

数値解析を用いたトンネル覆工における 繊維シート接着工の適用性検討

森本 真吾¹・菅原 健太郎²・田部 美月³・林 久資⁴

¹ 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内)

E-mail: charlie@dobocreate.jp

² 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

³ 正会員 株式会社 ケー・エフ・シー (〒105-0011 東京都港区芝公園 2-4-1 芝パークビル B 館 11F)

E-mail: tanabe.mizuki@kfc-net.co.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、偏土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。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ものの、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。

著者らは、繊維シート接着工の補強効果を適切に表現できるよう、繊維シートは曲げモーメントには抵抗せず引張のみに抵抗するモデルを構築し、繊維シートとトンネル覆工の界面におけるはく離や滑りを表現した。その結果、平面ひずみの条件下で繊維シート接着工の補強効果を確認した¹⁾。

本報告では、局所的・帯状に代表される偏土圧によるせん断・斜め方向ひびわれなどといった三次元的な変状に対して、本検討手法の適用可能性について検証する。

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

1. はじめに

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。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ほか、地山の変状等による外的要因による変状²⁾も多く報告されている。

トンネル覆工に生じたひびわれの形態から外力が作用していると評価される場合に、よりの確な補修・補強工法を選定できるような指標が望まれている。しかしながら、現在における補修・補強工法の選定は技術者の経験等に基づき行われていることが多い。

著者らはトンネル覆工補強工の定量的評価を行うため、外力性変状に対する繊維シート接着工の作用効果について解析的検討・評価を行った。その結果、二次元平面ひずみの条件下において繊維シート接着工の補強効果を確認した¹⁾が、平面ひずみ条件では偏圧や地山の緩みなどによる変状に対してトンネル覆工の挙動および対策工の

補強効果が再現出来ていない可能性がある。

そこで本報告では、局所的な崩壊や断層破碎帯などに代表される偏土圧といった三次元的に作用する可能性のある変状に対して、数値解析によってトンネル覆工への繊維シート接着工の補強効果を検証したものである。

2. トンネルにおける外力性変状要因³⁾

(1) 鉛直土圧による変状

覆工背面に空洞が存在すると、地下水流動による岩盤の劣化や地山のゆるみが進む。空洞上部の地山が小崩落を繰り返し、さらに、地山のゆるみ域が助長することで、長期的に大空洞となる場合がある。トンネル上部の地山や岩塊がトンネル覆工に落下し、鉛直圧が作用する。図-1に示すように、鉛直土圧による変状は、天端部付近に引張ひびわれや放射状のひびわれが生じる。

背面空洞がある場合に、塑性圧等によって側圧が生じ

天端が押し上げられ天端部に圧が生じるケースもあるが、本検討では扱わないものとする。

(2) 支持力不足による変状

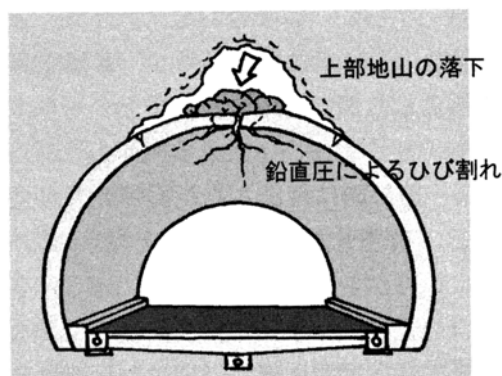
断層破碎帯のような局所的に地質状況が脆弱な場合、インバートを設置していない区間においては、支持力が不足し不等沈下が生じると、図-1に示すように、横断方向に輪切り状のひびわれが発生することがある。

トンネル変状の進展予測解析は、トンネル周辺地山の強度低下を再現する方法⁴⁾があるが、本報告においては、荷重を外力として載荷する方法とする。

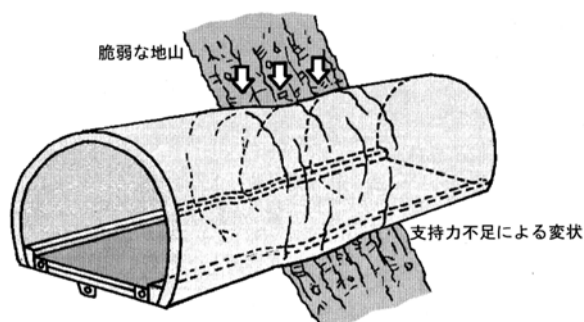
鉛直土圧を想定したケースは、「鉛直方向荷重」、断層破碎帯を想定したケースは「鉛直・水平方向荷重」とし、繊維シート接着工の有無による作用効果の差異について解析的な検討を行うものとする。

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トンネル覆工表面に含浸させて一体化を図ることで、覆工の内面からの引張耐力を向上させる工法である⁵⁾。写



(鉛直土圧による変状例)



(支持力不足による変状例)

図-1 外力性変状のひびわれ発生例¹⁾

真-2に繊維シート接着工の施工状況について示す。外力に伴う変状対策として繊維シート接着工を配置する場合、上半・下半の全面貼りがなされるケースが多い。繊維シート接着工に荷重が作用した際、繊維シートおよびトンネル覆工の破壊形態は、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⁶⁾ 押抜き実験から、繊維シート接着工のはく離メカニズムは、はく離前とはく離後の2つの段階から成り、2次段階目の荷重-変位、はく離投影長の勾配を用いた設計手法を提案している。本研究においても繊維シート接着工とトンネル覆工のはく離前での評価を対象としているが、初期段階においてもはく離が発生することも想定し、はく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、図-2に示すように、矢板工法で施工された二車線道路トンネル（上半 R=5,170mm、覆工厚：60cm）を想定し、ひび割れの進展などを模擬するため、solid 要素でモデル化を行った。また、本検討では、三次元的な効果を検討するため、奥行き 10m の1スパン相当

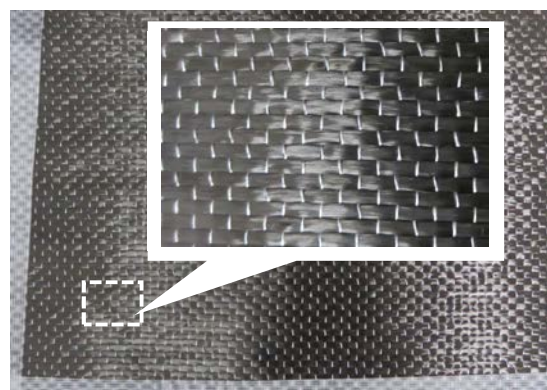


写真-1 繊維シート（炭素繊維）



写真-2 繊維シート接着工施工状況

分のモデル化を行った。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、引張強度 (1.91N/mm^2) を超過すると引張軟化させるモデルとすることで、ひび割れを疑似的に表現した (図-3)。地山とトンネル覆工間は、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 Interface 要素を用いた。Interface 要素の応力 - 変位関係を図-4 に示す。解析パラメータの詳細については、文献 7 で詳述されている。

(2) 繊維シート接着工のモデル化

本研究では、炭素繊維による繊維シート接着工を対象とした。繊維シート接着工のモデル化は、曲げモーメントおよび圧縮には抵抗せず、引張のみに抵抗するモデルとし、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。また、繊維シート接着工のはく離や滑りを表現できるモデルとした。モデル化については、以下に詳述する。

a) モデル概要

数値解析における繊維シート接着工のモデル化に関しては shell 要素などの薄膜モデルで表現されることが多い。本検討では、繊維シートとトンネル覆工間のはく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。繊維シート接着工とトンネル覆工間の不連続性については、前述した図-4 の Interface 要素と同様に、法線方向応力は、引張強度 30N/mm^2 を超えるとはく離、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発生すると滑動するものとした⁸⁾。

繊維シートは、写真-1, 2 に示すように、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、曲げや圧縮への抵抗についてはほとんど期待できない。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。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モデル⁹⁾を用いた。なお、三次元的なモデル化にあたり、繊維方向による平面的な異方性については考慮しない。

(3) 外力

図-5 に示すように、鉛直土圧を想定した鉛直方向荷重については、覆工天端の中央部に $\phi 0.3\text{m}$ の荷重範囲とし、断層破碎帯を想定した鉛直・水平方向荷重については、荷重幅 1.0m で天端から脚部までのトンネルを横断するように荷重範囲を設定した。

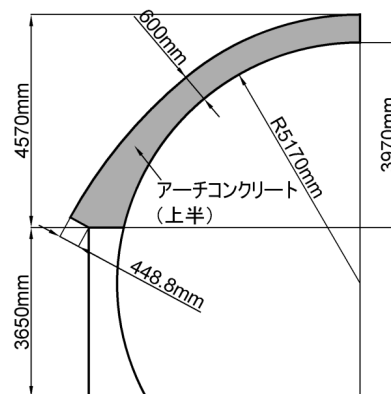


図-2 トンネル覆工形状

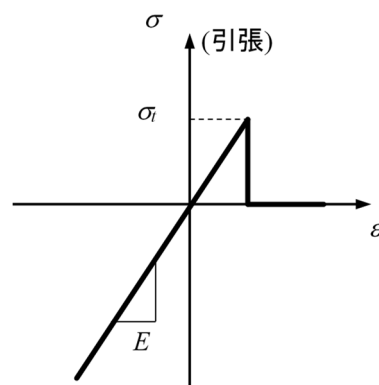


図-3 トンネル覆工の応力-変位関係

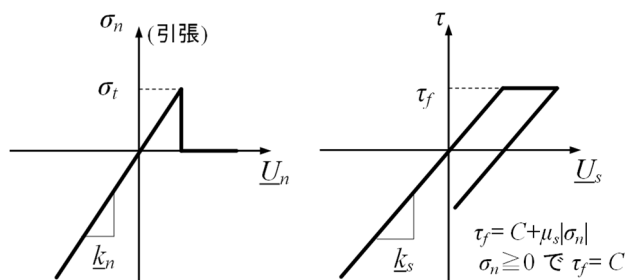


図-4 Interface 要素の応力-変位関係

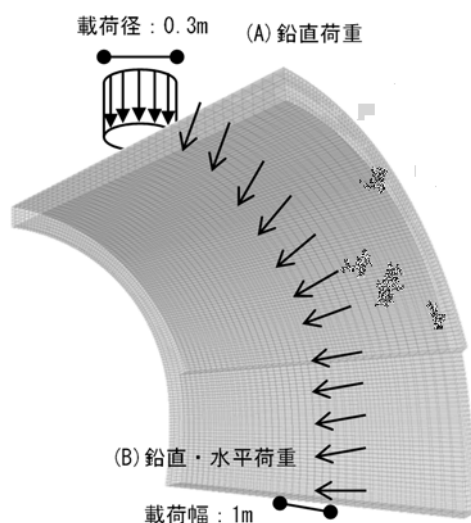


図-5 本研究における荷重条件

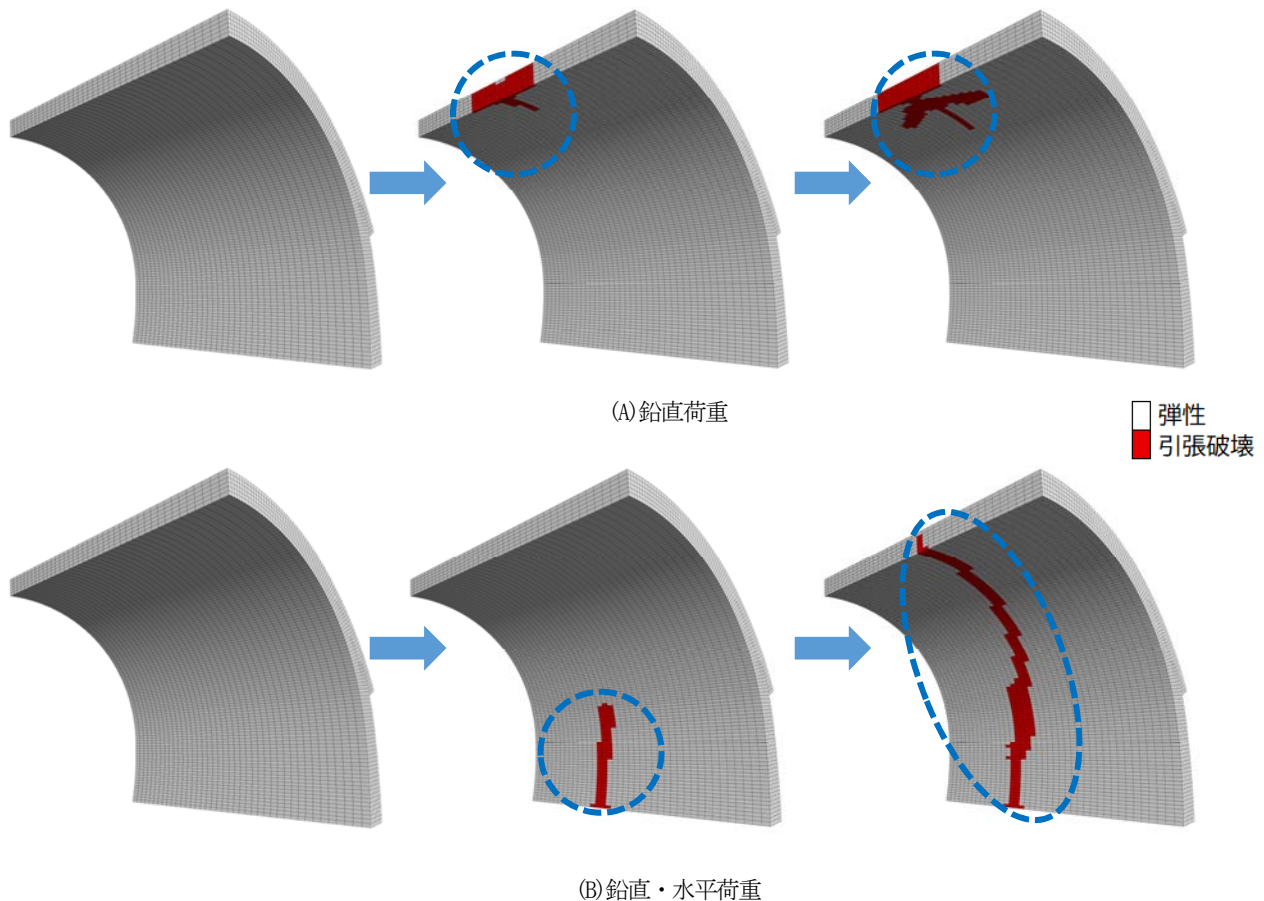


図-6 覆工の破壊域の進展状況（対策工無し）

5. 外力性変状への繊維シート接着工の作用効果に関する検討

(1) トンネル覆工の外力増加に伴う変状について

外力作用時のトンネル覆工の引張破壊を数値解析で表現するため、徐々に作用荷重を増加させた解析を実施した。ここでは、トンネル覆工の破壊形態を表現するため、繊維シート接着工は設置していない。鉛直方向荷重をトンネル天端部に載荷した際のトンネル覆工における引張破壊の発生状況を図-6(A)に示す。この図から、はじめに、横断方向への引張破壊が生じる。さらに荷重を増加させると、徐々に放射状への引張破壊が進展していることがわかる。同様に、鉛直・水平荷重のトンネル横断方向に載荷した際のトンネル覆工における引張破壊の発生状況を図-6(B)に示す。この図から、横断方向に輪切り状のひびわれが脚部から肩部、天端に向かって荷重の増加に伴って進展していることがわかる。以上より、本検討において、図-1に示すようなトンネル覆工の破壊形態を数値解析で表現することができた。

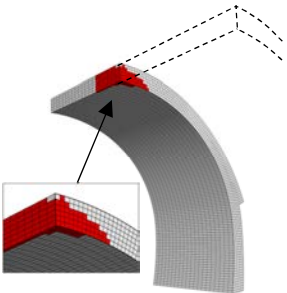
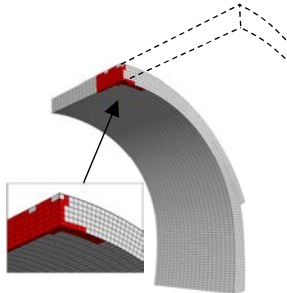
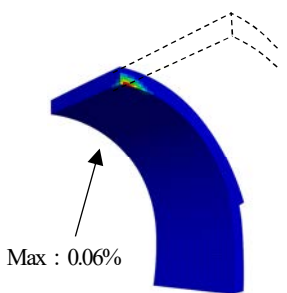
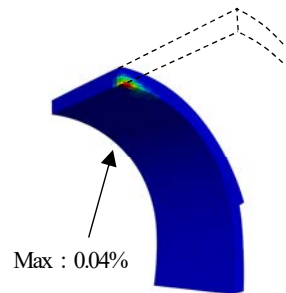
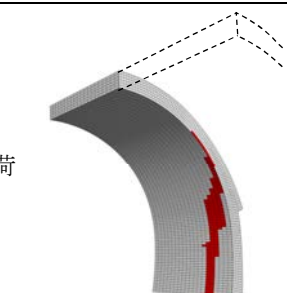
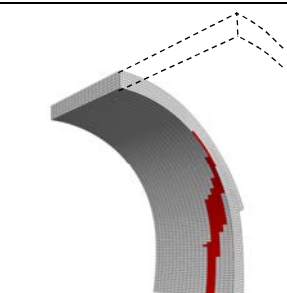
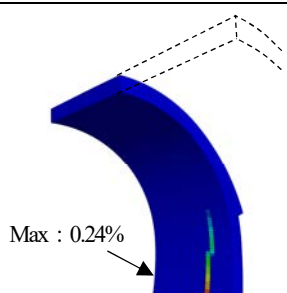
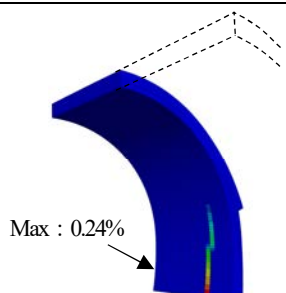
(2) 繊維シート接着工の対策効果について

図-6に示す载荷ケース((A)鉛直荷重, (B)鉛直・水平荷重)で、無対策時と繊維シート接着工設置時について数値解析を実施した。各载荷条件における無対策時および繊維シート接着工設置時のトンネル覆工の塑性領域図およびトンネル軸方向ひずみ量分布図を表-1に示す。

表-1から、鉛直荷重载荷時については、無対策の場合、天端部に生じた塑性領域は、トンネル覆工深部にまで達しており、周方向ひびわれが背面にまで貫通していることが示唆される結果となった。一方、繊維シート接着工を設置したケースでは、覆工表面に塑性化が生じているものの、覆工深部にまで広がっている形跡は見られなかった。このことから、繊維シート接着工を設置することで、ひびわれが抑制されたと判断できる。繊維シート接着工の応力分布を図-7に示す。この図から、トンネル天端部に軸方向の引張応力が卓越しており、先に示した周方向ひびわれに抵抗している様子がみてとれる。

一方で、鉛直・水平荷重については、塑性領域・ひずみ分布ともに対策工の有無による違いは見られなかった。断層破碎帯による不等沈下のような大きな変状に対して

表-1 トンネル覆工塑性領域図およびトンネル軸方向ひずみ量分布図（モデル中央部に着目）

荷重条件	塑性領域図		トンネル軸方向ひずみ量分布図	
	対策工無し	繊維シート接着工	対策工無し	繊維シート接着工
鉛直荷重			 Max : 0.06%	 Max : 0.04%
鉛直・水平荷重			 Max : 0.24%	 Max : 0.24%

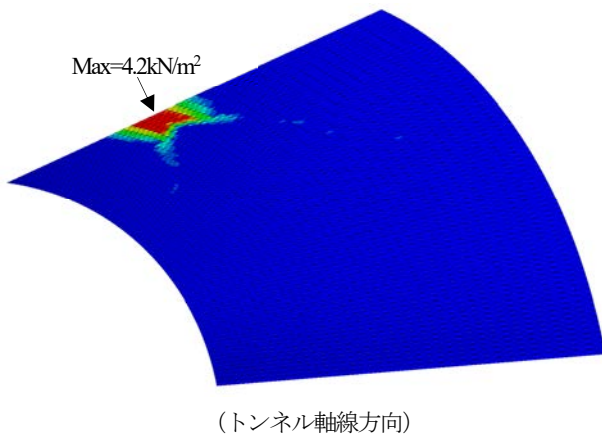


図-7 繊維シート接着工の応力分布図（鉛直荷重）

は繊維シート接着工による効果は発揮されにくい結果となった。

図-7に示すように、載荷範囲周辺に大きな引張応力が発生しているが、その影響範囲は広く、天端部周辺の広範囲に引張応力が発生している。外力に伴う変状対策として、繊維シート接着工を設置する場合、全面貼りされるケースが多いという点でも、本解析は裏付けされたと言える。

また、巻厚不足等により覆工厚さが均等でない場合や、覆工背面の状況によっては、引張応力の発生位置も異なることが想定されるため、広範囲に繊維シート接着工を設置する必要がある。

6. まとめ

本研究は、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実施した。局所的な崩壊や断層破砕帯などに代表される偏土圧といった三次元的に作用する変状に対して、トンネル覆工への繊維シート接着工の効果を検証した。得られた知見を以下に示す。

- ・繊維シート接着工は圧縮には抵抗が期待できないため、解析モデルで繊維シート接着工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することができた。
- ・本解析モデルにおいて、鉛直荷重と鉛直・水平荷重を作用させた際のトンネル覆工の破壊形態は、一般的なトンネル覆工のひびわれ発生状況を定性的であるが、おおよそ表現できることが確認された。
- ・鉛直土圧を模擬した数値解析結果から、本検討では繊維シート接着工は周方向ひびわれに対して抑制効果が期待できることを確認することができた。
- ・また、このような効果を発揮させるためには繊維シート工を設置する場合、全面張りすることが肝要であることが示唆された。

トンネル覆工の厚さが均でない場合は、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ため、必要に応じて巻圧不足を再現した解析による検証も有用であると考えられる。

参考文献

- 1) 岡部正ほか：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，地下空間シンポジウム論文・報告集，第 26 巻，土木学会【一般投稿論文】，2020.
- 2) 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.
- 3) 土木学会：実務者のための山岳トンネルのリスク低減対策，トンネルライブラリー第 32 号，pp.322-323，2018.
- 4) 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，pp.33-62，2008.
- 5) 土木学会：山岳トンネル覆工の現状と対策，トンネルライブラリー第 12 号，pp.136-137，2002.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.

APPLICABILITY STUDY OF REINFORCEMENT OF THE TUNNELLINING WITH FIBER SHEET USING NUMERICAL ANALYSIS

Shingo MORIMOTO, Kentarou SUGAWARA, Mizuki TANABE 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.

In this report, we will examine whether it is applicable to three-dimensional deformation (shearing due to unbalanced earth pressure represented by local or band-shaped, diagonal cracks, etc.).