

論文 ウェットボンディングによる FRP-RC ハイブリッド T 型梁の曲げ性能に関する実験的検討

岩下 健太郎^{*1}・呉 智深^{*2}・三島 勇人^{*3}

要旨: 著者らは, 鉄筋コンクリート構造の耐腐食性の向上と構造性能の高度化を目的として, 複数種類の連続繊維複合材 (FRP) を適材適所に用い, 0.29% 程度の小さな引張鉄筋比でも構造体として成立する FRP 主体の FRP - 鉄筋コンクリート (FRP-RC) ハイブリッド構造を提案し, ウェットボンディングにより実現した FRP-RC 梁の曲げ性能を初歩的に検討した。本研究では, 引張鉄筋比を大きくして鉄筋主体の構造とすることで FRP-RC 構造物の低コスト化や鉄筋降伏前の剛性の改良を図った。そして, 引張鉄筋比の増加による剛性やその他の曲げ構造性能の向上効果を実験的に検討するとともに, 既存の曲げ理論に基づく簡易算定手法により各種曲げ性能を評価した。

キーワード: FRP-RC ハイブリッド構造, ウェットボンディング, 適材適所, 鉄筋比, T 型梁

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 構造物の性能や寿命を損なう鉄筋やコンクリートの腐食・損傷問題が深刻であり, 高度な耐腐食性を有する連続繊維複合材 (Fiber reinforced polymers, 以後 FRP と呼称) の応用による RC 構造物の防食性の向上が期待されている。また, FRP の高い引張強度の活用により, 大規模震災時における損傷の軽減や復旧性を高度化させた RC 構造物の開発が大いに進められている。著者らは過去の研究^{1), 2)}において, 複数種類の FRP を適材適所に用い, 0.29% 程度の小さな引張鉄筋比でも構造体として成り立つ FRP 主体の FRP - 鉄筋コンクリート (FRP-RC) ハイブリッド構造を提案した。この構造では, RC 構造物の周囲を FRP で覆うことにより鉄筋の防食性を向上させただけでなく, 構造材の種類ごとに要求される性能を考慮して複数種類の FRP を適材適所に適用することにより, 曲げ構造性能を総合的に高度化させた。また, 引張鉄筋量を減らした分だけ配筋やコンクリートの打設が容易になるなど, 施工性の向上や工期の短縮にも期待でき

る。さらに, 大量の FRP を必要とする梁側面を被覆する FRP に要求性能を考慮して比較的低価格な E ガラス繊維 FRP (GFRP) を用いることにより低コスト化を図った。本研究では, FRP-RC 構造物内部の引張鉄筋量を増やし, 鉄筋主体の構造とすることで FRP 使用量を抑え, 材料面での低コスト化を図った。また, 過去の研究²⁾で課題となった鉄筋降伏前の剛性の改良を図った。

2. ウェットボンディングによる FRP-鉄筋コンクリートハイブリッド構造の提案

著者らが提案した FRP-RC 構造においては, 図 - 1 に示すように RC 構造物の側表面を全面的に FRP で覆うことで防食構造にすることを前提としている。ただし, 桁の側面に用いるせん断補強 FRP は曲げ補強 FRP に比べて接着面積がかなり大きくなることやせん断補強材の要求性能を考慮して, 比較的 low 価格で高伸度性状を有する E ガラス繊維を用いた FRP (GFRP) を用いる。また, 曲げ補強効果が効果的に得られる引張縁のコンクリート表面に, 表 - 1 に示すように比剛性・比

*1 茨城大学 工学部都市システム工学科産学官連携研究員 工博 (正会員)

*2 茨城大学 工学部都市システム工学科教授 工博 (正会員)

*3 茨城大学 工学部都市システム工学科

ウェットボンディングによる完全接着の確保

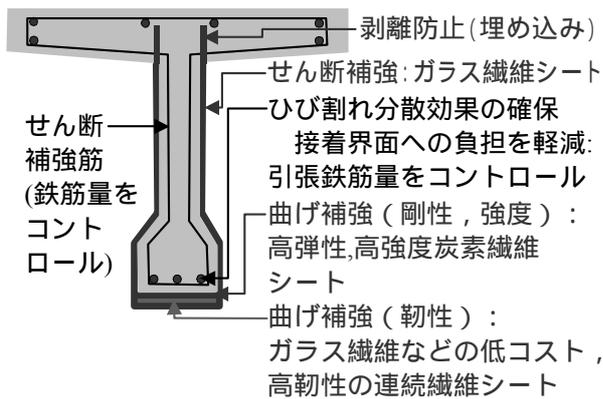


図 - 1 適材適所の概念に基づき提案した FRP-RC 構造

強度に優れる炭素繊維を用いた FRP (CFRP) と高伸度性状を有する GFRP を積層して配置し、ひび割れ発生荷重や剛性等の使用性、最大荷重、そして靱性といった曲げ構造性能の総合的な高度化を図った。さらに、FRP - コンクリート間の付着を確保するために、湿潤面への接着を可能にするウェットボンディングを用いる。ウェットボンディングとは、FRP の表面に事前にエポキシ樹脂を塗布したうえで硬化前にフレッシュコンクリートを打設する技術であり、過去の研究⁴⁾において、エポキシ樹脂とコンクリートの養生後には後接着補強の場合と同程度の付着強さが得られることが実験的に示されている。

3. 曲げ構造材に高弾性 FRP を用いた FRP-RC 梁の曲げ構造性能に関する実験的検討

3.1 T 型断面 FRP-RC 梁の製作

引張鉄筋比が異なる全長 2m の FRP-RC 梁を 5 体作製した (図 - 2)。これらの梁には 80mm 間

表 - 1 各種 FRP シートの引張特性一覧

各種指標	繊維材の種類	
	CFRP	GFRP
設計引張強度 (N/mm ²)	3400	1500
設計引張弾性率 (kN/mm ²)	230	80
設計破断伸度 (%)	1.48	1.88
単位面積重量 (g/m ²)	200	300
公称厚さ (mm)	0.111	0.118

表 - 2 FRP-RC 梁の FRP シートの種類と層数

供試体名	引張鉄筋比 (s)	曲げ補強 FRP	せん断補強 FRP
FRP-RC-0.29%	0.29%	2層CFRP 5層GFRP	2層GFRP
FRP-RC-0.43%	0.43%		
FRP-RC-0.77%	0.77%		
FRP-RC-1.20%	1.20%		
FRP-RC-1.73%	1.73%		
RC-2.38%	2.38%	なし	なし

隔の D10 帯鉄筋と 2 層のせん断補強 GFRP を配置して十分なせん断耐力を確保できるように設計した。曲げ補強 FRP には、表 - 2 に示すように 2 層の CFRP と 5 層の GFRP を用いた。ここで、各種梁に想定した引張鉄筋比はそれぞれ 0.29% (D6 × 3 本)、0.43% (D10 × 2 本)、0.77% (D13 × 2 本)、1.20% (D16 × 2 本)、そして 1.74% (D19 × 2 本) とし、それぞれの供試体を FRP-RC の後に引張鉄筋比をつけた名称で呼称する。また、これらの FRP-RC 梁の構造性能を標準的な RC 梁の場合と比較するために、引張鉄筋比を 2.38% に設定した RC 梁も 1 体作成した。次に、FRP-RC 梁の作製方法を以下に説明する。まず、連続繊維シートに 50% の繊維含有率 (V_f) 相当量の常温硬化型のエポキシ樹脂を含浸させ、樹脂が未硬

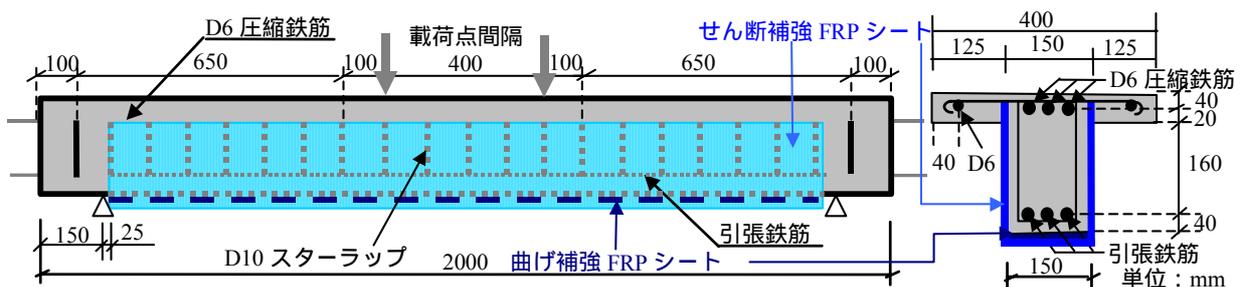


図 - 2 T 型断面 FRP-RC 梁の詳細寸法

化のうちに 150mm×300 mm の型枠に密着させ、室温環境下 (16 ±5) で硬化・成形した。ここで、上記の連続繊維材は 1 層ずつ手作業により樹脂で含浸し、コンクリートに近い方から順に、すなわち、曲げ補強炭素繊維材、ガラス繊維材、せん断補強ガラス繊維材の順に積層した。そして、T 型断面の型枠を組み、成形された FRP と所定の鉄筋比となるように径と本数を設定した異形鉄筋をその内側に設置し、FRP の内側表面に 0.5kg/m² 相当量のエポキシ樹脂を塗布したうえで、その樹脂が硬化する前にフレッシュコンクリートを打設して作製した。ここで、コンクリートの設計圧縮強度 30MPa、スランブ 80mm として配合し、セメントには早強ポルトランドセメントを使用した。また、100mm×200mm 円柱コンクリート供試体の圧縮試験において、28 日経過時の圧縮強度は 35.8MPa であった。

3.2 実験方法

載荷試験の方法は 4 点曲げとし、支点、載荷点の間隔をそれぞれ 1700mm、400mm に設定し、2000kN 加圧試験機を用いて 2kN/分の速度で載荷した。たわみ計測は 50mm 変位計を支間中央の梁両側面に設置して、両者の値を平均化した値を梁の最大たわみとして採用した。また、FRP ひずみは、梁作製前に支間中央及び両載荷点に相当する位置の CFRP 表面に設置した検長 5mm のひずみゲージで測定した。さらに、鉄筋ひずみは支間中央及び両載荷点に相当する位置における 1 本の引張鉄筋に設置した検長 5mm のひずみゲージで測定した。

3.3 実験結果

4 点曲げ試験において得られた荷重と変位の関係を図 - 3 に示す。まず、荷重をかけ始めてから破壊に至るまでの過程を説明すると、荷重を増加させ始めてから後しばらくして、剛性がやや低下する変曲点がある。ここでは、1 本目のひび割れが発生したものと推測される。その後、急激に剛性が低下する変曲点があるが、鉄筋の計

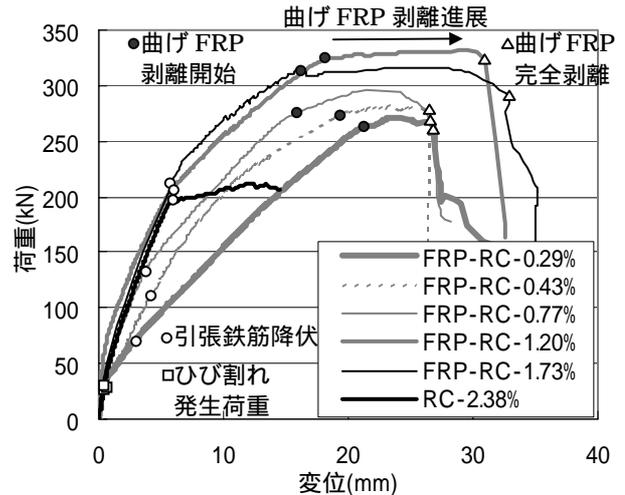


図 - 3 荷重 - 変位曲線

測ひずみが降伏ひずみとほぼ一致するため、この変曲点は鉄筋降伏を意味していると考えられる。そして、載荷点直下の FRP ひずみが 7000 μ e 程度まで到達すると載荷点直下付近から剥離音が生じ始め、その後は剥離音が継続するとともにほとんど荷重が増加しなくなり、たわみだけが增加した。このとき、梁の側面は FRP で覆われているために曲げ FRP の剥離を外部から確認できないが、側面のせん断補強 FRP が載荷点直下から支点方向に剥離していく様子が樹脂の変色と打音検査によって確認され、曲げ FRP の剥離進展が推測された。最後に、FRP が接着端部まで完全に剥離するとともに荷重が急激に低下し、その直後に支間中央付近の梁上縁部に圧縮破壊も生じたため、除荷して実験を終了した。次に、FRP-RC 梁の曲げ構造性能指標を評価するうえで、ひび割れ発生荷重、引張鉄筋降伏以前の剛性、引張鉄筋降伏荷重、引張鉄筋降伏後の剛性(以後、二次剛性と呼称)最大荷重、靱性、FRP シートの最大引張ひずみに注目した。まず、ひび割れ発生と引張鉄筋降伏に関しては、荷重 - 引張鉄筋ひずみ曲線(紙面の都合により省略)を作成して、その変曲点により判定した。ここで、ひび割れの発生や鉄筋降伏に伴う構造物の剛性低下により、荷重の増分より鉄筋ひずみの増分が大きくなると考えて変曲点から判定した。図 - 3 を拡大して読み取った値をまとめた表 -

3において、引張鉄筋比を大きくしてもひび割れ発生荷重はほとんど増加しないが、引張鉄筋降伏荷重は大きく増加したことがわかる。また、RC-2.38%梁における引張鉄筋降伏前の剛性を引張鉄筋比 1.20%以上の FRP-RC 梁において達成しており、引張鉄筋比を 1.20%以上により通常の RC 構造物レベルの剛性を達成できることが明確に示された。次に、二次剛性に関しては、RC-2.38%の場合にほとんど得られないのに対し、FRP-RC 梁の場合にはかなり大きな二次剛性が得られていることがわかる。また、引張鉄筋降伏後は鉄筋が受け持つ荷重が一定となるため、FRP 量が一定の場合に二次剛性は一定になると考えられ、実験結果(図-3)においても引張鉄筋比に関わらず同程度であることがわかる。最大荷重と靱性に関しては、まず、引張鉄筋比の増加に伴い最大荷重が増加した。さらに、荷重-変位曲線と変位軸に囲まれた部分の面積を靱性と定義して、引張鉄筋比が 1.2%を越える場合に卓越して靱性が大きいことがわかる。一方、表-4に示した FRP ひずみの最大値(完全剥離直前)において、剥離時の最大ひずみは $7481\mu\epsilon \sim 10743\mu\epsilon$ の範囲に大きくばらついており、ひずみゲージによる点計測でうまくひずみを測定できなかったことがわかる。そこで、著者らが過去の研究⁶⁾で提案した、FRP の剥離破壊モードにおける終局曲げモーメント M_u と FRP ひずみ ϵ_{fc}^* の関係式(1)に最大荷重の実測値から求めた M_u を入力して FRP の剥離ひずみを算出し、表-4に示した。

$$M_u = f_y A_s (d - y) + E_{fc} \epsilon_{fc}^* A_f (h - y) \quad (1)$$

ここで、 f_y は鉄筋降伏応力、 A_s は鉄筋の断面積、 d は梁上縁と引張鉄筋の距離、 $y = \beta_1 x / 2$ 、コンクリート標準示方書⁵⁾での推奨値を採用して $\beta_1 = 0.80$ 、 x は中立軸と梁上端の距離、 E_{fc} は FRP の引張弾性率、 A_f は FRP の断面積、そして h は梁せいを意味する。FRP 剥離ひずみの実測値と計算値から、0.29%程度の小さな引張鉄筋比であっ

表-3 ひび割れ発生荷重及び鉄筋降伏荷重一覧

供試体名	ひび割れ発生荷重 (kN)	鉄筋降伏荷重 (kN)
FRP-RC-0.29%	23.5	66.5
FRP-RC-0.43%	24.2	113.6
FRP-RC-0.77%	24.4	133.4
FRP-RC-1.20%	25.8	179.3
FRP-RC-1.73%	26.7	213.6

表-4 FRP ひずみの実測値と計算値

供試体名	実測最大FRPひずみ (μ)	計算FRP剥離ひずみ (μ)
FRP-RC-0.29%	8765	16500
FRP-RC-0.43%	8149	15140
FRP-RC-0.77%	8877	14630
FRP-RC-1.20%	10743	13240
FRP-RC-1.73%	7481	8770

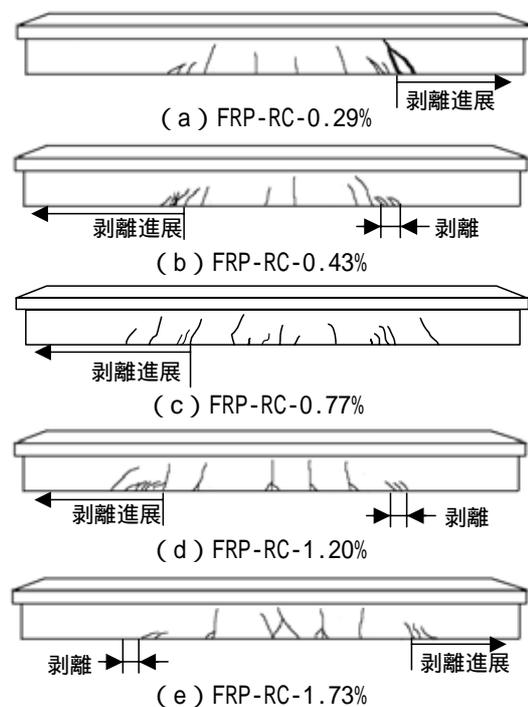
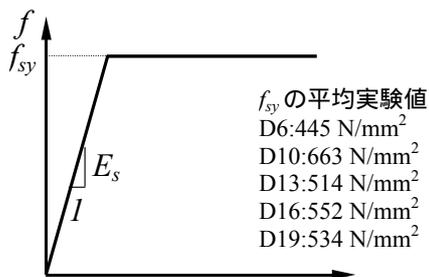
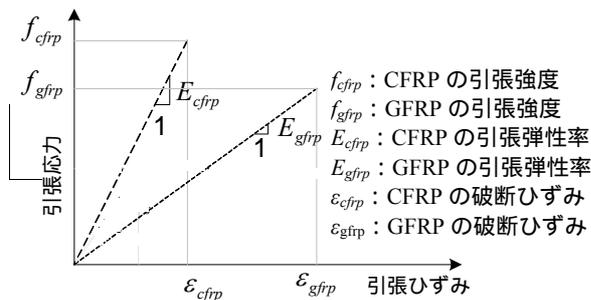


図-4 ひび割れ分布状況(曲げFRPの完全剥離後)

ても接着界面への負担がかなり低減されていることが明確に示された。また、除荷後にせん断FRPを剥がして確認したひび割れ分布図(図-4)より、引張鉄筋比に関わらずひび割れ分布に大きな違いは見受けられないことから、0.29%程度の小さな引張鉄筋比であってもひび割れがかなり分散しており、FRPの接着界面への負担がかなり軽減されていることがわかった。



(a) 異形鉄筋の引張挙動



(b) FRPシートの引張挙動

図 - 5 各種使用材料の応力 - ひずみ曲線

4. 簡易算定手法による FRP-RC 梁の曲げ構造性能評価

4.1 各種材料特性と引張・圧縮挙動の設定

コンクリート標準示方書 [設計編] (土木学会編)⁵⁾に示されている各種材料の引張挙動より、鉄筋は降伏応力度 f_{sy} までは傾き E_s で応力は増加し、降伏点を越えてからは破断ひずみ ε_s まで f_{su} を維持するものと仮定した (図 - 5 (a))。また、FRP シートに関しては、完全弾性体と考え、ハイブリッド化シートに含まれる FRP シートそれぞれの引張弾性率を考慮する (図 - 5 (b))。破断ひずみが小さい FRP シートから順に破断するものと考え、破断後は残された FRP シートのみで補強されているものとして考える。

4.2 ひび割れ発生荷重の算定

まず、各種材料の弾性係数をコンクリートの弾性係数 E_c で除した値 (弾性係数比) を各種材料の断面積に乘じ、コンクリートとして断面積を換算する。なお、弾性係数比は異形鉄筋では $n_s = E_s / E_c$ 、そして、FRP では $n_f = E_f / E_c$ である。次に、式 (2) から中立軸位置 h_c を求める。

表 - 5 FRP-RC 梁のひび割れ発生荷重の算定

供試体名	計算値 (kN)	実験値 (kN)
FRP-RC-0.29%	23.4	23.5
FRP-RC-0.43%	23.6	24.2
FRP-RC-0.77%	24.1	24.4
FRP-RC-1.20%	24.8	25.8
FRP-RC-1.73%	25.4	26.7
RC-2.38%	25.5	27.3

$$h_c = \frac{A_c d_c + A_s d_s (n_s - 1) + A_f d_f (n_f - 1)}{A_{total}} \quad (2)$$

ここで、 A_c は梁の断面積、 d_c は梁上縁から梁断面の図心までの距離、 A_s は引張鉄筋の断面積、 d_s は梁上縁から引張鉄筋までの距離、 A_f は曲げ FRP の断面積、 d_f は梁上縁から曲げ FRP までの距離を意味する。また、換算総面積 A_{total} は式 (3) から算出される。

$$A_{total} = A_c + A_s (n_s - 1) + A_f (n_f - 1) \quad (3)$$

そして、梁下縁での引張応力に関するつり合い条件により、ひび割れ発生荷重 P_{cr} は式 (4) から算出される。

$$P_{cr} = \frac{2 \cdot I_g \cdot f_t}{L_2 \cdot h_c} \quad (4)$$

ここで、 I_g は中立軸に対する断面 2 次モーメント、 f_t はコンクリートの引張強度、 L_2 は支点-載荷点間の距離である。

以上の方法により算出したひび割れ発生荷重の計算値を実験値とともに表 - 5 に示す。計算値と実験値はよく一致したことから、実験の再現性が確認された。

4.3 鉄筋降伏荷重の算定

鉄筋降伏荷重を算定するうえで、まず、梁上縁のコンクリートが受け持つ圧縮応力と梁下部の引張鉄筋および FRP が受け持つ引張応力のつり合い条件に基づき中立軸を算定する。このとき、コンクリート標準示方書 [設計編] (土木学会編)⁵⁾

表 - 6 FRP-RC 梁の鉄筋降伏荷重の算定

供試体名	計算値 (kN)	実験値 (kN)
FRP-RC-0.29%	63.6	66.5
FRP-RC-0.43%	111.4	113.6
FRP-RC-0.77%	120.8	133.4
FRP-RC-1.20%	170.5	179.3
FRP-RC-1.73%	210.0	213.6
RC-2.38%	214.9	207.7

に基づき圧縮鉄筋は無視する。そして、中立軸に対する引張鉄筋および FRP の曲げモーメントを算出し、これを荷重に変換する。このとき、引張鉄筋が受け持つ引張応力には、別途、鉄筋径ごとに行った3本の引張試験から得られた引張降伏強度の平均値(図 - 5 (a))を入力する。また、FRP が受け持つ引張応力には、断面保持の条件に基づき引張鉄筋の降伏強度から梁下縁部における応力に換算した引張応力を入力することで鉄筋降伏荷重が算出される。以上の方法により求めた鉄筋降伏荷重の算出結果を実験値とともに表 - 6 に示す。計算値と実験値はよく一致したことから、実験の再現性が確認された。

5. まとめ

本研究では、引張鉄筋比を考慮することで、過去に提案したFRP-RC 構造物の低コスト化および高性能化を図った。本研究で得られた主な知見を以下に示す。

(1) FRP-RC 構造梁において、引張鉄筋比を1.20%より大きくすることで、過去の研究において課題となった鉄筋降伏前の剛性を通常の RC 構造物のレベルにある 2.38%の引張鉄筋比を有する RC 梁と同等以上のレベルに向上させることができた。また、引張鉄筋降伏荷重、最大荷重、靱性といった曲げ構造性能も引張鉄筋比をより大きく設定することで向上させられることを実験的に示した。さらに、FRP-RC 梁においてかなり大きな二次剛性が得られることがわかった。

(2) 引張鉄筋比を 0.29%に設定した FRP-RC 梁において、FRP 剥離ひずみの実測値と計算値は共に FRP の破断ひずみ直前にまで達しているこ

とと、引張鉄筋比に関わらずひび割れ分布に大きな違いは見受けられないことから、0.29%程度の小さな引張鉄筋比に設定しても接着界面への負担がかなり低減されていることが明確に示された。

(3) FRP-RC 梁のひび割れ発生荷重と鉄筋降伏荷重を既存の曲げ理論に基づき評価した結果、計算値と実験値はよく一致しており、実験の再現性が確認された。

謝辞

日鉄コンポジット株式会社より連続繊維材およびエポキシ樹脂材をご提供いただいた。ここに記して深く感謝申し上げる次第である。

参考文献

- 1) Wu, Z.S., Li, W., Sakuma, N.: Innovative externally bonded FRP/concrete hybrid flexural members, Composite Structures, Elsevier, Vol. 72, Iss. 3, pp. 289-300, 2006.3
- 2) 岩下健太郎, 呉智深, 朱海堂, 石田英靖: ウェットボンディングによる FRP - コンクリートハイブリッド曲げ構造の創出, 土木学会第 61 回年次学術講演概要集, 京都, CS02-045, pp.157-158, 2006.9
- 3) 呉智深, 坂本宏司, 岩下健太郎, 小林朗: 高弾性炭素繊維シートのハイブリッド化による RC 梁の曲げ性能向上に関する研究, 応用力学論文集, 土木学会, Vol.8, pp.987-997, 2005.8
- 4) Y. Shao, Z.S. Wu, H. Zhu: FRP-Concrete Composite Beams Using Wet-Bonding Technology, 9th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition, Tokyo, pp.1024-1029, 2005.11
- 5) コンクリート標準示方書 [設計編], 土木学会, 1996.
- 6) 呉智深, 松崎智優, 福沢公夫, 神田建: CFRP シート緊張接着による鉄筋コンクリート曲げ部材の補強効果に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.641/V-46, pp.153-165, 2000