

2

伸び性能に優れたタフシートによる耐震補強工法の開発

土井 至朗^{*1}・松岡 茂^{*2}・益田 彰久^{*1}

概 要

R C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ビニロン繊維を用いたタフシートを開発し、そのシートにより補強した柱の交番載荷試験を行い、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：R C橋脚，耐震補強，FRPシート

DEVELOPMENT OF A SEISMIC RETROFIT METHOD USING TUF-SHEET
EXCELLENT IN ELONGATION CAPABILITY

Shiro DOI^{*1} Shigeru MATSUOKA^{*2} Akihisa MASUDA^{*1}

Abstract

For the purpose of seismic retrofit of reinforced concrete columns, a composite FRP sheet was developed. This sheet has reinforcing fibers impregnated with ultraviolet curing resin. The authors verified the contribution of this sheet to the improvement of shear strength and deformation capability. TUF-Sheet with vinylon fibers was recently developed to further improve the deformation capability and subjected to alternating loading tests. As a result, deformation capability of 1/16 or more was verified.

Keywords: reinforced concrete pier, seismic retrofit, FRP sheet

*1 Material / Structure Group, Engineering Technology Center, Engineering Division

*2 Manager, Material / Structure Group, Engineering Technology Center, Engineering Division

伸び性能に優れたタフシートによる耐震補強工法の開発

土井 至朗*¹・松岡 茂*²・益田 彰久*¹

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柱の試験体で載荷試験を行いその効果を検証した。

2. 紫外線硬化型FRPシート

試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。GFRPは、①品質が均一である。②紫外線の照射により硬化を開始する。③作業性、可搬性に優れる。④遮水性・耐熱劣化性・耐熱衝撃性・電気絶縁性などに優れる、などの特徴を有している。

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、硬化時間が早いので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き張強度とした。VFRPの引張強度はGFRPの約1/3程度である

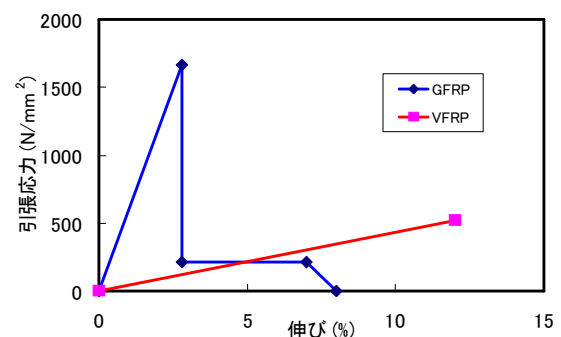


図-1 タフシートの伸び性能

*1 エンジニアリング本部 技術センター 材料・構造グループ

*2 エンジニアリング本部 技術センター 材料・構造グループ・リーダー

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試験

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400mm×400mmと800mm×800mm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($z=d/1.15$)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試験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伸び性能の高いシートで抑えれば、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、今回柱の変形性能を上げる目的で使用するVFR

表-1 タフシートの性能

	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

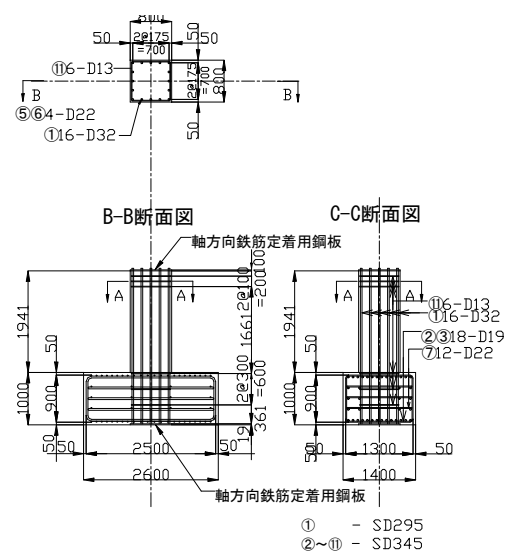


図-2 試験体概要

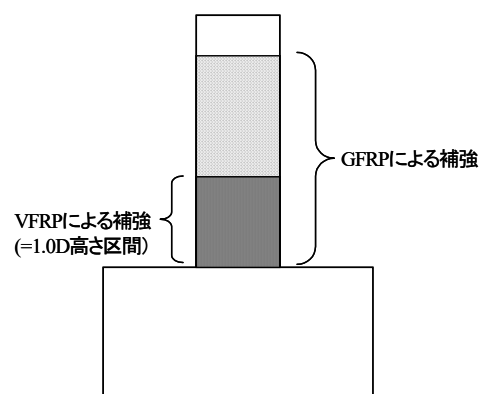


図-3 タフシートの補強範囲

P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にした。各試

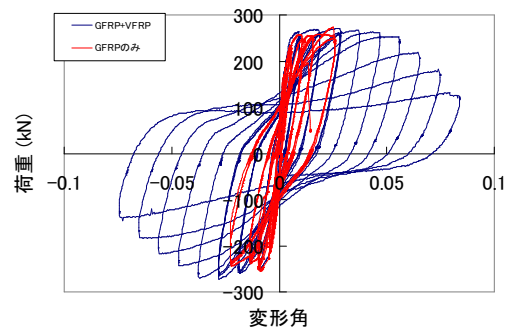
表－２ 試験条件一覧

試験体			試験条件				試験結果	
試験体番号	断面寸法 (m)	せん断 スパン比	軸力比	シート補強量 (N/mm)		VFRP / GFRP	最大荷重 (kN)	終局変位 δ (mm)
				GFRP	VFRP			
T1-1	0.4×0.4	3.200	0.1	721	756	1.05	261.7	88.5
T1-2					336	0.47	271.1	83.5
T1-3					168	0.23	268.2	70.0
T1-4			0.2		336	0.47	306.8	79.8
T2-1	0.8×0.8	3.067	0.1	1442	672	0.47	1031.2	95.9
T2-2					336	0.23	1021.6	66.9

験体の試験条件および試験結果を表－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。

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



図－４ 荷重－変位曲線



写真－１ 試験終了状況

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の試験体ではジャッキの能力範囲内では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、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。いずれの試験体でも柱基部から1.0D区間より上の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、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。前掲表-2に示した試験結果より、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、試験から得られた正負それぞれの試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

前掲の表-2および図-5から、VFRPの補強量の違いは最大耐力にはほとんど影響していないが、変形性能との相関性は認めることが出来た。そこで、VFRPの補強量を考慮した各試験体の荷重-変位関係の算定を試みた。骨格曲線のモデルは図-6に示すように、ひび割れ点(C点)、軸方向鉄筋の降伏点(Y点)、最大荷重を維持できる最大変位点(M点)、降伏荷重を維持できる最大変位点(N点)の4点を持つテトラリアモデルとした⁵⁾。各点における曲げモーメントはFRPの影響を無視しRC断面として算定し、M点、N点の部材角はGFRPおよびVFRPの補強量を帯鉄筋比に換算することによりF

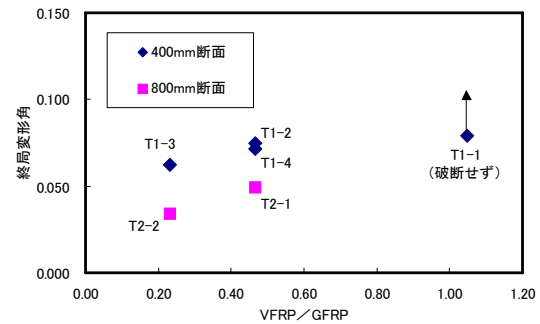


図-5 変形角とVFRP補強量の関係

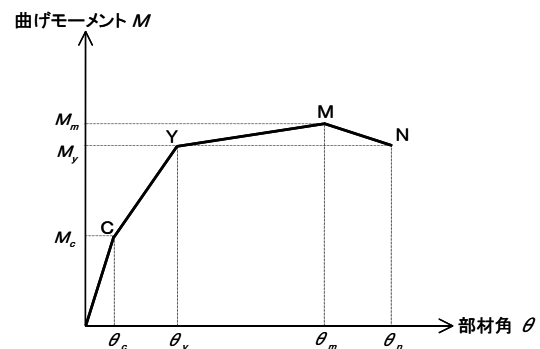


図-6 骨格曲線

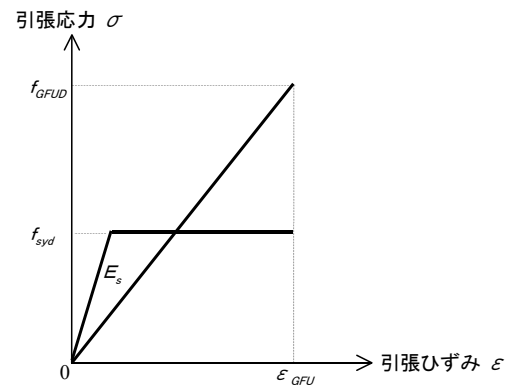


図-7 鉄筋、シートの引張エネルギー

RPによる補強効果を考慮した。

コンクリートの飛び出しが起きる以前のM点の変形性能は、VFRPではなくGFRPによる補強の影響を受けると考えられる。そこで、図-7に示すようにGFRPの破断時ひずみ量 ε_{GFRP} におけるGFRP変形によるエネルギーと、鉄筋が同じひずみ量まで変形したときのエネルギーとが同等となる鉄筋量を求め、その鉄筋量から帯鉄筋比に換算し、回

転角を算定する式中に代入した。また、N点での変形性能はVFRPの補強量の影響を受けることからM点と同様にしてVFRPの補強量を帯鉄筋比に換算し、その値をM点の塑性ヒンジの回転角の算定式中の帯鉄筋比と置き換えた。以上のようにして求めたM点、N点の変形角と実験値を比較したものを図-8、9に示す。M点、N点ともに計算値は実験値に対し近似もしくは安全側の値を得ることが出来た。

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試験を行った結果、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) FRPによるじん性補強性能は、FRPの補強量を帯鉄筋比に換算すること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いながら、適用性の拡大を目指す所存である。

参考文献

- 1) 岩田秀治ほか：劣悪な施工条件に対応可

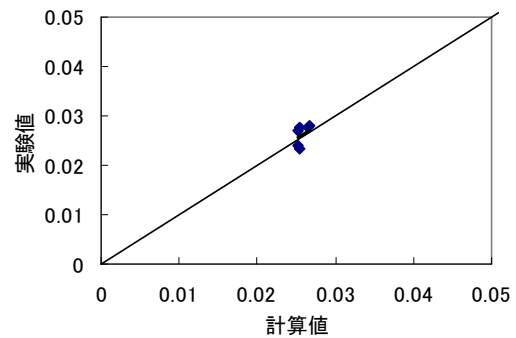


図-8 M点の変形角

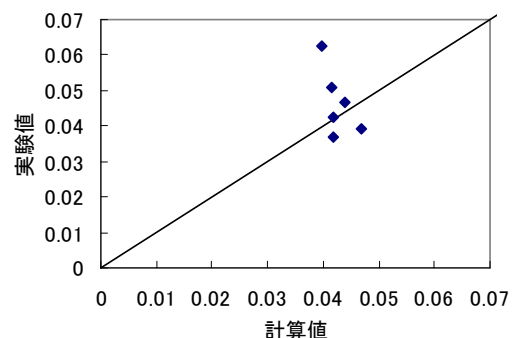


図-9 N点の変形角

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) 益田彰久ほか：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.
- 5) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，pp. 141-149