

# 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

大江 敦哉\* 嶋本 敬介\* 牛田 智也\*  
野城 一栄\* 鈴木 雅之\*\*

Applicable Conditions of Polyurea Resin Spraying Method for Seepage and Uneven Surface of Tunnel Lining

Atsuya OE Keisuke SHIMAMOTO Tomoya USHIDA  
Kazuhide YASHIRO Masayuki SUZUKI

If a piece of tunnel lining falls off and hits a train, it could lead to an accident, so great care is taken every day during tunnel maintenance to prevent this from happening. Repairs are planned and carried out in areas where there is a potential risk of future spalling. We have developed a method, called the “polyurea resin spraying method”, to prevent spalling of the lining by spraying polyurea resin on the surface of the tunnel lining. This paper presents the results of a study carried out to extend the applicability of this method and some construction examples: the effect of surface moisture during application on the bond strength of the resin, the long-term durability in a seepage environment, and the bond strength of the resin in an uneven surface environment, as well as the results of its application in a real tunnel.

キーワード：トンネル，覆工，ポリウレア樹脂，漏水，表面凹凸，適用条件

## 1. はじめに

鉄道トンネルの維持管理上、覆工片の剥落事象は、列車の安全な運行に直接影響を及ぼすことから、適切な措置により、剥落そのものを防止することが重要である。筆者らは、トンネルの剥落対策工の1つであるポリウレア樹脂吹付け工法を開発<sup>1)</sup>、現場展開を進めている。

本工法の適用に際しては、工法の設計・施工マニュアル（以下、マニュアル<sup>2)</sup>）により、適用可否を判断することになっている。ここで、鉄道トンネルでは、漏水や表面の凹凸がしばしばみられ、また、このような条件下では剥落の恐れも相対的に高いことから、剥落対策工に対するニーズは高い。しかし、漏水および表面の凹凸について、適用条件は、表1に示すようにある程度示されているものの、具体的にどのような条件において施工可能かについて、詳細が示されていない。このため、このような条件下では、適用できるかの判断ができず、本工法の適用はされていない状況にあった。

そこで、筆者らは、室内試験や、過去に実施した試験施工箇所における現地試験、供用中の漏水が点在するトンネルおよび凹凸が連続するトンネルでの実施工を通じて、適用条件の整理を行った。本論文はこれらの結果について示すものである。

表1 適用可能な条件<sup>2)</sup>より作成

項目	基準
漏水	施工範囲内に漏水がない
表面凹凸	10mm程度まで

## 2. 検討項目と検討方法

適用条件の整理にあたり検討した項目と、その方法を以下に示す。

### [1-1] 施工時の漏水が付着力に及ぼす影響

鉄道トンネルは建設年代が古いトンネルが多く、目地やひび割れが多数存在することから、表面を漏水が流れることがある。また、夏季のトンネル坑内は、一般に坑外と比べて気温が低く結露により覆工表面の含水率が高くなることもある。漏水が認められる場合は、止水モルタル等による仮止水を行い、覆工表面の含水率が高い場合は表面をドライヤーで乾かすなどにより表面含水率を8%以内になるようにしたうえで施工を行っている。一般にプライマーは、塗布対象の表面に水があると、付着強度が低下することが知られているが、影響の程度や低下のメカニズムについては不明な点が残っていた。これについては、プライマーあるいは吹付け施工前の浸水の有無に着目した室内試験を行った。また、試験結果を踏まえ、漏水の影響が小さくなるような対策を考案したうえで、供用中の漏水が点在するトンネルで実際に施工を

\* 構造物技術研究部 トンネル研究室

\*\* 元 構造物技術研究部 トンネル研究室

行い、適用条件の整理を行った。

[1-2] 施工後の覆工背面からの漏水が付着力に及ぼす影響

[1-1] で述べたように、漏水環境下では仮止水を行ったうえで施工を行っている。しかしながら、仮止水であることから、施工後に漏水が樹脂と母材の間に回り込み、付着力が低下することが考えられた。樹脂の背面から水が作用した中での付着力の経時変化については不明な点が残っていた。これについては、過去に実施した試験施工箇所における施工7年経過後の付着強さ試験を行った。

[2] 表面凹凸が付着力に及ぼす影響

建設年代が古いトンネルは、当時の施工技術や供用後の時間経過に伴いモルタル分が流され骨材が露出するなどして、覆工表面に凹凸を有する場合もある。マニュアルでは、10mm程度の骨材の露出等により覆工に凹凸のある場合までが適用できる目安として定められているが、これは、経験的に定めたもので、表面凹凸がある場合の耐荷力については確認がされていなかった。これについては、表面凹凸に着目した室内試験を行った。また、マニュアルでは、凹凸が連続する条件での施工の可否といった個別の施工条件についても言及していなかった。そこで、室内試験結果を踏まえ、表面凹凸の影響が小さくなるような対策を考案したうえで凹凸が連続するトンネルで実際に施工を行い、適用条件の整理を行った。

### 3. 施工時の漏水が付着力に及ぼす影響の検討

鈴木ら<sup>3)</sup>は表面含水の影響に着目し、含水条件の違いがプライマーやポリウレア樹脂の付着強度に与える影響を確認するため、建研式接着力試験およびピール試験による付着強さ試験を実施している。本章では、実施した試験を概説するとともに、新たな考察を示す。

建研式接着力試験は、供試体にアタッチメント(40mm×40mm)をエポキシ樹脂系接着剤で接着し、接着剤が硬化後にアタッチメントの周囲に、母材に達する切り込みをディスクサンダーで入れ、建研式接着力試験器を用いて、最大引張荷重を測定する試験で、最大引張荷重をアタッチメントの面積で除した値が付着強さとなる。ピール試験は、供試体に幅20mm、長さ200mmの母材に達する切り込みをディスクサンダーで入れ、ポリウレア樹脂を治具で挟み、90度方向へ引っ張り、最大引張荷重を測定する試験で、最大引張荷重を、剥離幅の20mmで除した値が付着強さとなる。

いずれの試験も引張試験であるが、建研式接着力試験は単軸の引張試験であり、ピール試験は剥離を想定した引き剥がし試験という違いがある。なお、ポリウレア樹脂吹付け工法の品質管理項目では、施工後に建研式接着力試験により、付着強さを確認することとしている<sup>2)</sup>。

表2 試験ケース

No.	浸水	
	プライマー前	吹付け前
Case1	なし	なし
Case2	あり(拭き取りあり)	なし
Case3	あり(拭き取りなし)	なし
Case4	なし	あり(拭き取りあり)

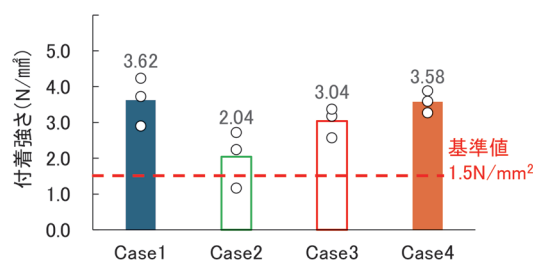


図1 建研式接着力試験の結果(平均値)

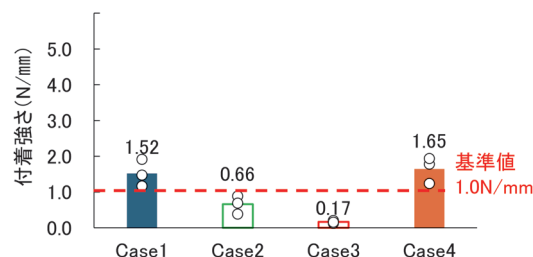


図2 ピール試験の結果(平均値)

試験ケースを表2に示す。試験は、プライマー前あるいは吹付け前の浸水の有無に着目した。ここで、浸水は、水を入れたバットに供試体を浸水させその後引き上げて、表面をタオルで拭きとった。なお、Case3はタオルの代わりに表面の水滴をワイパーで払うにとどめた。

図1に建研式接着力試験の結果を示す。図中には、マニュアル<sup>2)</sup>の基準値である1.5N/mm<sup>2</sup>をあわせて記載した。また、図2にピール試験の結果を示す。図中には、材料メーカー社内基準値である1.0N/mmを合わせて記載した。いずれの試験も、プライマー施工前の浸水ありのケース(Case2, Case3)は、浸水なし(Case1)やポリウレア施工前の浸水あり(Case4)と比較して、付着強さが低い傾向にあることがわかる。特に、ピール試験では、浸水による付着強さの低下の程度が大きい結果となっている。

2つの試験は付着強さを評価する試験である。そのため、破壊形態を確認することは、付着強さを正しく評価する上で重要となる。図3に破壊形態の面積割合を示す。建研式接着力試験では、浸水の有無に関わらず、母材破壊(A破壊)が主な破壊形態であった。ただし、図4に示すように同じ母材破壊であっても浸水の有無によって破壊厚さに違いがあることがわかった。一方で、

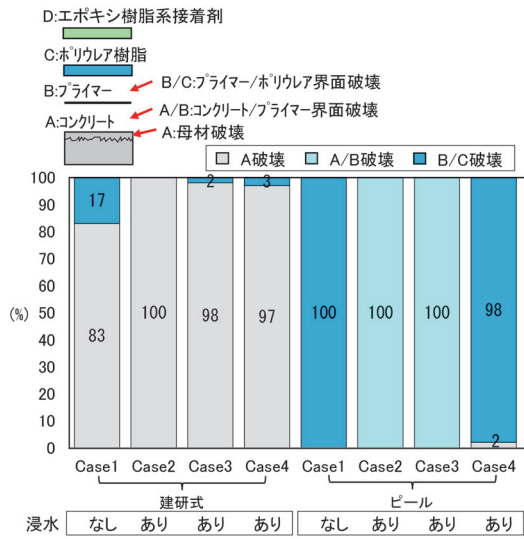


図3 破壊形態の面積割合

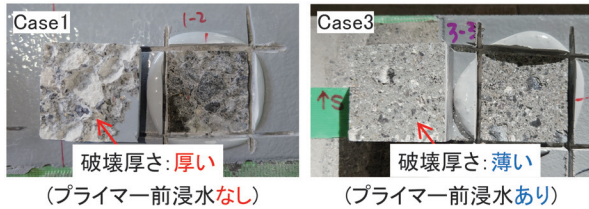


図4 浸水の有無による破壊状況の差 (建研式接着力試験)

ピール試験では、浸水なし (Case1) でプライマー/ポリウレア樹脂界面破壊 (B/C 破壊)、浸水あり (Case2~4) でコンクリート/プライマー界面破壊 (A/B 破壊) と、浸水の有無によって破壊形態が異なることがわかった。

ここで、建研式接着力試験の方がピール試験よりも母材に発生する引張応力が大きく、母材破壊の割合が高くなる傾向がある。一方ピール試験では、発生する引張応力が小さく、母材破壊をすることがなかったため、浸水による層間付着力の低下が付着強さに直接反映されているものと考えられる。

以上の結果に基づき、破壊挙動を図5のように考察した。プライマーによりコンクリート表面が改質される。また、表面に水分があるとプライマーの浸透が阻害される。具体的には、浸水なしの場合、プライマーを塗布することでプライマーとコンクリートとの界面の付着強度や、コンクリートの強度が向上し、その結果、建研式接着力試験ではコンクリートの破壊深さが深くなり、ピール試験ではプライマー/ポリウレア界面破壊が生じたものと考察した。一方、浸水ありの場合、プライマー塗布によるコンクリート表面の改質効果が小さく、建研式接着力試験では、コンクリートの破壊深さが浅くなり、ピール試験では、コンクリート/プライマー界面破壊となったものと考察した。表面に水分があることにより、プラ

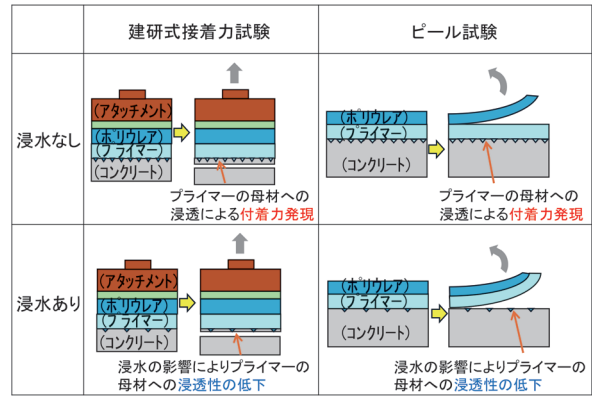


図5 破壊形態の差

表3 試験ケース

No.	漏水		下地処理 (参考)
	2016年 施工時	2023年 試験時	
Case1	あり	あり	ウォータージェット
Case2			ディスクサンダー
Case3			ブラシ
Case4 <sup>※</sup>	なし	なし	ウォータージェット
Case5 <sup>※</sup>			ディスクサンダー
Case6 <sup>※</sup>			ブラシ

※ 参考

イマーの浸透が阻害される理由としては、プライマーの表面に白化やアミンブラッシング等による硬化不良層が形成されたことやプライマーのコンクリート表層部への浸透性が低下したことが考えられる。

以上のことから、施工時の漏水により、覆工表面の含水率が高い状態である場合、ポリウレア樹脂の付着力に大きな影響を与えるため、施工前に仮止水や覆工表面を乾かすことが必須であると考えられる。また、ピール試験による付着強さの評価は、建研式接着力試験よりも、水の影響による付着強さの低下傾向を把握できる可能性がある試験と考えられる。

#### 4. 施工後の覆工背面からの漏水が付着力に及ぼす影響の検討

本章では、施工後の漏水環境が、ポリウレア樹脂吹付けの付着力に与える影響を確認するため、施工より7年が経過後の付着強さ試験を実施した結果を示す。試験は、建研式接着力試験およびピール試験を実施した<sup>4)</sup>。

試験箇所は、本州日本海側の寒冷地に位置する廃止線の単線トンネルであり、2016年に、ポリウレア樹脂吹付け工法の試験施工を行っている<sup>5)</sup>。

表3に試験ケースを示す。計6ケースの付着強さ試験を実施した。Case1~3は施工時にしみ程度の漏水が



図6 止水モルタルによる仮止水の施工状況

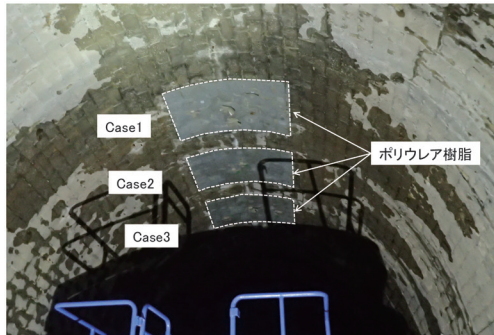


図7 7年経過試験時の覆工状況 (Case1~3)

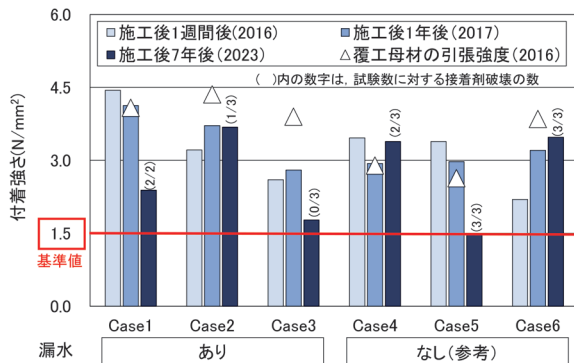


図8 建研式接着力試験の結果

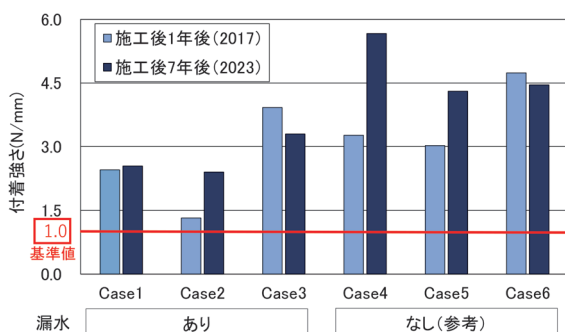


図9 ピール試験の結果

あった箇所での試験結果, Case4~6は施工時に漏水がなかった箇所での試験結果で, 参考として併せて示した。

図6に施工時に漏水があった箇所に対しての仮止水の施工状況を示す。また, 図7は, Case1~3の, 7年

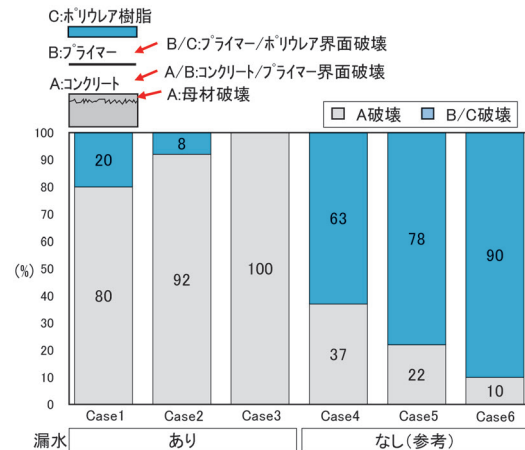


図10 破壊形態の面積割合 (ピール試験)

経過確認試験時の覆工状況で, 広い範囲が漏水によって湿潤状態となっており, 施工後に漏水が樹脂と母材との間に回り込んでいる可能性が想定される状況であった。

図8に建研式接着力試験の試験結果を示す。なお, 図中の三角は, 2016年に施工範囲内の覆工母材に対して, 建研式接着力試験を実施した結果であり,  $2.63 \sim 4.35 \text{ N/mm}^2$ であった。また, 図中には施工1週間後, 施工1年後の試験の結果も併せて示す。施工1週間後, 施工1年後試験の結果を勘案すると, 施工箇所のコンクリートブロックの状態に起因すると推察されるばらつきの影響が大きいが, いずれのケースにおいても, マニュアル<sup>2)</sup>の接着強さの合格基準値である試験の平均値  $1.5 \text{ N/mm}^2$ を上回った。また, 漏水の有無や下地処理の違いがあっても合格基準値を上回った。なお, 施工後7年経過時の試験については, 試験器側の治具とポリウレタ樹脂を接着する接着剤との間での破壊が半数以上を占めた。これは試験当日が多湿であり, 覆工表面が結露により湿潤状態となっていたことから, 水分の影響を受け接着剤が硬化不良を起こしたものと考えられる。よって, 施工後7年経過時の試験結果については, ポリウレタ樹脂の付着強さとしては, より大きい可能性がある。

図9にピール試験の試験結果を示す。いずれのケースにおいても, 漏水の有無や下地処理の違いによらず, 材料メーカー社内基準値である付着強さ  $1.0 \text{ N/mm}$ を上回った。漏水の有無に着目すると, 全体的にピール試験の付着強さは, 漏水ありのケースが漏水なしのケースと比べて小さくなっているが, 経時変化による傾向の差はみられなかった。

漏水の有無で付着強さに差が見られたピール試験について, 図10に破壊形態の面積割合を示す。3章の室内試験<sup>3)</sup>では, 図3に示したように, プライマー施工前の浸水の影響によって, 破壊形態がコンクリート/プライマー界面破壊 (A/B破壊) となった一方で, 本試験では

7年経過時も、コンクリート/プライマー界面破壊（A/B破壊）が認められなかった。これは、プライマー施工前に覆工表面を乾かすことが、プライマーのコンクリート表層部への浸透性を向上させ、コンクリート/プライマー界面の付着を強くすることの意義を示す結果であり、3章の室内試験と整合が取れた結果となった。

## 5. 漏水箇所が点在するトンネルにおける施工および適用条件

3章および4章の試験結果から、漏水によるプライマー施工時の表面含水は、ポリウレア樹脂の付着力に大きな影響を与えるため、プライマー施工前に覆工表面を乾かすことが必須であることが分かった。また、施工時に乾かすことができているならば、その後に樹脂の背面から漏水が発生した場合でも、長期間にわたって付着強さが大きく低下することはないことが分かった。

本章では、以上の知見を踏まえて実トンネルにポリウレア樹脂吹付け工法を適用し、プライマー施工前の止水・導水方法、漏水パターン毎の適用可否について、実施工の中で整理した事例<sup>4)</sup>を示す。

施工対象のトンネルは、山間部に位置する施工時において経年96年の単線非電化トンネルで、コンクリートブロック積みの覆工である。粗骨材の剥落対策として、透明タイプのポリウレア樹脂吹付け工法<sup>6)</sup>をアーチ部の142m<sup>2</sup>に対して適用する計画であったが、変状展開図より、施工範囲内に漏水箇所が多数認められることが分かっていた。

漏水の程度は、主観的な評価となりやすいことから、想定される漏水を発生源、発生源の範囲、量によってパターン分けした上で適用可否判断をフロー化することとした。ウォータージェットによる下地処理後の現地調査の結果、図11の赤枠に示す分類の漏水パターンが確認され、漏水箇所（図12）は合計104箇所確認された。なお、いずれの漏水においても発生源が特定できる状況であった。

覆工表面を漏水の無い状態に保つのに当たっては、従前の止水モルタルによる仮止水を行った場合、水みちの変化により隣接箇所から再度漏水が発生することが予想されたため、導水パイプを設置し、レールへの滴下がないように配慮した上で、道床上へ滴下させる方法考えた。導水パイプの施工順序は、[1]漏水発生源の削孔、[2]導水パイプの挿入、[3]止水モルタルの塗布の3工程（図13）である。

施工数量142m<sup>2</sup>に対して、ウォータージェットによる下地処理で6日間、止水および導水に5日、プライマー塗布に4日間、ポリウレア樹脂吹付けに4日間の計19日で施工した。作業時間は夜間間合の6時間程度

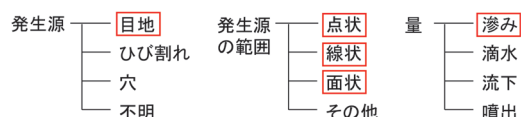


図11 漏水パターン

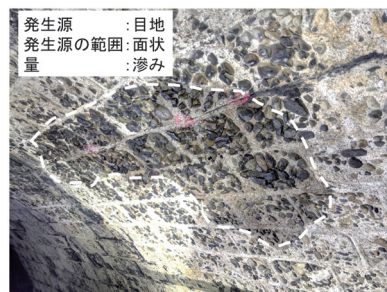


図12 漏水の例

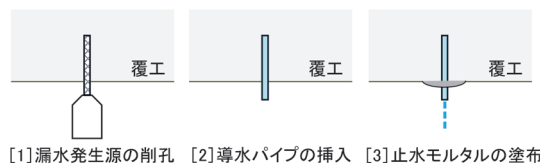


図13 導水パイプの施工順序

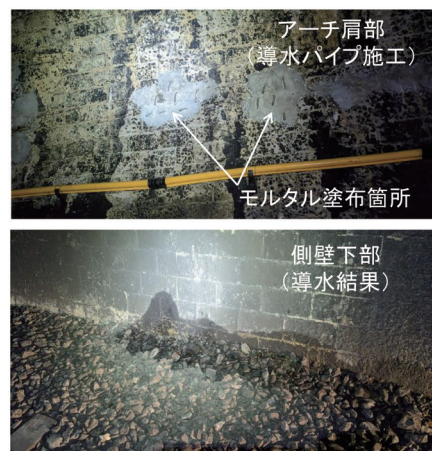


図14 導水の例（クラウン部を除くアーチ部）

であった。

施工の結果、漏水の発生位置によって、導水パイプの効果に差が見られた。図14にクラウン部を除くアーチ部の導水状況の例を示す。道床へと直接導水ができており、覆工表面は乾いていることがわかる。図15にクラウン部付近の導水状況を示す。導水パイプを施工した箇所は、導水が不十分で止水モルタルが湿潤状態となっていることがわかる。これは、クラウン部では覆工背面の勾配が緩く覆工背面に地下水が滞水しやすく、目地を通して覆工内空側へ浸入しやすいためと考えられる。ただし、湿潤範囲は、止水モルタル内に概ね収まっていたこ

とから、湿潤範囲の縮小という観点では十分な効果があるといえ、施工可能な面積を拡大させるうえで、導水パイプを施工することが有効な手段の一つとなりえると考えられる。

図16に施工後の覆工表面の状況を示す。現地調査時に、漏水が認められた箇所も含めて、広範囲で連続的に施工できたことがわかる。また透明タイプの施工により、母材の粗骨材部、目地部等が十分に判別できる程度の視認性を有しており、今後も検査時に覆工状態の確認が十分に可能である。

建研式接着力試験による付着強さは、本坑と同様の材質である待避坑にて実施し、平均値 1.7N/mm<sup>2</sup> かつ最低

値 1.2N/mm<sup>2</sup> であり、マニュアル<sup>2)</sup>の接着強さの合格基準値である試験の平均値 1.5N/mm<sup>2</sup> かつ試験の最低値 1.2N/mm<sup>2</sup> を上回った<sup>7)</sup>。

図17は、実施工の中で得られた結果を、漏水箇所の適用可否判断フローとしてまとめたものである。具体的には、事前調査にて漏水の程度により現地状況を分類し、フローに則り、仮止水または導水パイプを施工することで、施工範囲を決定していくものである。なお、本フローは、ブロック積み造のトンネルを想定したものである。

## 6. 表面凹凸が付着力に及ぼす影響の検討

本章では、表面凹凸の有無に着目した押し抜き試験<sup>8)</sup>を概説する。

押し抜き試験は、図18に示す荷重試験装置で実施した。荷重は、1mm/minの速度でコア部のコンクリートが破壊するまで行い、その後5mm/min荷重し、5、10、20、30mmの各変位において荷重を一時中止して剥落範囲を試験体にマーキングした。

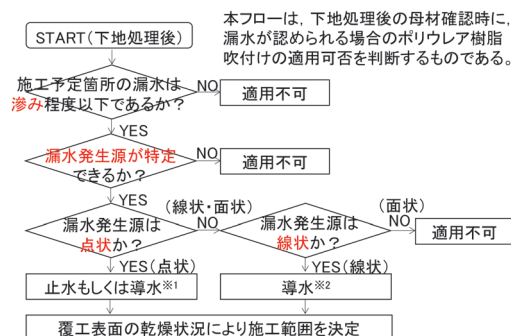
試験ケースは凹凸の有無に着目して、表4のように設定した。なお、Case2、3はピックアップハンマーにより表面に凹凸を施した。Case2ではコンクリート表面より深さ1~2mm程度の凹みを、Case3(図19)では深さ5~8mm程度の凹みを10cm四方に10箇所程度施した。



図15 導水の例(クラウン部)



図16 施工後の覆工表面の状況



※1: 止水モルタルによる止水を基本として、適宜導水パイプによる導水を実施する。  
 ※2: クラウン部を除くアーチ部は止水モルタルと導水パイプによる点導水とし、クラウン部は線導水とする。

図17 漏水箇所の適用可否判断フロー

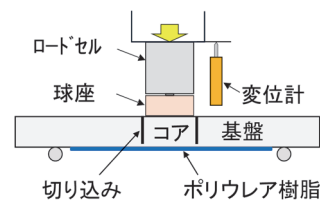


図18 荷重試験装置

表4 試験ケース

No.	表面状態
Case1	凹凸なし
Case2	凹凸小
Case3	凹凸大



図19 凹凸の作成状況 (Case3)

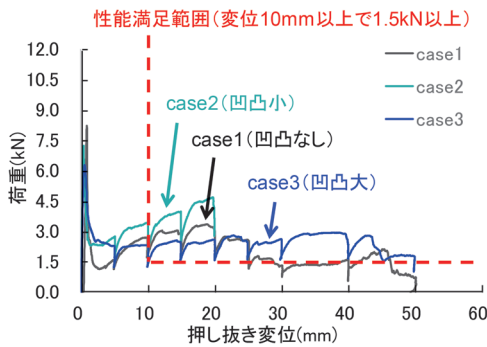


図 20 荷重変位曲線

図 20 に Case1～3 を比較した荷重～変位曲線を示す。全てのケースにおいて、NEXCO の基準値に準じた性能満足範囲（変位 10mm 以上で 1.5kN 以上<sup>9)</sup>）を満たした結果であることがわかる。最大荷重は Case3（凹凸大）<Case1（標準）<Case2（凹凸小）となっている。Case2（凹凸小）は、Case1（標準）と比べて最大荷重が増加したが、凹凸の存在により、塗膜が表面にしっかり食いつき見かけの付着力が向上することのほか、付着面積自体も増加したことが理由として考えられる。一方で、Case3（凹凸大）の破壊形態は、Case2（凹凸小）と同様に破断モードであったものの、Case1（標準）と比べて最大荷重が低下した。これは、大きな凹凸の存在により、吹付け厚のバラつきが大きき<sup>8)</sup>、局所的な薄膜部ができこで破断したことが理由として考えられる。よって、凹凸箇所においては、吹付け厚の設計値を確保できれば、十分な耐荷力を確保できるため、厚吹きや増し吹きが重要であると考えられる。

## 7. 表面凹凸が連続するトンネルにおける施工および適用条件

6 章では、表面凹凸が生じている覆工へポリウレア樹脂吹付け工法を適用する際には、厚吹きや増し吹きにより所定の吹付け厚を確保することで、必要な耐荷力を確保できることがわかった。本章では、6 章の知見を踏まえてポリウレア樹脂吹付け工法を適用し、実施工の中で適用範囲の拡大に向けた整理を行った事例を示す。

施工対象のトンネルは、山間部に位置する施工時において経年 87 年のトンネルで、場所打ち無筋コンクリート造の覆工である。粗骨材の剥落対策として、ポリウレア樹脂吹付け工法を側壁部の 15m<sup>2</sup> に対して適用する計画であった。下地処理後の調査の結果、粗骨材が露出し、10～20mm 程度の凹凸がトンネル延長方向に連続している状況であった（図 21）。

ポリウレア樹脂吹付け工法は、樹脂の付着力に依存する工法であるため、現状のマニュアル<sup>2)</sup>では、剥落想定



図 21 凹凸の状況

表 5 付着力を期待する範囲の管理の目安<sup>2)</sup>に加筆

確認項目	合格基準
母材の健全度	骨材のゆるみ・浮きがないこと ※ 粗骨材が露出して浮きを生じていることがないこと
母材の圧縮強度	設計基準強度以上
母材の引張強度	平均値 1.5N/mm <sup>2</sup> 以上 かつ最小値 10 <sup>2</sup> N/mm <sup>2</sup> 以上

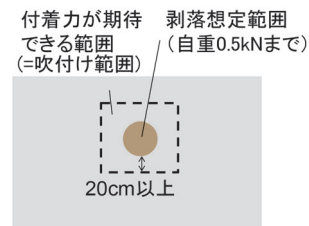


図 22 マニュアル上の適用条件<sup>2)</sup>

範囲の重量は 0.5kN までとし、この周り全周に付着力が期待できる範囲（表 5）が存在することが必要であるとしており、さらに剥落想定範囲の外周に 20cm 以上の定着長を確保することとしている（図 22）。そのため、今回の施工条件は、マニュアルでは想定していないものであった。しかしながら、漏水が認められなかったことや下地処理により脆弱な部分が除去できたこと、また凹凸の程度よりプライマー塗布、ポリウレア樹脂吹付けに留意することで、施工可能と判断した。

施工数量 15m<sup>2</sup> に対して、下地処理、プライマー塗布、ポリウレア樹脂吹付けがそれぞれ 1 日の計 3 日で施工した。なお実作業時間は、列車が走行しない夜間で各日 3 時間程度であった。図 23 にプライマーの塗布状況を示す。プライマーは、ローラーを基本としたが、刷毛を併用し、凹凸部の表面を全面的に塗布した。なお、プライマー使用量は、凹凸部の表面積の増加により、標準使用量の 2.1 倍となった。

図 24 にポリウレア樹脂吹付け後の覆工状況を示す。ポリウレア樹脂は、凹凸により吹付け厚の管理が難しいと考えられたことから、厚吹きで対応した。なお、ポリウレア樹脂の使用量は、標準使用量の 1.9 倍であった。



図 23 プライマー塗布状況



図 24 ポリウレア樹脂吹付け後の覆工状況

施工の結果、骨材の表面が樹脂で覆われており、隣接する骨材同士が架橋できていることを確認した。施工後の建研式接着力試験による付着強さは、全体の総平均は  $1.9\text{N}/\text{mm}^2$  かつ最小値  $1.2\text{N}/\text{mm}^2$  以上であり、マニュアル<sup>2)</sup>の接着強さの合格基準値である試験の平均値  $1.5\text{N}/\text{mm}^2$  かつ試験の最低値  $1.2\text{N}/\text{mm}^2$  を上回った。対象とする覆工から想定される剥落物は粗骨材程度であり、想定剥落荷重がマニュアルで想定している  $0.5\text{kN}$  (図 22) と比較して十分小さいため、実施工の結果を踏まえ、次のように適用条件の整理を行った。

想定剥落範囲が大面積で付着力が期待できる範囲を  $20\text{cm}$  確保できないものの、想定剥落荷重が小さい場合、以下の [1] ~ [3] の条件を満たすことで適用可能と整理した。

- [1] 想定される剥落片の大きさは粗骨材程度であり、大きなコンクリート塊が落下する懸念がないこと。
- [2] 事前に下地処理によって脆弱部を十分除去して、容易に覆工表面が剥離しないこと。
- [3] 覆工に鋼材等の剥落を助長する腐食・膨張する材料が含まれていないこと。

## 8. まとめ

ポリウレア樹脂吹付け工法に着目して、室内試験や、過去に実施した試験施工箇所における現地試験、供用中の漏水が点在するトンネルおよび凹凸が連続するトンネルでの実施工を通じて、適用条件の整理を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 施工時の漏水が付着力に及ぼす影響
  - ・施工時の漏水により、覆工表面の含水率が高い状態

である場合、ポリウレア樹脂の付着力に大きな影響を与えることがわかった。よって、施工前に覆工表面を乾かすことが必須である。

- ・ピール試験による付着強さの評価は、浸水の有無による破壊形態の影響が出なかった建研式接着力試験と比較して、水の影響による付着強さの低下傾向を把握できる可能性がある試験と考えられる。
- (2) 施工後の覆工背面からの漏水が付着力に及ぼす影響
  - ・施工より 7 年経過後の付着力試験を行った。その結果、経時的な付着強さの低下傾向は見られなかった。
- (3) 漏水箇所が点在するトンネルにおける施工および適用条件
  - ・プライマー施工前に導水パイプを施工することで、覆工表面を漏水の無い状態に保つことが可能である。
  - ・主観的な評価になりやすい漏水に対して、状況をパターン分けすることで、ポリウレア樹脂吹付け工法の適用可否を判断するフローを実施工の中で整理した。
- (4) 表面凹凸が付着力に及ぼす影響の検討
  - ・凹凸が大きい箇所であっても、吹付け厚の設計値を確保できれば、十分な耐荷力を確保できた。このような箇所では厚吹きや増し吹きが重要である。
- (5) 表面凹凸が連続するトンネルにおける施工および適用条件
  - ・樹脂の厚吹きによって、本工法が適用可能である。
  - ・想定剥落範囲が大面積で付着力が期待できる範囲を  $20\text{cm}$  確保できないものの想定剥落荷重が小さい場合の適用条件を、実施工の中で整理した。

## 文献

- 1) 伊藤直樹, 野城一栄, 輿石正己, 井出一直: ポリウレア樹脂を用いた吹付け型剥落対策工の開発, 土木学会全国大会第 71 回年次学術講演会, 2016
- 2) 土木学会: ポリウレア樹脂を用いたコンクリート構造物の機能保持・向上技術 (タフネスコート工法) に関する技術評価 報告書, IV タフネスコート工法 設計・施工マニュアル 同解説, 2021
- 3) 鈴木雅之, 嶋本敬介, 木下果穂, 野城一栄: 施工時の各種要因がポリウレア樹脂吹付けの付着強度に与える影響に関する検討, トンネル工学論文集, Vol.33, I-33, 2023
- 4) 大江敦哉, 牛田智也, 嶋本敬介, 野城一栄, 宮田佳和, 井出一直, 笹岡良治: トンネル漏水箇所へのポリウレア樹脂吹付け工法の適用性, 令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会, 2024
- 5) 野城一栄, 嶋本敬介, 鎌田和孝, 込山実: ポリウレア樹脂を用いたトンネル覆工の剥落防止対策の現地試験施工, 土木学会第 72 回年次学術講演会, 2017
- 6) 久保昌史, 宮田佳和, 井出一直: 下地コンクリートの状態

- を視認できるポリウレア樹脂吹付け工法の開発, 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会, 2022
- 7) 村田和哉, 多川浩二, 久保昌史, 宮田佳和, 大江敦哉, 笹岡良治, 井出一直: 鉄道トンネルにおける透明ポリウレア樹脂吹付け工法によるはく落防止対策, 令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会, 2024
- 8) 板谷創平, 野城一栄, 嶋本敬介: 剥落対策工としてのポリウレア樹脂の性能評価, 土木学会第72回年次学術講演会, 2017
- 9) 東日本高速道路, 中日本高速道路, 西日本高速道路: 構造物施工管理要領, pp.2-322, 2013