

論文 走行振動荷重による応力履歴を受けた RC はりの CFS 補強効果

阿部 忠^{*1}・木田哲量^{*2}・澤野利章^{*3}・加藤清志^{*4}

要旨：本研究は、RC はりを 2 タイプ用いて、RC はりに対する CFS 補強 RC はり、および応力履歴 RC はりをひび割れ補修と CFS 補強を併用した場合の補強効果について実験を行った。その結果、RC はりに比して CFS 補強 RC はりの曲げ耐力は 34%~45% 向上する結果が得られた。また、応力履歴 CFS 補強 RC はりは、RC はりに比して 24%~30%、応力履歴 RC はりの曲げ耐力に比しては 36%~44% の曲げ耐力が向上した。したがって、応力履歴を受けた RC はりをひび割れ補修と CFS 補強することにより、CFS 補強 RC はりと同等の補強効果が得られた。

キーワード：RC はり、炭素繊維シート、応力履歴、補強効果

1. はじめに

道路橋 RC 床版のひび割れ損傷は、路面の凹凸、伸縮継ぎ手の段差によって発生する大型自動車の荷重変動、つまり走行振動荷重の作用により、ひび割れ損傷を生じている。この補修・補強法の一つに炭素繊維シート(CFS)接着工法がある。

一方、RC はりの底面を CFS 接着補強した場合の補強効果および破壊メカニズムは、無補強 RC はりに比して曲げ耐力が向上する結果が報告されている^{1), 2)}。しかし、応力履歴の RC 部材の補強効果についての研究はあまり行なわれていない。そこで本研究では、RC 床版の厚さを考慮した断面寸法の異なる 2 タイプの RC はりを用いて、1) RC はりに対する CFS 補強 RC はりの補強効果、2) 応力履歴 RC はりにひび割れ補修と CFS 接着補強した場合の補強効果を実験によって検証した。

2. 使用材料および寸法

2.1 使用材料

供試体のコンクリートには、普通ポルトランドセメントと最大寸法 20mm の粗骨材を使用し、

鉄筋には SD295A, D16 を使用した。

材料特性値を表-1 に示す。次に、CFS は目付量 202g/m², 厚さ 0.111mm, 引張強度 4,420N/mm² の高強度連続カーボンシートを用いた。なお、全供試体ともに同一材料で同時製作した。

2.2 供試体寸法および鉄筋の配置

供試体は有効高と幅の異なる 2 タイプの RC はりを用いる。なお、無補強 RC はりの供試体を RC はり、RC はりに CFS 補強した供試体を CFS 補強 RC はりと称する。また、走行振動荷重による応力履歴を受けた RC はりの供試体を応力履歴 RC はり、応力履歴 RC はりに CFS 補強した供試体を応力履歴 CFS 補強 RC はりと称する。

1) **タイプ I**：支間長は 200cm, 幅 30cm, 高さ 21cm とし、鉄筋は引張側に 3 本, 圧縮側に 2 本配置し、有効高さを 17.2cm とした。

表-1 コンクリート・鉄筋の材料

| 供試体 | コンクリート 圧縮強度 N/mm ² | 鉄筋 (SD295A, D16) | | |
|--------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| | | 降伏強度 N/mm ² | 引張強度 N/mm ² | ヤング係数 kN/mm ² |
| タイプ I | 38.5 | 368 | 568 | 196 |
| タイプ II | 41.5 | | | |

*1 日本大学 生産工学部土木工学科助教授 (正会員)

*2 日本大学 生産工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

*3 日本大学 生産工学部土木工学科助教授 工博 (正会員)

*4 日本大学 生産工学部土木工学科教授 工博

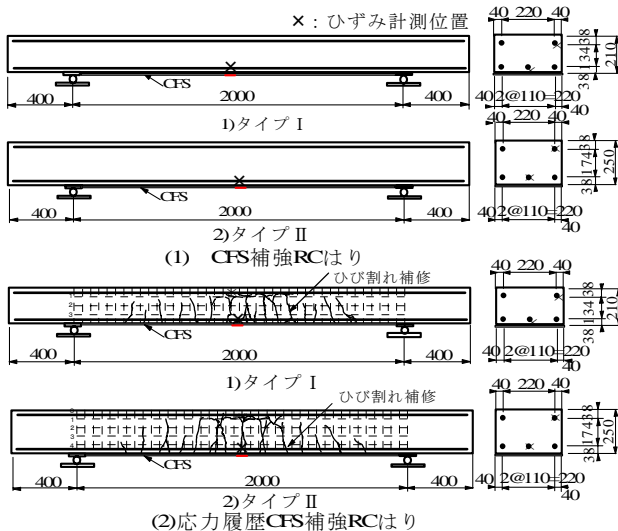


図-1 供試体寸法および鉄筋の配置

2) タイプ II : 支間長, 幅はタイプ I 同様に 200cm, 30cm とし, はりの高さは 25cm とした。鉄筋はタイプ I と同様に引張側に 3 本, 圧縮側に 2 本配置し, 有効高さを 21.2cm とした。

ここで, CFS 補強 RC はりおよび応力履歴 CFS 補強 RC はりのひび割れ損傷状況および鉄筋配置位置を図-1 に示す。

2.3 応力履歴 RC はりのひび割れ補修法

応力履歴を受けた RC はりのひび割れ補修は, 図-1(2)に示す, RC はりの底面を研磨処理した後, エポキシ樹脂により目地留めを行い, 樹脂注入用パイプを取付け, 24 時間養生を行う。ここで, ひび割れ補修状況を図-2 に示す。次に, 注入用パイプから補修剤であるエポキシ樹脂系の注入材と硬化剤を 2:1 で混ぜ合わせたものを注入し, 補修剤の養生は 7 日間行なった。

2.4 CFS 接着補強法

供試体底面の下地処理は, コンクリート表面をサンダーで平滑に仕上げ, エポキシプライマーを塗布含浸させ, 接着用含浸樹脂でシートを接着した。本実験における CFS 補強法は, 供試体底面の支間方向に CFS を 1 層張り付けとした。

3. 応力履歴に関する実験方法および結果

3.1 応力履歴を与える実験方法

応力履歴を与える方法は図-3 に示すように, 大型自動車の荷重変動を想定した走行振動荷重

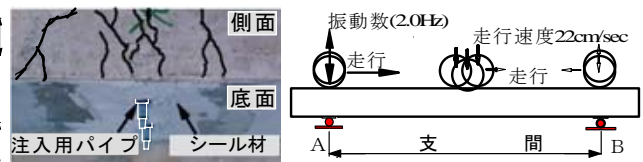


図-2 ひび割れ補修

図-3 実験方法

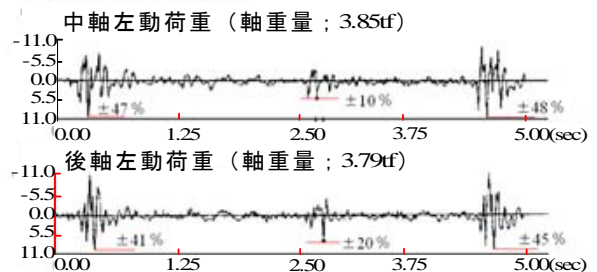


図-4 大型自動車の荷重変動³⁾

載荷である。

独立行政法人土木研究所では, 支間 45m の鋼合成桁橋の伸縮継手の段差部を大型自動車が走行する際に発生する荷重変動を図-4 のように報告している³⁾。これによると, タンデム式ダンプトラックの軸重量に対して, 荷重振幅が $\pm 41\% \sim \pm 48\%$ 生じている。また, この時の振動数は中軸で 13Hz, 後軸で 18Hz 程度となっている。

本実験の荷重振幅は, 基準荷重に対して $\pm 20\%$ (供試体名称 V20), $\pm 30\%$ (供試体名称 V30) とした。また, 走行速度と振動数は, 図-4 に示した走行速度と振動数から 1m 当たりの波数を求めて, 1 往復 4.0m を 18sec で走行し, 振動数は 2.0Hz の正弦波形とした。荷重は 1 往復するごとに 5.0kN ずつ増加した。なお, RC はりの静荷重による曲げ実験でたわみが 20mm を超えると, たわみが急激に増加して破壊に至ることから, 応力履歴の載荷条件は, 変位制御によりたわみが 20mm で除荷した。

3.2 実験結果

(1) 応力履歴 RC はりの最大耐力

応力履歴 RC はりの最大耐力を表-2 に示す。なお, 荷重はロードセルより検出した結果である。ここで, 走行振動荷重載荷における最大耐力とは, たわみ 20mm を維持し得た最大荷重とする。よって, 本載荷の最大荷重はタイプ I の

表-2 応力履歴 RC はりの耐力

| 供試体 | 最大荷重 (kN) | 基準荷重 (kN) | 最小荷重 (kN) |
|--------------|-----------|-----------|-----------|
| I-V20-2.0Hz | 75.7 | 64.2 | 51.2 |
| I-V30-2.0Hz | 75.2 | 57.9 | 40.5 |
| II-V20-2.0Hz | 94.1 | 78.4 | 62.7 |
| II-V30-2.0Hz | 92.5 | 71.1 | 49.7 |

供試体 I-V20 では 75.7kN, 供試体 I-V30 では 75.2.kN であり, タイプ II の場合の供試体 II-V20 は 94.1kN, 供試体 II-V30 では 92.5kN である。

(2) 応力履歴 RC はりのひび割れ状況

本載荷による応力履歴 RC はりのひび割れ状況の一例を図-1(2)に示した。

図-1(2)より, 応力履歴 RC はりのひび割れは, 曲げ領域⁴⁾ (せん断スパン比 $a/d=3.0$ 以上の区間, a : 荷重位置, d : 有効高さ) で, ほぼ等間隔に発生し, その間隔は走行速度に対する振動数が顕著となり, 10cm から 13cm 程度である。これらのひび割れをエポキシ樹脂で補修した後, CFS 底面接着補強を行なうものである。

(3) 荷重と鉄筋ひずみとの関係

応力履歴 RC はりの支間中央における終局時までの荷重とひずみおよび残留ひずみとの関係を図-5 に示す。タイプ I における供試体 I-V20 の場合の最大ひずみは基準荷重 64.4kN で $6,300 \times 10^{-6}$, その時の残留ひずみは 967×10^{-6} である。供試体 I-V30 の場合は, 基準荷重 57.9kN で $7,600 \times 10^{-6}$ となり, その時の残留ひずみは $1,189 \times 10^{-6}$ である。次に, タイプ II における供試体 II-V20 は基準荷重 78.4kN で $8,700 \times 10^{-6}$, 残留ひずみは $2,100 \times 10^{-6}$, 供試体 II-V30 は基準荷

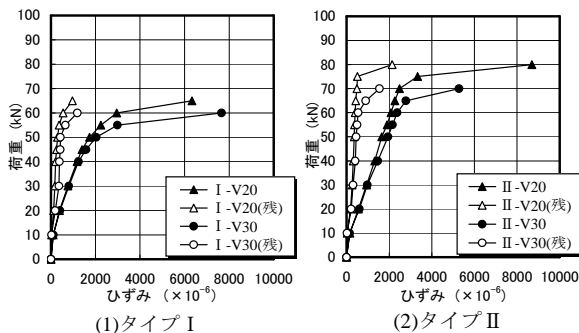


図-5 荷重とひずみ

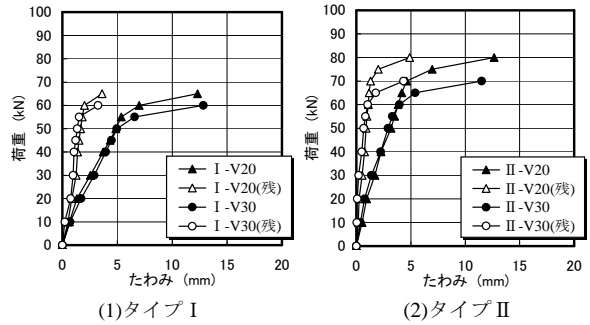


図-6 荷重とたわみ

重 71.1kN で $5,200 \times 10^{-6}$ で, その時の残留ひずみは $1,500 \times 10^{-6}$ である。よって, タイプ I, II ともに全ての供試体で鉄筋は降伏している。

(4) 荷重とたわみとの関係

荷重とたわみ関係を 図-6 に示す。タイプ I における供試体 I-V20 の最大たわみは基準荷重 64.4kN で 12.3mm, その時の残留ひずみは 4.5mm である。供試体 I-V30 は基準荷重 57.9kN で 12.8mm, その時の残留ひずみは 3.2mm である。また, タイプ II の場合の供試体 II-V20 は基準荷重 78.4kN で 12.7mm, 残留ひずみは 4.8mm である。また, 供試体 II-V30 は基準荷重 71.1kN で 11.5mm, その時の残留ひずみは 4.3mm である。

4. 実験方法⁵⁾

4.1 静荷重曲げ実験

静荷重曲げ実験は, 最大曲げ応力が生じる支間中央に車輪を停止した状態の実験である。載荷方法は荷重制御により 5.0kN ずつ増加する。なお, 応力履歴 CFS 補強 RC はりの鉄筋ひずみの計測は, 支間中央に新たに鉄筋ひずみゲージを貼り付けて, ひずみの計測を行なった。

5. 破壊モードおよび実験最大耐力

5.1 破壊モード

本実験における破壊時のひび割れを図-7 に示す。また, 破壊モードは表-3 に示した。

(1) RC はり

静荷重の場合は図-7(1), (1), (2), (1)に示すように, タイプ I, II ともに荷重増加中に車輪直下から約 $55^{\circ} \sim 60^{\circ}$ の拡がりとなる曲げ破壊とな

った。

(2) CFS 補強 RC はり

静荷重の場合は、図-7(1), (2), (2), (2)に示すように、タイプ I, IIともに荷重載荷位置付近にひび割れが集中して、そのひび割れは5cm~7cm 間隔で発生し、ひび割れの分散効果が発揮されている。また、タイプ I, IIはともに荷重載荷位置から45°~60°の位置の底面は曲げ引張力によってシートとコンクリートがはく離し、はく離破壊となった。そして、はく離は破壊荷重時には支点方向に進展した。なお、全供試体においてシートの破断は見られない。

(3) 応力履歴 CFS 補強 RC はり

応力履歴 CFS 補強 RC はりのひび割れ損傷は、応力履歴によるひび割れ補修位置と併せて図-7(1), (3), (2), (3)に示す。

応力履歴 CFS 補強 RC はりの場合は、静荷重実験であることから、ひび割れが荷重載荷位置付近に集中して発生している。ひび割れをエポキシ樹脂接着により補修したことから、新たなひび割れが発生しており、ひび割れ補修も適切に行われたことを示している。また、タイプ I の場合は荷重載荷位置から45°~60°の位置の底面はシートのはく離が著しく、供試体 I -D-20-CM は支点 A までのはく離した。タイプ II の場合は荷重載荷位置から60°の位置の底面のみはく離が著しく、両タイプともにはく離破壊となった。しかし、CFS 補強 RC はりと同様に、シートの破断は見られない。

5.2 RC はりの実験曲げ耐力

RC はりおよび CFS 補強 RC はりの実験耐力および破壊モードを表-3 に示した。なお、荷重はロードセルより検出した結果である。

(1) RC はり

静荷重の場合の平均曲げ耐力は、タイプ I では83.0kN、タイプ IIでは102.9kNである。これに対して、応力履歴 RC はりの場合はタイプ I, IIで、それぞれ75.5kN、93.3kNである。RC はりと応力履歴 RC はりとの耐力比(D/M)は、タイプ I, IIともに0.90となり、応力履

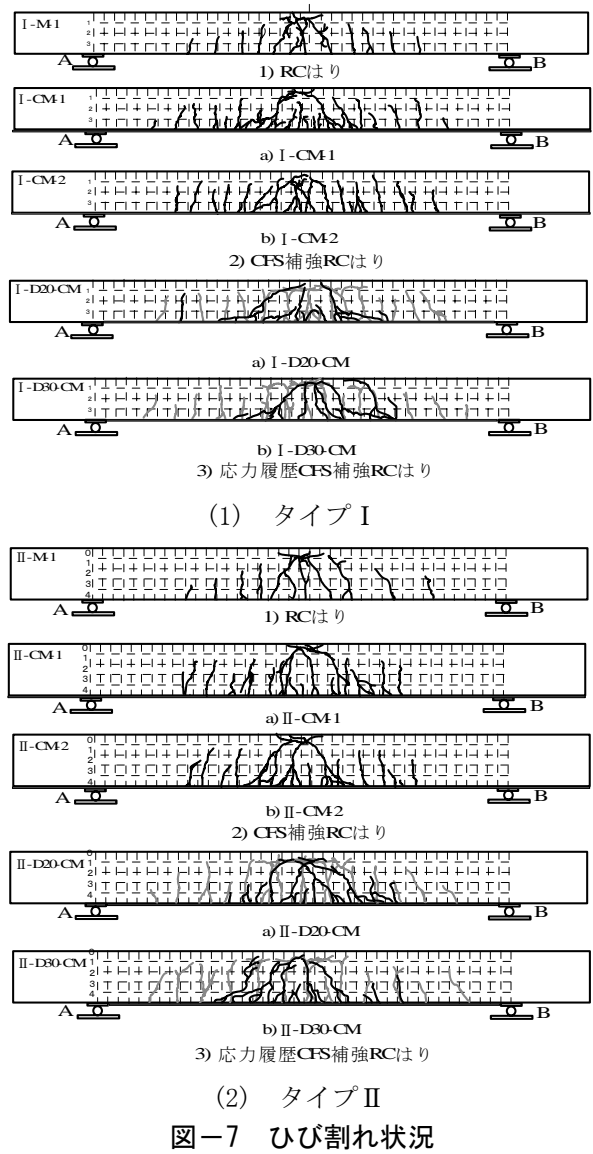


表-3 実験曲げ耐力および破壊モード

| 供試体 | 曲げ耐力 (kN) | 平均曲げ耐力 (kN) | 荷重比 | 破壊モード |
|------------|-----------|-------------|--------------------------|----------------|
| I -M-1 | 80.9 | 83.0 | — | 曲げ破壊 |
| I -M-2 | 85.1 | | | |
| I -CM-1 | 120.9 | 120.3 | CM/M=1.45 | はく離破壊 はく離破壊 |
| I -CM-2 | 119.7 | | | |
| I -D20-1 | 75.7 | 75.5 | D/M=0.90 | 曲げ破壊 曲げ破壊 |
| I -D30-2 | 75.2 | | | |
| I -D20-CM | 109.4 | 107.6 | DCM/M=1.30 DCM/D=1.44 | はく離破壊 はく離破壊 |
| I -D30-CM | 105.7 | | | |
| II -M-1 | 105.6 | 102.9 | — | 曲げ破壊 曲げ破壊 |
| II -M-2 | 100.1 | | | |
| II -CM-1 | 139.8 | 137.5 | CM/M=1.34 | はく離破壊 はく離破壊 |
| II -CM-2 | 135.1 | | | |
| II -D20-1 | 94.1 | 93.3 | D/M=0.90 | 曲げ破壊 曲げ破壊 |
| II -D30-2 | 92.5 | | | |
| II -D20-CM | 130.0 | 127.5 | DCM/M=1.24 DCM/D=1.36 | はく離破壊 はく離破壊 |
| II -D30-CM | 125.0 | | | |

※ I-: タイプ I, II-: タイプ II, M-: 静荷重曲げ実験, C: CFS
D: 応力履歴 (20: 振動荷重±20%, 30: ±30%), 1: 供試体番号

歴 RC はりの場合が10%耐力が低下した。

(2) CFS 補強 RC はり

CFS 補強 RC はりの静的曲げ耐力はタイプ I で120.3kN、タイプ IIで137.5kNである。RC は

りと CFS 補強 RC はりの曲げ耐力を比較 (CM/M)するとタイプ I で 1.45 倍, タイプ II で 1.34 倍となり, CFS 補強によって耐力が大幅に向上した。

(3) 応力履歴 CFS 補強 RC はり

応力履歴 CFS 補強 RC はりの曲げ耐力はタイプ I, II でそれぞれ 107.6kN, 127.5kN であり, この耐力と RC はりの曲げ耐力を比較 (DCM/M)すると, タイプ I, II で, それぞれ 1.30 倍, 1.24 倍となり, ひび割れ補修と CFS 補強による耐力向上がみられた。また, 応力履歴 RC はりと応力履歴 CFS 補強 RC はりの曲げ耐力を比較 (DCM/D)すると, タイプ I, II で, それぞれ 1.44 倍と 1.36 倍となり, CFS 補強 RC はりと同様の補強効果が得られた。

次に, CFS 補強 RC はりと応力履歴 CFS 補強 RC はりとの曲げ耐力比 (DCM/CM) は, タイプ I で 0.89, タイプ II で 0.93 となり応力履歴 CFS 補強 RC はりが約 9% 下まわった。

6. 荷重とひずみとの関係

6.1 引張鉄筋のひずみ

支間中央における引張鉄筋の荷重とひずみの関係を図-8 に示す。なお, 応力履歴 CFS 補強 RC はりの荷重とひずみの関係は, 応力履歴時の残留ひずみを加えた値である。

(1) RC はり

図-8 より, 引張鉄筋の降伏荷重は, タイプ I の供試体 I-M-1, 2 とともに 65kN, タイプ II の供試体 II-M-1, 2 とともに 75kN である。いずれも降伏荷重後の荷重増加ではひずみが急激に増加している。

(2) CFS 補強 RC はり

図-8 より, タイプ I における引張鉄筋の降伏荷重は 87.5kN であり, 降伏後の塑性域では補強効果が顕著に現れ, 急激なひずみの増加は見られず, ほぼ線形的に増加している。また, タイプ II の場合の引張鉄筋の降伏荷重は 115kN である。これらのことから, CFS の補強効果により引張鉄筋が降伏した後も耐力を維持し, ひずみが線形的に増加している。

(3) 応力履歴 CFS 補強 RC はり

図-8 より, 供試体 I-D20-CM では, 鉄筋は

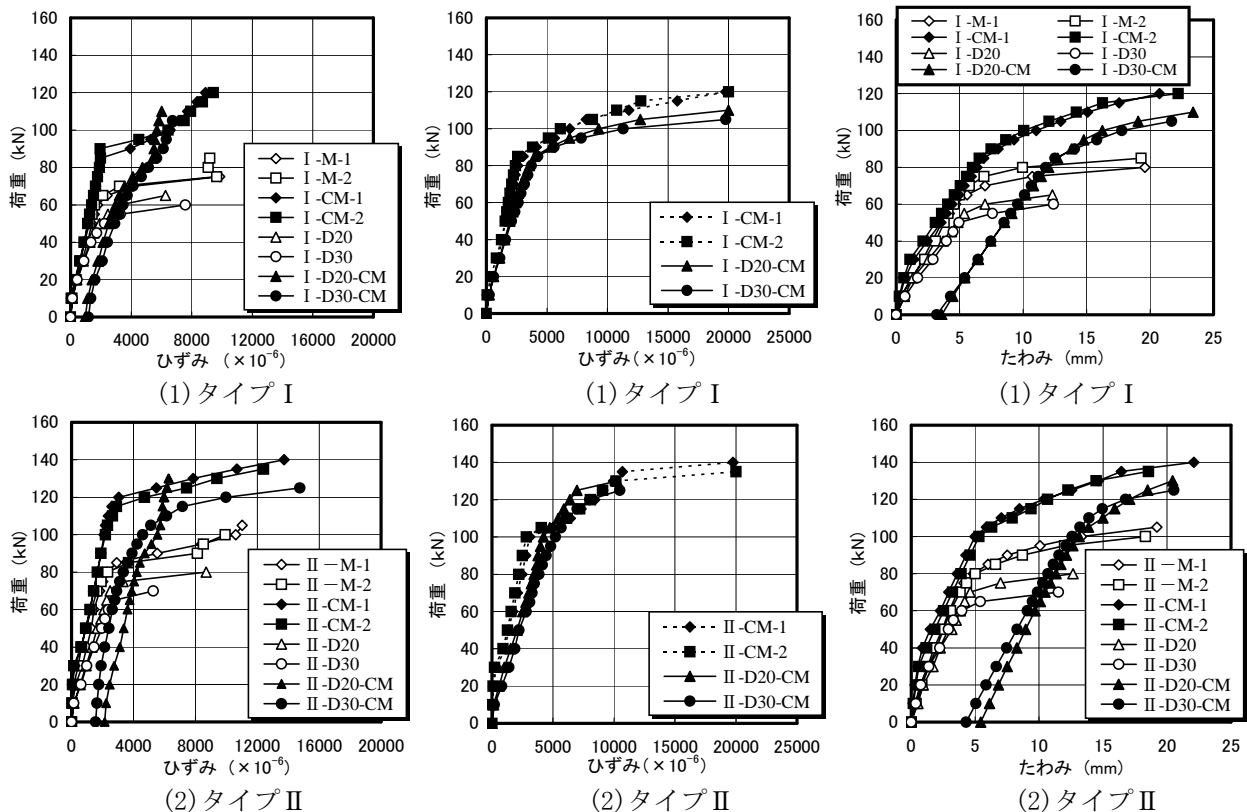


図-8 荷重とひずみの関係(鉄筋) 図-9 荷重とひずみの関係(CFS) 図-10 荷重とたわみの関係

既に降伏し、その時の残留ひずみは 969×10^{-6} である。したがって、この場合のひずみは、計測した鉄筋ひずみに残留ひずみを加えた値である。この場合の降伏荷重は 40kN であり、その後の荷重増加においても急激なひずみの増加は見られない。荷重 85kN からはひずみの増加は少ないことからすると、シートの補強効果が発揮されている。また、供試体 I-D30-CM も同様な結果が得られた。次に、タイプ II の供試体 II-D20-CM は荷重 100kN でタイプ I と同様に急激なひずみの増加が見られない。しかし、供試体 II-D30-CM の場合は CFS 補強 RC はりと同様に荷重 105kN 付近から、ひずみの増加が著しい。

6.2 CFS のひずみ

支間中央における CFS の荷重とひずみの関係を図-9 に示す。

タイプ I, II ともに引張鉄筋の降伏荷重と同時にひずみは線形的に増加するが、終局時は $20,000 \times 10^{-6}$ に達している。一般に、CFS の公称はく離ひずみは $6,000 \times 10^{-6}$ といわれているが、本実験では、公称はく離ひずみ後の荷重増加においても、シートのはく離および急激なひずみの増加は見られない。

CFS 補強 RC はりの場合と応力履歴 CFS 補強 RC はりを比較すると、応力履歴 CFS 補強 RC はりの CFS ひずみの増加が著しい。しかし、CFS 補強 RC はりのひずみと比較すると、荷重を増加に反して鉄筋のひずみの増加は少なく、その分、引張力がシートへの負担率が大きくなったものと考えられる。

6.3 荷重とたわみの関係

支間中央における荷重とたわみの関係を図-10 に示す。なお、応力履歴 CFS 補強 RC はりの荷重とたわみの関係は、応力履歴時の残留たわみを加えた値である。

図-10 より、荷重とたわみの関係は RC はりに比して、CFS 補強 RC はりはタイプ I, II ともに RC はりの破壊荷重付近からたわみの増加が著しくなっている。これに対して応力履歴 CFS 補強 RC はりは、荷重増加に対してたわみ

の増加は少ない。また、応力履歴 RC はりの破壊荷重付近からたわみの増加が少ないが、終局時では CFS 補強 RC はりとほぼ同様のたわみで破壊に至っている。

7. まとめ

(1)CFS 補強 RC はりの曲げ耐力は、RC はりの曲げ耐力に比してタイプ I, II で、それぞれ 1.45 倍と、1.34 倍曲げ耐力が向上した。

(2)応力履歴 CFS 補強 RC はりの曲げ耐力は、RC はりの曲げ耐力に比してタイプ I, II で、それぞれ 1.30 倍と、1.24 倍の曲げ耐力が向上した。また、応力履歴時の曲げ耐力と比較するとタイプ I, II で、それぞれ 1.44 倍と、1.36 倍曲げ耐力が向上した。

(3)RC はりを CFS 補強することにより、曲げ耐力が大幅に向上するが、応力履歴 CFS 補強 RC はりの場合も、ひび割れ補修と CFS 補強を併用することで、補強効果が得られた。

謝辞：本実験に際しまして、炭素繊維シートは日鉄コンポジット(株)、ひび割れの補修材はシヨーボンド(株)にそれぞれ提供して頂きました。ここに付記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) たとえば、高橋義幸、秦地大、前田敏也、佐藤靖彦：コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, 1998, pp.509-514
- 2) たとえば、三上浩、岸徳光、佐藤昌志、栗原祐介：コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, 1999, pp. 1549-1554
- 3) 建設省土木研究所構造研究室：橋の衝撃荷重に関する試験調査報告書(I-1987), 土木研究所資料, 1987, No.2508
- 4) 梶貝 勇：鉄筋コンクリート部材の諸性状(その4), コンクリートライブラリー, 土木学会, 第34号, 1972
- 5) 阿部 忠, 木田哲量, 澤野利章, 坪松 学：コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 3, 2000, pp. 763-768