

博士論文審査報告書

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

--

小林朗氏の論文に関し、慎重に審査員と学科教員で審査を行ったので審査内容を報告する。まず建設工学専攻の論文博士としての要件である、土木学会構造工学論文集など主要な論文集に筆頭著者として数編採択されて掲載されたことを確認し、研究業績が十分にあることを認めた。また2020年4月24日に開催された予備審査会、2020年8月25日に開催された公聴会などの口頭発表と質疑応答から、研究内容に独創性があり完成度が高いことを確認した。4項目の学識確認課題に対して、十分に当該分野に学識があることを確認した。研究倫理に関して所定の講義を受け合格していることと、論文の剽窃・盗用チェックを実施して問題のないことを確認した。以上より博士論文の要件を満たしていることを確認した。以下に審査した本論文の内容について述べる。

社会基盤施設の老朽化が急速に進む中、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。しかし、既設構造物は、新設の構造物と異なる構造的および施工的制約を有し、現在、それらの課題を解決するために、軽量かつ高強度を有するFiber Reinforced Polymer (FRP)の補修・補強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）を目指した研究・開発は、1980年代から始まっておりその歴史は浅い。それゆえ、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ストランド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ストランド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。具体的には、FRPストランド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ストランド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ストランドシートで補強した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ストランド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 として炭素繊維（以下、CFRP）ストランドシートを用いて、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を明らかにした。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。一方、RC はりの曲げ載荷試験では、ポリウレア樹脂を用いることで CFRP ストランド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 ストランドシートの定着長が短い場合には、接着端部まで CFRP ストランド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軸方向鉄筋に沿って破壊することが確認された。定着長を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。一方、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たつた。CFRP 格子筋の場合、かぶりコンクリート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 床版の疲労寿命の向上効果は、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。本提案手法によれば、算定した寿命増加率と松井の提案する RC 床版の S-N 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、コンクリート構造物の効率的・効果的な補強を通じて社会基盤施設の適正な管理に大きく資するものと考えられる。すなわち、本研究のコンクリート工学および維持管理工学上の貢献は大なるものと判断される。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

2020 年 10 月

審査員 主査 早稲田大学教授 博士(工学) 北海道大学 佐藤靖彦

副査 早稲田大学教授 博士(工学) 早稲田大学 岩波 基

副査 早稲田大学教授 博士(工学) 大阪大学 小野 潔

副査 早稲田大学教授 博士(工学) 東北大学 秋山充良
