

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

FRP 帯板を用いて トンネル覆工の内面を補強する

JR各社で供用されている山岳トンネルに対する補修・補強工事では、建築限界とトンネル覆工との離隔が小さく、短い間合い時間での作業となるのが一般的です。したがって、そのような条件下でも適用可能な補修・補強工法が求められています。鉄道総研ではFRP製の帯板をトンネル内面に接着する工法を考案し、その補強効果をトンネル模型実験により確認し、現在、広く用いられている繊維シート接着工法と同等以上の補強効果があることを確認しました。



岡野 法之
Noriyuki Okano
構造物技術研究部
トンネル研究室
主任研究員
【専門分野】トンネル工
学

はじめに

現在、JR各社で供用されている山岳トンネルは、約3,700本、総延長で約2,200kmにも及びます。そのうち半数以上は戦前に建設されており、トンネルの材質としては無筋コンクリートが大半を占めるものの、昭和初期まで用いられていた石・れんが・コンクリートブロックによるブロック積みも相当量存在します。また、それらの中には、建築限界とトンネル壁面との離隔がほとんどないトンネルもあります。

トンネルは、“一寸先は闇”の山の中を掘削して造っていくわけですが、地盤がよくて、設計・施工が適切に行われれば、健全な状態のまま、長期間にわたって使用することができます。

しかし、地盤が悪くて設計・施工に適切でないところがあったりすると、ひび割れや漏水などの変状が発生する場合があります。変状に対する対策工の種類は多数存在しますが、近年では、トンネル内面に補強・補修材を接着する工法のうち、施工性がよく、内空をほとんど支障しない繊維シート接着工法(図1)の施工事例が増加しています。しかし、繊維シート接着工法は接着材硬化までに剥離する恐れがあり、湧水箇所や覆工表面の不陸が大きい箇所へは適用が困難であることなどの短所を有しています。

そこで、それらの短所を克服しうるFRP製の帯板と、必要によりネットやシートを併用する新しい内面補強工

法(以下、「帯板接着工法」)を考案しました。そして、模型実験によりその補強効果を明らかにし、廃坑トンネルを利用した試験施工によりその施工性を確認しました。ここでは、まず、トンネルの変状対策工について概説した上で、帯板接着工法に関する研究成果につ



図1 繊維シート接着工法



図2 トンネル壁面の劣化

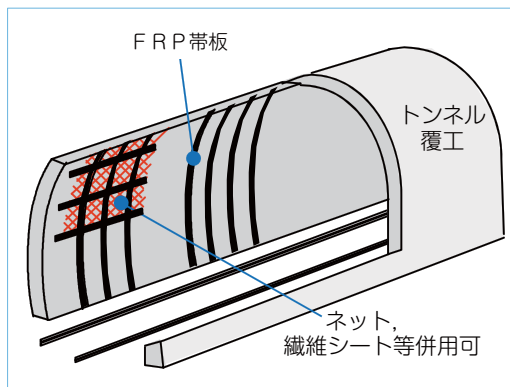


図3 帯板接着工法の概要

表1 実験ケース

ケースNo.	補強工法	仕様
Case1	なし	—
Case2	繊維シート	AFS 目付量 56g/m ²
Case3	帯材接着	CFP 幅 4mm 厚 1mm × 3本

※ AFS：アラミド繊維シート CFP：炭素繊維プレート



図4 大型トンネル模型載荷実験装置

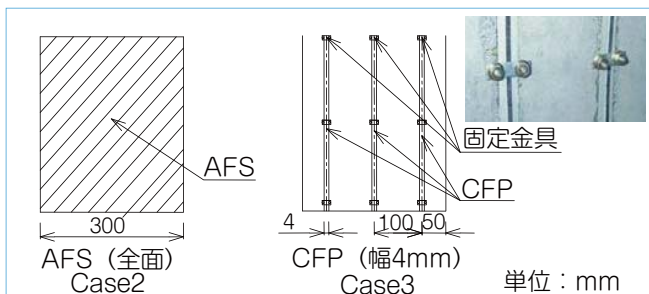


図5 補強工の仕様の詳細(トンネル壁面の状況)

いてご紹介します。

トンネルの変状対策工

前述の通り、トンネルの変状対策工は多数存在しますが、大きく、①劣化・剥落対策工、②漏水・凍結対策工、③外力対策工の3つに分類できます¹⁾。

トンネルの壁が経年とともに劣化するのを防止したり、トンネル壁の一部が剥落したりする(図2)のを防ぐのが①の劣化・剥落対策です。

トンネル周辺の地盤には、地下水が存在するのが一般的で、コンクリートの打継目(トンネルは一般に数十m～十数kmと長いので、一度にコンクリートを打設することができず、通常は10m前後に区切って打設します)やひび割れが発生してしまった箇所から漏水することがあります。また、寒冷地では、その漏水が凍結し、つららや側氷

となり、建築限界を侵してしまうことがあります。それら、漏水や凍結に対する対策工が②の漏水・凍結対策です。

トンネルは、周辺の地盤が非常に悪く、施工で苦勞した箇所などでは、完成後にじわじわトンネルを押し替えることがあります。また、地震や地すべりなどが発生すると、トンネルに力が働きます。その結果として発生する変状に対する対策工が、③の外力対策です。

FRP 帯板接着工法の概要

図3に示すように、FRP製の帯板(場合によっては鋼材も可)と、必要によりネットや繊維シートなどを組み合わせたものであり、覆工の耐力向上には帯板が、剥落防止には帯板およびその間に設置するネットや繊維シートなどが寄与するものです。したがって、③外力対策と①劣化・剥落対策として

適用できます。

本工法は、鋼板接着工法ほどの補強効果はないものの、前述した繊維シート接着工法、鋼板接着工法の短所を補い、かつ、それらに比べ非常に施工性がよく、維持管理しやすいのが特徴です。

実験による補強効果の確認

載荷実験に用いた大型トンネル覆工模型実験装置を図4に示します。実験装置は新幹線複線標準断面の縮尺1/5であり、反力フレーム、載荷用油圧ジャッキなどからなっています。トンネル模型の周囲には、油圧シリンダ付きの皿ばねを配置し、トンネル周辺の地盤を模擬しています。

実験は色々なケースを実施していますが、ここでは、無筋コンクリート覆工の補強なしを基本として、繊維シート接着工法と帯板接着工法(図5)の比

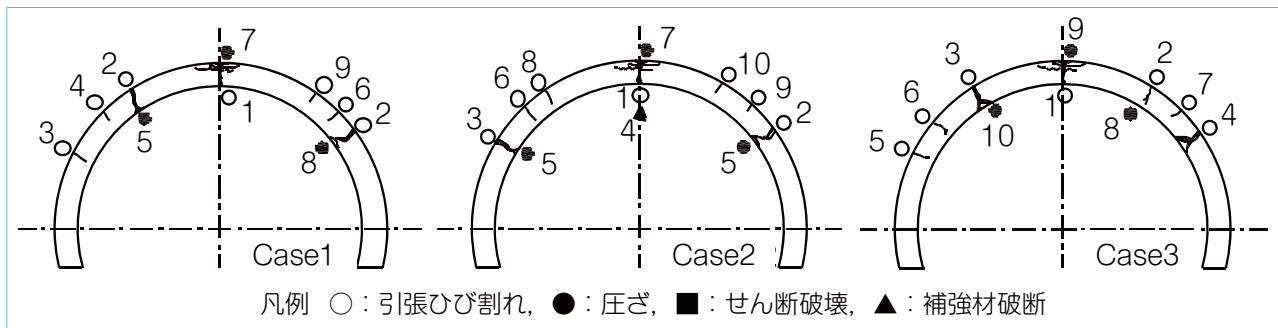


図6 ひび割れ進展状況

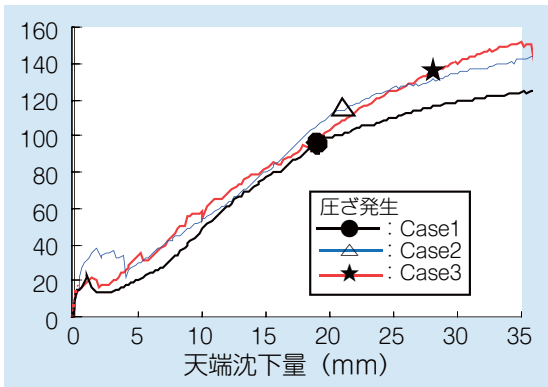


図7 荷重-変位曲線



図8 トンネル模型の破壊と帯板の状況

較について示します²⁾。

繊維シート接着工法のケースでは、構造物の補強に一般的に用いられているアラミド繊維1方向シート（以下、「AFS」）を選定し、目付量は最小の280g/m²の1/5、すなわち、56g/m²としました。

帯板接着工法のケースでは、FRP製のプレートで市販されている炭素繊維プレート（以下、「CFP」）を選定しました。市販のプレートの中で最も寸法の大きい幅50mm、厚さ2mmのものを50cm間隔に配置することを標準仕様として考えましたので、プレートの断面積が(1/5)²=1/25で、模型周方向300mmピッチに固定金具によるおさえを併用します。

図6にケースのひび割れ進展状況を、図7に天端載荷重と天端沈下量の関係（以下、「荷重-変位曲線」）を示します。

まず、ひび割れ発生状況について述べます。

いずれのケースもまず天端内側に曲

げ引張ひび割れ（以下、「ひび割れ」）が発生し、そののちアーチ肩部外側にひび割れが発生します。その後、圧縮せん断により破壊したCase3を除き、アーチ肩部外側のひび割れが増加していく中で、天端部外側、アーチ肩部内側の圧縮（※参照）の発生へと進行していきます。そして、アーチ肩部外側に発生するひび割れの数はだいたい3～4個でした。これらを見る限り、補強の有無による顕著な違いは見られません。

次に、荷重-変位曲線について述べます。

いずれのケースも天端部の第1ひび割れが天端沈下量約0.5mmで発生し、第1ひび割れ発生までの荷重-変位曲線の傾き、すなわち剛性はほとんど同じでした。

補強なしのケース（Case1）では、第1ひび割れ発生後、荷重-変位曲線の勾配が緩くなり、第2ひび割れ発生後急激に荷重が低下し、その後、緩やか

に荷重が増加しています。

Case2では、第1ひび割れ発生後も荷重-変位曲線の勾配は変化せず増加を続けていることがわかります。また、このケースで特徴的なのは天端沈下量約4mmでAFSが天端部で破断し、荷重が大きく低下していることです。

CFPを貼り付けたケースCase3では、第1ひび割れ発生からCFPが剥離するまでの挙動はCase1に近いですが、その後は天端沈下量35mmまでほぼ一定勾配で荷重が増加しており、耐力に優れていることがわかります。これは図8に示すように、固定金具によりCFPの剥離が抑制されているためであると考えられます。

※ 圧縮

コンクリートの強度を超えて、コンクリートを曲げようとする力が作用した時、コンクリートが破壊し、コンクリート片が剥離したり、浮いたりする現象。



図9 試験施工の状況

作業名	サイクルタイム(分)							
	60	120	180	240	300	360	420	480
高圧洗浄	1.8							
サンダーケレン	18.6							
プライマー混練		9.0			6.0			
プライマー塗布			31.3			72.0		
ウレタンプライマー混練						6.0		
ウレタンプライマー塗布							29.0	
補強材接着準備			33.3				35.0	
補強材接着				98.7				98.0

図10 サイクルタイム

最後に、各ケースの圧ぎ発生時の状況について考察します。無補強のケースに比べ、補強を施したケースは、圧ぎ発生時の天端沈下量および載荷重はいずれも大きくなっています。特に、CFPのCase3は無補強のCase1に比べて、天端沈下量で約60%、載荷重で50%近くアップしており、圧ぎの発生を遅らせる効果が非常に大きいことが確認されました。

試験施工による施工性の確認

FRP帯板接着工法の施工性の把握および付着力を確認するために、実トンネル（鉄道廃線トンネル）において試験施工を行いました。トンネルの材質はれんが積みで、厚さは4層（457mm）です。試験施工においても、繊維シート接着工法と比較しました。試験施工範囲は両ケースとも、トンネル縦断方向幅1m間の全周としました。試験施工の状況を図9に示します。

両工法の施工性は各作業のサイクル

タイムを測定することにより比較しました。トンネル延長1mあたりのサイクルタイムを図10に示します。ここでは、休憩時間などは含まず作業を行っている時間のみを記載しています。補強材接着準備および接着は両工法とも作業員4名で行いました。

合計の作業時間を比較すると、繊維シート接着工法は約470分なのに対し、CFP帯板接着工法は約240分と約5割でした。繊維シート接着工法は補強材を接着する面積が広いため、高圧洗浄や、サンダーケレンなどに時間を多く費やしていることが分かります。

CFPの接着は初めてで試行錯誤しながらの作業となったため、接着面積が小さいにもかかわらずほぼ同じ時間がかかってしまっていますが、慣れれば時間短縮は可能であり、さらに有意な差になると考えます。

したがって、帯板接着工法の施工性は繊維シート接着工法と比較して非常に優れていると言えます。

おわりに

今回、新しい内面補強工であるFRP帯板を用いた補強工法と従来からある繊維シート接着工法の補強効果に関する実験的検討結果をご紹介しました。解析的検討や剥落に対する検討も実施しているので、それらの結果を整理、分析し、帯板接着工法の適用範囲の明確化、設計法の確立をしていきたいと考えています。RRR

文献

- 1) 財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）トンネル，pp.57-62，2007
- 2) 岡野法之，植村義幸，小島芳之：FRP帯板を用いたトンネル覆工の内面補強工法の開発，鉄道総研報告，Vol.23，pp.41-46，2009