

伸び性能に優れた紫外線硬化型FRPシートによる 耐震補強効果に関する研究

益田彰久¹・岩田秀治²・下村 勝³・松岡 茂⁴

¹正会員 鉄建建設株式会社 技術研究所（〒286-0825 千葉県成田市新泉9-1）

²正会員 博(工) 東海旅客鉄道株式会社 技術開発部（〒485-0801 愛知県小牧市大山1545番地33）

³正会員 東海旅客鉄道株式会社 新幹線鉄道事業本部（〒100-0005 東京都千代田区丸の内1-9-1）

⁴正会員 工博 鉄建建設株式会社 技術研究所（〒286-0825 千葉県成田市新泉9-1）

1. はじめに

既存RC構造物の耐震性能向上を目的とした補強対策は、耐震基準の改定・社会的要求から依然として重要な施策であり、各地・各事業者によって今現在も数多く実施されている。また、近年は新設構造物に対する社会資本投入は減少傾向にあり、既設構造物を有効に生かす補強対策工は今後も大きな需要が見込まれている。

RC部材の耐震補強工法としては鋼板巻き補強やRC巻立て補強が、現状では一般的に採用されている。しかしながら、施工空間が狭隘である場合には重機等を使用することができないため人力施工に頼らざるを得ず、その場合、鋼板などの重量物を設置することは非常に困難である。一方、炭素繊維をはじめとする繊維巻き付け補強では人力施工が可能であるが、含浸樹脂が硬化するまで時間を要し、所要の強度を持つ補強体を速やかに築造する必要がある場合には適用に問題がある。

以上のような問題に対応できる補強工法として、筆者らは紫外線硬化型FRPシートを用いた耐震補強工法を開発している¹⁾。このFRPシートによる補強を施した実物大RC部材の載荷試験により、所要のせん断耐力向上を実現し、せん断破壊先行型のRC部材を曲げ降伏先行型へと性能を向上させることができることを確認している。また同試験より、じん性能についても降伏変位の5倍程度の変形量を示す結果を得た。

しかしながら、構造物の使用目的によっては、部材に対しさらに高い変形性能を要求される場合も想定され、鋼板巻き補強と同程度の性能を示す、新た

な補強工法の開発が望まれている。この度、紫外線硬化型FRPシートによる耐震補強の適用性拡大を目的として、FRPシートの伸び性能に着目し、高い伸び性能を有する補強材を開発した。また、改良したFRPシートを用い、RC高架橋柱をモデルとした試験体によって正負交番載荷試験を実施し、そのじん性補強効果を確認・検討した。

2. 紫外線硬化型FRPシートについて

筆者らが耐震補強用の補強材料として開発している巻き付け用シートは、補強材としてガラス繊維とステンレスメッシュを用い、これに紫外線硬化型のエポキシアクリレート樹脂を含浸して製作した、複合材FRPである（以下これをGFRPと呼ぶ）。このGFRPシートは次のような特徴を有している。

- 1) 工場ですみ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の必要がない。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はじめて硬化し始め、直射日光下で5分、紫外線ランプによっても20分程度で完全に硬化する。
- 3) 厚さ約2.5mm、重量4.8kg/m²と軽く、かつ硬化以前に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でき、作業性に優れている。
- 4) 遮水性・耐熱劣化性・耐熱衝撃性・電気絶縁性等に優れており、耐久性の高いRC部材を構築することができる。

このため、GFRPシートの巻き付けには重機のよ

うな大きな設備は必要とせず、人力のみで施工が可能であり、大掛かりな足場も不要である。また硬化時間が早いため、連続的に速く施工することが可能である。

今回新たに開発した紫外線硬化型FRPは、単体で10%以上の伸度性能を持つPVA（ポリビニル・アルコール）繊維を補強材として用いている。また、紫外線硬化型樹脂も繊維の伸びに追従できるよう、改良したエポキシアクリレート系のものを採用した（以下これをVFRPと呼ぶ）。予め工場にてシート状に加工できることはGFRPと同様であり、その結果、VFRPシートはGFRPシートと同様の特徴を持ちながらも、非常に高い伸び性能を有するFRPとなった。

図-1にGFRP・VFRPそれぞれのシート単体を、JIS K 7054「ガラス繊維強化プラスチックの引張試験方法」に準拠して引張試験を行った引張試験結果を示す。GFRPは3%近い伸び量を示したところでガラス繊維が破断し、耐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。以上のことから、ガラス繊維破断時の引張応力をGFRPの引張強度としている。

一方の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、この時点点を引張強度としている。VFRPの引張強度はGFRPの約1/3（繊維の有効厚さを乗じた引張破断荷重での比較では約1/10）程度であるが、伸び量では12%近い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、FRPの引張強度はばらつきを考慮し、危険率2.5%（ 2σ ）を加味した値を引張強度の特性値とした。

3. 紫外線硬化型FRPシートによるじん性補強効果

(1) 変形性能確認試験

GFRPおよびVFRPシート補強によるRC部材曲げ降伏後の変形に関する性能を確認するため、高架橋の柱をモデルとしたRC試験体により正負交番載荷試験を実施した。

試験体は、図-2に示すようにせん断スパンにはせん断補強鉄筋を全く配していない、せん断破壊先行型のRC柱部材である。高架橋柱を想定し、断面寸法を800mm×800mmとしたもの、また1/2縮小断面として400mm×400mmとしたのものと、2種類を用

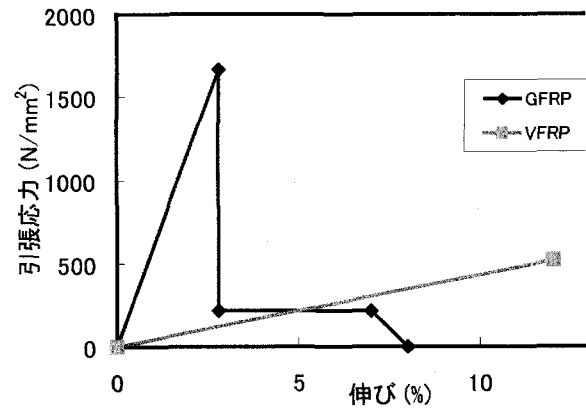


図-1 紫外線硬化型FRPの応力－ひずみ関係

表-1 紫外線硬化型FRP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

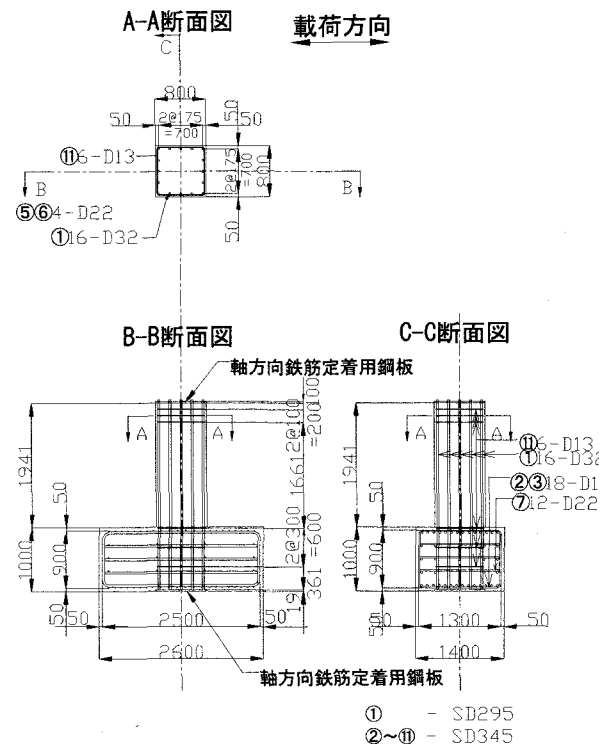


図-2 変形性能確認試験体（80cm角断面）

表-2 GFRP 補強による変形性能試験一覧

試験体		試験条件						試験結果	
番号	寸法 (m)	軸力比	曲げ耐力 (kNm)	せん断耐力 (kN)	シート補強量 (N/mm)	せん断曲げ 耐力比	ガラス繊維と ステンレスメッシュとの 破断エネルギー比率	最大変位値 / 降伏変位値	最大変形角
C4-1	0.4×0.4	0.1	263	114	268	1.18	1.03	7 δ_y	1/29
C4-2		0.1	269	116	394	1.48	0.56	7 δ_y	1/39
C4-3		0.2	327	117	566	1.58	1.28	8 δ_y 以上	1/23
C8-1	0.8×0.8	0.1	2164	362	898	1.63	1.19	7 δ_y	1/36

VFRPは前項で述べたように破断荷重が小さく、せん断補強に対しての効果は低い。そこで、せん断補強はGFRPにて対応することとし、すべての試験ケースでのせん断スパン内にGFRPを巻き付けている。

(2) GFRPによるじん性補強効果確認試験結果

試験は表-2に示すように部材寸法・せん断曲げ耐力比・軸力比をパラメータとして、4体実施した。

すべての試験ケースで、軸方向鉄筋降伏時変位の7倍に相当する変位量以上に達する結果を得た。写真-1にGFRP補強シートの破断状況を示す。破断したシート内側のコンクリートが粉碎しており、軸方向鉄筋は外側に向かって湾曲している。これはコンクリートが損傷しシート破断部からコンクリートが飛び出したために軸力が鉄筋に集中し座屈したものである。よって、この現象を回避するにはコンクリートの飛び出しを防止すればよく、そのためには補強シートの伸び性能を高め、コンクリートの飛び出しによる膨らみにシートが追従できるようにすればよいと考えられる。

GFRPの特性としては、ガラス繊維とステンレスメッシュを補強材とした複合体であることから、GFRPシートが破断する際には、各々の補強材が破断性能に影響を与えると考えられる。図-3はガラス繊維・ステンレスメッシュを単体として含んだ場合の補強シートが破断までに吸収するエネルギーのイメージを示したものである。ガラス繊維の特性としては、変形量は小さいものの破断強度が大きいので、主にせん断耐力の補強に大きく寄与していると考えられる。一方、ステンレスメッシュの特性としては、破断強度は小さいものの、大きな変形に対して引張力を保持できるため、ガラス繊維が破断した後の変形性能に寄与するものと考えられる。その複合効果が図-1に示すGFRPシート単体の引張試験結果となって現れている。本試験では試験体にGFRPを巻き付ける際、ガラス繊維とステンレスメッシュの含



写真-1 GFRP 破断状況 (C8-1)

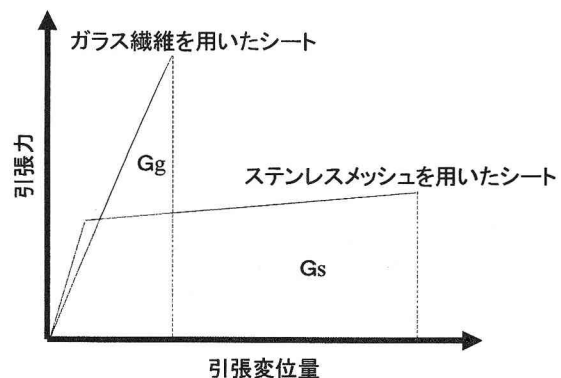


図-3 GFRP 破断時エネルギーの考え方

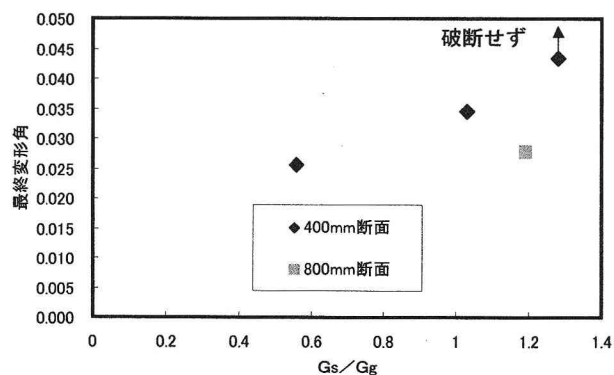


図-4 GFRP 補強によるガラス繊維・ステンレスメッシュのエネルギー比率と最終変形角との関係

表-3 VFRP 補強による変形性能試験一覧

試験体		試験条件					試験結果	
試験体番号	断面形状 (m)	軸力比	せん断スパン比	GFRP補強量 (N/mm)	VFRP補強量 (N/mm)	VFRP / GFRP	最大変位値 / 降伏変位値	最大変形角
T1-1	0.4×0.4	0.1	3.200	721	756	1.05	10δ _y 以上	1/9
T1-2		0.1	3.200	721	336	0.47	9δ _y	1/12
T1-3		0.1	3.200	721	168	0.23	7δ _y	1/16
T1-4		0.2	3.200	721	336	0.47	11δ _y	1/12
T2-1	0.8×0.8	0.1	3.067	1442	672	0.47	8δ _y	1/19
T2-2		0.1	3.067	1442	336	0.23	9δ _y	1/19

有量の比を意図的に変えている。ガラス繊維・ステンレスメッシュの持つエネルギー比率Gs/Ggを算出し、最大変形量と比較した結果を表-2および図-4に示す。これより、ステンレスメッシュのエネルギー比率が大きくなると変形性能も大きくなっている傾向を見出すことができ、相互の材料特性の長所が生かされ、複合材として高性能化されていることがわかる。特に、エネルギー比率が最も大きなC4-3試験体では軸方向鉄筋降伏時の8倍以上の変位を示し、最終的には軸力が不安定になることなく水平方向ジャッキを押し切る結果となった。このように、高い伸び性能を示す補強材を使用することにより、補強部材の変形性能を向上することができる可能性を確認した。

(3) VFRPによるじん性補強効果確認試験

GFRP補強部材の载荷試験より、柱基部から約0.5Dの高さ区間において、内部コンクリートの破壊による飛び出しおよび軸方向鉄筋の座屈が発生し、補強シートが部材内部から膨張されることによって破断することが観察された。また、この膨張による破断を抑制することによって、終局変位量をさらに大きくできる可能性を得た。そこで、せん断補強としてGFRP補強を施したRC部材に、柱基部から1.0Dの高さ区間のみにVFRPを巻き付けた試験体によって、正負交番载荷試験を行った。試験は表-3に示すように部材寸法・軸力比・VFRPとGFRPとの補強量の比をパラメータとして、6体実施した。GFRPによる補強量はいずれも同一としている。

図-5に試験より得られた荷重－変位関係を示す。これにはGFRPのみによる補強の試験結果も併せて示してある。GFRP補強では最大耐力からそれほど荷重が低下しないうちにシートが破断し、間もなく終局を迎えている。一方、VFRPでは最大耐力を示

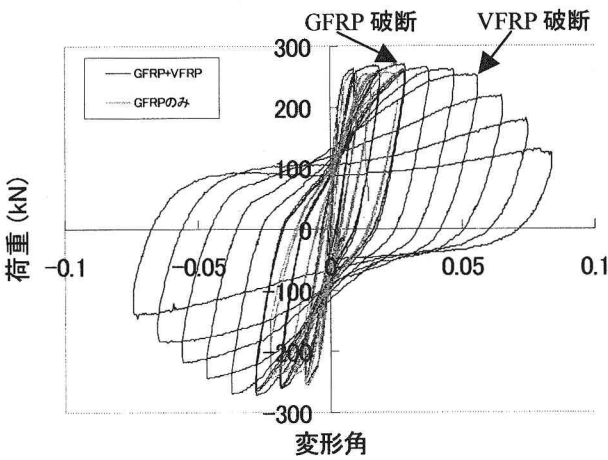


図-5 GFRP および VFRP 補強による RC 補強部材の荷重－変位関係

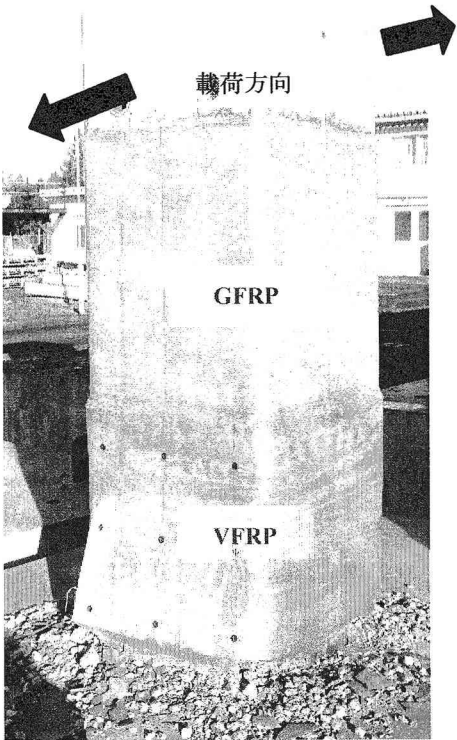


写真-2 VFRP 破断状況 (T4-1)

した後、シートの損傷および破断が進行するにつれて徐々に荷重が低下していることが大きな特徴となっている。この結果、GFRP補強のみで得られた最大変位角に対し、VFRP補強を施したものは最大変位角が大きく増加していることがわかる。

載荷終了後におけるVFRPシートの状況を写真-2に示す。内部のRC部材の破壊によるコンクリートの飛び出しによりVFRPシートが大きく膨らんでいる様子が確認できる。シートの平面部には多数の亀裂が見られるがいずれも破断にはいたっておらず、最終的にはコーナー部の応力集中によりVFRPシートが破断している。このように、次々と亀裂が生じるといったシートの性能が、部材耐力が急激に減少しないという効果を生みだしていると考えられる。

表-3に示す結果から、変形性能はすべての場合で軸方向鉄筋降伏時変位の7倍以上を示しており、補強部材は高い変形性能を有していることが確認された。特にVFRPの補強率が大きいT1-1の場合には降伏時変位の10倍に達しても破壊せず、高い変形性能を示している。正負変形から得られる変形量うち小さい値を終局の変形量とし、VFRPとの補強量との関係を表したものを図-6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、主にVFRP補強量と変形量との相関性を認めることができる。

3. 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すると図-7のようになると考えることができる。

すなわち、GFRPではシートの損傷後早い段階で破断に至り、よってGFRP補強部材としては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はシートに損傷が発生しても急激な破断に至らず、VFRP補強部材としては水平荷重は最大値以後も徐々に低下しながらも抵抗性を保持する。試験の結果として、終局時の荷重が降伏荷重を下回ることは、6体実施した試験のうち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補強部材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。そのうち、最大荷重以後の変形性能については主にVFRP部材の特性に大きく依存していると考えられる。そこで、鋼板巻き補強等の部材の変形性能算定式(1)と、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により精度を高めた式(2)に対する、VFRP補強による

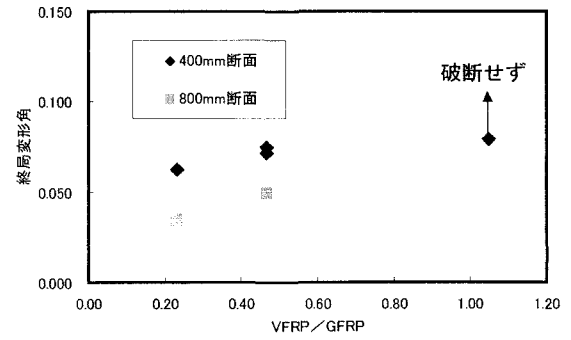
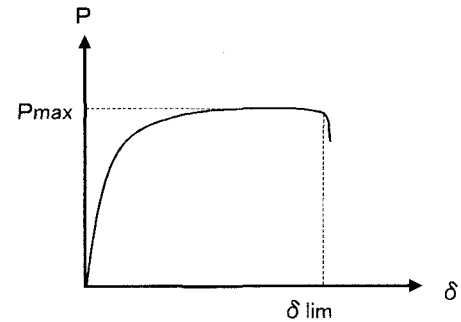
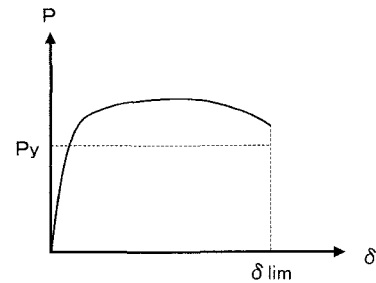


図-6 VFRP と GFRP の補強率と終局変形角との関係



(a) GFRP 補強部材



(b) VFRP 補強部材

図-7 FRP 補強部材のモデル化した変形性能

変形性能の適用性の検証を試みた。

$$\mu = \delta_u / \delta_y \quad (1)$$

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の最大水平変位)

$$\delta_u = k \cdot (2.3 \cdot V_{fyd} \cdot l_a / M_{yd} + 4.3) \cdot (1 - 0.5\eta) \cdot \delta_y / \gamma_{bsc} \quad (2)$$

ここに,

V_{fyd} : VFRP 補強部材の設計せん断耐力

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 とも 1.0 とした⁴⁾.

VFRP補強部材のじん性率の実験値と計算値との関係を図-8に示す. これによるとVFRPで補強した部材の実験値は, 評価式(1)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様に, VFRP補強部材のじん性能を安全側で算定することができることを確認した.

4. 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シートによる耐震補強では, 降伏時変位に対し5倍程度の変形性能を確保する.
- 2) GFRPによってせん断補強したRC柱のフーチング付け根部分1.0Dの高さ区間をVFRP補強することにより, 補強部材の変形性能を向上することができる.
- 3) VFRPによるじん性補強性能は, 鋼板巻き補強等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できる.

以上のように, GFRPとVFRPを併用することにより, 高性能な補強RC部材を実現することができた.

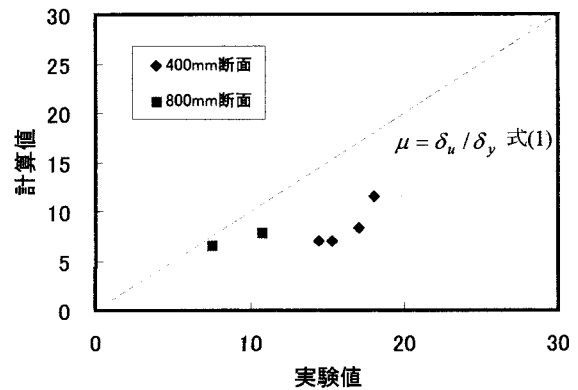


図-8 VFRP 補強部材じん性率の実験値と計算値との関係

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・補強等に適用の可能性があると考えられる. 今後はコスト削減・施工性の確認等を行いながら, 適用性の拡大を目指す所存である.

参考文献

- 1) 岩田秀治, 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: 鉄道構造物等設計標準・同解説 (コンクリート構造物), 1992.
- 4) 鉄道総合技術研究所: 既存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