論文 コンクリートのひび割れの収縮に伴う補修材・光硬化型 FRP シートに おけるバックリング現象の評価試験方法の提案

柿澤 雅樹*1·藤田 征也*2·六郷 恵哲*3

要旨: ひび割れの収縮方向への FRP シートの追従性を評価するための試験方法を提案した。ひび割れ幅, FRP シート厚さ, FRP シートの無付着域の大きさをパラメータとして, 光硬化型 FRP シートの収縮ひび割れ追従 性を, この試験方法により評価した。その結果, FRP シートの厚さが 1.5 mmの場合には, ひび割れ幅の違い によらず, 今回の試験条件では約 0.2mm のひび割れ収縮変位で FRP シートにバックリング現象が発生するこ とを確認した。FRP シートが厚い場合やひび割れ周辺部の無付着域が大きい場合には, バックリング開始時 のひび割れ収縮変位が大きくなり, 収縮ひび割れに対する FRP シートの追従性が向上することを確認した。 **キーワード**: 光硬化型 FRP シート, ひび割れ追従性, バックリング現象

1. はじめに

コンクリートの剥落防止対策として、アラミド繊維シ ートや炭素繊維シート、光硬化型 FRP シートなど様々 なシート材料を用いた補修工法がある^{1),2)}。これらの適 用にあたっては、構造物を所有する機関により規定され ている付着性能試験や、ひび割れ追従性試験により評価 される性能を満足する必要がある^{3),4),5)}。ひび割れ追従 性試験は、一般にひび割れの拡張方向(目開き方向)へ のシートの追従性を試験するものである。光硬化型 FRP シートなどの硬質な材料の場合、ひび割れの収縮方向 (閉塞方向)への追従性についても別途評価する必要が あると考える。

本研究では、光硬化型 FRP シートに着目し、ひび割 れの収縮方向への追従性を評価するための試験方法を提 案するとともに、シートのバックリング現象について評 価することを目的とする。

2. 光硬化型 FRP シートによる剥落防止の基本性能 2.1 光硬化型 FRP シートの性質

光硬化型 FRP シートとは、マット状のガラス繊維(チョップドストランドマット)に光硬化性のあるエポキシ アクリレート樹脂を含浸させたものであり、コンクリー ト構造物には補修材料として剥落防止の目的で用いられ る⁶。紫外線を照射して数十分で硬化するため、供用中 のトンネルなど、補修後すぐに供用を求められる構造物 に適用されることが多い。光硬化型 FRP シートの基本 物性を表-1に示す。

2.2 剥落防止に対する要求性能

剥落防止としてシート材料を使用する場合,対象構

表-1 光硬化型 FRP シートの一般的物性

繊維量	$300 \sim 940 \text{g/m}^2$		
厚さ	1. Omm~2. Omm		
引張強度	80N/mm ² 以上		
引張弾性係数	6.0×10 ³ N/mm ² 以上		

表-2 はく落防止の要求性能

要求性能	基準値	機関	
付着試験 JSCE-K531-2010 1.0N/mm	1.5N/mm ² 以上	NEXCO	
	1.0N/mm ² 以上	首都高速道路公団 東海旅客鉄道	
押し抜き試験 JSCE-K533-2010	1.5kN/m以上	NEXCO 首都高速道路公団 東海旅客鉄道,他	
ひび割れ追従性試験 JSCE-K532-2010	0.4mm以上	NEXCO	
	0.6mm以上	東海旅客鉄道	

造物を管理する機関により要求性能が異なる。主な要求 性能を**表-2**に示す。

光硬化型 FRP シートを用いたはく落防止対策も,こ の要求性能を満足する施工を行うこととなる。ここで, ひび割れ追従性試験は,40mm×120mm×10mmの板状 供試体の1面にシートを貼付し,その背面に切り欠き (5mm)を設け,両端から引張る試験である。この試験は, ひび割れの拡張方向の性能評価を行う試験であり,収縮 方向の追従性を評価するものではない。

2.3 収縮方向のひび割れ追従性能の評価の必要性

剥落防止対策用のシート材料の主な適用対象には,橋 梁の梁やスラブ背面,高欄,トンネル覆エコンクリート のクラウン部内面などがある。維持管理として剥落防止 対策を行う際,構造物は何らか劣化している状態であり,

*1 岐阜大学 大学院工学部社会基盤工学科 生産開発システム工学専攻 工修 (正会員)

*3 岐阜大学 工学部社会基盤工学科教授 工博(正会員)

^{*2} 岐阜大学 工学部社会基盤工学科

ひび割れがある構造物に貼付することが一般的である。 すべてのひび割れが充填補修されてシートが貼付される ことが好ましいが,ひび割れの大小により充填の要否が 判断され,また,ひび割れの伸縮挙動等による充填材の 劣化など様々な理由で,充填されていないひび割れ上に シートが貼付されていることが考えられる。収縮する可 能性があるひび割れに対しては,ひび割れの拡張方向の みならず,収縮方向に対しても,シートのひび割れ追従 性が要求される。

実際の供用中のトンネルにおいて、トンネル内の気温 変化を計測した報告ⁿによると、鉄道トンネルでは夏季 と冬季では約 10℃程度の温度変化があった計測事例が ある。コンクリートの線膨張係数を 10×10⁻⁶(1℃)とし、 コンクリート温度が周辺の気温と同じと仮定すると、例 えば 5m 程度の間隔でひび割れがあるトンネル覆エコン クリートでは、夏に閉じる方向、冬に開く方向の動きが 0.5mm 程度、気温変化により発生する可能性がある。実 際には、覆エコンクリートの厚さ方向に温度が分布する 影響や、背面の地山拘束による影響など、もう少し小さ い挙動と考えられるが、この様に、温度によりひび割れ が伸縮する場合、ひび割れに貼付された硬質なシート材 料のひび割れ収縮方向の挙動を適正に評価する必要があ る。

3. 収縮ひび割れ追従性試験の提案

3.1 収縮ひび割れ追従性試験の方法

収縮するひび割れへの FRP シートの追従性試験につ いては,既往のひび割れ追従性試験では評価できないた め,新たに試験方法を提案し,その試験により収縮ひび 割れへの FRP シートの追従性やバックリング現象につ いての評価を実施した。

今回実施した試験方法の概要図および写真を図-1, 写真-1 に示す。また,評価のために実施した試験の種 類は,後述の表-3 に示す。

3.2 供試体の作製

内径 50mm の中空塩化ビニル管を設置したコンクリー ト供試体 (150×150×300mm) を作製し,端面 (打設面) をコンクリートカッターで切断し,さらに中央を切断し, 2つのコンクリート供試体 (150×150×約 140mm,供試 体 A, B) を加工した。中央の切断面を所定の間隔で突 き合わせて模擬ひび割れとした。作製概要図を図-2 に 示す。

供試体の載荷面が平坦となるよう,コンクリート打 設面をコンクリートカッターにて薄層で切り取った。そ のため,実際に使用した供試体の寸法は,150mm× 150mm×280mmとなった。





写真-1 試験状況の写真



光硬化型 FRP シートを,供試体の平行する 2 つの側面 に貼付し,供試体に軸力を加え,FRP シートに圧縮力を 作用させた。供試体 A および B は,ひび割れ部を跨ぐ 2 枚の FRP シートで繋がっているのみである。図-2 に示 すように,載荷時にコンクリート供試体が載荷軸方向か らずれて,FRP シートにはく離が生じないように,供試 体の中心部の塩化ビニル管(内径 50mm)に,外径 50mm 弱の芯材(鋼製またはモルタル製)を挿入した。

貼付する光硬化型 FRP シートの寸法は,計測機器の 設置を考慮し,供試体側面寸法より幅が小さい 100mm ×280mm とした。供試体の貼付面にプライマーを塗布 (養生期間1日以上確保)し,続いて貼付補助材を塗布 した後,光硬化型 FRP シートを,模擬ひび割れを跨ぐ ように貼付した。貼付補助材は,光硬化型 FRP シート に使用しているエポキシアクリレート樹脂と同種の材料 のパテであり,貼付するコンクリート面の気泡や凹凸を 埋める効果がある。貼付補助材自身も光硬化性を有して おり, FRP シートに紫外線を照射した際に,シートと同時に硬化する。

今回は太陽光により光硬化型 FRP シートに紫外線を 与え、紫外線量計測機(UV チェッカー)により、各シ ートの紫外線積算光量が 1500mJ/cm² 以上であることを 確認することで、硬化完了とした。

3.3 載荷装置および荷重計測

載荷方向は、供試体の自重が FRP シートに作用しな いように、水平横向き方向とした。荷重は、手動式の油 圧ジャッキにより与え、油圧ジャッキと供試体の間にロ ードセル(容量 100kN)を設置し、載荷荷重の計測をお こなった。床にボルト固定した堅固な反力板により、ジ ャッキによる水平方向の荷重を支えた。床と供試体Aお よび供試体Bの間にそれぞれ独立したローラーを置き、 載荷側と反力側の両方に球座を置いた。

3.4 変位計測

(1) 収縮ひび割れの変位計測

載荷に伴う模擬ひび割れの収縮変位を, π型変位計 (容量±5mm)にて計測した。FRPシートの上方および 下方の2箇所で模擬ひび割れを跨ぐように変位計を設置 し,2箇所の平均値をひび割れ収縮幅とした。FRPシー トは供試体の2面にあるため,π型変位計を合計4箇所 に設置した。

(2) FRP シートのバックリングの計測

載荷時の FRP シートのバックリング状況を計測する ため、ひび割れ上の2つの面のFRPシート中央部に、高 感度変位計(容量 25mm)を各1個づつ設置し、シート の膨れの程度を計測した。載荷時の供試体自身の横方向 の変位を計測し、バックリング変位の計測値から除いた。 計測位置は、供試体のねじれ変位もキャンセルできるよ うに、バックリング計測位置を中心に、片側は供試体 A 側のシート上方、もう片側は供試体B側のシート下方と した。なお、この供試体変位の計測は、供試体の片面の みで行い、符号を反転させることで、両面の FRP シー トのバックリング変位結果へ反映させた。

4. 実験結果と考察

表-3 に示すような条件下で貼付した FRP シートにつ いて,提案する収縮ひび割れ追従性試験を行い,バック リング現象について検証を行った。

4.1 代表的な条件でのバックリング現象

実施した試験の代表例として,表-3の試験番号 No.1 に示す,光硬化型 FRP シートの厚さ1.5mm,ひび割れ幅 1mm の結果を取り上げる。試験後のシートを写真-2に 示す。写真からも明らかなように,ひび割れの収縮時に は,FRP シートがコンクリートからはく離し,ひび割れ 箇所を中心に凸型に浮いており,バックリング現象が確 認された。このとき,ひび割れ周辺の 50mm 程度までは, 供試体のコンクリート母材が引張破壊しており,さらに その外側 30mm 程度までは,FRP シートとコンクリート の界面ではく離が生じていた。

収縮ひび割れ追従性試験における,計測ステップと 荷重および変位計の計測結果を図-3 に,ひび割れ収縮 変位と荷重の関係を図-4 に示す。荷重の初期段階では, 荷重増加に対し FRP シートの付着力によりひび割れ収 縮変位が小さく,抑制されているが,荷重が10.6kN(ひ び割れ収縮変位が 0.18mm)に達した瞬間にバックリン グ現象が発生し,変位が大きく増加し,荷重が低下した。 模擬ひび割れ幅は 1.0mm で設定したが,供試体作製精 度や模擬ひび割れ面の凹凸の噛み合わせのため,バック リング時のひび割れ収縮変位は実際には 1.8mm まで計 測された。FRP シートのバックリング時のシートの膨れ は 7mm 程度であった。

試験番号	FRPシート 厚さ	ひび割れ幅	備考				
No. 1	1.5mm	1mm	代表パターン				
No. 2	1. 5mm	5mm					
No. 3	1.5mm	3mm					
No. 4	1. 5mm	0.6mm					
No. 5	1. Omm	1mm					
No. 6	2. Omm	1mm					
No. 7	4. 5mm	1mm	1.5mm×3枚				
No. 8	1.5mm	1mm	非接触部10mm				
No. 9	1.5mm	1mm	非接触部80mm				

表-3 試験の種類



写真-2 FRP シートのバックリング現象

変位方向



この結果から、ひび割れを跨いで貼付された FRP シ ートに、ひび割れの収縮変位によりバックリング現象が 生じることを確認できた。バックリング後の供試体写真 と、FRP シート、コンクリートそれぞれの状況写真を**写** 真-3 に示す。バックリング後のシートは、ひび割れ周 辺部ではコンクリート母材で破壊し、その外側はシート とコンクリートとの界面で破壊し、さらにその外側で付 着している状態であった。このバックリング現象は、ひ び割れ近傍のコンクリート母材の破壊を伴うため、FRP シートの付着力を高めることによる制御は困難であるこ とが予測できる。



写真-3 母材破壊の状況

4.2 ひび割れ幅が異なる場合のバックリング現象

FRP シートの厚さを 1.5mm, ひび割れ幅を 0.6mm~ 5mmまでの4種類として収縮ひび割れ追従性試験を実施 した(表-3 中の試験番号 No.1~No.4)。結果を図-5 に示す。バックリング現象が開始した時のひび割れ収縮 変位を表-4 に示す。いずれのひび割れ幅においても, ひび割れ収縮変位が 0.2mm 程度でバックリング現象が 発生した。





表-4 バックリング開始時のひび割れ収縮変位

ひび割れ幅(mm)	0.6	1.0	3.0	5.0
バックリング 開始変位(mm)	0.17	0.18	0.22	0.25

バックリング開始時の最大荷重は、ひび割れ幅が 3mmまたは5mmの場合に比べ、ひび割れ幅が0.6mmま たは1mmの場合の方が高くなった。この荷重の大小に は、ひび割れ周辺でのFRPシートの付着力(プライマー や貼付補助材の塗布状況)が影響することも考えられ る。

以上の結果から,FRPシートの厚さを1.5mmと固定し, ひび割れ幅を 0.6mm~5mm まで変化させた場合には, ひび割れ幅の寸法に影響されず,ひび割れ収縮変位が約 0.2mmとなった時にバックリング現象が発生することが わかった。この収縮ひび割れ追従性試験において,バッ クリング現象を概ね評価できることがわかった。

この試験を活用すると、収縮ひび割れ追従性試験から 確認できるバックリング開始時のひび割れ収縮変位に対 し、実構造物で計測されるひび割れの伸縮変位が小さい 場合には、バックリング現象が発生しないと考えられ、 補修時のひび割れ充填の要否の判断や、FRPシートの貼 付時期の選定にも適用できると考えている。今回の試験 によると、バックリング現象が発生するひび割れ収縮変 位は約0.2mmであったが、後述のように、FRPシートの 特性や付着により変動する。さらには、対象構造物の形 状やひび割れ形状、劣化状況により異なった数値となる と考える。

4.3 FRP シート厚さが異なる場合のバックリング現象

ひび割れ幅を 1mm, FRP シートの厚さを 1.0mm, 1.5mm, 2.0mm, 4.5mmの4種類として収縮ひび割れ追従 性試験を実施した(表-3 中の試験番号 No.1, No.5~ No.7)。結果を図-6に示す。FRP シート厚さが t=4.5mm の場合には、バックリング直後に π型変位計が外れたた め、ひび割れ収縮変位の計測はバックリング時までであ る。4.5mmのFRPシートは、1.5mmのFRPシートを3 枚重ねて作製した。光硬化の関係上,1 枚ごとに貼付・ 硬化を3回繰り返して作製した。グラフ中の線上の〇印 および数値は、各データでのバックリング開始時のひび 割れ収縮変位を示す。この結果から、同一ひび割れ幅 (1mm)の場合, FRP シートが厚くなると, バックリング 開始時のひび割れ収縮変位が大きくなり、収縮ひび割れ に対する追従性が向上していることがわかる。FRP シー トが厚くなると、バックリング開始時の荷重も大きくな っているが、実構造物での現象を考えた場合、温度変化 によりひび割れ幅が変動するため、荷重の大小よりも、 バックリング開始時のひび割れ収縮変位の大小の方が有 用である。

収縮ひび割れ追従性試験後の供試体の写真を**写真-4** に示す。FRP シート厚さを各写真の左下に示す。供試体 中央部に模擬ひび割れがあり,バックリング現象に伴う 母材破壊範囲(写真中黄色矢印),FRP シート界面破壊 範囲(写真中緑色矢印)を示す。FRP シートが厚くなる ほど,母材破壊範囲が大きくなった。





写真-4 バックリング後の供試体状況

4.4 ひび割れ周辺の付着が無い場合のバックリング現象

バックリング現象には、ひび割れ周辺の FRP シート とコンクリートの付着力が影響していると考えられる。 そこで、ひび割れ幅を1.0mm, FRPシート厚さ1.5mmと して、付着の無い範囲をパラメータとする試験を行った。 FRPシートをコンクリートに貼付する際、フィルムを1 枚挟むことで、その箇所が無付着域となる。ひび割れ両 側に、この無付着域を10mm,80mmの2種類として試験 を行った(表-3中の試験番号 No.1, No.8~No.9)。80mm を無付着域とすることは、4.1 で述べた代表的な条件で の試験(試験番号 No.1)において、バックリング時のコ ンクリートの母材破壊範囲を無付着域にすることに相当 する。また、無付着域が無く、ひび割れ部まで付着を確 保した試験結果は、代表的な条件での結果である。試験 結果を図-7に、試験後の供試体を写真-5に示す。



写真-5 バックリング後の供試体状況

ひび割れ周辺の付着力が無いパターンにおいてもバ ックリング現象が発生した。しかし,無付着域が大きい ほど,荷重の低い段階でバックリング現象が発生するも のの,バックリング開始時のひび割れ収縮変位が大きく, 収縮ひび割れへの追従性は向上する傾向にあった。無付 着域 10mmの供試体では,写真でも確認できるように, バックリングにより,FRPシートの無付着域の外側の付 着箇所において,コンクリート母材破壊およびはく離が 確認されたが,無付着域を80mmとした供試体では,バ ックリング現象は無付着域のみで発生し,付着箇所の母 材破壊やはく離は確認できたなかった。1 枚の FRP シ ートで付着している箇所と付着が無い箇所の境界部は, はく離に対して弱部となるため,実用化には弱部となら ないような対策を併せて実施する必要があると考える。

4.5 実現象との対応

今回提案する試験方法により,ひび割れ幅が異なる場 合や,FRPシート厚さが異なる場合,ひび割れ周辺の付 着が無い場合について,ひび割れ収縮変位によりバック リング現象が発生することを表現できた。実構造物にお いては,ひび割れの形状が直線ではなく,ひび割れ幅も 同一ひび割れ内で大小様々に変化していることから,今 回の試験による数値そのものを適用することはできない が,バックリング現象の発生の可能性の評価について, 提案する試験方法は有効であると考える。

5. まとめ

収縮するひび割れへの FRP シートの追従性やバック リング現象を評価するための試験方法を提案した。中空 塩化ビニル管を中心に配置したコンクリート供試体を 2 つに切断して,切断面を模擬ひび割れとした。2 つの供 試体に模擬ひび割れを跨いで FRP シートを貼付し,ひび 割れが収縮する方向に軸力を供試体に加え,FRP シート に圧縮力を作用させた。中空塩化ビニル管内に芯材を入 れて,圧縮力下での2つの供試体の横ずれを防いだ。幅 0.6mm から 5mm 程度のひび割れを対象として,FRP シ ートの収縮追従性をこの試験方法で評価した。その結果, 下記の知見が得られ,この試験方法の有効性を確認でき た。

 (1) FRP シートの厚さを 1.5mm とし、ひび割れ幅を パラメータとして変化させた時のバックリング現 象は、ひび割れ幅の違いによらず、ほぼ同一なひ び割れ収縮変位(今回の試験条件では0.2mm 程度) で発生することを確認できた。

- (2) FRP シートの厚さを 1.0mm から 4.5mm まで変化 させたとき, FRP シートが厚い方が, バックリン グ現象発生時のひび割れ収縮変位が大きくなり, 収縮ひび割れへの FRP シートの追従性が向上する ことが分かった。
- (3) ひび割れ近傍の FRP シートの付着を無くすることで、収縮ひび割れへの FRP シートの追従性が向上することが分かった。80mm の無付着域を設けることで、バックリング現象は発生するものの、シートのはく離が発生しないことが分かった。

参考文献

- 社団法人土木学会:101 コンクリートライブラリー 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補 修補強指針,2000.3
- 社団法人土木学会:119 コンクリートライブラリー 表面保護工法設計施工指針(案), pp.20-37, 2000.3
- トンネル安全対策工法研究会:FRPによるトンネル 覆工剥落対策マニュアル,海山堂,2003.5
- 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:設計要領第三集ト ンネル編,高速道路総合研究所,2012.7
- 5) 日本道路公団:覆工コンクリートはく落対策工 [繊 維シート接着工] 設計・施工指針(案),日本道路 公団, pp.15-49, 2003.11
- 6) 株式会社竹中土木:パーマコート工法技術資料 Ver 3.0, pp.3-9, 2013.4
- 斎藤寛之,地下鉄トンネル内温度の予測と検証,第 266回鉄道総研月例発表会,pp.1-2,2013.4