

樹脂吹付け工法により トンネルからのはく落を防ぐ



大江 敦哉
Atsuya Oe

構造物技術研究部
トンネル研究室
研究員



嶋本 敬介
Keisuke Shimamoto

構造物技術研究部
トンネル研究室
主任研究員



牛田 智也
Tomoya Ushida

元 構造物技術研究部
トンネル研究室
副主任研究員



野城 一栄
Kazuhide Yashiro

構造物技術研究部
トンネル研究室
上席研究員



笹岡 良治
Ryoji Sasaoka

四国旅客鉄道株式会社
工務部 工事課
主席

はじめに

鉄道トンネルはその中を列車が走行するため、覆工（トンネルの壁）からの覆工片のはく落は列車の安全な運行を脅かす重大な事象となりえます。鉄道トンネルでは、1999年に相次いで発生したはく落事故（図1）を契機として、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、覆工に近づいて検査を行う（図2）ことが義務付けられました。これ以後、列車の安全な運行を脅かす大規模なはく落は発生していませんが、小規模なはく落（図3）は依然として起こっており、保守担当者

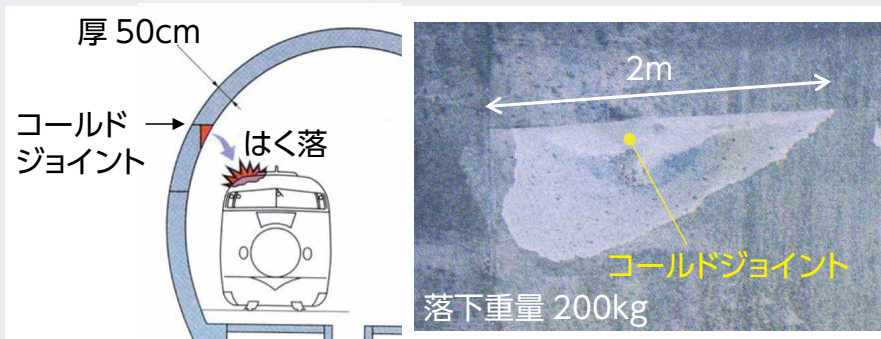


図1 トンネルからの大規模なはく落¹⁾



図3 トンネルからの小規模なはく落¹⁾

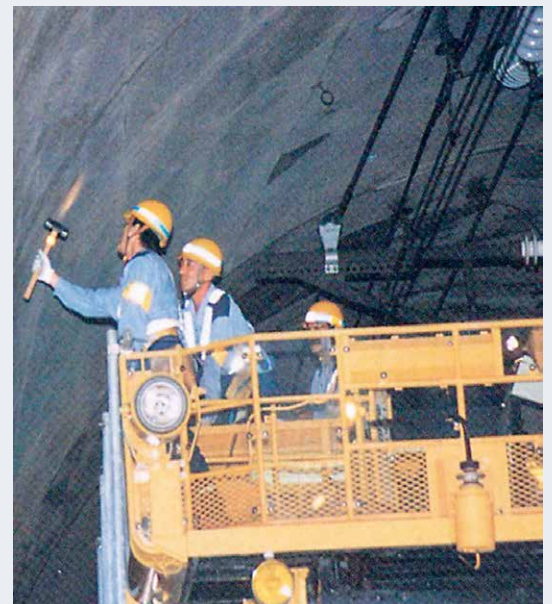


図2 覆工に近づいて行うトンネルの検査



図4 ポリウレタ樹脂を吹き付けた状態(カットモデル)



図5 ポリウレタ樹脂の吹付け

を悩ませる問題となっています。

本記事では、50kg程度の比較的小規模なはく落片が落下するおそれがある覆工を想定し、施工範囲を柔軟に設定することができる対策工として開発した、ポリウレタ樹脂吹付け工法²⁾の概要と、現場適用事例³⁾⁴⁾を紹介します。

ポリウレタ樹脂の特徴と施工方法

ポリウレタ樹脂は、イソシアネートとアミンとの化学反応によって生成される樹脂化合物で、コンクリート壁面の保護や防水のために開発されたものです。2つの材料の配合量を工夫すると、 24N/mm^2 と大きい引張強度を有する一方で200%以上の伸び性能が得られ、ひび割れに対する追従性に優れていることから、最近では、はく落対策にも用いられています。また、トンネル内では、紫外線が当たらないため材料の劣化が少なく、長期間の使用が期待できます。ポリウレタ樹脂を吹付けた後の状態(カットモデル)を図4に示します。

ポリウレタ樹脂吹付け工法では、覆工をディスクサンダーなどで下地処理した後に、覆工との接着を良くするプライマーとしてエポキシ系の樹脂を塗布し、その上にポリウレタ樹脂を専用のスプレーガンにより吹付けて、1.5mm程度の被膜を作ります(図5)。

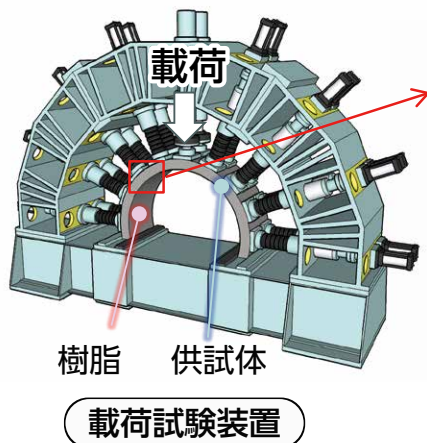
吹付けで施工することから、 1m^2 あたり1～2分程度と施工に要する時間が比較的少なくて済み、覆工の表面に多少の凹凸や、施工時に一時的に漏水を止めれば施工できるという特徴があります。

樹脂には、灰色に着色したものと透明のものとの2種類があり、現場のニーズに合わせて選べます。

ポリウレタ樹脂のはく落防止性能を実証するために、載荷実験で確認を行いました。コンクリート製の供試体を載荷試験装置にセットして天端を鉛直下向きに載荷して強制的にはく落を発生させました。載荷を続けていくと、樹脂吹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)が生じ、コンクリート片がはく落しました。一方、樹脂吹付けを施工した供試体では、同様に圧ざが発生しましたが、これ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防止しました(図6)。

山岳トンネルの覆工の特徴

トンネルは、作られた時代に応じて、れんが、コンクリートブロック、場所打ちコンクリートなど(図7)、いろいろな材料が使われています。覆工の材料にれんがやコンクリートブロック



吹付けなし



吹付けあり

図6 模型実験によるはく落防止性能の確認



れんが



コンクリートブロック



場所打ちコンクリート

図7 トンネル覆工のいろいろな材料

が使われているトンネルでは、目地があったり、漏水と共にコンクリートのモルタル分が流出して骨材（コンクリートを構成する小石）が表面に露出していることがあります（図8）。

これらのような凹凸のある覆工では、シートを接着するタイプのはく落対策工を施工する場合は、凸部を除去したり、凹部をパテ材で埋めるなどの事前準備をする必要があります、施工にひと手間を要します。

また、古い年代に建設されたトンネルでは、当時の技術水準に起因し、防水がしっかりしておらず、地山からの漏水で、覆工がぬれた状態になっていることが多くあります（図9）。また、はく落が問題となるようなトンネルは、覆工が乾いた状態であることは少なく、ぬれた状態が

多く見られます。このように、漏水で覆工がぬれた状態の場合、覆工に接着するタイプのはく落対策工を施工すると接着がうまくいかず施工後にはがれる場合があります。このため、漏水があるトンネルでも付着力が確保できることが求められます。

実際のトンネルで適用するためには、これらの難しい施工条件でも施工でき、はく落を防止できることが求められます。そこで、これらの課題に対してポリウレア樹脂の吹付け工法がどの程度対応できるのか、各種試験によって確認しました。

凹凸のあるトンネルでの適用

凹凸のあるトンネルでの適用を想定し、押抜



骨材の露出の例

図8 骨材の露出により凹凸ができた覆工

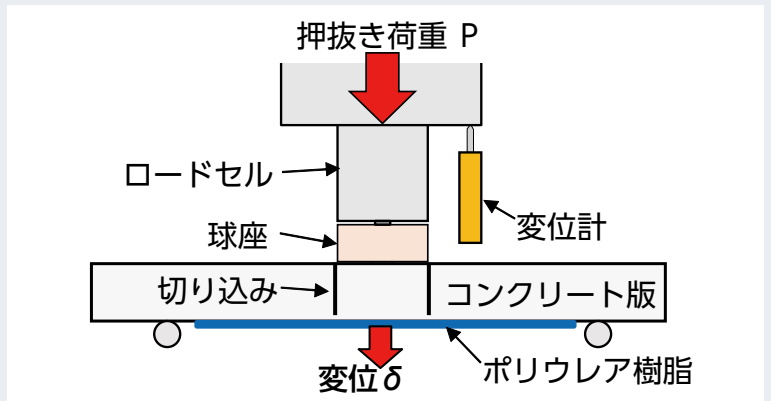


図10 押抜き試験の模式図²⁾

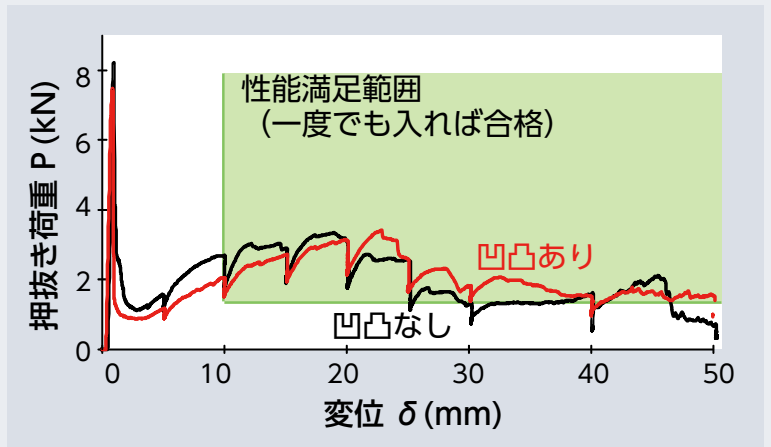


図11 押抜き試験の結果²⁾



降雨前の状況



漏水

降雨後の状況

図9 トンネルの漏水の例²⁾



図12 れんが積みトンネルでの施工例

き試験により、耐荷性能の確認を行いました。ここでは、コンクリート板の下面にポリウレア樹脂を吹き付け、はく落を想定した押抜き荷重を与えることにより行いました(図10)。実験では表面に大小の凹凸を施した供試体を用意しました。はく落対策工の基準では、図において

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。試験の結果、凹凸がある場合でも樹脂の量を多めに吹き付けることにより基準を満足でき、所定の耐荷力を確保できることを確認しています(図11)。

凹凸のあるトンネルでの施工例として、図12

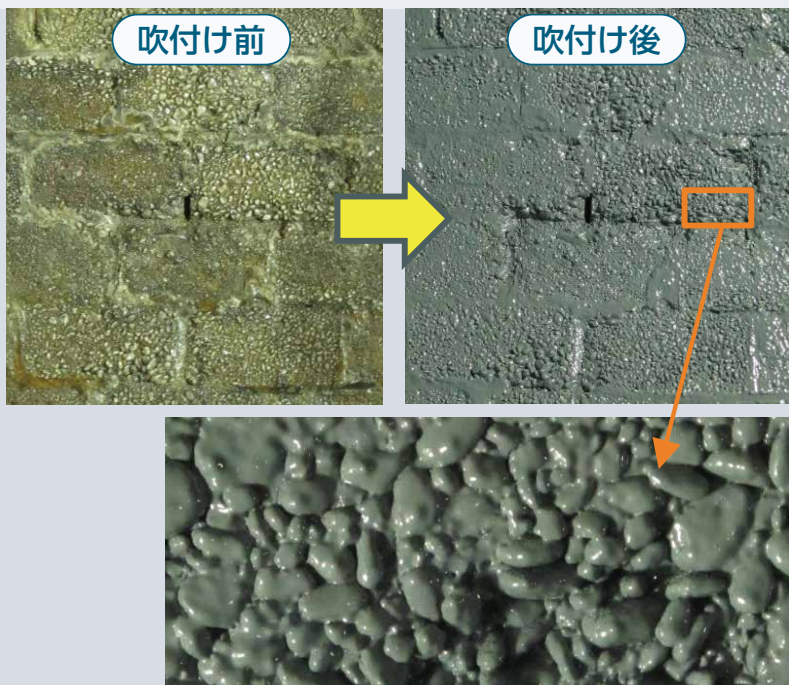


図13 骨材が露出したコンクリートブロック積みトンネルでの施工例²⁾



図14 骨材が露出した場所打ちコンクリート造のトンネルでの施工例³⁾



図15 止水用のモルタルを塗布する方法⁴⁾

にれんが積みトンネルでの施工例を、[図13](#)に骨材が露出したコンクリートブロック積みトンネルでの施工例を、[図14](#)に骨材が露出した場所打ちコンクリート造のトンネルでの施工例を示します。樹脂が凹凸に回り込むことにより、しっかり覆工表面を覆うことができることがわかります。

漏水のあるトンネルでの適用

漏水のあるトンネルにおいてポリウレタ樹脂を吹き付ける際は、一時的にでもよいので覆工を乾いた状態に保つことが重要です。漏水があるトンネルで、覆工を乾いた状態にする方法としては以下の2つの方法があります。

1つ目は、止水用のモルタルを塗布する方法です。止水用のモルタルを塗布することで、覆工表面を乾かして、ポリウレタ樹脂吹付け工法を施工している例を示します([図15](#))。なお、このトンネルでは、施工から7年が経過後にポリウレタ樹脂の接着力を確認する試験を行っています。7年経過時には、施工箇所の周辺が漏水でぬれている状況([図16](#))でしたが、試験の結果、覆工とポリウレタ樹脂の接着に問題がないことを確認しています。

2つ目は、事前に覆工を削孔し導水用のパイプを埋め、モルタルを塗布することにより漏水をうまく覆工の外に逃がす方法です。施工を行っている例を示します([図17](#))。このトンネルでは、漏水箇所が点在していたことから、止水用のモルタルの塗布では、覆工を乾かすことが難

しいと判断されました。そこで、覆工を削孔し導水用のパイプを埋め、モルタルを塗布することにより漏水をうまく覆工の外に逃がす工夫を行いました(図18)。これによって、道床へと直接導水ができており、覆工表面は乾かすことができます。

なお、このトンネルでは、透明タイプのポリウレア樹脂吹付けを施工しています(図17)。このタイプの樹脂は、吹付け後も覆工の様子を目視確認することができ、検査の省力化につながります。

おわりに

施工に要する時間が比較的少なく、済み、覆工の表面に凹凸があっても施工できるはく落対策工として開発したポリウレア樹脂吹付け工法の、概要と現場適用事例を紹介しました。

今後、トンネルの経年がますます増加するとともに、トンネルの検査員の減少が見込まれています。本工法は、検査ではく落対策が必要となったときに使っていただくことを目的に開発したのですが、将来的にはく落のおそれがあるところに計画的に本工法を施工しておくことにより、トンネルの検査の省力化にもつながることが期待できます。本工法のさらなる改良を行うとともに、現場適用を進めてまいります。RRR



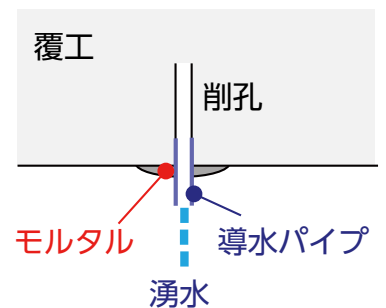
図16 施工から7年経過後のポリウレア樹脂吹付け工法⁴⁾



図17 漏水を覆工の外に逃がす方法⁴⁾



図18 漏水を逃がす工夫⁴⁾



文献

- 1) 国土交通省鉄道局：コンクリート片等の剥落対策に係る手引き，2017.10
- 2) 野城一栄，嶋本敬介，板谷創平，水谷真基，鎌田和孝：ポリウレア樹脂によりトンネル覆工のはく落を防止する，RRR，Vol.75，No.6，pp.20-23，2018
- 3) 松原史憲：トンネル変状箇所におけるポリウレア樹脂吹付け工法の適用検討，令和6年度土木学会全国大会年次学術講演会，VI-561，2024
- 4) 大江敦哉，嶋本敬介，牛田智也，野城一栄，鈴木雅之：トンネル覆工の漏水・表面凹凸箇所におけるポリウレア樹脂吹付け工法の適用条件，鉄道総研報告，Vol.39，No.5，pp.45-53，2025