

論文 高弾性 CFRP ロッドで補強されたコンクリート床版の曲げ特性に関する研究

久部 修弘*1・手塚 光晴*2・谷木 謙介*1・佐藤 正一*3

要旨：道路橋 RC 床版の上面（張出し部、支点部）を炭素繊維シート（以下 CFS）で補強する場合、CFS を貼付した上に直接橋面防水とアスファルト舗装を行う為、防水層更新時の CFS 保護対策や、CFS 層とアスファルト層の付着性能確保等の必要性が指摘されている。本研究ではこれらの問題点を解決する為に、高弾性 CFRP ロッドを引張強度の高い薄肉樹脂モルタル層の中に埋設して補強層とする工法を検討し、その補強効果を曲げ試験によって確認した。その結果、樹脂モルタルによるひび割れ抑制効果と、CFRP ロッドによる鉄筋降伏点までの補強効果の定量化が可能である事が確認された。

キーワード：CFRP ロッド, 炭素繊維, 床版, 曲げ補強, 樹脂モルタル

1. はじめに

B 活荷重の対応等により、近年道路橋の床版を補強する機会が増加している。補強工法の種類としては、増厚工法、鋼板接着工法、縦桁増設工法、炭素繊維シート（以下 CFS）接着工法等が挙げられている。この内、CFS 接着工法は、軽量、高強度高弾性、高耐久性が特徴の CFS を用いる工法であり、その工法優位性から多数実績のある工法である。

CFS で既設床版を補強する部位は、床版下面（支間部）、床版上面（張出し部、支点部）に大別される（図-1）。床版下面への適用については明確に指針化¹⁾がなされている。一方、床版上面への適用については、CFS の補強厚が数 mm と非常に薄く、アスファルト厚さが補強前とほぼ同等に確保できるという利点があり、採用実績も増加している。

しかし、床版上面を CFS で補強する工法は CFS を貼付した上に直接橋面防水とアスファルト舗装を行う為、防水層更新時の CFS 保護対策や、CFS 層とアスファルト層の付着性能確保等の必要性が指摘されている。

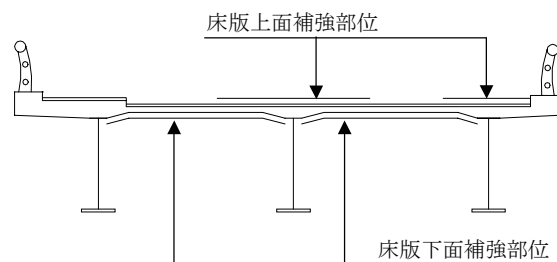


図-1 床版補強部位

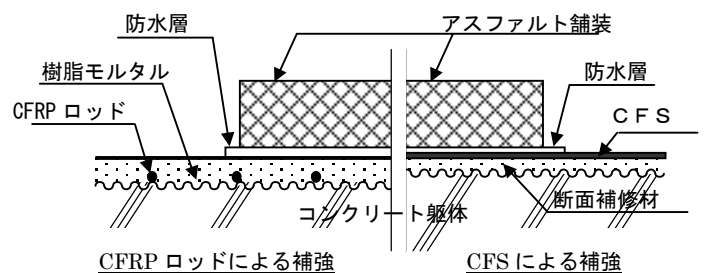


図-2 床版上面補強概念図



写真-1 CFRP ロッド形状

*1 三菱化学産資（株）土木資材事業部 CF 複合材グループ（正会員）

*2 三菱化学産資（株）商品研究所 工修

*3 三菱化学産資（株）土木資材事業部 CF 複合材グループ

これらの問題を解決する為に、本研究では、炭素繊維に樹脂をマトリックスとして棒状に成形した炭素繊維補強ロッド(以下 CFRP ロッド)を切削した床版上面に配し、引張強度の高い樹脂モルタルで既存床版面まで埋め戻す工法を検討した(図-2)。CFRP ロッドは CFS 同様非常に耐久性に優れている為、鉄筋を使用した RC 増厚工法のように数十 mm のかぶりを確保する必要はなく、従って既存床版の切削深さも十数 mm 程度で済むというメリットがある。さらに、よりコスト削減を可能とする為に、供用時の補強効率に優れた高弾性型の炭素繊維を用いた CFRP ロッドも使用した。

床版上面の設計は現在、鉄筋応力度等に着目した許容応力度設計法³⁾で行われているので、鉄筋が降伏するまでの(CFRP ロッド+樹脂モルタル)補強効果を明らかにする目的で曲げ載荷試験を実施し、補強工法の検討を行った。

2. 載荷試験

2. 1 使用材料

CFRP ロッドは炭素繊維を引き抜き成形方法

でロッド状に加工したもの⁴⁾である(写真-1)。本実験では、一般に CFRP として使用されている GM ロッドと、それより約 3 倍弾性率が高い HM ロッドを使用した。CFRP ロッドの材料試験結果を表-1に示す。又、CFRP ロッドを埋め戻した樹脂モルタルの仕様を表-2に示す。樹脂モルタルは、珪砂に接着樹脂を添加し練り混ぜたものである。

本実験で使用した鉄筋の引張試験結果を表-3に、コンクリートの圧縮試験結果を表-4にそれぞれ示す。コンクリートは、設計基準強度 30N/mm²のものを使用した。圧縮強度は、若干設計基準強度を下回った結果となったが、本実験は鉄筋降伏点までの比較が主目的であるので、影響は小さいと判断した。又、比較用に使用した CFS の力学的特性を表-5に示す。

2. 2 試験体

載荷試験に使用した試験体の形状寸法を図-3に、試験体の一覧を表-6に示す。試験体の断面は、T-20 相当の活荷重で設計された道路橋床版の張出し部分をほぼ 1/1 スケールで切り出したものを想定して作製した。

表-1 CFRP ロッドの材料試験結果

呼称	断面形状	平均外径 (mm)	公称断面積 (mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	引張弾性率 (kN/mm ²)	破断伸び (%)
GM ロッド	円形	7.9	49.02	2550	147	1.6
HM ロッド		7.9	49.02	1817	437	0.4

表-2 樹脂モルタルの材料試験結果

骨材	樹脂	配合比 (樹脂:骨材)	硬化体比重	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
珪砂	ポキシ樹脂	1:5	1.9	71.6	11.6	3.2

表-3 鉄筋試験結果

呼称	規格	降伏応力度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	伸び (%)
D16	SD295A	380	568	195	23.4

表-4 コンクリート試験結果

圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
28.36	23.4

表-5 CFS 力学的特性

引張強度 (N/mm ²)	引張弾性率 (kN/mm ²)	破断伸び (%)
3400	230	1.5

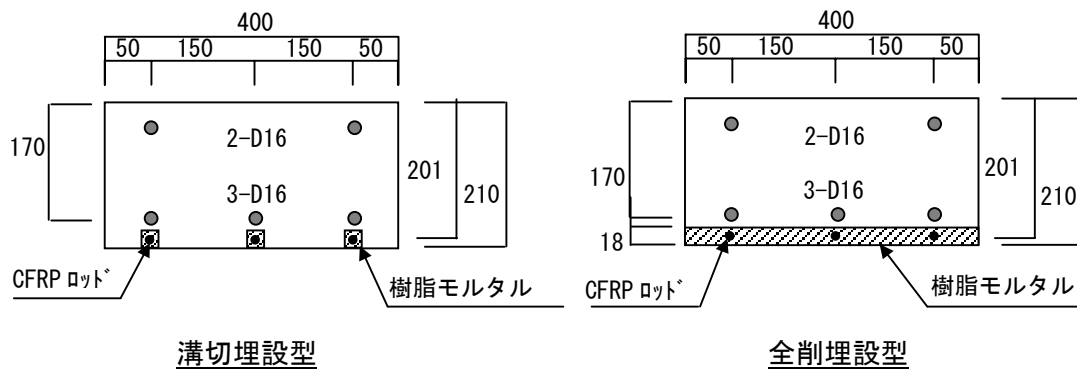
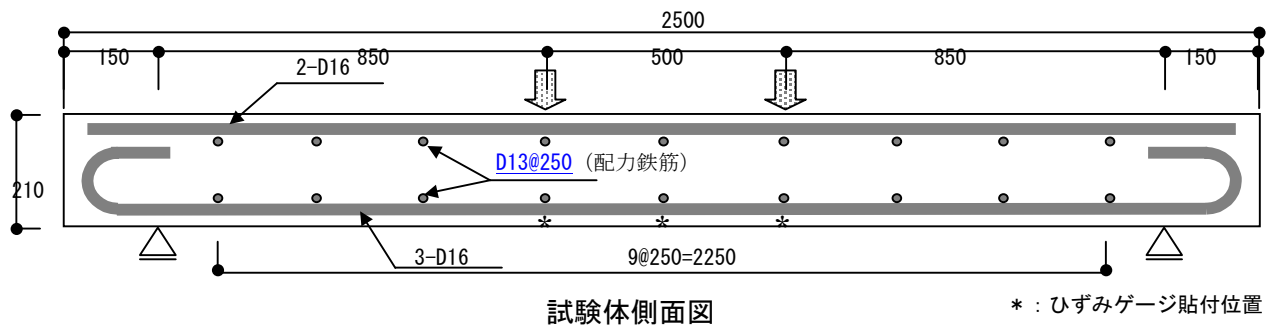


図-3 試験体形状寸法

表-6 試験体一覧

試験体番号	試験体名	補強タイプ	補強材料	補強量 (炭素繊維断面積 : mm ²)
No.1	NR	—	—	—
No.2	GM-S	貼付け法	CFS	1.5層 (101.5)
No.3	GM-R3B	溝切埋設	GM ロッド	3本 (101.5)
No.4	GM-R3A	全削埋設		3本 (101.5)
No.5	HM-R3B	溝切埋設	HM ロッド	3本 (101.5)
No.6	HM-R3A	全削埋設		3本 (101.5)

本実験は、引張鉄筋降伏までの補強効果を確認する事を主な目的としている。切り出し想定床版では、鉄筋降伏前に試験体がせん断破壊する可能性があった為、試験体のせん断破壊を遅らせる目的で、引張鉄筋量を想定断面より30%程減少させた。

No.1 試験体は無補強の基準試験体である。No.2 試験体は、CFS 接着工法と CFRP ロッド埋設工法の補強効果の差を見る試験体で、炭素繊維量は CFRP ロッド試験体と同等に設定した。

No.3~No.6 試験体は、埋設工法の差による補強効果への影響を確認する為の試験体とし、GM ロッドと HM ロッドを使用した。No.3, No.5 試験体はコンクリート表面に 20mm×20mm の溝を作成し、その中に樹脂モルタルと

共にロッドを配し、No.4, No.6 試験体はコンクリート表面を全面切削したと想定して 18mm 厚さの樹脂モルタル層を設け、その中にロッドを配した。

又、全ての補強した試験体の断面に於いて、圧縮縁から引張鉄筋までの距離と、補強部材の図心位置までの距離は等しくなる様に設定した。

2.3 試験体作製要領

試験体はコンクリート打設後、養生を行った後に補強面のケレンをディスクサンダーを用いて行い、CFS の接着もしくは CFRP ロッドの埋設を行った。CFRP ロッドの埋設に使用した樹脂モルタルは、70Lパン型ミキサーに珪砂と樹脂を投入して混練し、試験体補強面に打設した。

2.4 載荷方法

荷重は、容量 2000kN の万能試験機を用いて、**図-3**に示すようにスパン 2200mm、等曲げ区間 500mm の 4 点曲げ荷重とした。実験では引張鉄筋のひずみが降伏ひずみの 50%に達した時点で一旦除荷し、その後は破壊に至るまで単調荷重を行った。又、荷重時には同時に、変位、引張鉄筋ひずみ、補強材ひずみを測定した。

2. 4 実験結果及び考察

各試験体の試験結果、破壊性状を**表-7**に、各ロッドを使用した試験体の荷重-中央変位関係を**図-4**に示す。CFRP ロッド試験体間の比較を明確とする為、GM-S 試験体曲線は示していない。GM タイプの補強材を用いた試験体はコンクリート圧壊もしくはせん断破壊で、HM ロッドを用いた試験体はロッドの破断で、それぞれ最大耐力が決定した。

GM タイプの補強材を用いた試験体の鉄筋降

伏点はほぼ等しく、CFRP ロッド工法はCFS 工法と同等の補強効果を有する事が確認された。

又、**図-4**より、CFRP ロッドの埋設工法の差による補強効果への影響をみると、GM ロッドを用いた場合は鉄筋降伏荷重の差はみられないが、HM ロッドを用いた場合には全削埋設工法の方が高い降伏荷重を示した。

従って本論文では、補強効果に差の見られた HM ロッド試験体に着目して検討を行った。

(1) ひび割れ発生状況

表-7より、コンクリート部分のひび割れ発生荷重は、溝切埋設型よりも全削埋設型の方が、GM ロッドを使用したものよりも HM ロッドを使用したものの方が、高い値を示した。これは、樹脂モルタル層や HM ロッドがコンクリートや GM ロッドに比べてより引張力を負担する為と考えられる。

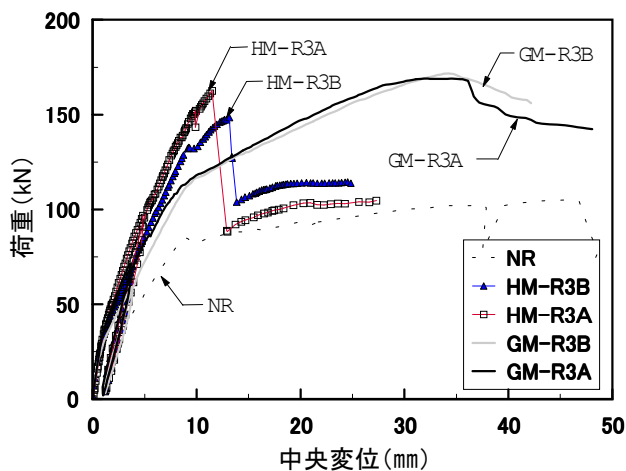


図-4 荷重-中央変位関係

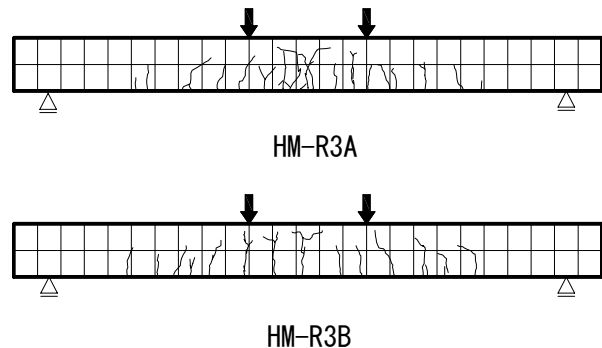


図-5 ひび割れ発生状況

表-7 試験結果一覧

試験体番号	試験体名	ひび割れ発生荷重(kN)	鉄筋降伏荷重(kN)	破壊荷重(kN)	破壊性状
No.1	NR	22.5	83.1	103.5	コンクリート圧壊
No.2	GM-S	30.4	116.0	171.0	せん断破壊→コンクリート圧壊
No.3	GM-R3B	21.1	110.4	170.2	コンクリート圧壊
No.4	GM-R3A	30.2	106.6	167.6	コンクリート圧壊
No.5	HM-R3B	23.5	131.0	147.0	ロッド破断
No.6	HM-R3A	35.0	150.6	161.1	ロッド破断

HM ロッドを用いた場合の埋設方法の違いによるひび割れ発生状況を図-5に示す。全削埋設型試験体の場合は等曲げ区間内にひび割れが集中しているのに対し、溝切埋設型の方は支持スパン全体にひび割れは分散して現れた。

(2) ひずみ挙動

図-6にHM-R3A試験体の、図-7にHM-R3B試験体の荷重-鉄筋ひずみ関係を示す。鉄筋ひずみ値は試験体等曲げ区間の鉄筋3箇所に貼付したひずみゲージの値である。図中の計算値1はコンクリートと樹脂モルタルの引張強度を無視した値で、計算値2はコンクリートの引張強度は無視しているが、樹脂モルタルの引張強度を考慮した場合の値である。

HM-R3A試験体の場合、除荷後再載荷した荷重-鉄筋ひずみ曲線は計算値2に沿って伸びていくが、鉄筋ひずみが1000 μ 付近から計算値1の線上に移行し、ほぼ計算値1の降伏点と同じ位置で降伏した。これは、コンクリートにひび割れが発生した後も樹脂モルタルがある程度引張力を負担するが、樹脂モルタルにひび割れが発生すると引張力を負担しなくなった為と推察される。

HM-R3B試験体の場合、除荷後の荷重-鉄筋ひずみ関係は途中まで計算値1に沿って伸びていったが、計算値の降伏点をやや下回る荷重で鉄筋が降伏した。

次に、HM-R3A試験体とHM-R3B試験体の荷重-CFRPロッドひずみ関係を図-8に示す。HM-R3A試験体の場合は鉄筋のひずみ挙動と同様に安定した挙動を示したが、HM-R3B試験体の場合は途中でCFRPロッドのひずみが戻る現象がみられた。これはCFRPロッドもしくは樹脂モルタル層の界面でずれが生じ、一時的に応力負担しない状況が発生した為と推測される。

(3) 解析的検討

HMロッドを使用した際の、埋設方法の差による影響を確認する為に、FEMによる解析的検討を行った。解析に使用したモデルを図-9に示す。解析モデルは試験体の対称性を考慮して1/4

対称モデルとし、同一荷重レベルでCFRPロッド周辺の応力状態に着目して解析を行った。

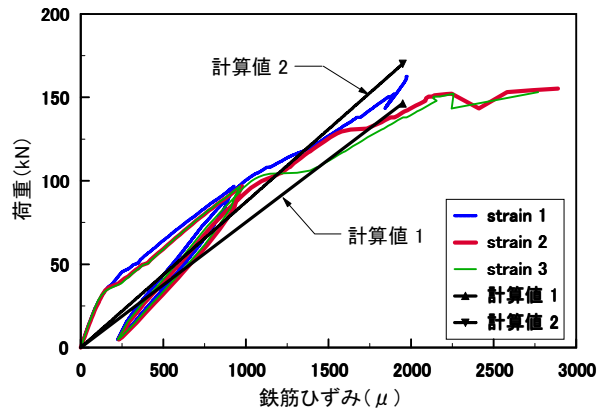


図-6 荷重-鉄筋ひずみ関係 (HM-R3A)

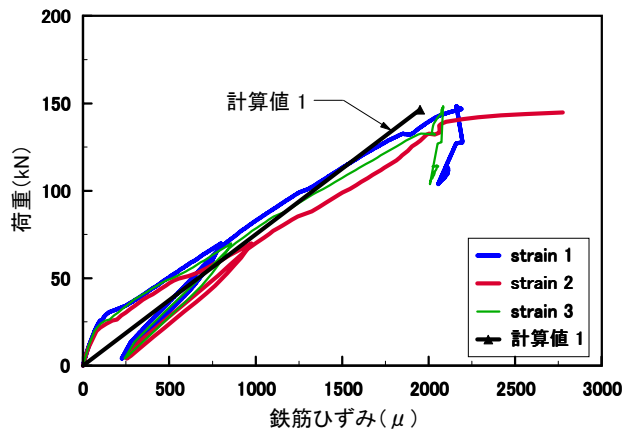


図-7 荷重-鉄筋ひずみ関係 (HM-R3B)

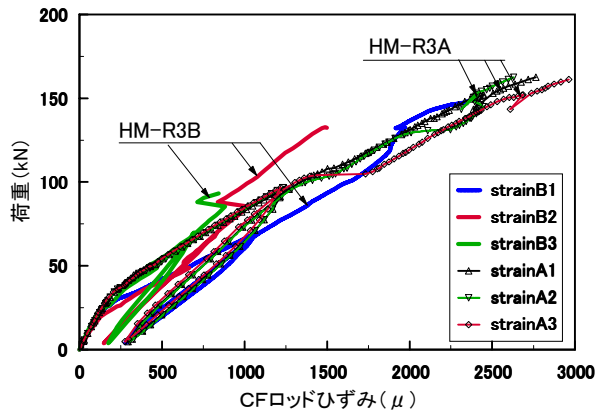


図-8 荷重-CFRPロッドひずみ関係 (HM-R3A, HM-R3B)

図-10に樹脂モルタル部分の応力分布状況解析結果の一例を、表-8にP=80kN時の樹脂モルタルに発生しているせん断応力解析結果を示す。これによると、溝切埋設型のZX面でのせん断応力が顕著であり、CFRP ロッド付着強度と同程度の応力が発生している事が確認された。従って、この界面の付着抵抗力を超過した為に溝切埋設型ではCFRP ロッドひずみの戻り現象が観察されたと推察される。原因としては、躯体側に接する樹脂モルタルの面積の差(=応力伝達面積の差)等が考えられるが、各材料間の付着性能に関しては今後の検討が必要である。

3. まとめ

本実験より、弾性率の違うCFRP ロッドを溝切埋設もしくは全削埋設して既設床版を補強した場合の補強効果について以下の事が確認された。

(1)GM, HM ロッドを用いて、樹脂モルタルによる全削埋設補強を行った場合、鉄筋降伏点までロッドの引き抜け等は見られず、補強効果は引張側コンクリートを無視した一般的な手法で評価出来る事が明らかとなった。

(2)今回の樹脂モルタルを使用した全削埋設工法では、溝切埋設工法に比べひび割れ抑制効果が高い事が確認された。

(3)HM ロッドを用いて溝切埋設補強を行う場合は、全削埋設工法に比べ、補強材～躯体界面に大きなせん断応力が発生し、鉄筋降伏前に補強材の付着切れが先行する可能性がある。

但し、床版下面に比べ床版上面の損傷メカニズムは未だ明らかにされていない部分が多い。今後は疲労実験等を行い、本工法の適用性を高めていく予定である。

謝辞

本実験を行うにあたり東急建設株式会社黒岩氏をはじめとする諸氏に、解析を行うにあたり三菱化学産資(株)新谷氏に多大な御協力を頂いた。ここに記し、謝意を表します。

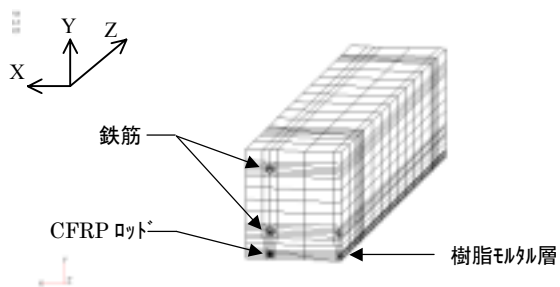
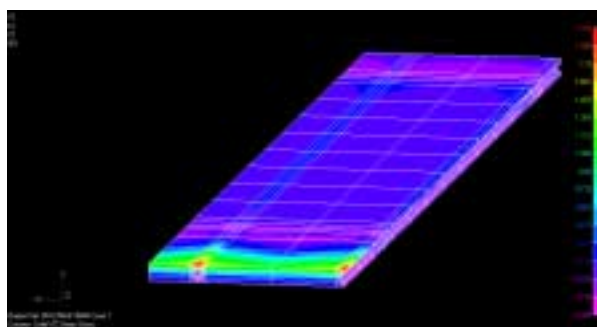


図-9 FEM 解析モデル (1/4 対称モデル)



全削埋設型 (HM-R3A)

図-10 樹脂モルタル部分応力状況 (一例)

表-8 樹脂モルタル層応力解析結果 (N/mm²)
(P=80kN 時の樹脂モルタル発生応力)

試験体名	補強タイプ	ZX 面	YZ 面
HM-R3B	溝切埋設型	17.48	8.04
HM-R3A	全削埋設型	5.00	6.36

参考文献

- 1)コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書(Ⅲ)-炭素繊維シート接着工法による道路橋コンクリート部材の補修・補強に関する設計・施工指針(案)-, 建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室, 炭素繊維補修・補強工法技術研究会
- 2)連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針, 土木学会コンクリートライブラリー 101, 2000.7.
- 3)(社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編, 丸善, 2002.3
- 4)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), 土木学会コンクリートライブラリー 88, 1996.9