

- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

ポリウレシア樹脂によりトンネル覆工のはく落を防止する

鉄道トンネルの維持管理において、トンネル覆工片のはく離・はく落は列車の安全な運行を脅かす事象であるため、適切な検査と措置により未然に防ぐ必要があります。そこで、はく落を防ぐための対策工として、ポリウレシア樹脂吹き付け工法を開発しました。ここでは、ポリウレシア樹脂吹き付け工法の概要と、トンネル覆工を模擬した模型実験や押し抜き試験、廃止線のトンネルで実施した試験施工により、ポリウレシア樹脂吹き付け工法のはく落抑止性能や施工性を確認した結果について紹介します。

はじめに

鉄道トンネルはその中を列車が走行するという特徴があります。そのため、トンネル覆工片のはく離・はく落は列車の安全な運行を脅かす重大な事象であり、適切な検査と措置により未然に防ぐ必要があります。鉄道トンネルでは、1999年～2000年にかけて相次いで発生した3件のはく落事故を契機としてはく落に対する検査体系が見直され、新幹線で10年、新幹線以外で20年を超えない期間ごとに、特別全般検査を実施して覆工に近づいて目視を行うことが義務付けられました¹⁾。この成果として、検査体制が強化された2000年以降は、列車の安全な運行を脅かすような大きなはく落は減少したといえます。一方で、図1に最近発生した鉄道トンネルではく落事象の発

生状況を示しますが、小規模のはく落は依然として発生しており、保守担当者を悩ませる問題となっています。

覆工片のはく落を防ぐための対策工（はく落対策工）として、ステンレス金網、樹脂ネットによる金網・ネットや、繊維シート接着工法などの内面補強が一般に用いられ、はく落防止に効果を発揮しています（図2）。鉄道総研でもシート系のはく落対策工と比較して耐荷力が大きく、比較的大きなはく落にも耐えうる「バサルト帯板接着工法



野城 一栄
Kazuhide Yashiro
構造物技術研究部
トンネル研究室
主任研究員
[専門分野] 山岳トンネル



嶋本 敬介
Keisuke Shimamoto
構造物技術研究部
トンネル研究室
副主任研究員
[専門分野] 山岳トンネル



板谷 創平
Sohei Itaya
前 構造物技術研究部
トンネル研究室
研究員
[専門分野] トンネル



水谷 真基
Masaki Mizutani
構造物技術研究部
トンネル研究室
研究員
[専門分野] 土木構造物の維持管理



鎌田 和孝
Kazutaka Kamada
前 構造物技術研究部
トンネル研究室
研究員
[専門分野] 土木構造物の維持管理

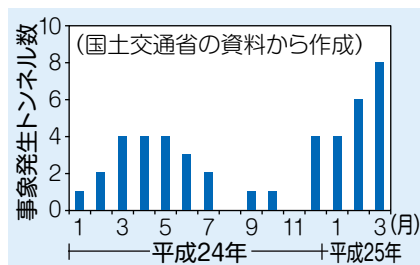


図1 はく落事象の発生状況

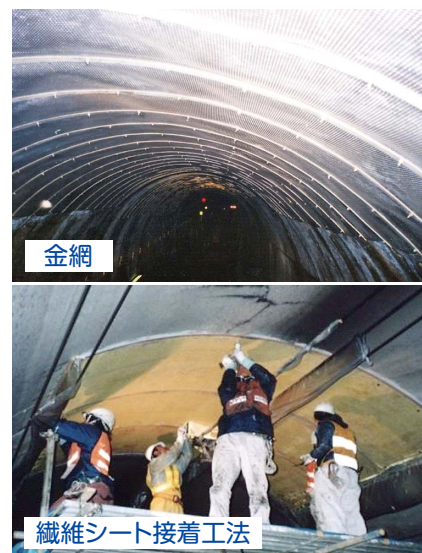


図2 はく落対策工の例



図3 バサルト帯板接着工法²⁾

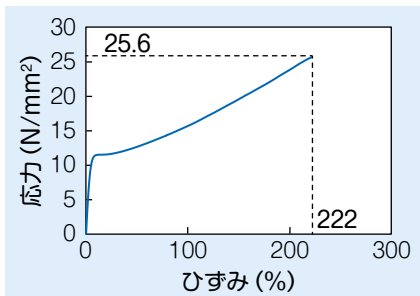


図4 樹脂の応力とひずみの関係の例³⁾

(図3)²⁾を開発してご利用いただいています。しかし、金網・ネットは、はく落そのものを防止できないという課題があります。また、繊維シート接着工法についても、覆工表面に凹凸がある場合には段差をパテ材で補修しなければならないことや、含浸・接着の工程に比較的時間を要することが課題です。筆者らは、はく落そのものを防止することができ、覆工表面に凹凸があっても施工でき、施工に要する時間が比較的少なくて済むはく落対策工として、ポリウレア樹脂吹き付け工法を開発しました。本工法は、比較的広い面積にわたり、比較的小規模なはく落片が落下するおそれのある覆工に対する対策工として開発したものです。ここでは、ポリウレア樹脂吹き付け工法の概要を紹介するとともに、はく落抑止性能や施工性の確認試験の結果³⁾⁴⁾について紹介します。



図5 樹脂吹き付けの様子



図6 樹脂により被覆された状況(模型)

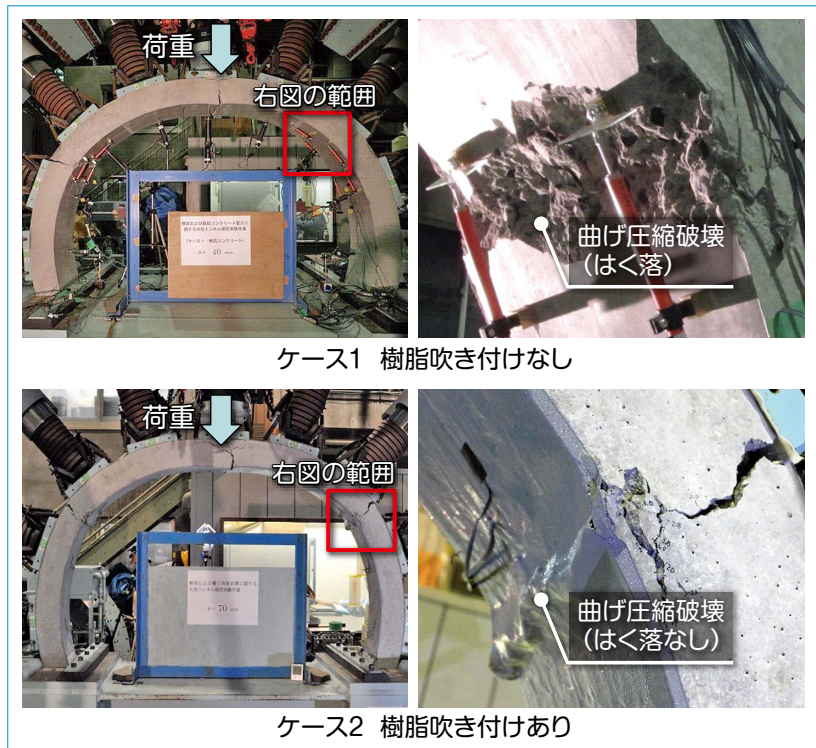


図7 トンネル覆工を模擬した模型実験の結果⁴⁾

ポリウレア樹脂

ポリウレア樹脂は、ポリイソシアネートとポリアミンとの化学反応によって形成されるウレア結合が主体となった化合物です。一般的な配合では、24N/mm²程度と大きい引張強度を有する一方で200%以上の優れた伸び性能も有し(図4)、ひび割れに対する追従性に優れています。ポリウレア樹脂はこれまで構造物や建築物における防水材料として使用実績がありました。

ポリウレア樹脂吹き付け工法の施工は、覆工をディスクサンダーなどで下地処理した後に、プライマー(下地と樹脂との間に介在して両者の結合力を高める材料)としてエポキシ系の樹脂を塗布し、その上にポリウレア樹脂を

専用のスプレーガンで吹き付けることにより行います(図5、図6)。被膜は1~数mm程度の厚さで、吹き付けによる施工ですので、多少の凹凸や、幅数mm程度のひび割れであれば問題なく施工できます。施工速度は1m²あたり1~2分程度であることから、大面積を速く施工することができます。

はく落抑止性能の確認

以下、模型実験により、ポリウレア樹脂吹き付け工法の性能を確認した結果を紹介します。

まず、トンネル覆工を模擬した模型実験により、ポリウレア樹脂のはく落抑止性能について確認しました。実験では、新幹線断面の1/5程度のアーチ

状の覆工模型供試体を作成し、ポリウレタ樹脂吹き付けを施工した供試体と、施工していない供試体について比較を行いました。供試体を試験装置にセットして天端を鉛直下向きに載荷し、供試体を破壊して強制的にはく離を発生させました。載荷を続けていくと、樹脂吹き付けを施工していない供試体では、供試体内面で圧ざ（曲げ圧縮破壊によるはく離）が生じ、コンクリート片がトンネル内にはく落しました。一方、樹脂吹き付けを施工した供試体では、圧ざは同様に発生しましたが、圧ざ部を覆うようにポリウレタ樹脂がよく伸びてコンクリート片のはく落を抑制しました（図7）。

耐荷性能の確認

トンネル覆工のはく落対策工として成立するためには、一定重量のはく落片を保持できる耐荷性能を有する必要があります。

そこで、押し抜き試験によりポリウレタ樹脂の耐荷性能を確認しました。実験は、コンクリート版の下面にポリウレタ樹脂を吹き付け、はく落を想定した押し抜き荷重を与えることにより行いました（図8）。実験では、標準供試体のほか、トンネル覆工表面の凹凸を想定して、コンクリート版の表面に大小の凹凸を施した供試体や、覆工背面地山からの漏水による凍結融解を想定して、漏水条件下で温冷繰り返し試験を行った後の供試体の載荷試験も行いました。はく落対策工の基準では、図9において緑色で示した性能満足範囲に一度でも入ることが求められますが、いずれも基準を満足しており、はく落対策工としての性能を満足していることを確認できました（図9）。

施工性の確認

次に、廃止線となっている在来線の

単線トンネルにて試験施工を実施し、ポリウレタ樹脂の施工性の確認を行いました。試験施工は、覆工の材料や表面の劣化状況が異なるAトンネルとBトンネルの2トンネルで実施し、閉鎖空間における施工性やポリウレタ樹脂の付着性能の確認を行いました。

施工完了後のAトンネルの状況を図10に示します。狭い単線トンネルでも問題なく施工することができました。また、Bトンネルはコンクリートブロック造で、SLによる煙害を受けており表面が劣化して骨材が露出してかなりの凹凸を有していましたが、樹脂は凹凸に回り込み問題なく施工することができました（図11）。また、現地にて樹脂の母材への付着強さを確認しましたが、付着強さは、基準値および母材の強さを上回っており、十分な付着性能を有することを確認しました（図12）。

図13にトンネル天井部分の2m²範囲を施工するのに要した正味の時間（資機材の搬入や養生、片付けなどの時間を除きます）を示しますが、ポリウレタ樹脂の吹き付けに要する時間は、下地処理、プライマー塗布と比べて短時間で済んでいることがわかります。

また、ポリウレタ樹脂吹き付け工法は、吹き付け施工の利点を活かして、覆工にスリットを作ることができます。「バッカー」と呼ばれるマスキング材を事前に覆工に貼り付けた後に吹き付けを行い、樹脂硬化後にバッカーを取り外すことにより、比較的容易にス

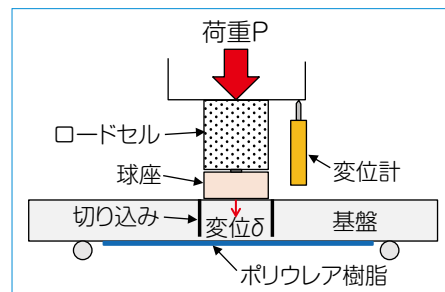


図8 押し抜き試験の概要

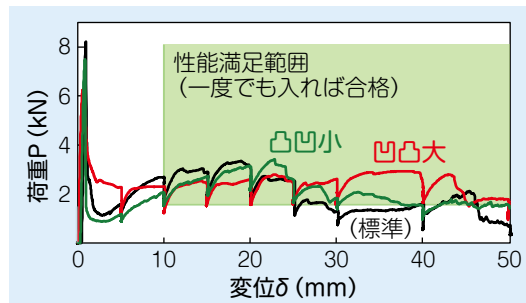


図9 押し抜き試験の結果の例

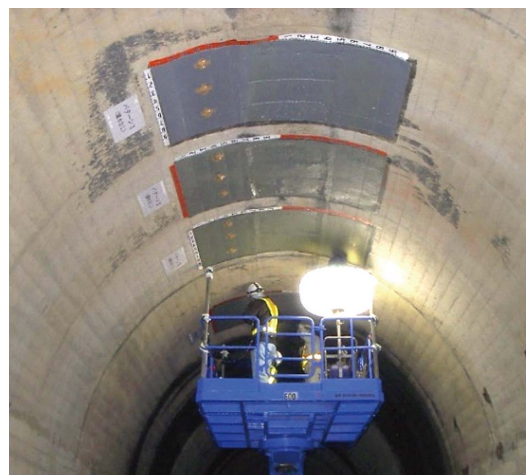


図10 施工完了後の状況 (Aトンネル) 4)

リットを作ることができます（図14）。

ここで、矢板工法で施工されたトンネルでは、当時の施工技術水準に起因して漏水（トンネル内の空間に地山からの地下水がにじみ出してくること）が多く見られます。また、このような漏水は、降雨や季節の影響も受けるので、同じトンネルでも漏水の発生場所や量はまちまちです（図15）。

一般に、覆工に面的に接着施工するはく落対策工を、このように漏水している箇所で行う場合、止水などの対策を事前しておく必要があります。十分な止水を行わないと、水圧により、

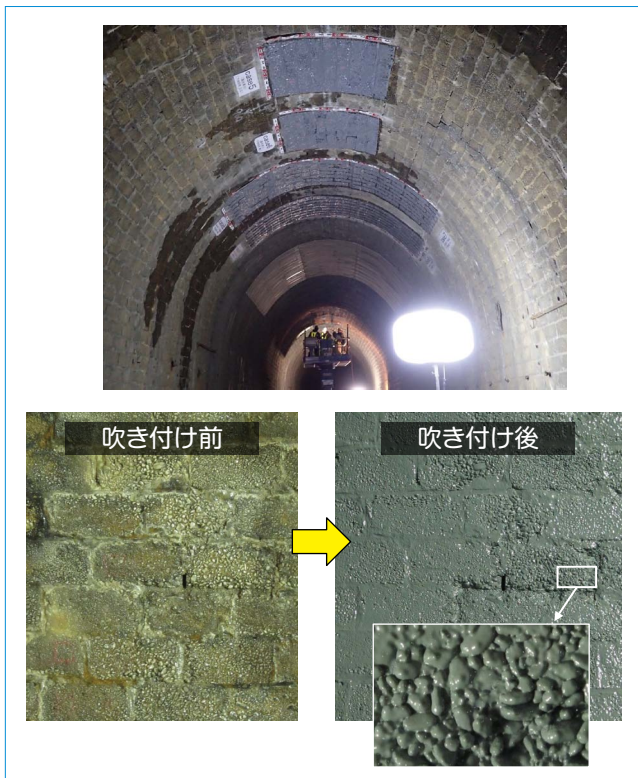


図11 施工完了後の状況(Bトンネル)

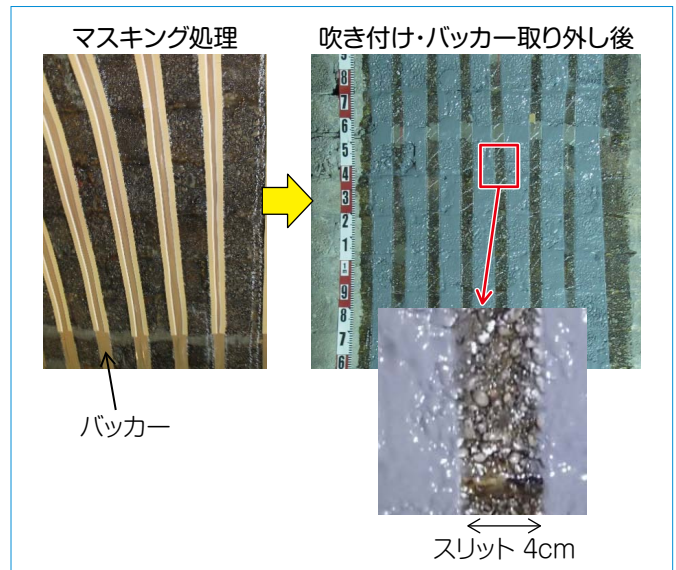


図14 マスキングによるスリットの作成

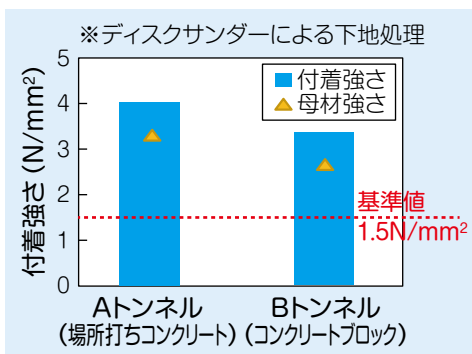


図12 付着強さの試験結果

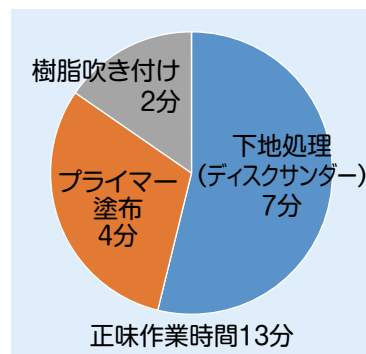


図13 作業時間の内訳 (天端2m²範囲)

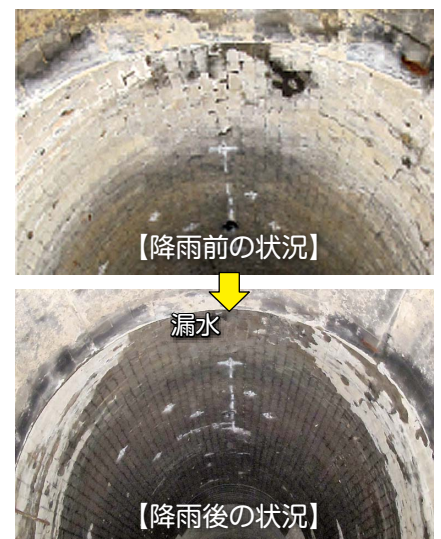


図15 トンネル内の漏水の例

はく落対策工自体がはく離してしまう可能性もあります。スリットを作っておくことにより、地山からの漏水をスムーズに排水させることが可能となります。そのほか、変状箇所をはく落対策工により全て覆ってしまうと変状の進行の有無の確認が困難となりますが、このスリットを作っておけば、これを介して、目視により変状の進行の有無を確認することも引き続き可能となります。

おわりに

各種室内実験により、ポリウレア樹

脂吹き付け工がトンネルのはく落対策として、十分なはく落抑止性能を有していることを確認することができました。また、実トンネルによる試験施工より、施工性も良好であることがわかりました。今後は、さらに厳しい環境条件での耐久性の評価に取り組むことや、実施工において一定の品質を確保できるように、施工マニュアルを整備することを考えています。

本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施しました。[RRR]

文献

- 1) 小島芳之：トンネル覆工の安全問題と今後の課題，RRR，Vol.57，No.6，pp.28-31，2000
- 2) 野城一栄，嶋本敬介：山岳トンネルを補強する，RRR，Vol.72，No.9，pp.12-15，2015
- 3) 水谷真基，野城一栄，嶋本敬介，板谷創平，奥石正己，井出一直：ポリウレア樹脂吹き付け法の簡易品質管理法の検討，第45回土木学会関東支部技術研究発表会，VI-2，2018
- 4) 嶋本敬介，野城一栄，川上義輝，奥石正己，井出一直：トンネル覆工の剥落対策としてのポリウレア樹脂吹き付けの模型実験と試験施工，土木学会論文集F1(トンネル工学)，Vol.73，No.3，pp.L21-L31，2017