

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博士論文概要

論文題目

FRP により補強された鉄筋コンクリート部材の
構造性能評価

Evaluation of Structural Performance of Reinforced
Concrete Members Strengthened by FRP

申請者

小林 朗

Akira KOBAYASHI

2020年7月

我が国では、社会基盤施設の老朽化が急速に進んでいく中で、その維持管理を適切に行っていくことの重要性が増している。既設コンクリート構造物の老朽化対策や要求性能の高度化に対して、各種の補修・補強工法が実用化されているが、新設の構造物と異なる構造面や施工面などの制約が多く、それらの課題を解決するために、軽量かつ高強度の FRP を用いたコンクリート構造物の補修・補強工法へのニーズが高まっている。FRP の建設分野への材料としての利用(補強用 FRP) に関しては、1980 年代から研究・開発が行われるようになった比較的新しい技術であり、設計・施工上のニーズに十分に対応できていない点も多いこと、また高性能繊維と樹脂の複合材料である FRP のもつ高強度・高剛性、高耐食性や軽量性などの優れた特性、すなわちシーズを活用できていない点も多い。そこで本研究では、既存の補強用 FRP の利用にとどまらず、FRP の持つシーズをコンクリート構造物の補強に対するニーズに適合させるために、新たな補強用 FRP および補強工法の開発、補強用 FRP を用いた部材試験を通じた補強効果の確認と設計法に関する検討を行った。

2 章では、FRP シートの施工上の弱点と FRP プレートの構造上の弱点を克服した FRP スtrandシートを新たに開発し、その材料特性および補強効果を、FRP スtrandシートを接着して曲げ補強した鉄筋コンクリート(以下、RC) はりの耐荷性状を通じて明らかにした。

FRP シート接着工法は、施工現場で繊維に結合材となる含浸接着樹脂を含浸して FRP を形成する必要があるため浮きや膨れなどの施工欠陥が発生しやすいという課題があった。FRP プレート接着工法は、工場製作された FRP プレートを使用するため現場含浸工程が必要なく施工の効率化が図られるが、接着面積が狭いためはく離が発生しやすいといった課題があった。本研究で開発した FRP スtrandシートは、従来の FRP シートのように施工現場で樹脂を含浸させる必要がなく、含浸不良の恐れがなく、浮きや膨れなどの施工欠陥が生じにくく、施工の効率化および施工品質の向上を図ることができる。また FRP スtrandシートは、薄いシート状の補強材であり FRP シートと同様に部材の補強面全面に接着することが可能であり、FRP プレートに比べてはく離が発生しにくいと考えられる。そこで 2 章では、FRP スtrandシートの引張試験およびコンクリートとの付着試験を行い、同種の連続繊維を用いた FRP シートと同等の引張強度および付着強度を有することを確認した。さらに、部材レベルでの補強効果を確認するために、繊維の種類、引張強度、ヤング係数および厚さの異なる FRP スtrandシートを接着して補強した RC はりの曲げ載荷試験を行った。その結果、FRP スtrandシートで補強した RC はりは、従来型の FRP シートとほぼ同等の降伏耐力および曲げ耐力を有することを、また、FRP スtrandシートの引張剛性がシートのは

く離性状に大きな影響を及ぼすことを明らかにした。

3章では、FRP 接着による曲げ補強の課題である補強用 FRP のコンクリートからのはく離を抑制するため、弾性係数が低く破断伸度の大きい柔軟性のある高伸度弾性樹脂を介して補強用 FRP をコンクリートに接着する工法について検討した。高伸度弾性樹脂としてポリウレア樹脂を、補強用 FRP として CFRP スtrandシートを用いて、コンクリートとの付着試験、接着補強した RC はりの曲げ載荷試験を行った。

付着試験では、ポリウレア樹脂を用いることで、従来の接着方法に比べて、はく離荷重が 2 倍以上に増加することと有効付着長が長くなることを確認した。付着強度の改善について付着応力-すべり関係から考察し、局所付着応力の最大値は低下するが、終局すべりが大幅に大きくなることで界面はく離破壊エネルギーがポリウレア樹脂を用いない場合より大幅に増加することが明らかとなった。また、接着界面の力のつり合いによる数値解析により、付着試験で得られた付着応力-すべり関係を用いることで界面はく離荷重を概ね算定できることを示した。

CFRP スtrandシートを、ポリウレア樹脂を用いて接着補強した RC はりの曲げ載荷試験の結果、ポリウレア樹脂を用いることで CFRP スtrandシートのはく離発生荷重が大きく増加することを確認した。ただし、CFRP スtrandシートの定着長が 670mm と短い場合には、接着端部まで CFRP スtrandシートに引張力が伝達され、接着端部の付着応力が高くなりかぶりコンクリートが主鉄筋に沿って破壊することが確認された。定着長を 970mm と長くとることではりのせん断スパン比 a/d によらず接着端部からのかぶりコンクリートの破壊を抑制し、より高い補強効果が得られることを明らかにした。

4章では、ボックスカルバートなどの地下構造物の壁面や中壁などの面部材の面外せん断力に対する補強工法として、あと施工差込型 FRP 補強材を用いる補強工法を考案し、引抜試験と RC はりのせん断載荷試験によりその補強効果を検討した。

引抜試験では、コンクリートのアンカー穴内に、軸筋に直交する横筋が突出した格子点を持つ CFRP 格子筋を差し込み、膨張剤を配合したモルタル充填材を充填して定着し、CFRP 格子筋に引張力を負荷し付着性状を検討した。その結果、モルタルで定着した CFRP 格子筋の付着特性は、CFRP 格子筋表面の付着・摩擦と格子点の機械的定着の相互の影響を受けること、格子点が 1 点以上あれば、軸筋が引張破断し、格子点が 2 点ある場合には、すべりは 2 つ目の格子点の手前までの範囲で生じ定着部全長には進展しないことが明らかとなった。

RC はりのせん断載荷試験では、はりの高さ方向に削孔したアンカー穴内に CFRP 補強材を差し込みせん断補強した RC はりの載荷試験を行った。補強材としては、2 本の軸筋が 1 端で横筋により連結された U 字型 CFRP 補強筋と直線状

の CFRP 格子筋および外周にらせん状の節をもつ CFRP ロッドの 3 種類を、充填材として U 字型 CFRP 補強筋と CFRP 格子筋に対しては膨張剤を配合したモルタル充填材を、CFRP ロッドに対してはモルタル充填材およびエポキシ樹脂充填材の 2 種類を用いて補強を行った。U 字型補強筋では、RC はりの上面もしくは下面に接する横筋の機械的定着が得られるが、アンカー穴内の軸筋の端部では引抜けが発生するため、補強したはりの荷重変位関係は、補強筋の差し込み方向および斜めひび割れの位置の影響を受けることが明らかにした。CFRP 格子筋の場合、引張側主鉄筋および圧縮側主鉄筋かぶり部に格子点を配することで、CFRP ロッドの場合には充填材としてエポキシ樹脂を用いることで補強材を定着することが可能であり、補強した RC のせん断耐力は、土木学会の「連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針（案）」のせん断耐力式で安全側に評価できることを明らかにした。

5 章では、FRP シートで接着補強した道路橋の RC 床版の疲労寿命の予測手法について検討した。FRP シート接着による RC 床版の疲労寿命向上効果は、中立軸の深化による圧縮側コンクリートの有効断面の増加、異方性度の改善、ひび割れ拘束の 3 つのメカニズムにより説明できるものとし、無補強床版に対する寿命増加率をこれらの 3 つの補強効果の積としてあらわす方法を提案した。大阪大学の輪荷重走行試験機で行われた 17 体の FRP シート接着補強床版の疲労試験の結果を整理し、寿命増加率の定式化を行った。本提案法によれば、算定した寿命増加率と松井の提案する RC 床版の SN 関係式により算定した母床版の疲労破壊回数から、FRP シート補強床版の疲労破壊寿命を精度よく算定できる。加えて、本手法の適用限界として、FRP シートの補強量が過大となると、寿命増加率が低減する可能性があること、特に床版厚が薄く異方性の強い床版を引張剛性の高い FRP シートで補強した場合にその可能性が高くなることを示した。

本研究の成果を総括する。本研究において、新たな補強用 FRP として FRP スtrand シートの考案とその曲げ補強効果の検証を行い、FRP 接着工法のはく離を抑制するためポリウレタ樹脂を高伸度弾性樹脂として用いた工法の開発とその高い付着性能の確認、さらには、付着応力-すべり関係のモデル化およびはく離荷重の評価法の検討を行い、面部材の面外せん断力に対する補強工法としてあと施工差込型 FRP 補強材を用いる工法の開発と補強部材のせん断耐力の算定法を検討し、最後に FRP シートで接着補強された道路橋 RC 床版の疲労寿命予測手法の提案と補強床版の S-N 関係式を提示した。本研究で開発した新たな補強用 FRP や補強工法の多くは、すでに実際に利用されており、本研究は、社会基盤施設のコンクリート構造物の効率的・効果的な補強を通じて維持管理工学に大きく貢献するものと考えられる。

以上

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 小林 朗 印

(2020年 6月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	<p>○(1) 高伸度弾性樹脂を用いて接着した FRP シートとコンクリートの付着挙動に関する研究：構造工学論文集，Vol. 66A，pp.855-867，2020.4，<u>小林朗</u>・尾崎充彦・佐藤靖彦・荒添正棋・立石晶洋・小森篤也</p> <p>○(2) 連続繊維シート接着により補強された道路橋 RC 床版の疲労寿命算定法に関する一検討：構造工学論文集，Vol. 62A，pp.1261-1271，2016.3，<u>小林朗</u>・松井繁之</p> <p>(3) 界面にポリウレタ樹脂を塗布された CFRP スtrandシート補強 RC はりの曲げ挙動に関する実験的研究：コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.2，pp.1285-1290，2013.7，高橋義裕・荒添正棋・<u>小林朗</u>・佐藤靖彦</p> <p>○(4) FRP スtrandシートの材料特性と RC 梁の曲げ補強効果に関する研究：コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.1561-1566，2008.7，<u>小林朗</u>・佐藤靖彦・高橋義裕・立石晶洋</p> <p>(5) 炭素繊維プレートにより補強された RC はりの破壊挙動：コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.1519-1524，2008.7，佐藤靖彦・<u>小林朗</u>・高橋義裕</p> <p>○(6) あと施工差込型連続繊維補強材により補強された RC はりのせん断耐力に関する実験的研究：コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.1585-1590，2007.7，<u>小林朗</u>・佐藤靖彦・高橋義裕</p> <p>○(7) 炭素繊維シート格子接着工法により補強した RC 床版の疲労耐久性：コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，pp.1513-1518，2005.6，<u>小林朗</u>・蔡華堅・下西勝・松井繁之</p> <p>○(8) 埋込型 FRP 筋の付着特性とはり部材のせん断補強効果：コンクリート構造物の補修補強アップグレード論文報告集，Vol.4，pp.401-408，2004.10，<u>小林朗</u>・佐藤靖彦・阿部篤史</p> <p>○(9) FRP 補強材埋め込み方式で補強された RC はりのせん断性状：コンクリート構造物の補修補強アップグレード論文報告集，Vol.3，pp.83-86，2003.10，<u>小林朗</u>・増渕基・佐藤靖彦</p>
講演	<p>(1) EFFECT OF CONCRETE STRENGTH AND AMOUNT OF POLYUREA RESIN ON CONCRETE – STRAND SHEET BOND: Proceedings of the 8th International Conference on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering (CICE 2016), CD-ROM, 2016.12, M. Arazoe, <u>A. Kobayashi</u>, Y. Takahashi and Y. Sato</p> <p>(2) スtrandシート補強 RC はりの曲げ耐力：土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集，V-120，pp.239-240，2014.9，高橋義裕・<u>小林朗</u>・荒添正棋・佐藤靖彦</p> <p>(3) BONDING CHARACTERISTIC AND STRENGTHENING EFFECT OF STRAND SHEET WITH SOFT LAYER: Proceedings of the 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2012), CD-ROM, 2012.6, M. Arazoe, Y. Sato, Y. Takahashi and <u>A. Kobayashi</u></p> <p>(4) BASIC CHARACTERISTICS OF FRP STRAND SHEETS AND FLEXURAL BEHAVIOR OF RC BEAMS STRENGTHENED WITH FRP STRAND SHEETS : The Second official International Conference of International Institute for FRP in Construction for Asia-Pacific Region, pp.93-98, 2009.12, <u>A. Kobayashi</u>, Y. Sato, Y. Takahashi</p> <p>(5) STUDY ON BASIC CHARACTERISTICS OF FRP STRAND SHEETS AND ITS FLEXURAL STRENGTHENING FOR RC BEAMS: Proceedings of the 9th international Symposium on Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures, CD-ROM, 2009.7, <u>A. Kobayashi</u>, Y. Sato, Y. Takahashi</p>

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
特許	(6) STUDY ON FLEXURAL CAPACITY OF RC BEAMS REINFORCED WITH CFRP SHEET, CFRP PLATE AND CFRP STRAND SHEET: Proceedings of the 9 th international Symposium on Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures, CD-ROM, 2009.7, Y. Takahashi, Y. Sato, <u>A. Kobayashi</u>
	(7) 各種補強材により下面補強された RC はりの曲げ耐力に関する実験的研究：土木学会第 63 回年次学術講演会, V-493, pp.985-986, 2008.9, 高橋義裕・佐藤靖彦・ <u>小林朗</u>
	(8) 面状 CFRP 補強材の付着性状に関する一検討：土木学会第 62 回年次学術講演会概要集, V-376, pp.751-752, 2007.9, 立石晶洋・ <u>小林朗</u> ・佐藤靖彦
	(9) 格子配置された炭素繊維シートによる床版補強効果：第 3 回道路床版シンポジウム講演論文集, pp.175-190, 2003.6, 岡田昌澄・大西弘志・松井繁之・ <u>小林朗</u>
	○ (1) コンクリート構造物の補強方法及び補強構造体、並びに、コンクリート構造物補強用弾性層形成材, 特許第 5478651 号, 2012.2.28 出願, <u>小林朗</u> ・小森篤也・荒添正棋
	○ (2) 繊維強化シート及びその製造方法：特許第 5254930 号, 2009.10.27 出願, 宮尾巻治・ <u>小林朗</u>
	○ (3) 構造物の補強方法：特許第 5214864 号, 2006.9.5 出願, <u>小林朗</u> ・竹田敏和・宮尾巻治
	○ (4) コンクリート構造物の補強方法：特許第 4194894 号, 2003.7.8 出願, <u>小林朗</u> ・佐藤靖彦
	○ (5) 道路橋床版の補強方法：特許第 4004436 号, 2003.5.30 出願, 小島宏・松井繁之・岡田昌澄・中野博文・ <u>小林朗</u> ・久部修弘・深川英明・藤本宜充
その他 論文	(1) CFRP プレート接着補強工法におけるポリウレア樹脂挿入による付着性能の改善: コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.1129-1134, 2017.7, 扇孝洋・日野伸一・畠山繁忠・ <u>小林朗</u>
(2) 中・高弾性型 CFS 接着補強におけるポリウレア樹脂を用いた RC 床版の耐疲労性の評価: コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.1135-1140, 2017.7, 小森篤也・ <u>小林朗</u> ・阿部忠	
(3) 道路橋 RC 床版の急速施工型上面補強法の開発と施工例: コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.2125-2130, 2017.7, 小森篤也・ <u>小林朗</u> ・阿部忠	
(4) Strengthening of steel plates subjected to uniaxial compression using small-diameter CFRP strands: Construction and Building Materials, Vol.111, pp.223-236, 2016, Hamid Kazem, Lucas Guaderrama, Hatem Selim, Sami Rizkalla, <u>Akira Kobayashi</u>	
(5) 高伸度弾性パテ材を用いた炭素繊維シート接着による鋼桁補修設計法の提案：土木学会論文集 F4, Vol.71, No.1, pp.44-63, 2015.4, 若林大・宮下剛・奥山雄介・秀熊佑哉・ <u>小林朗</u> ・小出宜央・堀本歴・長井正嗣	
(6) New small-diameter CFRP material for flexural strengthening of steel bridge girders: Construction and Building Materials, Vol.95, pp.748-756, 2015, Salar Tabrizi, Hamid Kazem, Sami Rizkalla, <u>Akira Kobayashi</u>	
(7) 鋼部材腐食損傷部の炭素繊維シートによる補修技術に関する設計・施工法の提案：土木学会論文集 F, Vol.65, No.1, pp.106-118, 2009.3, 杉浦江・ <u>小林朗</u> ・稲葉尚文・本間淳史・大垣賀津雄・長井正嗣	

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	(8) 緊張した炭素繊維プレートによる既設コンクリート部材の補強に関する研究：土木学会論文集, No.711/V-56, pp.27-44, 2002.8, 濱田譲・井上真澄・ <u>小林朗</u> ・高木宣章・児島孝之
	(9) 炭素繊維フレキシブル筋を用いたコンクリート橋脚の変形特性について：コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.853-858, 2001.7, 大久保証一郎・佐藤靖彦・ローシャントウラダー・ <u>小林朗</u>
	(10) 炭素繊維シートの付着せん断強度に関する研究：コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.319-324, 2000.7, 土谷逸郎・ <u>小林朗</u> ・松井繁之・真鍋隆 その他：7件
	(1) 超軽量 FRP 複合床版の強度特性に関する基礎的研究：土木学会第 72 回年次学術講演会概要集, CS5, pp.19-20, 2017.9, <u>小林朗</u> ・秀熊佑哉・大垣賀津雄
	(2) Strengthening of steel and concrete structures using CFRP in Japan: IABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering III, pp.597-606, 2015.8, <u>A. Kobayashi</u> , Y. Hidekuma and A. Tateishi
	(3) 高温時におけるポリウレタ樹脂層を有する炭素繊維シート補強工法の付着特性（1）— 実験的検討—：土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集, V-127, pp.253-254, 2014.9, 荒添正棋・ <u>小林朗</u> ・山野辺慎・新井崇裕・佐藤靖彦
	(4) 高温時におけるポリウレタ樹脂層を有する炭素繊維シート補強工法の付着特性（2）— 解析的検討—：土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集, V-127, pp.255-256, 2014.9, 新井崇裕・山野辺慎・荒添正棋・ <u>小林朗</u> ・佐藤靖彦
	(5) FATIGUE BOND OF CARBON FIBER SHEETS AND CONCRETE IN RC SLAB STRENGTHENED BY CFRP: Proceedings of the Sixth International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCE-6), PP.865-874, 2003.7, <u>A. Kobayashi</u> , S. Matsui, M. Kishimoto
	(6) 炭素繊維シートによる RC 橋脚の耐力およびじん性補強に関する研究: コンクリート構造物の補強設計・施工の将来像—性能照査型補強設計指針(指案), pp.II175-185, 1998.4, <u>小林朗</u> ・松井繁之・李泳昊・真鍋隆・伊藤嘉修 その他 47件
	著書
特許	(1) 鋼構造物の補修補強方法：特許第 6327634 号, 2013.12.26 出願, 宮下剛・長井正嗣・奥山雄介・青木圭一・若林大・大垣賀津雄・小出宜央・ <u>小林朗</u> ・小森篤也・秀熊佑哉
	(2) 地中に埋設されたコンクリート構造物の補強方法及び補強されたコンクリート構造物：特許第 4582771 号, 2004.8.4 出願, <u>小林朗</u> ・斉藤誠
	(3) コンクリート剥落防止方法：特許第 4314163 号, 2004.6.22 出願, <u>小林朗</u> ・斉藤誠 その他 46件