙の概要図を図-4に示す。トンネル寸法は標準断面⁹⁾に従った。背面空隙は、施工上、最も空隙が残りやすい天端を中心とする範囲とする。単純化のために背面空隙の厚さは10cmの一定の厚さとし、巻厚も背面空隙部分でも設計巻厚70cmとしている。

ケース5の塑性領域図を図-5に、解析結果を図-6に示す。ケース5においては最終的に覆工天端内面の鉛直方向上向きの変位が5.22cm、空隙の厚さは10cmから9.07cmへと変化した。また、最も変位が小さな空隙のないケース1では、覆工天端内面の鉛直方向上向きの変位は4.35cmであった。

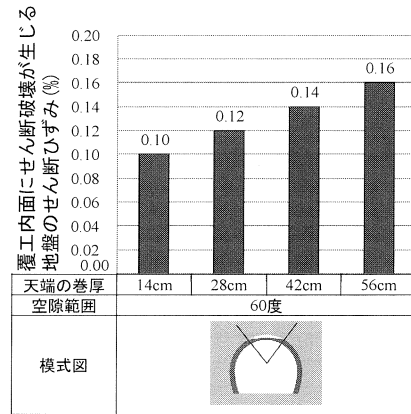


図-8 解析結果

空隙がない健全な場合は地盤のせん断ひずみが0.36%まで覆工天端内面にせん断破壊が生じないが、背面空隙範囲が10度のケースにおいて0.30%、20度のケースではさらに下がり0.26%、背面空隙範囲が60度と90度のケースについては、健全なケースの半分の0.18%でせん断破壊が生じた。しかし、背面空隙範囲が120度のケースは0.24%となり、90度のケースよりも高い覆工耐力を持つことが確認された。これらのことについて考察する。まず、背面空隙が広がれば広いほど、覆工が天端付近で地盤から反力を受けることができないため、背面空隙が広いほど覆工耐力が低下すると考えられる。しかし、背面空隙が肩部まで及ぶと、覆工が地盤から受ける、内空断面を水平方向に縮小させる力が小さくなる。よって、天端の反力を得ることができない60度から90度において覆工耐力が最も低下し、120度のケースでは天端で反力を得ることができないものの、覆工が受ける水平方向の力が減少したため、覆工耐力が60度や90度よりも高くなったものと考えられる。ここで、比較検討を行った中で他よりも小さな地盤のせん断ひずみで覆工にはせん断破壊が生じるということは、他の条件よりも小さな地震規模で覆工が破壊することを意味するので、そのようなケースは優先的に裏込め注入による補修が必要である。

(7) 巻厚不足が覆工耐力に与える影響の検討

実トンネルにおいてはトンネルの巻厚が設計巻厚どおりあるとは限らない。そこで、天端の巻厚不足が覆工耐力に与える影響の検討を行った。図-7のように巻厚が不足している範囲に背面空隙が存在するものとしてモデル化している。

天端における巻厚を、設計巻厚70cmの1/5～4/5である14cm～56cmの4通り設定した。背面空隙の範囲は図-6に示したように、最も小さいせん断ひずみで覆工内面にせん断破壊が発生した60度とした。解析ケースの一覧を表-3に示す。

覆工耐力を、前節と同様に覆工内面にせん断破壊を生

じる地盤のせん断ひずみで比較する。結果を図-8に示す。

巻厚が56cmの場合は0.16%で覆工内面にせん断破壊が生じたのに対し、巻厚が14cmの場合は0.10%となり、巻厚が不足するほど覆工耐力が低下する結果となった。

(8) まとめと考察

背面空隙が60度から90度の範囲で覆工耐力の低下が顕著であり、巻厚が不足すると更に覆工耐力が低下することが確認された。

しかし、巻厚が薄い場合は裏込め注入施工時に注入圧が覆工に作用することによって覆工に破壊が生じる恐れがあり、施工時において覆工にどの程度の注入圧が作用するかを明らかにする必要があるため、3章において実験を行い検証する。

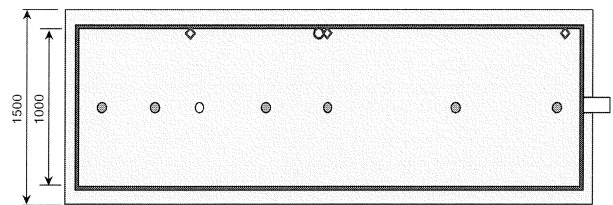
3. 裏込め注入圧に関する実験

覆工裏込め注入施工時は最大200kPaという高い圧力で注入を行うため、この圧力がそのまま覆工に作用すると、空隙の範囲や覆工の薄さによっては損傷（ひび割れ）を起こす可能性がある。閉ざされた空間に水のような粘性の小さい液体を注入する場合には、静水圧が壁全体に作用するとともに、空間が充填された瞬間に注入圧も壁全体に作用するが、一般に裏込め注入に使用される可塑性注入材の場合でも、同様のことになるのか検証する必要がある。そこで背面空隙を模擬した空間を有する試験体を作成し、実際に可塑性注入材を使用して注入試験を実施し、覆工に作用する圧力を確認した。また、注入管からの距離で覆工への圧力が変わるのかどうか実験において確認した。なお、使用した可塑性注入材は実験直前の品質試験の結果、比重1.41、フロー値145.5であった。これは要領¹⁷⁾の基準（比重1.3以上、フロー値80mm～155mm）を満たしている。

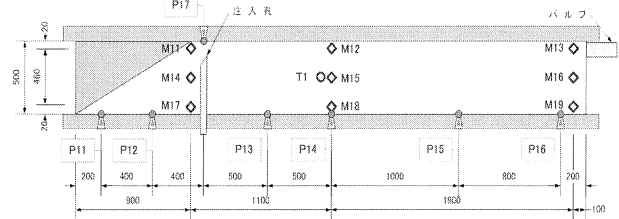
(1) 試験体概要

試験体は注入スペース（内寸）を4m×1m×0.5mとした。構造の概要は下記のとおりである。

- ・上版および下版をRCスラブ、側面を鋼製部材で構成し、200kPaの圧力でも隙間等から水が漏れない水密性のある構造とした。
- ・注入管は図-8(b)のように試験体の中央より片側にオフセットし、注入管に空隙の壁に近い状態と遠い状態を想定した。
- ・狭い閉塞した空隙を想定し、注入管と壁が近い側に斜め45度に鋼板を設置した。
- ・注入管（VP50）は実施工と同様に先端の形状は竹割



(a)平面図



(b)側面図

凡例

- 土圧計 [P11-16]
- ◇ 充填検知センサー [M11-19]
- 熱電対

図-9 試験体概要

表-4 充填検知センサーの検知状況

Q = 39 ℓ	M11 ☐	M12 ☐	M13 ☐
	M14 ☐	M15 ☐	M16 ☐
	M17 ☐	M18 ☐	M19 ☐
Q = 510 ℓ	☐	☐	☐
	☐	☐	☐
	☐	☐	☐
Q = 1201 ℓ	☐	☐	☐
	☐	☐	☐
	☐	☐	☐
Q = 1696 ℓ	☐	☐	☐
	☐	☐	☐
	☐	☐	☐
Q = 1775 ℓ (充填完了)	☐	☐	☐
	☐	☐	☐
	☐	☐	☐
凡例	■ 検知	□ 未検知	

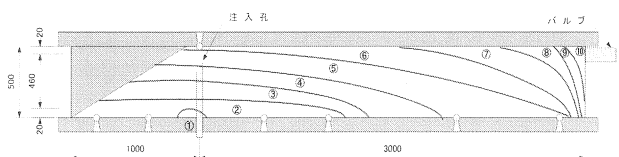
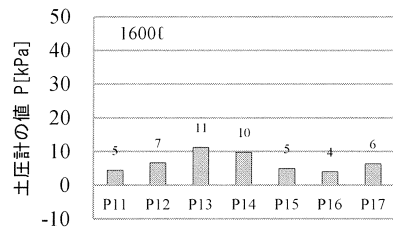


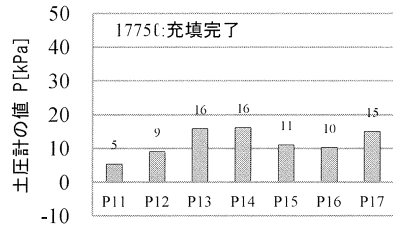
図-10 注入充填状況(イメージ)

構造とし、上版スラブ下面から50mm離して固定した。

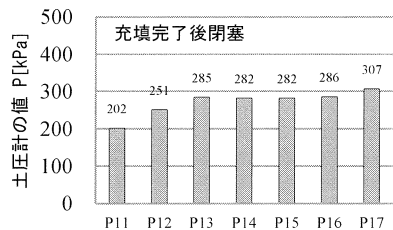
- ・広い側（図-8(b)右側）側面上部に開閉バルブ付きのエア抜き兼注入材リーク管（以下、リーク管）を設けた。リーク管の位置（高さ）は、実施工で空隙、



(a) 底面全てに充填材が分布



(b) 注入材がリーク (充填材で充填完了)



(c) バルブを閉じ空間を閉塞

図-11 各分布状態における土圧計の値

天井部から 50mm の位置に開口部がくるように設置した。

- ・試験体内には土圧計を設置した。図-9に示すとおり覆工を想定した下版に一直線上に P11~P16を、注入管直上の上版にP17を設置した。
- ・試験体側壁内面側に電気抵抗の変化で注入材の充填状況をモニターできる「充填検知センサー(M11~19)」を設置した。

(2) 実験手順

試験は、下記の手順により実施した。

- ・最初は空隙が注入管とリーク管の間で連続している状態を想定し、リーク管のバルブは開とした。
- ・注入中は、試験体内に設置した土圧計により注入材が覆工に与える圧力を測定するとともに、充填検知センサーにより充填進捗状況を確認した。
- ・注入材がリーク管からリークし始めた時を充填完了と判断した。
- ・注入材のリーク後、バルブを閉じることにより、閉塞された空隙に注入材が充填された状態を再現し、注入圧が200kPaを超えた瞬間に注入を中止し、試験終了とした。

(3) 注入材充填状況

充填検知センサーによる充填状況検知結果を表-4に示す。また、試験体①における注入材の充填進捗イメージを図-10に示す。注入材は、注入管付近を中心に積層していくような形で遠方に向かって流動していく。すなわち、空隙を下から埋めていくのではなく、注入管側から空隙範囲を狭めていく形で埋めていくということになる。

(4) 圧力測定結果

試験体に設置した土圧計に作用する注入圧力の変化を図-11に示す。実験中の土圧計の数値の経過の概要は以下のとおりである。

- ・流入量が充填完了（すべての充填検知センサーが反応した時点）となる流量の1/2程度までは、試験体底面の土圧計に作用する圧力は10kPaに満たない値であり、図-11 (a)に示すように底面の全面にわたって注入材が分布した状態においても、10kPa程度の圧力しか土圧計には作用しなかった。
- ・図-11 (b)に示すように、リークが発生し、充填が完了した時の土圧計の値は20kPa以下の小さい圧力であった。また注入管の口元の注入圧を目視で観察しており、その値も20kPa程度であり、施工管理上の注入圧上限値200kPaと比較して1/20程度であった。
- ・試験体側面上部に設置したリーク管から注入材がリークし始めた後、バルブによって閉塞させると、図-11 (c)に示すように直後に試験体底面のすべての土圧計の値が200kPa以上に急上昇した。なお、バルブ閉塞の際は安全のため、注入流速をそれまでの1/2程度に半減させた上で測定を実施しているが、注入管の口元の注入圧も200kPa以上に急上昇した。なお、その際試験体から注入材の漏れなどは確認されなかった。

注入材の自重により試験体底面に作用する圧力は、注入材の密度を比重測定の結果から1410kg/m³とすると、試験体高さまで注入材が満たされた状態では、7kPa程度になるが、図-11 (a)から明らかなように試験体高さまで充填される以前でもそれよりも高い圧力が作用している。このことから、注入時の圧力は空隙充填の前でもわずかながら覆工に作用していることが分かる。

充填完了までは、可塑性注入材はその粘性により水とは違う挙動および圧力変化を示し、空隙が閉塞していない状態、例えば空隙がトンネル軸方向に長く連続している場合や、空気や注入材が漏出する隙間が存在する場合には、覆工に大きな圧力を与えず注入材により空隙が充填されることが分かった。しかし、バルブ閉塞直後、すなわち閉塞した空隙が完全に充填された瞬間、すべての試験体底面の土圧計の値は、それまでの10倍以上の値を

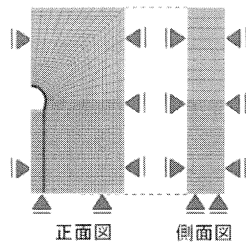


図-12 境界条件

表-5 入力物性値一覧

物性値	地山：軟岩	覆工
ヤング率	200MPa	22GPa
ポアソン比	0.30	0.20
内部摩擦角	—	30度
粘着力	—	5.2MPa
引張強度	—	1.8MPa
設計巻厚	—	70cm
破壊規準	線形弾性体	Mohr-Coulomb の 破壊規準に従う 弾完全塑性体

示した。すなわち、空気や注入材が漏出する場所のない閉塞した空隙では、注入管からの距離に関わらず覆工に大きな圧力が瞬間的に作用することが分かった。

(5) まとめと考察

実験結果より、裏込め注入施工の際、空隙が閉塞している場合において注入圧が覆工背面に直接作用することが分かった。このことから、巻厚不足箇所に注入圧による圧力が作用すると、覆工が破壊する恐れがある。そのため、覆工背面に注入圧による圧力が作用しても覆工に破壊が生じないように、内面補強工などの対策を講じることが必要である。

4. 裏込め注入時の巻厚不足箇所対策の検討

すでに述べたように、裏込め注入を施工するに当たり、覆工背面空隙を注入材で完全に充填することが望ましい。しかし、巻厚が不足している場合は注入圧で覆工が破壊する恐れがある。ここでは、注入圧が覆工に与える影響に着目し、対策を検討するため、数値解析を行った。

(1) 3次元解析による検討

裏込め注入時の巻厚不足箇所対策を検討するにあたり、まず、覆工に注入圧が作用した時の覆工への影響を検討する必要がある。また、裏込め注入の実施工においては、注入材は、トンネル断面方向だけではなく、トンネル軸方向にも流動していく。解析においても、実際の施工と同じように、トンネル軸方向への注入圧の影響も考慮するため、3次元解析によって、注入圧の影響を検討する

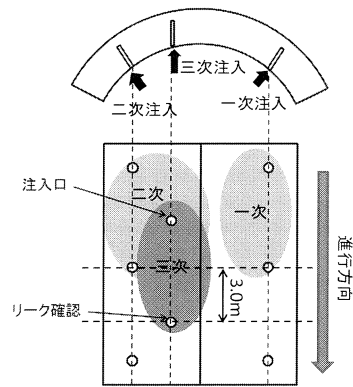


図-13 注入工の配置と注入順序

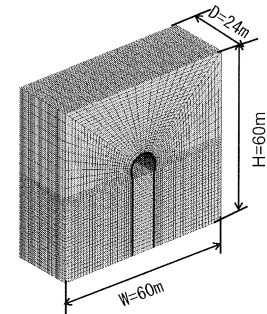


図-14 解析モデル

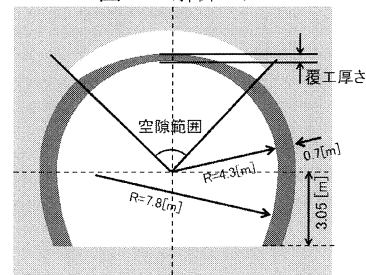


図-15 トンネル・背面空隙概要

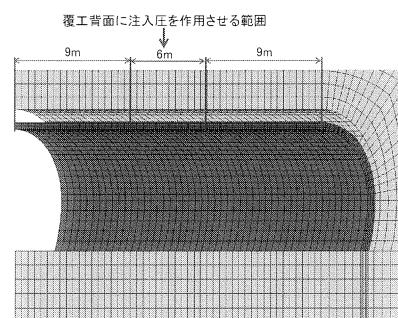
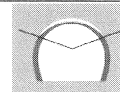


図-16 注入圧を作用させる範囲

表-6 解析ケース一覧

空隙範囲		60度	90度	120度
				
天端巻厚	14cm	ケース1	ケース2	ケース3
	28cm	ケース4	ケース5	ケース6
	42cm	ケース7	ケース8	ケース9
	56cm	ケース10	ケース11	ケース12
	70cm	ケース13	ケース14	ケース15

こととした。

3次元解析を行うに当たり、トンネル軸方向に注入圧を作用させる範囲の検討を行った。注入管の設置間隔は3mとした。裏込め注入は図-13に示すようにトンネルの長手方向に沿って、片方の坑口側からもう片方の坑口に向かって順番に注入を行う。このことから、トンネル軸方向にある間隔で注入管を設置した場合、覆工背面に注入圧が作用するトンネル軸方向長さはその2倍の距離であり、トンネル軸方向に3m間隔で注入管を設置した場合は、覆工背面に注入圧が作用するトンネル軸方向長さは最大で6mである。よって、ここでは3次元的效果を考慮し、解析モデルにおいて中央の6mの区間にのみ注入圧を作用させた。

(2) 解析モデル

解析領域を図-14に示すように60m×60m×24mとし、地山は線形弾性体とし、ヤング率は軟岩相当の200MPaとした。覆工は無筋コンクリートを想定し、完全弾塑性体とした。トンネルおよび背面空隙の概要図を図-15に示す。トンネル寸法は標準断面⁹⁾に従い、トンネル掘削外径は10mとした。背面空隙は、最も空隙が生じやすい天端部分に設けた。覆工巻厚は、天端部において設計巻厚70cmの1/5である14cmから、所定の巻厚70cmまで設定した。解析に用いた入力物性値を表-5に示す。

(3) 解析方法

実施工における作業上の安全を見込んで、300kPaの圧力を覆工背面に等圧に作用させて、覆工内面に破壊が生じないか検討を行った。境界条件を図-12に示すように三次元モデルの上面以外をローラー支持とした。覆工背面の注入圧が作用する範囲において等圧な応力を作用させる^{18)~20)}ことで覆工に作用する注入圧を再現し、注入圧は0kPaから10kPaずつ増加させて解析を行った。注入圧を作用させる範囲を図-16に示す。なお、注入材の自重は覆工に作用する注入圧に比べて極めて小さいので、解析では注入圧のみ考慮する。

(4) 解析ケース

解析ケースは、空隙範囲を60度、90度、120度に設定し、巻厚を設計巻厚の1/5である14cmから5/5の70cmまで5パターン設定した。解析ケースの一覧を表-6に示す。

(5) 解析結果

図-17に覆工内面に引張破壊が生じた注入圧を比較したグラフを示す。空隙範囲が90度のケースを例にみると、天端での巻厚が70cmだと370kPaで覆工内面に引張破壊が生じるが、巻厚56cmだと320kPa、巻厚42cmだと280kPa、

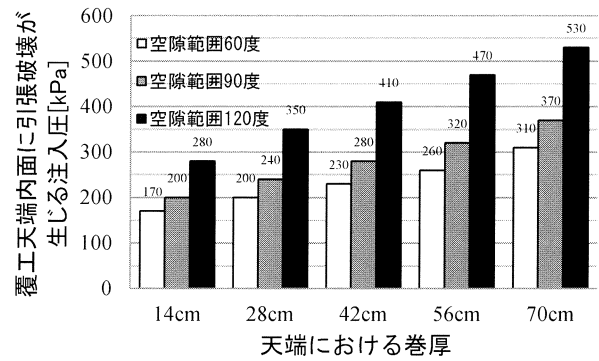


図-17 解析結果

表-7 300kPaにおける覆工内面での引張破壊の有無

空隙範囲	巻厚	空隙のトンネル軸方向長さ			
		5.0m	4.0m	3.0m	2.0m
60度	14cm	破壊有	破壊有	破壊有	破壊無
	28cm	破壊有	破壊有	破壊無	
	42cm	破壊有	破壊無	-	
	56cm	破壊有	破壊無	-	
90度	14cm	破壊有	破壊有	破壊有	破壊無
	28cm	破壊有	破壊無	-	
	42cm	破壊無	-	-	
120度	14cm	破壊有	破壊無		

巻厚28cmだと240kPa、巻厚14cmだと200kPaとなっており、生じるが、巻厚56cmだと320kPa、巻厚42cmだと280kPa、巻厚28cmだと240kPa、巻厚14cmだと200kPaとなっており、巻厚が不足するほど低い注入圧で破壊が生じている。道路、鉄道では巻厚が20cm以下の場合は内面補強を行って200kPa以下で注入を行うよう設定されている⁶⁾²¹⁾²²⁾が、この結果は、これらの指針とおおむね整合の取れた結果が得られている。次に、破壊場所について考察する。背面空隙範囲90度、巻厚が設計巻厚の3/5であるケース8)において、引張破壊を生じた場所を図-18に示す。

圧力が作用している範囲の中央部分が引張破壊を起こすのではなく、注入圧力が作用している範囲外で引張破壊を生じた。注入圧300kPaを作用させた際の、解析領域の最大主応力分布図を図-19に、最小主応力分布図を図-20に示す。引張を正、単位はMPaとし、変形量を500倍に拡大している。図-19より、注入圧が作用している範囲の外に最大引張応力が発生している。このことを断面ごとに考察する。

注入圧が200kPa時の各断面の主応力方向を、変形量を500倍に拡大した領域図に重ねて、図-21に示す。また、天端での変位も合わせて示す。

青が圧縮応力、赤が引張応力である。断面①では、覆工背面に静水圧同様、面に垂直な荷重が作用することにより、天端付近が圧縮状態になっていることが分かる。

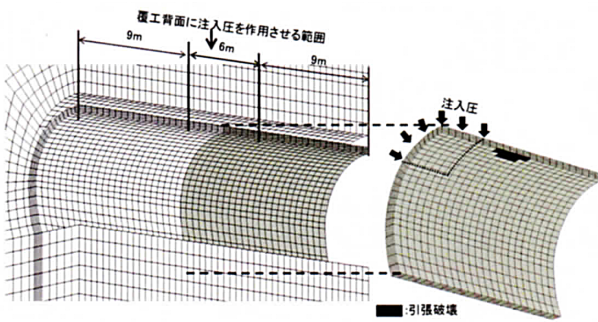


図-18 引張破壊を生じる箇所

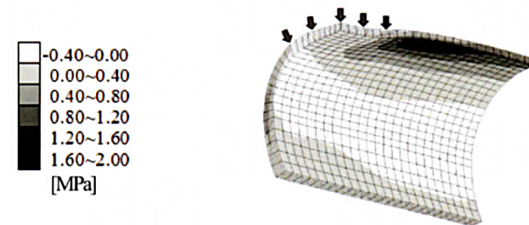


図-19 最大主応力分布図

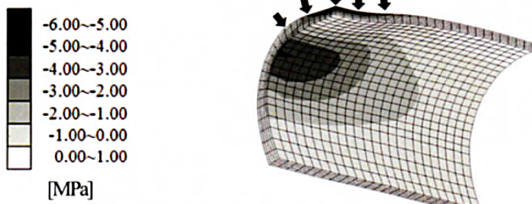


図-20 最小主応力分布図

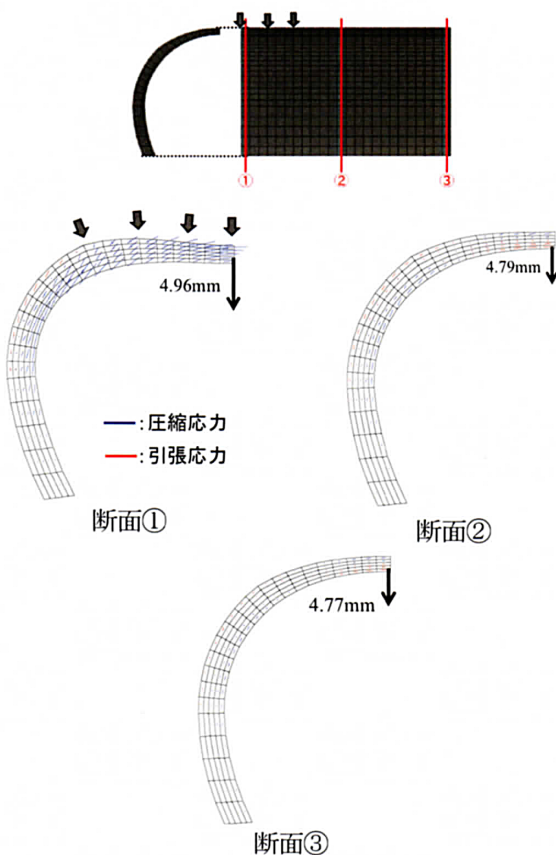


図-21 各断面の主応力方向

次に断面②においては、断面①の鉛直下向きの変形に引き込まれるように鉛直下方向の変位が発生し、それにより天端覆工内面に引張応力が発生している。そして、断面③では変形量も小さくなり、大きな応力が発生しなくなる。よって、断面②付近において、最大引張応力が発生したと考えられる。すなわち、裏込め注入の施工においては、注入範囲だけではなく、その前後の状況にも注意を払う必要がある。

この結果から、施工の工夫により注入圧力を下げる手法を検討することとした。前節の実験結果から、注入時に閉塞すると高い圧力が覆工に作用するため、閉塞させない状況を作る必要がある。閉塞させないためには、圧力を下げるためのリーク管を設けることが考えられる。すなわち、注入管の設置間隔を短くすることで、覆工に作用する注入圧を下げるができると考えた。先ほどの解析ケースについて、覆工背面に300kPaの注入圧を作用させても、覆工に引張破壊を生じないトンネル軸方向における空隙範囲の検討を行った。

具体的には、前述の8ケースについて、空隙のトンネル軸方向長さを5.0mに設定し、覆工内面に引張破壊を生じるまで注入圧を10kPaずつ上昇させる。そして、300kPa以下で引張破壊が生じたケースについては、更に空隙のトンネル軸方向長さを1.0m短くし、同様に注入圧を作用させる。そして破壊が生じたものについては更に1.0m短くし、300kPaでも破壊を生じない空隙のトンネル軸方向長さを検討する。

解析結果を表-7に示す。空隙のトンネル軸方向長さに注目する。空隙範囲60度巻厚14cmのケースでは、空隙のトンネル軸方向長さが2.0mで300kPaの圧力を背面に作用させても覆工に破壊が生じなくなり、28cmのケースでは3.0m、42cmでは4.0m、56cmでは4.0mの空隙のトンネル軸方向長さ、つまり圧力の作用範囲で覆工に破壊が生じなくなる。すなわち、空隙の軸方向長さが短いほど、応力の作用範囲が狭まり、覆工に生じる応力が小さくなる。結果として、300kPaの圧力が作用しても覆工に引張破壊が生じなくなる。一方、図-17では、トンネル横断方向の空隙範囲が狭い方が、覆工天端内面に引張破壊が生じる注入圧が小さくなる結果となっている。しかし、60度以下の範囲であつたら横断方向についても空洞範囲が狭いほど、注入によって覆工に生じる応力は小さくなるものと考えている。

(6) まとめと考察

裏込め注入時の巻厚不足箇所対策を検討するにあたり、まず、覆工に注入圧が作用した時の覆工への影響を、3次元解析によって検討した。その結果、巻厚不足箇所において裏込め注入を実施した際、圧力が作用している範

囲の中央部分が引張破壊を起こすのではなく、注入圧力が作用している範囲外で引張破壊を生じた。すなわち、裏込め注入の施工においては、注入範囲だけではなく、その前後の状況にも注意を払うことが必要であることがわかった。このことから、施工の工夫により覆工に作用する圧力を下げる方法について検討を行った。その結果、リーク管として天端に設置する三次注入管を増やす方法が有効であることがわかった。

5. 結言

本研究では、数値解析によって背面空隙の存在範囲と巻厚の不足が覆工耐力に及ぼす影響の定量的な評価を行った。次に、巻厚不足箇所に注入圧力が作用しても覆工に破壊が生じないように、対策を講じるため、裏込め注入において覆工に作用する注入圧を実験により検証し、その実験から得られた結果を用いて数値解析を行い、対策の検討を行った。

合理的に裏込め注入を行うために、以下に本研究で得られた結論について記す。

- 1) 背面空隙が存在する時、地震に対する覆工耐力は健全な場合の半分まで低下する。
- 2) 巻厚が不足すると、それに応じて覆工耐力が低下する。
- 3) 裏込め注入において空気や注入材が漏出する場所があると、覆工に作用する圧力は数10kPaと低い。
- 4) 裏込め注入において、空気や注入材が漏出する場所のない閉塞した空隙では、水と同様に注入管からの距離に関わらず覆工に大きな圧力が瞬間的に作用する。
- 5) 背面空隙の範囲が狭く、巻厚が不足している箇所ほど、注入管のトンネル軸方向における設置間隔を短く設定し、注入圧が作用するトンネル軸方向長さを短くし、覆工に発生する応力を小さくする必要がある。

今後は地山の剛性、奥行き方向での巻厚不足や空隙の分布の変化などについて、実施工への研究の適用に向けてより詳細に検討する必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会 岩盤力学委員会 トンネルの変状メカニズム, pp.16-20, 丸善株式会社, 2004.
- 2) 朝倉俊弘, 小島芳之, 安東豊弘, 佐藤豊, 松浦章夫: トンネル覆工の力学挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集 No.493/3-27, pp.79-88, 1994.
- 3) 蔣宇静, 藤崎雅史, 川田晶仁, 棚橋由彦: 地山強度の時間依存性を考慮した変状予測と補強工法効果に関する研究,

- 長崎大学工学部研究報告 Vol.35(65), pp.95-100, 2005.
- 4) 吉川和行, 秩父顕美: トンネル背面空洞がトンネル覆工に及ぼす影響について, 土木学会年次学術講演会講演概要集 Vol.64, VI-326, 2009.
- 5) 中西祐介, 野城一栄, 春日井敦詞: トンネル背面空洞と裏込め注入の効果に関する実験, 土木学会年次学術講演会講演概要集 Vol.64, III-407, 2009.
- 6) (株)高速道路総合技術研究所: 矢板工法トンネルの背面空洞注入工設計・施工要領, p.24, 2005
- 7) 宮瀬文裕, 朝倉俊弘, 栗林賢一, 安居和博, 名倉健二: トンネル覆工背面新充填工法の実施工への適用時における各種計測, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.53, No.6, pp.224-225, 1998.
- 8) 吉川恵也: 鉄道トンネルの震災事例調査, 鉄道技術研究報告, No.1123, 1979.
- 9) 斉藤徹, 吉村恒, 野沢太三, 藤井浩: 現場技術者のためのトンネル工事ポケットブック, 山海堂, 1983.
- 10) 朝倉俊弘, 志波由紀夫, 松岡茂, 大矢敏雄, 野城一栄: 山岳トンネルの地震被害とそのメカニズム, 土木学会論文集 No.659/3-52, 27-38, 2000.
- 11) 真下英人, 日下敦: 地震時における山岳トンネルの挙動に関する基礎的研究, トンネルと地下 vol.43 no.4, pp.25-35, 2012.
- 12) 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構: 山岳トンネル設計施工基準・同解説, 2008年4月.
- 13) 菊池宏吉: 地質工学概論, 土木工学社, 1990.
- 14) 鉄道総合技術研究所編: SI 単位版鉄道構造物等設計標準・同解説コンクリート構造物, 丸善株式会社, 2002.
- 15) 松長剛: トンネル変状の進展予測と対策の合理化に関する研究, 京都大学学位論文, 2007.
- 16) A.Graziani, D.Boldini, R.Ribacchi: Practical estimate of deformations and stress relief factors for deep tunnels supported by shotcrete, Rock Mechanics and Rock Engineering, volume 38, Number 5, Pages 345-372, 2005.
- 17) 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社: 矢板工法トンネルの背面空洞注入工設計・施工要領, (株)高速道路総合技術研究所, p.15, 2006.
- 18) H.Mashimo, T.Ishimura: Evaluation of the load on shield tunnel lining in gravel, Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 18, Issues 2-3, April-June 2003, Pages 233-241, Tunnelling in Japan
- 19) Yukinori Koyama: Present status and technology of shield tunneling method in Japan, Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 18, Issues 2-3, April-June 2003, Pages 145-159, Tunnelling in Japan
- 20) 矢萩秀一, 入江 健二, 大門 信之, 中村 兵次, 鈴木 久尚: 施工過程を考慮したシールドトンネル覆工の応力計算方法, 土木学会論文集, Vol.65, No.2, pp.128-147, 2009.
- 21) 財団法人 鉄道総合技術研究所: 変状トンネル対策工設計マニュアル, p.86, 2000.9
- 22) 社団法人 日本道路協会: 道路トンネル維持管理便覧, p.148, 2010.1

(2012.5.28 受付)

STUDY ON THE BACKFILL GROUTING WORK IN MOUNTAIN TUNNELS

Tomoaki MATSUO, Keisuke SHIMAMOTO, Toshihiro ASAKURA
Shigeru NAITOU and Kenichi TAGAWA

In grouting the openings behind the lining of mountain tunnels, there are two subjects for efficiently and safety work. You need a quantitative evaluation of the influence of the openings behind the lining on seismic performance and you need the appropriate construction method of the grouting. On this study we examined the influence of the range of the openings and the lack of the lining thickness on the seismic performance. And next, we measure the injection pressure acting on the lining by experiment, and we examined the appropriate construction method of the grouting by numerical analysis using the results of the experiment. Then, in the opening's range of 60 degrees to 90 degrees, loss of seismic performance is remarkable, and the strength is further reduced by the lack of the thickness of the lining. And last, in the case of the thickness is thinner than designed, here is a possibility that lining is destroyed by the injection pressure. but it is possible to low the injection pressure acting on the lining by shorting the arrangement pitch of the pipes for grouting.