

# 論文 紫外線硬化型FRPシートによる補修工法の付着性に関する実験的研究

和田 直也<sup>\*1</sup>・松本 由美子<sup>\*2</sup>

**要旨:** コンクリート構造物の補修用の材料として、紫外線で硬化する樹脂を用いたFRPシートによる補修工法を開発した。種々のコンクリートの表面状態および貼付け方法の違いが、FRPシートの付着特性に与える影響について実験的に検討を行った。その結果、コンクリートの表面状態に応じて、FRPシートを加圧力、加熱または加振して貼り付けることにより、付着力の増加が期待できることがわかった。また紫外線照射装置を用いることにより、短時間で樹脂が硬化することを明らかにした。

**キーワード:** 紫外線硬化樹脂, FRPシート, 補修材, 付着強度

## 1. はじめに

近年、コンクリート片の剥落防止等を目的として連続繊維シートを用いた構造物の補修工法が開発されている。そこで、筆者らは既設のコンクリートを対象に補修工法の工期短縮を目的として、紫外線で硬化する樹脂を用いたFRPシート材料、およびその施工方法を開発してきた<sup>1)</sup>。しかし、本研究で使用しているような補強繊維と紫外線硬化型樹脂が一体となっているFRPシートを、表面が凹凸している劣化したコンクリートに施工する場合、シートとコンクリートとの界面に非接着箇所が介在し付着強度が低下する。そのため所要の強度を発揮するためにはパテ材等を使用し断面を平滑にして施工する必要がある。

ここで、FRPシート接着工法による補修効果の良否は、コンクリート母材とFRPシートとの付着によることは広く知られており、CFRPシート・コンクリート間の付着強度と各種表面粗さ指標との関係は、三井ら<sup>2)</sup>によって示されている。この研究においては、エポキシ樹脂を用いて炭素繊維シートを接着した試験体を評価しており、エポキシ樹脂を接着剤として用いた場合

は、表面の粗さが大きくなるほど付着強度が増加した結果を得ている。しかしながら、補強繊維と紫外線硬化樹脂とが一体となっているFRPシートを用いたときの、表面粗さと付着強度との関係について言及した研究は見あたらない。

そこで本研究では、紫外線硬化型FRPシートを用いた場合において、コンクリート表面の凹凸状態を変えたときの付着強度を求めた。またFRPシートを貼り付けるときの加圧力を変えて、表面の凹凸状態ごとの加圧力と付着強度との関係を求めた。また表面の凹凸が大きい場合において、硬化前のFRPシートに熱を加えることにより樹脂とコンクリート表面の凹凸部とのなじみが良くなるものと考え、FRPシートを貼り付けた後、加熱してなじませた場合の付着強度を求めた。さらには振動を加えて加圧することで、より一層の凹凸部とのなじみが良くなるものと考え、FRPシートを貼り付け加熱した後、振動を加えて貼り付けた場合の付着強度を求めた。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体と付着試験

実験はコンクリート平板 (300×300mm

\*1 (株) 竹中土木 技術本部 技術研究所研究員 (正会員)

\*2 (株) 竹中土木 技術本部 (正会員)

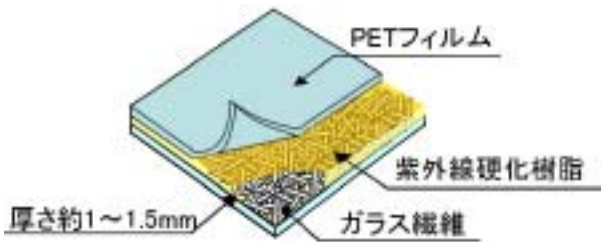


図-1 FRPシートの構成

表-1 FRPシートの仕様

項目	仕様
樹脂の種類	エポキシアクリレート
繊維量	450g/m <sup>2</sup>
厚さ	1~1.5mm
重量	平均1.8kg/m <sup>2</sup>

表-2 コンクリートの配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Ad
33.4	43	165	495	728	1001	0.594

表-3 圧縮強度試験結果

圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	
試験値	平均値
56.9	56.6
57.4	
55.5	

t=50mm) に貼り付けた FRP シートの付着試験によって行った。実験に使用した FRP シートの構成を図-1, シートの仕様を表-1 に示す。FRP シートはそれ自体に粘着性があり, PET フィルムによって粘着を保護している。

また, 実験に使用したコンクリートの圧縮強度は, 付着試験の際にコンクリートの母材を破壊しにくくするため 48N/mm<sup>2</sup> とした。表-2 にコンクリートの配合, 表-3 に圧縮強度試験の結果を示す。

コンクリート表面の前処理として, プライマーを使用し, むらのないように2回塗布した。プライマーが十分乾燥するまで2時間放置した後, FRP シートの貼り付けを行った。

FRP シートの貼り付け方法は, コンクリート平板に対して FRP シート (250×250mm) がほぼ真中になるように配置し, 貼り付け面側の PET フィルムをはがして粘着面をコンクリート面にあて, 気泡が入らないように片側から貼り付けた。付着試験は建研式接着力試験方法(JIS A 6909 に準拠) にて行った。

## 2.2 紫外線装置

本研究にて使用した FRP シートは, 紫外線で硬化する樹脂を用いており, 紫外線があたらないければ軟らかい状態を保ち続け, 紫外線があたることにより硬化を開始する。よって FRP シート自体の強度およびコンクリートとの付着強度は, 紫外線積算量に依存する。紫外線積算量は, 紫外線強度と照射時間によって決まる。そこで紫外線条件を定量化するため, 写真-1 のような紫外線照射装置を用いた。装置の仕様と紫外線強度を表-4 に示す。

### (1) 紫外線照射方法

今回使用した紫外線照射装置は, 紫外線強度が太陽光の 1000 倍程度と高く, 照射面が発熱するため, 試験体をベルトコンベアにより移動させながら紫外線を照射する。紫外線ランプは直



紫外線ランプ



ベルトコンベア

写真-1 紫外線照射装置

表-4 紫外線照射装置の仕様

ランプ種類	ランプ出力	灯数	照射方法
水銀ランプ	3kW	1	ベルトコンベア式
集光距離	1m/min時のピーク強度		太陽光
8cm	554 mW/cm <sup>2</sup>		0.48mW/cm <sup>2</sup>

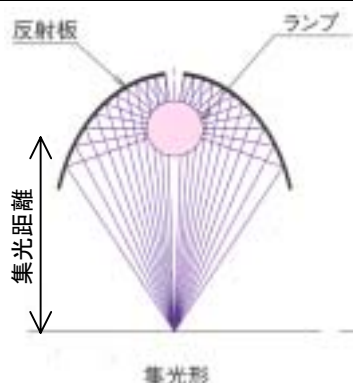


図-2 紫外線の集光イメージ

接見ることが危険であり、写真-1下の箱の中に写真-1上の紫外線ランプが設置されており、密閉された箱の中で紫外線を照射する仕組みである。

### (2) 紫外線照射条件

紫外線照射装置において、コンクリート試験体の表面と紫外線ランプとの距離およびベルトコンベアの移動速度は任意に変えることができる。コンクリート試験体の表面と紫外線ランプとの距離は、図-2に示すような集光形の反射板を用いて最適集光距離である8cmとして実験を行った。

また、ベルトコンベアによる試験体の移動速度は、1.0m/min以上から設定できる。この運搬速度が紫外線照射量に比例し樹脂の硬化に影響するため、紫外線シートを十分に硬化させるために、実験を行いその結果より移動速度を1.0m/minとし紫外線ランプを2回通過させて樹脂を硬化させるように設定した。

### 2.3 コンクリート試験体の表面状態

コンクリート試験体表面の凹凸状態については、トンネル内壁など比較的劣化が少ないコンクリート面を模擬して型枠面で作製した試験体をL-1とした。また、凍結融解や風力など自然



L-2 サンドペーパー転写面



L-3 カッター目

写真-2 コンクリート表面状態

環境からのダメージを想定して劣化したコンクリート状態を模擬して、劣化度の大小でL-2, L-3の試験体を製作した。L-2とL-3の試験体の表面状態を写真-2に示す。

#### (1) 試験体の作製方法

試験体L-1は、木質の合板型枠にコンクリートを打設し、脱型したそのままの表面状態のコンクリート面を用いた。試験体L-2は、コンクリート打設前にサンドペーパー#60番を型枠面に設置し、コンクリートを打設してサンドペーパーの凹凸面をコンクリートに転写して作製した。試験体L-3はコンクリート打設養生後、コンクリートカッター（刃厚t=1.2mm）によって5mm程度の間隔で格子目をつけた。カッター目の深さは、約1~2mm程度とした。

#### (2) 表面の凹凸測定

表面の凹凸の測定装置にはレーザー変位計を用いた。レーザー変位計（型式：LB-02）の分解能は2μmである。一般的な表面粗さ測定装置は、接触式装置が用いられるが、今回の実験では試験体L-3で凹凸の深さが1~2mmと大きいためレーザー変位計を用いた。またレーザー変位計を用いた表面粗さについては三井ら<sup>2)</sup>の報告があり、レーザー式の測定精度が高いことを実証している。表面凹凸をレーザー変位計により2次元的に測定した結果を図-3に示す。

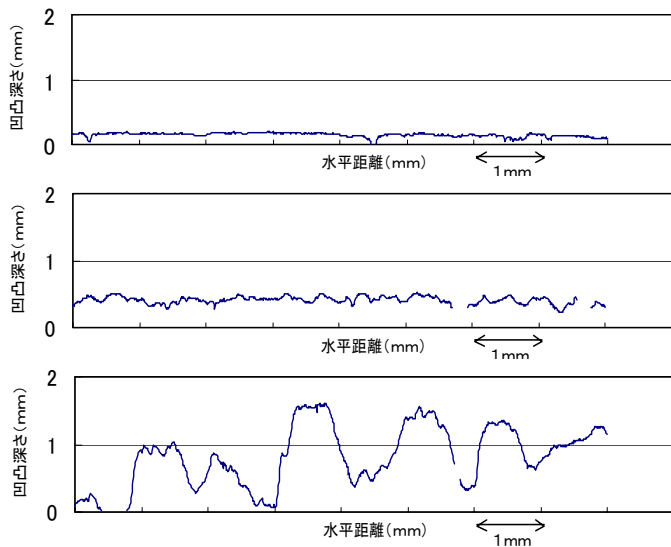


図-3 表面凹凸状態

## 2.4 実験条件

### (1) 表面処理と加圧力条件

表-5にコンクリート表面の凹凸状態と表面処理条件および加圧力条件を示す。

表-5に示すように凹凸の状態は、型枠面、サンドペーパーの転写面、カッター目を入れた面の各状態を水準とした。またサンドペーパーを転写した面においては、前処理を想定して転写面の表面をサンダーでケレンした場合の表面状態においても実験した。

加圧力条件の加圧方法については、おもりによる静的荷重を載荷した。静的荷重は、貼り付けた250×250mmのFRPシート全面の上にコンクリート平板をおもりとして積み重ね加圧した。加圧力は、現場施工において橋梁床版の下面やトンネル覆工コンクリートの下面などに手でFRPシートを貼り付けることを想定した

表-5 表面処理条件と加圧力条件

凹凸状態	型枠面	サンドペーパー 転写面	カッター目を入れた面
表面処理 条件	無処理 圧力1.6kN/m <sup>2</sup> (L-1A)	無処理 圧力1.6kN/m <sup>2</sup> (L-2A)	無処理 圧力1.6kN/m <sup>2</sup> (L-3A)
		サンダー処理 圧力1.6kN/m <sup>2</sup> (L-2B)	
加圧力 条件	無処理 圧力11.2kN/m <sup>2</sup> (L-1C)	無処理 圧力11.2kN/m <sup>2</sup> (L-2C)	無処理 圧力11.2kN/m <sup>2</sup> (L-3C)

表-6 加熱と加振条件

表面状態	加熱と加振の条件
カッター目を入れた面	加熱温度(180℃)、加熱時間(10sec/箇所) (L-3H)
	上記加熱条件+ 加振(型枠バイブレータ)、加振時間(10sec/箇所) (L-3HB)

1.6kN/m<sup>2</sup>加圧力と下向き施工において十分荷重がかけられる状態で施工した場合を想定した11.2kN/m<sup>2</sup>加圧力の二種類において実験を行った。また1.6kN/m<sup>2</sup>加圧力の場合の荷重載荷時間は1分間とし、11.2kN/m<sup>2</sup>加圧力の場合の載荷時間は60分間とした。表-5の各条件によってFRPシートを貼り付けた後、写真-1の紫外線照射装置によってシートを硬化させた。

### (2) 加熱および加振

表-6に加熱および加振の条件を示す。試験体はカッター目を入れた面のものを用いた。

シート自体の温度は、室内(20℃)程度とし、貼り付け時にシートを加熱した場合としない場合とにおいて試験を行った。試験体(L-3H)の作製にあたって、加熱方法はFRPシートを貼った後、写真-3に示すように加熱用アイロンを用いてコンクリート面に対して上部から偏りがないように加熱した。加熱温度はシートが十分に軟化しかつ樹脂の沸点以下である180℃程度とした。加熱時間は、加圧面ごとに10秒程度行い、250×250mmのシート面に対して一様に加熱した。加熱後、写真-1の紫外線照射装置によってシートを硬化させた。

試験体(L-3HB)の作製にあたっては、上記加熱方法によりシートを加熱した後、型枠バイブレータを用いて行った。加振方法は、バイブレータの加圧面を写真-4のようにシート貼り付け面に対して上部から偏りがないように加振して施工した。加振時間は10秒程度とし、250×250mmのシート貼り付け面に対して一様に加振した。加熱と加振後、写真-1の紫外線照射装置によってシートを硬化させた。

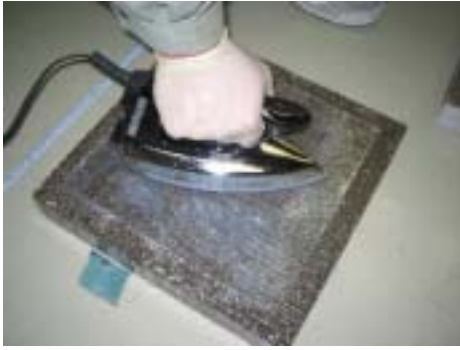


写真-3 加熱状況



写真-4 加振状況

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 表面処理・加圧力と付着試験結果

図-4に実験結果を示す。図中の棒グラフは平均値であり、プロットは各付着強度の値である。付着強度の試験回数はコンクリート平板に対して、N=9として行った。ここで、付着強度の目標値は事業者ごとに定めており、補修材料のマニュアル等で多く用いられている  $1.5\text{N/mm}^2$  とした。

その結果、L-1A 型枠面および L-2B サンドペーパー転写面（サンダーケレン処理）が基準強度  $1.5\text{N/mm}^2$  を満足した。L-2A サンドペーパー（無処理）と L-3A カッター目処理面は基準強度が得られなかった。これより紫外線硬化型 FRP シートを用いた場合、型枠面やサンダーによってケレンした表面状態のように FRP シートの貼り付け表面が平滑な場合は、FRP シートの接着力が期待できるものと考えられる。

また加圧力が小さい場合（L-1A, L-2A, L-3A）と、大きい場合（L-1C, L-2C, L-3C）との比較では、大きい圧力の場合の方がいずれの表面状

態であっても付着強度が増す結果となり、L-1 型枠面では 1.2 倍程度の強度増加となった。しかし、L-3A カッター目程度の凹凸がある場合は、貼り付け圧力を上げた場合（L-3C）であっても基準とした  $1.5\text{N/mm}^2$  を満足する結果が得られなかった。

これは凹凸が大きい場合、シート自体を単に加圧しても凹凸が大きいいため FRP シートがその凹凸面に十分になじまず、非接着箇所が存在しているためだと考えられる。

付着強度値の分布については、表面の凹凸状態が平滑であれば、ばらつきが少ない傾向となった。なお L-2C において破壊状態を観察すると、引張面積に対して部分的に母材破壊が生じており、大きな圧力を加えた場合であってもサンドペーパー転写面の凹凸状態により、ばらつきが生じやすい結果となった。

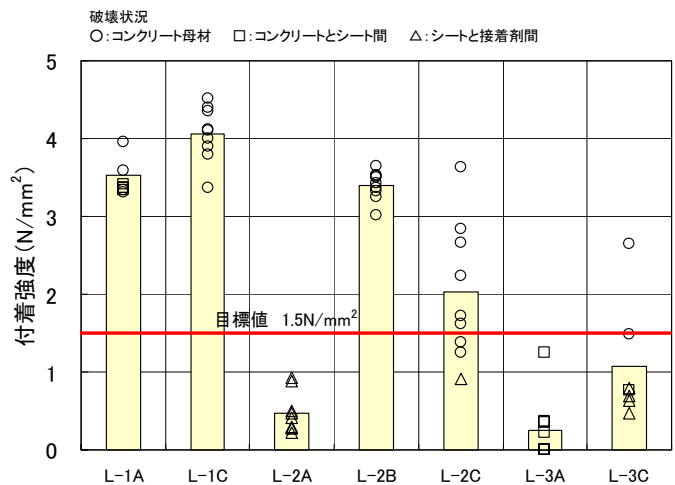


図-4 表面処理・加圧力と付着強度の関係

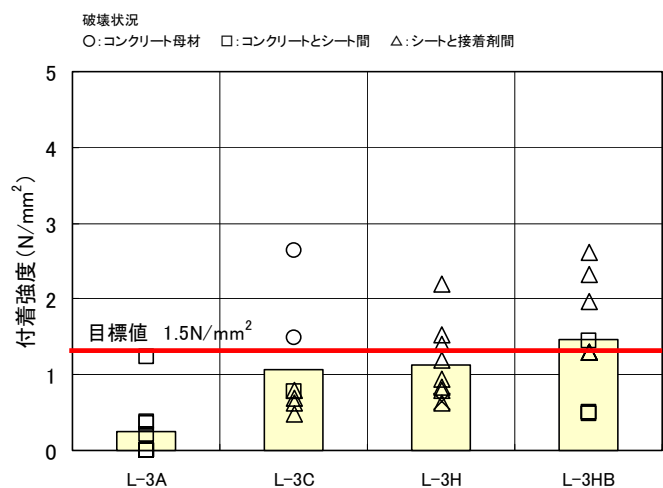


図-5 加熱・加振と付着強度の関係





写真-5 凹凸面(L-3)と FRP シート

### 3.2 加熱・加振と付着試験結果

表面状態がカッター目の場合において、コンクリートの凹凸と FRP シートとの密着度を向上させるために加熱および加熱加振して貼り付けた。その結果を図-5 に示す。

実験の結果より、凹凸面がある場合のコンクリート面に対しては、熱を加えることにより付着強度が高まった。さらには振動を加えることにより目標強度に近い結果を得ることができた。これは、コンクリート面とシートが加熱および加振により密着したためだと考えられる。

しかしながら、試験値のばらつきも考慮すると表面状態の凹凸が大きい場合は、十分な付着強度を得ることができなかつた。破壊状態を観察すると、そのほとんどがシートと治具取り付け用接着剤との間で破壊していた。コンクリートとシートとは写真-5 のように引張面の一部で接着しているが一部では接着が切れていた。またシート自体は、紫外線により十分に硬化していた。

これより付着強度が得られなかつた原因は、引張時に引張面の片側の面が浮き、治具自体が傾いたことにより発生した偏心作用で、せん断的な力が接着剤部に作用し接着剤の破壊により付着強度を低下させたものと推察する。しかしながら十分な強度を確保するためには、その現象を解明した上で、接着面積を確保する何らかの方法を検討する必要がある。

## 4. まとめ

紫外線で硬化する樹脂 FRP シートをコンクリートの各種条件により貼り付けた実験を行った。

その結果を以下にまとめる。

- (1) コンクリート表面が L-1 型枠面においては、いずれの場合であっても付着強度の目標値を満足した。
- (2) コンクリート表面の凹凸が少ない L-2 サンドペーパー転写面においては、サンダー等によりコンクリート表面を平滑に、すなわち型枠面に近い状態にすれば付着強度を確保できることを確認した。
- (3) L-2 サンドペーパー転写面においては、加圧力を上げることで付着強度の目標値を満足した。
- (4) コンクリート表面の凹凸が大きい L-3 カッター目においては、結果にばらつきがあり目標値を満足しないものがあるが、シート貼り付け時に加熱および加熱加振することにより、付着強度が増加することが確認できた。

また、今回の実験に用いた紫外線照射装置は、1.0m/sec の速度で 2 回照射させることで、樹脂が十分に硬化することが確認できた。すなわち 0.5m/sec の速度で移動させながら樹脂を硬化させることができるので、現場における紫外線硬化型 FRP シートの施工性を大きく向上させる可能性を得た。

なお、現場での実施工にあたっては、紫外線を直接見ることが危険なので、保護具の着用や遮光幕の設置等の安全上に配慮する必要があるものと考えている。

## 参考文献

- 1) 松本由美子, 和田直也ほか: FRP シートによるコンクリート構造物の補修工法の開発, 土木学会第 59 回年次学術講演会, Vol.59, No.5, pp.689-690, 2004.9
- 2) 三井雅一, 福澤公夫, 沼尾達弥, 布田郁雄: CFRP シート・コンクリート間の付着強度と各種表面粗さ指標との関係, 材料, Vol.49, No.6, pp.685-691, 2000.6