

論文 FRP シートを用いた RC 柱の耐震補強効果に関する実験的検討

土井 至朗^{*1}・松岡 茂^{*2}・益田 彰久^{*1}

要旨:RC 柱の耐震補強を目的として、紫外線硬化型樹脂を補強繊維に含浸させた複合型 FRP シートを開発し、せん断補強効果と変形性能の向上効果についての確認を行った。今回、変形性能をさらに向上させる目的で FRP シートを改良し、そのシートにより補強した柱の交番載荷実験を行い、1/16 以上の変形性能を有することが確認できた。

キーワード: RC 橋脚、耐震補強、FRP シート、

1. はじめに

近年、コンクリート構造物は経年劣化による耐力の低下や、近い将来に大きな地震の発生も予測されていることから、既設・新設にかかわらず耐震補強の需要はこれからますます大きくなると見られている。RC 部材の補強に関しては様々な技術が開発されているが、筆者らは従来型の鋼板巻立てによる補強が難しい箇所での施工が可能な、紫外線硬化型樹脂をガラス繊維とステンレスメッシュに含浸させた複合型 FRP シートを開発した¹⁾。そのシートを補強に用いることでせん断補強効果があることを確認し、また降伏変位の 5 倍以上の変形性能を有すること、ガラス繊維補強と同様の理論によりせん断補強効果の算定が可能であることを確認した²⁾。本研究では補強部材の変形性能をさらに上げるために改良した FRP シートを使用し、RC 柱の試験体で載荷実験を行いその効果を検証した。

2. 紫外線硬化型 FRP シート

実験にはせん断補強用として、ガラス繊維に紫外線硬化型のエポキシアクリレート樹脂を含浸させて製作したもの（以下 GFRP）を用いた。以下に GFRP の特徴を示す。

- 工場で予めシート状に生産されるため、現場で繊維に樹脂を含浸させる作業が必要ない。そのため品質が均一であり、性能の信頼性に優れている。

2) 樹脂は紫外線の照射によって硬化を開始し、直射日光下で 5 分、紫外線ランプによっても 20 分で完全に硬化する。

- 厚さ約 2.5mm、重量 4.8kg/m² と軽く、かつ硬化を開始するまでは非常に柔らかいため、補強対象部材の形状を問わず巻き付けることが出来、作業性に優れている。
- 遮水性・耐熱劣化性・耐熱衝撃性・電気絶縁性などに優れており、耐久性の高い RC 部材を構築することが出来る。

このため、GFRP シートの施工は人力のみで可能であり、大がかりな足場も不要である。また、硬化時間が早いため連続的な施工が可能である。

今回 GFRP シートに加え、補強材に PVA 繊維を用いた FRP シートを開発した（以下 VFRP）。PVA 繊維は単体で 10% 以上の伸度性能を持つもので、それにあわせて紫外線硬化型樹脂も改良

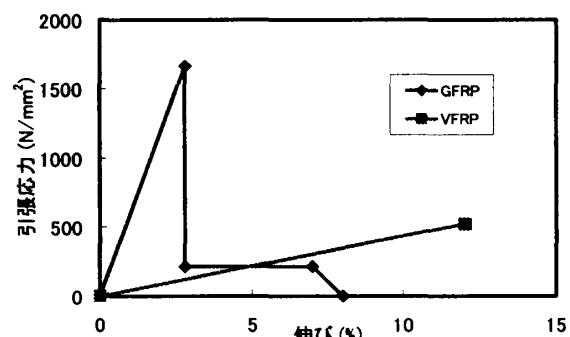


図-1 FRP シートの応力-ひずみ関係

*1 鉄建建設（株）技術センター 材料・構造グループ （正会員）

*2 鉄建建設（株）技術センター 材料・構造グループ 博士（工学） （正会員）

したエポキシアクリレート樹脂を使用した。VFRPシートもGFRPシートと同様の特徴を持ち、可搬性や加工のしやすさは変わらない。

図-1にGFRPおよびVFRPシート単体の引張試験結果を示す。引張試験はJIS K 7054「ガラス繊維強化プラスチックの引張試験方法」に準じて行った。GFRPは伸びが3%付近に達するとガラス繊維が破断し、応力が大きく低下している。その後は破断伸びがガラス繊維に比べて大きいステンレスメッシュの効果により7%近い伸び量まで応力を保持している。このことからGFRPの引張強度はガラス繊維破断時の引張応力とした。

VFRP では PVA 繊維の破断時に最大引張応力を示し、その後は応力の保持がないことからこの時点を引張強度とした。VFRP の引張強度は GFRP の約 1/3 程度であるが、伸び量ではガラス繊維破断時の 4 倍程度の性能を発揮している。両シートの性能諸元を表-1 に示す。なお表中の FRP の引張強度の特性値は、ばらつきを考慮し、危険率 2.5% を加味した値とした。

3. じん性補強効果確認実験

補強効果を確認するため、高架橋の柱をモデルとした RC 柱試験体を FRP シートで補強し、交番載荷試験を行った。図-2に試験体の概要を示す。断面寸法は $400\text{mm} \times 400\text{mm}$ と $800\text{mm} \times 800\text{mm}$ の 2 種類とした。試験体は全てせん断補強筋を持たないせん断破壊先行型である。せん断補強は GFRP のみで行い、VFRP は変形性能を上げるために使用した。GFRP の補強量は 400mm , 800mm の両試験体とも補強後のせん断曲げ耐力比が 2 前後となるように統一した。GFRP 補強によるせん断耐力の増分は式(1)により算定した³⁾。

$$V_f = A_f \cdot f_t \cdot (\sin \theta + \cos \theta) \cdot z \quad (1)$$

ここに、 V_f : 繊維シートにより受け持たれるせん断耐力、 A_f : 角度 θ で配置される単位幅あたりのシートの断面積、 θ : シートが部材角と

表-1 FRPシートの性能諸元

	GFRP	VFRP
引張強度の特性値 (N/mm ²)	1664	517
有効厚さ (mm)	0.539	0.162
破断荷重の特性値 (N/mm)	897	84
平均伸度 (%)	約 2.8	約 12.0
平均弾性率 (N/mm ²)	約 65000	約 4500

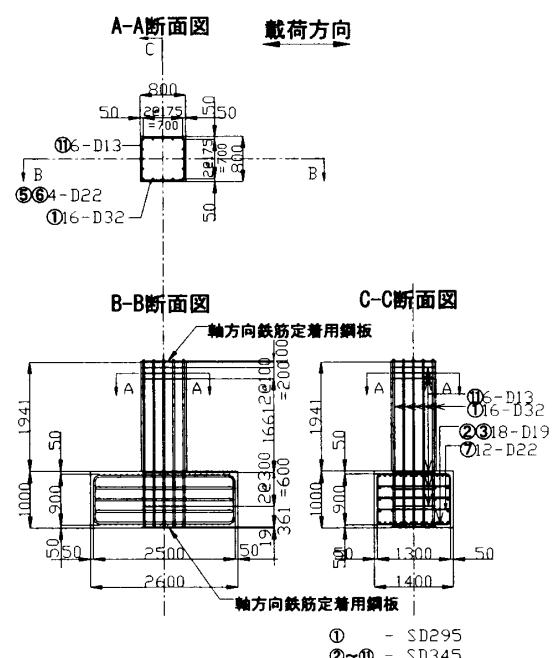


図-2 試験体概要 (800mm断面)

なす角度 (=90 度), f_t : シートの引張強度, z : 圧縮応力の合力の作用位置から引張材の図心までの距離 ($= d/1.15$) である。なお、シートの断面積は有効厚さに補強枚数を乗じたもの、引張強度は表-1 中の特性値を使用した。

筆者らが過去に行った実験²⁾において、GFRPのみの補強を施した試験体では変形が進むと柱の基部から 0.5D の高さ区間において、内部コンクリートの圧壊および軸方向鉄筋の座屈が生じ、GFRP シートが破断することが観察された。よって、この区間のコンクリートの飛び出しを抑えれば、部材の変形性能を高めることが出来ると考えられた。このことから、今回柱の変形性

表-2 試験条件一覧

試験体			試験条件				
試験体番号	断面形状 (m)	せん断 スパン比	軸力比	シート補強量 (N/mm)		VFRP / GFRP	
				GFRP	VFRP		
T1-1	0.4×0.4	3.200	0.1	721	756	1.05	
T1-2					336	0.47	
T1-3			0.2		168	0.23	
T1-4					336	0.47	
T2-1	0.8×0.8	3.067	0.1	1442	672	0.47	
T2-2					336	0.23	

能を上げる目的で使用する VFRP シートの補強区間は柱基部から図-3 に示すように 1.0D の区間とした。この VFRP の補強量を基本パラメータとして、断面寸法、軸力比による影響も調べることとした。各試験体の試験条件を表-2 に示す。表中のシート補強量とは、シートの有効厚さ (mm) × シートの枚数 × 引張強度 (N/mm²) である。載荷試験時、柱部分のコンクリートの圧縮強度は 31.2~32.6N/mm² であった。また、予め行った鉄筋の引張試験から降伏ひずみを求め、交番載荷時に引張側の鉄筋がその降伏ひずみに達した時点の変位を 1 δ とし、その整数倍の変位で正負の繰り返し載荷を行い、VFRP が破断し耐力が大きく低下した時点で載荷終了とした。

図-4 に試験から得られた荷重-変位曲線の一例を示す。同図には過去に行った GFRP のみの補強の結果も併せて示している。GFRP のみの補強では最大耐力に達した後、間もなく GFRP が破断し終局を迎えている。一方、VFRP で補強した試験体は最大耐力後も荷重が急激に落ちることはなく、シートの損傷が進むにつれて荷重が徐々に低下している。この結果より VFRP による補強が GFRP のみの補強の場合に比べて変形性能が大きく向上していることがわかる。

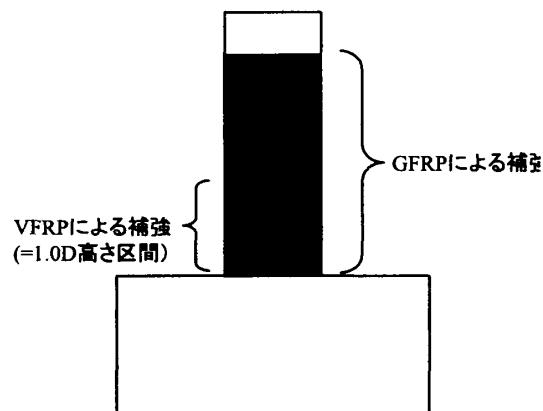


図-3 シートの補強範囲

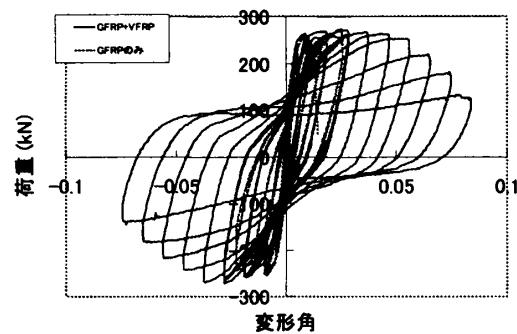


図-4 GFRP および VFRP 補強による RC 部材の荷重-変位関係

写真-1 に試験終了後の FRP シートの状況を示す。写真から分かるように柱基部の内部コンクリートの飛び出しにより VFRP シートが大

きくふくらんでいる。試験中、内部のコンクリートが膨張するとともに、シート表面には細かい亀裂が複数発生していったが、伸びが最も大きいと思われる面の中央では破断しておらず、最終的には柱コーナーの応力集中によりシートが破断する結果となった。VFRP の補強量が最も多い T1-1 の試験体では実験範囲内では VFRP シートは破断しなかったが、他の試験体ではいずれも同じような状態で破断が起きた。また、写真-2を見ると軸方向鉄筋の配置されている個所に亀裂が集中的に発生しており、VFRP により鉄筋の座屈およびコンクリートの飛び出しが抑えられていることがうかがえる。また、いずれの試験体でも GFRP シートには内部のコンクリートの損傷、またはシートの浮き上がりによると見られる変色は見られたが、柱基部から 1.0D 区間より上の GFRP のみの補強区間では、シート表面に亀裂や破断は発生しなかった。

変形性能は全ての場合で軸方向鉄筋降伏時変位 δ_y の 7 倍以上を示しており、VFRP による補強は高い変形性能の向上効果があることが確認された。特に T1-1 の場合には変形が δ_y の 10 倍以上に達しても破壊せず、高い変形性能を示している。表-3 に実験結果の一覧を示す。この結果より、VFRP の補強量の違いは最大耐力には寄与していないことが分かる。また表中の終局変位は、実験から得られた正負それぞれの実験終了時の変位のうち小さい値とした。その変形量から求めた変形角と VFRP の補強量との

表-3 試験結果一覧

試験体番号	断面形状 (m)	軸力比	最大荷重 (kN)	終局変位 δ (mm)
T1-1	0.4×0.4	0.1	261.7	88.5
T1-2			271.1	83.5
T1-3			268.2	70.0
T1-4		0.2	306.8	79.8
T2-1	0.8×0.8	0.1	1031.2	95.9
T2-2	1021.6	66.9		

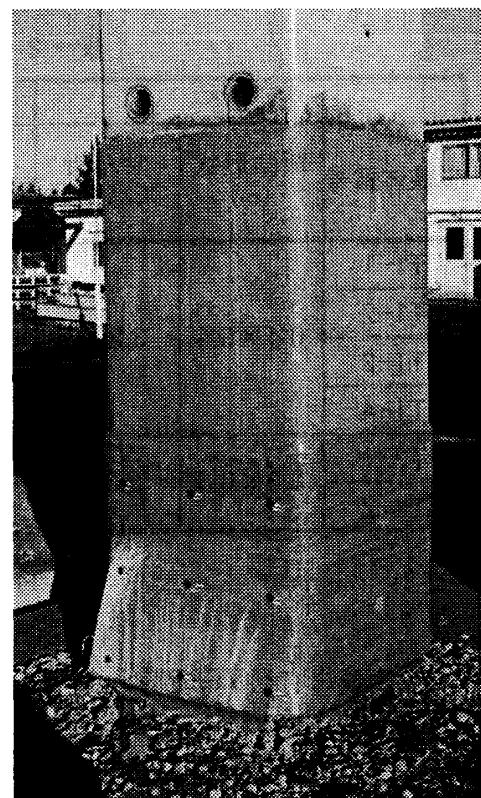


写真-1 試験終了後の VFRP 破断状況

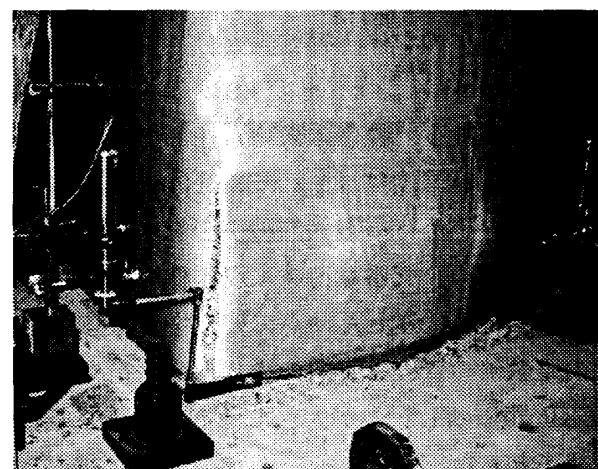


写真-2 VFRP の損傷状況

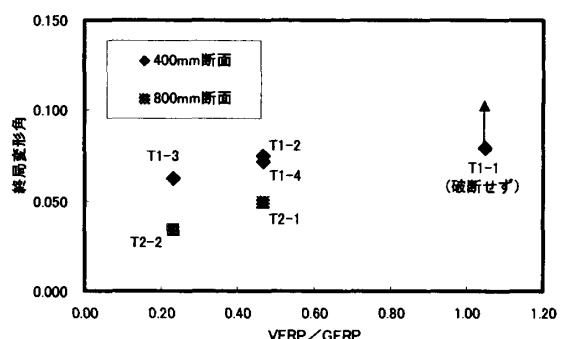


図-5 VFRP と GFRP の補強率と終局変形角との関係

関係を示したものを図-5に示す。これによると部材寸法について若干の依存性が見られるがVFRP補強量と変形量の相関性を認めることが出来る。また軸力比の高いT1-4試験体では、補強量の同じT1-2と比べると大きな差異は認められなかった。

4. FRPによるじん性補強の評価

実験より得られたGFRPおよびVFRP補強部材における水平荷重と変位の関係をモデル化したもののが図-6に示す。

GFRP補強部材では、最大荷重に達した後シートは柱基部の圧壊を抑えられずに早い段階で破断に至り、この時点で水平荷重に対する抵抗性を失う。それに対し、VFRP補強部材ではシートに損傷が発生しても急激な破断には至らず、最大値以後も水平荷重は変位が進行しても徐々に低下しながら抵抗性を保持する。試験の結果として、終局時の荷重が降伏荷重を下回ったのはT1-2の1例のみであった。

このようにVFRP補強部材の変形性能はGFRPによるせん断補強との複合効果により鋼板巻き補強部材と同様の変形形態を示している。そこで、部材の変形性能算定式(2)からじん性率を算定した³⁾。また、最大荷重以降の変形性能についてはVFRP部材の特性による寄与が大きいと考え、終局変位を算定する際に曲げ降伏耐力・せん断耐力・せん断スパン・軸力比のパラメータを加えた式(3)を用いてじん性率を算定し³⁾、VFRP補強による変形性能の適用性の検証をこころみた。

$$\mu = \delta_u / \delta_y \quad (2)$$

ここに、

μ ：じん性率

δ_y ：降伏変位（軸方向引張鉄筋が降伏する時点の水平変位）

δ_u ：終局変位（降伏荷重を下回る時点

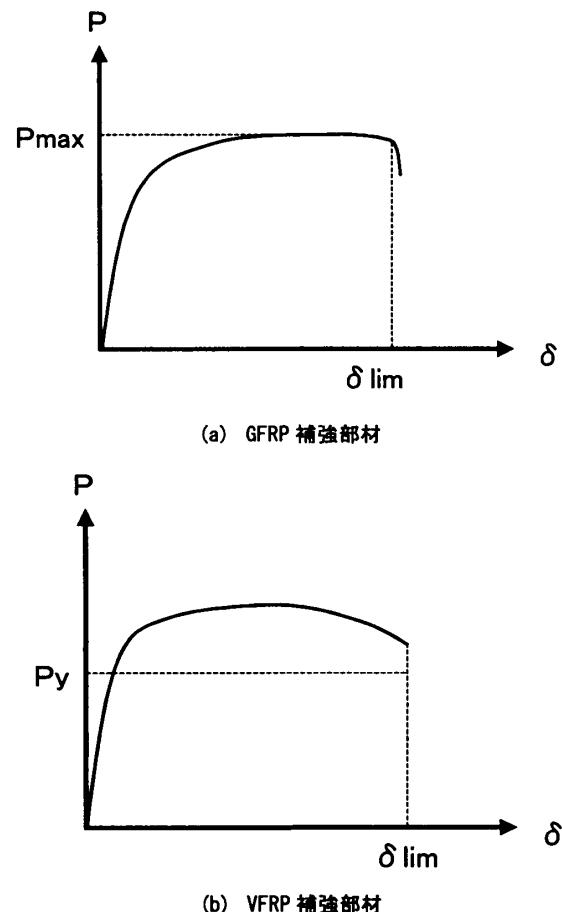


図-6 FRP補強部材のモデル化した
変形性能

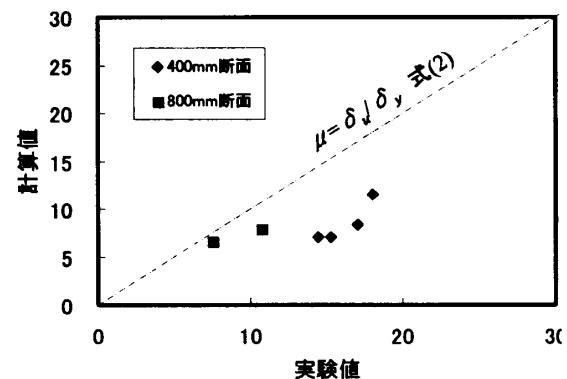


図-7 VFRP補強部材じん性率の実験値と
計算値との関係

の最大水平変位)

$$\delta_u = k \cdot (2.3 \cdot V_{Fy,d} \cdot l_a / M_{y,d} + 4.3) \cdot (1 - 0.5\eta) \cdot \delta_y / \gamma_{bsc} \quad (3)$$

ここに、

V_{Fyd} : VFRP 補強部材の設計せん断耐力³⁾

l_a : せん断スパン

M_{yd} : VFRP 補強材の設計曲げ降伏耐力

η : 軸力比（軸方向圧縮応力度／コンクリートの圧縮強度）

γ_{bsc} : 部材係数(=1.0)

k : 安全係数(=1.0) である。

なお補強部材の降伏変位 δ_y は、補強材の影響を無視した RC 断面とした³⁾。終局変位 δ_u は部材係数 γ_{bsc} 、安全係数 k とともに 1.0 とした⁴⁾。

式(3)から求められた VFRP 補強部材のじん性率の計算値と実験値との関係を、式(2)から算定した値と合わせて図-7 に示す。なお、実験終了時に降伏荷重を下回らなかった試験体の実験値については、表-3 中の終局変位を用いた。これによると VFRP で補強した部材の実験値は、式(2)による算定値を上回っていることが確認できる。よって、鋼板巻き補強等の部材の変形性能の評価算定と同時に、VFRP 補強部材のじん性能を安全側で算定できることを確認できた。

5. まとめ

紫外線硬化型 FRP シートによる RC 柱部材の耐震補強により、補強部材の曲げ降伏後の変形性能を確認する実験を行い検討した結果、以下の知見を得た。

- 1) GFRP によってせん断補強した RC 柱の基部 1.0D 区間を VFRP 補強することにより、補強部材の変形性能を向上させることが出来る。
- 2) VFRP によるじん性補強性能は、鋼板巻き補強などの部材の変形性能算定と同様な評価法により安全側に算定することが出来る。

以上のように、特性の違う GFRP シートと VFRP シートをそれぞれ適所に適用し、併用することで高性能な補強 RC 部材を実現することが出来た。これらのシートの補強率を変えることで要求される部材性能に合わせた補強を行うことが出来る。また、VFRP は伸び能力が高いため、耐震補強以外にも変形が大きい箇所の補修・補強などに適用の可能性があると考えられる。今後はコスト縮減・施工性の確認などを行なながら、適用性の拡大を目指す所存である。

参考文献

- 1) 岩田秀治、丹間泰郎、下村勝、松岡茂、渡辺忠朋:劣悪な施工条件に対応可能な新しい高性能な橋脚等の耐震補強法、第 6 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、pp.215-220,2003.
- 2) 益田彰久、丹間泰郎、岩田秀治、渡辺忠朋:FRP シートによる RC 橋脚のせん断補強効果に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.25, No.1, pp.1541-1546, 2003.
- 3) 鉄道総合技術研究所:既設鉄道コンクリート高架橋柱等の耐震補強設計・施工指針 FRP 吹付け補強編、1996.11
- 4) 鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物)、1992.