格子状に炭素繊維シート接着補強された RC 床版の

輪荷重走行下における破壊性状

田中良樹*,村越潤**,玉越隆史*,新藤竹文***

*(国研)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター(〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6) ** 博(工) 首都大学東京教授 都市環境学部(〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1) *** 工博 炭素繊維補修・補強工法技術研究会(〒103-0021 東京都中央区日本橋本石町 1-2-2)

> 格子状に炭素繊維シート接着補強された RC 床版の輪荷重走行試験にお いて、シートのたるみや破断が発生した.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.測定 データから、1箇所のシートの破断であっても、シート補強された RC 床版 全体の挙動や疲労耐久性に影響を及ぼすことが分かった. キーワード:炭素繊維シート、補強、(シートの)破断、(シートの)補修

1. はじめに

炭素繊維シート(以下、シート)による鉄筋コンクリー ト床版(RC 床版)の補強事例において、仕様が類似する RC 床版であっても補強量が異なる場合が見られる. 著 者らは、シート補強された RC 床版の疲労損傷機構が必 ずしも十分に解明されていないことがその一つの要因で あると考え、同機構の解明と性能照査型補強設計法の構 築に向けて,輪荷重走行試験による検討を行っている. また近年、維持管理を考慮して格子状にシートを貼る事 例が見られることから,検討の一環として格子貼りによ るシート補強の性能について確認することとした. その うち、補強前の損傷の程度を変えて行った3体の床版供 試体 CF1~3 を用いた輪荷重走行試験において、走行載 荷中にシートのたるみや破断が確認された 1). また, そ の3体の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¹⁾、本文では、それらの損傷箇所付近の測定デー タを示した上で、それらのシートの損傷が見られた付近 の変化の状況と、全体挙動に及ぼす影響について報告す る. また、1 体については、試験の途中でシート損傷箇 所をシートを用いて部分補修したことから、その部分補 修前後における挙動の変化について報告する.

2. 試験方法

供試体 CF1~3の RC 床版部の形状寸法を図-1に,主 な諸元を表-1にそれぞれ示す.供試体の諸元は,昭和 39 年の鋼道路橋設計示方書を適用した床版に概ね相当 する.表-2 に、コンクリートの材料試験結果を示す. シートの諸元と施工時の温度及び材料試験結果を表-3 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.CF2,3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シートで覆い、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、養生載荷という)².

表-2 には、各供試体の補強前及び補強後の走行回数 も示した. 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 で走行載荷を行った. CF2, CF3 の目標変位は 静的載荷時でそれぞれ 10mm, 8mm とした. CF3 の目標



変位 8mm は、既往の試験²⁾で用いた値と同じである(既 往の試験では 157kN 載荷時であった). 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 載荷を行った後, 荷重を 196kN に上げて抜け落ちが生じ るまで走行載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 で走行載 荷した後、荷重を 196kN に上げた. 走行載荷の途中で、 所定の回数ごとに床版中央での静的載荷を行った. その 際に変位、ひひ割れ幅、鉄筋ひずみ及びシートのひずみ を測定するとともに(以下, SS データ), その直前 60 秒間の走行載荷時の各波形データを記録した(以下, DT データ). 本文で示す補強後のデータは、補強時点で初 期化した値を示す.シートの浮きの確認は小型のハン マーによる叩き調査によった.ひび割れ幅の測定は、図 -1に示す位置に基長150mmで取り付けたパイ型変位計 によった、シート補強時は一旦取り外し、シート施工後、 再び元の位置に設置しなおして、シート越しにひび割れ 幅の測定を行うこととした.

3. シートの損傷

3.1 シートの損傷の種類

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 のたるみが生じた(写真-1). 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る方向に繊維のずれが生 じ、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.

CF3 では、養生載荷中、箇所4,5 にシートの破断が見 られた.写真-2(a)にそのうちの箇所4のシート破断の 状況を示す.CF3は、その後、補強後の走行載荷を開始 したが、繰返し数16万回で一旦停止して、写真-2(b)に 示すようなシートによる部分補修を行った.シートの仕 様、層数は元のシート補強と同様であり、シート破断位 置を跨いで双方に100mm以上の長さが確保できるよう に、長さ230mm×幅250mmのシートを、元のシートの 上に重ねて貼り付けた(箇所5 は幅50mmのシート).部 分補修後から約1週間静置した後に走行載荷を再開した.

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²⁾⁴⁾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). そのうち, 196kN で走行載荷中に発生した配力鉄筋方向シートの破断は、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 と想定された.

表-5 にシートの損傷箇所の周辺状況を整理した.3 体の試験の範囲では、シートの損傷として、初期損傷の 程度や養生載荷の開始時期の影響によると考えられる シートのたるみや、シートの疲労や抜け落ちに伴う過大 な変形によると考えられるシートの破断が見られた.なお、 抜け落ちに伴い発生した箇所 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.配力鉄筋方向のシー トの破断が目立った理由として、主鉄筋方向のシートの 貼り付けを養生載荷の前日に行ったのに対して、配力鉄 筋方向のシートの貼り付けは養生載荷の当日に行い、

表-1 RC 床版供試体の主な諸元 (CF1~3 共通, 設計値)

		主鉄箱	竻		中語		
	呼び 径	間隔 (mm)	上縁から の距離 [*] (mm)	呼び 径	間隔 (mm)	配力 鉄筋 比(%)	厚 (mm)
上段	D16	300	30	D10	300	22	100
下段	D16	150	160	D13	300	52	190

*) 床版上縁から鉄筋中心までの距離

表-2 コンクリートの材料試験結果及び補強前,補強後の走行回数

-								
<i>#</i>	コンク	コンクリー	初期損	補強前	補強後			
供封	リート圧	ト弾性係数 ¹⁾	傷目標	目標変位まで	養生載荷2)	147kN,	196kN,	
武士	縮強度」)	$(\times 10^{3})$	変位	147kN, 15rpm	68kN, 5rpm	15rpm	15rpm	
744	(N/mm ²)	N/mm ²)	(mm)	(×10 ⁴ 回)	$(\times 10^{4} \underline{\textcircled{D}})$	$(\times 10^{4} \square)$	$(\times 10^{4} \square)$	
CF1	22.7	18.8	-	_	10	38.5	8.9	
CF2	20.7	18.1	10	161	18.5	110	-	
CF3	25.4	19.8	8	38.5	18.9	38.5	20.8	
	and the part of the base of the					· · · had been		

1) 試験開始時, 3本の平均値, 2) CF1 は7日間, CF2,3は14日間

衣-	-3	シートの)諸兀,	施上時	温度,是	 引 振	际朱
	24		经营业 日	∋л.⇒⊥.	羊小咕	日正法	弾性係

供試体	シー トの 種類	接着剤 の種類	繊維目 付量 (g/m ²)	設計 厚さ (mm)	養生時 温度 ¹⁾ (℃)	引張強 度 ²⁾ (N/mm ²)	輝生床 数 ²⁾ (×10 ³ N/mm ²)	
CF1	古部	一般用	200		25	2100	681	
CF2	向炠	友期田	500 1 図	0.143	19	2310	683	
CF3	TIT	今朔用	工層		17	2540	668	

1) シート養生期間中の平均温度,2)5本の平均値





表-4 走行載荷時及び養生載荷時の主な事象1) 供試体 CF1 CF2 CF3 ■84 万回 38.5 万回 ・試験機からの漏油により、油が ・配力鉄筋方向のひび割れ幅 補強前 床版下面まで浸透. は最大で 0.6mm 147kN ■160 万回 ・配力鉄筋方向のひび割れ幅は、 床版中央付近で最大 0.8mm ・床版中央付近(配力鉄筋方向の 変状 ・2箇所で配力鉄筋方向の 養生 ひび割れ幅で,最も大きな変化 シートが破断(箇所 4,5) なし 載荷 が見られた箇所付近)のひび割 68kN れ直下で、シートのたるみ(箇所3 110万回 変状 ■16 万回 補強後 101 ・床版中央付近で抜け落ち ・シートの破断箇所に部分的に 147kN シートを当てて補修(箇所 4,5) ■16 万回 2万回 ・床版中央で配力鉄筋方向 ・配力鉄筋方向のシートが破断(箇所6,7) のシートが破断(箇所1) ■16~20万回 ■8.9 万回 補強後 ・試験機からの漏油により、油が床版 196kN ・床版中央付近で抜け落ち 下面まで浸透. ・抜け落ち時、主鉄筋方向 ■208万回 のシートが破断(箇所 2) ・床版中央から離れた位置で抜け落ち 抜け落ち時,配力鉄筋方 ・抜け落ち後、配力鉄筋方向のシート 向の鉄筋降伏 が破断(箇所8) 注)箇所1~8はシートの損傷箇所であり、図-2にその位置を丸付数字で示す.

貼り付けた直後から養生載荷を行ったことが挙げられる.

3.2 シート損傷付近のひずみ等の挙動

表-5に示すように、シートの変状が見られた箇所の うち、その近傍で何らかのデータが得られた箇所は限ら れていた. 各供試体で得られた主なデータを次に示す.

図-3に、供試体 CF2 のたるみ発生箇所付近における ひび割れ幅の振幅の変化を示す.シートにたるみが発生 していたにもかかわらず、補強後 48 万回まではひび割 れ幅がある程度抑制されていた.48 万回を境に、その付 近のひび割れ幅の増加または減少といった変化が見ら れた.しかし、配力鉄筋のひずみは、下段鉄筋のひずみ ゲージの損傷が多かったこともあるが、顕著な変化が認 められなかった.少なくとも補強後の 48 万回までは、 たるみによってシートが幅全体に破断に相当する状況 に至ることはなかったと考えられる.

図-4に、供試体 CF3 の補強後 147kN 走行載荷におけ るシート破断付近(箇所 4)のシート及び下段配力鉄筋 のひずみ振幅を示す.シートの部分補修によって,近傍 のシートのひずみ振幅が顕著に増加する一方,同じ断面 の配力鉄筋のひずみ振幅は明確に減少した.同図に補強 前の同じ位置の配力鉄筋のひずみ振幅を示した.補強前 に比べると,補強後の鉄筋のひずみ振幅は顕著に小さく なっていた.近傍のシート破断が見られたにもかかわら ず配力鉄筋のひずみが改善されていたのは、シートの破 断位置近傍では影響があるものの,版全体としてはシー トが損傷していない部分のシート補強の効果が残って おり,その分の効果が見られたと推察される.

図-5 に、供試体 CF1 の補強後 196kN, 2.0 万回から 2.2 万回の間で箇所1に発生したシート破断について、破 断前後におけるその付近のシート及び下段配力鉄筋の



写真-1 シートのたるみ (CF2の箇所3)





写真-2 シートの破断と部分補修(CF3の箇所4)



写真-3 シートの破断 (CF1 の箇所 1)

ひずみを示す. この時点 では2000回ごとに60秒 間の波形データを測定 していたが,ちょうど破 断した時のデータは得 られていない. ここでは, 破断前後の直近におけ るデータを示した. シー ト破断が生じた床版中 央 CL に最も近い CL-75mm, CL+20mmに おけるシートのひずみ 振幅は,シート破断に伴 い. いずれも顕著に小さ

表-5 シート損傷箇所の周辺状況と測定データの有

供試	當正	シート	破断前の	コンクリートの	抜け落ち	測定データの有無と種類		
体	固力	交差部	シート浮き	曲げひび割れ	時に発生	有無	変化時期	データ種類
CF1	1	×	×	0	×	有	補強後196kN時 破断	上段配力鉄筋,下段配力鉄筋, シートのひずみ,ひび割れ幅
	2	×	0	×	0	無	-	—
CF2	3	\bigtriangleup	0 (たるみ)	0	×	有	補強後147kN時 たるみ→破断	下段配力鉄筋, シートのひずみ, ひび割れ幅
	4	\bigtriangleup	×	0	×	有	養生載荷時 破断	上段配力鉄筋,下段配力鉄筋, シートのひずみ
GEA							補強後147kN時 シート補修	上段配力鉄筋,下段配力鉄筋, シートのひずみ
CF3	5	×	×	0	×	無		
	6	0	×	0	×	無	_	
	7	0	×	0	×	無	_	_
	8	0	0	×	0	無	_	_

○:シート損傷箇所と一致する、△:シート損傷個所に近接する、×:シート損傷箇所と一致しない.

くなった.シート破断以降, CL+20mm では圧縮ひずみ が残留しているのみであり,輪荷重による変化はほとん ど見られなくなった.CL-75mm では輪荷重通過時に引張 ひずみが残っていた.一方,その近傍の CL-20mm にお ける下段配力鉄筋の上面と下面のひずみ波形では、シー ト破断に伴い、下面のひずみが顕著に増加するとともに、 上面と下面のひずみ差が大きくなり、ひび害い位置で鉄筋 の曲げひずみ(鉄筋上下のひずみ差の1/2)も増加していた.

4. シートの損傷が版の挙動に及ぼす影響

4.1 シートの損傷と床版の抜け落ち位置

図-2に示したとおり、床版の抜け落ちは、箇所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¹⁾.

図-6に、抜け落ち位置付近の切断面に見られたひび 割れを示す.シート補強された RC 床版の抜け落ちは、 既往の試験³⁾でも見られたとおり、RC 床版と同様にコ ンクリートの斜めひび割れを伴う押抜きせん断破壊が 生じ、その斜めひび割れの裾付近でシートの剥離が生じ ていた.



(DT データ)



図-4 CF3 のシート破断付近のシート及び下段配力鉄 筋のひずみ振幅(147kN 時, DT データ)



図-5 CF1, 196kN, 2.0 万~2.2 万回でのシート破断付 近のシート及び下段配力鉄筋のひずみ (DT データ)



図-6 抜け落ち位置付近の切断面のひび割れ図

4.2 床版のたわみ挙動

図-7に、供試体 CF3 について、補強前及び補強後に おける床版中央変位の変化を示す.補強後の繰返し数は、 荷重条件ごとの繰返し数で示した.図中、載荷時の測定 結果をピーク荷重時、除荷時の測定結果を残留、それら の差を活荷重分として、それぞれ示す.

補強前,147kN での走行載荷の開始時における活荷重 変位は1.2mm であり,全断面有効とした床版中央の計算 変位 1.1mm と同程度であった.シート断面を考慮して, かつ RC と同様にコンクリートの引張域を無視した場合 の補強後147kN 時の床版中央の計算変位が2.7mm であ るのに対して,走行開始時の実測活荷重変位は2.3mm と 小さかったが,10回以降は2.5mm から2.7mm に漸増し て計算変位に近づく傾向が見られた.補強後196kN時の 走行開始時活荷重変位は3.8mm であり,同様にコンク リートの引張域を無視した床版中央の計算変位 3.7mm と同程度の値であった.

補強前の変位は、既往の無補強の供試体⁵と概ね同様 に、載荷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 で走行載荷を 行った場合、補強前の走行終了時よりも活荷重変位は小 さく、同じ繰返し数 38.5 万回で比べても活荷重変位が補 強前に比べて小さくなっていた.また、16 万回でシート の部分補修を行ったことによって、床版中央の変位が一 旦減少していた.このことから、床版中央から 1350mm 離れた箇所4であっても、シート接着が版全体の挙動改 善に貢献していたことが分かる.

図-7(c)は、荷重を 196 kN に上げて走行載荷した時の 結果を示す.載荷初期の残留変位は 147kN 走行載荷によ るものである. 196kN 時は、ピーク荷重時変位、残留変 位ともに徐々に増加した.特に、16 万回で箇所 6,7 (CL+1325mm)のシート破断が生じた後、活荷重変位の 増分が大きくなった.

同様に,図-8,9に供試体CF1,CF2の結果をそれぞ れ示す.供試体CF1ではシート破断が生じた補強後 196kN時の2万回から,供試体CF2ではシートのたるみ



が見られた箇所でひび割れ幅が顕著に増加した補強後 147kN時の48万回から,床版中央変位の増分が急増する 傾向が見られた.CF3も含め,いずれの供試体においても, シート破断の後,変位が急激に増加する傾向が認められた.

4.3 床版下面のひび割れ

図-10 に、初期損傷の程度の順に、 各載荷段階での床版下面のひび割れ 幅を示す、また、補強前後の変化を見 るため、補強前終了時の残留分を除い た値と、補強直後の147kN,50回時の 値も示す. 初期損傷を与えた供試体は いずれも、補強前のひび割れ幅が 0.2mmを超える大きいひび割れが複数 箇所で認められた. 初期損傷の目標変 位が 10mm の場合,同 8mm の結果と 比べて,補強前終了時の走行直角方向 に開閉するひび割れの幅が大きい傾 向にあったが, 走行方向に開閉するひ び割れの幅に明確な差は見られな かった.補強直後はいずれの場合もひ び割れ幅が顕著に抑制されていた. た だし、初期損傷の程度が大きかった CF2 では、補強直後でも 0.2mm を超え る箇所が見られた.

補強後 147kN のひび割れ幅 (走行中 の最大値) は、シートの損傷がない限 り、ほとんどの箇所で補強前 147kN の 結果に比べて小さい傾向が見られた. 荷重を 196kN に増加させた後は、ひび 割れ幅が顕著に増加する箇所が見ら れた.

5. まとめ

- (1) 格子状にシート補強された RC 床 版の輪荷重走行試験において、シー トのたるみや破断が発生した¹⁾. そ れらの原因として、初期損傷の程度、養生載荷の開始 時期、シートの疲労、抜け落ちに伴う過大な変形が挙 げられ、原因の異なる複数の事例が見られた.
- (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¹⁾.
- (3) 1箇所のシートの破断であっても、シート補強された RC 床版の全体挙動や疲労耐久性に影響を及ぼすことが分かった.ただし、本試験の範囲では、1箇所のシートの損傷によって、版全体としてのシートの補強効果が直ちにすべて失われることはなかった.
- (4) シート破断が見られた箇所に部分補修を施した場合,近傍の鉄筋のひずみが顕著に改善され,版全体の 挙動の改善にも貢献する場合があることが分かった.

参考文献

 村越潤,田中良樹,吉田英二,新藤竹文,近藤富士夫: 格子状に炭素繊維シート接着補強された RC 床版の



左:走行方向,右:走行直角方向 各載荷段階でのDTデータによる最大ピーク値を示す.

輪荷重走行下における破壊性状,第70回土木学会年 次学術講演会概要集,I,pp.425-426,2015.9.

- 2) 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(II),共同研究報告書第230号,1999.10.
- 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.
- 小林朗,蔡華堅,下西勝,松井繁之:炭素繊維シート格子 接着工法により補強した RC 床版の疲労耐久性,コンク リート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp. 1513-1518, 2005.
- 5) 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.

(2016年7月18日受付)

図-10 パイ型変位計によるひび割れ幅