

光硬化型 FRP シートの評価試験方法の提案と RC はりのせん断補強への適用

破壊診断工学研究室 田邊 幸佑

1. 研究の背景と目的

光硬化型 FRP シートとは、1 本当たりの繊維長さ 50mm の短繊維ガラスをランダム配向によりマット状に加工し、光硬化性を有するエポキシアクリレート樹脂を含浸させた FRP シートである。短繊維ガラスを用いた光硬化型 FRP シートは、連続繊維シートのような特定方向に強度が卓越する異方性を有した材料と異なり、どの方向の引っ張りに対しても等しい強度特性を有する等方性材料である。またこのシートは、紫外線を照射して数十分で硬化するため、補修後すぐに供用を求められる構造物に、コンクリートの剥落防止対策として適用されることが多い。

剥落防止対策には、他にもアラミド繊維シートや炭素繊維シートなどといったシート材料が用いられる。これらの適用にあたっては、規定されている付着性能試験やひび割れ追従性試験を行い、その要求性能を満足する必要がある。しかし、これらの試験方法は、光硬化型 FRP シートなどの硬質系の材料には適しておらず、正しく評価できているとは言い難いため、新たな試験方法の開発が必要であると考えられる。また連続繊維シートは、コンクリートの補強工法に関する指針類が整備され、耐震補強材として実用化されているのに対し、短繊維ガラスを用いた光硬化型 FRP シートは、せん断補強についてほとんど研究がされていないのが現状である。

そこで本研究では、短繊維ガラスを用いた光硬化型 FRP シートの性能を正しく評価できる新たな評価試験方法の開発を行った。また、このシートを RC はりのせん断補強に用いて、その補強効果を検証した。発表および概要では、後者の内容を取り上げる。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

光硬化型 FRP シートのせん断補強効果を確認す

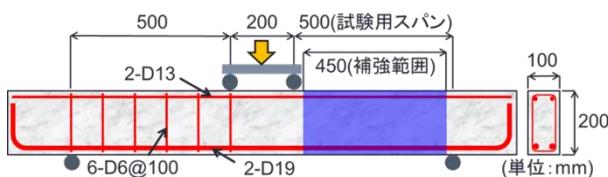


図-1 試験及び供試体概要図

るため、既往の研究を参考に、図-1 に示す様な 2 点集中荷重による RC はりの荷重試験を行った。

供試体のせん断スパンのうち左側スパンには、全供試体共通でせん断補強筋としてスターラップを 6 本配置した。右側スパンは、鉄筋によるせん断補強をせず、試験用スパンとし、シートによるせん断補強を行った。荷重試験では、荷重をロードセル、試験体の変位を高感度変位計により計測した。荷重の荷重点の 2 か所と、支点の 2 か所で変位を測定し、支点の変位の影響を除いて、荷重点での変位とした。

2.2 補強条件

試験を実施した供試体の種類を表-1 に示す。No.1 は、せん断補強していない供試体であり、No.2 は、鉄筋で補強した供試体である。No.3~7 の各補強条件における断面図を図-2 に示す。No.3 は、シート 1 枚を全面貼付しており、今回の試験における標準パターンに位置づけている。No.4 は、シート 2 枚を全面貼付した。No.5, No.6 では、図-2 に示すように補強形状を変化させた。No.7 では、シートを貼付する際、コンクリートとの間にフィルムを 1 枚挟み、シートとコンクリートが直接付着しないように補強した。No.8~14 の供試体作製概要を図-3 に示す。No.8~10 は、カッターナイフにより 5cm 間隔で表-1 に示す貼付角度でシートをカッティングし、シートに所定の異方性を持たせた。No.11~14 について

表-1 供試体の補強条件

試験番号	補強材料	貼付面積	貼付角度	備考		
No.1	無し	—	—	—		
No.2	鉄筋	D6@100	—	—		
No.3	FRP	100%	無し (等方性)	標準パターン		
No.4				シート2枚		
No.5				側面を補強		
No.6				側面と底面を補強		
No.7				—	—	付着なし
No.8				100%	異方性	45度
No.9						90度
No.10		135度				
No.11		50%	0度			
No.12			45度			
No.13			90度			
No.14			135度			

試験No.	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7
断面図					

図-2 No.3～No.7の断面図

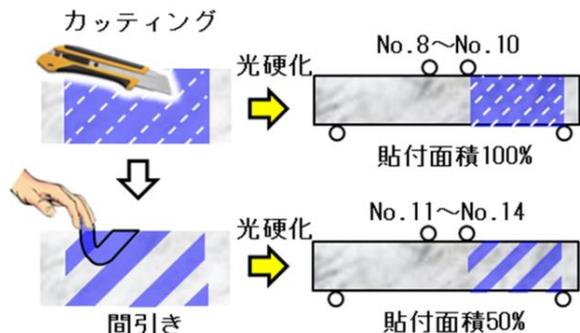


図-3 異方性補強の作製概要

は、No.8～10と同様に、シートを切断した後、シートの一部を間引くように除去し、貼付面積を50%とし、かつ異方性を持たせた供試体とした。

2.3 強度評価式の適用

等方性材料である光硬化型FRPシートのせん断補強効果が、異方性材料である連続繊維シートに準拠するかを検証するために、以下の式を用いて強度を評価し、その適用性を確認した。

$$V_{fyd} = V_{cd} + V_{sd} + V_{fd} \quad (1)$$

$$V_{fd} = K[A_f \cdot f_{fud} (\sin \alpha_f + \cos \alpha_f) / s_f] z / \gamma_b \quad (2)$$

$$K = 1.68 - 0.67R \quad 0.4 \leq K \leq 0.8$$

$$R = (\rho_f \cdot E_f)^{1/4} \left(\frac{f_{fud}}{E_f} \right)^{2/3} \left(\frac{1}{f'_{cd}} \right)^{1/3} \quad 0.5 \leq R \leq 2.0$$

$$\rho_f = A_f / (b_w \cdot s_f)$$

V_{fyd} : はりのせん断耐力

V_{cd} : コンクリートが分担するせん断耐力

V_{sd} : 鉄筋が分担するせん断耐力

V_{fd} : シートが分担するせん断耐力

A_f : 区間sfにおける連続繊維シートの総面積

s_f : 連続繊維シートの配置間隔

f_{fud} : 連続繊維シートの引張強度 (N/mm²)

E_f : 連続繊維シートの弾性係数 (kN/mm²)

α_f : 連続繊維シートが部材軸となす角度

γ_b : 部材係数

シート補強されたはりのせん断耐力は、式(1)に示す通り、コンクリートが分担するせん断耐力、鉄筋が分担するせん断耐力、シートが分担するせん断耐力の和で表される。シートが分担するせん断耐力 V_{fd} は、式(2)により算出される。式(1)は、

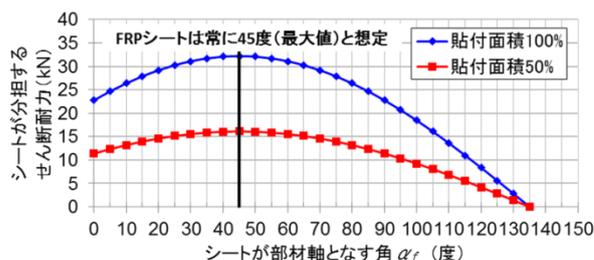


図-4 なす角度 α_f とせん断耐力の関係

表-2 実験結果の総括

試験番号	計算式によるせん断耐力(kN)				試験結果(kN)
	コンクリート	鉄筋	シート	合計	
No.1		0.0	0.0	26.5	26.7
No.2		45.5	0.0	72.0※	69.5
No.3	26.5	0.0	32.2	58.7	66.3
No.4			64.4	90.9※	69.5
No.5			32.2	58.7	49.1
No.6			32.2	58.7	66.3
No.7			—	26.5	38.3
No.8			32.2	58.7	63.1
No.9			22.8	49.2	55.9
No.10			0.0	26.5	55.4
No.11			11.4	37.9	31.2
No.12			16.1	42.6	38.1
No.13			11.4	37.9	45.5
No.14			0.0	25.5	61.4

※66.9で曲げ破壊が先行

せん断ひび割れが部材軸に対し、135度で発生することを想定している。シートをはり側面の全面に貼付するとした場合、引張強度や弾性係数は使用材料により決まるため、式(2)は、シートの部材軸となす角度 α_f が45度で最大値となる関数となる。なす角度 α_f とせん断耐力の関係をグラフ化したものを図-4に示す。等方性材料である光硬化型FRPシートは、角度 α_f に関係せず一定のせん断耐力となるため、せん断耐力が最大値となる45度のせん断耐力値を採用できると考えられる。

3. 実験結果および考察

実験結果の総括として、計算式により算出されたせん断耐力と試験結果を表-2に示す。

3.1 光硬化型FRPシートによるせん断補強効果

試験番号No.1～4について、載荷試験を行った。No.1の補強していない供試体については、コンクリートのみのせん断耐力であり、26.7kNでせん断破壊した。表-2より、計算式とほぼ近似したため、本試験におけるコンクリートのせん断耐力は、計算式とほぼ同一とみなすことができ、以後の試験では、全せん断耐力から計算式によるコンクリートが分担するせん断耐力を差し引くことで、シートが分担するせん断耐力として評価した。No.2で

は、はりの曲げ破壊が確認でき、試験結果が69.5kNであったため、鉄筋が分担するせん断耐力についても、計算値と同等であると言える。

No.3, No.4より、光硬化型FRPシートを用いてせん断補強することで、供試体のせん断耐力が向上することが確認できた。No.3については、シートが部材軸となす角度 α_f を45度として算出した計算値58.7 kNに対し、66.3kNとやや上回る結果となった。またNo.4については、計算通り曲げ破壊が先行することが確認できた。この結果より、光硬化型FRPシートをせん断補強に用いた場合、なす角度 α_f を45度として計算値を算出することで、安全側に推定されることが分かった。

3.2 補強形状の違いによるせん断補強への影響

シートの補強形状を変化させて載荷試験を行った（試験番号No.1, No.3, No.5, No.6）。各供試体についての、変位とせん断力の関係を図-5に示す。

No.5では、シートは破断せず、剥離が先行し、せん断補強効果を失った段階ではりがせん断破壊した。No.3, No.6では、せん断ひび割れ箇所でシートが破断してせん断破壊した。このとき、載荷中にシートがせん断ひび割れ周辺部で剥離したが、その周辺の付着は有効であった。

これら結果から、シートを貼り付けることで、その補強形状に関係なく、せん断補強効果を発揮することが確認できた。しかし、No.5のように剥離が先行する場合、シートの引張耐力が有効に作用しなくなるため、施工時にシートを十分に定着させる必要があると言える。またNo.3, No.6については、試験値がせん断耐力の計算値を大きく上回っていた。これは、はりの全体または引張を受ける面をシートで覆うことで、シートがはりの変形を拘束し、せん断破壊の進行を抑制したために向上したのではないかと考えられる。

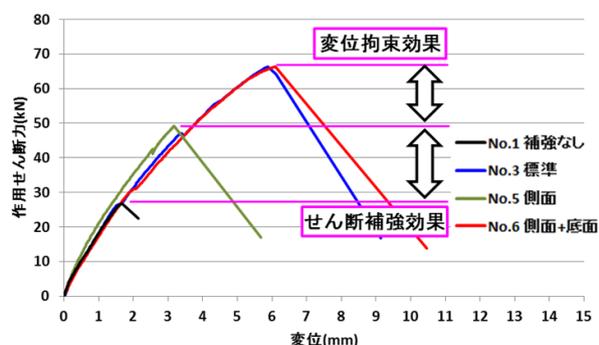


図-5 補強形状が異なる場合の試験結果

3.3 付着の有無によるせん断補強効果への影響

付着の有無に着目して載荷試験を行った（試験番号No.1, No.3, No.7）。各供試体についての、変位とせん断力の関係を図-6に示す。No.7は付着させていないため、せん断補強効果が生じず、付着があるものと比べると、せん断耐力は大きく低下した。No.7の破壊までの挙動をしてみると、せん断ひび割れが発生した後に、再び耐力が上昇した。このとき、No.7は、シートを巻いて硬化させたのみであり、シートとコンクリートとの間に若干の隙間があった。そのため、はりにひび割れが発生したと同時に、シートがコンクリートに密着し、せん断耐力が向上したと思われる。これは3.2で述べたものと同じく、変形拘束による補強効果であると考えられる。

3.4 異方性を有した場合のせん断耐力

(1) 貼付面積100%

試験番号 No.8~10 について、シートに異方性を持たせた供試体を載荷試験に供した。表-2 の計算式によるせん断耐力は、カッティングした方向をなす角度 α_f として算出した値であり、なす角度 $\alpha_f=45$ 度は、カッティングしておらず等方性を有する状態のシート（No.3）と同じ計算値となる。また、なす角度 $\alpha_f=135$ 度では、せん断ひび割れと同一方向にカッティングすることとなるため、計算上のシートが分担するせん断耐力はゼロとなる。No.8 の試験結果から、 $\alpha_f=45$ 度の時は計算式におけるせん断耐力をやや上回る結果となったため、等方性である No.3 と同様に、計算式により算出されるせん断耐力が期待できると言える。このことから、例えばせん断方向が特定されている構造物を補強する際、その方向と直角方向にシートの突き合わせによる継ぎ目があっても、等方性に貼付した時と同等のせん断補強効果が見込めると言うことができる。

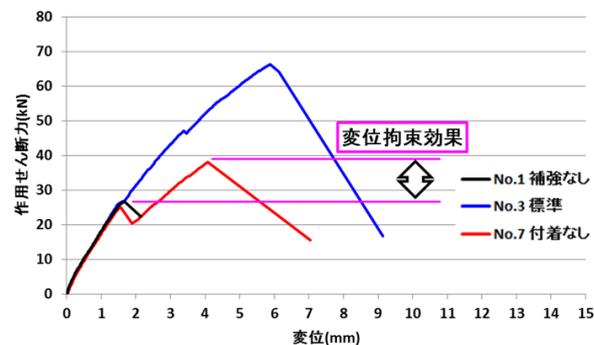


図-6 付着条件が異なる場合の試験結果

なす角度 α_f とシートが分担するせん断耐力の関係と試験結果を図-7に示す。いずれの場合においても計算式による結果を上回っており、特に135度では大幅に上回るせん断耐力となった。これは、斜めひび割れは補強されていなくても、水平ひび割れ部分がシートにより補強されているためと考えられる。このため、実際のせん断耐力は、部材軸となす角度 α_f より算出するせん断耐力以上の耐力であることが期待できる。

(2) 貼付面積 50%

試験番号No.11~14について、シートに異方性を持たせ、さらにシートを間引きすることで貼付面積を50%とした供試体を載荷試験に供した。表-2の計算式によるせん断耐力は、シートが部材軸となす角度 $\alpha_f=45$ 度の時に最大値となり、その値は貼付面積100%の半分となる。また、 $\alpha_f=135$ 度では、シートが分担するせん断耐力はゼロとなる。

なす角度 α_f とシートが分担するせん断耐力の関係と試験結果を図-8に示す。図から分かるように、なす角度 $\alpha_f=0$ 度および45度の時、計算式によるせん断耐力を下回る値でせん断破壊し、特に $\alpha_f=0$ 度では、計算値の半分以下の値で破壊した。シートの剥離が先行し、シートの引張耐力が効果的にせん断耐力に寄与しなかったと考えられる。

なす角度 $\alpha_f=45$ 度では、最も荷点側に貼付したシートは、破断せずに剥離がすぐにシート端部に達した。このため、シートの引張耐力が有効に作用せず、シートの貼付面積が、実質的に50%より小さくなり、せん断耐力が計算値を下回ったと

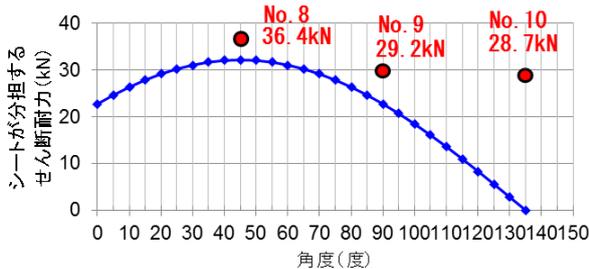


図-7 角度 α_f とせん断耐力の関係(100%)

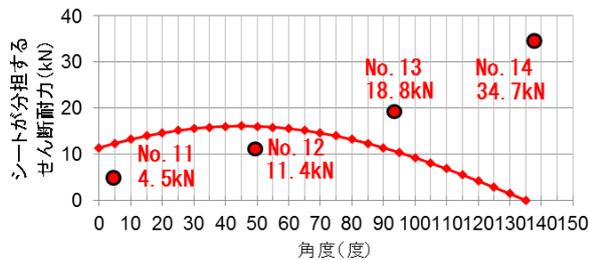


図-8 角度 α_f とせん断耐力の関係(50%)

考えられる。

なす角度 $\alpha_f=90$ 度および135度では、計算式によるせん断耐力を上回る結果となり、特に $\alpha_f=135$ 度では、貼付面積100%と同等なせん断耐力となった。この $\alpha_f=135$ 度の破壊は、はりにせん断ひび割れが発生した後、シートが破断するまで荷重に耐え続け、シートの破断とともにせん断破壊に至った。せん断耐力は、一般に圧縮部のせん断力、せん断面の骨材の噛み合わせ、引張鉄筋のダウエル作用や付着割裂によるとされている。No.14は、計算式ではシートが分担するせん断耐力はゼロになるものの、実際には水平ひび割れ部分を補強する形状となり、タイドアーチが形成され、最終的にせん断圧縮により破壊したため計算値より高いせん断耐力となったと考えられる。ただし、シートを間引く位置が異なっていた場合は、水平ひび割れ部分の補強の程度も変わるため、せん断圧縮に至らず、斜め引張破壊となった可能性がある。

4. まとめ

等方性材料である短繊維ガラスを用いた光硬化型FRPシートを、RCはりのせん断補強として適用し、異方性を有する連続繊維シートのせん断補強として用いられる評価式の適用性について検証、各補強条件におけるせん断補強効果の確認を行った。また、等方性材料である光硬化型FRPシートを、異方性を持たせた貼付をした時、シートの貼付面積100%と50%について、貼付角度をパラメータとしてせん断試験を行った。その結果、下記の知見を得た。

- (1) 光硬化型FRPシートをせん断補強に適用する場合に、評価式により算出されるせん断耐力の最大値を、シートで補強した場合のせん断耐力として用いることができる。
- (2) 光硬化型FRPシートを用いてせん断補強を行うと、その補強条件に関わらず、せん断補強効果が認められた。さらに、計算上で求められるせん断補強効果に加え、はりの変形を拘束することで生じる補強効果の可能性が示された。
- (3) 異方性を持たせた貼付では、貼付面積100%時は、評価式で求めた計算値以上の耐力が得られたが、貼付面積を半分にした場合には、条件によっては、シートの引張耐力が有効に発揮されず、計算値を下回った。