

側面補強を有する AFRP シート曲げ補強 RC 梁の耐荷性状に関する数値解析

Numerical analysis of load-carrying behavior of RC beams bonded with AFRP sheet on tensile-surface and side-surface

室蘭工業大学 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
 室蘭工業大学 正員 小室 雅人 (Masato Komuro)
 室蘭工業大学 学生員 張 広鋒 (Guangfeng Zhang)
 室蘭工業大学 ○学生員 山田 真司 (Shinji Yamada)

1. はじめに

連続繊維シート (以後、FRP シート) 曲げ補強 RC 梁は、鉛直荷重載荷時の等せん断力区間に発生する曲げとせん断ひび割れによって下縁かぶり部のコンクリートがブロック化し、その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シート剥離が発生し、終局に至る場合のあることが実験的に明らかとなっている。このような破壊形式で終局に至る場合には、補強設計曲げ耐力を確保できない場合もある。著者ら¹⁾はシートを側面貼りすることにより、コンクリートブロックの形成とピーリング作用の発生を阻止して設計耐力を確保する手法を提案し、その抑制効果を実験的に検討してきた。

本研究では、上述の側面補強を有するアラミド繊維 (AFRP) シート曲げ補強 RC 梁の耐荷性状や破壊挙動を適切に評価可能な解析手法を検討することを目的として、著者ら²⁾が過去に提案した解析手法に基づき、側面補強高さの異なる AFRP シート曲げ補強 RC 梁に関する 3次元弾塑性解析を試み、実験結果と比較することによりその妥当性について検討を行った。

2. 試験体概要

表-1には、解析対象とした試験体の一覧を示している。これらの試験体は、著者らが過去に行った実験の一部であり、側面補強シートの高さを変化させた全4体の矩形RC梁である。試験体名は側面貼りを示すSと側面補強高さ(mm)を用いて表している。

図-1には試験体の形状寸法、配筋状況、載荷点位置およびシートの補強概要をS90試験体を例に示している。試験体は、いずれも上端鉄筋にD19、下端鉄筋にD13、帯鉄筋にD10を用いた複鉄筋矩形RC梁であり、断面寸法(幅×高さ)は150×250mm、純スパン長3,400mmである。

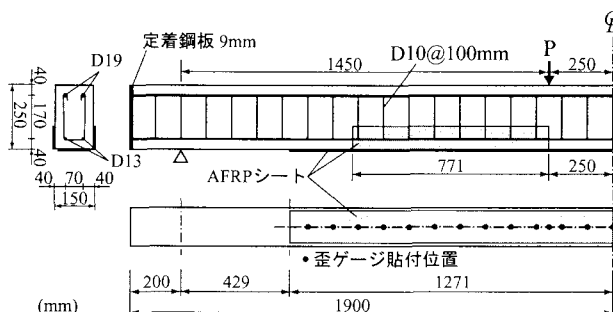


図-1 試験体の形状寸法、配筋状況、載荷点位置およびシート補強概要図の一例 (S90 試験体)

全ての試験体において、底面には目付量 415 g/m²、幅 130 mm の AFRP シートを梁中央部から左右にそれぞれ 1,271 mm の範囲に 2層貼り付けている。シート上には、その補強効果や剥離挙動を精査するため、箔歪ゲージを 100 mm 間隔および載荷点直下に貼り付けている。また、側面には目付量 200 g/m² のシート 1層を等せん断力区間の載荷点から計算終局時主鉄筋降伏領域の長さ L_{yu} だけ、補強方向を梁の上下方向にして貼り付けている。表-2および表-3には、それぞれ実験時に実施したコンクリート、鉄筋および

表-1 試験体の一覧

| 試験体名 | 梁高 h (mm) | せん断スパン比 a/d | 側面補強シート | |
|------|-------------|---------------|-----------------|-------------------------|
| | | | 補強高さ h_s (mm) | 目付量 (g/m ²) |
| S0 | 250 | 6.9 | - | - |
| S40 | | | 40 | 200 |
| S90 | | | 90 | |
| S120 | | | 120 | |

表-2 コンクリートおよび鉄筋の力学的特性一覧

| 材料 | 圧縮強度 f'_c (MPa) | 引張強度 f_t (MPa) | 降伏強度 f_y (MPa) | 弾性係数 E (GPa) | ポアソン比 ν |
|--------|-------------------|------------------|------------------|----------------|-------------|
| コンクリート | 34.3 | 2.67 | - | 29.0 | 0.2 |
| 鉄筋 | - | - | 362 | 206 | 0.3 |

表-3 AFRP シートの力学的特性 (公称値)

| 繊維目付量 (g/m ²) | 厚さ t_f (mm) | 引張強度 σ_f (GPa) | 弾性係数 E_f (GPa) | 破断歪 (%) |
|---------------------------|---------------|-----------------------|------------------|---------|
| 200 | 0.138 | 2.06 | 118 | 1.75 |
| 415 | 0.286 | | | |

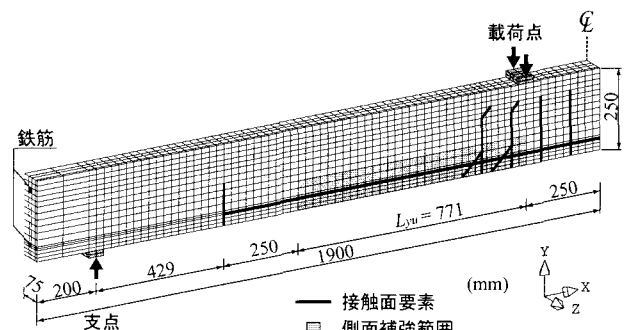


図-2 要素分割図の一例 (S0 試験体)

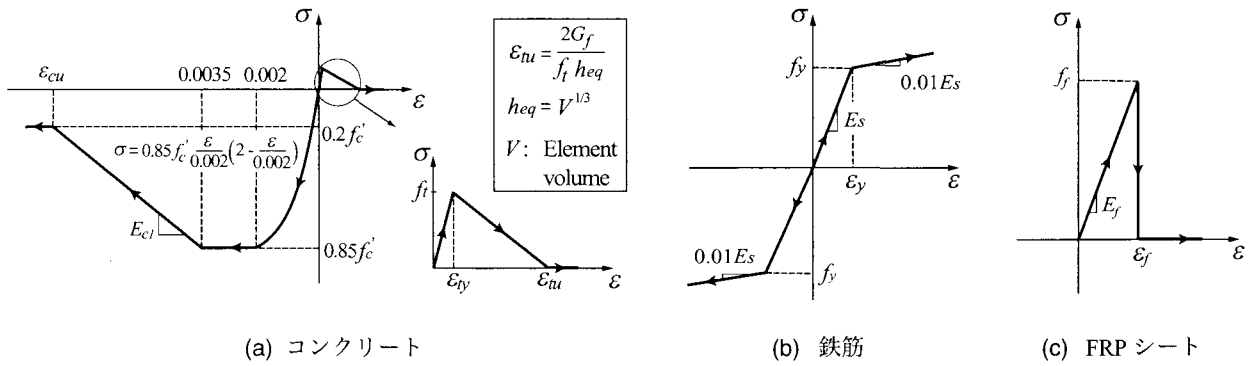


図-3 材料構成則

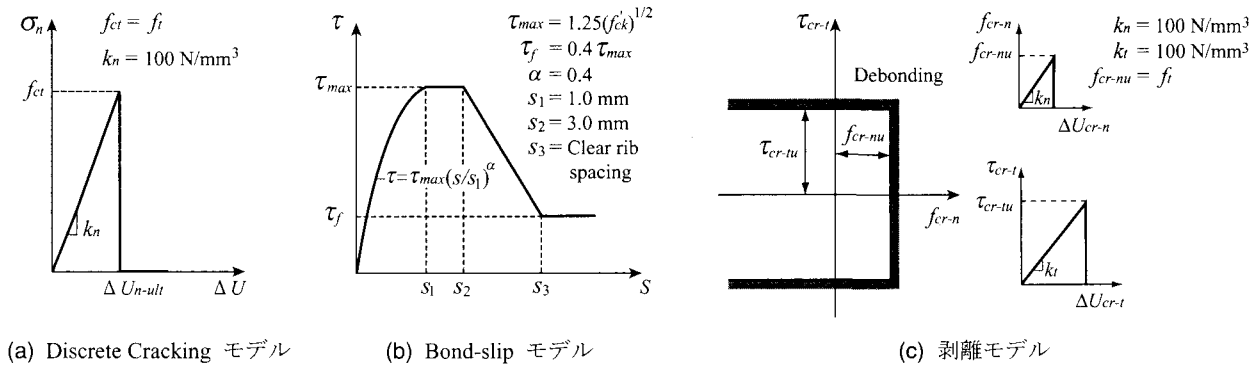


図-4 接触面要素に適用した各応力-相対変位関係

びAFRPシートの力学的特性値を一覧にして示している。

3. 数値解析概要

3.1 解析モデル

図-2には、要素分割図の一例として、S0試験体に関する要素分割状況を示している。解析モデルは、RC梁の対称性を考慮してスパンおよび断面方向に2等分した1/4モデルである。コンクリート、鉄筋およびAFRPシートは、8節点あるいは6節点3次元固体要素を用いてモデル化している。境界条件は、解析対象の連続性を考慮して、対称切断面においてはその面に対する法線方向変位成分を拘束し、支点部においては節点の鉛直方向変位成分を拘束している。また、S40/90/120試験体に関しては、コンクリート、鉄筋および底面補強シートの要素分割状況はS0試験体と同様であり、側面補強シートは図中の灰色部にそれぞれ所定の高さまで配置している。なお、収束計算には一般に広く用いられているNewton-Raphson法を採用している。

3.2 材料構成則

図-3(a)にはコンクリートの応力-歪関係を示している。圧縮側の構成則に関しては、材料試験結果から得られた圧縮強度 f'_c を用いて、圧縮歪 $3,500\mu$ までは土木学会コンクリート標準示方書に基づいて定式化し、 $3,500\mu$ 以後は初期弾性係数の0.05倍で $0.2f'_c$ まで線形軟化するモデルとした。また、降伏の判定にはvon Misesの降伏条件を用いている。一方、引張側に関しては、線形軟化モデルを適用し、ひび割れ開口歪 ϵ_{tu} はCEB-FIPのコードに従い、破壊エネルギー G_f を用いて図示のように定義している。上下端鉄筋およびスターラップ要素には、図-3(b)に示すような塑性硬化係数 H' を考慮した弾塑性体モデルを適用した。降伏はvon Misesの降伏条件に従うものとしている。

FRPシートには、図-3(c)に示すように引張強度に達した時点で破断したと見なされるモデルを適用している。実験時には、全て一方向FRPシートを用いて補強しているが、曲げ補強シートのみならず側面貼りシートも簡略化して等方材料と仮定した。

3.3 接触面要素の配置および応力-相対変位関係

本数値解析では、図-4に示すような、ひび割れの開口、主鉄筋のすべり、およびシートの剥離に関する3つの幾何学的不連続現象を接触面要素を用いてモデル化している。

Discrete Crackingモデルは接触面要素の法線方向の開口とその方向の引張応力との関係をモデル化している。限界応力値 f_{ct} は、コンクリートの引張破壊強度 f_t と等価であるものと設定した。Bond-slipモデルにはCEB-FIPによるすべり-付着応力関係式を採用した。また、底面に貼り付けている曲げ補強シートや側面補強シートの剥離を再現するため、著者らが提案した剥離モデルを用いている。このモデルでは、付着界面の法線方向引張応力と面内せん断応力間の相互作用を無視し、法線方向およびせん断方向の剥離基準を簡易に次のように定義した。

$$f_{cr-n} > f_{cr-nu} \quad (1)$$

$$\tau_{cr-t} = \sqrt{\tau_{cr-ts}^2 + \tau_{cr-tt}^2} > \tau_{cr-tu} \quad (2)$$

ここで、 f_{cr-n} 、 τ_{cr-ts} 、 τ_{cr-tt} は、それぞれ付着界面の法線方向引張応力、軸方向および断面方向のせん断応力であり、 f_{cr-nu} 、 τ_{cr-tu} はそれぞれ法線方向、せん断応力の限界応力である。なお、 τ_{cr-tu} は文献3)を参考にして、SI単位系の下に以下の式を用いて評価することとした。

$$\tau_{cr-tu} = 0.92\sqrt{f'_c} \quad (3)$$

接触面要素の配置に関しては、S0試験体は実験後のひ

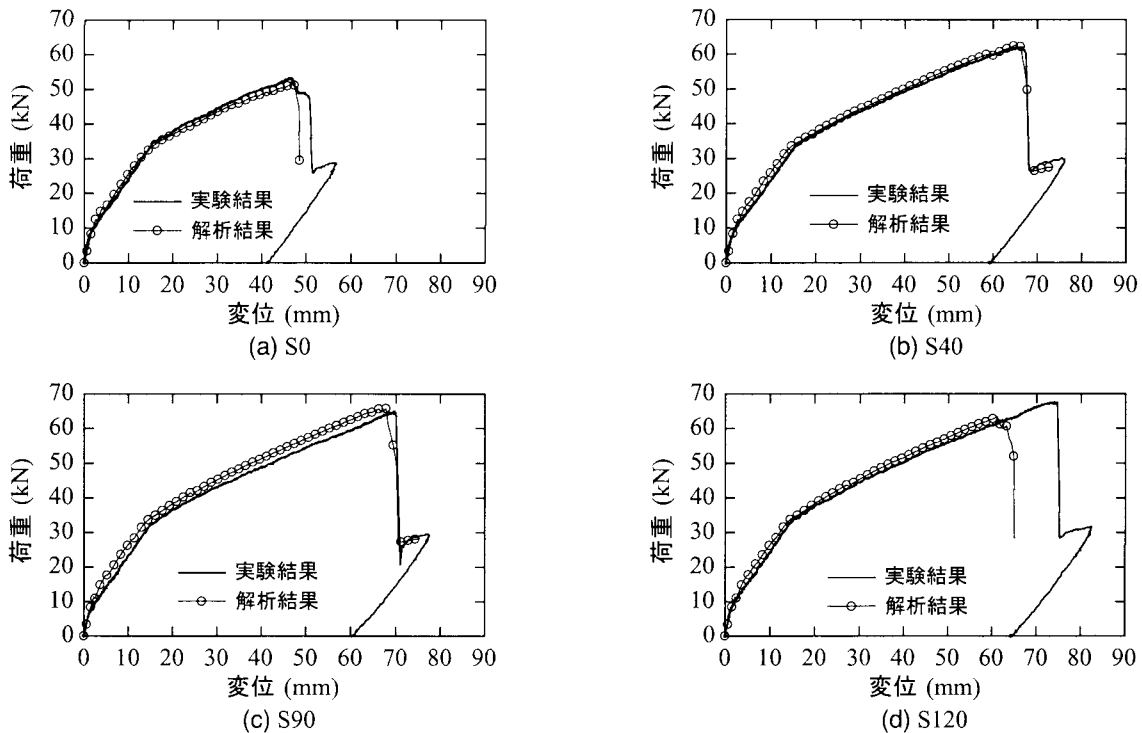


図-5 荷重-変位関係

び割れ状況に即して図-2に示すように配置した。一方、側面シートを有する3試験体に関しては、便宜的にS0試験体と同様の接触面要素を配置した。なお、側面補強シートとコンクリート間にも離散ひび割れを配置している。

4. 数値解析結果および考察

4.1 荷重-変位関係

図-5には各試験体における荷重-変位関係に関する解析結果を実験結果と比較して示している。各解析は全て曲げ補強シートの全面剥離によって終了している。

図-5(a)のS0試験体に関する比較図より、解析結果は変位47mm付近まで実験結果とよく一致している。その後、荷重は急激に低下していることが分かる。これは、かぶりコンクリートのピーリング作用によって斜めひび割れ先端部からシートの剥離が発生し、シートの全面剥離によって荷重が急激に低下したものと推察される。

(b)図のS40試験体に関する解析結果は、載荷初期からシートの全面剥離によって終局時に至るまで実験結果とよく一致していることが分かる。また、(c)図のS90試験体に関する比較図より、解析結果は剛性勾配が実験結果より若干大きく、終局時変位が実験結果をわずかに下回っているものの、S40試験体と同様に終局まで実験結果と大略対応していることが分かる。

一方、(d)図のS120試験体に関する比較図に着目すると、解析結果は変位61mm付近まで実験結果とよく一致している。しかしながら、終局荷重および終局時変位ともに実験結果を下回った結果となっている。これは、実験時には一方向シートを梁高さ方向に貼り付けているために曲げひび割れの発生が著しくは抑制されていないのに対して、解析ではシートを等方性材料と仮定していることと、シートの補強高さが高いことから、等せん断力区間におけるひび割れの発生が他の梁に比較して実験結果以上に抑制されたことによるものと推察される。

表-4 各試験体の最大荷重 P_{max} および最大荷重時変位 δ_{max} の一覧

| 試験体名 | 実験結果 | | 解析結果 | |
|------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|
| | P_{max} (kN) | δ_{max} (mm) | P_{max} (kN) | δ_{max} (mm) |
| S0 | 53.2 | 46.6 | 51.5 | 46.7 |
| S40 | 62.1 | 66.3 | 62.7 | 65.2 |
| S90 | 64.9 | 69.8 | 65.6 | 66.2 |
| S120 | 67.6 | 74.1 | 63.4 | 61.1 |

表-4には、各試験体の実験結果と解析結果の最大荷重 P_{max} および最大荷重時変位 δ_{max} をまとめて示している。表より、本実験範囲において、側面補強シート高さが高いほど最大荷重および最大荷重時変位が大きくなる傾向にあることが分かる。一方、解析結果では、S120試験体に関しては前述のように、シートを等方材料として仮定していることから、実験結果より小さい変位で終局に至ったものの、他の3試験体の場合には、実験結果と同様に側面補強シート高さが高いほど最大荷重および最大荷重時変位が大きくなる傾向があり、実験結果を大略再現している。

4.2 梁軸方向ひび割れ分布

図-6には、各試験体に関する解析結果の全面剥離直前における離散ひび割れの開口を含む梁の変形状況およびコンクリートの軸方向歪コンター図を示している。ここで、S40/90/120試験体の結果は、側面シートを除いたものである。なお、歪コンターレベルにおいて、100, 3000 μ の引張歪は、それぞれ図-3(a)に示すひび割れ発生歪 ϵ_{ty} 、ひび割れ開口歪 ϵ_{tu} と対応している。

図-6(a)に示しているS0試験体の結果を見ると、斜めひび割れ先端部において、斜めひび割れに起因するピーリング作用によってシートの剥離が開始し、支点側に向かって進行している状況が分かる。(b)のS40試験体に関しては、S0試験体と同様に、斜めひび割れ先端部からピーリング作用によってシートの剥離が発生している様子が見られ

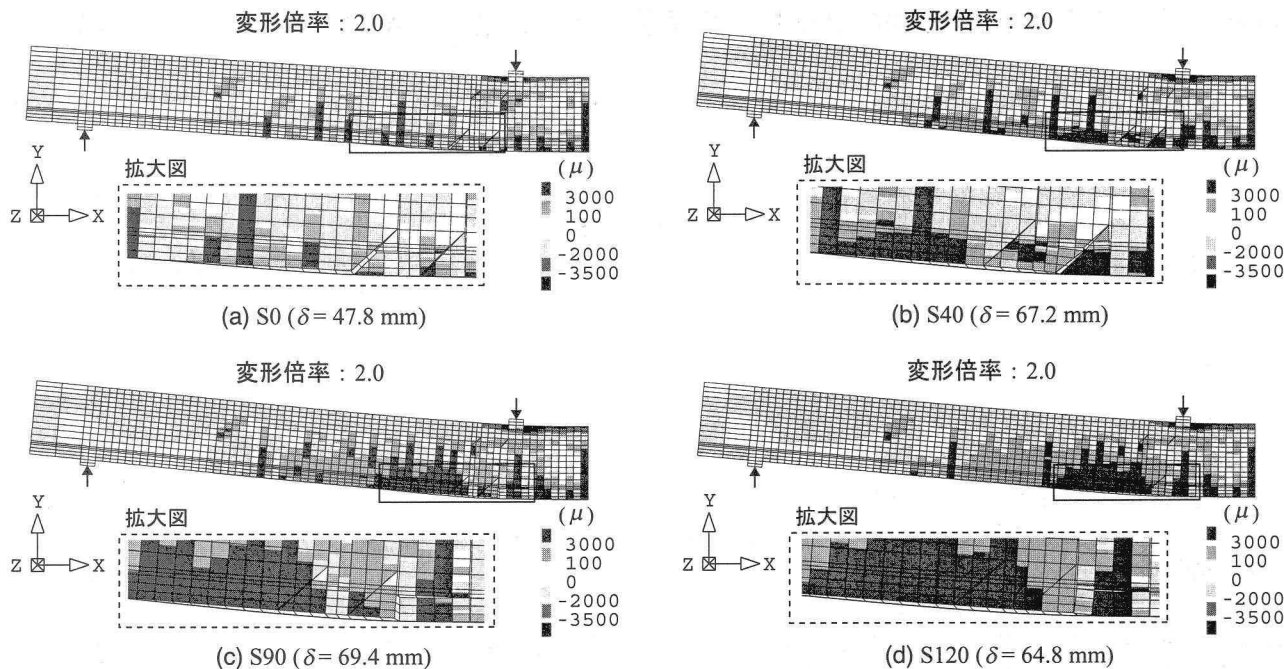


図-6 梁軸方向歪分布および変形図

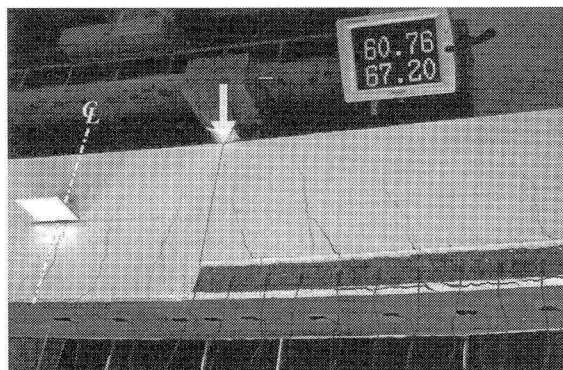


写真-1 剥離直前の側面シートの状況 (S40 試験体)

る。この場合には、S0 試験体の場合と比較して終局時の変位が大きいことから、側面補強シートによる剥離抑制効果がより現れているものと考えられる。また、写真-1には、S40 試験体の実験時におけるシート剥離直前のひび割れ状況を示している。写真より、斜めひび割れに起因するピーリング作用が生じていることが確認できることから、解析結果は実験結果とほぼ同様の挙動を示しているものと考えられる。

図-6の(c)、(d)に示しているS90試験体およびS120試験体に関する結果より、荷重点近傍下縁かぶりコンクリートには明瞭な斜めひび割れが現れず、等せん断力区間における荷重点近傍の曲げ離散ひび割れが大きく開口し、せん断力の作用によってその部分が下方に押し出されることに伴うピーリング作用によって、シート剥離が支点側に向かって進行していることが分かる。これは、側面補強シートを等方材料と仮定することにより、斜めひび割れの開口を大きく抑制していることに起因しているものと推察される。一方、実験結果では、両試験体とも、等せん断力区間に側面補強シートの繊維方向に沿った曲げひび割れの開口に伴うピーリング作用により終局に至っている。また、実験結果にも斜めひび割れの開口は見受けられないことか

ら、解析結果には実験結果における側面補強シートの補強効果を大略再現しているものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、側面補強を有するAFRPシート曲げ補強RC梁の耐荷性状や破壊挙動を適切に評価可能な数値解析手法の確立を目的として、側面補強高さの異なるAFRPシート曲げ補強RC梁を対象として数値解析を行い、実験結果と比較する形で検討を行った。本研究より得られた結果を整理すると、

- (1) 本研究で提案した解析手法を用いることにより、側面補強シートの補強高さにかかわらず、実験結果の荷重-変位関係およびシートの剥離挙動を大略再現可能であるものと考えられる。
- (2) 本研究の範囲内では、側面補強を施すことにより、曲げ補強のみの場合よりも最大荷重や最大荷重時変位を向上させることができ、曲げ補強シートの剥離抑制効果が期待できることが数値解析的にも明らかになった。
- (3) しかしながら、より適切に実験結果を再現するためには、解析においてFRPシートを異方材料として取り扱うべきであるものと考えられる。

参考文献

- 1) 栗橋 祐介, 岸 徳光, 三上 浩, 澤田 純之: FRPシート曲げ補強RC梁のシート剥離抑制法に関する一検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.1771-1776, 2003.
- 2) 岸 徳光, 三上 浩, 張 広鋒: FRPシート曲げ補強RC梁に関するシートの剥離挙動解析, 土木学会論文集, No. 725/V-58, pp.255-272, 2003.
- 3) Chajes, M.J., Finch, W.W., Januszka T.F., and Thomson T.A.: Bond and Force Transfer of Composite Material Plates Bonded to Concrete, *ACI Structural Journal*, V.93, No.2, pp.208-217, 1996.