報告 継手部を有する連続繊維補強材により下面増厚補強した RC はりの疲労 性状

小田切 芳春*1・辻 幸和*2・岡村 雄樹*3・小林 朗*4

要旨:性能が低下した道路橋 RC 床版の補修・補強対策は,非常に重要な課題である。この 補強工法としては,吹付け下面増厚補強工法がある。本研究では,補強材に炭素繊維の連続 繊維補強材(以下 CFRP)を使用し,継手部を有する CFRP と継手部が無い CFRP の2 種類を 使用して,静的載荷試験および 200 万回の定点繰返し載荷試験を行った結果を報告する。実 験要因としては,CFRP の継手部の有無,CFRP のかぶりの有無,アンカーの種類とした。 そして,試験体の最大荷重,ひび割れ幅,CFRP のひずみ分布等の力学的性状および疲労性 状を報告する。

キーワード:連続繊維補強材,補強材の継手,アンカー,疲労性状,ひび割れ幅

1. はじめに

現在, 我が国の RC 構造物には, 高度経済成 長期に建設されたものが多く, 性能が低下して いる構造物も見られる。特に, 大型車交通量の 増加, 平成5年11月の車両制限令による車両総 重量規制緩和および道路構造令による設計自動 車荷重の増加に伴ない橋梁上部工の RC 部材の 劣化が進行しており, RC 構造物の耐震補強, 耐荷力の向上, 耐疲労性の向上を図る必要が生 じている^{1), 2)}。

本研究では,道路橋の床版を対象とした下面 増厚補強工法として,格子形状の炭素繊維の連 続繊維補強材(以下,CFRP)を使用する場合の基 礎研究を報告するものである。すなわち,CFRP には分割型で継手部を有するCFRPと一体型で 継手部が無いCFRPの2種類を使用して,静的 載荷試験および200万回の定点繰返し載荷試験 を行った。そして,その力学的性状と疲労性状



図-1 試験体の形状寸法

*	1	群馬大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 (正会員)
*	2	群馬大学 工学部 建設工学科 教授 工博 (正会員)
*	3	前橋工科大学 建設工学科 助教授 工博 (正会員)
*	4	日鉄コンポジット㈱ トウシート事業部 構造技術部 (正会員)

を、コンクリートの強度、CFRP のかぶりの有 無および M-8 式アンカー(テーパー付ボルト: ねじ径 8mm, 全長 65mm, 埋め込み長 35mm) とリベット式アンカーの違いについて検討した 結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体の作製

試験体の形状寸法を図−1 に示す。高さ 199mm,幅 500mm,長さ2400mmのRC はりを 作製し,コンクリートの材齢が28日に達した後, 劣化を想定して RC はりに載荷を行った。RC は りの引張側に曲げひび割れを発生させ,引張鉄 筋の応力度が300N/mm²となるまで漸増載荷を 行った。

この劣化 RC はりには、ポリマーセメントモ ルタルと躯体との付着が良好となるように、躯 体底面に表面処理を施した。表面処理には、サ ンドブラストを用いて粗骨材が見えるまで削り、 凹凸を設けた状態にした。

CFRP の諸性状を表-1 に示す。あらかじめひ ずみゲージを貼付した CFRP を劣化 RC はりの 下縁に鋼製アンカーボルトを用いて固定した。 図-2 にひずみゲージの貼付位置,継手部を有 する CFRP の設置位置および M-8 アンカーの 定着位置を示す。アンカーボルトは,直径が 8mmのM-8式アンカーボルトとリベット式アンカーボルトの2種類を使用した。

その後,劣化 RC はりの底面に噴霧器で水を 散布することで湿潤状態にした後,ポリマーセ メントモルタルを2層に分けて吹き付けた。吹 付けの終了後,28日間の気中養生を行い試験体 とした。表-2に試験体の種類を示す。

2. 2 載荷試験方法

載荷試験方法は,スパン 2000mm, 等曲げモ ーメント区間 500mm の二点集中載荷とし,載 荷方法は変位制御とした。

(1)静的載荷試験

CFRP の応力度が計算値で 200N/mm² となる 荷重65kNまで漸増載荷した後,一度除荷した。 その後, CFRP の応力度が計算値で 300N/mm² となる荷重が 98kN まで漸増載荷した後,再び 除荷した。その後,試験体が破壊するまで漸増 載荷を行った。この間に主鉄筋および補強材の 各位置のひずみ,試験体側面の引張鉄筋位置に 生じる曲げひび割れ幅,およびひび割れ発生状 況の計測・観察を行った。

表-1 CFRP の諸性状

公称断面積	引張強度	引張弾性率	
(mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	
39.2	1794	1.81×10^{5}	



図-2 継手部を有する CFRP の設置位置

試験体	載荷方法	目標強度 (N/mm ²)	アンカー	継手部の 有 無	增厚量 (mm)
A -1	静的載荷	20	M-8(12 個)	有り	22
A-2	静的載荷	20	M-8(12 個)	有り	7
B-1	定点繰返し載荷	20	M-8(12 個)	有り	22
B-2	定点繰返し載荷	20	M-8(12 個)	無し	22
B-3	定点繰返し載荷	20	リベット式(24 個)	有り	22
B-4	定点繰返し載荷	20	リベット式(24 個)	無し	22
C-1	静的載荷	10	M-8(12 個)	無し	22
D-1	定点繰返し載荷	10	M-8(12 個)	無し	22

表-2 試験体の種類

(2) 定点繰返し載荷

下側に配置した引張鉄筋の応力度が計算値で 140N/mm²となる荷重51kNまで漸増載荷した後, 上限荷重が51kN,下限荷重が2kNで50万回定 点繰返し載荷試験を行い,再び荷重が51kNま で漸増載荷を行った。その後,同様に定点繰返 し載荷50万回(合計100万回)を行い,再び荷重 が51kNまで漸増載荷を行った。定点繰返し載 荷が100万回(合計200万回)後については,試 験体が破壊するまで漸増載荷を行った。漸増載 荷する際には,主鉄筋および補強材のひずみ, 試験体側面の引張鉄筋位置に生じる曲げひび割 れ幅,試験体中央部のたわみの計測を行った。

3. 実験結果

3.1 最大荷重

図-3 に各試験体の最大荷重を示す。すべて の試験体において,計算値を下回る荷重で破壊 に至った。すべての試験体は、コンクリートの 圧縮縁が圧壊する以前に変位の増加量が大きく なり荷重が増加しにくくなった時点で,試験機 の安全性を考慮し載荷を終了したためと考えら れる。また,すべての試験体が,無補強の場合 の計算値を超える荷重で破壊に至った。試験体 の種類に関係なく,CFRP の補強効果が得られ た。



載荷方法のみが異なる試験体 D-1 と試験体 C-1,試験体 B-1 と試験体 A-1 をそれぞれ比較 すると,最大荷重はほとんど等しい。200 万回 の繰返し載荷は,その後の最大荷重に,ほとん ど影響を及ぼさないことが確認できた。

CFRP の継手部の有無のみが異なる試験体 B-2 と試験体 B-1 を比較すると,試験体 B-1 は、 試験体 B-2 に対して,最大荷重が約3割小さか った。同様に,試験体 B-3 は,試験体 B-4 に対 して,最大荷重が約2割小さかった。継手部を 有する試験体は,図-2 に示した継手部の配置 では,継手部の無い試験体に比べて疲労による 損傷を受けやすいと考えられる。 アンカーボルトの種類のみが異なる試験体 B-1と試験体 B-3,試験体 B-2と試験体 B-4 をそ れぞれ比較すると,試験体 B-3 は試験体 B-1 に 対して最大荷重が約2割大きく,試験体 B-2 と 試験体 B-4 は最大荷重がほぼ同等であった。ア ンカーボルトがリベット式の試験体は,M-8 式の試験体に対して同等以上の耐疲労性状を示 すと考えられる。さらに継手部が有る試験体は 継手部が無い試験体に対して,その現象が顕著 である。

コンクリートの強度のみが異なる試験体 B-2 と試験体 D-1 を比較すると、強度が低いと、最 大荷重が約3割小さかった。

増厚量のみが異なる試験体 A-2 と試験体 A-1 を比較すると, CFRP のかぶりが 0mm の試験体 A-2 は, かぶりが 15mm の試験体 A-1 に対して, 最大荷重が約 3 割小さかった。CFRP でもかぶ りがないと,最大荷重が低くなることが確認で きた。

3. 2 CFRP のひずみ分布

図-4~図-7に、試験体Bシリーズにおける, 引張鉄筋の応力度が計算値で140N/mm²となる 荷重が51kNとなる時のCFRPのひずみ分布を 示す。図において、ゲージ位置が0mmは試験 体中央を示し、ゲージ位置が-250mmから 250mmまでが等曲げモーメント区間を示して いる。また、補強材のひずみの値は、ゲージ位 置-600mmからゲージ位置600mmまでにそれぞ れ3箇所ずつ貼付したひずみゲージの実験値の 平均値である。図において、繰返し載荷が初回 から200万回後にかけてCFRPのひずみの増加 が大きな試験体ほど、CFRPが疲労による損傷 を受けやすいといえる。

図-7の試験体 B-4 において、初回から繰返 し載荷が 200 万回後にかけての CFRP のひずみ の増加が最も大きく、CFRP が疲労による損傷 を受けやすいといえる。しかし、試験体の種類 の違いによる CFRP のひずみの値には、顕著な 差は見られない。



図-4 試験体 B-1 の CFRP のひずみ分布



図-5 試験体 B-2 の CFRP のひずみ分布



図-6 試験体 B-3 の CFRP のひずみ分布



図-7 試験体 B-4 の CFRP のひずみ分布

継手部の有無のみが異なる試験体をそれぞれ アンカーの種類ごとに比較する。図ー4の CFRP の継手部が有る M-8 式の試験体 B-1 は, 図ー5 の CFRP の継手部が無い M-8 式の試験体 B-2 に,また図ー6 の CFRP の継手部が有るリベッ ト式の試験体 B-3 は, 図-7 の CFRP の継手部 が無いリベット式の試験体 B-4 に比較して、そ れぞれゲージ位置-200mm, 200mm において引 張応力の伝達がうまく行われていない。

さらに、アンカーの種類のみが異なる試験体 を比較する。図-4の CFRP の継手部が有る M -8式の試験体 B-1 は,図-6の CFRP の継手部 が有るリベット式の試験体 B-3 に比較して,ゲ ージ位置-200mm, 200mm において引張応力の 伝達がうまく行われていない。

以上より, 応力伝達はうまく行われているも のから順に, 試験体 B-2, B-4, 次いで試験体 B-3, 最後に試験体 B-1 の順となる。また, 最大 荷重は大きいものから, ほぼ同等で試験体 B-2、 B-4、次いで試験体 B-3、最後に試験体 B-1 の順 となった。これらより, CFRP により下面増厚 補強工法を施した RC はりの最大荷重は, CFRP の応力伝達が良好なほど大きくなるといえる。

3.3 曲げひび割れ幅

曲げひび割れ幅は,試験体側面の引張鉄筋位 置に貼付した測定基準長が 100mm のコンタク トゲージを用いて計測を行った。図-8 には, 試験体 B シリーズにおける 200 万回後の等曲げ モーメント区間内の平均曲げひび割れ幅を示す。 1 つの計測区間内に複数の曲げひび割れが発生 する場合があったため,ここでは最大曲げひび 割れ幅ではなく平均曲げひび割れ幅を示す。計 算値は,引張鉄筋のひずみの理論値を土木学会 に定められた曲げひび割れ幅の算定式(1)に代 入して求めた。なお,引張鉄筋のひずみの理論 値は,コンクリートの圧縮縁ひずみの各段階ご とに,ひずみ分布の直線性を仮定し,そのひず み分布から求まるコンクリートと鉄筋の力の釣 合条件から算出した。



$$\omega = k \left\{ 4c + 0.7 (c_s - \phi) \right\} \left(\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{cs} \right)$$
(1)

ここに、 ω :曲げひび割れ幅(mm)、k:鋼材の付 着性状の影響を表す定数で、異形鉄筋の場合 1.0, c:かぶり 12.65mm, c_s:鋼材の中心間隔 100mm, ϕ :鋼材径 12.7mm, ϵ 'cs:コンクリートの収縮お よびクリープ等による曲げひび割れ幅の増加を 考慮するための数値で、通常は 150×10⁶ である が、本実験では屋外による 28 日間の気中養生で あったため、収縮およびクリープ等の影響はほ とんどないものと考え 0 とした。 σ se/Es:引張鉄 筋ひずみの増加量

図-8において, CFRP の継手部が有る M-8 式の試験体 B-1 は, 継手部が無い M-8式の試 験体 B-2 に対して, 平均曲げひび割れ幅が大き い。同様に, リベット式の試験体でも継手部が 有る B-3 は, 継手部が無い B-4 に対して, 平均 曲げひび割れ幅が少し大きい。以上のように, アンカーが等しい試験体において, CFRP の継 手部が有る試験体は, CFRP の継手部が無い試 験体に対して平均曲げひび割れ幅が大きくなっ た。

また, CFRP の継手部が有る M-8 式の試験 体 B-1 は, 継手部が有るリベット式の試験体 B-3 に対して, 平均曲げひび割れ幅が大きい。同様 に, CFRP の継手部が無い試験体でも M-8 式 の B-2 は, リベット式の試験体 B-4 に対して, 平均曲げひび割れ幅が大きい。以上のように, M-8 式の試験体はリベット式の試験体に対し





図-9 アンカーのみが異なる2体の破壊状況

て平均曲げひび割れ幅が大きくなった。図-9 にアンカーのみが異なる2体の破壊状況を示す。 破壊後、曲げひび割れ幅が最も大きい部分をは つるとM-8式の試験体では、アンカーとCFRP の格子の角との間に空隙があることが確認でき た。M-8式の試験体は、空隙が弱点となりリ ベット式に対して曲げひび割れ幅が大きくなっ たと考えられる。

しかし、これら4体の試験体は土木学会で定められた許容曲げひび割れ幅の観点からも、また200万回の繰返し載荷後においても十分に安全であると言える。

4. まとめ

CFRP を下面増厚補強の補強材に用いて,繰返し載荷実験を行った。本研究により,以下のことが言える。

- CFRPにより下面増厚補強工法を施した RC はりは、道路橋示方書に示されている RC 床版の鉄筋応力度の許容値が 140N/mm² と なる上限荷重により繰返し載荷を 200 万回 行っても、十分な耐疲労性状を示している。
- 2) 継手部を有する試験体は、継手部が無い試 験体に対して、最大荷重が1割から3割程 度低く、疲労による損傷を受けやすい。
- 3) CFRP により下面増厚補強工法を施した RC はりの最大荷重は、コンクリートの強度が

小さく, また CFRP のかぶりの無いと, そ の補強効果は小さい。

- CFRP により下面増厚補強工法を施した RC はりの最大荷重は, CFRP の応力伝達が良い ほど大きい。
- アンカーがリベット式の試験体は、M-8式
 の試験体に対して、同等以上の耐疲労性状 を示す。

本研究は,FRP グリット工法研究会の研究開 発の一環として実施したものである。試験体の 作製および1次載荷に際しては、ドーピー建設 工業㈱関東工場に多大なご協力を頂いた。付記 して、厚くお礼申し上げる。

参考文献

- 金田和男, 辻幸和, 杉山隆文:連続繊維補 強材と圧入モルタルによる RC 床版の下面 増厚補強効果, コンクリート工学年次論文 報告集, Vol.121, №2, pp.289-294, 1999
- 2) 中田学, 辻幸和, 杉山隆文, 佐藤元: 表面 に切欠きを有する RC はりの織り方を変え た炭素繊維シートによる補強効果, コンク リート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.445-450, 2001