

バサルト繊維補強プレートの トンネル覆工補強効果に関する研究

野城 一栄¹・岡野 法之²・田中 徹³・伊藤 秀治⁴

¹正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 トンネル研究室 (〒185-8540 国分寺市光町2-8-38)
E-mail:yashiro.kazuhide.40@rtri.or.jp

¹正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 トンネル研究室 (〒185-8540 国分寺市光町2-8-38)
E-mail:okano.noriyuki.41@rtri.or.jp

²正会員 戸田建設株式会社 技術開発センター 社会基盤ユニット (〒104-8388 東京都中央区京橋1-7-1)
E-mail:tooru.tanaka@toda.co.jp

⁴コニシ (株) 土木建設営業本部 土木開発部 (〒101-0054 東京都千代田区神田錦町2-3)
E-mail:itou-hideharu@bond.co.jp

バサルト補強プレート (BFP) による覆工の補強に着目し, 模型実験の再現解析による解析モデルの検証と, 実トンネルを想定した解析による補強効果の評価を行った. この結果, 耐力に着目する場合等で, 比較的大変形が大きい時を想定した解析を行う場合は, 剥離モデルが適切であることがわかった. また, 実トンネルを想定した解析により補強効果の評価を行った結果, BFPにより耐荷力が増加する傾向となること, 補強効果はれんがの方が無筋コンクリートより大きく, また, 荷重モードとしては, 曲げが卓越するモードで補強効果が大きく現れることがわかった. さらに, BFPは, 覆工の材料や荷重のモードによっては, 覆工の耐荷力を向上させる効果を有することがわかった.

Key Words : tunnel lining, basalt plate, countermeasure, model test, numerical analysis

1. はじめに

トンネルの経年が今後ますます増加していく中で, 適切な時期に効果的な補修, 補強を行い, トンネルを長く, 安全に使っていくことが求められている. これまでに, トンネル覆工コンクリートの補修・補強工法として, 鋼板やPC板, 繊維シート等, 様々な工法が開発され適用されてきている. しかし, 鋼板やPC板は, 内空断面に余裕がない箇所においては適用が困難な場合がある, 鋼板には錆の問題ある, 繊維シートには漏水が多い箇所や覆工表面の不陸が大きい箇所においては適用が困難な場合がある, 覆工内面全体を覆うため変状の発生や進行を目視確認できないなどの短所も抱えている,

これに対し, 筆者らは, 帯板接着工法の補強材としてバサルト繊維補強プレート (以下, BFPと称す) を用いた新しい覆工修繕工法の開発を行っている¹⁾²⁾. BFPを用いた覆工修繕工法は, 内空の支障が小さい, 錆びない, 施工後も覆工内面の変状を目視確認可能であるなど, 従来工法の問題を一部解決することができる特徴を有して

いる. 図-1に本工法の施工例を示す. 本工法は, 帯板状に加工したBFPを覆工内面にエポキシ樹脂等の接着材で貼付ける工法である. BFPは, 幅5cm, 厚さ2mmであり, トンネル延長方向の設置間隔は50cmを標準としている. 覆工内面を下地処理した後, エポキシ樹脂等を用いてBFPを貼付け, 50cm~1.5m間隔にて鋼製プレートとあと施工アンカーを用いて固定する. 特殊な機械を必要とせず, また, 覆工内面に漏水が多い場合でもプレート貼付け位置以外に導水することで施工が可能となる. 覆工内面のコンクリート片の剥落やれんがの抜落ちが心配され



図-1 バサルト帯板接着工法の施工例

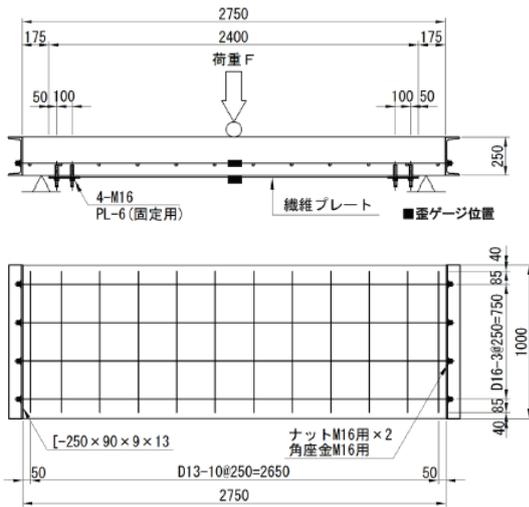


図-2 供試体概要

表-1 材料の諸元

名称	物性値	備考
コンクリート	圧縮強度 33.5MPa	粗骨材寸法 20mm
鉄筋	鉄筋種別 SD345	D16
BFP	引張強度 1,019 MPa 弾性係数 47 GPa	幅 50mm×厚 2mm

る箇所においては、プレート間にネットを設置することで防止することができる。

ここで、本工法は、主に剥落対策を目的としたものであるが、条件によっては補強効果を有することが確認されている¹⁾²⁾。筆者らはBFPによる覆工の補強効果に着目し、模型実験の再現解析による解析モデルの検証と、実トンネルを想定した解析により補強効果の評価を行ったので、これらの結果について報告する。

2. BFP補強工法の補強効果に関する模型実験

本章では、BFPを用いた帯板接着工法の補強効果を調べるために過去に実施した模型実験の結果について紹介する。なお、3章以降においてこれらの模型実験の再現解析を実施しており、前段として本章において概要を紹介する。実験は、RC梁供試体に対する曲げ試験と、トンネル模型を用いた載荷実験の2種類である。前者は主に曲げが作用する場合の補強、後者は曲げと軸力が同時に作用する場合の補強を想定したものである。

(1) RC梁供試体を用いた曲げ試験¹⁾

RC梁供試体の概要を図-2に示す。長さ2750mm、厚さ250mm、奥行1000mmのRCスラブ版である。ここで、D16を250mm間隔で4本設置して補強がなされている。実験は、支点中央1点載荷による単純曲げ試験により、変

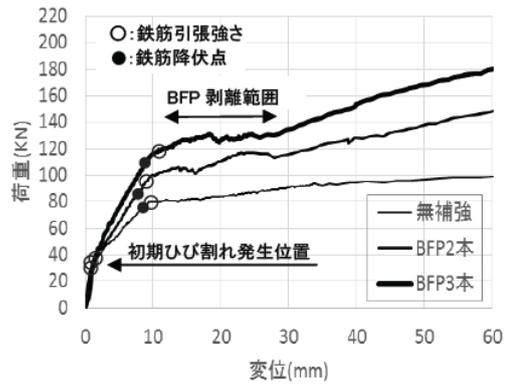
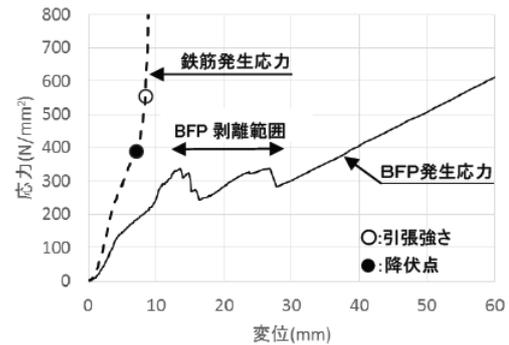
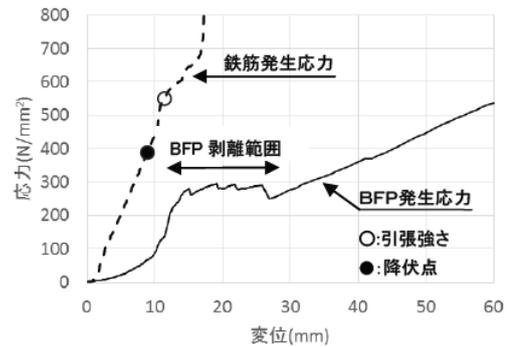


図-3 実験結果 (荷重～変位)



(a) Case2 (BFP2本)



(b) Case3 (BFP3本)

図-4 実験結果 (ひずみから換算した鉄筋応力, BFP応力)

位 δ が60mmとなるまで実施した。

実験ケースは、BFP補強の有無、補強量 (BFP本数) に着目して、Case1 (無補強)、Case2 (BFP2本)、Case3 (BFP3本) の3ケースとした。BFPはエポキシ樹脂によりRCスラブ版に接着されている他、両端部においてアンカーにより機械的に固定されている。用いた材料の諸元を表-1に示す。

図-3に荷重～変位関係を示す。図より、Case1 (無補強) の場合、支間中央引張側でひび割れが発生することにより剛性が低下し、鉄筋の降伏により更に剛性が低下した。一方で、BFP補強を行ったCase2, 3は、Case1 (無補強) に比べ、初期ひび割れ発生後の剛性が増加し、また、鉄筋降伏後の荷重も増加した。BFPによる補強効果は補強量が大きくなると大きくなっている。

目視観察によると、変位 $\delta=10$ mmころからBFPの剥

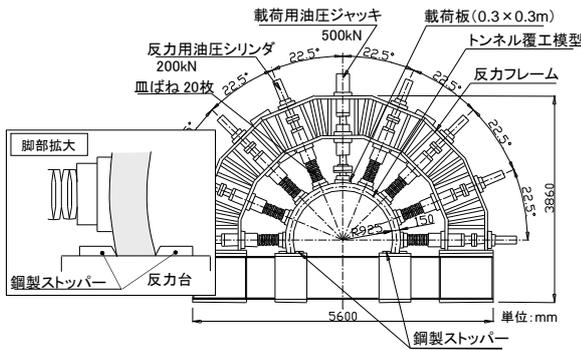


図-5 実験装置の概要

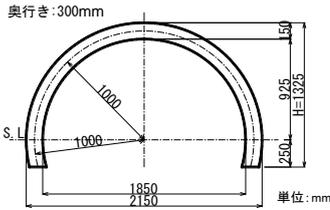


図-6 模型の形状

離が始まり、 $\delta = 30\text{mm}$ 程度で完全に剥離した。図-4にひずみから換算した鉄筋発生応力、BFP発生応力を示す。BFP発生応力はBFPの剥離が始まった頃から増加が一旦止まるが、完全に剥離した $\delta = 30\text{mm}$ 以降は再度単調に増加した。BFPが完全に剥離した後は、アンカー部のみでBFPがスラブに固定され、アンカーを介した機械的な荷重伝達により、補強効果が発現されていると推察される。

(2) トンネル模型を用いた荷重実験²⁾

次に、BFPをアーチ形状のトンネルの補強材として用いることを想定し、大型トンネル覆工模型実験装置(図-5)を用いた実験を行った。実験装置は、荷重用油圧ジャッキ、反力用油圧シリンダ、反力フレーム等で構成され、覆工模型の周囲に皿ばねが配置されており、覆工と地盤との相互作用を模擬することができる³⁾。

実験は、天端部の荷重用油圧ジャッキを鉛直下向きに変位制御により変位 $\delta = 80\text{mm}$ 程度まで荷重することにより行った。実験ケースは、BFP補強の有無、補強量(BFPの幅)に着目して、Case1(無補強)、Case2(BFP4mm)、Case3(BFP8mm)の3ケースとした。BFPはエポキシ樹脂により覆工模型に接着されている他、300mmおきにアンカーにより機械的に固定されている。ここで、覆工は無筋コンクリートとした。模型の寸法を図-6に、用いた材料の諸元を表-2に、BFPの補強配置を図-7に示す。

図-8に荷重～変位関係を示す。図には覆工内面側に圧が発生した時を●●●印で併せて記載した。

Case1(無補強)の場合、 $\delta = 2\text{mm}$ 程度で引張りひび割れが発生して3ヒンジアーチとなった際(図A点)に荷

表-2 材料の諸元

名称	物性値	備考
コンクリート	圧縮強度 23.0MPa	細骨材寸法 20mm
BFP	引張強度 1,019 MPa 弾性係数 47 GPa	幅 4mm×厚 1.9mm 幅 8mm×厚 1.9mm

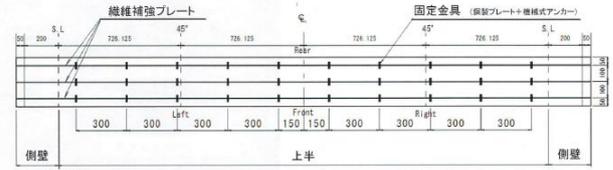


図-7 BFPの補強配置

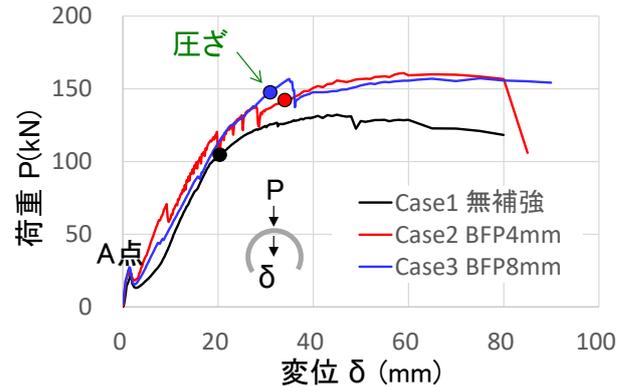


図-8 荷重～変位曲線



図-9 剥離状況 (Case2)

重が一旦低下して剛性が低下するが、その後は再び荷重が増加に転じ、覆工内面に圧ざが発生する $\delta = 20\text{mm}$ になると構造としての剛性が低下し、 $\delta = 40\text{mm}$ 以降は荷重が減少するという結果となった。

一方で、BFP補強を行ったCase2、3は、A点において同様に荷重が一旦低下して剛性が低下するが、荷重が増加に転じた後の剛性はCase1(無補強)よりも大きくなった。また、無補強と比べ、圧ざが生じる変位が大きくなり、圧ざ発生後も荷重の低下が抑制された。ただし、Case2～Case3間の差は小さく、補強量を増加させた効果は余り見られなかった。

目視観察によると、荷重に伴いBFPの剥離が見られた。図-9にCase2におけるBFPの剥離状況を示すが、 $\delta = 2\text{mm}$ 程度で天端部から剥離が始まり、 $\delta = 20\text{mm}$ 程度までにはアーチ肩部の圧ざ箇所より上方の範囲は概ね全て剥離が生じた。(1)同様、BFPが完全に剥離した後は、アンカー部のみでBFPが覆工に固定され、アンカーを介した機械的な荷重伝達により、補強効果が発現されていると推察される。

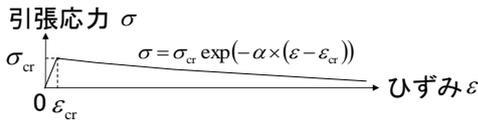


図-10 引張軟化特性

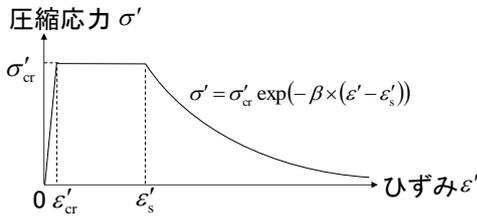


図-11 圧縮軟化特性

3. 模型実験の数値解析による評価

ここでは、引張強度、圧縮強度到達後の軟化挙動を表現することのできる解析手法^{4),5)}を用い、2.で示した模型実験のシミュレーション解析を行って、BFPの解析におけるモデル化手法について検討した。

(1) 解析の概要

無筋コンクリートやれんがを材料とするトンネル覆工の限界状態を精緻に表現するためには引張強度到達後や圧縮強度到達後の挙動をモデル化することのできる解析手法が必要となる。そこで、材料のひび割れの発生（引張破壊）による軟化挙動、圧縮の発生（圧縮破壊）による軟化挙動を考慮することのできる材料の構成則を組み込んだ非線形 FEM モデルを用いた。以下にモデルの概要について示す。

引張破壊（引張ひび割れ）については、最大主応力が引張強度を超える箇所主応力の直角方向にひび割れが発生するものとし、引張破壊後の材料は、図-10 に示すように、ひび割れ発生時の応力を σ_{cr} 、ひび割れ発生時のひずみを ε_{cr} 、引張軟化係数を α として、指数関数により軟化するものとしてモデル化した。

通常の FEM 解析では圧縮破壊後の覆工材料の強度は期待しないものとして圧縮破壊をもって解析を終了することも多いが、実際には圧縮破壊後も相応の強度を有していることから、本研究では圧縮破壊後のひずみ軟化特性も考慮することとした。すなわち、図-11 に示すように、圧縮破壊後の材料について、圧縮強度を σ'_{cr} 、軟化開始時のひずみを ε'_s 、圧縮軟化係数を β として、指数関数により軟化するものとしてモデル化した。

その他、鉄筋については、弾完全塑性の物性を与えた。

(2) RC梁供試体を用いた曲げ試験の解析

2.(1)で示した、RC 梁供試体を用いた曲げ試験のうち、Case2 (BFP2 本) について、再現解析を行った。図-12

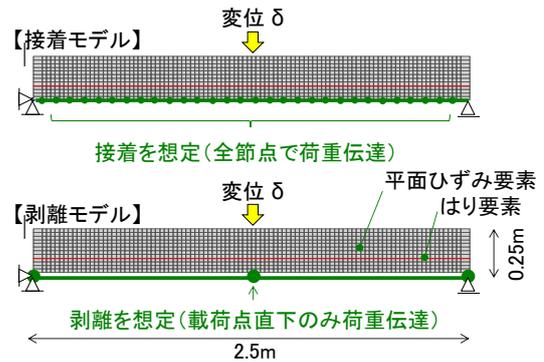


図-12 FEM モデル

表-3 解析入力値

	項目	入力値	備考
コンクリート	圧縮強度 f_c	33.5MPa	実測値
	引張強度 f_t	2.4MPa	$0.23 \times f_c^{2/3}$
	弾性係数 E_c	1.5×10^4 MPa	実測値
	引張弾性係数 E_t	1.5×10^4 MPa	$= E_c$
	ポアソン比 ν	0.2	文献5)より
BFP	弾性係数 E	4.5×10^4 MPa	引張強度 1120MPa

に解析モデルを示す。覆工本体は2次元平面要素でモデル化している。鉄筋ははり要素でコンクリート中に節点共有でモデル化し、弾完全塑性体（引張強度到達後完全塑性）としてモデル化した。BFP ははり要素で梁材の下面にモデル化し、弾性体とするが、応力を監視し、引張強度に到達した時点で解析を終了することとした。

ここで、BFP とコンクリートとの接合については、2.をふまえ、以下の2つの方法でモデル化した。

剥離モデル：BFP とコンクリートを3点で節点共有としてモデル化する。荷重開始時から全面剥離していると仮定するモデルである。

接着モデル：BFP とコンクリートを全節点で節点共有としてモデル化する。荷重終了まで全面付着を保つモデルであり、剥離モデルよりも耐荷力が大きくなると考えられる。今回は、剥離モデルとの比較のために実施した。

解析の入力値を表-3 に示す。

解析により得られた荷重～変位曲線を図-13 に示す。図より、接着モデルは剥離モデルよりも荷重が大きく、また、剥離モデルの方が実験に近くなっている。

解析により得られた変位～BFP 応力を図-14 に示す。剥離モデルは概ね実験相当の応力値となっている。接着モデルは剥離モデルよりも BFP の応力が大きい。これは、接着モデルではひび割れ箇所等のひずみの大きいところにおいて局所的に大きなひずみが出たためと考えられる。一方、剥離モデルではまんべんなくひずみが出るため接着モデルより値が小さくなったものと考えられる。

以上より、以降の解析では、剥離モデルを用いて解析することとした。

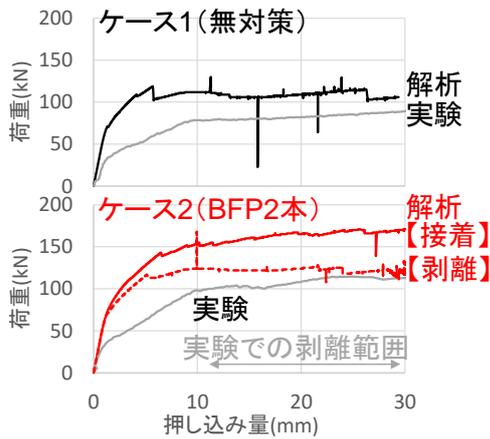


図-13 荷重～変位曲線



図-14 変位～BFP応力曲線

(3) トンネル模型を用いた模型実験の解析

次に、剥離モデルを用いて、2. (2) で示した、トンネル模型を用いた荷重実験の再現解析を行った。図-15 に解析モデルを示す。覆工本体は2次元平面要素でモデル化している。(2)と同様に、BFP ははり要素で覆工の下面にモデル化した。ここでBFPは弾性体とするが、応力を監視し、引張強度に到達した時点で解析を終了することとした。また、BFPと覆工との接合は、(2)での検討をふまえ解析上 BFP に引張が発生した天端 90° 範囲について剥離モデル（アンカー固定箇所のみ荷重伝達）とした。解析の入力値を表-4 に示す。

解析により得られた荷重～変位曲線を図-16 に示す。図より、解析は実験よりも全体的に大きめの値を出している。荷重初期の3ヒンジアーチになった後で両者の乖離が大きい。また、解析ではひび割れ発生による荷重の低下減少までは表現できていない。しかし、変形が大きくなってきた段階では両者の値は近づき、また、圧ぎのタイミングについては実験をほぼトレースできている。

補強に伴う圧ぎ発生変位・圧ぎ発生荷重の変化を図-17 に示す。圧ぎ発生荷重については、実験、解析いずれも Case1 (無補強) < Case2 (BFP2本) < Case3 (BFP3本) となり補強効果が見られたが、圧ぎ発生変位については、実験、解析いずれも Case3 (BFP3本) は Case2 (BFP2本) とくらべて小さくなり、補強量の増加が必ずしも変形性能の増加につながらない結果となった。

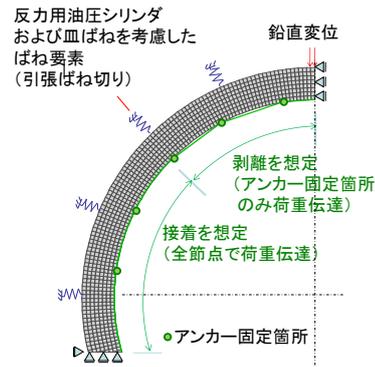


図-15 解析モデル

表-4 解析入力値

項目	入力値	備考	
コンクリート	圧縮強度 f_c	23.0MPa	実測値
	引張強度 f_t	1.8MPa	$0.23 \times f_c^{2/3}$
	弾性係数 E_c	1.55×10^4 MPa	実測値
	引張弾性係数 E_t	1.55×10^4 MPa	$= E_c$
	ポアソン比 ν	0.2	文献5)より
BFP	弾性係数 E	4.5×10^4 MPa	引張強度 1120MPa

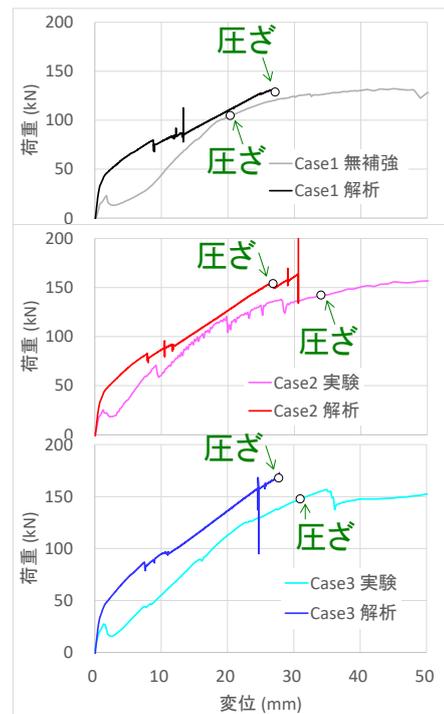


図-16 解析結果

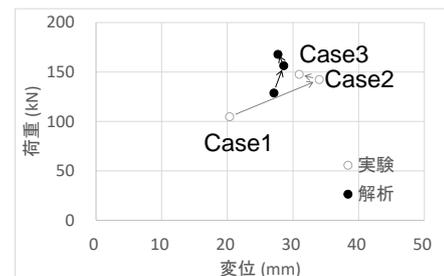


図-17 補強に伴う圧ぎ発生変位・圧ぎ発生荷重の変化

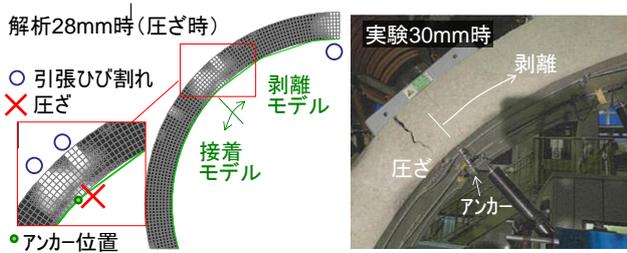


図-18 圧ざ発生時のひずみ発生状況

構造タイプ 1	構造タイプ 2	構造タイプ 3
単線巻厚46cm 空洞あり	単線巻厚46cm(れんが) 空洞あり	単線巻厚46cm 空洞あり
【インパートなし】	【インパートなし】	【インパートあり】

図-19 構造, 材料の設定

荷重タイプ A	荷重タイプ B	荷重タイプ C
単純梁モデル	トンネルモデル	トンネルモデル

図-20 荷重の設定とモデル化方法

図-18 に圧ざ発生時 ($\delta = 28\text{mm}$ 時) のひずみの発生状況を示す。図には、実験 Case2 ($\delta = 30\text{mm}$ 時) の模型の状況を併せて示す。解析では、図中のアンカーの上側を剥離モデルとしたが実験でも同様に剥離しており、モデルの妥当性が確認できる。また、解析においては、覆工の圧ざは BFP を接着モデルとした範囲では発生せず、BFP を剥離モデルとした範囲において発生している。このことから、BFP の圧縮側の剛性により覆工内面側の圧縮ひずみを一部緩和し、圧ざ時期を遅くしているものと考えられる。

4. 実トンネルの覆工補強を想定した数値解析

これまでの検討により、BFP の効果を数値解析で評価できること、耐荷力の評価にあたっては、BFP と覆工と

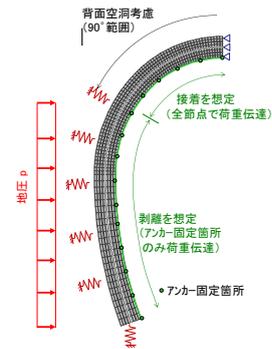


図-21 解析モデル (構造タイプ2, 荷重タイプCの例)

の接合は、接着を無視してアンカー固定箇所のみで荷重伝達するモデルを用いると適切に評価できることがわかった。以上の検討結果をふまえ、本章では、実トンネルの覆工補強にBFPを適用した場合の効果を数値解析により調べた結果について示す。

(1) 解析の条件

解析対象としたトンネルを図-19に示す。今回の解析では、一般的な鉄道単線トンネルを想定し、構造、材料を変化させて構造タイプ1~3を設定した。構造はインパートはなしとありを、材料はれんがあるいは無筋コンクリートを設定した。

BFP の効果を評価するにあたって、トンネルに何らかの荷重を作用させる必要がある。荷重モデルは、後述するような3タイプを設定した (図-20)。また、図-20に解析モデルもあわせて示す。

荷重タイプA：局所的な地圧 (含裏込注入圧) を受ける場合を想定したものであり、主として曲げ荷重が作用するタイプ。解析モデルは、長さ2mの単純梁に一樣荷重が作用するモデル。

荷重タイプB：塑性地圧を想定した水平荷重が作用するタイプ。解析モデルは、地盤ばねで支持されたトンネルに水平方向の一樣荷重が作用するモデル。なお、背面空洞を考慮している。

荷重タイプC：緩み荷重を想定した鉛直荷重が作用するタイプ。解析モデルは、地盤ばねで支持されたトンネルに鉛直方向の一樣荷重が作用するモデル。

巻厚は、れんがの場合は4層、無筋コンクリートの場合にはれんが4層分に相当する47cmとした。ここで、本研究では、巻厚が何らかの理由で減少したトンネルに対してBFPを補強目的で施工することを想定した。巻厚減少の理由としては、

- ①施工時の巻厚不足 (無筋コンクリートの場合)
- ②劣化による1層はつきり (れんがの場合)

の2つを設定した。解析ケースは、この考え方に基づき、それぞれ、標準の巻厚を有する場合、巻厚が減少し

表-5 解析入力値

	項目	入力値	備考
コンクリート	圧縮強度 f_c	24MPa	一般的な値
	引張強度 f_t	1.9MPa	$0.23 \times f_c^{2/3}$
	弾性係数 E_c	25×10^3 MPa	文献4)より
	引張弾性係数 E_t	25×10^3 MPa	$= E_c$
	ポアソン比 ν	0.2	文献4)より
れんが	圧縮強度 f_c	10.0MPa	文献4)より
	引張強度 f_t	1.1MPa	文献4)より
	弾性係数 E_c	1.0×10^4 MPa	文献4)より
	引張弾性係数 E_t	1.0×10^4 MPa	文献4)より
	ポアソン比 ν	0.11	$= E_c$
目地	圧縮強度 f_c	7.9MPa	文献4)より
	引張強度 f_t	0.3MPa	文献4)より
	弾性係数 E_c	7.8×10^3 MPa	文献4)より
	引張弾性係数 E_t	7.8×10^3 MPa	文献4)より
	ポアソン比 ν	0.17	$= E_c$
地山	変形係数 E	30MPa	強風化軟岩想定
	地盤反力係数 k	36×10^3 kNm ³	$1.7 \times 1 \times E_d^{1/3}$ (d:掘径)
	ポアソン比 ν	0.25	軟岩地山想定
BFP	寸法	50mm×2mm	ct50cm
	弾性係数	4.5×10^4 MPa	引張強度 1120MPa

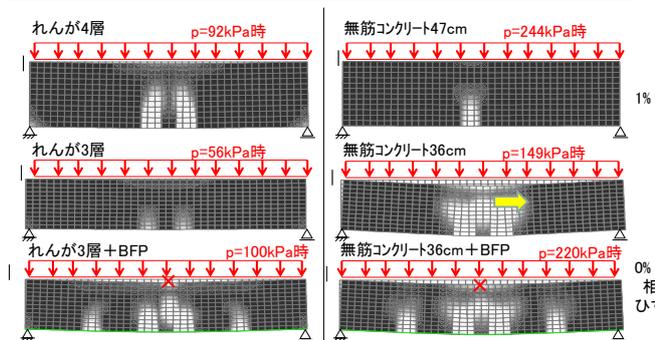


図-22 最大荷重・圧ざ発生時のひずみ分布 (荷重タイプA)

た場合、BFPを貼り付けた場合の3通りとした。

解析は、これまでと同様に、引張強度、圧縮強度到達後の軟化挙動を表現することのできる解析手法を用い、BFP ははり要素で覆工の下面にモデル化した。ここでBFP は弾性体とするが、応力を監視し、引張強度に到達した時点で解析を終了することとした。また、BFP と覆工との接合は、解析上 BFP に引張が発生した範囲について剥離モデル (アンカー固定箇所のみ荷重伝達) とした。図-21 に解析モデルの例を、表-5 に解析入力値を示す。

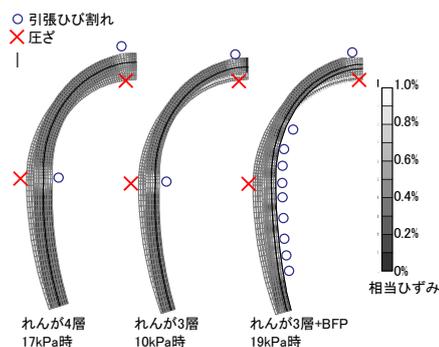
(2) 解析結果

a) 荷重タイプA (曲げ荷重)

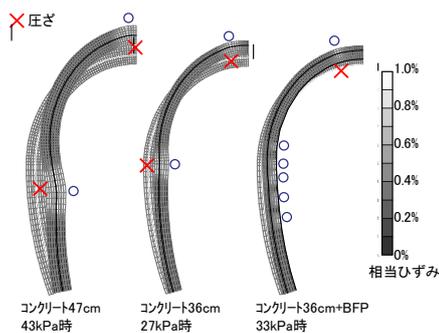
図-22に、最大荷重時、あるいは、圧縮縁に圧ざが発生したときのひずみ分布を示す。ここで、ひずみは、von Mises相当ひずみ (式(1)) で示す。なお、(1)式は絶対値であるため、引張により生じたひずみ、圧縮により生じたひずみの両方が白色で表示されている。また、相当塑性ひずみ ε_{eq} が1%を超えた場所について圧ざ相当として図中に発生箇所を記載した。

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{2} \{ (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 \}} \cdots (1)$$

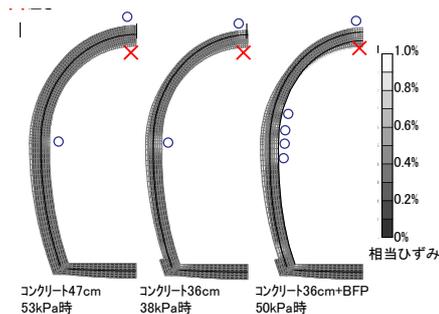
($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$: 最大, 中間, 最小主ひずみ, のび正)



(a) ケース1 (無筋コンクリート・インバートなし)



(b) ケース2 (れんが・インバートなし)



(c) ケース3 (無筋インバート・インバートあり)

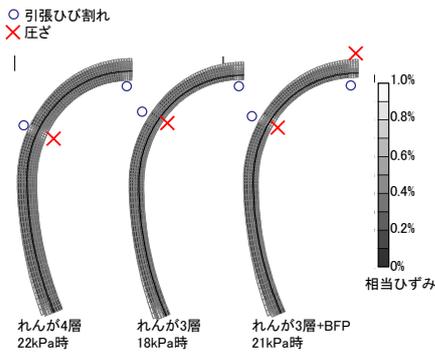
図-23 圧ざ発生時のひずみ分布 (荷重タイプB)

図より、れんが、無筋コンクリートのいずれも、無補強の場合は、はり中央部下面側を起点として引張ひび割れが上面に向けて伸びている。BFPによる補強を行うと、ひび割れが分散し、また、上面側では圧ざが発生するようになった。なお、この時のBFPの発生応力は引張強度以下であった。

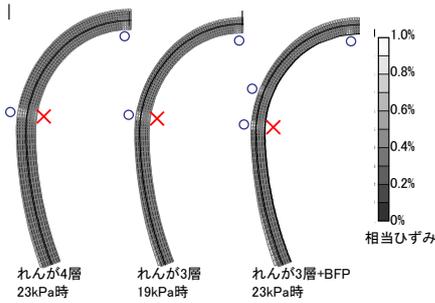
b) 荷重タイプB (水平荷重)

図-23に、覆工内面に圧ざが発生したときの覆工のひずみ分布を示す。また、相当塑性ひずみ ε_{eq} が1%を超えた場所について圧ざ相当として図中に発生箇所を記載した。

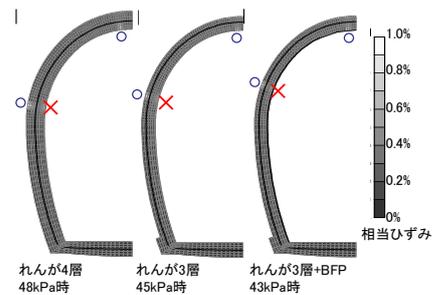
図より、いずれも、ひずみが大きい箇所は天端部と側壁部に位置していて、天端部は内側で圧ざ、地山側で引張ひび割れが発生した。側壁部は、圧ざ、引張ひび割れの位置関係が天端部と入れ替わる。覆工の巻厚が小さくなくてもひずみの発生形態は変わらないが、これに対し



(a) ケース1 (無筋コンクリート・インバートなし)



(b) ケース2 (レンガ・インバートなし)



(c) ケース3 (無筋コンクリート・インバートあり)

図-24 圧ざ発生時のひずみ分布 (荷重タイプC)

BFP補強を行うと、引張側においてひずみが分散する変化が見られた。これらの傾向は、覆工材質やインバートの有無によって変わらない結果となった。

単線トンネルは縦長の構造であるため、水平荷重を受ける場合は、側壁部では、軸力成分よりも曲げ成分の方が増加しやすくなっていることによるものと推察される。

c) 荷重タイプC (鉛直荷重)

図-24に、覆工内面に圧ざが発生したときの覆工のひずみ分布を示す。

図より、いずれも、ひずみが大きい箇所は天端部と側壁部に位置していて、天端部は地山側で圧ざ、内側で引張りひび割れが発生した。側壁部は、圧ざ、引張りひび割れの位置関係が天端部と入れ替わる。覆工の巻厚が小さくてもひずみの発生形態は変わらない。これに対しBFP補強を行うと、引張側において、発生するひずみ量がやや減少する変化が見られたものの、b) 荷重タイプBと異なり、ひび割れが分散する傾向は見られなかった。また、これらの傾向は、覆工材質やインバートの有無に

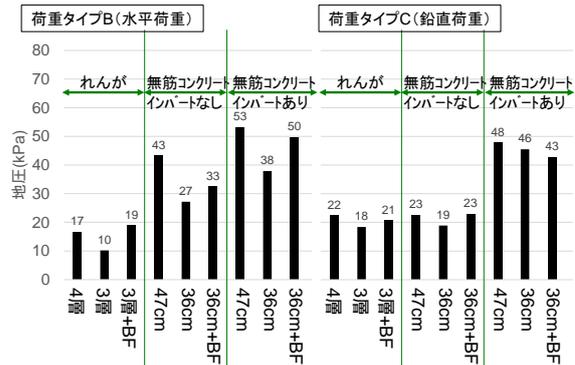
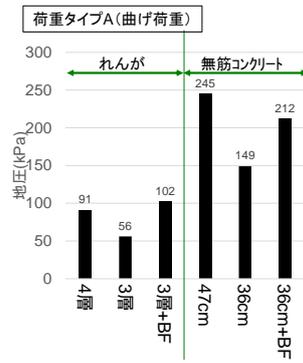


図-25 解析結果まとめ (耐荷力)

よって変わらない結果となった。

単線トンネルは縦長の構造であるため、鉛直荷重を受ける場合は、アーチ部では、水平荷重の場合と比べて、曲げ成分よりも軸力成分の方が増加しやすくなっていることによるものと推察される。

(3) 耐荷力のまとめ

図-25に、各ケースの耐荷力を比較する。ここで、荷重タイプAは最大荷重、荷重タイプB, Cは、覆工内面に圧ざが発生したときの荷重を比較した。

図より、全体的な傾向として、巻厚が小さくなることにより耐荷力が低下し、BFP補強を行うことで耐荷力が増加する傾向となった。荷重タイプの違いに着目すると、曲げが比較的大きく発生する荷重形態である荷重タイプA、タイプBでBFPの補強効果が比較的大きく現れ、レンガ覆工であれば、BFPはレンガが1枚分程度の巻厚の補償に相当するという結果となった。側壁部の曲げが大きくなると推察される荷重タイプBかつインバートありのケースでBFPの補強効果が比較的大きくなったこともこの推論を裏付ける結果となっていると考えられる。一方で、荷重タイプA, Bであっても、無筋コンクリートはレンガに比べて補強効果が小さくなった。これは、無筋コンクリートはレンガと比べて剛性や強度が大きいいため、相対的にBFPの補強効果が小さくなったためと考えられる。曲げが比較的小さく発生する荷重形態である荷重タイプCではBFPの補強効果はあまり見られなかった。

5. 結論

BFPによる覆工の補強効果に着目し、模型実験の再現解析による解析モデルの検証と、実トンネルを想定した解析による補強効果の評価を行った。以下に、本研究により得られた成果をまとめる。

- 1) 模型実験の再現解析による解析モデルの検証を行った結果、耐力に着目する場合等で、比較的変形が大きい時を想定した解析を行う場合は、剥離モデルが適切であることがわかった。
- 2) 実トンネルを想定した解析による補強効果の評価を行った結果、BFPにより耐荷力が増加する傾向となる。補強効果はれんがのほうが無筋コンクリートより大きく、また、荷重モードとしては、曲げが卓越するモードで補強効果が大きく現れることがわかった。
- 3) BFPは、覆工の材料や荷重のモードによっては、覆工のを耐荷力を向上させる効果を有することがわかった。

参考文献

- 1) 田中徹, 岡野法之, 木村亮: 無機系繊維補強プレート帯板接着工法の補強効果に関する数値解析, 土木学会年次学術講演会, VI-253, pp.505-506, 2015.
- 2) 田中徹, 岡野法之, 小島芳之: バサルト繊維補強プレート帯板接着工法に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1666-1671, 2012.
- 3) 岡野法之, 小島芳之, 植村義幸: 大型覆工模型実験によるトンネル覆工の変形特性の再現, 第12回岩の力学国内シンポジウム講演概要集, pp.909-914, 2008.
- 4) 野城一栄, 小島芳之, 新井泰, 岡野法之, 竹村次朗: 圧縮破壊後の軟化を考慮した無筋コンクリート山岳トンネル覆工の数値解析手法に関する研究, 土木学会論文集C, Vol.71, No.2, pp.78-94, 2015.
- 5) 新井泰, 有賀貴志, 平野勝識, 渡辺忠朋: 鉄筋腐食と断面欠損によるRCはりの曲げ挙動に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.169-174, 2007.

(2017.8.11 受付)

RESEARCH ON TUNNEL LINING REINFORCING EFFECT OF BASALT FIBER PLATE

Kazuhide YASHIRO, Noriyuki OKANO, Toru TANAKA and Hideharu ITO

Focusing on reinforcement of lining by Basalt reinforcing plate (BFP), the authors verified the analytical model by reproducing analysis of the model experiment and evaluated the reinforcing effect by analysis assuming real tunnel. We verified the analytical model by reproducing analysis of the model experiment and evaluated the reinforcing effect by analysis assuming real tunnel. As a result, it was found that the peeling model is appropriate when analysis is performed assuming a case where the deformation is relatively large. Moreover, by analyzing assuming actual tunnel, the reinforcing effect of BFP was clarified by lining material and load model.