

論文 AFRP シートで補強した鋼製ブラケット付きラーメン橋脚横梁の正負交番載荷試験

中島 規道^{*1}・篠崎 裕生^{*2}・三上 浩^{*3}・睦好 宏史^{*4}

要旨：落橋防止用鋼製ブラケットが付属するラーメン橋脚横梁を模した RC 梁にアラミド繊維シート補強を施し，正負交番載荷試験を実施した。この中で，ブラケットを有する上下非対称な梁においてもアラミド繊維シートによる正負両方向の補強が可能であること，部分的な4面全周補強の付与がせん断補強性能の確保に効果的であること等を明らかにした。

キーワード：ラーメン橋脚，鋼製ブラケット，アラミド繊維シート，せん断補強，交番載荷

1. はじめに

都市部の幹線交通網で一般的な高架橋ラーメン橋脚は，面内方向の地震時保有水平耐力の照査は省略され，面外方向力に対する柱部の補強のみ行われてきた。その後，不静定構造物の非線形領域の研究が進み，面内方向の地震動に対する横梁補強の必要性が生じてきている。

ラーメン橋脚横梁は，連続繊維シート補強が有効であるが，上面および側面に支承や落橋防止装置が設置されているなど施工条件に制約があるため，支障物を避けて不完全な補強を行わざるを得ないのが現状であった(図-1参照)。

筆者らは，これら部材全体の補強が困難な構造物を対象としたアラミド繊維シート(以下，AFRPシート)補強工法の開発を進め，側面のブラケットは一定のせん断補強効果を有すること，側面と底面のみを AFRP シートで補強した上下非対称な3面補強でも補強効果を期待できること，補強区間の30%程度を4面全周補強とすることで全閉合と同等の耐力となることなどを明らかにし，設計手法の検討を進めている^{1)~3)}。

本試験は，鋼製ブラケット付き横梁の効率的な AFRP シート補強方法の検討を目的とし，ブラケットの設置数，非設置部4面補強のシート層数をパラメーターとした鉄筋コンクリート梁

(以下，RC 梁)の正負交番載荷試験を行い，せん断補強効果を試験的に検討した。

2. 試験概要

2.1 試験体

試験体の形状・寸法を図-2に示す。試験体は，幅300mm，高さ300mmの矩形断面とした。

補強鉄筋は，軸方向の曲げ補強筋のみとし，引張側と圧縮側に，SD345-D32をそれぞれ4本使用した。加力は，支点間距離2800mm，載荷点間距離800mmの2点集中載荷とした。支点および載荷点には幅100mmの載荷板を使用した。

試験体の形状・寸法および載荷方法は，筆者らがこれまで行ってきた RC 梁のせん断補強を対象とした諸試験の緒元を参考に定めた。断面分割法で計算した曲げ耐力は，541kN，土木学会示方書⁵⁾で計算したせん断耐力は193kNで，両者の比となるせん断余裕度は0.36である。

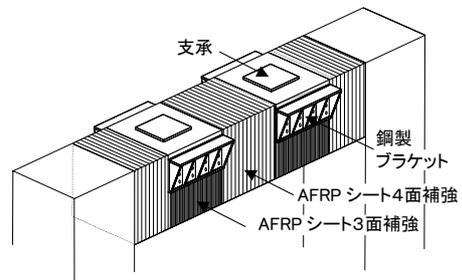


図-1 ラーメン橋脚横梁の概要

*1 三井住友建設(株) 技術研究所 工修 (正会員)

*2 三井住友建設(株) 技術研究所 (正会員)

*3 三井住友建設(株) 技術研究所 工博 (正会員)

*4 埼玉大学工学部 (フェロー)

2.2 補強方法

鋼製ブラケットおよび AFRP シートの貼付方法を図-2 に示す。

鋼製ブラケットは、既往の研究²⁾を参考にして、ベースプレートと補剛リブ全体をモデル化した鋼板(以下、ブラケット)とした。実構造におけるブラケットの配置は様々であるが、せん断スパン 1000mm 区間に 1 枚または 2 枚設置するものとした。鋼板の寸法は、幅 300×高さ 100×厚さ 3.2mm であり、梁幅に対する比は、それぞれ 1.0×0.3×0.02 である。

ブラケット下部は、AFRP シート 1 層で 3 面補強を行った。シートは、端部を 300×30mm の鋼板に定着した後に厚さ 6mm のブリッジプレートを介してブラケットに接続した。ブラケットおよび AFRP シート端部は、エポキシ樹脂、およびφ10mm のアンカーボルトを、それぞれ 6 本および 5 本使用して固定した。

せん断スパンのブラケット非設置部は AFRP シート 1 層($\rho=0.19\%$)または 2 層($\rho=0.38\%$)で 4 面補強を実施した。せん断スパン全長に対する 4 面補強区間の比は、66%および 33%である。

試験体の一覧を表-1 に示す。交番载荷の試験体数は、ブラケットの設置数、および非設置区間の補強量を変えた 3 体(B1,B2,B3)とした。さらに、基準試験体(N)、ブラケットのみの試験体(A1,A2)、AFRP シートのみの 4 面補強とした試験体(F)の 4 体について一方向単調载荷でせん断耐力を確認し、併せて検討を行うものとした。

2.3 使用材料

AFRP シートの機械的性質を表-2 に示す。AFRP シートは、高弾性タイプの一方向シートを使用した。AFRP シートの貼付は、一般的な常温硬化型のエポキシ樹脂を使用して、従来の繊維補強工法と同様の手順で実施した。ブラケットの設置に際しても同一のエポキシ樹脂を使用した。また、鋼材の材料特性値を表-3 に、試験時のコンクリート強度を表-4 にそれぞれ示す。

2.4 交番载荷方法

交番载荷方法を図-3 に示す。加力は、変位

表-1 試験水準

試験体	载荷方法	ブラケット区間		AFRP 補強比 ρ %		
		設置 (3 面)	非設置 (4 面)	設置 (3 面)	非設置 (4 面)	全体平均
N*	単調	—	—	—	—	—
A1	単調	1	2	0.0	0.0	0.0
A2	単調	2	1	0.0	0.0	0.0
B1	交番	1	2	0.19	0.38	0.32
B2	交番	2	1	0.19	0.38	0.25
B3	交番	2	1	0.19	0.19	0.19
F	単調	—	全区間	—	0.19	0.19

*文献 4) より引用, () 内 AFRP 補強方法

表-2 アラミド繊維シート

耐力 kN/m	目付け g/m ²	設計厚 mm	弾性係数 kN/mm ²	引張強度 N/mm ²
588	415	0.286	118	2060

表-3 鋼材の機械的性質

	降伏強度 N/mm ²	弾性係数 kN/mm ²
補強鉄筋	410	199
鋼板 (ブラケット)	267	206

*SS400 の規格値

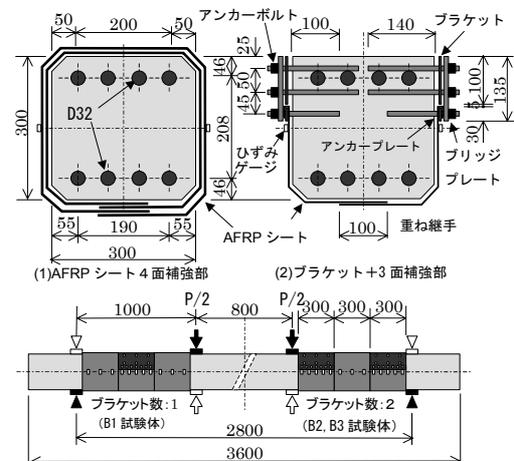


図-2 試験体形状・寸法

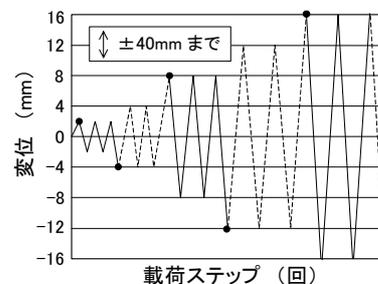


図-3 载荷ルール

±4.0mm を基準としてその整数倍に増加させる変位制御で最大変位±40mm まで実施した。なお、ブラケットの設置により断面形状が上下非対称

であることから、繰返し数を 2.5 回として新たなステージにおいて変位を増加させる際に初回の加力方向を交互に反転させ、加力方向が耐荷性状に与える影響を軽減させることとした。

2.5 測定項目

AFRP シートのひずみは、補強区間の側面にひずみゲージを貼付し、梁軸直角方向の値を計測した(図-2 参照)。シートひずみおよび変位の測定は、梁全高の 1/2 の位置で行った。さらに、等曲げモーメント区間中央の引張鉄筋ひずみおよびコンクリートひずみについても計測を行った。

3. 試験結果

3.1 破壊状況

試験結果の一覧を表-4 に示す。ブラケットのみの A1 および A2 試験体の最大荷重は、斜めひびわれの発生により、それぞれ 214kN および 239kN となった。基準試験体の耐力は、224kN であり、ブラケット 1 枚の A1 試験体で-5%、2 枚の A2 試験体で+7%の耐力差となり、配置によりせん補強効果が期待できない場合があることが明らかとなった。

AFRP シートを付加した B1 から B3 の各試験体は、曲げ破壊に移行し、AFRP シートのみでせん断区間全体を 4 面補強とした F 試験体の耐力 550 kN とほぼ同等の値を示した。ブラケット配置の違いによる最大荷重の差は、3%以下の僅かな値であった。同様に、各試験体の正方向と負方向の異方性も明確に認められなかった。

破壊時の AFRP シートの剥離状況を図-4 に示す。ブラケット 1 個を配置した B1 試験体は、ブラケットを中心として広範囲なシートの剥離が認められる。ブラケット 2 個の B2 試験体は、載荷点側のブラケットと 4 面補強の境界部に集中した剥離領域が認められる。ブラケット非設置部の 4 面補強の層数が少ない B3 試験体は、B2 試験体に比して剥離範囲が大きくなり、最終的に境界近傍のシートの破断が認められた。

シート撤去後に観察した斜めひびわれの発生状況を一例を図-5 に示す。ブラケット数によ

表-4 試験結果

試験体	f'c N/mm ²	P _y kN	P _{max} kN		δ _{max} mm		破壊状況
			正側	負側	正側	負側	
N	38	—	224	—	6.9	—	せん断
A1	37.0	—	214	—	6.1	—	せん断
A2	37.0	—	239	—	6.7	—	せん断
B1	42.4	499	548	544	22.3	40.2	曲げ
B2	42.1	501	541	548	23.7	40.2	曲げ
B3	42.3	511	546	529	24.1	29.4	曲/せん
F	40.4	543	550	—	27.0	—	曲げ

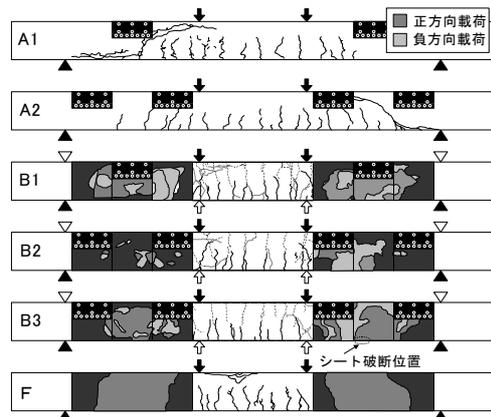


図-4 AFRP シート剥離状況

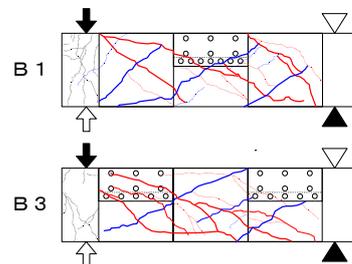


図-5 斜めひびわれ発生状況

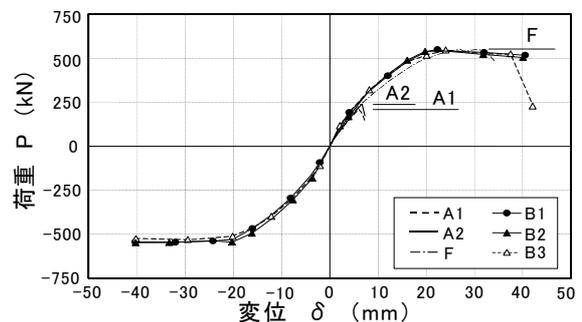


図-6 荷重-変位関係

り斜めひびわれの発生状況が異なり、特に載荷点と支点を結ぶ主要な斜めひびわれの交差位置に差が生じていることが認められる。さらに、両試験体とも副次的な斜めひびわれの発生が認められ、斜めひびわれの発生以降 AFRP シート

がひびわれの開口を抑制し、効果的にせん断力を負担していることが確認された。

3.2 荷重 - 変位関係

各試験体の荷重-変位関係を骨格曲線として図-7に示す。AFRP 補強の各試験体は、ブラケットのみの試験体の斜めひびわれ発生荷重以降、徐々に剛性低下傾向を示しつつ耐力が増加している。斜めひびわれ発生から最大荷重までの変形量は、4面補強の F 試験体よりも若干小さくなっているが、正方向の荷重で比較を行っているため、引張側に配置されたブラケットの影響で曲げ変形が抑制されたためと推測される。

正方向の耐力は、主鉄筋が降伏ひずみに達した後、変位 24mm 付近で最大値を示した。以降の曲線は、F 試験体とほぼ同様に緩やかな荷重低下とともに変位が増進し、主鉄筋の降伏による曲げ変形が卓越していることが確認されたため、交番荷重は変位 40 mm で中止とした。

負方向の挙動は、正方向とほぼ同様の履歴曲線となっており、鉄筋降伏後の荷重低下が明確でない傾向のみが僅かな違いとなっていた。

3.3 荷重 - AFRP シートひずみ関係

変位±24mm における AFRP シートひずみの一覧を表-5に示す。表中のひずみは、各計測値を載荷点側、せん断スパン中央、支点側の各 300mm 区間の平均値として表示した。B1 および B2 試験体は、載荷点側とスパン中央部のひずみが全体的に大きな値となっている傾向が認められる。一方、4面補強を1層とした B3 試験体は、中央の4面補強部のみが特に大きな値を示した。

せん断スパンの梁軸方向のひずみ分布の一例を図-7に示す。ブラケット配置や4面補強の層数に寄らず、ブラケットと4面補強の境界である 350mm 近傍の計測点で突出したひずみが認められる。前述の剥離領域と対応して、境界部に損傷が蓄積している傾向が示されている。

境界部近傍の AFRP シートひずみの包絡線を図-8および図-9に示す。シートひずみは、剥離の影響などにより値が大きく変動しているが、両図は一時的なひずみの減少を省いた骨格

表-5 AFRP シートひずみ ($\delta = \pm 24 \text{ mm}$)

試験体	ブラケット配置	正			負		
		計測 区間			計測 区間		
		1	2	3	1	2	3
B1	2	3650	4795	2619	3976	3661	1383
B2	1,3	4412	4115	1296	3366	3728	1985
B3	1,3	2105	7159	2379	1898	5905	2916
F	0	6981	9156	430	-	-	-

1 : 載荷点側, 2 : せん断スパン中央, 3 : 支点側

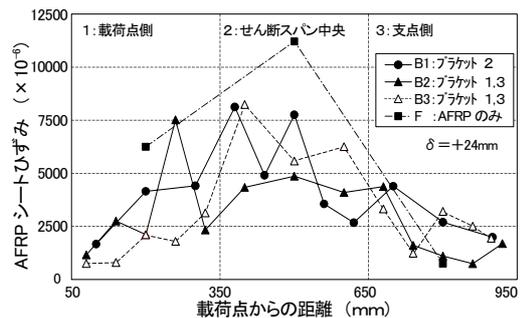


図-7 AFRP ひずみ分布

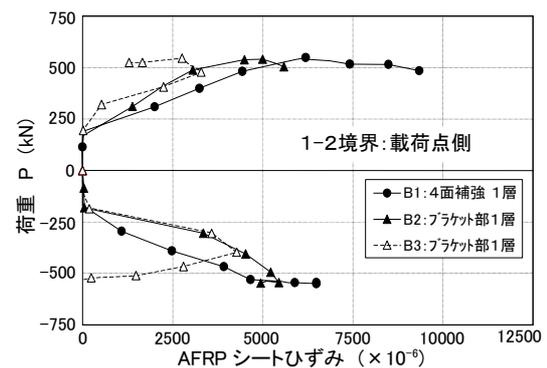


図-8 AFRP ひずみの包絡線 (載荷点側)

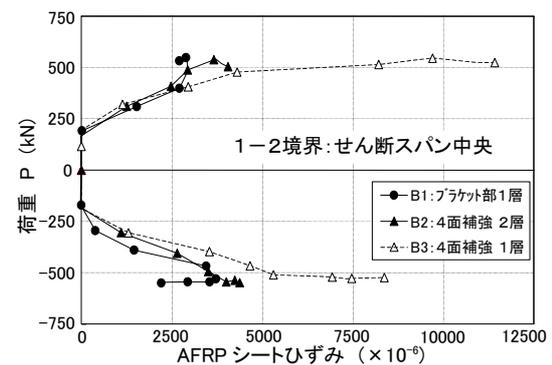


図-9 AFRP ひずみの包絡線 (中央側)

曲線として表示した。図-8に示す載荷点側の境界では、ブラケットを有する B2 および B3 試験体のひずみの挙動が正負で異なり、負方向荷重において-260kN 程度の荷重段階からひずみが大きくなる傾向が認められる。

図-8の中央側の境界では、ブラケットを有するB1およびB2試験体の正負の異方向性は明確に認められなかった。しかしながら、4面補強が1層のB3試験体のひずみは、最大荷重近傍で急増傾向を示し、最大ひずみは $12,000 \times 10^{-6}$ 程度と規格破断ひずみの70%程度に達していた。

総じて、載荷点寄りにブラケットが配置されている場合、境界部近傍の損傷の蓄積が顕著であることが認められ、AFRPシートによる耐力の増進と正負の耐荷性状の対称性を勘案すると、ブラケットとシートの接続、およびブラケット非設置部の4面補強が、効果的なせん断補強方法として寄与したものと推測される。

4. せん断補強効果

4.1 分担力の算定方法

試験結果からブラケットとAFRPシートそれぞれが分担するせん断力を、式(1)に示す単純な加算則を仮定して算出を試みるものとした。

鋼製ブラケットの負担するせん断力は、Aシリーズの試験体の最大せん断力から基準となるN試験体の最大せん断力を減じて算出した。この際、コンクリート強度がせん断力に与える影響は、式(2)を用いてN試験体との比を算出して補正した。

AFRPシートの分担力は、同様にBシリーズの試験結果から、対応するAシリーズの試験体の最大せん断力を減じて算出した。なお、交番試験の結果は、平均を取り表記した。

コンクリートおよびAFRPシートのせん断力の計算値は、式(2)および式(4)に示す土木学会の算定方法⁵⁾⁶⁾より求めた。この際、シートの補強量は、既往の知見³⁾により、ブラケット部の3面補強1層のみを全体の補強量として使用した。

ブラケットの負担力は、分散した部分的な配置であり直接的な算定手法が存在しないが、式(3)に示す鉄骨鉄筋コンクリート部材のせん断耐力算定方法⁷⁾を準用してせん断スパン全体に一樣な鋼板が設置された場合の上限値を算出し、定量的な算定の可否を検討するものとした。

表-6 せん断力の試験値

試験体	ブラケット	AFRP層	Vc kN	Vpl kN	Vaf kN	V kN	破壊形式
N	—	—	112	—	—	112	せん断
A1	1	—	110	-3.0	—	107	せん断
A2	2	—	110	9.5	—	120	せん断
B1	1	2	115	-3.0	162	274	曲げ
B2	2	2	115	9.5	148	273	曲げ
B3	2	1	115	9.5	144	269	曲/せ
F	0	1	113	—	162	275	曲げ
計算*	2	1	115	54.2	174	343	せん断

* : B2試験体

$$V = V_c + V_{pl} + V_{af} \quad \dots (1)$$

V_c : コンクリートの分担するせん断力

V_{pl} : ブラケットの分担するせん断力

V_{af} : AFRPシートの分担するせん断力

$$V_c = \beta_d \cdot \beta_p \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b \quad \dots (2)$$

$\beta_d = (1/d)^{1/4}$, ただし, $\beta_d \leq 1.0$

$\beta_p = (100 \rho_w)$, ただし $\beta_p \leq 1.5$

$f_{vcd} = 0.2 (f'_c)^{1/3}$, ただし $f'_c \leq 75 (\text{N/mm}^2)$

b_w = 腹部の幅, d = 有効高さ, ρ_w = 引張鉄筋比

$$V_{pl} = f(s) \cdot V_{sy} \quad \dots (3)$$

$V_{sy} = f_{vy} \cdot t_w \cdot Z_w / \gamma_b$

$f(s) = 2.7 + 0.16 \cdot k - 0.68(a/d)$

ただし, $0.6 \leq f(s) \leq 2.5$,

f_{vy} : 鋼板のせん断降伏強度, $f_{vy} = f_{syk} / \sqrt{3}$,

f_{syk} : 鋼板の降伏強度, t_w : 鋼板の厚さ

Z_w : 鋼板の幅, k : 鋼板比, ただし, $1.0 \leq k \leq 7.0$

a : せん断スパン, ただし, $1.0 \leq a/d \leq 3.5$

$$V_{af} = K \cdot A_{af} \cdot f_{af} (\sin \theta + \cos \theta) z / \gamma_b \quad \dots (4)$$

$K = 1.68 - 0.67R$ ただし, $0.4 \leq K_2 \leq 0.8$

$R = (\rho_{af} \cdot E_{af})^{1/4} \left(\frac{f_{af}}{E_{af}} \right)^{2/3} \left(\frac{1}{f_{af}} \right)^{1/3}$ ただし, $0.4 \leq R \leq 0.8$

K_2 : シートのせん断補強効率, $z = d / 1.15$

A_{af} : シートの断面積, $\rho_{af} = A_{af} / (b_w \cdot s_{af})$

s_{af} : シートの配置間隔, θ : 補強角(90°)

f_{af} : シートの引張強度, E_{af} : シートの弾性係数

4.2 せん断力の分担状況

試験結果から求めたせん断力分担の一覧、およびB2試験体に関しての計算結果の一例を表-6に示す。さらに、せん断力の分担状況の実験値と計算値の比較を図-10に示す。

A シリーズの試験結果から求めたブラケットの分担力は、若干の耐力上昇が確認された A2 試験体においても 10kN 程度であるのに対して、計算上の値は 54kN と大きく乖離しており、耐力を危険側に評価する結果となっている。

B シリーズ試験結果から求めた AFRP シートの分担力は、F 試験体の分担力にほぼ等しく、B2 試験体と B3 試験体の差異もブラケットの分担力にほぼ相当する僅かな値となっている。F 試験体における AFRP シートの実験値と計算値の比は 0.93 程度であり、曲げ破壊先行であるものの、せん断破壊と比較的接近した結果であったと判断できる。これにより、B シリーズの 4 面補強部の 2 層目を考慮せず、ブラケット部の 3 面補強 1 層の AFRP シートのみを補強量とした算定手法は、ほぼ妥当であったと推測される。

総じてブラケットの効果を算定することの有意性が認められない結果となった。これは、本試験ではブラケット部で損傷の集中傾向があり、せん断耐力の増加効果はほぼシートに起因していたためと推測される。実際のラーメン橋脚におけるブラケット配置は様々なものがあり、本試験結果のように効果が明確に認められない場合も勘案すると、ブラケットと AFRP シートの連結補強と、部分的な 4 面補強の併用を条件とし、AFRP シートのみでせん断補強量を算出することが合理的であると判断される。

5. まとめ

鋼製ブラケットを有するラーメン橋脚横梁を模した RC 梁にアラミド繊維シート補強を施し、正負交番載荷試験を実施した。本試験で得られた知見を以下に記す。

- (1) 上下非対称な鋼製ブラケット付き RC 梁においても、アラミド繊維シートにより正負両方向の補強を行うことが可能である。
- (2) 鋼製ブラケットとアラミド繊維シートの接続、および 4 面補強の付与により、破壊形式を曲げ破壊に移行させることが可能である。

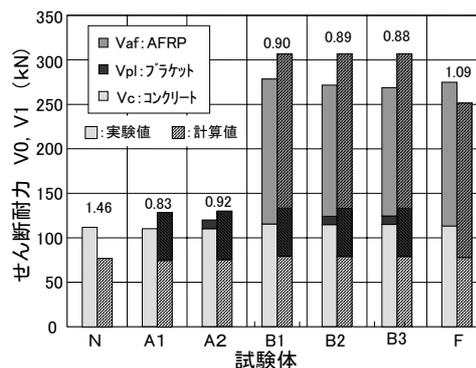


図-10 せん断力分担の比較

謝辞

本研究の実施するに際してご協力いただいた埼玉大学建設材料工学研究室、並びにファイベックス(株)の諸氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 中島ほか：AFRP シートを用いた U 字型と部分閉合補強を併用した RC 梁のせん断耐荷性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.27，No.2,pp.1519-1524,2003
- 2) 篠崎ほか：側面にブラケットを有する橋脚横梁のアラミド繊維シート補強工法，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.28,No.2, pp 1537-1542, 2006
- 3) 中島ほか：AFRP の 3 面補強と 4 面補強を併用してせん断補強した RC 梁の正負交番載荷試験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.28,No.2,pp.1453-1458,2006
- 4) ASHRAF ほか：Shear upgrading of reinforced concrete beams with externally bonded composite sheets，日本コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 24, No.2, pp.1537-1542,2002
- 5) 土木学会編：コンクリート標準示方書，構造性能照査編,2002
- 6) 土木学会編：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，コンクリートライブラリー101,2000
- 7) 村田ほか：鉄骨鉄筋コンクリート部材のせん断耐力,土木学会論文集,No.626,1-48,pp207-218,1997.7