

FRP 帯板補強工法の設計に関する検討

ケー・エフ・シー 正会員 ○田部美月, 大久保拓真, 森岡弘樹, 上田康成, 松長 剛

1. はじめに

供用後のトンネル変状に対しては、施工性が良く、内空断面を侵さない等の要因から、内面補強工として炭素繊維シート接着工の採用実績が増えている。同工法は、覆工に発生したひび割れを包含して施工することで、その開口や深さの進行を抑制することが期待されている。一方で、覆工面にシートを接着することから、変状箇所が観察できなくなる、漏水が溜まって一部が剥がれるといった課題がある。

そこで、筆者らは帯状に一定間隔で覆工面に設置する FRP 帯板補強工法“SH シートボード工法”¹⁾を開発し、変状箇所の継続観察、シート内の水溜まり防止等の効果を期待している。内面接着工を帯状に配置する工法については、既にいくつかの工法²⁾⁴⁾が提案されているが、その設計法については明確な手法がないのが現状である。そこで、本研究では、FRP 帯板補強工法の断面耐力を設定し、従来の全面貼り繊維シート接着工との比較設計を行って、帯板接着工法の設計法について検討した。

2. FRP 帯板補強工法“SH シートボード工法”の特徴

本工法は、補強繊維とセパレーターを積層縫製し、図-1 のように接着剤・含浸剤を別工程とすることで、従来工法と以下のような差別化を図った。

① 施工性の向上

セパレーターを不織布/フィルム/不織布の3層とし、不織布には接着樹脂、含浸樹脂との接着力の向上、フィルムには樹脂の透過防止を期待した。貼付するセパレーター不織布面は単独構成とし、接着樹脂と密着することで空気が侵入せず、垂直面への設置でも剥がれや落下が防止される。また、接着剤・含浸剤を別工程とすることで、従来工法よりも含浸作業が容易なため、高度な熟練作業は不要であり、使用材料は人力で容易に持ち運べるため高所作業車などの簡易な足場で施工が可能となる。

② 補強効果

付着力の高い不織布は、強固にコンクリート構造物に接着する。また、含浸作業が容易なことで、上向き作業が困難な高目付量の炭素繊維が使用でき、結果として図-2 のように帯状に配置しても全面貼りと同等の設計が可能となった。これにより、従来工法と比較して施工面積は少なくなり、実作業時間が短縮されることが期待される。

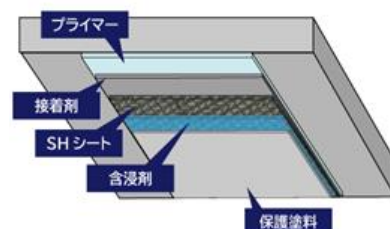


図-1 FRP 帯板補強工法の積層構成

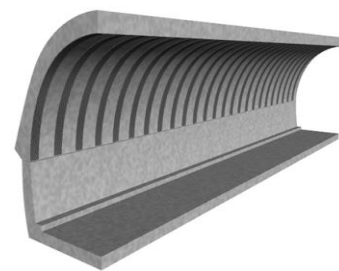


図-2 FRP 帯板補強工法の配置例

3. 変状トンネル対策工の設計法

変状トンネル対策工の設計には、変状の進行を評価したひび割れ進展解析が標準的に採用されている^{5) 6)}。この設計法は、ひび割れ発生ごとに構造モデルを変更し、各モードでの解析結果を重ね合わせることでひび割れの進展を表現している。なお、各段階における覆工部材は線形弾性体として設定し、ひび割れを考慮した構造モデルではひび割れ断面をピン結合で表現し、ひび割れ前の解析結果と重ね合わせることで塑性ヒンジを評価している。設計では、対策工をモデル化した解析で対策後耐力を算定し、補強効果の評価を行う。FRP 帯板補強工法の設計断面耐力は、無筋コンクリートを内面補強工(炭素繊維シート接着工法)で補強した内面補強工ノモグラムの算定手法に準拠して決定する⁶⁾。この内面補強覆工ノモグラムは、コンクリートの圧縮側縁ひずみが $3,500\mu$ もしくは内面補強工が引張強度となる断面耐力(N-M 図)で判定を行うもので、解析で得られた断面力が断面耐力に達する時の地圧を構造耐力として評価する。

キーワード トンネル, 変状対策工, ひび割れ進展解析, 内面補強工, 帯板補強工法

連絡先 〒105-0011 東京都港区芝公園 2-4-1 芝パークビル B 館 11 階 ケー・エフ・シー技術部 TEL 03-6402-8256

4. 内面補強工に関する比較設計

FRP 帯板補強工法による補強効果を従来の内面補強工と比較するため、表-1 に示す3 ケースの試設計を行った。検討断面は、2 車線道路トンネル標準断面とし、巻厚は矢板工法を想定して 600mm とした。また、外力変状として鉛直緩み圧 q を想定して、ひび割れ進展解析を行った。解析モデル図を図-3 に示す。

各ケースの断面耐力の算定結果を図-4 に示す。ケース③帯補強では、目付量を 1200g/m^2 とすることで、面積比 25% の帯補強で全面貼りと同等以上の断面耐力を確保することができた。また、各ケースのひび割れ進展解析の結果を図-5 に示す。今回の試設計では、鉛直緩み圧による外力の作用によって、図-3 に示す箇所ではひび割れが発生し、以下のように変状が進展した。

STEP1：天端内側ひび割れ

STEP2：肩部外側ひび割れ

STEP3：天端外側圧縮損傷（解析終了）

ひび割れ進展解析の結果から、現況地圧を第 1 ひび割れ発生(STEP1)直後の 238.1kN に設定した。その後の地圧の増加によって、①無対策の耐荷力は 550kN 程度であったが、②全面貼りは 830kN 程度、③帯補強は 862kN 程度と耐力が向上することが確認された。

表-1 試設計ケース

試設計ケース	補強率 (面積比)	炭素繊維 目付量	炭素繊維 弾性係数	備考
①無対策	—	—	—	設計基準強度 $f'_{ck}=18\text{N/mm}^2$
②シート接着工法 (全面接着)	100%	200g/m^2	2.35×10^5 N/mm^2	従来工法
③帯板補強工法 (帯補強)	25%	$1,200\text{g/m}^2$	2.35×10^5 N/mm^2	SH シートボード

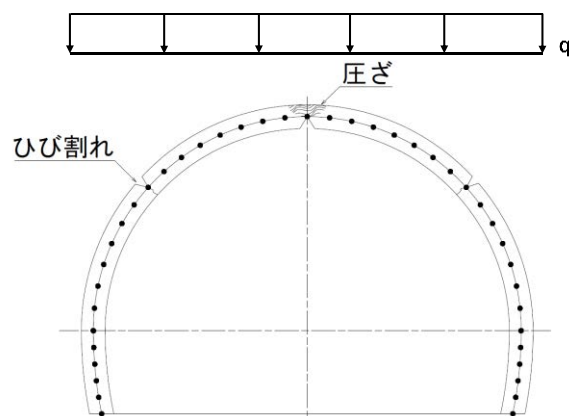


図-3 解析モデル図（ひび割れ箇所）

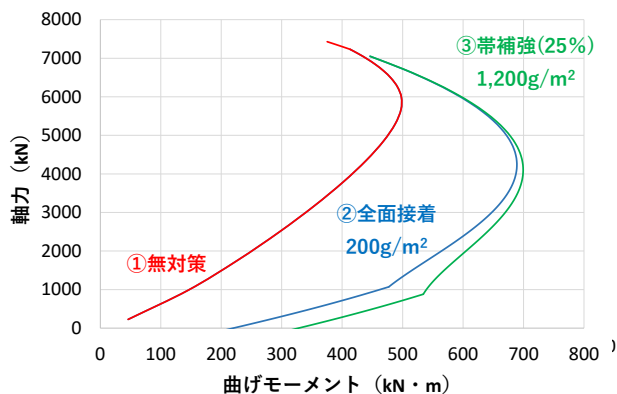


図-4 各ケースの断面耐力(N-M 図)

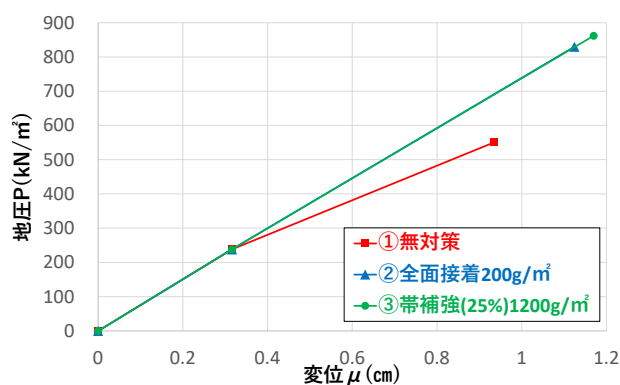


図-5 各ケースの地圧-変位

5. まとめ

試設計を通じて、帯板補強工法が全面貼り繊維シート接着工と同等以上の耐力を確保することを確認した。なお、本研究では、一定間隔で配置した FRP 帯板をロックボルト工や補強セントル工のようにトンネル軸方向に換算する方法で設計を行った。今後は、無補強箇所と帯板補強箇所に変位の進行に相違がないことを確認するため、ひび割れ進展を再現した試験を行って補強効果の妥当性を検証していく予定である。

参考文献

- 1) イプロス都市まちづくり HP ガイナ SH シートボード工法：<https://kensetsu.ipros.jp/product/detail/2000584811>
- 2) ケー・エフ・シーHP 帯鋼板による覆工補強工法：<https://www.kfc-net.co.jp/products/cat03/21.html>
- 3) 鉄道総合技術研究所 HP バサルト帯板接着工：<https://www.rtri.or.jp/rd/division/rd43/rd4340/rd43400106.html>
- 4) 中村：東京メトロにおける強靱化対策の実施例，基礎工 Vol.50, No.1, pp.72-74, 2022.1.
- 5) 東日本・中日本・西日本高速道路：設計要領第三集トンネル【保全編 令和2年7月】，2020.7.
- 6) 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，1998.2.