

## 論文 FRP シート曲げ補強 RC 梁のシートの剥離抑制法に関する一検討

栗橋 祐介<sup>\*1</sup>・岸 徳光<sup>\*2</sup>・三上 浩<sup>\*3</sup>・澤田 純之<sup>\*4</sup>

**要旨:** FRP シート曲げ補強 RC 梁の合理的なシート剥離抑制法の確立を目的として, RC 梁の側面に FRP シートを貼付ける方法を取り上げ, その剥離抑制効果に関する検討を行った。本実験では, せん断スパン比の異なる FRP シート曲げ補強 RC 梁を対象として, 側面接着および U 字巻付による曲げ補強シートの剥離抑制効果を比較検討した。その結果, 曲げ補強シートの剥離抑制効果は, 側面接着の場合にはせん断スパン比に依存するが, U 字巻付の場合にはせん断スパン比に依存しないことなどが明らかになった。

**キーワード:** RC 梁, FRP シート, 曲げ補強, ピーリング作用, 剥離抑制効果

## 1. はじめに

既設鉄筋コンクリート (RC) 構造物の経年劣化や耐震耐荷性能の向上を目的として, 連続繊維シート (FRP シート) を用いた接着工法が多く採用されている。著者らは, これまで FRP シートを用いた RC 梁の合理的な曲げ補強設計手法の確立を目的として, FRP シート曲げ補強 RC 梁の静載荷実験を数多く実施してきた。その結果, 曲げ補強シートの剥離は, 等せん断力区間における主鉄筋降伏領域内の下縁かぶり部に形成されたコンクリートブロックがシートを押し出して引き剥がすピーリング作用によって生じること等を明らかにしている<sup>1)</sup>。

また, 上縁コンクリートの圧壊を想定した計算終局耐力を下回る荷重で曲げ補強シートが剥離して終局に至る「剥離破壊型」RC 梁に関しては, 曲げ補強シートの剥離抑制法として曲げ補強シートの上から FRP シートを U 字状に巻き付ける方法 (以後, U 字巻付) を提案し, その優れた剥離抑制効果を確認している<sup>2)</sup>。しかしながら, 剥離を抑制するために必要な U 字巻付シートの厚さや断面高さ方向の接着範囲 (以後, 接着高さ) 等に関する算定法は確立される

に至っていない。一方, 前述のように, 曲げ補強シートの剥離がコンクリートブロックのピーリング作用によって発生することを考慮すると, 梁側面のみに FRP シートを縦貼りして下縁かぶりコンクリートのブロック化やそのピーリング作用を抑制することで, より効率的に曲げ補強シートの剥離を抑制することができるものと考えられる。

このような観点より, 本研究では, FRP シート曲げ補強 RC 梁の合理的なシート剥離抑制法の確立を目的として, シートを梁側面に接着 (以後, 側面接着) した場合および U 字巻付した場合における曲げ補強シートの剥離抑制効果を比較検討した。

## 2. 曲げ補強シートの剥離抑制法の概要

過去の実験結果より, FRP シート曲げ補強 RC 梁のシートの剥離は, 以下のような過程で発生・進展することが明らかとなっている。すなわち, 図-1 に示されているように 1) 曲げひび割れとともに載荷点からほぼ 45° 方向に梁下縁に達する斜めひび割れが発生し (図中 (i)), これらのひび割れにより下縁かぶり部に形成さ

\*1 (独) 北海道開発土木研究所 研究員 材料研究室 博(工) (正会員)

\*2 室蘭工業大学 教授 工学部建設システム工学科 工博 (正会員)

\*3 三井住友建設(株) 室長 技術研究所土木研究開発部 博(工) (正会員)

\*4 室蘭工業大学大学院 建設工学専攻 修(工) (正会員)

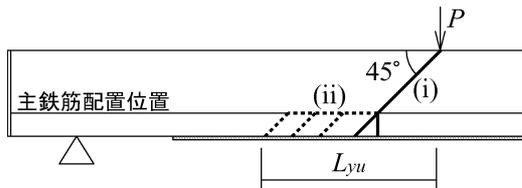


図-1 曲げ補強 RC 梁のひび割れ進展過程

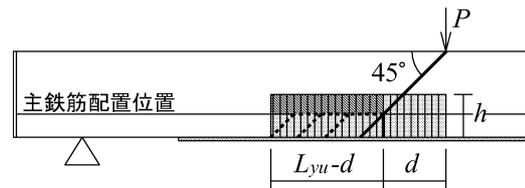


図-3 接着高さ  $h$  の算定に関する模式図

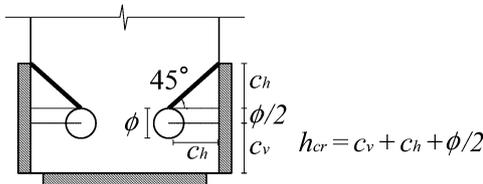


図-2 限界接着領域  $h_{cr}$  に関する模式図

れたコンクリートブロックのピーリング作用によってシートが剥離し、2) 次いで、斜めひび割れ部から支点側に向かって主鉄筋に沿う割裂ひび割れとともに、下縁かぶり部にも斜めひび割れが発生して(図中(ii)), シートの剥離が進行し終局に至ることが明らかになっている。

これより、本研究では、側面接着を施すことにより、1) ピーリング作用の原因となる斜めひび割れの開口を抑制させ、その後に2) 軸方向鉄筋に沿う割裂ひび割れを抑制させることによって、シートの剥離を抑制・遅延させることが可能であるものと考えた。なお、シートの接着高さが不十分の場合には、定着長不足のために段落し的な状態となり、シート上端面からひび割れが発生して割裂を抑制できなくなる可能性がある。本研究では、このような状態を避けるため、図-2に示すようにシートの限界接着領域  $h_{cr}$  を主鉄筋上端から45°の方向線との交点までとした。すなわち、

$$h_{cr} = c_v + c_h + \phi/2 \quad (1)$$

ここで、 $c_v$  および  $c_h$  は、それぞれ主鉄筋の中心から梁下縁および側面までの距離であり、 $\phi$  は主鉄筋径である。

なお、側面接着およびU字巻付シートの部材軸方向接着範囲は、著者らによる既往の研究<sup>2)</sup>を参考にして、ピーリング作用や割裂ひび割れの発生が予想される等せん断力区間の終局時計算主鉄筋降伏領域  $L_{yu}$  とした。

## 2.1 接着高さの算定

側面接着シートの接着高さ  $h$  は、上記の  $h_{cr}$  を最小の接着高さとして、図-3のように載荷点からの斜めひび割れの開口、押し抜けを抑制し、かつその後発生する割裂ひび割れの開口を抑制できるものとなるように算出した。具体的には、割裂ひび割れの発生後において、主鉄筋上側の側面接着シート(図中濃灰色部)の付着力により割裂ひび割れの開口が抑制可能となるようにシートの接着高さを算出した。本研究では、設計的に安全側となるように、計算終局時の作用せん断力を全て側面接着シートが受け持つものと仮定し、 $h$  を下式により算定した。すなわち、

$$h > h' + c_v \quad (2)$$

$$h' = Q / \{2\tau(L_{yu} - d)\} \quad (3)$$

ここで、 $h$ : 必要接着高さ、 $Q$ : 計算終局時の作用せん断力、 $\tau$ : シートとコンクリートの付着強度、 $d$ : 梁断面の有効高さ、である。なお、既往の研究成果<sup>1)</sup>より、コンクリートとFRPシートの付着強度は、コンクリートの引張強度よりも大きいことが明らかになっている。従って、付着強度  $\tau$  には、コンクリート標準示方書<sup>3)</sup>に準拠して算出したコンクリートの引張強度を用いることとした。

## 2.2 シート厚さの算定

側面接着シートの厚さは、図-3のように載荷点から梁下縁に向かって45°の角度で生じた斜めひび割れ発生部のシートが、計算終局時の作用せん断力の全てを負担するものとして下式により算定した。すなわち、

$$t > Q / (2\sigma_f h) \quad (4)$$

ここで、 $t$ : 側面接着シートの必要厚さ、 $\sigma_f$ :

表-1 試験体の一覧

試験体名	せん断スパン比 $r_s$	作用せん断力 $Q$ (kN)	計算主鉄筋降伏領域 $L_{yu}$ (cm)	側面接着／U字巻付シート		
				補強方法	接着高さ $h$ (cm)	目付量 (g/m <sup>2</sup> )
R3-N	3.1	71.8	34.6	-	-	-
R3-S				側面接着	19	140
R3-U				U字巻付		
R7-N	6.9	32.2	77.1	-	-	-
R7-S				側面接着	9	200
R7-U				U字巻付		

\*  $L_{yu}$  および  $P$  は、断面分割法により上縁コンクリートの圧壊を想定して算出した計算終局時の値

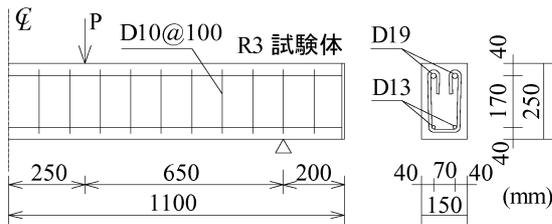


図-4 RC梁の形状寸法および配筋状況

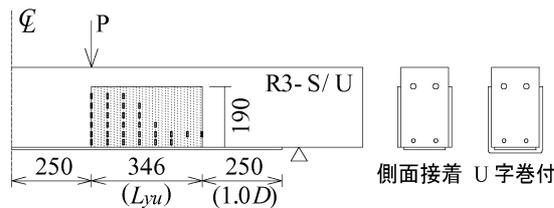


図-5 補強概要とシートひずみ測定位置

シートの公称引張強度，である。

### 3. 実験概要

本研究では、上述で提案の側面接着による曲げ補強シート剥離抑制法の妥当性を検討するために、静載荷実験を実施した。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、断面形状および曲げ補強シート厚を同等とし、せん断スパン比を2種類、曲げ補強シートの剥離抑制法を3種類に変化させた全6体である。表中、試験体名の第1項目のRに付随する数値は、せん断スパン比  $r_s$  の概略値である。また、第2項目は、剥離抑制法の種類を示している。すなわち、曲げ補強のみの場合はN、側面接着およびU字巻付を施した場合をそれぞれSおよびUとして示している。なお、U字巻付シートの接着高さ  $h$  および厚さ  $t$  はS試験体の場合と同様とした。

表-2 AFRPシートの材料特性値

目付量 (g/m <sup>2</sup> )	厚さ $t$ (mm)	弾性係数 (GPa)	引張強度 $\sigma_f$ (GPa)	破断ひずみ (%)
140	0.0965	118	2.06	1.75
200	0.138			
415	0.286			

図-4には、RC梁の形状寸法および配筋状況をR3試験体について示している。試験体は、断面寸法(幅×高さ)が15×25cm、下端および上端鉄筋として、それぞれD13、D19を2本ずつ配筋した複鉄筋RC梁である。なお、上端鉄筋にD19を用いたのは、上縁コンクリートの圧壊がシート剥離に先行して生じ、梁が曲げ圧壊型で終局に至ることを避けるためである。また、純スパン長は、R3およびR7試験体でそれぞれ1.8m、3.4mである。

図-5には、補強概要およびシートのひずみ測定位置をR3試験体について示している。曲げ補強シートには、既往の研究<sup>1)</sup>に基づき曲げ補強後のRC梁の破壊形式が剥離破壊型となるように、目付量415g/m<sup>2</sup>、幅13cmのアラミド繊維製FRP(以後、AFRP)シートを2層用いることとした。また、接着範囲は上縁コンクリート圧壊時の計算耐力を保証できる長さとして設定した。すなわち、既往の研究<sup>2)</sup>と同様、片側等せん断力区間における接着範囲を  $L_{yu} + 1.0D$  ( $D$ : 断面高さ)とした。側面接着およびU字巻付シートには、表-1に示した目付量のシートを用い所定の範囲に接着している。また、本実験では、U字巻付する場合においても梁下端隅

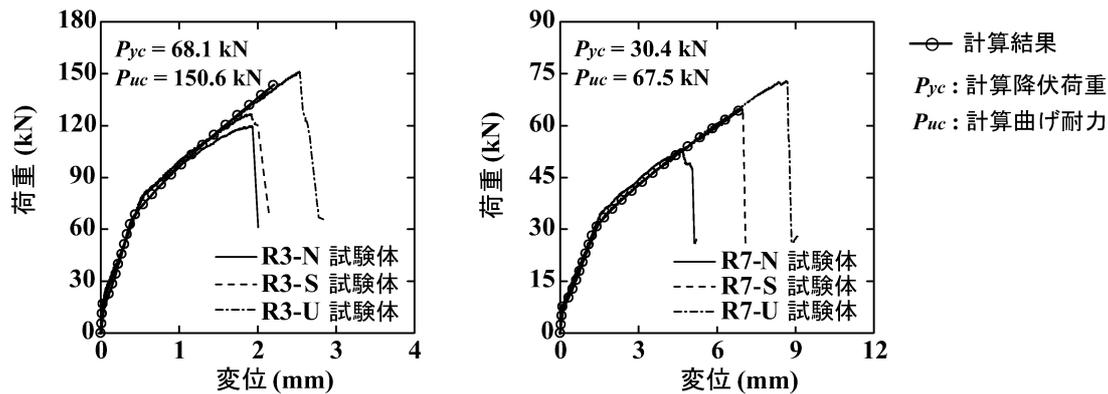


図-6 荷重-変位関係に関する実験および計算結果の比較図

角部の面取りを行っていない。なお、図-4, 5に示した梁の断面寸法，配筋状況，シート補強概要および載荷点間隔は，R7試験体の場合も同様である。

実験時のコンクリートは材齢が82日，平均圧縮強度が34.3 MPaであった。また，主鉄筋の降伏強度は362 MPaである。表-2には，AFRPシートに関する公称の材料特性値の一覧を示している。本実験における測定項目は，載荷荷重，スパン中央部変位およびAFRPシート各点のひずみである。

## 4. 実験結果

### 4.1 荷重-変位関係

図-6には，各試験体の荷重-変位曲線の実験および計算結果の比較図をせん断スパン比 $r_s$ 毎に整理して示している。なお，計算結果はシートとコンクリートとの完全付着を仮定し，断面分割法<sup>1)</sup>により算定したものである。図より，曲げ補強のみのR3/7-N試験体は，ともに計算耐力および計算最大変位に到達する前にシートが剥離して終局に至る剥離破壊型の性状を示していることが分かる。

側面接着したR3/7-S試験体は，それぞれR3/7-N試験体よりも最大荷重が大きく示されている。ただし，この耐力向上効果は， $r_s$ の違いにより大きく異なっている。すなわち，R3試験体の場合には耐力の向上効果が小さく，計算耐力に到達する前に曲げ補強シートの剥離により終局に至っているのに対し，R7試験体の場合

には最大荷重が計算耐力程度まで向上している。一方，U字巻付を施したR3/7-U試験体はともに計算耐力を大きく上回っている。

以上より，側面接着を施す場合には，せん断スパン比 $r_s$ の違いによって曲げ補強シートの剥離抑制効果が大きく異なるが，U字巻付の場合には $r_s$ にかかわらず計算耐力を十分に満足していることが分かる。

### 4.2 破壊性状

本研究では，側面接着シートが計算終局時の作用せん断力を全て負担するとの仮定の下，2章で述べた算定法に基づき側面接着シートの接着高さおよび厚さを設定している。しかしながら，前述のように，側面接着した試験体の場合には十分な剥離抑制効果が発揮されず，計算耐力と同程度かそれ以下の荷重レベルで曲げ補強シートの剥離によって終局に至っている。本節では，このような実験結果に至った原因を解明するため，各試験体の破壊性状を詳細に検討することとする。

図-7には，実験終了後における各試験体の破壊状況を示している。図より，R3-N試験体の場合には，シートが剥離した右側スパンにおいて，載荷点から支点側に45°方向への斜めひび割れと共に，主鉄筋配置位置で割裂ひび割れが発生して，シートとかぶりコンクリートが剥離していることが分かる。この破壊性状は，図-1に示したひび割れ進展過程に類似している。

R3-S試験体の場合には，等せん断力区間に

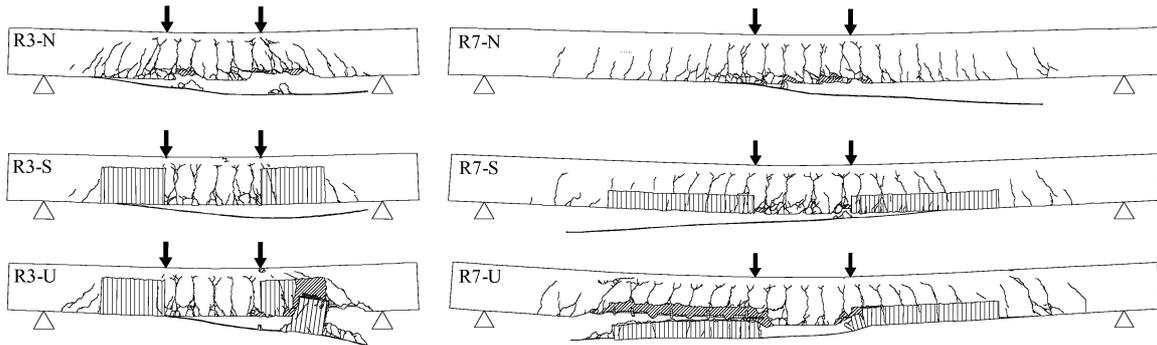


図-7 実験終了時における破壊状況図

著しい損傷は見られないものの、等曲げ区間の下縁かぶり部に曲げおよび斜めひび割れが交差してコンクリートブロックが形成されている。実験時には、写真-1に示されているように、曲げ補強シートがこれらのコンクリートブロックのピーリング作用によって引き剥がされていることを確認している。これより、側面接着による曲げ補強シートの剥離抑制効果が十分に発揮されなかった原因はこのコンクリートブロックのピーリング作用による剥離によるものと推察される。このことは、側面接着によって等せん断力区間におけるコンクリートブロックの形成が抑制されていることも暗示している。

一方、U字巻付けを施したR3-U試験体の場合には、R3-S試験体と同様に等曲げ区間の下縁かぶり部にコンクリートブロックの形成が見受けられるものの、左側等せん断力区間では曲げ補強シートの剥離は見られず、また右側等せん断力区間ではU字巻付シートの隅角部破断および剥離を伴って曲げ補強シートが剥離していることが分かる。

R7-N試験体は、R3-N試験体に比べて等せん断力区間の下縁かぶりコンクリートの損傷が顕著ではない。これは、R7-N試験体に作用したせん断力がR3-N試験体のそれに比較して小さいためと推察される。なお、R7-N試験体もR3-N試験体と同様、载荷点近傍等せん断力区間に形成されたコンクリートブロックによるピーリング作用によってシートが剥離して終局に至っている。R7-S/U試験体の結果を見ると、ともに梁側面のシートにひび割れが発生してい

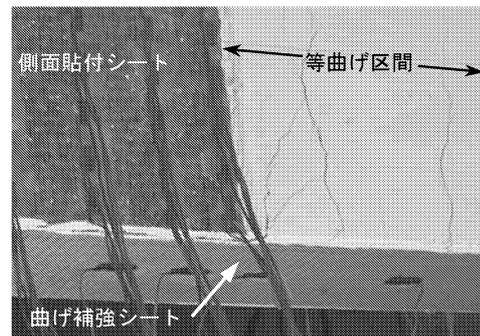


写真-1 R3-S試験体の等曲げ区間におけるピーリング作用の発生状況

ることが分かる。しかしながら、R7-S試験体の場合には、曲げ補強シートのみが剥離しているのに対し、R7-U試験体の場合には、曲げ補強シートがU字巻付シートおよびかぶりコンクリートを伴って剥落している。

なお、実験時にはR7-S試験体は、等曲げ区間における曲げ補強シートの剥離の進展は見られないものの、等せん断力区間に生じた曲げひび割れの影響により、側面接着シートの繊維が切断されてシートがブロック化したかぶりコンクリートと共に鉛直方向にずれ、その部分が曲げ補強シートを押し下げるピーリング作用によって終局に至っていることを確認している。

このように、側面接着の場合には2章で想定した破壊性状と異なる性状を示したため、十分な曲げ補強シートの剥離抑制効果が得られなかったものと推察される。従って、側面接着による曲げ補強シートの剥離抑制効果を適切に評価するためには、1)等曲げ区間にも側面接着を施すことや、2)側面接着シートの繊維の破断を抑制するため2方向AFRPシートを用いること

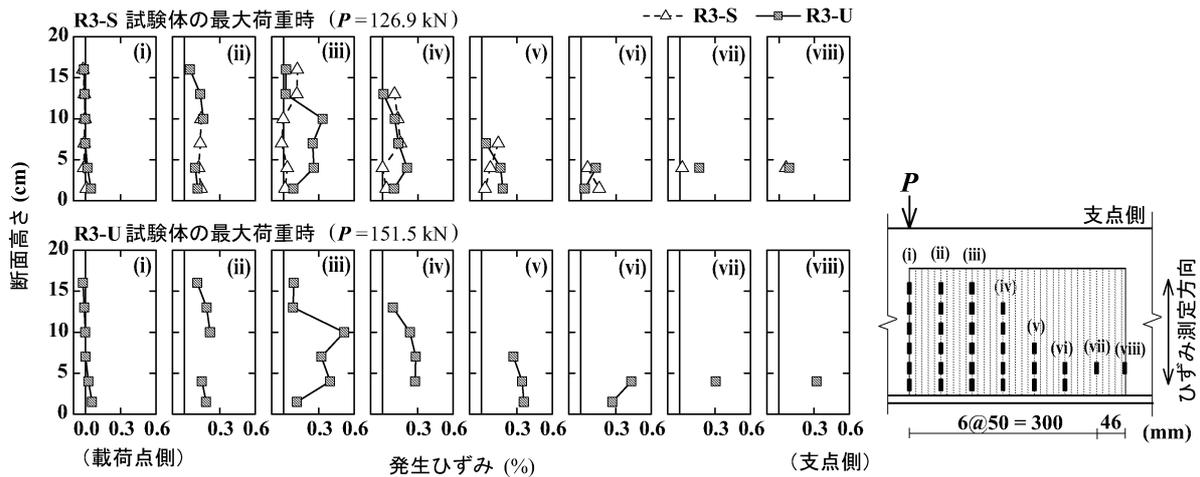


図-8 側面接着およびU字巻付シートの断面高さ方向ひずみ分布の比較 (R3 試験体)

が必要であるものと考えられる。

#### 4.3 側面接着シートのひずみ分布性状

図-8には、R3 試験体を対象として、U字巻付した R3-U 試験体および側面接着した R3-S 試験体に関する梁側面シートの断面高さ方向ひずみ分布を比較して示している。なお、ひび割れの影響等によりひずみゲージが破損して測定不能となったデータに関しては検討から除外している。

図より、R3-S 試験体の最大荷重時の結果を見ると、R3-U 試験体は R3-S 試験体に比較して梁下縁部のひずみが大きく示される傾向にあることが分かる。これは、1) R3-U 試験体の場合には U 字巻付により曲げ補強シートの剥離が効率的に抑制されているのに対し、2) R3-S 試験体の場合には、側面接着を施していない等曲げ区間に形成されたコンクリートブロックのピーリング作用によって曲げ補強シートが剥離したため、側面接着シートの剥離抑制効果が十分に発揮されていないことを示すものである。一方、R3-U 試験体の最大荷重時の結果より、U 字巻付シート上端部の発生ひずみは  $500 \mu$  程度と小さく示されていることが分かる。また、R3-U 試験体の最大荷重が計算耐力 ( $P_{uc} = 150.6$  kN) を上回っていることより、2 章で算定したシート接着高さは設計的に安全側であることが分かる。なお、このような性状は R7 試験体の場合も同様であることを確認している。

#### 5. まとめ

本研究では、FRP シート曲げ補強 RC 梁の合理的なシートの剥離抑制法の確立を目的として、シートを側面接着した場合および U 字巻付した場合における曲げ補強シートの剥離抑制効果を比較検討した。本実験により得られた知見をまとめると以下の通りである。

- 1) 側面接着を施した場合には、せん断スパン比  $r_s$  の大きさによって曲げ補強シートの剥離抑制効果が大きく異なる。これは、等曲げ区間に側面接着していないことより、作用せん断力が大きい場合には等曲げ区間に斜めひび割れが発生してピーリング作用が励起される傾向を示すことによる。
- 2) U 字巻付の場合には、 $r_s$  の大きさにかかわらず、提案の方法により算定したシート接着高さおよび厚さとすることで、計算耐力を十分に満足することができる。

#### 参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介: AFRP シートで曲げ補強した RC 梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.683/V-52, pp.47-64, 2001
- 2) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介, 澤田純之, 田口史雄: AFRP シート RC 梁のシートの剥離抑制法に関する実験的研究, 応用力学論文集, Vol. 5, 2002.8, pp. 899-909
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書, 2002