

## 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 年度は、補強前の RC 床版の劣化程度が炭素繊維シート補強後の RC 床版の疲労耐久性に与える影響について把握するため、補強前の劣化程度をパラメータとした輪荷重走行試験による実験的検討を行った。

キーワード：RC 床版、疲労、補強、炭素繊維シート、輪荷重走行試験

### 1. はじめに

RC 床版の疲労損傷は、厳しい交通実態や環境条件を反映して道路橋の主たる損傷要因となっている。疲労損傷に対して、比較的初期のひび割れに対する予防保全のための補強法として、鋼板接着や炭素繊維シートによる補強工法があるが、軽さや施工性で有利な炭素繊維シート補強工法の適用事例が多く見られる。一方で、繊維補強された RC 床版の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。また、最近では、補強後の維持管理を考慮した補強仕様（写真-1）や施工性の改善等に配慮した他の繊維補強材も開発されており、耐久性向上の観点から、それらの新しい材料にも対応可能な繊維シート補強による補強設計法を確立する必要がある。

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 年度は、補強前の RC 床版の劣化程度が炭素繊維シート補強後の RC 床版の疲労耐久性に与える影響について把握するため、RC 床版 3 体（CF1

～3）を製作し、補強前の劣化程度をパラメータとした輪荷重走行試験による実験的検討を行った。そのうち、既に試験を終えた、供試体 CF2 の結果について報告する。

### 2. 試験方法

#### 2.1 床版供試体

図-1、表-1 に供試体（CF1～3）の形状寸法と主な諸元をそれぞれ示す。供試体の諸元は、昭和 39 年の道路橋示方書を適用した床版（以下、39 床版）に



写真-1 シート接着補強（格子貼り）された RC 床版の事例

概ね相当する。

コンクリートの練り混ぜは、プラントでの実機練りとした。表-2 に、コンクリートの配合と打設記録を示す。養生シートで約 10 日間養生した後、空中に放置した。表-3 にコンクリートの圧縮及び割裂引張強度試験の結果を示す。表-4 に使用した鉄筋の引張試験結果を示す。

### 2.2 炭素繊維シートによる接着補強

供試体に初期損傷を与えるため、補強前に 147kN 一定で荷重時の変位が所定の値になるまで繰り返し走行荷重を行った。供試体 CF1~3 の目標とする変位は、それぞれ、0mm (初期損傷無し)、10mm、8mm とした。CF2 の損傷の指標 10mm は、既往の試験で目標としていた 8mm よりも劣化の程度が著しい状態となるように設定した<sup>2)</sup>。図-2 に、CF2 の補強前の初期損傷終了後における床版下面のひび割れ状況を示す。CF2 は、繰り返し数 160 万回で、初期損傷の目標レベル (荷重時の床版中央実測変位 10mm) に到達した。初期損傷終了後では、床版下面全体にひび割れが見られ、かつ、床版中央付近において、下面のかぶりコンクリートの浮きが部分的に見られた。

図-3 に、炭素繊維シートの配置図を示す。本試験では、炭素繊維シートを格子状に配置した場合の補強効果について確認するため、図-3 に示すような接着方法とした。炭素繊維シートは、幅を 250mm、シート間の間隔を 150mm とし、供試体中央にシートの中心が来るように配置した。炭素繊維シートの種類は、高弾性タイプ (300g/m<sup>2</sup> 目付) のものを使用した。含浸接着樹脂は、標準的なエポキシ樹脂 (冬期用) を使用した。表-5 に、コンクリート補強用連続繊維シートの引張試験方法 (JIS A1191) による材料試験結果を示す。

写真-2 に、供試体 CF2 のシート接着補強の施工完了時の状況を示す。炭素繊維シートは、主鉄筋方向・配力鉄筋方向にそれぞれ 1 層ずつ施工した。施工は、供試体下面のコンクリートをディスクサンダーで下地処理をした後、プライマーを塗布し、エポキシ樹脂系のパテ材で不陸修正を行った。その後、含浸用接着剤を塗り、その上にシートをのせ、脱泡ロー

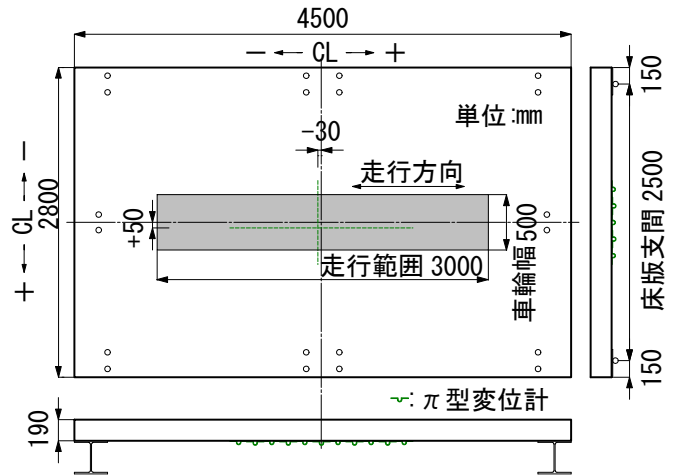


図-1 床版供試体の形状寸法

表-1 床版供試体の主な諸元 (設計値)

供試体	主鉄筋			配力鉄筋			
	呼び径	間隔 (mm)	上縁からの距離* (mm)	呼び径	間隔 (mm)	上縁からの距離* (mm)	
CF1~3	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 コンクリートの配合及び打設記録

供試体	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					SL (cm)
				W	C	S	G	AE	
CF1~3	58.2	4.7	48.7	178	306	857	928	3.06	18.5

セメント：普通ポルトランドセメント、AE：AE 減水剤標準形 I 種、最大粗骨材寸法 G<sub>max</sub>=20mm、目標圧縮強度：24N/mm<sup>2</sup>、注) 埋め込みゲージの設置に配慮してスランブを大きくした。空気量、スランブは実測値を示す。

表-3 コンクリートの圧縮強度及び割裂強度試験結果

	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (×10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	材齢 (日)
開始時	20.6	18.1	0.191	2.2	28
終了時	24.7	19.4	0.159	2.8	125

注)3 本の平均値

開始時：CF2 の補強前の開始時、終了時：CF2 の補強後の終了時。

表-4 鉄筋の引張試験結果

供試体	鉄筋	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (×10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> )
CF1~3	D10	353	514	188
	D13	336	485	192
	D16	348	521	192

注)鉄筋は SD295A、3 本の平均値

ラーを用いてシートがコンクリートに密着するように接着した。冬期 (1 月) の施工のため、シート接着完了後、14 日間の養生期間を確保した。養生中は、

■: コンクリートの浮き

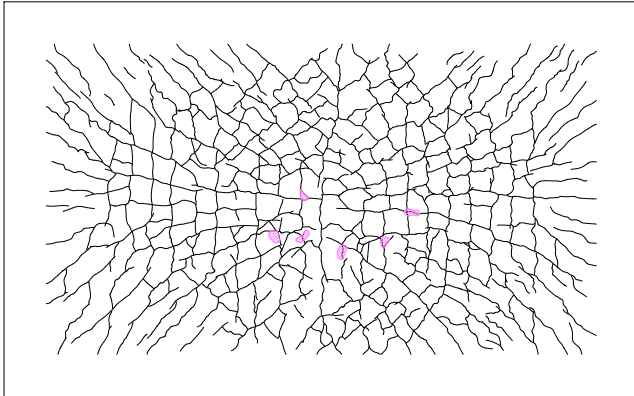


図-2 供試体CF2の補強前の床版下面のひび割れ状況（初期損傷終了時、上面からの透視図）

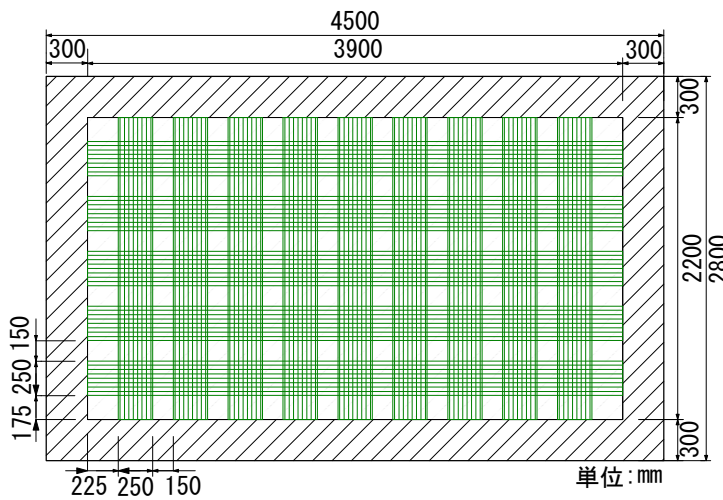


図-3 供試体下面へのシート接着補強(CF1～3 共通)

表-5 炭素繊維シートの引張試験結果

シートの種類	設計厚さ(mm)	繊維目付量(g/m <sup>2</sup> )	引張強さ(N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数(×10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> )
高弾性型	0.143	300	2310	683

注) 引張強さ及び弾性係数は、5本の平均値。

供用期間を想定して、70kNの荷重で輪荷重を走行させた。

### 2.3 載荷試験と計測項目

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、200mm×500mmの鋼製載荷ブロックを並べて鋼板を敷いた上に、輪荷重を走行載荷させた。

補強後の走行載荷は、補強前と同じ条件（CF2は荷重147kN一定で160万回）で走行載荷した後、荷重を235kNとして、床版の抜け落ちが生じるまで走行載荷を繰り返すこととした。



写真-2 供試体CF2のシート接着補強の施工完了時の状況

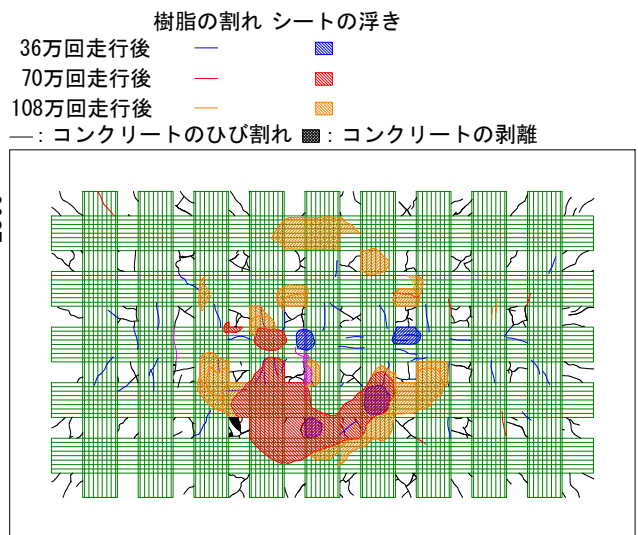


図-4 補強後のシートの浮き・樹脂の割れ、コンクリートのひび割れ・剥離状況

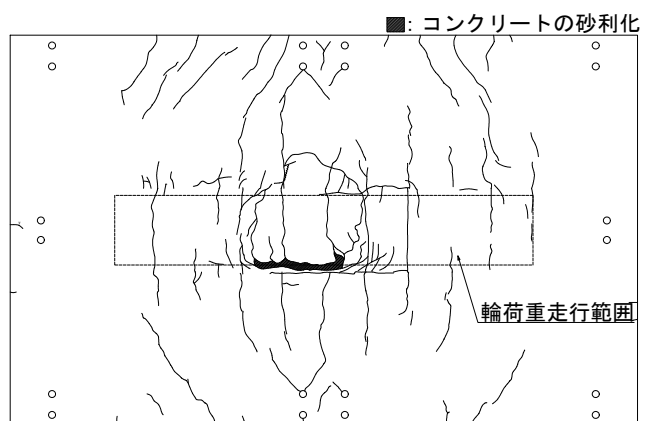


図-5 試験終了後の床版上面のひび割れ状況

主な計測項目は、鉛直変位、鉄筋、コンクリート及びシートのひずみ、ひび割れ幅とした。ひび割れ幅は、下面のひび割れを対象としてπ型変位計を用

いて測定した。コンクリートのひび割れは、鉄筋位置に概ね沿って出る傾向があることから、鉄筋をまたぐように  $\pi$  型変位計 (基長 150mm) を配置した (図-1)。シート接着後は、シートの上から  $\pi$  型変位計を取り付け、補強前と同じ箇所でのひび割れ幅を測定した。

計測は、ひずみと変位の全点を対象として、所定の回数ごとに、床版支間中央で静的载荷を行った際の静的計測 (SS データ) と、その直前 60 秒間の走行中における動的計測 (20Hz、DT データ) を行った。なお、本文で示す補強後のデータは、補強時点で初期化した値 (実測値から補強前の試験終了後における残留値を減じた値) で示す。

炭素繊維シートの付着切れは、叩きによる打音調査により確認した。

### 3. 結果

#### 3.1 破壊状況

図-4 に、補強後のシートの浮き・樹脂の割れ、コンクリートのひび割れ・剥離状況、図-5 に、補強後における床版上面のひび割れ状況をそれぞれ示す。補強後の CF2 供試体は、初期損傷を与えた時の 160 万回に達することなく、繰返し数 108 万回で、床版中央付近において抜け落ちが発生した。床版上面が陥没するとともに、床版下面には陥没範囲を囲むようにシートの浮きが確認された。

補強後、繰返し数 36 万回までの走行で、シートの浮きは初期载荷終了後に確認したかぶりコンクリートの浮きの箇所から発生していた。繰返し数 70 万回までの走行で、シートの浮きは片方に偏って広がっていた。抜け落ちの直前には、シートの浮きは床版中央付近を囲むように広がる傾向が見られた。

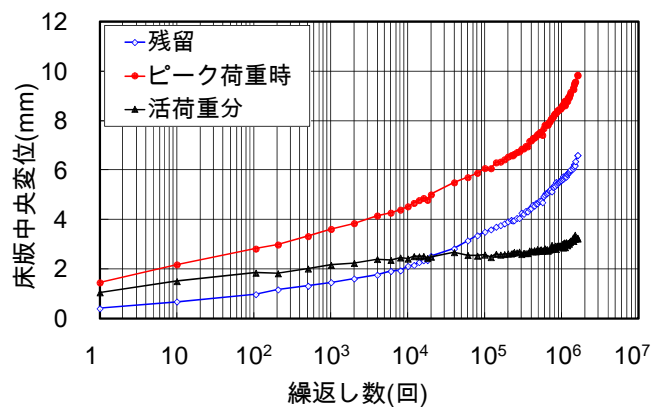
#### 3.2 床版中央変位の変化

表-6 に、床版中央の変位と抜け落ちまでの繰返し数、図-6 に、床版中央変位と繰返し数の関係をそれぞれ示す。図中、载荷時の測定結果をピーク荷重時、除荷時の測定結果を残留、ピーク荷重時と残留の差を活荷重分として、それぞれ示す。補強前の変位は、载荷直後から初期損傷終了時まで徐々に増加する傾

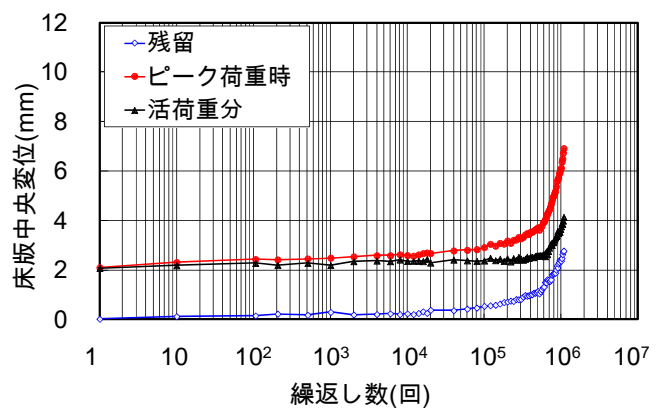
表-6 载荷荷重、床版中央変位と抜け落ちまでの繰返し数

	载荷荷重 (kN)	床版中央変位 <sup>※1</sup> (mm)		抜け落ちまでの繰返し数 $N_f$ <sup>※4</sup> ( $\times 10^4$ 回)
		実測値 <sup>※2</sup>	計算値 <sup>※3</sup>	
補強前	147	1.05 (3.23)	0.79 (3.18)	(160)
補強後	147	2.08 (4.14)	0.78 (2.79)	108

※1: 活荷重分 (ピーク荷重時と残留の差)。※2: 走行開始直後 (上段) と走行終了時 (下段) の値を示す。※3: 全断面有効とした場合の値 (上段) とコンクリートの引張を無視した場合の値 (下段括弧) を示す。※4:  $N_f$  の括弧は破壊無し。



(a) 補強前, 147kN



(b) 補強後, 147kN

図-6 床版中央変位の変化 (SS データ)

向が見られた。補強直後の変位は、補強前の走行開始の変位よりやや大きい値であった。補強直後の活荷重分の変位は、2.08mm であり、コンクリートの引張域を無視した場合の計算値 2.79mm より小さい値であった。補強後の残留分の変位は、繰返し数 50

万回から急激に増加する傾向が見られた。

### 3.3 ひび割れ幅の変化

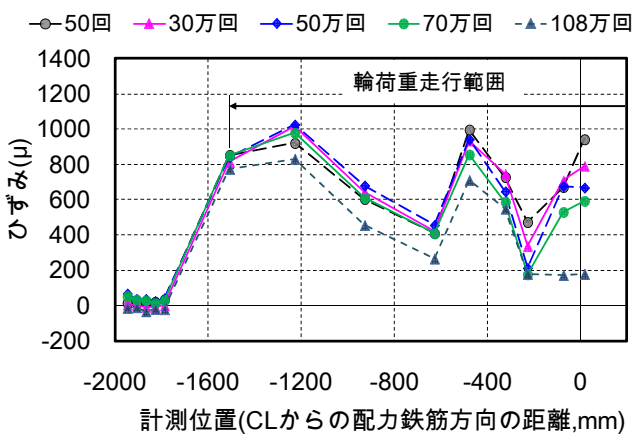
図-7に、補強前後の走行載荷中の床版下面の配力鉄筋方向及び主鉄筋方向のひび割れ幅（動的波形の最大ピーク値）を繰返し数ごとにそれぞれ示す。補強前の配力鉄筋方向及び主鉄筋方向のひび割れ幅のほとんどは、0.2mmを大きく超えており、主鉄筋方向のひび割れ幅は、早期にシートの浮きが進行した側に偏って大きくなっており、最大で1.6mmに達していた。

補強後、配力鉄筋方向のひび割れ幅で、補強前において最も大きなひび割れ幅を計測した箇所（CL-150mm）では、補強後も繰返し数の増加に伴いひび割れ幅が増加する傾向が見られた。その他の箇所における配力鉄筋及び主鉄筋方向のひび割れ幅は、いずれも試験終了時までほとんど変化がなく、顕著に抑制されていた。

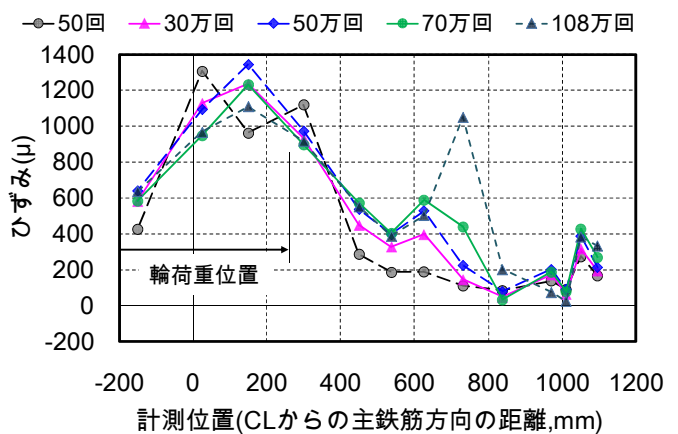
### 3.4 シートのひずみ分布

図-8に、補強後の床版中央における配力鉄筋方向及び主鉄筋方向のシートのひずみ分布（動的波形の最大ピーク値）を繰返し数ごとにそれぞれ示す。配力鉄筋方向のシートのひずみの多くは、輪荷重走行範囲においても繰返し数の増加によるひずみの変化はほとんど見られない。主鉄筋方向のシートのひずみは、輪荷重位置からやや離れた計測箇所（CL+750mm）で局所的に増加する傾向が見られた。

### 3.5 補強後の疲労耐久性

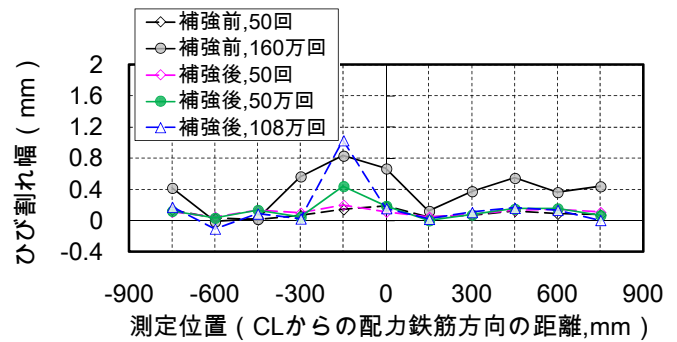


(a) 配力鉄筋方向ひずみ



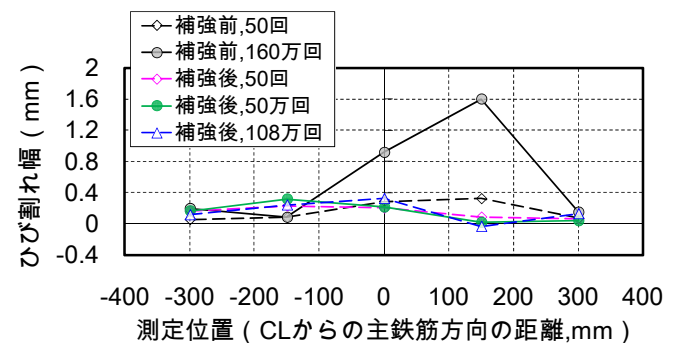
(b) 主鉄筋方向ひずみ

図-8 シートのひずみ分布 (DT データ)  
注) 各載荷回数での最大ピーク値を示す。



(a) 配力鉄筋方向

(主鉄筋方向ひび割れのひびわれ幅)



(b) 主鉄筋方向

(配力鉄筋方向ひび割れのひびわれ幅)

図-7 π型変位計によるひび割れ幅 (DT データ)

注) 各載荷回数での最大ピーク値を示す。

図-9に、供試体 CF2 の抜け落ちまで繰返し数  $N_f$  を、既往の補強無しの 39 床版の結果<sup>3)</sup>及びシート補強 (全面貼り) された 39 床版の結果<sup>1)</sup>と併せて示す。縦軸は、配力鉄筋量の影響を考慮した梁状化した後の静的押し抜きせん断耐力  $P'_{sx}$  を用いて整理した

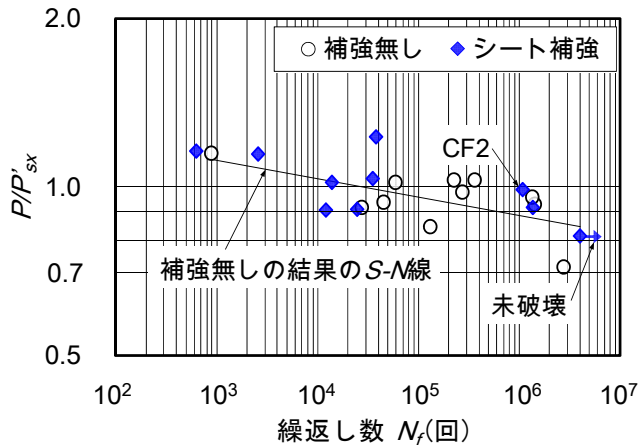


図-9  $P/P'_{sx}$  と  $N_f$  の関係

4)6)。 $P$ は走行載荷における輪荷重である。なお、既往のシート補強（全面貼り）された 39 床版の階段載荷の結果  $\Psi$ は、抜け落ち破壊時の荷重とその時の繰返し数を用いてプロットした。

シート補強された供試体 CF2 の結果は、既往のシート補強（全面貼り）された RC 床版の結果  $\Psi$ も含めて、補強無しの場合の 39 床版の結果の S-N 線の概ねばらつきの範囲に位置していた。

#### 4. あとがき

本課題では、炭素繊維シート接着工法による補強に関して、炭素繊維補修・補強工法技術研究会との共同研究を実施しており、シート補強された RC 床版の疲労損傷機構の解明や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） $\Psi$ の改訂に取り組んでいる。

#### 参考文献

- 1)例えば、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（I）-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）、1999.12.
- 2)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.
- 3)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、2008.7.

4)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、pp.161-168、2012.6.

5)田中良樹、村越潤：繰返し移動荷重を受ける鋼板接着補強された鉄筋コンクリート床版の挙動、構造工学論文集、59A、土木学会、pp.1124-1137、2013.3.

6)田中良樹、村越潤、長屋優子、吉田英二：鉄筋コンクリート床版の疲労耐久性に関する最近の研究、土木技術資料、56-3、pp.30-35、2014.3.

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 sufficiently been 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 examine the influence of the damage of the decks at strengthening upon the fatigue durability of the decks strengthened with externally-bonded CFRP sheets, an experimental study by means of truck wheel traveling tests using full-scale deck specimens with the different levels of the initial damage at strengthening.

**Key words** : concrete deck, fatigue, strengthening, carbon fiber sheet, truck wheel traveling test