論文 ポバール樹脂およびポリマーセメントモルタルを用いたビニロン繊 維メッシュ巻立て工法による RC はりのせん断補強効果

伊藤 賢^{*1}·正木 守^{*2}·三宅 紀^{*3}·二羽 淳一郎^{*4}

要旨:ポパール樹脂およびポリマーセメントモルタルを用いてビニロン繊維メッシュを巻き立てた RC はり の載荷実験を行い,せん断補強効果を検討した。その結果,モルタル充填のみでメッシュとの一体化を図っ た旧工法よりも,補強効果が向上することを確認した。また,メッシュによる補強効果は,メッシュ自体の せん断抵抗力に加えて,コンクリートに対する拘束効果によるものであることを明らかにした。さらに,使 用樹脂をエポキシ樹脂,アクリル樹脂に変更して行った比較実験より,さらに接着性状を向上することで, より高い補強効果が得られることを確認した。

キーワード:ビニロン繊維メッシュ,ポバール樹脂,ポリマーセメントモルタル,補強効果,せん断

1. はじめに

近年,既設鉄筋コンクリート(以下, RC)部材の耐震 補強工法において,高強度で腐食の問題がなく,軽量な ため施工が容易であるなどの利点から連続繊維シートの 適用が増加している。しかし,連続繊維シートは一般的 に高価であり,接着に用いられるエポキシ樹脂やアクリ ル樹脂などは紫外線に弱く,施工時の天候に影響される こと,また環境ホルモンによる人体への悪影響が懸念さ れるなどの問題がある。このような背景から,ビニロン 繊維メッシュ(以下,VFM)をモルタル充填により母材 と一体化し補強を行う工法が提案された。本工法の利点 として,一般的な連続繊維シートに比べ VFM が安価で あること,破断伸びが大きいため変形性能の向上を図る ことができ,耐震補強に適していること,モルタルが紫 外線や施工時の天候から影響を受けにくく,環境ホルモ ンによる人体への影響がないことなどが挙げられる。

既往の研究として、本工法を用いて、積層使用された VFMによりせん断補強された RC はりのせん断挙動に関 する実験的研究が赤熊らにより行われた¹⁾。その結果、 積層数の増加とともにせん断耐力が増加し、変形性能も 向上することが確認された。しかし、VFM と母材コンク リートとの密着度が低いためせん断耐力が予測値を大き く下回り、また多層巻きの供試体においては VFM が隅 角部で破断するなどの問題が生じた。

本研究は、VFM をポリマーセメントモルタル(以下, PCM)およびポバール樹脂(ポリビニルアルコール樹脂) を用いて一体化する新たな工法を検討したものである。 ポバール樹脂とは、水系樹脂の一種であり、施工時の天 候に影響されにくく、環境ホルモンの懸念がないという

*1 東京工業大学 土木・環境工学科(学生会員) *2(株)富士ピー・エス技術本部(正会員) *3 ユニチカ(株)産業繊維管理室(正会員) *4 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻教授 工博(正会員)

特徴を有する樹脂であり、本研究では、この水系樹脂を 用いて VFM の密着度を高めることにより、環境に優し くかつ効果の高い補強方法を確立することを目指した。 新工法を用いて積層使用された VFM によりせん断補強 された RC はりのせん断補強効果を明らかにするため、 補強 RC はりの載荷実験を実施した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

本研究では、合計10体の試験体を作製し、載荷試験を 実施した。各試験体の詳細を表-1にまとめる。本実験 は3つのシリーズから構成されている。シリーズ1はポ バール樹脂を用いており、VFMの積層数を実験パラメー タとして作製した試験体(無補強試験体も含む)、シリー ズ2は比較用として一般的に用いられているエポキシ樹 脂およびアクリル樹脂を用いて作製した試験体、シリー

実験	試験	積屆粉	被覆モルタ	使用樹脂	
シリーズ	体名	1頁/音 妖	ルの有無		
	Ref	0	無		
	PO	0		_	
	P2	2		ポバール樹脂	
1	P4	4	右		
	P6	6	Ϋ́Ρ.		
	P8	8			
	P10	10			
2	E6	6	右	エポキシ樹脂	
	A6	6	Ϋ́Η	アクリル樹脂	
3	Old	10	有	_	

表-1 供試体一覧



ズ3は赤熊らと同様の工法で作製した試験体である。試 験体概要を図-1 に示す。引張鉄筋と圧縮鉄筋には、降 伏強度が 930N/mm²の異形 PC 鋼棒 (D23) を用い, せん 断スパン内にせん断補強筋は配置していない。なお,異 形 PC 鋼棒は緊張せず,試験体端部に定着板を設けて定 着した。また、コンクリート打込み時に型枠の四隅に1 辺 10mmの面木を設けてコンクリートを打込み,面取り を行うことで隅角部における応力集中を緩和した。試験 体打込み後は1週間程度, 散水養生を行った。養生後, グラインダーで補強部表面の研掃を行い、人力で VFM を試験体に巻き立てた。VFM 巻立て後の様子を写真-1に示す。なお、樹脂の塗布は、巻立て前と巻立て2層 ごとに行い、樹脂塗布後に脱泡ローラーを用いて VFM を試験体に押し付け、緩みの発生を抑制した。樹脂の硬 化後, PCM を左官工により試験体表面に塗布した。載荷 は図-1に示すように静的4点曲げ載荷とした。試験体 と支点の間に減摩パッドを使用することで水平反力の影 響を除去した。測定項目は、荷重、スパン中央における 鉛直変位および引張鉄筋のひずみ、等曲げ区間における 圧縮縁のコンクリートひずみとした。せん断耐力 V,,は修 正トラス理論を用い、コンクリートの分担せん断力 V_c に対する既往の式²⁾に VFM の分担せん断力 V_fを加える ことで算定した(式(1)および式(2))。

$$V = V_c + V_f \tag{1}$$

$$V_c = 0.2 f_c {}^{1/3} p_w {}^{1/3} \left(\frac{1000}{d}\right)^{1/4} \left(0.75 + \frac{1.4}{a/d}\right) b_w d \quad (2)$$

ここで、 f_c' : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)、 p_w : 引 張鉄筋比(%)、d: 有効高さ(mm)、a: せん断スパン、 b_w : 試験体幅、である。また、VFM の分担せん断力に関して は、赤熊ら¹⁾による以下の式を用いた。

$$V_f = \frac{21n_l F_t ad}{8h} \tag{3}$$

ここで、 n_l :積層数、 F_t :繊維の配向方向に力が作用した時に単位幅当たりのVFMに生じる最大引張力(以下、引張強力と称する)、h:はりの高さ、である。なお、この手法は「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³⁾」を参考にしたものである。ここで、補強材のせん断補強効率は 1.0 としてモデル化した。



写真-1 VFM の巻立て後の様子(6 層巻き)

表-2 示方配合

G_{max}	W/C	s/a	単位量(kg/m ³)				
(mm)	(%)	(%)	W	С	S	G	高性能 AE 減水剤
20	62.9	48.0	175	278	879	952	2.50

表-3 鉄筋の力学特性(規格値)

町墨 福武	公称断面積	降伏強度	引張強度	弾性係数
印色物川	(mm^2)	(N/mm^2)	(N/mm^2)	(kN/mm ²)
圧縮鉄筋	415.5	930	1080	200
引張鉄筋	415.5	930	1080	200

表-4 母材コンクリートの力学特性

試験	圧縮強度	弾性係数	試験	圧縮強度	弾性係数
体名	(N/mm ²)	(kN/mm ²)	体名	(N/mm ²)	(kN/mm ²)
Ref	41.8	28.1	P8	46.2	32.1
P0	42.3	31.7	P10	47.6	30.7
P2	43.6	30.4	E6	42.8	29.4
P4	43.5	29.7	A6	44.7	29.5
P6	47.3	33.0			

表-5 PCM の力学特性

材齢	圧縮強度 (N/mm ²)	弹性係数 (kN/mm ²)	
28 日	55.6	20.6	



2.2 使用材料

本実験で用いたコンクリートの示方配合を表-2 に, 異形 PC 鋼棒の力学特性を表-3 に示す。また,各試験 体の試験日における母材コンクリートの力学特性を表-4 に, PCM の力学特性を表-5 に,補強材として用いた VFM の形状,力学特性を写真-2 および表-6 に示す。 なお、VFM は写真-2 に示すように各方向のストランド が部材軸から 30°,90°,150°となるよう巻き立てた。 さらに,表-7 に使用した樹脂の力学特性を示した。

3. 実験結果および考察

3.1 シリーズ1:積層数の影響

(1) 破壊性状

積層数をパラメータとしたシリーズ1の実験で得られ た最大荷重,最大荷重時の変位,破壊形式を表-8に, 荷重-変位関係を図-2に示す。全ての試験体において 等曲げ区間のコンクリートの圧縮縁ひずみが終局ひずみ に達しておらず,また引張鉄筋が降伏しなかったことか ら,破壊形式はせん断破壊であったと判断される。ただ し,図-2からも分かるように破壊は脆性的ではなく, ポストピークでの荷重の低下は緩やかであった。補強試 験体の最大荷重は無補強試験体に比べ向上し,その補強 効果は積層数の増加に伴い増大することが確認された。 また最大荷重時の変位も無補強試験体より大きく,積層 数の増加に伴って向上した。

各試験体の載荷後における母材コンクリートのひび割 れ状況を図-3に示す。なお、補強試験体においてはPCM 表面と母材コンクリートのひび割れ状況の間には相違が あった。そのため、以下の各試験体の破壊プロセスに関 する考察は、荷重-変位関係と、PCM で被覆されていな い部分に生じたひび割れより推察したものである。

図-3 a)に示した Ref 試験体では、23.0kN で等曲げ区間に曲げひび割れが発生した。その後、102.4kN で破壊スパン側に斜めひび割れが、108.9kN で破壊スパン逆側に斜めひび割れが発生し、131.3kN で破壊スパン側に 2本目の斜めひび割れが発生した。その後、最初の斜めひび割れが拡幅し、せん断破壊に至った。また、図-3 b)に示した P0 試験体は 152.5kN で破壊スパン側に 2本目の斜めひび割れが発生するまでは、Ref 試験体と同様の挙動を示した。しかしその後、荷重が再度増進し 155.9kN で載荷点付近のコンクリートが圧壊し、破壊に至った。

図-3 c)から g)に示した P2 から P10 の試験体では,28 ~39kN で等曲げ区間に曲げひび割れが発生した。その後, 110kN 付近で剛性が低下した。剛性が低下した荷重付近 において,載荷点付近に斜めひび割れの発生を確認した ことから,剛性の低下は斜めひび割れ発生によるものと 考えられる。また,P4,P6,P8の試験体においては荷重

表-7 樹脂の力学特性(試験値)

樹脂の種類	引張強度 (N/mm ²)	弹性係数 (N/mm ²)	
ポバール樹脂	27	14	
エポキシ樹脂	30	2000	
アクリル樹脂	23	593	

表-8 最大荷重,最大荷重時の変位,破壊形式 (シリーズ 1)

試験体名	P_{u_exp} (kN)	δ_u (mm)	破壊形式		
Ref	131.3	6.33	せん断破壊		
P0	155.9	17.91	せん断破壊		
P2	191.3	12.11	せん断破壊		
P4	200.5	13.40	せん断破壊		
P6	235.5	16.96	せん断破壊		
P8	264.9	17.05	せん断破壊		
P10	286.8	19.34	せん断破壊		

 $P_{u exp}$:実験で得られた最大荷重, δ_u :最大荷重時の変位



が10kN程度低下し、その後再び荷重は増加した。なお、 この間に荷重増加に伴うひび割れ幅の拡幅は確認されな かった。そして、荷重が 200kN 程度で Ref と同様に 2本 目の斜めひび割れが発生し、荷重が20kN程度低下した。 その後,剛性は低下したものの再度荷重が増加する傾向 が,全ての補強試験体で確認された。最終的には,各補 強試験体は載荷点付近のコンクリートが圧壊し、せん断 破壊に至った。なお,各補強試験体の PCM においては, 200kN 程度で荷重低下が生じるまでは母材コンクリート に生じた斜めひび割れと同様のひび割れ状況であったが, 以降の荷重増進過程では母材コンクリートに比べ、より 分散したひび割れが生じ、母材コンクリートに発生した 2本の斜めひび割れに沿ってPCMの浮上がりが確認され た。また、載荷試験後に PCM を除去し、VFM の状態を 確認したところ、いずれの試験体においても VFM の破 断は確認できなかった。

(2) せん断抵抗メカニズムに関する考察

荷重-変位関係から補強試験体において,破壊に至る までに幾つかのプロセスが確認されており,複数のせん 断抵抗メカニズムが存在したものと推察される。本実験 における補強試験体のせん断抵抗力は,VFMによるせん 断抵抗力 V_f,まだひび割れていない曲げ圧縮部のコンク リートの直接的なせん断抵抗 V_u,軸方向鉄筋のダウエル 作用 V_D,ひび割れ面の骨材の噛合せ抵抗 V_I,の4つのせ ん断抵抗力の和として表されると考えられる。

斜めひび割れの発生後には、ひび割れの拡幅に伴い VFM のひずみが増大することで、VFM の分担せん断力 V_fが増加し、せん断抵抗力 Vが増大したものと予想でき る。なお、斜めひび割れの発生と同時に一部の試験体に おいて荷重が低下したのは、VFM に多少の緩みがあり、 斜めひび割れの発生後直ちに VFM が抵抗しなかったた めと推察される。その後 VFM の引張力は増加したもの の,引張強度に達する前に母材コンクリートから剥離し, 分担せん断力 V₄が一度減少した。これが、200kN 付近で 荷重低下が生じた原因と推察される。VFM は試験体に巻 き立てられているため、剥離後もひび割れ幅の拡幅に伴 いひずみが増大し、分担せん断力 V_fが増加したと推察さ れるが、ひび割れ幅の増大に伴う VFM のひずみの増加 は剥離前よりも小さかったと考えられる。そのため、ひ び割れ幅の増大に伴う骨材の噛合せ抵抗 V₁の低下分は, コンクリートの直接的なせん断抵抗 Vu へ多く再分配さ れたものと推察される。こうして、載荷点直下のコンク リートの圧壊が VFM の破断よりも先行して生じ,破壊 に至ったと推察される。また、VFM に緩みが生じると、 VFM のせん断抵抗力が発揮される前に母材コンクリー トの破壊が生じる可能性がある。

VFM の積層数が大きくなると,斜めひび割れの拡幅に 対する抵抗力が増加することから,剥離後に V_fが増加す ることに加えて,骨材の噛合せ効果の減少を抑止する効 果があると考えられる。また,圧縮部コンクリートでは VFM が拘束効果をもたらし,積層数が大きいほど圧縮部 コンクリートのみかけの圧縮強度が大きくなった可能性 がある。以上のようなせん断抵抗メカニズムによって, VFM は補強効果を発揮したものと考えられる。

(3) 新旧工法の比較

本研究と赤熊ら¹⁾による研究の結果を用いて、新工法 と旧工法の比較を行う。まず、VFM の分担せん断力を比 較する。VFM の分担せん断力の実験値 $V_{f_{exp}}$ は、PCM に よるせん断耐力の増加分を除くため、載荷試験より得ら れた各試験体のせん断耐力 $V_{u_{exp}}$ から P0 試験体のせん断 耐力 $V_{P0_{exp}}$ を差し引くことで算出した(式(4))。

$$V_{f_{exp}} = V_{u_{exp}} - V_{P0_{exp}}$$
 (4)
分担せん断力の比較を図-4 に示す。図-4 から分か



るように、本研究で得られた分担せん断力の実験値は、 赤熊らの研究の結果 1)より大きくなり, 1.28~3.65 倍と なった。次に最大荷重時の変位に着目する。図-5 に最 大荷重時の変位と積層数の関係を示す。最大荷重時の変 位は、概ね赤熊ら¹⁾の結果と等しいことが分かる。以上 の結果から、新工法は旧工法と比較して RC はりの変形 性能を維持しつつせん断力を向上させることができてお り、言い換えれば、部材剛性の低下を防ぐことができた といえる。これは、荷重-変位関係から確認できるよう に、新工法によって VFM と母材コンクリートの一体性 が向上したためと考えられる。旧工法により補強された RC はりは、荷重が増加する際、荷重低下が幾度となく 生じた。これは、積層使用された各 VFM が一体的とな って抵抗力を発揮せず、巻立て時の緩みを補正しながら 荷重が増加したためと考えられる。一方、新工法によっ て補強された RC はりは、プレピーク域における荷重低 下が比較的少ない。これは、VFM の各層が一体となって 引張力に抵抗したことによるものと考えられる。



----: 部材軸に対して 30°方向のストランド(引張力 T₁)
→ : 部材軸に対して 90°方向のストランド(引張力 T₂)
--: 部材軸に対して 150°方向のストランド(引張力 T₃)

図-6 VFM の分担せん断力の算定モデル

(4) VFM の分担せん断力の再評価

本研究から得られた VFM の分担せん断力は積層数の 増加とともに線形的に増大したものの,式(3)から求まる 計算値の34~55%の値に留まった。このことより,式(3) では VFM の分担せん断力を適切に評価できないと考え られる。そこで、計算手法の再検討を行った。式(3)は、 **図-6** に示すフリーボディにおいて修正トラス理論を用 い、斜めひび割れが載荷点と支点を結ぶ直線上に発生す る、VFM が圧縮合力と引張合力の間のみでせん断に抵抗 する,終局時に斜めひび割れを横切る VFM の応力が引 張強度に達すると仮定し、VFM の分担せん断力を評価し たものである。しかし,通常の修正トラス理論では,部 材軸と斜めひび割れのなす角度を 45° としてせん断補 強鉄筋などの補強効果を評価するのに対し、仮定では 22.7°(=tan⁻¹h/a)としており、ひび割れを横切る VFM の 本数を過大に見積もっている可能性がある。また, VFM はせん断補強鉄筋と異なり,曲げ剛性が非常に小さいこ とから、作用せん断力に対して傾斜した方向に配された ストランドは、平行に配されたストランドと同様な一軸 引張の状態にならない可能性がある。以上から、斜めひ び割れの角度を45°とする手法,作用せん断力に対して 平行なストランドのみがせん断抵抗力を発揮すると仮定



する手法,の2つの手法によりVFMの分担せん断力を 再評価した。斜めひび割れの角度を45°として再評価し た分担せん断力 V_{f1}を式(5)に,作用せん断力と平行な方 向のストランドのみが抵抗力を発揮するとして再評価し た分担せん断力 V_{f2}を式(6)に示し,実験値との比較を図 -7に示す。

$$V_{f1} = \frac{2\ln_l F_t d}{8}$$
(5)

$$V_{f2} = \frac{7n_l F_t a d}{4h} \tag{6}$$

図-7から分かるように、斜めひび割れの角度を45° とした式(5)は実験値によく対応しているが、作用せん断 力と平行なストランドのみがせん断抵抗力を発揮すると した式(6)は、実験値より60%程度高い値を示している。 ただし、載荷終了後にVFMの破断は確認されなかった ことから、VFMの引張力を引張強力により算出している ことも、実験結果を過大評価した原因のひとつと考えら れる。以上のように、修正トラス理論に用いる斜めひび 割れ角度、せん断抵抗に貢献するVFMのストランド方 向、最大荷重時に各ストランドに発生する引張力を検討 することが、VFMの分担せん断力を正しく評価するため の今後の課題として挙げられる。

(シリーズ 2)					
試験体名	P_{u_exp} (kN)	δ_u (mm)	破壊形式		
P6	235.5	16.96	せん断破壊		
E6	272.5	8.13	せん断破壊		
A6	239.7	14.33	せん断破壊		

表-9 最大荷重,最大荷重時の変位,破壊形式

P_{u exp}:実験で得られた最大荷重, δ_u:最大荷重時の変位



3.2 シリーズ2: 樹脂の種類の影響

(1) 破壊性状

樹脂の種類をパラメータとしたシリーズ2の実験より 得られた最大荷重,最大荷重時の変位,破壊形式を表-9に,荷重変位関係を図-8に示す。シリーズ2のいず れの供試体においてもシリーズ1と同様,等曲げ区間の 圧縮縁コンクリートひずみが終局ひずみに達する前に荷 重が低下し,また引張鉄筋の降伏が確認されなかった, 破壊形式はせん断破壊と判断した。エポキシ樹脂を用い た E6 試験体の最大荷重はポバール樹脂を用いた P6 試験 体の 1.36 倍の値を示したものの,最大荷重時の変位は 0.48 倍と半分程度の値を示した。一方,アクリル樹脂を 用いた A6 試験体は最大荷重,最大荷重時の変位ともに P6 と同程度の値を示した。

E6 試験体では、斜めひび割れの発生とともに剛性が低下した。その後、P6 と同程度の剛性で荷重が増加し、 272.5kN に達した時に急激に荷重が低下した。この荷重低下の後、再度荷重が増加したものの、262.8kN に達した時に載荷点下のコンクリートの圧壊が進み、荷重が低下した。

A6 試験体では,斜めひび割れの発生とともに剛性が低下し,135kNで一度荷重が低下した。その後,再度荷重が増加し,219kNで荷重が再度低下した。この荷重低下後も,他の試験体と同様に剛性の低下が見られたものの荷重の増加が見られた。その後荷重が239.7kNに達した時,載荷点直下のコンクリートの圧壊が進み,ピーク荷重を迎えた。

(2) 補強効果の比較

3 種類の樹脂を比較すると、ポバール樹脂とアクリル 樹脂を用いた試験体は、最大荷重、変形性能、破壊性状 は同程度の値、挙動を示した。一方、エポキシ樹脂を用 いた試験体は、変形性能は半減したものの、最大荷重は 他の樹脂の 1.3 倍程度まで増大した。これは、エポキシ 樹脂の弾性係数が他の樹脂に比べ大きく、VFM のひずみ 分布が斜めひび割れ直上で局所化したため部材剛性が大 きくなり、またエポキシ樹脂による VFM の母材コンク リートへの付着性状が最も良好であったため剥離までの 荷重増進が大きく、剥離時の荷重が最大荷重となったも のと考えられる。これより、さらに接着性状を改善する ことでより高い補強効果が得られると考えられる。

4. 結論

本研究ではポバール樹脂およびポリマーセメントモル タルを用いてビニロン繊維メッシュを巻き立てた RC は りの載荷実験を行い,そのせん断補強効果を検討した。 以下に得られた知見を示す。

- (1) 補強RCはりのせん断耐力はビニロン繊維メッシュの 積層数の増加とともに増大し、変形性能も積層数の 増加とともに向上した。ビニロン繊維メッシュはせ ん断抵抗力を分担することに加えて、コンクリート に対する拘束効果をもたらすことにより、その補強 効果を発揮すると考えられる。
- (2)本研究で行った工法は、モルタル充填のみによりビニ ロン繊維メッシュの一体化を図った旧工法よりもビ ニロン繊維メッシュの一体性が向上し、変形性能を 維持しつつ、せん断耐力を向上させることができる。
- (3) ビニロン繊維メッシュの分担せん断力を正しく評価 するためには、斜めひび割れ角度、ストランド方向 による抵抗力の差異、各ストランドに発生する引張 力についての検討を重ねる必要がある。
- (4) ポバール樹脂をエポキシ樹脂, アクリル樹脂で置き換 えて行った比較実験から, さらに接着性状を向上す ることで,より高い補強効果が得られることを確認 した。

参考文献

- 赤熊宏哉,梶原 勉,三宅 紀,二羽淳一郎:ビニ ロン繊維メッシュとモルタル充填により補強した RC はりのせん断挙動,コンクリート工学年次論文 集, Vol.34, No.2, pp.1261-1266, 2012.7
- 二羽淳一郎:コンクリート構造の基礎,数理工学社, 2006
- 3) 土木学会: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, pp.23-25, 2000.7