

論文 連続繊維補強材により下面増厚を行った RC はりの力学的性状

三浦一博^{*1}・辻 幸和^{*2}・金井昌義^{*3}・池田正志^{*4}

要旨：格子形状の炭素繊維の連続繊維補強材 CFRP を道路橋の床版等の下面増厚工法の補強材として用いる場合の補強効果を確認するために、実際の施工を模擬して作製した RC はり供試体によりその曲げ性状および水平せん断ひび割れ性状を実験し、その良好な結果を報告した。CFRP を 3 種類と比較のための D6 鉄筋を補強材として用いるとともに、下面増厚補強部のモルタルの施工には、こて塗り工法と 2 種類の注入工法を用い、躯体と下面増厚部との付着力を確保させた。

キーワード：RC はり，連続繊維補強材，CFRP，下面増厚工法，曲げ性状，せん断性状

1. はじめに

鉄筋コンクリート(RC)床版の下面増厚補強工の補強材としては、鋼板や鉄筋などが用いられてきたが、近年では連続繊維補強材(FRP)が目されつつある。FRP は鋼材に比べ、軽量で引張強度が大きく、また耐腐食性にも優れているという特徴を有することから、RC 床版の補強工の補強材として高い効果が期待できる¹⁾²⁾。しかし、現状ではその補強方法が確立されているとはいえず、必ずしも適切な補強材の選定や配置および下面増厚の施工が行われているとはいえない。

本研究では、格子形状の炭素繊維の連続繊維補強材 CFRP を用いて、使用限界状態を迎えた RC はりに下面増厚補強工を行い、その曲げ性状およびせん断性状を実験的に検討した結果を報告する。

2. 実験概要

はり供試体の形状寸法および載荷方法を図-1に示す。はり供試体は高さが約 23cm、幅が 30cm の矩形断面とし、はり長を 300cm とした。鉄筋は圧縮側に D10、引張側に D13 をそ

れぞれ 3 本ずつ配置した。

実験ではまず高さが 20cm、幅が 30cm の RC はりを作製した。D6 のスターラップを等曲げモーメント区間では 10cm ピッチで、せん断スパンでは 5cm ピッチで配置し、RC はりは曲げ引張破壊を生じるように計画した。

コンクリートに所定の強度が発現した時点、もしくは材齢 28 日に達した時点で、一次載荷した。載荷方法はスパンが 300cm、等曲げモーメント区間が 60cm の 2 点集中載荷とした。載荷開始後、引張縁に曲げひび割れを発生させ、引張鉄筋の応力が 300N/mm² に達するまで載荷した後に除荷した。

その後、はりに下面増厚補強を行った。補強材には、D6 と 3 種類の格子形状の炭素繊維の連続繊維補強材 CFRP を用いた。補強材の諸性状を表-1に示す。下面増厚部には、セメントモルタルを用い、こて塗り工法と 2 種類の注入工法で厚さが 3cm になるように作製した。

補強材およびアンカーボルトの配置位置を、図-2に示す。補強材をスペーサとずれ止め用アンカーボルト 13 本を用いて、RC はり供試体の下縁から 5mm 浮かして固定した。また、

*1 ネフコム(株)技術部 (正会員)

*2 群馬大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

*3 ドービー建設工業(株)東京支店

*4 群馬大学技術官 工学部建設工学科 (正会員)

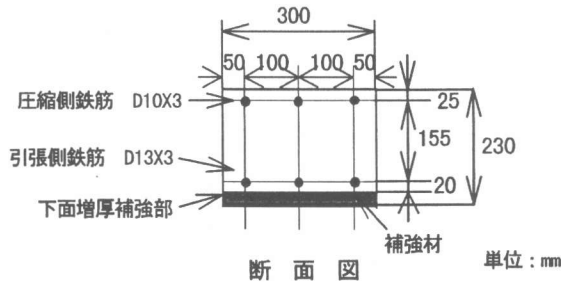
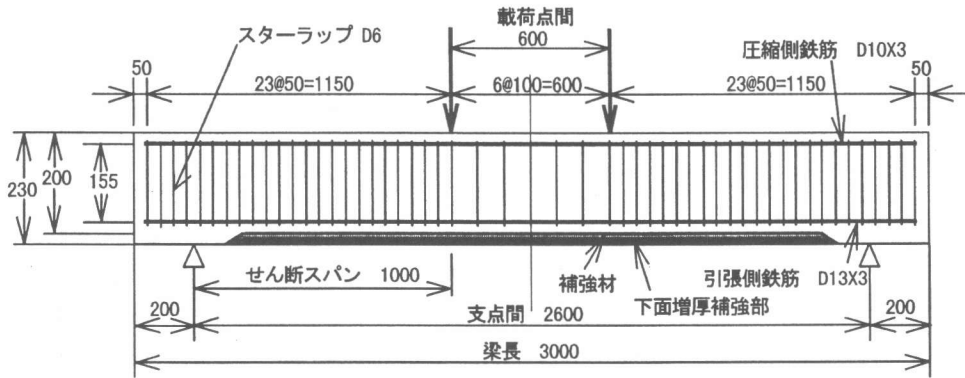


図-1 はり供試体の形状寸法および載荷方法

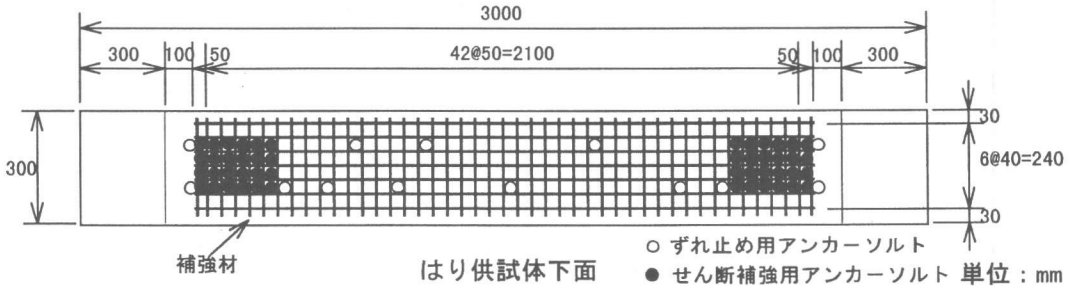


図-2 補強材およびアンカーボルト配置図

端部での定着破壊を防ぐために、増厚補強部分のそれぞれには直径 8mm のせん断補強用アン

カーボルトを 24 本打ち込んだ。せん断補強用アンカーボルトの埋込長は 60mm とし、CFRP

表-1 補強材の諸性状

補強材	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (10 ⁵ N/mm ²)	断面積 (cm ²)	引張剛性 (10 ⁷ N)
D 6 鉄筋	3 8 1 *	2. 0	2. 2 2	4. 4 4
CFRP-C	1 6 0 0	1. 0	1. 2 3	1. 2 3
CFRP-CM	1 5 0 0	3. 0	1. 6 0	4. 8 0
CFRP-CHM	1 2 0 0	2. 4	2. 0 0	4. 8 0

表-2 鉄筋の力学的性状

種類	呼び名	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
引張鉄筋	D 1 3	3 9 7	5 7 6
圧縮鉄筋	D 1 0	3 7 2	5 2 2
スッターラップ	D 6	3 8 1	5 3 4

の格子部分の中央に配置した。

なお、一部供試体では、ひずみ測定用のリード線位置をはずすために、少しずつして配置した。

下面増厚補強の施工後、材齢

28 日で再び載荷試験を行い、曲げ性状および水平せん断ひび割れの検討を行った。測定項目は、等曲げモーメント区間の圧縮鉄筋、引張鉄筋、補強材のひずみと、引張線および供試体側面の引張鉄筋配置位置での曲げひび

表-3 コンクリートの示方配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤 A
25	12.0	59.0	4.5	45.5	162	275	838	1009	1.031

表-4 補強工法の種類

補強工法の種類	下面の下地処理状態	モルタルの種類	流動性 J ₁₄ 漏斗 (秒)
こて塗り	サンドペーパーとワイヤブラシ	SBR エマルジョン混入ポリマーセメントモルタル	—
注入1	サンドペーパーとワイヤブラシ	セメント系無収縮モルタル	9~15
注入2	はつり		

割れ幅、コンクリートの圧縮縁と引張縁のひずみ、たわみならびに曲げひび割れ、水平せん断ひび割れの発達状況とした。

鉄筋の力学的性質を表-2に、コンクリートの示方配合を表-3に示す。設計基準強度は 24N/mm² を目標とし、RC はり供試体と同様な養生を行ったコンクリートの圧縮強度は、一次載荷時において 30.2N/mm²、下面増厚の補強後の材齢 28 日の載荷試験時において 31.4N/mm² であった。

下面増厚補強工法は、表-4に示す3種類とした。はり下面の下地処理には、サンドペーパーとワイヤブラシで表面を削った状態と、はつりにより約 5mm の凹凸とした状態とした。補強の直前にはり下面を湿潤状態にした後、その下面に約 30mm の厚さで、吹付けとこて塗り工法およびモルタルの注入工法により増厚補強部分を仕上げた。なお、下地材などは特別に用いなかった。

3. 曲げひび割れ発生荷重および最大荷重

曲げひび割れ発生荷重を図-3に、最大荷重を図-4に示す。また、図-5には破壊時におけるひび割れの分散

状況の例を示す。こて塗り工法の場合である。

曲げひび割れ発生荷重は、はり供試体の引張縁に貼付したワイヤストレインゲージの引張ひずみが 200×10^{-6} に達した時点として、判定した。

曲げひび割れ発生荷重は、下面増厚を行っても大きく増加していない。これは、補強前に一次載荷を行なって曲げひび割れを発生させた部分が、補強後もほとんど引張応力を受け持

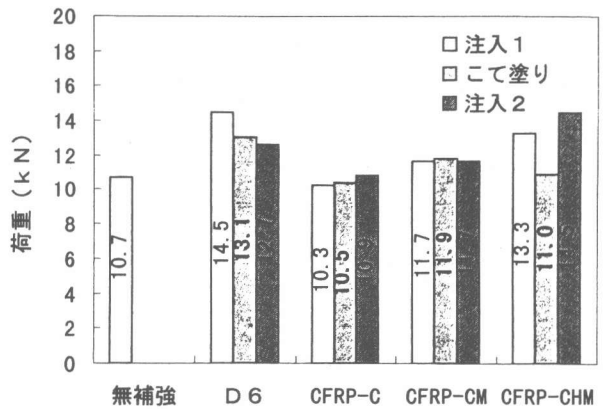


図-3 曲げひび割れ発生荷重

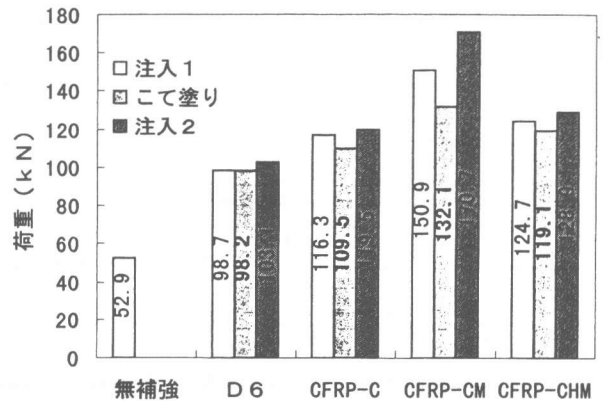


図-4 最大荷重

たないためと考えられる。

破壊時までの挙動は、無補強と D6 の補強材を用いた場合では曲げひび割れの発生後、曲げひび割れが圧縮縁またはせん断スパンでは荷重点に向かって発達した。その後、等曲げモーメント区間の補強材と引張鉄筋の降伏に続いて、コンクリート上面が圧壊する曲げ引張破壊となった。CFRP を用いた場合は、まず曲げひび割れが発生した後に、曲げひび割れが D6 の補強材を用いた場合と同様に発達した。そして、ほとんどのはりでは引張鉄筋が降伏する直前に、下面増厚補強部に剥離が起り、その後コンクリート上面が圧壊した。CFRP-CM と CFRP-CHM の引張剛性が大きい補強材を用いた場合は、CFRP-C を用いた場合と同様に剥離が起こったが、その後荷重が下がり、コンクリートの圧壊には至らなかった RC はりがあった。

ひび割れの分散状況を、図-5 により以下に示す。無補強の RC はりでは、曲げひび割れの本数が最も少なく、それぞれのひび割れ幅が大きい。CFRP-C と CFRP-CM を用いた RC はりは、比較的類似したひび割れの発達傾向を示していて、曲げひび割れの本数が多く分散状況も良好である。これに対して、補強材の引張

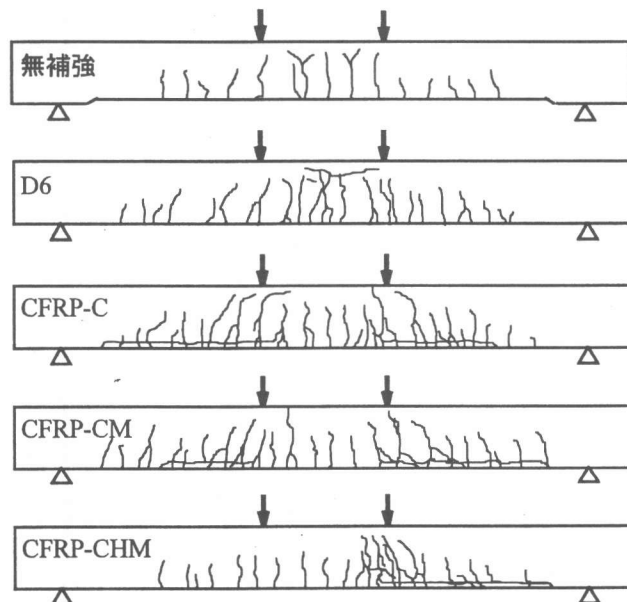


図-5 ひび割れの分散状況 (こて塗り工法)

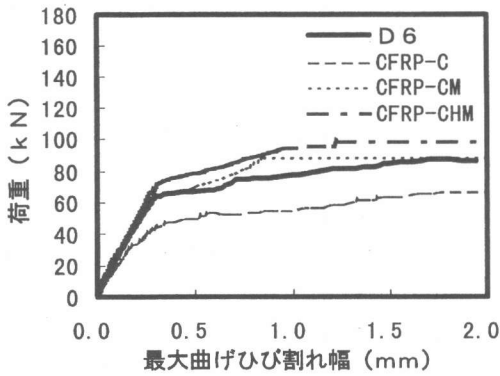
剛性が同程度である D6 と CFRP-CHM を用いた RC はりでは、曲げひび割れの間隔が均等ではなく、ひび割れの分散状況は良好とは言えない。補強材として D6 鉄筋を使用した RC はりは、引張鉄筋が降伏した後、荷重の上昇に対応して変形量が増大したため、鉄筋の降伏により曲げひび割れ幅が広がり、ひび割れの間隔が不均等になったと思われる。

最大荷重は、補強材の引張剛性と引張強度が最も大きい CFRP-CM を用いた RC はりが一番大きく、次に CFRP-CHM, CFRP-C, D6 を用いた RC はり、無補強と続いている。CFRP-CM の一番引張剛性と引張強度の大きい補強材を用いた RC はりでは、補強工法の影響が大きく、こて塗り、注入 1, 注入 2 の順に大きくなった。それ以外のはりでは、補強工法の違いが最大荷重に及ぼす影響は小さい。CFRP-CM を用いた注入 1 および注入 2 工法による RC はりでは、破壊の直前まで、水平ひび割れが発生しなかったため、最大荷重が大きくなった。

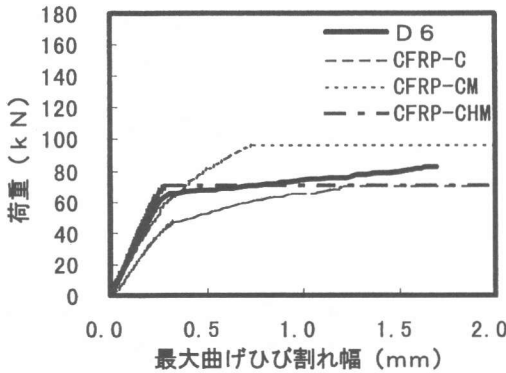
4. 曲げひび割れ幅およびたわみ量

供試体側面の引張鉄筋位置での最大曲げひび割れ幅と荷重の関係を図-6 に示す。図-6 より、いずれの補強工法についても、D6, CFRP-CM, CFRP-CHM を用いた RC はりでは、CFRP-C を用いた RC はりと比べて、同一荷重に対する曲げひび割れ幅が小さいことがわかる。これは、CFRP-C の補強材の引張剛性が D6, CFRP-CM, CFRP-CHM のものと比べて約 1/4 と小さいことによるためである。そして、CFRP-CM と CFRP-CHM の補強材を用いると最大曲げひび割れ幅は、D6 の鉄筋に用いた RC はりとほぼ等しい値に制御できている。これらの補強材の引張剛性を、ほぼ等しく設定したことによる。

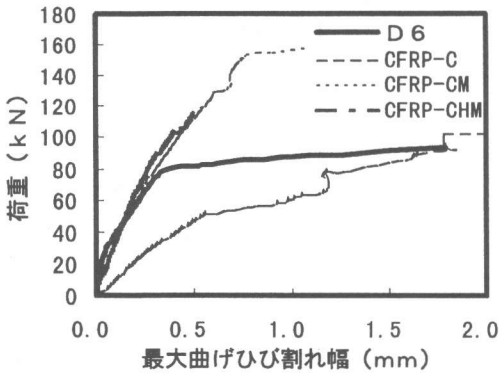
荷重が 70kN の付近で D6 の鉄筋が降伏し、曲げひび割れ幅が急増した後



(a) 注入1工法



(b) こて塗り工法



(c) 注入2工法

図-6 最大曲げひび割れ幅と荷重の関係

も、CFRP-CM と CFRP-CHM の補強材は引張力の増加分を分担し続けている。これらのCFRP は降伏現象がなく、引張強度が鉄筋の降伏強度の3~4倍となっているためである。

たわみ量と荷重の関係を示した図-7からも、図-6と同様に引張剛性の大きいD6、CFRP-CM、CFRP-CHM を用いたRC はり供試

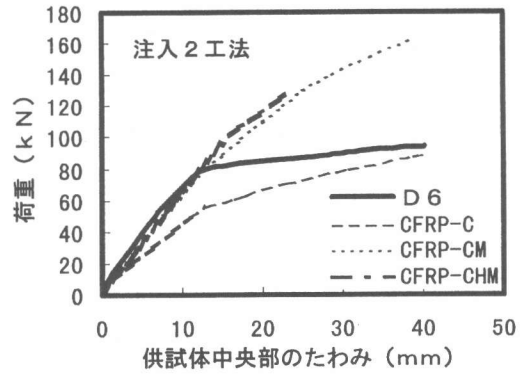
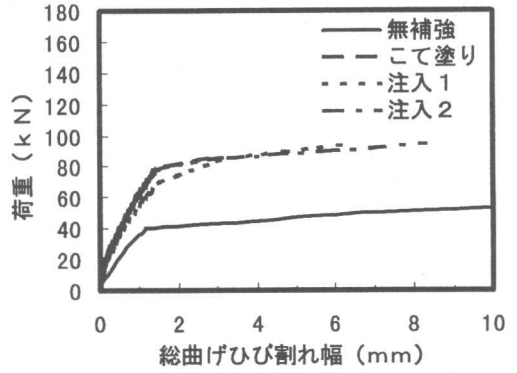
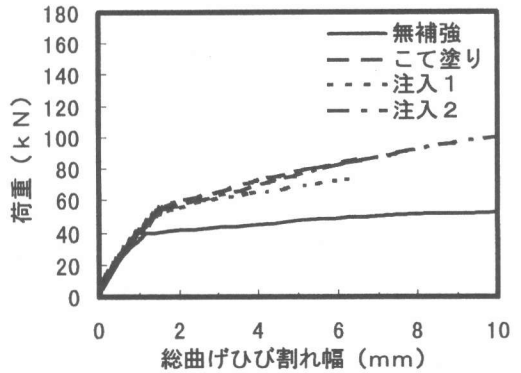


図-7 供試体中央部のたわみと荷重の関係



(a) D6鉄筋



(b) CFRP-C

図-8 総曲げひび割れ幅と荷重の関係

体の同一荷重に対するたわみ量は、CFRP-Cを用いたはりと比べ小さいことがわかる。そして、補強材が降伏するまでの荷重段階において、これら3体のたわみ量がほぼ同様な傾向を示しているのは、これらのはりに用いた補強材の引張剛性を、ほぼ等しくしたためである。

5. 総曲げひび割れ幅

図-8に、総曲げひび割れ幅と荷重の関係を示す。総曲げひび割れ幅とは、供試体側面の引張鉄筋の位置に設置したゲージ長100mmのパイゲージにより、供試体中央から両支点方向へ450mmまでの合計90cmの区間を計測した曲げひび割れ幅を含む伸びの総和である。

無補強のRCはりと比較すると、総曲げひび割れ幅は、全ての補強工法において補強効果が見られるが、引張鉄筋が降伏する荷重段階までは、補強工法の違いによる差はほとんどない。しかし、補強材の種類により、引張鉄筋の降伏後における総曲げひび割れ幅の増加量に差が現れている。すなわち補強材にD6鉄筋を用いた供試体は、荷重が70~80kNにおいて引張鉄筋、補強材ともに降伏した後、総曲げひび割れ幅が急激に増加している。一方、補強材にCFRPを用いた供試体は、補強材が引張鉄筋降伏後も引張力の増加分を負担しており、総曲げひび割れ幅の急激な増加が抑えられた。補強材は降伏点を示さず、その引張強度がD6鉄筋に比べて大きいためである。そして、補強工法の種類により総曲げひび割れ幅も異なっている。これは、引張鉄筋の直前に生じた水平せん断ひび割れの影響と考えられ、このひび割れの発達状況が補強工法により異なったためである。

6. まとめ

RCはりの下面増厚補強工に補強材として、鉄筋の代わりに格子形状の炭素繊維の連続繊維補強材CFRPを用いた場合の曲げ性状と水平せん断ひび割れの実験結果を報告した。本研究で、次のことがいえる。

1)CFRPの引張剛性を高めることにより、鉄筋を用いた場合と同様な曲げひび割れ幅の制御ができる。

2)曲げひび割れ発生荷重、最大荷重、総曲げひび割れ幅は、こて塗り工法と2種類の注入工法のいずれにおいても、ほぼ同等な値を示しており、補強工法による差は認められなかった。したがって、こて塗り工法に比べて注入工法により施工の簡略化が可能になると考えられる。

3)補強材にCFRPを用いることで、引張鉄筋降伏後の曲げひび割れ幅、たわみ、総曲げひび割れ幅の急激な増加を抑えることができる。ただし、注入工法を用いるには、躯体と下面増厚部の間の付着力を確保することが必要である。

今後、アンカーボルトの本数を変えた供試体を作製し、アンカーボルトの本数が下面増厚補強工法を行ったRCはりの力学的性状にどのような影響を及ぼすかを検討する予定である。

謝辞

本研究の実施には、(株)セメントテックスコーポレーション、(株)佐藤組、日本セメント(株)より多大なご援助を頂いた。また、群馬大学工学部建設工学科横田隆雄、栖原健太郎、飯田尚志、金田和男の諸君をはじめ、社会基盤工学講座の学生諸君にご協力を頂いた。付記して、厚くお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 佐藤、小玉、吉川：FRPとポリマーモルタルを用いたRC梁の補修に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12, No.1, pp.1269~1274, 1990
- 2) 岡田、川内、鈴木、家室：床版下面増厚工法の補強効果に関する検討、コンクリート構造物の補修工法に関するシンポジウム論文報告集、pp.59~64, 1996.10