

# 論文 FRP シート下面接着 RC 梁のせん断耐力に及ぼす主鉄筋降伏の影響

三上 浩\*1・岸 徳光\*2・藤田 学\*3・澤田 純之\*4

**要旨:** 本研究では, FRP シートを下面に接着したせん断破壊によって終局に至る RC 梁の耐荷性状の検討を目的として, FRP シートを下面接着したせん断補強筋を有しない RC 梁の静載荷実験を実施した。検討は, 無補強時に曲げ破壊する RC 梁およびせん断破壊する RC 梁に, それぞれ FRP シートを 0~4 層接着した全 10 体を用いて静的 4 点曲げ載荷実験により行った。その結果, 下面接着シートの補強効果は, 主鉄筋降伏の有無により大きく異なることが明らかになった。

**キーワード:** RC 梁, アラミド繊維シート, せん断破壊, 主鉄筋降伏

## 1. はじめに

近年, 既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物を対象にした補修・補強工事に連続繊維シート (以後, FRP シート) を用いた接着工法が多く採用されている。これまで FRP シートを用いて RC 部材を補強する際の合理的な補強設計手法の確立を目的に, 諸研究機関において FRP シートで補強した RC 部材を用いた数多くの実験検討が行われてきた。その中で, 押し抜きせん断破壊で終局に至る RC 版を対象として FRP シートを下面接着する場合は, 三次元的な挙動を示すためシート接着が耐荷性状に与える影響は十分には把握されていないのが現状である。

著者らは, 道路橋床版を FRP シートで下面接着した際の疲労寿命算定に必要な押し抜きせん断耐力を把握することを目的として, 種々の検討を行ってきた<sup>1)~3)</sup>。その結果, 1) FRP シートの引張剛性と耐力増分は線形比例関係になく, 補強効果には上限があること, 2) 主鉄筋が降伏しやすい RC 版ほど FRP シートの補強効果が大きく出現すること, 等を明らかにしている。しかしながら, RC 版を用いた実験では, ひび割れの進展状況等の確認が不可能であるため, 耐荷性状やシートの剥離性状は未だ十分には明らか

かになっていない。

そこで本研究では, 主鉄筋量の異なる AFRP シートを下面接着したせん断破壊によって終局に至る RC 梁を用いて, 主鉄筋の降伏がシートの補強効果に与える影響を実験的に検討した。

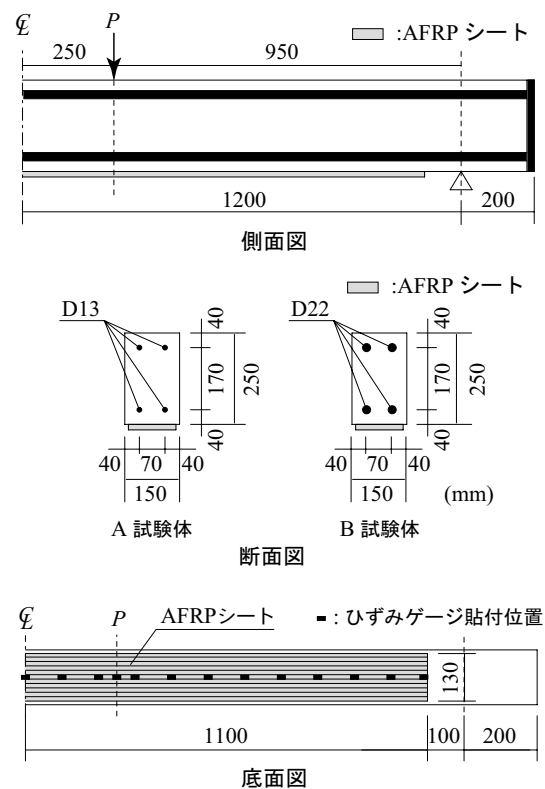


図-1 形状寸法, 配筋状況および補強概要

\*1 三井住友建設 (株) 技術研究所 主席研究員 博 (工) (正会員)  
 \*2 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科教授 工博 (正会員)  
 \*3 三井住友建設 (株) 技術研究所 土木研究開発部長 博 (工) (正会員)  
 \*4 室蘭工業大学 工学部 建設システム工学科 研究員 博 (工) (正会員)

表－1 試験体一覧

試験体名	軸方向鉄筋	補強層数	曲げ耐力 (kN)	せん断耐力 (kN)	せん断余裕度
A-S0	D13	無補強	40.3	51.4	1.27
A-S1		1層	68.5		0.75
A-S2		2層	86.6		0.59
A-S3		3層	100.0		0.51
A-S4		4層	110.4		0.47
B-S0	D22	無補強	112.4	74.5	0.66
B-S1		1層	133.0		0.56
B-S2		2層	149.3		0.50
B-S3		3層	162.7		0.46
B-S4		4層	173.9		0.43

表－2 AFRP シートの力学的特性値

目付量 (g/m <sup>2</sup> )	厚さ (mm)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	破断ひずみ (%)
415	0.286	118	2.06	1.75

## 2. 試験体概要

図－1には、本実験に用いた RC 梁の形状寸法、配筋状況および補強概要を示している。試験体は、断面寸法 (梁幅 × 梁高) 15 × 25 cm、純スパン長 2.4 m、軸方向鉄筋に D13 または D22 を上・下端に 2 本ずつ配置した複鉄筋矩形 RC 梁である。なお、試験体にはせん断破壊先行とするため、せん断補強筋を配置していない。

曲げ補強シートの補強範囲は、梁幅方向に 13 cm、梁軸方向には梁中央部から両支点の 10 cm 手前までとしている。なお、シート接着部のコンクリート表面には付着性能の向上に有効であるショットブラスト処理 (処理深さ 1 ～ 2 mm) を施している。また、シート上には、検長 10 mm のひずみゲージをスパン中央部から両支点側に 10 cm 間隔および載荷点直下に貼り付けている。

表－1には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体は、軸方向鉄筋を 2 種類、シート層数を無補強を含む 5 種類に変化させた全 10 体の RC 梁である。表中、試験体名の第

一項目は軸方向鉄筋の種類 (A : D13, B : D22)、第二項目の S に付随する数値は補強層数を示している。また、表には曲げ耐力、せん断耐力およびせん断余裕度を示している。せん断余裕度は、せん断耐力を曲げ耐力で除した値であり、1.0 を下回る場合には計算上せん断破壊することを示している。なお、曲げ耐力は平面保持を仮定した断面分割法を用いて、上縁コンクリートの圧壊ひずみを 3,500  $\mu$  として算出した。また、せん断耐力はコンクリート標準示方書<sup>4)</sup>に準拠し、シート補強を無視して算出している。本実験に用いた試験体は、無補強時に曲げ破壊し、FRP シートで下面接着を行うことによりせん断破壊に移行することが予想される試験体 (A 試験体) と、無補強時および補強後もせん断破壊が予想される試験体 (B 試験体) の 2 種類である。

実験時のコンクリートの材齢は 56 日、平均圧縮強度  $f'_c = 26.1$  MPa であった。また、軸方向鉄筋 D13, D22 の降伏強度はそれぞれ  $f_y = 386$  MPa,  $f_y = 384$  MPa であった。表－2には、AFRP シートの力学的特性値の一覧を示している。

## 3. 実験結果

### 3.1 荷重－変位関係

図－2には、各試験体の荷重とスパン中央変位 (以後、単に変位) の関係を断面分割法を用いて算出した計算結果と比較して示している。図中の計算結果は A 試験体では全試験体について示しているが、B 試験体では、いずれも主鉄筋降伏前にせん断破壊していることより、B-S0 試験体の結果のみを示している。なお、図－3には図－2より得られる最大荷重  $P_{max}$  および最大荷重時変位  $\delta_{max}$  と補強層数の関係を示している。

図－2 (a) より、A-S0 試験体は載荷途中まで計算結果とほぼ対応し、その後計算終局変位を大きく上回り、上縁コンクリートが圧壊して終局に至ったことがわかる。A-S1 試験体では、せん断余裕度が 0.75 であるにもかかわらず、主鉄筋降伏後も荷重および変位が線形に増加し、計算終局変位と同程度の変位でシート剥離により

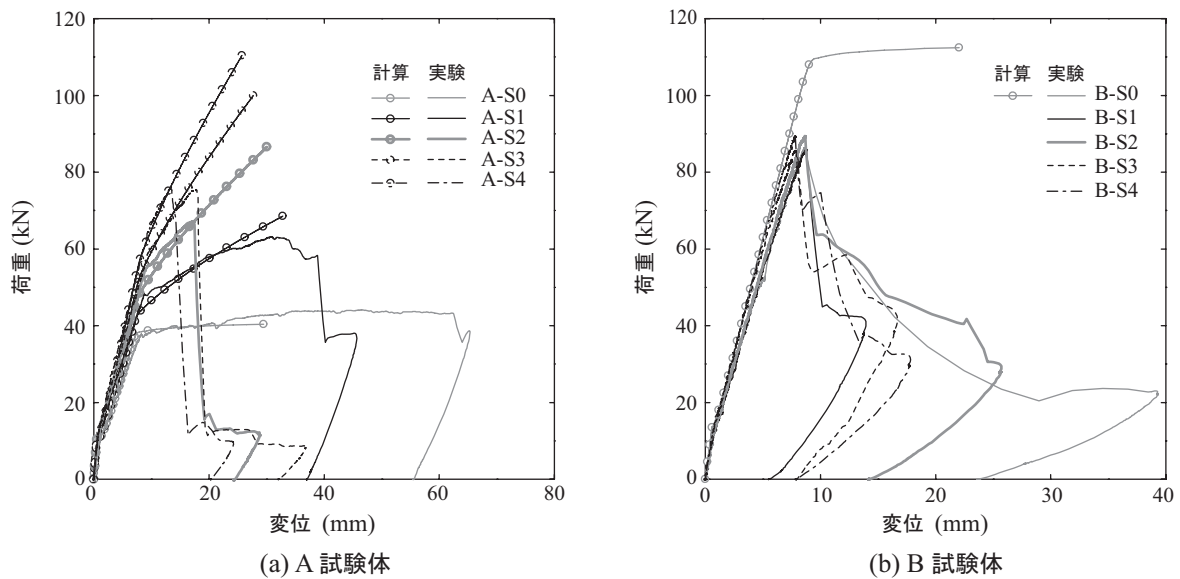


図-2 荷重-変位関係

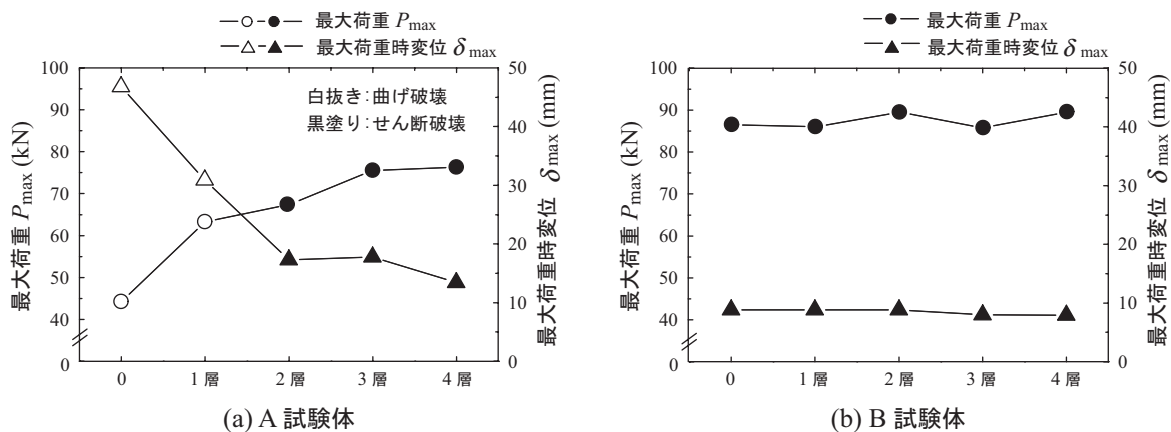


図-3 シート層数と最大荷重および最大荷重時変位の関係

終局に至っている。これは、A-S1 試験体の計算せん断余裕度が 0.75 と比較的 1 に近く、下面接着シートの効果によってせん断耐力が多少増加した結果、実せん断余裕度が 1.0 を上回ったためと考えられる。一方、A-S2/S3/S4 試験体はいずれも主鉄筋降伏後も計算結果と同様の剛性勾配を示しているものの、67~76 kN 程度でせん断破壊により終局に至っている。ここで、**図-3 (a)** より、シートの補強層数が増加するに伴い最大荷重が増加し、最大荷重時変位が減少する傾向にあることがわかる。このことより、シート下面接着後においても主鉄筋が降伏する

場合には、シート補強によって梁の剛性低下が抑制され、耐力が増大することが明らかになった。また、曲げ破壊に比べて主鉄筋降伏後にせん断破壊する場合は、シート補強層数の変化による最大荷重および変位の変動が少ないことがわかる。

**図-2 (b)** より、B-S0 試験体は、計算結果より若干小さな剛性勾配を示し、計算時の降伏点に到達する前に急激な荷重低下を示していることより、せん断破壊で終局に至っていることがわかる。また、下面接着補強を施した B-S1/S2/S3/S4 試験体は、補強層数を増加させることにより剛

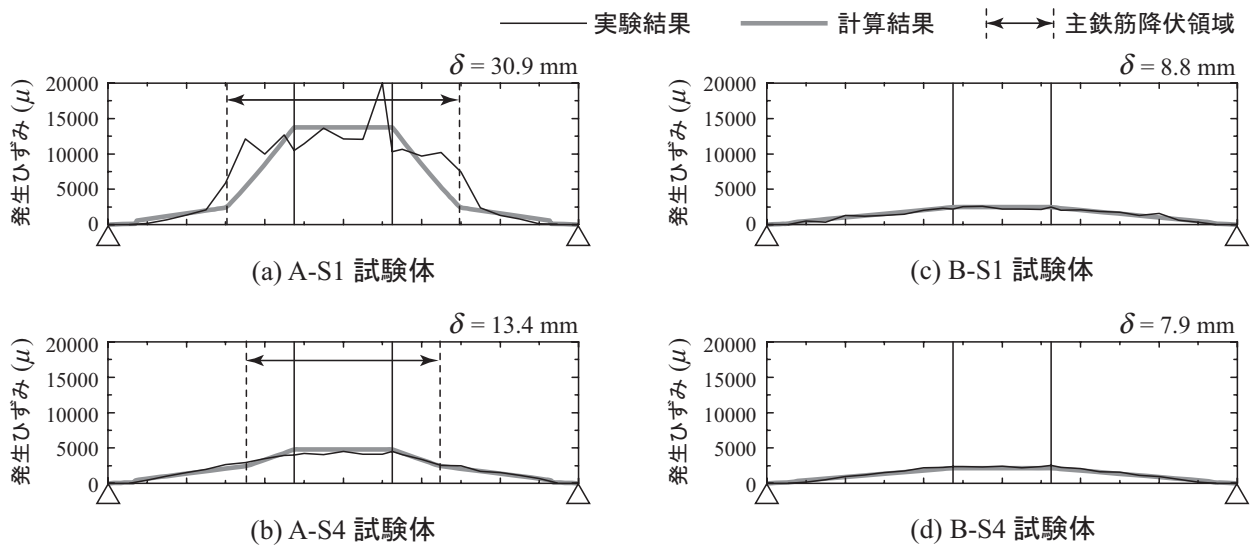


図-4 実測最大荷重時におけるシートのひずみ分布性状

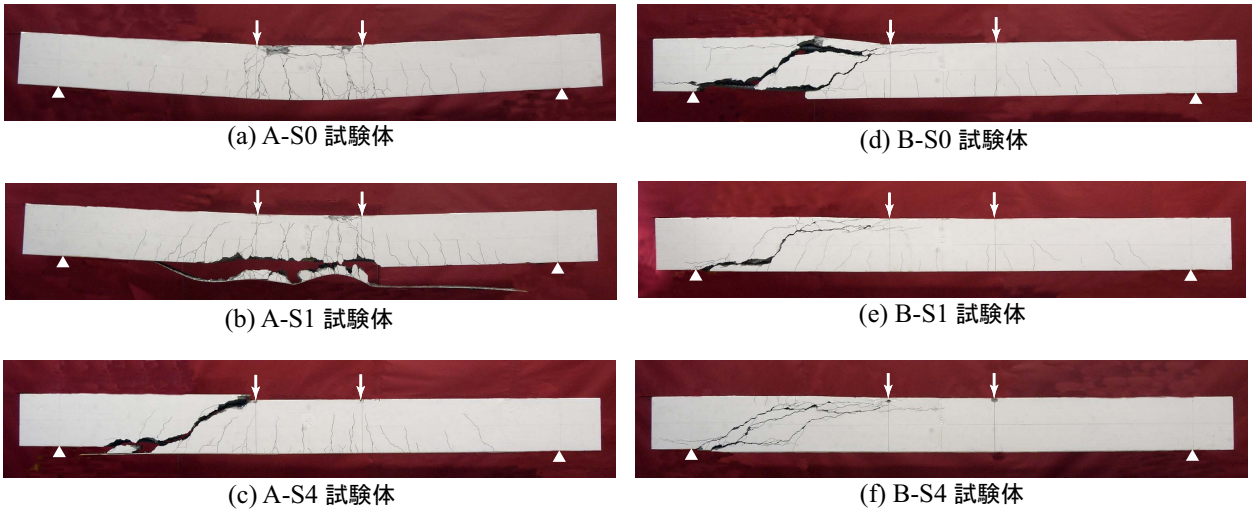


写真-1 ひび割れ分布性状

性は若干上がるものの、ほぼ同様の荷重および変位でせん断破壊に至っている。図-3(b)からも、最大荷重および最大荷重時変位は補強層数にかかわらず同様の値を示していることがわかる。これらのことより、主鉄筋が降伏する前にせん断破壊するRC梁の場合には、シートの補強効果はほとんど発揮されなかったことが明らかになった。

### 3.2 シートのひずみ分布性状

図-4には、実測最大荷重時におけるシートのひずみ分布を同一変位時の計算結果と比較して

示している。図には、A-S1/S4、B-S1/S4試験体の結果を示している。シート剥離により終局に至ったA-S1試験体では、著者らの既往の研究と同様、等せん断力区間の主鉄筋降伏領域内で計算結果よりも大きなひずみが発生している。このことより、ピーリング作用によって部分剥離が進展した後シートが全面剥離して終局に至ったことがわかる。A-S4試験体では、実験結果と計算結果が概ね一致している。しかしながら、発生ひずみは最大でも5,000 $\mu$ 程度であり、シートの補強効果を十分に発揮する前にせん断破壊

表-3 実験結果一覧

試験体名	降伏荷重 $P_y$ (kN)	降伏変位 $\delta_y$ (mm)	最大荷重 $P_{max}$ (kN)	最大荷重時変位 $\delta_{max}$ (mm)	耐力 増加割合	破壊形式
A-S0	36.9	7.9	44.3	46.8	-	曲げ破壊
A-S1	48.7	8.8	63.3	30.9	1.43	
A-S2	55.5	9.2	67.4	17.3	1.52	せん断破壊
A-S3	58.9	9.4	75.6	17.8	1.71	
A-S4	64.5	9.5	76.3	13.4	1.72	
B-S0	-	-	86.6	8.8	-	せん断破壊
B-S1	-	-	86.1	8.8	0.99	
B-S2	-	-	89.5	8.8	1.03	
B-S3	-	-	85.8	8.0	0.99	
B-S4	-	-	89.6	7.9	1.04	

したことがうかがわれる。一方、主鉄筋降伏前にせん断破壊した B-S1/S4 試験体では、実測最大荷重時においても主鉄筋が弾性域内にあるため、シートの発生ひずみは 2,000  $\mu$  程度と小さい。これらのことより、主鉄筋降伏前にせん断破壊により終局に至る試験体では、シートの補強効果がほとんど発揮されずに終局に至ったことが明らかになった。

### 3.3 ひび割れ分布性状

写真-1 には、A-S0/S1/S4 試験体および B-S0/S1/S4 試験体の実験終了後におけるひび割れ分布性状を示している。写真より、A-S0 試験体は梁の下縁より曲げひび割れが発生し、上縁コンクリートが圧壊していることがわかる。一方、A-S1 試験体は載荷点近傍下縁かぶりコンクリートにおいて斜めひび割れの発生およびコンクリートの剥落が見られることより、ピーリングにより全面剥離に至ったことがうかがわれる。またシートを4層とした A-S4 試験体は、載荷点近傍の下縁かぶりコンクリートに微少な斜めひび割れが見られるものの、載荷点より 45° の角度で斜めひび割れが大きく開口し、シートが端部で剥がれていることがわかる。一方、B-S0 試験体は、載荷点近傍より発生する 45° の斜めひ

び割れのほか、上端鉄筋に沿う割裂ひび割れおよび斜めひび割れが大きく開口してせん断破壊によって終局に至っている。また、B-S1/S4 試験体の場合も、上端、下端鉄筋に沿う割裂ひび割れおよび斜めひび割れが開口していることから、せん断破壊で終局に至っていることは明らかである。なお、B-S1/S4 試験体では、割裂ひび割れや斜めひび割れがシート接着端部近傍にまで進展し、1) シート接着端部から支点までの 10 cm 区間が無補強であり弱点となりやすいこと、2) 下面接着シートの定着が確保できずシートが一層剥離しやすいこと、により補強効果が出現しなかったものと考えられる。また、B 梁の斜めひび割れが A 梁に比べてより支点近傍に発生していることから、鉄筋降伏の有無が斜めひび割れ発生位置を変化させ、同時に補強効果に大きな影響を与えていることが推察される。

### 3.4 補強効果の検討

表-3 には、本実験より得られた降伏荷重  $P_y$ 、降伏変位  $\delta_y$ 、最大荷重  $P_{max}$ 、最大荷重時変位  $\delta_{max}$ 、無補強試験体に対する耐力増加割合および終局時の破壊性状を一覧にして示している。なお、耐力増加割合は A/B-S1 ~ S4 補強試験体の最大荷重を無補強試験体の最大荷重で除した

値である。無補強時に曲げ破壊する A 試験体では、補強層数の増加とともに耐力増加割合が増大していることがわかる。しかしながら、主鉄筋が降伏する場合も補強層数が 3 層以上の場合には増加割合は 1.7 程度とほぼ一定である。一方、無補強時にせん断破壊する B 試験体では、シートの補強層数にかかわらず、シートの耐力向上効果は出現しないことがわかる。このように、主鉄筋の降伏を伴ってせん断破壊する場合にはシートの補強効果は出現するが耐力増加割合には上限があること、主鉄筋が降伏しないでせん断破壊する場合はシートの補強効果はほとんど出現しないことが明らかになった。これは、シートを下面接着した RC 版の押し抜きせん断耐力が、主鉄筋が降伏する場合に大きく、降伏しない場合は小さいことと対応している<sup>3)</sup>。

なお本研究では、主鉄筋が降伏しない場合に割裂ひび割れや斜めひび割れがシート接着端部近傍にまで進展し、シート接着端部から支点までの無補強部が弱点となることや下面接着シートが一層剥離しやすくなったことが補強効果の出現しなかった要因とも考えられることから、せん断スパン比や載荷方法(3点曲げ)を変えた実験を行い、さらに詳細に検討する必要があるものと判断される。

#### 4. まとめ

本研究では、FRPシートを下面接着したせん断破壊によって終局に至る RC 梁の耐荷性状を検討するため、シートの補強層数を变化させた主鉄筋が降伏する RC 梁および降伏しない RC 梁を用いて 4 点曲げ載荷実験を行った。本研究の範囲内で得られた結論は以下の通りである。

- 1) シート補強時に主鉄筋の降伏を伴う場合は、補強層数の増加に対応して曲げおよびせん

断耐力が増加する傾向にある。ただし、耐力増加割合には上限があり、1.7 程度が最大である。

- 2) 主鉄筋の降伏を伴う場合でも、曲げ破壊する場合の方がシート層数の増加による耐力および最大荷重時変位の変動が大きく、せん断破壊する場合は少ない。
- 3) 主鉄筋降伏前にせん断破壊する場合は、シートの補強層数にかかわらず補強効果はほとんど出現しない。これは、下面をシート接着した RC 版の押し抜きせん断耐力向上効果が、主鉄筋が降伏する場合に大きく、降伏しない場合に小さいことと対応している。
- 4) 主鉄筋が降伏しない場合は、斜めひび割れや割裂ひび割れがシート接着端部近傍にまで進展する。これが、補強効果がほとんど出現しない要因であるものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 三上 浩, 岸 徳光, 栗橋祐介, 松岡健一: FRPシートを下面接着した RC 版の押し抜きせん断性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.847-852, 2001.6
- 2) 三上 浩, 岸 徳光, 田口史雄, 松岡健一: 2 方向 AFRP シートを下面接着した各種 RC 版の押し抜きせん断性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.1435-1440, 2002.6
- 3) 三上 浩, 藤田 学, 岸 徳光: AFRP シート補強 RC 版の押し抜きせん断性状に与える補強方法と補強量の影響, 平成 15 年度土木学会北海道支部 論文報告集, 第 60 号, V-30, pp.772-775, 2004.1
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書(構造性能照査編), 2002.5