

トンネル覆工補強工の定量的選定に向けた 数値解析的検討の適用性

岡部 正¹・岸田 展明²・菅原 健太郎³・林 久資⁴

¹正会員 株式会社 ケー・エフ・シー 技術部 (〒105-0011 東京都港区芝公園 2-4-1 芝パークビル B 館 11F)
E-mail: okabe.tadashi@kfc-net.co.jp

²正会員 トボクリエイト株式会社 (〒755-0097 山口県宇部市常盤台 2-16-1 山口大学研究推進機構 C206)
E-mail: kishida@dobocreate.jp

³正会員 株式会社地層科学研究所 (〒242-0017 神奈川県大和市大和東 3-1-6JM ビル 4F)
E-mail: sugawara@geolab.jp

⁴正会員 山口大学大学院 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)
E-mail: hayashi@yamaguchi-u.ac.jp

山岳トンネルの維持管理段階において、緩み土圧、偏土圧、塑性圧などに伴う外力性と推定される変状がみられることがあり、必要に応じて補修や補強工法の適用について検討が行われている。しかしながら、トンネル覆工の補強工法の選定については点検要領に基づいて行われるが、定量的な手法は確立されておらず、技術者の判断に委ねられる部分が多い。

本研究では、繊維シート補強工の補強効果に着目し、いくつかの外力性の変状パターンについて想定し、補強工法として施工実績が比較的多い「繊維シート接着工」を適用した際の数値解析的検討を行った。その結果、繊維シート接着工の補強効果については、外力性の変状パターンごとの作用効果について数値解析によりある程度の評価ができることが確認された。

Key Words: tunnel, maintenance management, numerical analysis, carbon fiber sheet

1. はじめに

日本の高度成長期に数多く建設されたトンネルでは老朽化が進み、維持管理が重要となっている。その対象となるトンネルの多くは矢板工法により建設されており、材料劣化等の内的因子の他、地山の変状等による外力が要因による変状も多く報告されている。覆工に発生するひびわれの発生モードについては、緩み土圧や編土圧などにより代表的な変状形態が示されており¹⁾、変状要因の違いにより、対策工の作用効果についても違いがあるものと考えられ、それぞれの変状形態に対して適切な対策工パターンを選定することが重要であると考えられる。本研究では、数値解析手法を用いて、外力が要因である変状パターンのシミュレートを行い、それぞれの変状形態での補強工の作用効果について検証を行うものとする。なお、補強工は補強ランクに応じて裏込め注入工やロックボルト、内巻き工などが挙げられるが本報告においては、比較的实施例の多い「繊維シート接着工」を

対象とした。

2. 代表的な外力性変状要因¹⁾

以下にトンネルに作用する代表的な外力性変状要因について示す(図-1)。

(1) 緩み土圧

トンネルに作用する緩み土圧は、トンネル掘削時にトンネル周辺地山が緩むことにより、主に上部よりトンネルに作用する土圧である。緩み土圧が作用する場合には覆工の天端部分で縦断方向のひび割れが発生する。また、集中荷重として作用する場合には横断方向や放射状にひび割れが広がる場合がある。

(2) 偏土圧

偏土圧は、トンネル上部の地山が、傾斜している際な

ど、トンネルに作用する土圧が左右非対称となる。また、大規模な場合には斜面崩壊などを誘発することも考えられる。偏圧が発生し、斜め方向から土圧が作用する際は、肩部に縦断方向のひび割れが発生するが多い。

(3) 塑性圧

塑性圧は、地圧に対して地山強度不足であったり、地下水位の変化や地山のクリープ等によりトンネルに土圧が作用するような状況において発生する。塑性圧が発生し、側方から土圧が作用する際にはトンネルの SL 付近に縦断方向のひび割れが発生することが多い。

本報告においては、上記の3パターンのうち、緩み土圧を想定した「鉛直方向荷重」と、塑性圧を想定した「水平方向荷重」を対象とし、作用効果の差異について解析的に検討を行うものとする。

3. トンネル補強対策工（繊維シート接着工）の概要

繊維シート接着工は内面補強工に含まれ、シート状に加工した繊維シート（写真-1）をエポキシ樹脂等によりコンクリート表面に含浸させて一体化を図り、覆工の内面から引張補強材を接着して内側の引張耐力を向上させる工法である²。写真-2に繊維シート接着工の施工状況について示す。繊維シートの配置方法については、外力に伴う変状対策としては、上半・下半の全面張りをされる場合が多い。繊維シートに荷重が作用した際、繊維シートおよび覆工の破壊形態は、①覆工の破壊、②繊維シートのはく離、③繊維シートの破断が挙げられる。

繊維シート接着工に関する既往の研究例として、小島らは³ 小型および大型の押抜き実験を行い、繊維シート接着工の剥離メカニズムについては、剥離前と剥離後の2次段階から構成され、2次段階目からの荷重-変位、剥離投影長の勾配を用いて設計手法について検討されている。その際、繊維シートと覆工の剥離についてはコンクリートの母材で起こると仮定している。本研究においても覆工と炭素繊維シートの剥離前での評価を対象としているが、初期段階においても剥離が発生することも想定し剥離を表現できる要素を用いることとした。

4. 解析モデルの概要

(1) トンネル覆工のモデル化

トンネル覆工は、在来工法での施工を模擬した道路トンネル二車線標準断面（上半R=5,170mm、覆工厚：60cm）における上半部の覆工コンクリートを解析対象部位とし、

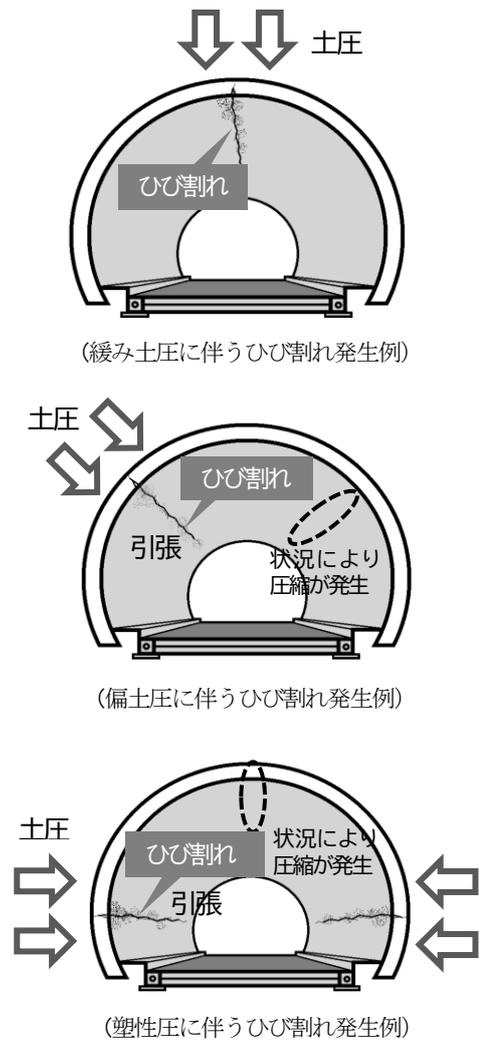


図-1 外力性変状のひび割れ発生パターン例

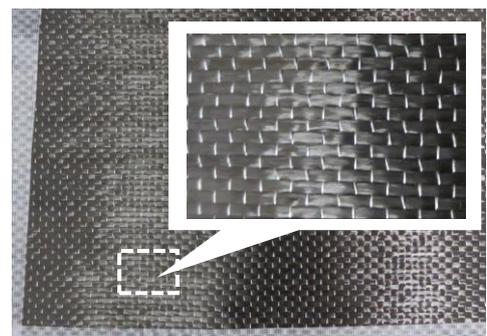


写真-1 繊維シート材料（炭素繊維：参考）



写真-2 繊維シートの施工状況

下半部も含めてモデル化した(図-2)。本検討では、基礎的な検討を対象とするため、二次元平面ひずみの条件下にて実施することとした。トンネル覆工の変形特性は、弾性係数 $25,000\text{N/mm}^2$ 、ポアソン比 0.2 とした。なお、覆工コンクリートは引張強度 (1.91N/mm^2) を超過すると引張軟化するものとし、疑似的にひびわれを表現することとした。地山とトンネル覆工間は、Interface要素を配し、不連続性を考慮した。Interface要素の応力-変位関係を図-3に示す。Interface要素は、法線方向応力が引張強度を超えると分離、せん断方向応力が摩擦係数 0.5 からなるせん断強度を超えると滑動するものとした。これらのパラメータの詳細は、文献⁴⁾に詳述されている。

(2) 繊維シートのモデル化に関する検討

本研究で取り扱う繊維シートは、炭素繊維を対象とした。炭素繊維シートのモデル化は、曲げモーメントには抵抗しないモデルとし、引張剛性を 250kN/mm^2 、厚さについては 0.167mm (目付け量 300g/m^2) とした。ここで、繊維シート母材は引張のみに抵抗する材料とし、さらには繊維シートの剥離や滑りを表現できるようモデル化することとした。詳細を以下に述べる。

a) 検討概要

繊維シート接着工の数値解析におけるモデル化に関してはshell要素などの薄膜モデルでモデル化されることが多い。一方で、本研究において炭素繊維シートのモデル化は、繊維シートとトンネル覆工間の剥離や摩擦抵抗を表現することができるLiner要素を採用した。繊維シートとトンネル覆工間の不連続性については、前述した図-3と同様である。法線方向応力は、引張強度 30N/mm^2 を超えると剥離、せん断方向応力は付着強さ 1.5N/mm^2 を超えるせん断強度が生じると滑動するものとした⁵⁾。

繊維シートは、引張に対しては繊維の引張剛性により抵抗するが、繊維の束を編み込んで加工されているため(写真-1参照)、曲げや圧縮への抵抗についてはほとんど期待できないと考えられる。そこで本研究においては、曲げおよび圧縮に抵抗しないモデルを構築することとした。具体的には各要素において周方向応力を算出し、その値が圧縮の場合は剛性 0 、引張の場合は前述の引張剛性を考慮できるよう、サブルーチンを構築した。このようなモデル化事例は見られないため、ここでは、従来の「圧縮に抵抗するモデル」と「圧縮に抵抗しないモデル」の2ケースについて比較検討を実施し、炭素繊維シートのモデル化手法についての検討を行うこととする。

荷重条件については、図-4に示される荷重条件のうちの「鉛直荷重①」を載荷し、繊維シートの応力状態について比較を行う。

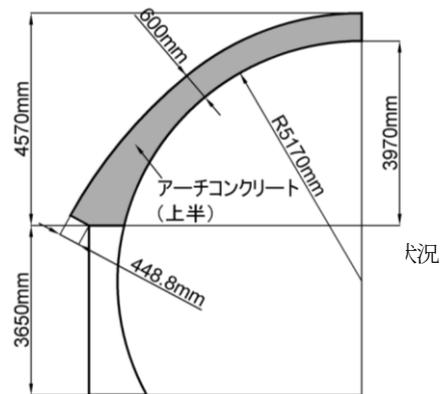


図-2 トンネル覆工形状

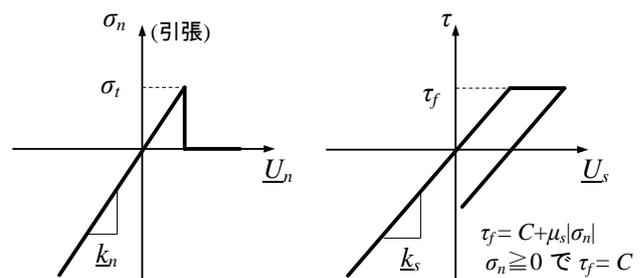


図-3 Interface要素の応力-変位関係

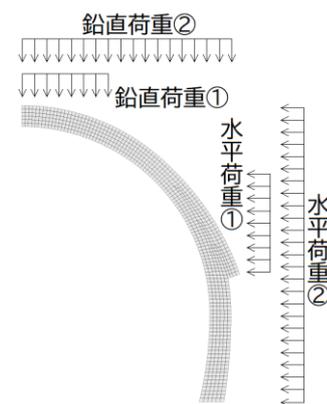


図-4 本研究における荷重条件

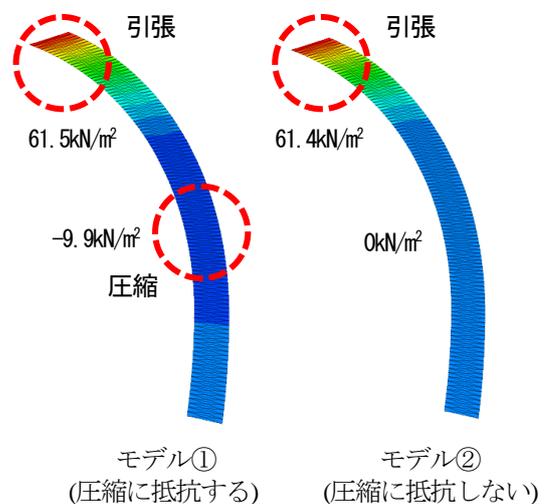


図-5 繊維シートの周方向応力

b) 検討結果

図5に荷重を載荷した際の、繊維シートの周方向応力の分布図を示す。両ケースともに天端部には引張応力が発生し、覆工の天端内側引張に抵抗しているモードとなる。モデル①（圧縮に抵抗する）では、側壁部に圧縮応力が作用し、材料的に抵抗できない圧縮応力に対しても繊維シートで受け持つ結果となった。このことから、繊維シートのモデル化については、作用荷重によっては圧縮が発生することから圧縮に対しては抵抗しないようなモデル化を行うことが適切であると考えられる。

5. 外力性変状への作用効果に関する検討

(1) 外力の増加に伴う変状と対策工の作用効果

ここでは、覆工に外力が作用した際の覆工の応力状態や繊維シートの発生応力について外力を想定した荷重を徐々に作用させた場合の経時変化についてシミュレートを行う。図6に鉛直土圧①の載荷時における覆工の破壊域の発生状況について示す。対策工無しのケースについては、はじめに天端部の内側に破壊域が発生し、破壊域

が外側へ貫通するように進展すると、肩部の外側に破壊域が発生し、その後内側へ貫通するような発生状況となっている。なお、破壊域はすべて引張によるものである。繊維シートを施工することにより、顕著ではないが天端部の破壊域の進展を遅らせ、対策工無しのケースについては肩部の破壊域が貫通しているが、繊維シート接着工のケースは破壊域は発生しているものの、貫通はしていないことが確認できる。

(2) 外力性の変状パターンにおける対策工の作用効果

以上の解析結果より、局所的な鉛直荷重が作用する際には、トンネル天端部の内側から引張による破壊が発生し、繊維シートは主に天端において引張抵抗部材として作用することが解析的に確認された。本検討においては、他の外力性の変状パターンとして、図4に示す4ケース（鉛直荷重①、鉛直荷重②、水平荷重①、水平荷重②）について同様に対策工無しと繊維シート接着工施工時の解析を実施した。表1に各荷重条件における対策工無し、繊維シート接着工施工時の覆工の塑性領域図および周方向ひずみ量分布図を示す。鉛直荷重に対して覆工は天端部の内側に引張破壊が発生しており、図1に示すような

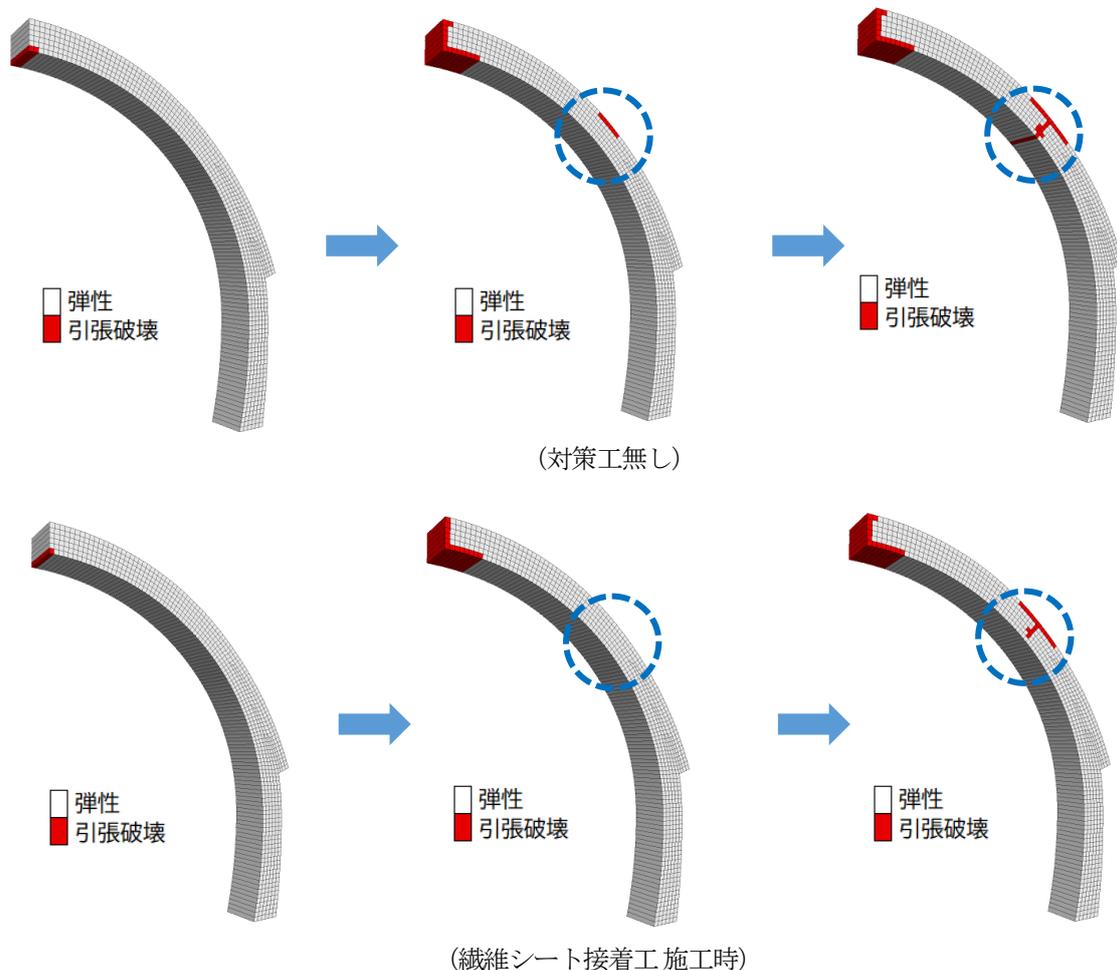
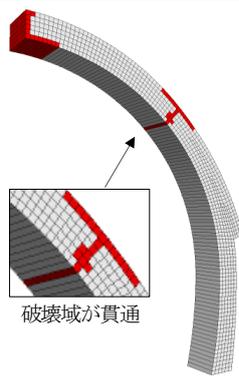
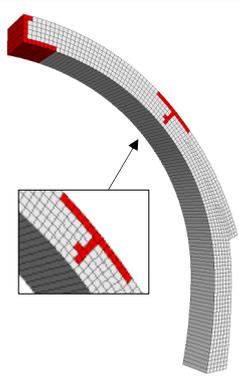
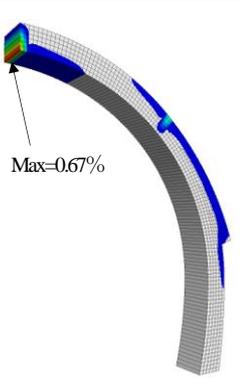
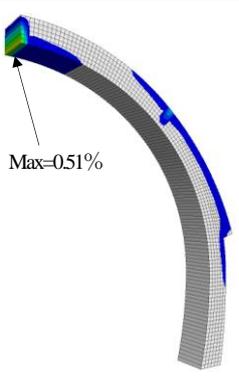
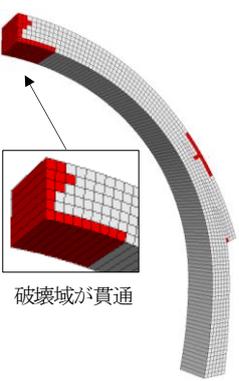
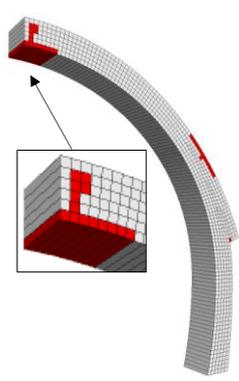
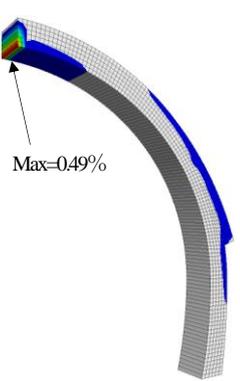
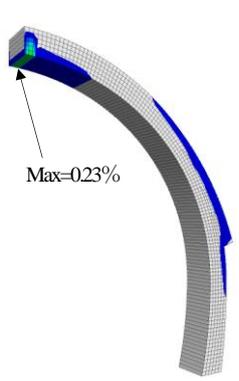
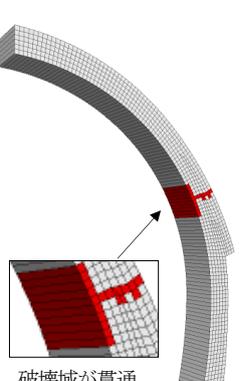
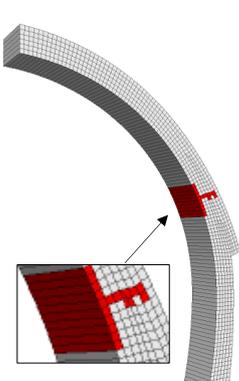
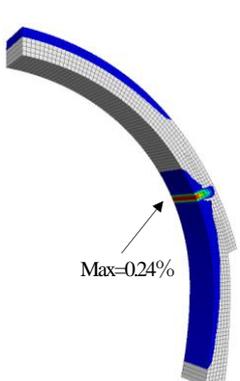
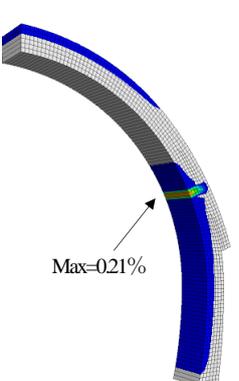
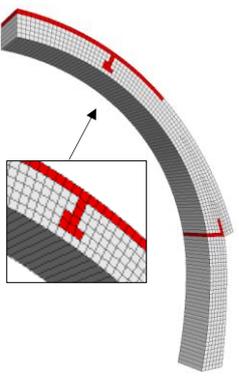
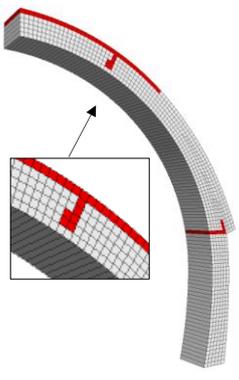
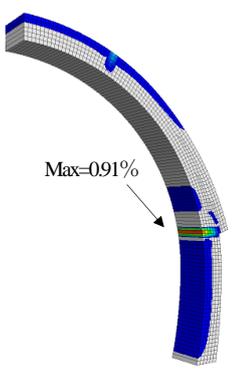
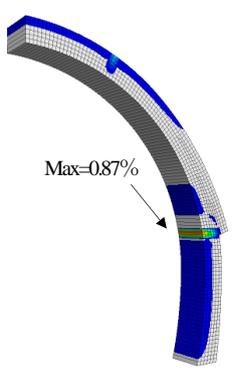


図6 覆工の破壊域の進展状況

表-1 解析結果（覆工コンクリート塑性領域図，周方向ひずみ）

荷重条件	塑性領域図		周方向ひずみ量分布図	
	対策工無し	繊維シート接着工施工時	対策工無し	繊維シート接着工施工時
鉛直荷重① 	 破壊域が貫通		 Max=0.67%	 Max=0.51%
鉛直荷重② 	 破壊域が貫通		 Max=0.49%	 Max=0.23%
水平荷重① 	 破壊域が貫通		 Max=0.24%	 Max=0.21%
水平荷重② 			 Max=0.91%	 Max=0.87%

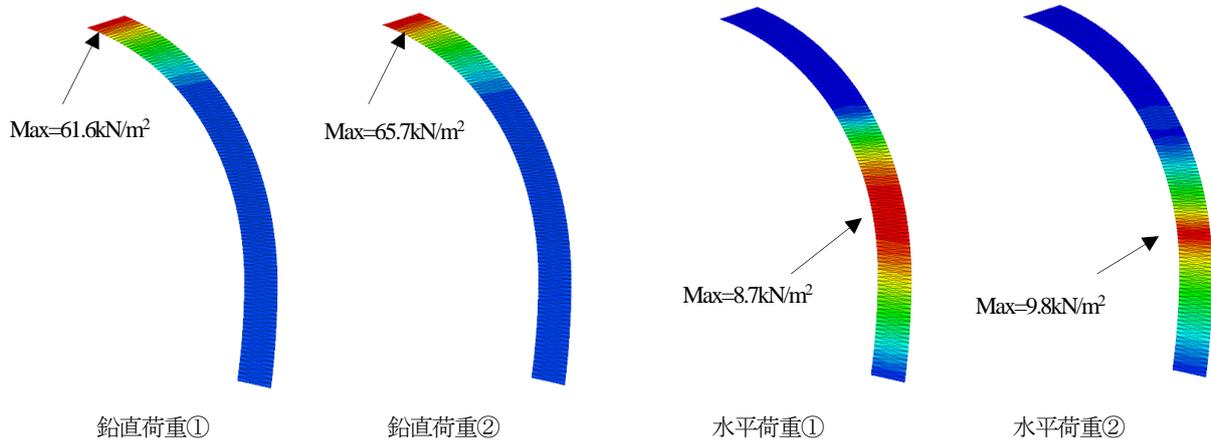


図-7 繊維シート接着工の周方向応力分布図

緩み土圧に伴う覆工のひび割れ発生形態を程度再現できているものと考えられる。その後、肩部の外側に引張破壊域が発生するが、鉛直荷重の荷重範囲により発生位置に違いがみられ、局所的に鉛直荷重を荷重した①については、荷重を荷重した境界付近の肩部で引張破壊が発生している。周方向ひずみ量分布図については、引張破壊が生じた位置にひずみが集中する分布状況となることが確認できる。鉛直荷重に対して、繊維シート接着工を施工することにより、破壊域および周方向ひずみ量を抑制する効果が確認された。繊維シート接着工は覆工の内側に施工されるため、覆工外側の引張に対しては効果はないと考えられるが、天端部の内側の変状を抑えることで相乗的に肩部外側の引張破壊の進展を抑制する効果についても期待できることが示された。

次に水平荷重に対しては側壁部の内側に引張破壊が発生しており、水平荷重を作用させた場合においても図-1に示すような塑性圧に伴う覆工のひび割れ発生形態をおおよそ再現できている。水平荷重の荷重範囲の違いにより側壁部の破壊域の発生位置が異なるが、本研究では上半と下半の覆工境界についてはモデルの簡素化のため連続したモデルとしているが、実際は分割されていることから水平荷重が作用した際、トンネル側壁の内空変位が大きくなることも想定される。水平荷重についても顕著ではないが、繊維シート接着工を施工したことによる破壊域および周方向ひずみ量の抑制効果が示された。

また、図-7に各荷重条件における繊維シート接着工の周方向応力について示す。鉛直荷重に対しては、天端部は覆工厚が一定のアーチ形状となっていることから荷重の荷重範囲の違いに関わらず最大値の発生位置は天端中心部となる。水平荷重に対しては今回のトンネル覆工モデルの側壁部が均等な厚さではないことから荷重範囲の違いにより最大引張応力の発生位置が異なる。ただし天端部においても巻厚不足等により覆工厚さが均等でない

場合は、最大の引張荷重の発生位置も異なることが想定される。なお、本解析結果においては、覆工と繊維シートの剥離は発生していない。

6. まとめ

本研究では、繊維シート接着工を対象としたトンネル覆工補強工の定量的評価を行うための検討のひとつとして、数値解析モデルによる外力性変状に対する作用効果について解析結果の評価を行った。数値解析手法の定量的評価への適用にあたり解析結果より得られた知見について以下に示す。

- 繊維シート接着工は圧縮側には抵抗が期待できないことから、解析モデルにおいてシートに圧縮力が発生する場合は圧縮に抵抗しないようなモデル化を行うことで余剰な作用効果を低減することができる。
- 本解析モデルにおいて、鉛直荷重と水平荷重について覆工の破壊形態は、一般的な覆工のひび割れ発生状況をおおよそ再現できることが確認された。
- 覆工の厚さが均一でない場合は、繊維シートの最大の引張応力の発生位置も異なることが予想されることから、必要に応じて数値解析による検証も有用であると考えられる。
- 本解析モデルにおいて、繊維シート接着工による覆工の破壊域の抑制効果が確認された。また、今後は繊維シートに発生する応力状態より繊維シート配置方法についても検証が行える可能性がある。

参考文献

- 1) 東・中・西日本高速道路株式会社：設計要領第三集トンネル【保全編平成28年8月】【建設編平成28年8月】，pp.2-2-2-5，2016。

- 2) 土木学会：山岳トンネル覆工の現状と対策，pp.136-137，2002.
- 3) 小島芳之ほか：繊維シート接着工によるトンネル覆工コンクリートの剥落対策設計法，土木学会論文集 No.756/VI-62，pp.101-116，2004.
- 4) 菅原健太郎：矢板工法で建設されたトンネル覆工のひびわれ発生メカニズムに関する研究，長崎大学学位論文，pp.31-39，2017.
- 5) 炭素繊維補修・補強工法技術研究会トンネル部会：炭素繊維シートによるコンクリート構造物の補修・補強設計・施工マニュアル，pp.6-13，1997.

STUDY ON THE APPLICABILITY OF NUMERICAL ANALYSIS FOR THE SELECTION OF TUNNEL LINING REINFORCEMENT METHOD

Tadashi OKABE, Nobuaki KISHIDA, Kentarou SUGAWARA and Hisashi HAYASHI

At the maintenance stage of the mountain tunnel, repair and reinforcement methods will be examined as necessary. However, a quantitative method for reinforcing tunnel lining has not been established. In this study, we focused on the reinforcing effect of the fiber sheet, assumed the deformation pattern of the tunnel, and performed a numerical analysis when the fiber sheet, which has a lot of construction results, was applied as the reinforcement method.

As a result, it was confirmed that the reinforcing effect of the fiber sheet can be evaluated to some extent by numerical analysis of the effect of each tunnel deformation pattern.