

## 繊維シートによる RC 床版の補強設計法に関する研究

研究予算：運営交付金（一般勘定）

研究期間：平 25～平 29

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：村越潤，田中良樹，吉田英二

### 【要旨】

既設道路橋の RC 床版の疲労に対する補強として、軽さや施工性で有利な繊維シート補強の適用事例が多く見られる。しかし、繊維シート補強された RC 床版の疲労損傷機構は必ずしも十分に解明されていないため、類似の RC 床版であってもシートの積層数や補強方向が異なる場合が見られる。本研究では、繊維シート補強された RC 床版の疲労損傷機構をより明確にするとともに、繊維シートによる RC 床版の性能照査型補強設計法を提案する。平成 25～26 年度にかけて、格子状に炭素繊維シートで補強された RC 床版供試体 3 体の輪荷重走行試験を実施した。その輪荷重走行下において、床版下面に接着されたシートのたるみや破断が発生した。3 体の試験の範囲では、シートのたるみや破断は、抜け落ちに伴うシート破断を除くと、配力鉄筋方向シートで、床版下面のコンクリートのひび割れを跨ぐ箇所に発生した。また、シート補強された床版の抜け落ちは、いずれもシートのたるみや破断が生じた箇所付近で発生した。

キーワード：RC 床版，炭素繊維シート，補強，（シートの）破断，（シートの）たるみ，アーチ機構，膜作用

### 1. はじめに

日本におけるこれまでの鉄筋コンクリート(RC)床版の主たる損傷は、大型車の繰返し載荷による疲労損傷であり、ひび割れの発生・進展、最終的には路面の抜け落ちに至る、という過程をたどる<sup>1)</sup>。鋼道路橋の維持管理において、RC 床版の補修・補強は鋼材の腐食や疲労の対策に並んで大きな割合を占めている<sup>2)</sup>。1993 年の車両制限令及び設計自動車荷重の 25 トンへの改正に伴い、損傷度の高い既設床版を中心に補修・補強が進められてきているが、近年の道路橋と比較して、RC 床版の疲労耐久性が相対的に低い傾向にある昭和 30～40 年代(1955～1974 年)の橋は、鋼道路橋約 6 万橋のうちの 1/3 近くを占めており、未補強で供用されているものも少なくない。

RC 床版の補強対策には、鋼板接着、上面増厚、炭素繊維シート補強等の各種工法がある<sup>2),3)</sup>。1990 年代に、RC 床版の疲労耐久性を輪荷重走行試験により評価する方法が考案され<sup>4),5)</sup>、新旧の補強工法の評価が行われた<sup>6),7)</sup>。そのうち、炭素繊維シートによる補強工法は死荷重や施工性の面で利点がある。旧建設省土木研究所と炭素繊維補修・補強工法技術研究会の共同研究(1996～1998 年)において、炭素繊維シート補強された RC 床版の輪荷重走行試験が実施され、補強仕様（シートの積層数として全面 2 層

貼りを推奨）を含む設計・施工指針(案)が提案された<sup>7)</sup>。これらのことから、1990 年代後半以降、炭素繊維シート補強の事例が増加している。しかし、繊維シート補強された RC 床版の損傷機構は必ずしも明確にされていないため、類似の RC 床版であっても異なる補強仕様が適用される事例が見られる。一方、補強後の維持管理を考慮した新たな補強仕様(格子貼り、写真-1)や施工性の改善等に配慮した他の繊維補強材が開発され普及している。RC 床版の耐久性向上(補強の信頼性確保)の観点から、それらの新しい材料にも対応可能な、かつより合理的な繊維シート接着工法による補強設計法を確立する必要がある。



写真-1 格子状 CFRP シート接着による RC 床版の補強事例

本研究では、平成 25～26 年度にかけて、補強前の損傷程度が異なる炭素繊維シート補強された RC 床版供試体 3 体 (CF1～CF3) の輪荷重走行試験を実施した。その結果、シートの破断等の損傷が見られ、その後の抜け落ち位置にも影響が見られた。本文では、それらの損傷形態について整理して示すとともに、そのうち供試体 CF3 の結果を元に、鉄筋のひずみ挙動の変化に着目して、CFRP シート接着工法の補強効果について述べる。

## 2. 試験方法

図-1、表-1 に、供試体 CF1～3 の形状寸法と配筋をそれぞれ示す。RC 床版の諸元は、昭和 39 年の道路橋示方書を適用した床版に概ね相当する。シートの諸元と施工時の温度及び材料試験結果を表-2 に示す。また、シートの貼り付け方法を図-2 に示す。シートは主鉄筋方向、配力鉄筋方向の順にそれぞれ 1 層ずつ接着した。CF2、CF3 のシート施工時は気温が低かったため、床版下面の作業空間をビニルで覆い、養生時はその中に投光器を入れて温度管理を行った。養生期間中は、配力鉄筋方向のシートを貼り終えた直後から、供用中での養生を想定して 68kN で輪荷重を走行させた(以下、養生载荷)。

床版供試体の支持は 2 辺(長辺)を単純支持、他の 2 辺を弾性支持とした。図-1 に示した網掛け部分に輪荷重を走行载荷させた。表-3 に、各供試体の補強前及び補強後の走行回数を示す。CF2、CF3 では、補強前の RC 供試体に初期損傷を与えるため、床版中央の変位が所定の値になるまで 147kN で走行载荷を行った。CF2、CF3 の目標変位はそれぞれ 10、8mm とした。CF3 の目標変位 8mm は、既往の試験<sup>7)</sup>で用いた値と同じである(既往の試験では 157kN 载荷時であった)。補強後の CF2、CF3 は、それぞれの補強前と同じ荷重、繰返し数で走行载荷を行った後、荷重を 196kN に上げて抜け落ちが生じるまで走行载荷を行うこととした。ただし、CF2 は 147kN の段階で抜け落ちが生じた。初期損傷を与えずに補強した CF1 は、CF3 と同様に 38.5 万回まで 147kN で走行载荷した後、荷重を 196kN に上げた。走行载荷の途中で、所定の回数ごとに床版中央での静的载荷を行った。その際に変位、ひび割れ幅、鉄筋ひずみ等を測定するとともに、その直前 60 秒間の走行载荷時の波形データを記録した。シートの浮きの確認は叩き調査によった。

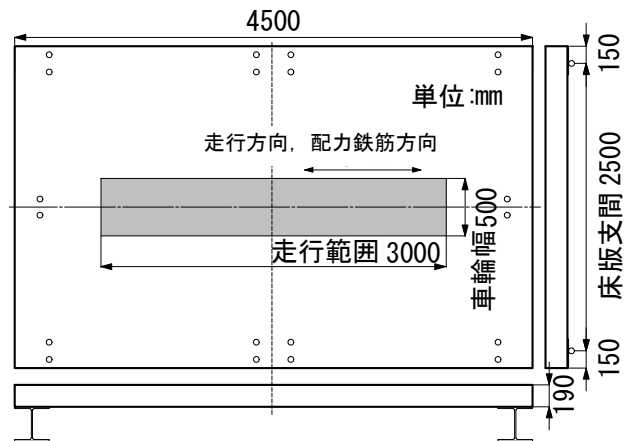


図-1 RC 供試体の形状寸法

表-1 RC 供試体の配筋 (設計値)

	主鉄筋			配力鉄筋		
	呼び径 (mm)	間隔 (mm)	上縁からの距離* (mm)	呼び径 (mm)	間隔 (mm)	上縁からの距離* (mm)
上段	D16	300	30	D10	300	43
下段	D16	150	160	D13	300	146

\*) 床版上面から鉄筋中心までの距離

表-2 シートの諸元、施工時温度、引張試験結果

供試体	シートの種類	接着剤の種類	繊維目付量 (g/m <sup>2</sup> )	設計厚さ (mm)	施工時温度 <sup>1)</sup> (°C)	引張強度 <sup>2)</sup> (MPa)	弾性係数 <sup>2)</sup> (GPa)
CF1	高弾性型	一般用	300	0.143	25	2100	681
CF2		冬用			19	2310	683
CF3					17	2540	668

1) シートの施工期間中の平均温度、2) 5 本の平均値

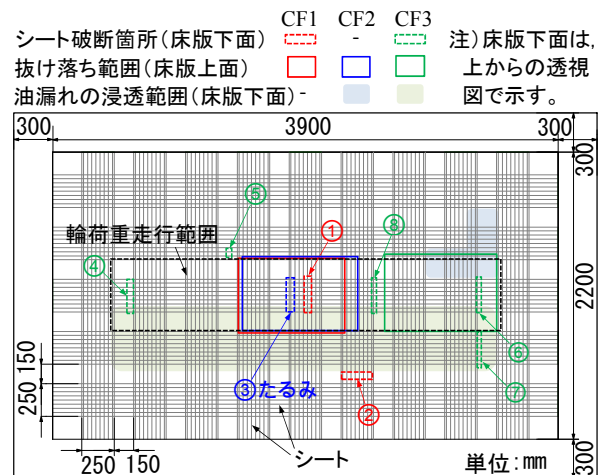


図-2 シートの貼り付け方法、シートの損傷箇所、抜け落ち範囲及び漏油の浸透範囲

### 3. シート補強されたRC床版の破壊性状

図-2に、各供試体のシートの損傷箇所及び抜け落ち範囲を示す。表-4に、走行載荷時及び養生載荷時の主な事象を示す。初期損傷の程度が最も厳しかったCF2では、RC床版のひび割れ幅が最も大きかった箇所(147kN 走行下で0.8mmの開き)で、養生載荷中にシート

表-3 補強前及び補強後の走行回数

供試体	コンクリート圧縮強度 <sup>1)</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	目標変位 <sup>2)</sup> (mm)	補強前	補強後		
			目標変位まで 147kN, 15rpm (回)	養生載荷 <sup>3)</sup> 68kN, 5rpm (回)	147kN, 15rpm (回)	196kN, 15rpm (回)
CF1	22.7	—	—	100,000	385,000	89,000
CF2	20.7	10	1,610,000	185,000	1,100,000	—
CF3	25.4	8	385,000	189,000	385,000	208,000

1)3本の平均値, 2) 載荷時の床版中央たわみ, 3) CF1は7日間, CF2,3は14日間

のたるみが生じた(写真-2)。配力鉄筋方向シートの接着剤の強度が発現する前に、コンクリートのひび割れの開きに伴ってシートが伸ばされ、そのまま硬化したものと考えられる。その部分のシートは輪荷重が離れると面外にはらみ出し、硬化後はシートが局部的に折れるような動きを示した。

また、CF1、CF3では、これまでのシート補強されたRC床版の輪荷重走行試験<sup>7)</sup>で見られなかったシートの破断が数箇所で見られた(写真-3, 4)。シートの破断は、コンクリートの曲げひび割れ位置でのシートの疲労か、交差部の応力集中によるシートの疲労が影響したことによると推測された。

表-4 走行載荷時及び養生載荷時の主な事象

供試体	CF1	CF2	CF3
補強前 147kN	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>■84万回                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・試験機からの漏油により、油が床版下面まで浸透。</li> </ul> </li> <li>■160万回                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・配力鉄筋方向のひび割れ幅は、床版中央付近で最大0.8mm</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■38.5万回                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・配力鉄筋方向のひび割れ幅は最大で0.6mm</li> </ul> </li> </ul>
養生載荷 68kN	変状なし	<ul style="list-style-type: none"> <li>・床版中央付近(配力鉄筋方向のひび割れ幅で、最も大きな変化が見られた箇所付近)のひび割れ直下で、シートのたるみ<sup>③</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2箇所配力鉄筋方向のシートが破断<sup>④, ⑤</sup></li> </ul>
補強後 147kN	変状なし	<ul style="list-style-type: none"> <li>■110万回                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・床版中央付近で抜け落ち</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■16万回                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・シートの破断箇所部分的にシートを当てて補修<sup>④, ⑤</sup></li> </ul> </li> </ul>
補強後 196kN	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>■2万回                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・床版中央で配力鉄筋方向のシートが破断<sup>①</sup></li> </ul> </li> <li>■8.9万回                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・床版中央付近で抜け落ち</li> <li>・抜け落ち時、主鉄筋方向のシートが破断<sup>②</sup></li> <li>・抜け落ち時、配力鉄筋方向の鉄筋降伏</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■16万回                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・配力鉄筋方向のシートが破断<sup>⑥, ⑦</sup></li> </ul> </li> <li>■16~20万回                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・試験機からの漏油により、油が床版下面まで浸透。</li> </ul> </li> <li>■20.8万回                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・床版中央から離れた位置で抜け落ち</li> <li>・抜け落ち後、配力鉄筋方向のシートが破断<sup>⑧</sup></li> </ul> </li> </ul>

注) ①~⑧はシートの損傷箇所であり、図-2にその位置を示す。

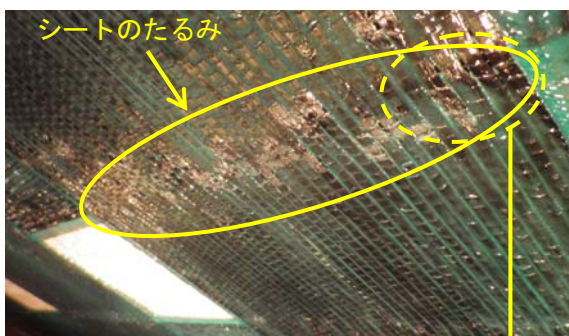


写真-2 CF2のシートのたるみ(図-2中③)

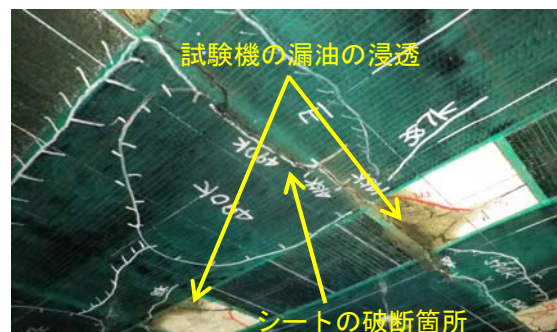


写真-3 CF3のシート破断(図-2中⑥)



写真-4 CF1のシート破断(図-2中①)

このことから、表-5 にシートの破断箇所周辺の状況を整理した。抜け落ちに伴い発生した②、⑧を除くと、すべてのシート破断が配力鉄筋方向のシートでコンクリートのひび割れを跨ぐ箇所に生じていた(写真-4)。ただし、コンクリートのひび割れ位置付近にシートの交差部が近い場合があり、交差部の応力集中の影響についても関係している可能性が残されている。なお、配力鉄筋方向のシートの破断が目立った理由として、RC 床版の配力鉄筋量が比較的少なく、シートの負担が主鉄筋方向に比べて大きい傾向にあること、配力鉄筋方向のシートを貼り付けた直後から養生荷重を行ったことなどが挙げられる。

図-2 に示したとおり、床版の抜け落ちは、②、⑧以外のシートのたるみや破断が生じた箇所付近で生じる傾向が見られた。このことから、シートの損傷がその付近の床版の疲労耐久性に影響した可能性があると考えられる。なお、CF2, 3 の走行荷重中、試験機からの漏油がひび割れを通じて床版下面に浸透していたが(図-2, 写真-3)、シートの破断や床版の抜け落ちに影響したかは現時点で不明である。

#### 4. シート補強された RC 床版の挙動

図-3 に、供試体 CF3 について、静的荷重における床版中央変位の経時変化を示す。図中、荷重時の測定結果を「ピーク荷重時」、除荷時の測定結果を「残留」、それらの差を「活荷重分」として、それぞれ示す。補強後の繰返し数は、それぞれの荷重条件ごとの繰返し数で示した。補強後の変位は、147 kN 走行開始前に初期化した値を示す(以下、ひずみの場合も同様)。補強前の変位は、いずれも荷重開始直後から徐々に変位が増加する傾向が見られた。補強後、補強前と同じ荷重 147 kN で走行荷重を行った場合、補強前の走行開始時よりも繰返し数に伴う変位の増分は著しく小さかった。CF3 は、表-4 に示したとおり、養生荷重時に生じていたシートの破断箇所④、⑤を、補強後 147kN、16 万回時に補修したため、たわみが若干回復した。

図-3(c)は、CF3 の補強後 147kN で 38.5 万回走行荷重した後、荷重を 196 kN にして荷重した結果を示す。約 1 万回以降、ピーク荷重時変位、残留変位ともに徐々に増加した。16 万回時にシート破断(⑥、⑦)が生じてから数万回後に、活荷重たわみの増加が著しくなった。

図-4 に、床版中央下段主鉄筋のひずみ(鉄筋の両面でひずみを計測した箇所はその平均値)の分布を示

表-5 シート損傷箇所①～⑧の周辺状況

供試体	箇所	シート交差部	破断前のシート浮き	コンクリートの曲げひび割れ	抜け落ち時に発生
CF1	①	×	×	○	×
	②	×	○	×	○
CF2	③	△	○(たるみ)	○	×
CF3	④	△	×	○	×
	⑤	×	×	○	×
	⑥	○	×	○	×
	⑦	○	×	○	×
	⑧	○	○	×	○

○：シート損傷箇所と一致する，△：シート損傷箇所と近接する，×：シート損傷箇所と一致しない

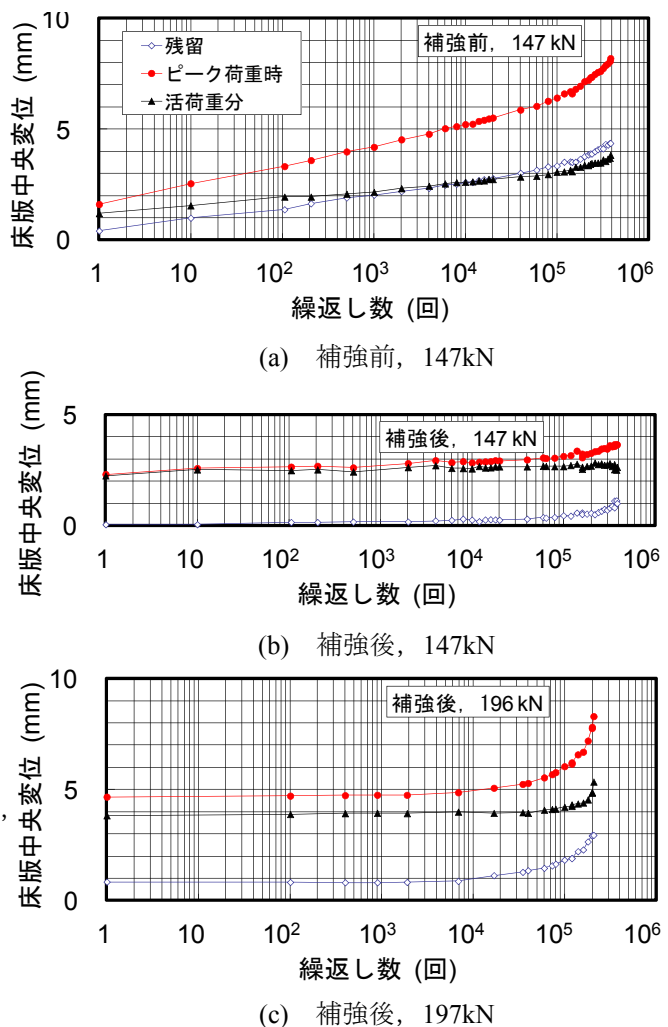
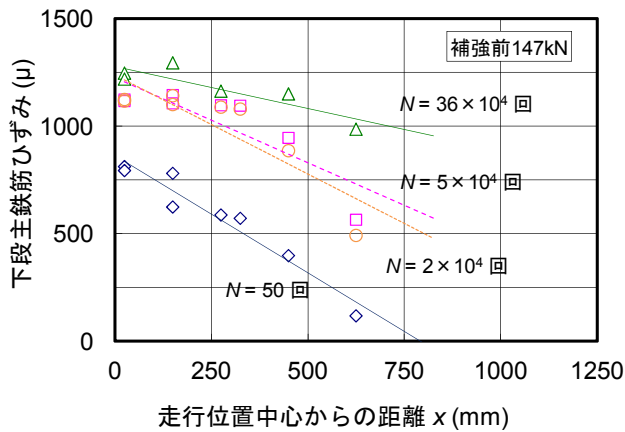


図-3 CF3 の床版中央変位の変化 (静的荷重時データ)

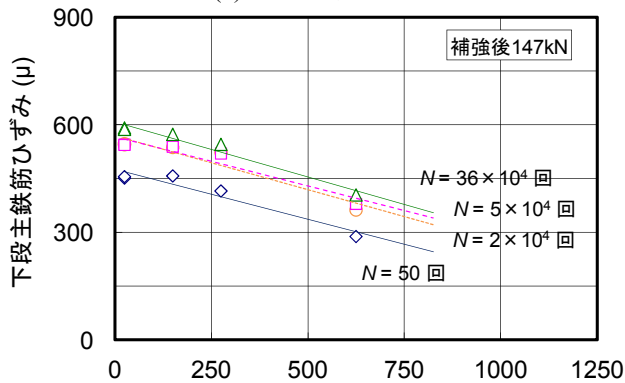
す。図中には、走行回数ごとの直線回帰式を示す。補強前の図(a)では、既往の RC 床版の供試体<sup>8)</sup>と同様に、繰返し数の増加に伴い、下段主鉄筋のひずみ分布が版の曲げモーメント分布に概ね沿った分布形状から、軸方向に変化のないタイドアーチのタイ状

の分布形状に変化する傾向が見られる。

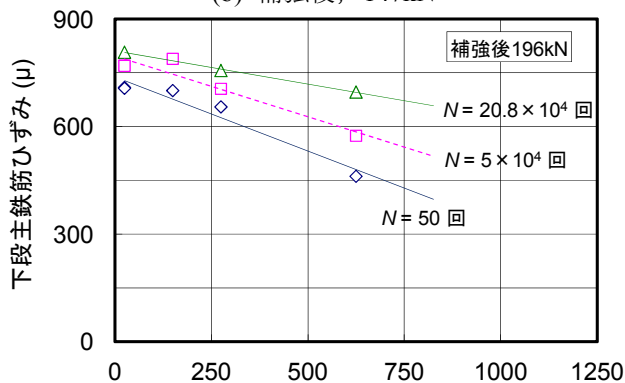
図-4(b)に示す補強後、147kNの段階では、シート補強によって、鉄筋ひずみは補強前の1/2程度まで低下した。しかし、補強前に見られたタイ状の分布が十分には解消されず、36万回までの範囲でひずみ分布の顕著な変化は認められなかった。補強後、196kNの走行載荷では、主鉄筋のひずみ分布が、補



(a) 補強前, 147kN



(b) 補強後, 147kN

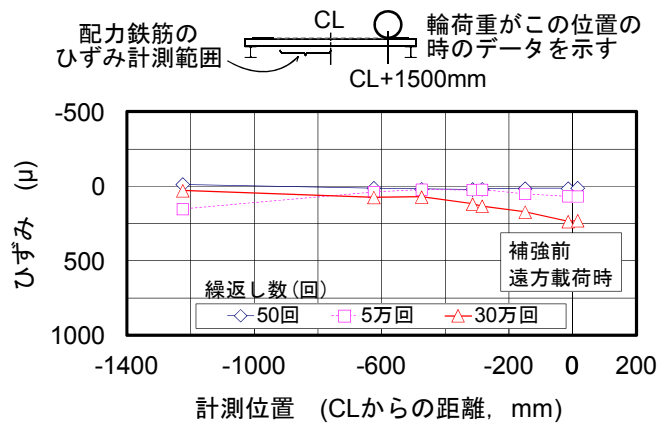


(c) 補強後, 196kN

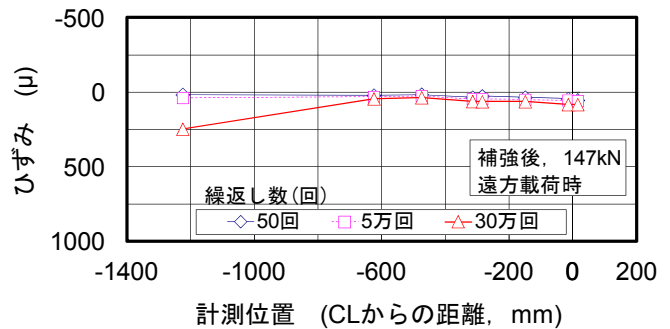
図-4 CF3の床版中央下段主鉄筋のひずみ分布 (動的波形データによる、輪荷重位置は中央)

強前に見られた挙動からさらにタイ状の分布に近づく(図中の回帰直線の傾きが小さくなる)傾向が見られた。

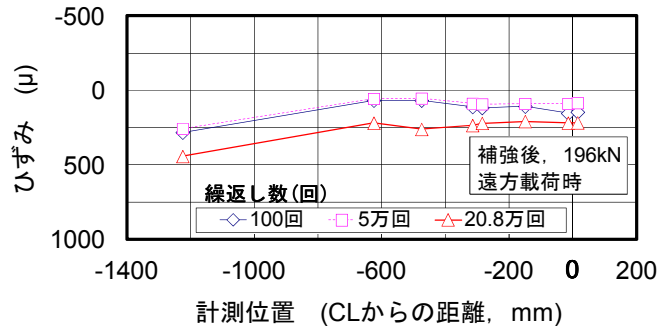
図-5に、輪荷重走行位置直下における上段配力鉄筋のひずみ分布の変化を示す。ここでは、走行中の測定結果のうち、輪荷重が図-5のデータの計測範囲から最も遠い位置(CL+1500mm)に載荷されている状態での結果を示す(遠方載荷時ひずみという)。補強前の段階から上段配力鉄筋の位置は、計算上の中



(a) 補強前, 147kN



(b) 補強後, 147kN



(c) 補強後, 196kN

図-5 上段配力鉄筋の遠方載荷時ひずみ分布 (動的波形データによる)

立軸位置の近くであり、輪荷重直下であっても上段配力鉄筋の計算ひずみは小さい傾向にある。輪荷重直下の上段配力鉄筋のひずみは繰返し数とともに徐々に引張側に増加する傾向が見られ、遠方載荷時のひずみもそれとともに引張側に増加する傾向が見られた。すなわち、既往の補強のない RC 床版供試体 9) と同様に、配力鉄筋方向には断面の大部分が引張域となり、膜の挙動に近づく傾向が見られた(以下、単に膜作用という)。シート補強後 5 万回までは、上段配力鉄筋の引張ひずみが小さく抑制された。補強前に一旦、膜作用の兆候が見られた配力鉄筋方向の挙動が、シート補強によってある程度改善される傾向が見られた。しかしその後、遠方載荷時のひずみが徐々に増加する傾向が見られた。荷重を 196kN に上げた後は、遠方載荷時の引張ひずみの増加が著しくなった。

## 5. まとめ

格子状に炭素繊維シートで補強された RC 床版供試体 3 体の輪荷重走行試験を実施して、次の結果が得られた。

- 1) 輪荷重走行下において、床版下面に接着されたシートのたるみや破断が発生した。報告した試験の範囲において、シートのたるみや破断は、抜け落ちに伴うシート破断を除くと、配力鉄筋方向シートで、床版下面のコンクリートのひび割れを跨ぐ箇所に発生した。
- 2) シート補強された床版の抜け落ちは、いずれもシートのたるみや破断が生じた箇所付近で発生した。  
また、供試体 CF3 の鉄筋ひずみの測定結果より、次の結果が得られた。
- 3) 補強のない RC 床版では、主鉄筋のひずみ挙動の観察等において、主鉄筋方向の耐荷機構が版としての挙動から徐々にアーチ機構に移行する傾向が見られる。補強前の供試体 CF3 でも同様にアーチ機構への移行が認められた。その後に施工されたシート補強によって主鉄筋のひずみが半分程度に抑制されたが、版の挙動が十分に回復するには至らなかった。
- 4) 補強のない RC 床版では、配力鉄筋のひずみ挙動の観察等から、配力鉄筋方向の挙動が版としての挙動から徐々に膜の挙動に近づく傾向が見られる。補強前の供試体 CF3 でも同様に膜作用への移

行が認められた。その後に施工されたシート補強によって、膜作用への移行をある程度抑制する傾向が認められた。

## 6. おわりに

本課題のうち、炭素繊維シート補強については、炭素繊維補修・補強工法技術研究会との共同研究の下で実施している。供試体 CF1~CF3 の結果については、さらに分析を進めるとともに、追加の輪荷重走行試験も実施する予定である。また、炭素繊維シートの剥離や破断についての基礎性状を調査するため、RC はり供試体での疲労試験やシート単体の疲労試験も並行して実施しているところである。

## 参考文献

- 1) 国広哲男：道路橋床版の問題点，橋梁と基礎，2-7，pp. 1-5，1968.7.
- 2) 西川和廣，村越潤，山本悟司，杉山純：活荷重による橋梁上部構造の損傷と対策，土木技術資料，34-8，pp. 58-65，1992.
- 3) 森成道，松井繁之，岩下藤紀，西川和廣：炭素繊維シートによる床版下面補強効果に関する研究，橋梁と基礎，95-3，pp. 25-32，1995.3.
- 4) 松井繁之：移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について，コンクリート工学年次論文報告集，9-2，pp. 627-632，1987.
- 5) 内田賢一，西川和廣，神田昌幸：既設 RC 床版の健全度評価手法に関する実験的検討，土木学会第 55 回年次学術講演会，pp. 516-517，2000.9.
- 6) 松尾伸二，西川和廣，内田賢一，川間重一：既設鉄筋コンクリート床版の補修・補強に関する検討，橋梁と基礎，pp. 25-32，2000.11.
- 7) 建設省土木研究所，炭素繊維補修・補強工法技術研究会：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)一，共同研究報告書第 235 号，1999.12.
- 8) 長屋優子，村越潤，田中良樹：繰返し移動荷重を受ける鉄筋コンクリート床版のひび割れ挙動に関する検討，コンクリート工学年次論文集，pp. 907-912，2008.
- 9) 田中良樹，村越潤，長屋優子：鉄筋コンクリート床版の疲労耐久性に及ぼす配力鉄筋の影響，第 7 回道路橋床版シンポジウム論文報告集，土木学会，pp. 161-168，2012.6.

RESEARCH ON DESIGN METHOD FOR STRENGTHENING CONCRETE BRIDGE DECKS WITH EXTERNALLY-BONDED FRP SHEETS

Budget : Grants for operating expenses,

General account

Research Period : FY2013-2017

Research Group : Bridge and Structural

Engineering Research Group

Authors : MURAKOSHI Jun,

TANAKA Yoshiki, YOSHIDA Eiji

Abstract :

A strengthening method with externally-bonded FRP sheets having the advantages of light weight and easy installation is often applied to existing concrete bridge decks suffering from fatigue. Nevertheless, because the mechanisms of fatigue deterioration of the concrete decks strengthened with the FRP sheets have not been sufficiently identified, the differences in the amount of the sheets and the directions of strengthening were made even between the decks with similar conditions. The research program has been carried out in order to identify the mechanisms and to provide the performance-based design specifications for strengthening the concrete bridge decks with the FRP sheets. In FY2013 to 2014, the wheel running tests using three specimens of reinforced concrete decks strengthened with the grid type CFRP sheets were carried out. Under the cyclic moving load in the testing, a sag in the CFRP sheet and the ruptures of the sheets were observed. In the extent of the tests using three specimens, the sag and the ruptures developed in the sheets arranged parallel to the distribution bars and at the cross section across the flexural cracking of concrete on the soffit of the decks except the ruptures brought by the final punching failure of the decks. In addition, the every final punching failure of the strengthened decks took place near the sag or ruptures.

Key words : concrete deck, fatigue, strengthening, carbon fiber sheet, wheel running test, arch action, membrane action