

鉄道レンガトンネルへの繊維シート接着工法の適用実験について

An experiment about an application to brick lining of a fiber sheet for railway tunnels.

古宮一典¹⁾・奥村純市²⁾・石川真己³⁾・奥井裕三⁴⁾・太田裕之⁵⁾

Komiya Kazunori, Okumura jyunichi, Isikawa Masato, Okui Yuzo and Ohta Hiroyuki

¹⁾応用地質株式会社 中部支社 静岡支店 (〒442-8056 静岡市駿河区津島町13-28)

komiya-kazunori@oyonet.oyo.co.jp

²⁾元 JR東海 静岡土木技術センター (〒420-0851 静岡市葵区黒金町64番地)

³⁾元 JR東海 静岡土木技術センター (〒420-0851 静岡市葵区黒金町64番地)

⁴⁾正会員 工修 応用地質株式会社 東京本社 (〒331-8688 さいたま市北区土呂町2-61-5)

⁵⁾正会員 応用地質株式会社 技術本部 (〒331-8688 さいたま市北区土呂町2-61-5)

In this paper, an application to brick lining of a fiber sheet was investigated experimentally. Recently, the fiber sheet is often used in the tunnel as a prevention to spalling of concrete lining. But, there are few application examples to the brick lining of a fiber sheet.

There are much old tunnel built with brick in Tokaido line, Minobu line, etc. Many of tunnels completed with brick were built from about 1870 to 1930, and it has passed about 100 years. Among those, many spallings are occurring because of aging or the other reason. Until now, shotcrete or wire net have been used mainly as countermeasure against spalling, the higher measure of durability is required now. To apply to brick lining of a fiber sheet, it was needed to clarify methods for loading, the kind of fiber sheet, the pretreatment method, the adhesion method and these combination, etc.

Consequently, some of results about an application to brick lining of a fiber sheet were obtained.

Key Words : railway tunnel, , brick lining, field experiment, fiber sheet, peeling, spalling resistance

1. はじめに

近年、トンネル覆工のはく落事故が顕在化し、覆工材料の劣化による安全性が問われている。トンネル覆工のうち、コンクリート覆工については、繊維シート接着工法によるはく落対策が内空断面を縮小させない工法として一般化しつつある¹⁾²⁾。しかし、繊維シートのレンガ覆工への適用については、事例がほとんど無いのが現状である。

そこで、東海道本線にある明治時代に作られたトンネルのレンガ覆工を対象として、繊維シート接着工「直貼り」によるはく落対策工の実証実験を行った。

その結果、繊維シートの種類、下地処理方法、接着方法およびそれらの組み合わせについて、一定の知見を得たのでここに報告する。

2. 繊維シート接着工法の概要とレンガ覆工への適用上の問題点

(1) 工法の概要

繊維シート接着工法は、変状トンネルの補強対策や、はく落防対策として用いられる工法であり、接着樹脂を含浸させた繊維シートを変状箇所貼り付けるものである。

写真-1に今回の実証実験の際に繊維シートをレンガ面に接着した様子を示す。また、図-1に連続繊維シート接着工の一般的な断面構成を示す。

本工法は、素材が薄いことから内空断面余裕に制限があるコンクリート覆工のトンネルなどで多く使用されている。

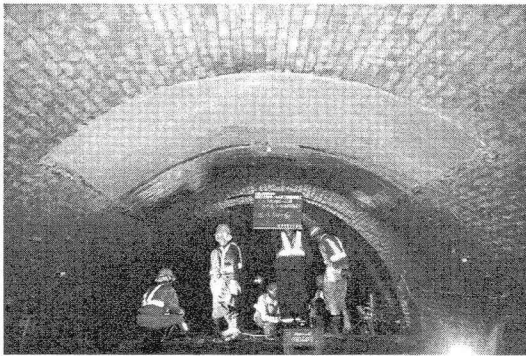


写真-1 繊維シート接着工法を施工した様子

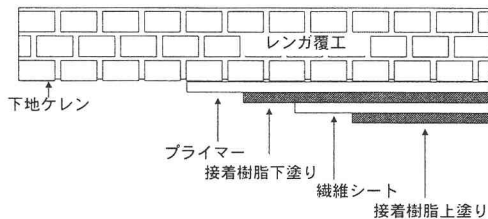


図-1 繊維シート「直張り」の断面構成

(2) レンガ覆工への適用上の問題点

a) 実験を行ったレンガ覆工の状況

実験を行ったトンネルは、東海道本線の牧の原トンネル（廃坑）である。牧ノ原トンネル（廃坑）は、明治 21 年に建設され、その後外力による変状が著しく昭和 48 年に使用停止となった。

現在、建設から 117 年が経過し、覆工表面～数mm奥は蒸気機関時代の煤煙が浸透して黒くなっている。また、平均的な一軸圧縮強度は 20N/mm^2 で、JIS R 1250（1951 制定）に定められた強度 10N/mm^2 は満たしているものの、表面が劣化して薄くうろこ状に剥がれやすくなっている。

b) 問題点

繊維シート接着工をレンガ覆工へ適用する際には、コンクリートと比べて、レンガは母材強度が小さい、覆工の凹凸が大きい、表面の劣化が著しい、煤煙の浸透などのちがいがあがある。これらは、繊維シートの接着性能に結びつく事項であり、実験においては以下に示すような点に着目した。

① はく落塊の荷重を保持する力の設定

はく落対策を計画する上で基礎となるレンガとの接着性能が明らかでなく「どのくらいの荷重を支えることができるか」を求める必要がある。

② 現場載荷実験方法の確立

実験室で、はく落塊の荷重を保持する力（以

下「耐はく落荷重」）を求めるための実験はある²⁾³⁾⁴⁾が、今回は既設のトンネルを対象とした現場実験のため、実験方法を確立する必要がある。

③ 適切な下地処理方法の選定

レンガは多孔質で煤煙が表面～数mm奥まで浸透しているため、繊維シートの接着樹脂が効果不良を起こすことが懸念された。このため、適切な下地処理方法を選定する必要がある。

④ レンガ覆工における繊維シートの目付量の選定

通常のコンクリート覆工で使用される材料のレンガでの適用性を明らかにする必要がある。

3. 実験の流れと使用材料

(1) 実験の流れ

実験の流れを図-2 に示す。まず、下地処理方法を比較し、適切な下地処理方法を選定する。次に使用する繊維シートの目付量を決定する。最後に選定された条件のもとで耐はく落荷重を求めることとした。

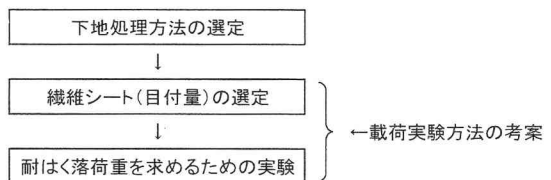


図-2 実験のフロー

(2) 使用材料

a) 繊維シート

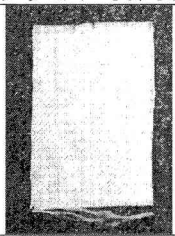
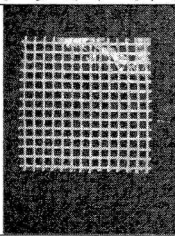
通常、繊維シート接着工法に用いられる繊維シートには、炭素繊維、アラミド繊維、ガラス繊維がある。

本報告では、鉄道トンネルに対する適用を目的としているため、電気伝導性が無くかつ強度が大きい材料として、アラミド繊維を使用することとした。

トンネルのはく落対策には、目付量 200g/m^2 程度のものが使用されることが多い。ここでは、一般的に使用されている目付量 200g/m^2 程度の 2 方向繊維シート（アラミド 10/10）と、その半分の目付量（アラミド 5/5）の 2 種類を比較し、現場載荷試験で適切な目付量を決定することとする。

本報告で使用する繊維シートを表-1 に示す。

表-1 実験に用いたアラミド繊維

材質	アラミド 10/10	アラミド 5/5
概要		
繊維方向	2方向	2方向
目付量	170~180g/m ²	85~90g/m ²
耐荷力	100kN/m (10tf/m)	50kN/m (5tf/m)

b) プライマーおよび接着樹脂

プライマーと接着樹脂については表-2 に示す仕様の材料を用いることとした。接着樹脂については、列車間合いでの施工にも対応出来るように、気温により細かく可使時間を設定できるような材料を用いた。

表-2 仕様材料の詳細

材 料	特 性	試験方法
プライマー (MMA プライマー)	配合物粘度 (mPa・s)	200 JIS K 7117
	接着強度 (N/mm ²)	>1.4 JIS A 6909
接着樹脂 (MMA 樹脂 上塗り, 下塗り共通)	配合物粘度 (mPa・s)	300~4,000 JIS K 7117
	接着強度 (N/mm ²)	>1.4 JIS A 6916
	引張強度 (N/mm ²)	>20 JIS K 7113
	曲げ強度 (N/mm ²)	>25 JIS K 7203

4. 適切な下地処理方法の選定

下地処理方法として代表的な工法は、ディスクサンダーによる研磨（以下「サンダーケレン」）、高圧水による洗浄（以下「高圧水洗」）がある。

ここでは、比較のために無処理を追加して3種類の下地処理のちがいを比較し、適切な下地処理方法を選定することとする。

(1) 実験方法

実験方法は、図-3 に示す建研式接着試験 (JIS K 5400) とする。ここで、必要な接着強度としては、母材破壊の形態を呈するか、または接着強度 1.4N/mm² 以上とした¹⁾。

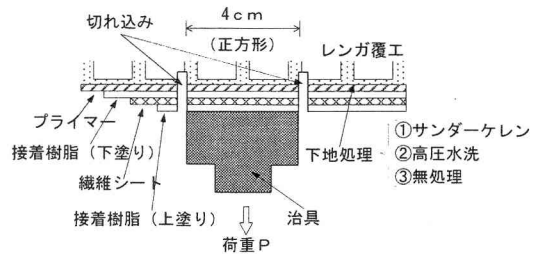


図-3 建研式接着試験概要図

(2) 実験ケース

下地処理の方法は以下の3種類を比較した。

① サンダーケレン

レンガの表面をディスクサンダーで研磨し新鮮な面を露出させる。煤煙汚れまできれいに落すことが可能で新鮮な面にシートを施工できる反面、施工面積が増えると施工性が悪くなる。

② 高圧水洗

高圧の水で表層の汚れを洗浄する。今回は最大 7.5MPa の水圧を作用させた。面積が広くても短時間で洗浄でき施工性がよい。覆工面表層の劣化部や主な汚れは取り除けるが、レンガにしみ込んだ煤煙までは落とせない。

③ 無処理

実験箇所では概ねレンガ面が露出しているため、現実的にはありえないが他と比較するために実施する。

(3) 実験結果

実験結果を図-4 に示す。接着強度は、無処理、サンダーケレン、高圧水洗の順で大きくなる結果となった。

破壊形態は、サンダーケレンの内1ケースを除いて、母材破壊の形態を呈した。

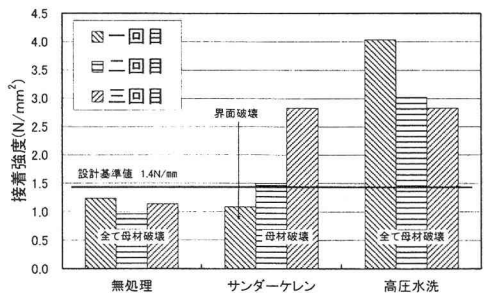


図-4 建研式接着試験結果

(4) 考察

破壊形態は概ね母材破壊であったが、接着強度に図-4 に示す工法による差異が見られた理由は以下

ように考えられる。

無処理の値が低い原因の一つは、表面の劣化部（うろこ状に剥がれる部分）が除去されていないためであると考えられる。

サンダーケレンは新鮮な面に繊維シートを接着できるため接着強度も大きいと予想していたが、予想よりも低くシートとレンガの界面付近では剥離も見られた。これは、作業によって生じた研磨カスが表面に付着しているためではないかと考えられる。

高圧水洗では、レンガ表面の脆弱部や埃などが除去されるため、比較的大きな接着強度が発現できたものと考えられる。また、レンガにしみ込んだ煤煙の汚れはあまり影響がないようである。

以上より、下地処理方法は高圧水洗を基本とし、汚れや小さな突起除去のためサンダーケレンを行なう場合は高圧水洗と併用することとした。

5. 繊維シートの目付量の決定

ここでは、現場載荷試験によって本工法に適切なアラミド繊維シートの目付量を決定することを目的とする。

繊維シート接着工の耐荷重を検証するための実験としては、呉ら³⁾が行っている押し抜き実験がある。これは、覆工をモデル化したコンクリート板の下面に繊維シートを接着し、円形にくり抜かれた中心部を上面から載荷するというものである。

今回は、実際のトンネルでの実験であるため、背面からの押し抜きが行えないという問題があることから、以下に示す載荷実験方法を考案した。

(1) 実験方法の考案

実験方法は、図-5、写真-2 に示すように繊維シートと覆工との間に埋め込んだ鉄製の載荷板を引張るというものである。

工夫した点は、載荷板の裏にペットフィルムをテープで貼り付け、載荷板の裏側に樹脂が回り込んで、載荷板とレンガが接着することを防止したことである。

(2) 載荷方法と耐荷重の求め方

載荷重としては 1 個 100N の土嚢袋を用いる簡易な方法を考案した。これは、現地への機材の搬入条件などから大型の機材を搬入することが困難なことから、まず、簡易な方法でいわゆる当りを付けることを第一の目的としているためである。

載荷は、2 分間隔とした。耐はく落荷重は、最初のはく離が始まった時の荷重とし、土嚢袋より算出した。したがって、耐はく落荷重は 100N 単位となっている。

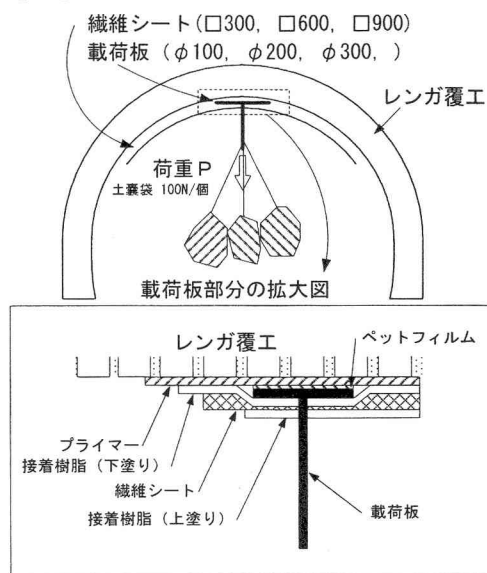


図-5 載荷試験の概要

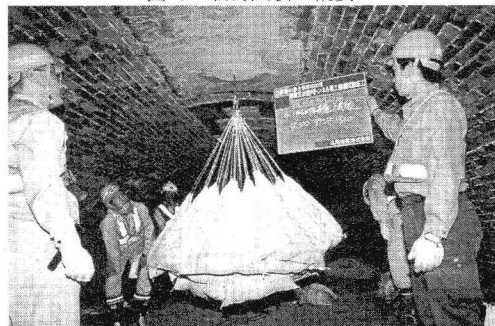


写真-2 載荷試験状況

(3) 実験ケース

実験のケースとしては、表-1 に示したアラミド 10/10 とアラミド 5/5 とを比較した。

実験ケースは、載荷板の直径を変化させて表-3 に示す 6 通りとした。ここで、繊維シートの貼り付け面積は、載荷板の 3 倍の大きさとした。

表-3 繊維シートの目付け量の決定のための実験ケース一覧

ケース	繊維シート	載荷板の直径	断面構成
1-1	アラミド	10 cm	「直貼り」 (図-1 参照)
1-2	10/10	20 cm	
1-3		30 cm	
1-4	アラミド	10 cm	
1-5	5/5	20 cm	
1-6		30 cm	

(4) 実験結果

試験結果を図-6 に示す。ここで、アラミド 10/10 の載荷板の直径が 10cm のケースは、載荷板とレンガ覆工との付着により、耐はく落荷重が得られなかった。

実験の結果、アラミド 5/5 のはく落荷重のほうがアラミド 10/10 を上回る結果となった。

これは、アラミド 5/5 の繊維のほうが、網目の空間を通して上塗りと下塗りがよく混合され、凹凸の大きいレンガ表面に馴染みがよく接着できたためであると考えられる。

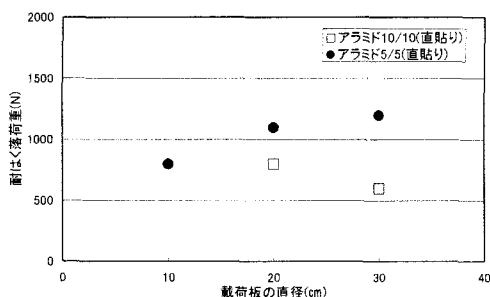


図-6 アラミド 5/5 と 10/10 の比較

注) アラミド 10/10 の載荷板の直径が 10cm のケースは、載荷板とレンガ覆工との付着により、耐はく落荷重が得られなかった。

(5) 考察

以上より、レンガ覆工のはく落対策としては、アラミド 5/5 を選定することとした。

6. 耐はく落荷重を求めるための実験

(1) 実験方法

現場載荷重試験の方法は、5. 繊維シートの目付量の決定で用いた載荷方法とする。

(2) 実験ケース

実験ケースは、載荷板の直径と断面構成を変化させて表-4 に示す 6 通りとした。ここで、繊維シートの貼り付け面積は、先と同様に載荷板の 3 倍の大きさとした。

また、「直貼り」とレンガの目地による接着面の欠損が無い場合とを比較するために、ポリマーセメントモルタルによる不陸修正を実施したケースを設けた。

図-7 にポリマーセメントモルタル（以下「PCM」）を用いた繊維シート接着工の断面構成を示す。

表-4 耐はく落荷重を求めるための実験ケース一覧

ケース	繊維シート	載荷板の直径	断面構成
2-1	アラミド 5/5	10 cm	「直貼り」 (図-1 参照)
2-2		20 cm	
2-3		30 cm	
2-4		10 cm	
2-5		20 cm	不陸修正 (図-7 参照)
2-6		30 cm	

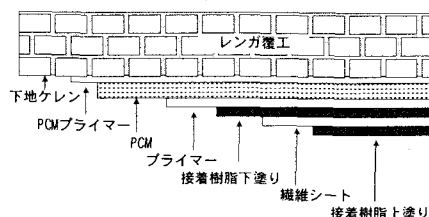


図-7 ポリマーセメントモルタル (PCM) による不陸修正を用いた繊維シート接着工の断面構成

(3) 実験結果

実験結果は、縦軸にはく落荷重、横軸に載荷板の直径をとって図-8 に示した。図-8 に不陸修正ありの場合と「直貼り」のそれぞれについて、載荷板の直径 D と耐はく落荷重 P_c との関係を示した。ここで、載荷板の直径がゼロの時の耐はく落荷重をゼロとした。

図-8 より以下のことがわかった。

- ① ポリマーセメントモルタルを用い不陸修正を行った方が「直貼り」より耐はく落荷重は大きく、同一の直径では約 2 倍である。
- ② 載荷板の直径が大きくなると耐はく落荷重も大きくなり、載荷板の直径と耐はく落荷重との間には正比例の関係がある。これは、不陸修正を行ったケースと「直貼り」のケースの両方に当てはまる。
- ③ ②の関係は、不陸修正を行った方が載荷板の直径と耐はく落荷重に良い相関関係がある。

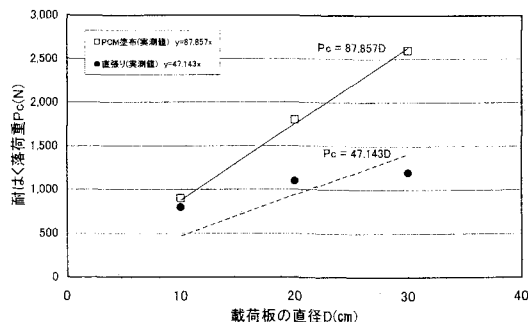


図-8 現場載荷試験結果

(4) 考察

ここでは、はく落対策としての繊維シート接着工の設計に用いる設計はく落荷重の求め方を以下に提案する。

図-8 において、「直貼り」の場合の耐はく落荷重 P_c は載荷板の直径を D とすると

$$P_c = 47.143D \quad (1)$$

で近似した。これに安全率として一般的な3を見込むと、

$$P_{ca} = 15.714D \quad (2)$$

となる。

載荷板の直径をはく落片の直径と考えて、式(2)より求まる耐はく落荷重より、許容できる(安全率3を確保できる)はく落片の厚さを求めて図-9に示す。ここで、レンガの単位体積重量を 20.5kN/m^3 とした。

図-9 より、想定されるはく落塊の大きさがわかれば、繊維シート「直貼り」の適用の要否が判断できる。

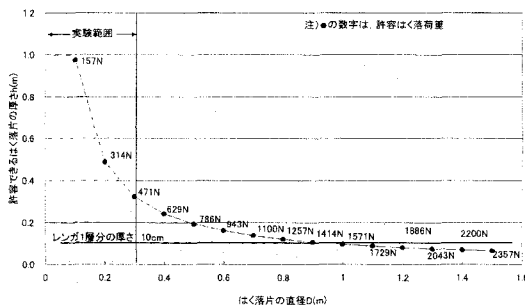


図-9 直張り時のはく落片の落下高さとはく落片の直径の関係図

7. おわりに

(1) 実験結果に関して

ここで今回得られた技術的成果についてまとめる。

- ① 今回考案した載荷方法については、接着面を平滑にした場合や直張りの場合、アラミド繊維の目付量を変更するなど違いによる耐荷力を比較検討できるものであった。
- ② 繊維シートの目付量については、通常、コンクリート覆工で使用されるアラミド 10/10 よりも目が粗い網目状のアラミド 5/5 のほうが大きな耐荷力が得られた。これは、繊維シートの編み目を通して接着剤を確実にレンガ面に塗布できることから、レンガ面に生じている小さな凹凸を埋める効果が

あるためであると考えられる。

- ③ 「直貼り」時の耐荷力は、コンクリート覆工の約2分の1でありレンガの目地による欠損の影響が考えられるが、期待した耐荷力は得られた。
- ④ 下地処理の方法は、高圧水洗が有効であることがわかった。なお、ディスクサンダーを利用する場合は、高圧水洗を併用する必要がある。

(2) 施工上の留意点について

今回の実証実験を行う上で得られた施工上の留意点を以下に簡単にまとめておく。

- ・ 湿潤面や結露が発生している状況下では、接着樹脂が硬化不良を起こす可能性が高いため、事前に止水処理を行うか、湿潤面でも硬化する接着樹脂を使用する必要がある。
- ・ エポキシ樹脂やMMA樹脂は、2液を混合させるタイプが多いが、温度により硬化時間が大きく異なるため、温度により配合を変える必要がある。

(3) 今後の課題

今後は、現在設置している繊維シート接着工の耐久性についても継続的に試験を実施していくとともに漏水対策についても取り組んでいきたいと考えている。

謝辞：JR東海静岡土木技術センターの安原所長をはじめとする皆様、日鉄コンポジットの斎藤誠氏には実験方法や試験結果に対する評価などご協力をいただきました。以上の方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) 財団法人 鉄道総合技術研究所：トンネル保守マニュアル(案)，2000。
- 2) トンネル安全対策工法研究会(TSC研究会)：FRPによるトンネル覆工剥落対策マニュアル，2003。
- 3) 呉智深，朝倉俊弘，古澤弘之，袁鴻，小林朗，高橋徹：連続繊維シートの貼付けによるコンクリート片の剥落防止効果に関する実験的・解析的研究，土木学会論文集No.662/V-49，45-58，2000。
- 4) 六車崇司，小島芳之，吉川和行，小林朗，高橋徹：トンネル覆工におけるFRP剥落対策工の適用性に関する基礎実験，土木学会第57回年次学術講演会講演概要集第4部Vol.57巻，2002。