

ポリウレア樹脂吹付けによるトンネル覆工剥落対策工法

野城 一栄* 嶋本 敬介* 板谷 創平* 木下 果穂*

Spalling Prevention Method for Tunnel Lining Using Polyurea Resin

Kazuhide YASHIRO Keisuke SHIMAMOTO Sohei ITAYA Kaho KINOSHITA

This paper explains the applicability of polyurea resin as a spalling prevention method from tunnel lining. Model tests and trial executions have been carried out. According to the model tests using a model tunnel, with polyurea resin, spalling does not occur because the polyurea resin covers exfoliated concrete. According to the trial executions, the time required for spraying polyurea resin is shorter than that of the surface preparation or the primer coating. By the pull-off adhesion testing, it is confirmed that the adhesive strength of the polyurea resin is sufficient even after the experience of cold winter.

キーワード：山岳トンネル，剥落対策，ポリウレア樹脂

1. はじめに

鉄道トンネルの維持管理上，剥落事故は列車の安全運行を脅かす事象であり，適切な検査と措置により未然に防がなければならない。1999年に相次いで発生した3件の鉄道トンネルにおける規模の大きな剥落事故を契機として鉄道トンネルの剥落に対する検査体系が見直され，これ以降列車の安全な運行を脅かす規模の大きな剥落事故は発生していないが，規模の小さな剥落は近年でも引き続き発生しており，対策が求められている¹⁾。

筆者らは，ポリウレア樹脂を覆工表面に吹き付けて，樹脂の膜を覆工表面に設ける剥落対策工法を開発した。ポリウレア樹脂とは，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化合物であり，引張強度が 24N/mm^2 程度と大きい一方で200%以上の優れた伸び性能を有する。施工は，表面の下地処理後，プライマーとしてエポキシ系の樹脂を塗布し，その上に2液型のポリウレア樹脂をスプレー機により吹付けることにより行う。多少の不陸や数mm幅以下のひび割れであれば施工可能であるとともに施工速度も繊維シート接着工法と比較して速いという特徴を持っている。

本論文では，本工法について，建研式接着力試験，トンネル覆工模型載荷実験，試験施工を通じて，剥落防止性能や施工性を確認した結果について示す²⁾。

2. 付着性能の評価

本章では，ポリウレア樹脂の付着性能を建研式接着力試験により評価した結果について示す。

2.1 試験方法

付着力は建研式接着力試験により確認した。試験ケースを表1に示す。材料には鉄道トンネルで多く用いられているコンクリートおよびれんがを用いた。なお，比較のため，アラミド繊維シート接着工法も併せて試験した。

ポリウレア樹脂，アラミド繊維シートそれぞれに対し，ディスクサンダーによる下地処理の後，プライマーを吹き塗りした後で吹付け，または含浸接着を実施した。

試験内容の「湿潤状態」は，供試体を24時間水中に浸漬し，水中から取り出した後に表面をウェスで拭いてプライマーを施工したもので，表面含水率が高い状態で施工した場合を想定したものである。「温冷繰返し」については，基準³⁾の「トンネル剥落防止用繊維シート接着工の温冷繰返し接着強さ試験法」を参考に，

- ① -20°C で3時間保持
- ② 50°C に1時間掛けて加温
- ③ 50°C で3時間保持
- ④ 23°C に1時間かけて冷却
- ⑤ 23°C で15時間保持
- ⑥ -20°C に1時間かけて冷却

という24時間サイクルを30回繰返し，寒冷地での覆工背面からの漏水が凍結した場合の性能の変化を確認した。なお，れんがのケースでは，目地を挟まず，レンガ母材部分のみの $40\text{mm} \times 40\text{mm}$ の領域を試験範囲とした。

表1 試験ケース

番号	供試体	試験内容
Case1	コンクリート	乾燥状態
Case2	コンクリート	湿潤状態
Case3	コンクリート	湿潤状態，温冷繰返し
Case4	れんが	乾燥状態
Case5	れんが	湿潤状態，温冷繰返し

* 構造物技術研究部 トンネル研究室

2.2 試験結果

試験結果を図1に示す。なお、試験は1ケースあたり3回実施しており、同図は3回の平均値である。図1より、全てのケースにおいて文献⁴⁾において定められている付着強度の基準値 1.5 N/mm^2 を上回り、ポリウレア樹脂が要求される耐荷性能を有していることが確認できた。

施工時の表面含水率の影響について、Case1（コンクリート・乾燥）とCase2（コンクリート・湿潤）を比較すると、ポリウレア樹脂もアラミド繊維シートも、湿潤状態での施工を想定したCase2のほうが付着強度が小さく、表面含水率の影響が見られた。一方、施工後の温冷繰り返しの影響については、Case2とCase3（コンクリート・温冷繰り返し）の比較において、明確な傾向は見られなかった。また、Case1とCase3, Case4（れんが・乾燥）とCase5（れんが・温冷繰り返し）を比較すると、少なくとも、ポリウレア樹脂の方がアラミド繊維シートと比べて大きな影響を受けるという傾向は見られなかった。なお、施工後の温冷繰り返しの影響については、温冷繰り返し回数や実験数がまだ十分でないため、今後さらに環境条件の厳しい試験等を多数回実施するなどして、慎重に判断する必要がある。

なお、Case1とCase4, Case3とCase5を比較すると、アラミド繊維シートでは、れんが供試体の付着強度はコンクリート供試体と比べ小さいが、ポリウレア樹脂では、れんが供試体の付着強度はコンクリート供試体と比べ、同程度あるいは大きい傾向にある。これは、れんがは表面の凹凸が多く、ポリウレア樹脂が吹付け施工により表面の凹凸に食い込み、母材～ポリウレア樹脂間の機械的な摩擦が大きくなったことによるものと考えられる。

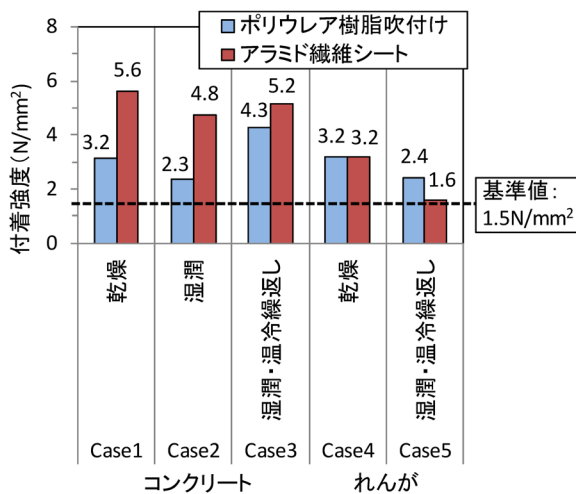


図1 建研式接着力試験の結果

3. 剥落防止性能の評価

次に、ポリウレア樹脂について、剥落防止性能をアーチ形状の模型トンネルの載荷実験により評価した。

3.1 実験方法

実験は大型トンネル覆工模型実験装置⁵⁾ (図2)により実施した。上記装置は、反力フレーム、載荷用油圧ジャッキ、油圧シリンダから構成されている。覆工模型は、内径1.85m、巻厚15cm)であり、新幹線トンネル(内径9.6m、巻厚70cm)の約1/5の縮尺となっている。覆工模型の周囲には地盤を模擬した油圧シリンダ付きの皿ばねが配置されており、覆工模型の皿ばね方向の変位に対して変位量に応じた反力を覆工に与える仕組みとなっており、覆工と地盤の相互作用を模擬することができる。実験装置の仕様を表2に示す。

実験ケースはコールドジョイント(以下、CJ)と剥落対策工の種類に着目して表3のように設定した。ポリウレア樹脂に加えて、比較のためにアラミド繊維シートも試験した。また、ポリウレア樹脂は吹付けパターンとして全面吹付けの他に千鳥配置を設定した。剥落対策工は、トンネル覆工内面のスプリングライン(以下、SL)以上の範囲に施工した。なお、ポリウレア樹脂の吹付け厚は1.4mmである。

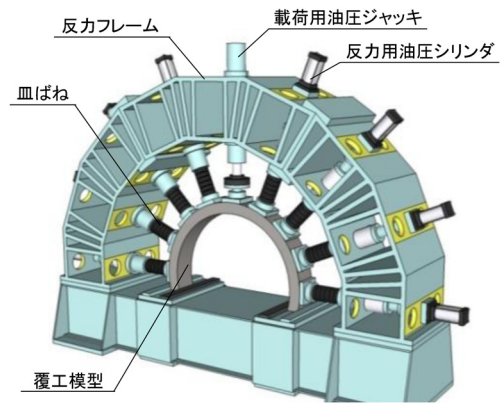


図2 模型実験装置の概要

表2 覆工模型実験装置の仕様

構成部材	項目	諸元
載荷用油圧ジャッキ	最大載荷重	500kN
	最大載荷圧	5.6MPa
	ストローク	250mm
油圧シリンダ	寸法	内径φ125mm
	ストローク	200mm
皿ばね	ばね係数	3,000kN/m
	地盤反力係数	16MN/m ³ (洪積層程度)

表3 大型トンネル覆工模型実験ケース

	略称	CJ	剥落対策工
Case1	無対策/CJなし	なし	なし
Case2	PU(ポリウレア)	なし	ポリウレア樹脂
Case3	アラミド	なし	アラミド繊維シート
Case4	CJあり	あり	なし
Case5	CJ+PU	あり	ポリウレア樹脂
Case6	CJ+PU千鳥	あり	ポリウレア千鳥配置

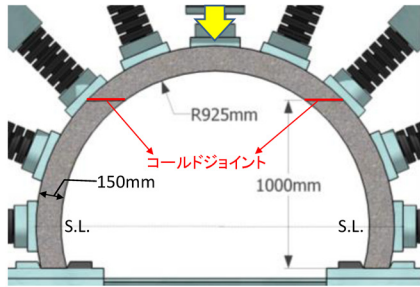


図3 模型寸法とコールドジョイントの位置

Case3は剥落対策工としてアラミド繊維シートを用いたケースである。アラミド繊維シートは1方向シートとし、目付け量は標準的に使われる623g/m²の1/5相当の125g/m²とした。Case4～Case6はCJを設けたケースである。CJの位置はトンネル模型脚部から1mの高さとした(図3)。CJは肩部載荷板の中心の位置にあり、かつ覆工内面で圧が発生する位置に近く、CJの存在による影響が大きくなる位置となっている。Case6は樹脂を千鳥配置としたケースである。千鳥配置は、樹脂を寸法100mm×500mmの矩形状として、相互の離隔を50mmとして、図4に示すように配置したものである。

千鳥配置とすることにより、樹脂間の目地部より覆工の状況を継続して観察できる、また、トンネル背面地山からの漏水を速やかに内空に排出することができ、吹付け後の樹脂に地山側から水圧がかかることを防止するというメリットがある。なお、千鳥配置の作製は、覆工表面にバッカーと呼ばれるマスキング材を配置し、ポリウレア樹脂を吹付けた後にこれを取り外すことによって行った。

3.2 実験結果

3.2.1 剥落対策工の材料の違い (Case1～3)

まず、剥落対策工の材料の違いに着目する。図5に荷重～変位曲線を、図6にCase1(無対策)、Case2(ポリウレア樹脂:PU)の載荷変位 $\delta = 60\text{mm}$ 時、Case3(アラミド)の $\delta = 40\text{mm}$ 時の覆工模型の変状状況を示す。

図5より、Case1(無対策)とCase2(PU)は $\delta = 2\text{mm}$ 前後でひび割れが発生し荷重が一時的に低下した。Case1では、肩部で大きな圧が発生(図6a)し、 $\delta = 50\text{mm}$ 以降、荷重が低下した。一方、Case2(PU)は $\delta = 50\text{mm}$ 以降も荷重低下を生じず、トンネルとして

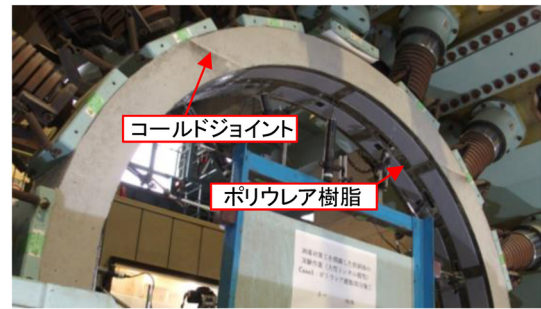


図4 ポリウレア樹脂の千鳥配置状況

の靱性を向上させる効果が見られた。Case2では肩部の圧さ・剥離をポリウレア樹脂が抑制することで圧さ部の覆工コンクリートが有効巻厚として機能し続けたためと考えられる。

Case3(アラミド)では、 $\delta = 2\text{mm}$ 前後でひび割れが発生し荷重が一時的に低下したものの、荷重の大きな低下は生じなかった。アラミド繊維は、弾性係数が大きいことから、コンクリートにひび割れが発生した後は複合材料として引張応力を負担することにより、ひびわれ部の回転剛性の低下を抑制し、荷重の低下を抑制したものと考えられる。一方で、Case3では $\delta = 22\text{mm}$ 以降荷重が低下した。これは、天端部でせん断破壊が発生したことによる(図6c)。Case3では、天端部で曲げ補強を行った一方で、せん断補強は行っていないため、荷重が増加した際に天端部で押し抜きせん断破壊を生じたものと考えられる。

3.2.2 CJの影響と吹付けパターンの違い(Case4～6)

図7に荷重～変位曲線を、図8に $\delta = 40\text{mm}$ 時の覆工模型のコールドジョイント部の状況を示す。Case1(CJなし)とCase4(CJあり)を比較すると、Case4は $\delta = 27\text{mm}$ 程度から荷重が低下した。一方でCase1では $\delta = 48\text{mm}$ 程度まで荷重の低下はみられず、CJがあるトンネル覆工は耐荷性能が低くなる結果となった。しかし、CJのあるトンネルにおいてもCase5(CJ+PU)のように、全面的に樹脂吹付けを実施した場合には、荷重～変位曲線はCase1(CJなし)と同等に推移し、Case1よりもむしろ大きな変形まで荷重が低下しない結果となった。また、Case6(CJ+PU千鳥)においても、Case5よりも効果は低減するが、Case4よりも大きな変形まで荷重低下を抑制することができるという結果となった。これより、ポリウレア樹脂を内面に吹き付けると大変形時の荷重の低下を抑制できること、また、CJという構造欠陥がある場合にこの効果がより顕著に現れることがわかった。

Case4ではCJとひび割れが閉合して浮き(図8a)が生じ、 $\delta = 42\text{mm}$ 時に右肩で、 $\delta = 46\text{mm}$ 時に左肩で剥落した。一方でCase5、Case6ではポリウレア樹脂により、実験終了($\delta = 60\text{mm}$)まで剥落は生じなかった。

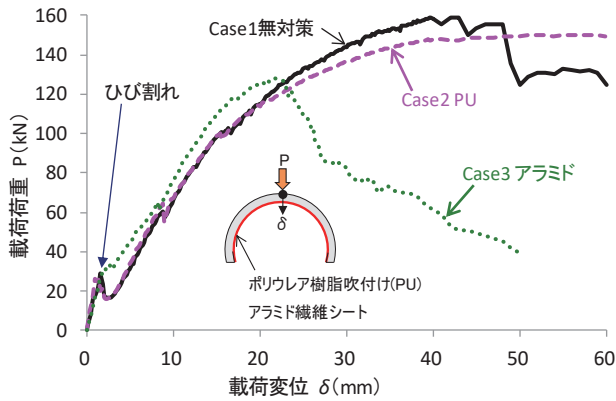


図5 荷重変位曲線 (Case1 ~ Case3)

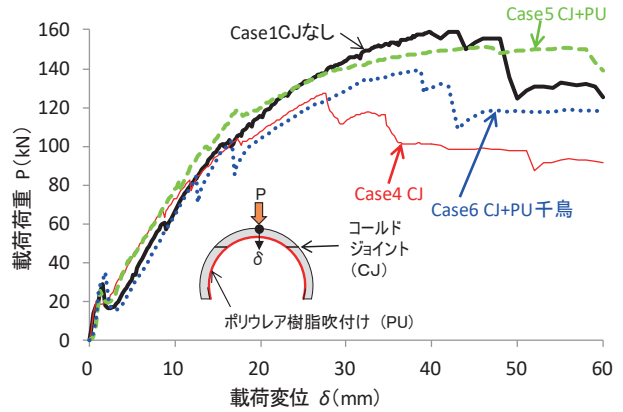
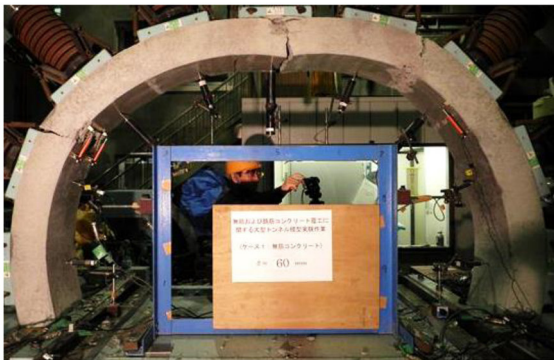
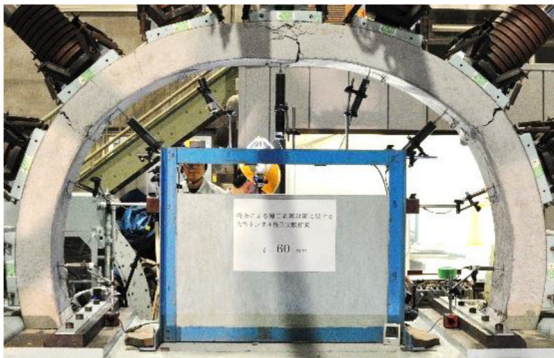


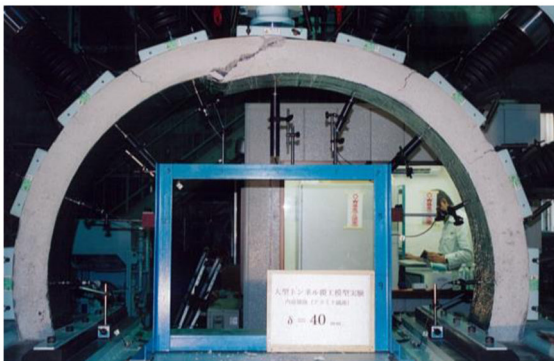
図7 荷重変位曲線 (Case1, Case4 ~ Case6)



a) Case1 無対策 ($\delta = 60\text{mm}$ 時)

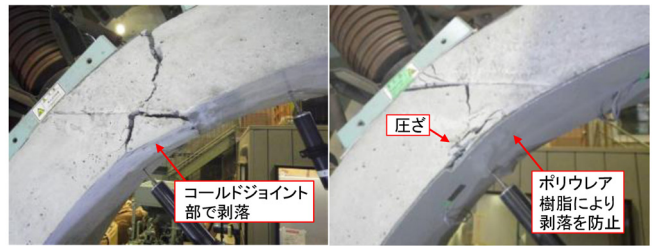


b) Case2 ポリウレア樹脂吹付け ($\delta = 60\text{mm}$ 時)



c) Case3 アラミド繊維シート ($\delta = 40\text{mm}$ 時)

図6 荷重時の覆工模型の変状状況



a) Case4 (CJ あり)

b) Case5 (CJ+PU)



c) Case6 (CJ+PU 千鳥)

図8 コールドジョイント部の状況 ($\delta = 40\text{mm}$ 時)

3.3 まとめ

大型覆工模型実験の結果、ポリウレア樹脂は、全面吹付け、千鳥配置のいずれの場合も、剥落を防止することができることがわかった。また、CJに起因する剥落も防止できることがわかった。

また、ポリウレア樹脂は、変形量の小さい範囲での荷重低下を防ぐ効果は見られなかったが、大変形時に、圧ざによる断面欠損を防止し、その結果として荷重低下を防ぐ効果があることがわかった。また、その効果は特に、CJがある場合に顕著であった。

4. 施工性と付着性能の評価

本章では、施工性と、漏水の有無や下地処理方法が付着強度に与える影響について、実際のトンネルにおける試験施工により評価した結果⁶⁾について述べる。

表4 試験ケース

	漏水	下地処理
Case1	なし	ウエス
Case2	なし	圧搾空気
Case3	なし	ディスクサンダー
Case4	あり	ウエス
Case5	あり	圧搾空気
Case6	あり	ディスクサンダー

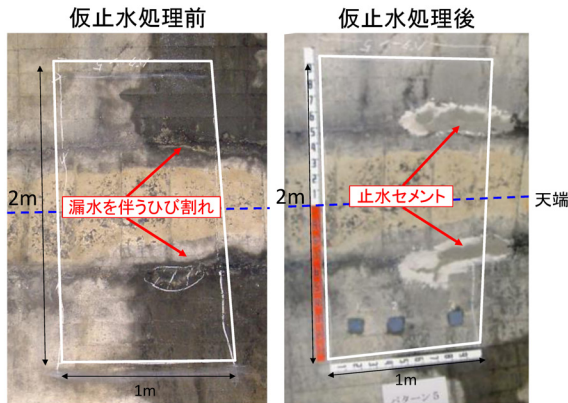


図9 仮止水前後の状況 (Case5)

4.1 試験概要

試験施工は、休止線となっている JR 北海道の在来線単線トンネル（内空幅約 4.8m、内空高さ約 5.4m、延長 187m）で実施した。覆工は場所打ちコンクリートで、ひび割れ等の変状はさほど見られないが、一部箇所ではひび割れから漏水が生じている。そこで、下地処理の違いの他に漏水の有無に着目し、表 4 に示す全 6 ケースの試験施工を実施した。施工範囲は、各ケース横 1m × 縦 2m とした。下地処理方法として、「ウエスによる乾拭き」「圧搾空気による清掃」「ディスクサンダーがけ」の 3 種類を設定した。その他、漏水ありのケースを設定した。Case4～Case6 では、図 9 に示すように、一時的に漏水箇所を止水セメントによる仮止水を実施した後に施工した。ポリウレタ樹脂施工時は覆工表面は乾燥しているが、止水は完全ではなく、後に漏水が発生することが想定され、樹脂施工後に水が回ってくる状況を模擬している。施工フローを図 10 に示す。施工完了 1 週間後、1 ヶ月後、5 ヶ月後、1 年後の計 4 回、建研式接着力試験により付着力を確認した。1 年後は、最低気温が -20℃ に達する冬を越した後の結果である。

4.2 試験結果

図 11 に施工状況写真、図 12 に施工完了後の状況を示す。施工完了後に実施したポリウレタ樹脂の目視検査で問題がなかったことから、閉鎖空間における施工は十分に可能と判断した。

サイクルタイムを図 13 に示す。サイクルタイムは、

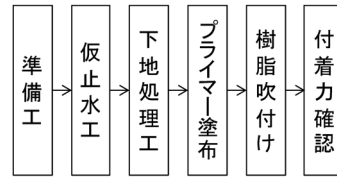


図 10 施工フロー



図 11 施工状況写真

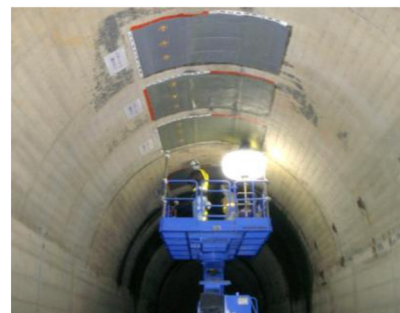


図 12 施工完了後の状況

高所作業車等の資機材が配置され、施工の準備が整った時点から施工完了までの所要時間を示しており、各作業において準備・片づけ・段取り替えや材料の養生時間は含んでいない。また、漏水ありのケースの仮止水に要した時間も含まれていない。3 種類の下地処理を比較すると、圧搾空気、ウエス、ディスクサンダーの順に施工の所要時間が長くなっている。樹脂吹付け自体の所要時間は 2 分であり、下地処理やプライマー塗布の時間よりも短時間で済んでいる。吹付けによる施工は、塗布系や貼り付け系の剥落対策工よりも施工時間が短く済むものと考えられ、供用中の鉄道トンネルの短い夜間間合いでの施工や、アーチ全体といった大面積を施工する場合には有利であると考えられる。

図 14 に施工完了後の建研式接着力試験により得られた付着強さを示す。これより、漏水の有無、下地処理の

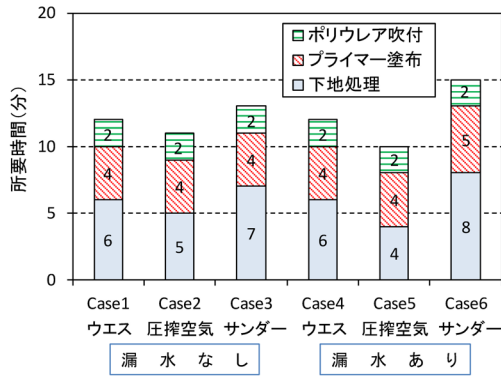


図 13 サイクルタイム (2m²あたり)

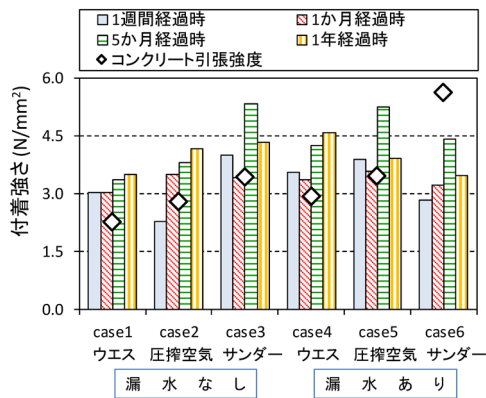


図 14 付着強さ

方法と付着強さは、明確な相関は見られなかった。また、付着強度の経時変化に関しては、現段階では時間の経過とともに付着強度が増す傾向にあるように見える。基本的には誤差の範囲内と考えると良いと思われるが、少なくとも、寒冷地で一冬を越しても、付着強度が顕著に低下するような現象は確認されなかった。なお、基準⁴⁾の付着強度の規定値 (1.5N/mm²以上) に対して、今回の付着強度は全て 1.5N/mm² 以上であり、所要の強度を満足した。図 14 に併せて母材コンクリートに対する建研式接着力試験により得られた、各ケースのコンクリート引張強度を白抜き菱形で示している。これより、コンクリートの引張強度は漏水の有無によらず 3N/mm² 前後であることがわかる。すなわち、付着強度の明確な低下は見られないことが確認できる。

5. 結論

本研究ではトンネル覆工の剥落対策工として、ポリウレア樹脂に着目し、ポリウレア樹脂を吹付けた場合の挙動を、建研式接着力試験、トンネル覆工模型載荷実験により評価した。さらに、寒さの厳しい北海道の鉄道単線トンネルにおいて下地処理の条件、漏水の有無をパラメータとして試験施工を実施し、ポリウレア樹脂の施工サイクル、付着強度の経時変化等を確認した。本研究により得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 建研式接着力試験の結果、ポリウレア樹脂は、所定の付着強度を有することがわかった。また、樹脂吹付け後に温冷繰返しを行ったが、付着強度の低下傾向は明瞭には見られなかった。
- 2) 大型覆工模型実験の結果、ポリウレア樹脂により、全面吹付け、千鳥配置のいずれの場合も、剥落を防止できることがわかった。また、ポリウレア樹脂により大変形時の荷重の低下を防止できることがわかった。特に、CJがある覆工にポリウレア樹脂を吹付けた場合、CJに起因する剥落や荷重低下を防ぐことがわかった。
- 3) 試験施工の結果、樹脂吹付け作業にかかる時間は短く、下地処理やプライマー塗布よりも短時間で済むことがわかった。また、付着強度を1週間後、1か月後、5か月後、1年後に試験した結果、いずれも基準を十分満足しており、一冬だけではあるものの、寒冷地の冬を越しても付着強度の明確な低下は見られないことを確認した。また、漏水の有無や下地処理方法が付着強度に与える影響は明瞭ではなかった。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みつつ、施工事例を増やしていきたい。

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た。

謝 辞

試験施工にあたり北海道旅客鉄道株式会社に多大なるご協力を頂いた。ここに深甚なる謝意を表す。

文 献

- 1) 岡野法之, 山中崇雅, 水谷真基: バサルト帯板を用いたトンネル覆工の補修工の概要と施工例, 日本鉄道施設協会誌, Vol.56, No.11, pp.739-742, 2018.11
- 2) 嶋木敬介, 野城 一栄, 川上義輝, 興石正己, 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, p. I_21-I_31, 2017
- 3) 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社: NEXCO 試験方法 第7編 トンネル関係試験方法, 2013.7
- 4) 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社: トンネル施工管理要領, 2014.7
- 5) 岡野法之, 小島芳之, 植村義幸: 大型覆工模型実験によるトンネル覆工の変形特性の再現, 第12回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 132, pp.909-914, 2008.9
- 6) 興石正己, 野城一栄, 井出一直: 構造物の機能保持技術 (タフネスコート) によるトンネル覆工の剥落防止効果, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.70, VI-324, 2015