CFS補強RC床版の補強効果と耐疲労性

高野真希子(日大生産工・P.D.)・阿部 忠(日大生産工・教授)・ 木田哲量(日大生産工・教授)・斉藤 誠(日鉄コンポジット(株))

1. はじめに

高度経済成長期に建設された橋梁の多くが、建設 後約50年を迎え、重交通による繰り返し荷重等によ り劣化が進んでいる。とくに道路橋のRC床版は、支 間長に比して厚さの薄い部材で荷重変動が著しい大 型車両の輪荷重を直接支える構造であることから, 疲労劣化が著しい。疲労劣化は、塩害やアルカリ骨 材反応と並び道路橋のRC床版における3大損傷原因 の1つであり、損傷が進行すると床版が抜け落ちる など安全性が脅かされるため、早期に補修・補強対 策が必要となっている。このような道路橋RC床版の 補修・補強に炭素繊維シート(以下, CFSとする) 接着工法が採用されている^{1), 2)}。CFS接着補修・補強 法は、CFSが軽量で高引張強度を有することからひ び割れの進行を抑制し,床版の耐荷力を向上させ, 施工性の容易性や、工期短縮などの利点がある。そ こで本研究では、道路橋RC床版の疲労劣化、および 伸縮継手を通過する際に発生する荷重変動によって 発生するひび割れ損傷をCFS補強したRC床版の補強 効果および耐疲労性を実験により検証した。

2. 大型自動車の荷重変動および鋼道路橋RC床版の 損傷状況

(1) 大型自動車の荷重変動

建設省土木研究所は、大型自動車が伸縮継手の段 差部を走行する際に発生する荷重変動および衝撃力 に関する実験を行いFig.1のように報告している³。実 験車両は、総重量205kNのタンデム式ダンプトラッ クで,その荷重分担は中軸左動荷重が37.73kN,後軸 左動荷重は37.14kNであり、この軸重量に対して最大 で約2.8倍の変動荷重が生じている。タンデム式の場 合は中軸が最大荷重を示した時に,後軸は静荷重程 度、すなわち軸重量程度になる応答を示している。 したがって、荷重振幅は、中軸の最大荷重を上限荷 重,後軸の軸重量を下限荷重とすると、橋梁の両端 部支点付近の荷重振幅は基準荷重に対して±45~48% となる。また、支間中央付近では、中軸で±10%、後 軸で±20%程度生じており、振動数は中軸で13Hz, 後軸で18Hz程度となっている。次に、タンデム式ダ ンプトラックが段差部通過後の荷重分布および包絡

線をFig.2に示す⁴が,段差部から2.0 m, 8.0 mの位置 で最大荷重が生じており,段差量20mmの場合の動 的係数が1.0以下に減衰される位置は段差部から14m に及んでいる。このように実橋の伸縮継手を通過す る際には,近傍の床版に大きな変動荷重が作用し, その衝撃の影響が10m先にまで及ぶことになる。し たがって,RC床版の補強には,伸縮継手の段差によ って発生する荷重変動を想定した振動荷重による走 行実験を行い,RC床版の補強法を確立することが重 要である。

(2) 鋼道路橋RC床版の損傷状況

道路橋RC床版のひびわれ損傷は、支点部の伸縮継 手付近が著しい。その損傷は、大型車両の輪荷重が 伸縮継手の段差部通過後に大きな荷重変動が生じ、 これが衝撃力となり橋梁の支点付近の床版に作用し、 橋軸直角方向に曲げひび割れが生じるためである。 さらに荷重の繰り返しにより、最終的には陥没に至 るものである。ここで、実橋のひび割れ損傷状況の 一例をFig.3示す。Fig.3(1)、(2)はそれぞれ走行レーン







Fig.2 Distribution and envelope of loads when a tandem-type dump truck passed over expansion joints of differing levels.⁴⁾





(1)Vicinity of entrance (2)Vicinity of exit Fig.3 Conditions of cracks in the RC slabs of actual bridges.

の入口および出口付近のひび割れ損傷であり、伸縮 継手部を通過する時の荷重変動が最も大きい位置で ある。このようなRC床版のひび割れ補修・補強法に は、RC床版底面へのCFS接着補強法が耐荷力の向上 および耐疲労性の向上の面から、最も有効な補強法 であると考えられる。

3. 使用材料・寸法および補強方法

(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,最大寸法20mmの粗骨材を使用した。鉄筋 はSD295A, D10を使用した。コンクリートおよび鉄 筋の材料特性値をTable1に示す。次に、CFSは目付 量202g/m²,厚さ0.111mmの高強度連続カーボンシー トとし、その材料特性値をTable2に示す。

(2) 供試体寸法および鉄筋の配置

供試体寸法および鉄筋の配置をFig.2に示す。供試 体寸法は道路橋示方書(以下,道示とする)Ⅱ5の規 定により設計し、1/2モデルとした。支持状状態は4 辺単純支持とした。供試体の寸法は、支間長を120cm、 張り出し部は13.5cmとした全長147cmである。鉄筋 の配置は複鉄筋配置とし、引張側の軸直角方向およ び軸方向にD10をともに10cm間隔で配置し、有効高 さをそれぞれ10.5cm, 9.5cmとする。また, 圧縮側に は引張鉄筋量の1/2を配置した。

4. 応力履歴実験および結果

(1) 応力履歴の実験方法

応力履歴の実験は、ひび割れ損傷を与えるための ①走行一定荷重, ②走行振動荷重で, それぞれ4万回 走行とする。

1) 走行一定荷重実験

走行一定荷重実験は、大きさが一定な荷重が供試 体の上面を走行する実験である。本実験装置の輪荷 重幅は、道示に規定する輪荷重幅50cmの1/2であるこ とから、基準荷重は、設計活荷重100kNの1/2に安全

率20%を考慮した60kNとする。また,走行範囲はFig.2 に併記してあるとおり、支間中央より±45cm、すな わち1走行90cmとする。この走行範囲は、輪荷重が 45°で床版の底面方向に分布するものと仮定すると、 輪荷重は床版支間内に分布するものである。走行速 度は1往復1.8mを9.0secで走行する平均速度0.18m/s である。走行一定荷重による疲労実験の供試体記号 をFとする。

2) 走行振動荷重実験

走行振動荷重実験は、大型車両の荷重変動および バネ下振動を想定した振動を伴う荷重が供試体の上 面を連続走行するものである。これは、従来から行 われている定位置の正弦波形による片振荷重と走行 荷重とを組み合わせたものである。走行範囲は走行 一定荷重実験と同様である。振動荷重は、Fig.1に示 した大型車両の伸縮継手通過後の荷重変動をモデル とする。次に作用振動数は、タンデム式ダンプトラ ックが段差量20mmを通過した場合のバネ下振動数 は13Hz~18Hzである。タンデム式の場合は中軸,後 軸が交互に作用するものとして、橋梁の支間長を走

Table 1 Characteristic values of concrete and rebars.

Specimen (RC slab)	Compressive	Steel (SD295A, D10)					
	strength of concrete	Yield strength	Tensile strength	Young's modulus			
	(N/mm ²)	(N/mm^2)	(N/mm^2)	(N/mm^2)			
RC-F-1	35.0	368	516	200			
RC-F-2	32.0	368	516	200			
CFS-RC	35.0	371	506	200			
CFS-RCD	32.0	371	506	200			
CFS-V20	35.0	370	511	200			
CFS-V30	35.0	370	511	200			

Table 2 Mechanical properties of CFS.

	Amount of	Design	Tensile	Young's				
Seat name	carbon wire	thickness	strength	modulus				
	(g/m^2)	(mm)	(N/mm^2)	(kN/mm^2)				
CFS	202	0.111	4420	235				



Fig.4 Dimensions of the test specimens and the arrangement of the rebars (unit in mm).

行速度と振動数で除して、1m当たりの波長を求めた⁶。実験振動数は、この1m当たりの波長を用いて1 往復2.4mを13secで走行する1.8Hzの正弦波形とした。 なお、疲労実験の振動数は、高速走行となることか ら、走行速度に合わせて振動数を調整する。走行振 動荷重は、走行一定荷重による疲労実験の基準荷重 60kNに対して、荷重振幅±20%の場合は上限荷重 78kN、下限荷重42kN、荷重振幅±30%の場合は上限 荷重は72kN、下限荷重48kNである。応力履歴した供 試体記号は、荷重振幅±20%、±30%をそれぞれF-V20、 F-V30とする。

(2) 応力履歴実験によるひび割れ状況

応力履歴を与える走行一定荷重および走行振動荷 重による疲労実験における4万回走行時のひび割れ状 況をFig.5に示す。走行一定荷重による応力履歴時の ひび割れ状況はFig.5(1)に示すように、供試体の軸直 角方向および軸方向に配置した鉄筋位置に格子状に ひび割れが発生に発生しているが、RC床版上面のひ び割れは目視では確認されない。次に、走行振動荷 重±20%のひび割れ状況はFig.5(2)に示すように、輪 荷重の走行範囲に集中し、軸直角方向および軸方向 に配置した鉄筋の位置で発生している。また、輪荷 重の走行端部から床版の隅角方向にもひび割れが発 生している。走行振動荷重±30%の場合もFig.5(3)に 示すように,軸方向および軸直角方向に発生してい る。走行一定荷重と走行振動荷重による疲労実験の ひび割れと比較すると、供試体F-V20は走行一定荷 重の1.2倍の72kN,供試体F-V30は1.3倍の78kNの荷 重で走行したことから、荷重振幅の大きさに比例し



Fig.5 Cracks in the test specimen subjected to a period of stress.





(1)Cutting

②Surface preparation

2

て広範囲に渡りひび割れが発生している。

5. CFS補強RC床版による疲労実験

(1) CFS補強方法

CFS補強は、道路橋RC床版の補修・補強法^かに従って、応力履歴後のRC床版供試体底面の支間内に CFSを接着する。CFS接着方法はFig.6に示すように 次の手順で行う。

①ひび割れ損傷供試体底面をサンダーで研磨する。②下地処理として、表面を平滑に仕上げる。

③エポキシプライマー(引張強度:30N/mm²以上,曲 げ強度:40N/mm²以上)を塗布含浸させ,24時間養生 する。

④エポキシ系含浸樹脂接着剤(付着強度:
1.9N/mm²)で1層目(軸方向)のCFSを接着し,24時間養生する。

⑤2層目(軸直角方向)のCFSを接着する。

なお、CFS補強RC床版の耐疲労性を評価するために、未損傷のRC床版供試体もCFSにより補強を施した。

(2) 走行一定荷重による疲労実験

応力履歴の実験方法と同じである。荷重は階段状 漸増載荷としたことから,基本荷重60kNから100kN までは2万回走行ごとに20kNずつ荷重を増加,100kN 以降は10kNずつ増加し,供試体が破壊するまで荷重 増加と走行を繰り返し行う。ここで,走行一定荷重 実験によるRC床版供試体記号をRC-F-1,2,未損傷RC 床版にCFS補強した供試体をCFS-RC,応力履歴後CFS 補強補強した供試体をCFS-RCDとする。

(3) 走行振動荷重による疲労実験

応力履歴の実験方法と同じである。荷重は走行一 定荷重による疲労実験と同様に階段状漸増載荷とし た。ここで、CFS補強後荷重振幅±20%、±30%の走 行振動荷重による疲労実験の供試体記号をそれぞれ CFS-V20、CFS-V30とする。

(4) 走行疲労実験における等価繰返し走行回数

走行疲労実験は、2万回走行ごとに荷重を増加する 段階状漸増載荷としたことから、等価走行回数を算



⑤CFS bonding (2nd layer)

Fig.6 CFS bonding method.

③Primer

3

Specimen		Stress running		Load (kN)				Total number	Average number	Number of	
		load	cycles	60	80	100	110	120	cycles	cycles (cycle)	cycles ratio
DC E 1	Number of cycles	—	_	20,000	20,000	7,010					
КС-Г-1	Number of equivalent cycles	-	_	20,000	772,664	4,604,655			5,397,319	6,180,292	_
RC-F-2	Number of cycles		_	20,000	20,000	9,392					
	Number of equivalent cycles	_	_	20,000	772,278	6,190,987			6,963,265		
CFS-RC	Number of cycles		_	20,000	20,000	20,000	20,000	15832		163,350,704	26.4
	Number of equivalent cycles		_	20,000	772,239	13,137,391	44,075,395	105345679	163,350,704		
CFS-RCD	Number of cycles	60kN	40,000	20,000	20,000	20000	20,000	8114		111,995,351	18.1
	Number of equivalent cycles		40,000	20,000	772,239	13,137,391	44,075,395	53,990,326	111,995,351		
CFS-V20	Number of cycles	60kN	40,000	20,000	20,000	20,000	15,333			47,720,032	7.7
	Number of equivalent cycles	$\pm 20\%$	40,000	20,000	772,239	13,137,391	33,790,402				
CFS-V30	Number of cycles	60kN	40,000	20,000	20,000	5,800				4,602,083	0.7
	Number of equivalent cycles	$\pm 30\%$	40,000	20,000	772,239	3,809,843					

Table 3 Number of cycles and number of equivalent cycles.



Fig.7 Cracking damage in the RC slabs and the separation of the CFS from the RC slabs.

出して耐疲労性を評価する。等価走行回数は、マイ ナー則に従うと仮定すると式(1)として与えられる。 本研究は、走行一定荷重および走行振動荷重が作用 した場合のCFS補強RC床版の耐疲労性を評価するこ とから、RC床版のS-N曲線を基準とする。したがっ て、S-N曲線の傾きの逆数mには、RC床版およびCFS 補強RC床版ともに松井らが提案するS-N曲線の傾き の逆数12.7[®]を適用する。なお、等価走行回数の算出 においては、RC床版供試体および走行一定荷重・走 行振動荷重による疲労実験の基準荷重を60kNとす る。これは、走行振動荷重による伸縮継手の段差量 による荷重変動の軸重量の1.2倍と1.3倍を許容範囲と する。

$$N_{ep} = \sum_{i=1}^{n} (P_i/P)^m \times n_i \tag{1}$$

ここで、N_{ep}:等価走行回数(回)、P_i:載荷荷重
(kN)、P:基準荷重(=72kN)、n_i:実験走行回数
(回)、m:S-N曲線の傾きの逆数(=12.7)

6. 結果および考察

(1) 実験走行回数および等価走行回数

本実験における走行回数および式(1)より算出した

等価走行回数をTable3に示す。RC床版供試体 RC-FR-1,2の平均等価走行回数は6.19×10⁶回である。 このRC床版供試体の平均等価走行回数を基準にCFS 補強効果および耐疲労性を評価する。未損傷RC床版 底面にCFS補強した供試体CFS-RCの等価走行回数は 16.3×10⁷回となり、RC床版供試体の26.4倍となった。 また、応力履歴後CFS補強した供試体CFS-RCDは 11.2×10⁷回となり, RC床版供試体の18.1倍となった。 未損傷RC床版底面にCFS補強した供試体CFS-RCと 応力履歴後CFS補強した供試体CFS-RCDの等価走行 回数比は0.70となり、応力履歴した供試体では等価 走行回数が30%低下している。したがって、損傷度 の程度によって耐疲労性が大幅に減少することから, 補修時期の決定が重要となる。次に、大型車両が伸 縮継ぎ手の段差によって発生する荷重変動の影響を 考慮した供試体CFS-V20の等価走行回数は47.7×10⁶ 回,供試体CFS-V30は4.6×10⁶回となった。さらに, 計画交通量を大型車両1日1方向2,000台以上を想定 して耐用年数を換算すると走行振動荷重±20の供試 体CFS-V20は65年, 走行振動荷重±30の供試体 CFS-V30では6.5年となり、軸重量の荷重振幅が大き くなることにより耐用年数が大幅に減少した。

以上の結果から, CFS補強RC床版の耐疲労性を向

上させるためには伸縮継手の段差量も考慮する必要 がある。

(2) 破壊状況

RC床版供試体のひび割れ損傷およびCFS補強RC床 版供試体の剥離状況をFig.7に示す。なお、CFSの剥 離状況は打音法による3段階で示した。RC床版供試 体RC-Fのひび割れ状況は、Fig.7(1)に示すように軸直 角方向に配置した圧縮鉄筋および軸方向の配力筋位 置とほぼ同位置でひび割れが発生している。破壊は、 支点Bから40cmの位置で押抜きせん断破壊となった。 次に、供試体CFS-RCの底面は、Fig.7(2)に示すよう に軸直角方向の主鉄筋および輪荷重載荷位置から45° の底面はダウエル効果の影響によりはく離が見られ るが、ダウエル効果が及ぼす範囲以外はCFSの剥離 がほとんど見られない。破壊は走行中に支間中央で 押抜きせん断破壊となり,同時にCFSが剥離した。 応力履歴後CFS補強した供試体の破壊状況は, Fig.7(3) ~(5)に示すとおり、走行一定荷重および走行振動荷 重による疲労実験ともに、未損傷RC床版供試体と同 様に輪荷重走行位置から45°の底面にRC床版のダウ エル効果によるはく離が及ぼす範囲におけるCFSの はく離が著しい。とくに,走行振動荷重供試体 CFS-V20, 30は, 走行一定荷重における基準荷重の1.2 ~1.3倍の荷重が作用したことから、等価走行回数が 少ないにもかかわらずはく離は広範囲に渡っている。 なお、輪荷重が走行中に押抜きせん断破壊になると 同時にCFSははく離した。

(3) たわみと等価走行回数の関係

たわみと等価走行回数の関係をFig.8に示す。RC床 版供試体RC-F-1,2は、ほぼ同様な傾向を示し、等価 走行回数4.0×10⁶付近からたわみが急速に増大し, 100kN載荷走行中に破壊に至った。未損傷RC床版底 面にCFS補強した供試体CFS-RCは、初期荷重60kN載 荷した場合のたわみは0.48mmであり、2万回走行時 では0.66mm, その後, 荷重を80kN, 100kNに増加し た時のたわみはわずかに上昇するものの0.82mm程度 で急激な増加は見られない。荷重120kN付近からた わみの増加が大きくなり、たわみが3mm超えた付近 から著しく増加して破壊に至った。応力履歴後CFS 補強した供試体CFS-RCDは、4万回走行による応力 履歴時のたわみが1.57mm,荷重除荷時の残留たわみ は0.58mmである。この残留たわみを初期値とした CFS補強後のたわみと等価走行回数の関係では、荷 重60kNで2万回走行した場合のたわみは1.06mm,荷 重80kNでは1,92mm, 100kNでは2.88mmである。等 価走行回数58.0×10⁶付近でのたわみは3mm程度であ り、その後の走行回数増によってたわみが急激に増



Fig.8 Relationship between deflection and number of equivalent cycles.

加し,終局時のたわみは等価走行回数112.0×10⁶付近 で5.1mmとなった。走行振動荷重±20%を与えた供 試体CFS-V20の4万回走行時のたわみは2.35mm,残 留たわみが0.9mmである。CFS補強後は3600万回走 行付近までは荷重増加に比例してたわみが増加する 破壊となった。また,走行振動荷重±30%を与えた 供試体CFS-V30は,応力履歴が著しく影響を及ぼし, その後の走行回数から急激にたわみが増加し,時の 最大たわみは3.16mm,残留たわみは1.0mmである。 CFS補強後は無補強RC床版と同様な傾向を示し,417 万回走行後たわみが急激に増加し,破壊となった。

以上より,たわみが3.0mmを超えると急激にたわ みが増加することから,残留たわみ1mmを除いた 2mm程度で再補修が必要であると考える。またCFS 補強後は,伸縮継手,路面の凹凸などの橋面につい ても補修が必要である。

(4) ひずみと等価走行回数の関係

床版中央における軸直角方向の鉄筋ひずみと等価 走行回数およびCFSのひずみと等価走行回数の関係 をFig.9に示す。RC床版供試体RC-F-1の場合,荷重 80kNで2万回走行(等価走行回数772.664回)後の鉄 筋ひずみは1600×10°であり、降伏に至っていない。 その後、等価走行回数4,604,655回で破壊に至り、鉄 筋ひずみは2400×10⁶となり降伏している。RC床版供 試体RC-F-2も同様な挙動を示し,等価走行回数 790,000回以降からひずみが1645×10°と急速に増加 し,終局時のひずみは2060×10⁶となり,降伏してい る。次に、未損傷RC床版底面にCFS補強した供試体 CFS-RCは、荷重の増加とともにわずかづつ増加し、 終局時は等価走行回数163,350,704回でひずみは 1107×10°であり、CFSは終局時でも剥離せず、ひず みは2310×10°である。応力履歴後CFS補強した供試 体CFS-RCDは, 等価走行回数13,970,000回付近まで は供試体CFS-RCとほぼ同様であるが、その後等価走 行回数58,051,679回付近から増加しており、終局時は 111,995,351回で1400×10°であり、鉄筋は降伏してい ない。CFSのひずみは荷重増加に応じて徐々に増加 しているが、剥離には及ばず終局時で2470×10°であ る。走行振動荷重±20%を与えた供試体CFS-V20の CFSひずみは、等価走行回数832,239回で830×10⁶であ り,終局時では1547×10⁶である。CFSのひずみは, 荷重増加に応じて徐々に増加しているが、剥離には 及ばず終局時で2310×10°である。また、走行振動荷 重±30%を与えた供試体CFS-V30では、等価走行回 数91,150回でひずみ1179×10°であり、RC床版供試体 を上回っている。なお、終局ひずみは1849×10°とな り、降伏点をやや超えている。CFSのひずみは、CFS 補強した他3体より急速に増加し,終局時で2397×10° である。軸方向のひずみも軸直角方向とほぼ同様な 傾向を示している。すなわち、CFS補強によって等 価走行回数増加に対応したひずみの増加が抑制でき ており、CFSの補強効果が確認できる。また、供試 体CFS-V30以外では、終局時でも鉄筋は降伏してい ないことからCFS補強後は荷重振幅を±20以下に抑制 するように路面の性状も併せて整備する必要がある と考える。

7. まとめ

①走行振動荷重による疲労実験では、CFS補強RC床版はRC床版に比して、走行振動荷重±20%の耐用年数は65年、走行振動荷重±30%の場合は6.5年となり、軸重量の荷重振幅が大きくなることにより耐用年数が大幅に減少した。したがって、CFS補強による耐疲労性を検討する場合は、伸縮継手の段差および路面の維持管理も合わせて補修する必要がある。

②CFS補強RC床版の破壊時には、押抜きせん断破壊 によるダウエル効果が及ぼす範囲でCFSははく離し ているものの、他の位置でははく離や破断は見られ ない。

③CFS補強後のたわみと等価走行回数の関係より, 走行振動荷重±20,±30%の場合ともにたわみが3.5mm を超えると急激にたわみは増加する。したがって, 残留たわみを除いたたわみが2.0mmとなった時点で2 次補修が必要と考えられる。

参考文献

- 小林朗,蔡華堅,松井繁之:コンクリート工学 年次論文集27巻2号: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, pp.1513-1518,2005
- 2) Tadashi Abe, Tetsukazu Kida, Toshiaki Sawano,



Number of equivalent cycles (N_{ep})

(1)Steel (Perpendicular to axis direction)





Atsuya Komori and Syuniti Hida: Reinforcement Effect and Mechanical Characteristics of CFS Reinforced RC Slabs with Different Number of Layers, THEORETICAL AND APPLIED MECHANICS JAPAN, Vol. 57, pp.105-112, 2009.2

- 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(II-1987),土木研究所資料第 2508号,1987
- 4)建設省土木研究所構造研究室:橋梁の設計動荷重に 関する試験調査報告書(Ⅶ−1985),土木研究所資 料第2258号,1985
- 5) 日本道路橋会:道路橋示方書・同解説Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ, 2004.
- 6)阿部忠,木田哲量,澤野利章,徐銘謙:走行振動 疲労荷重受けるRC床版の動的影響および残存耐 力,構造工学論文集Vol/52A,2006.
- 7) 土木研究所: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),コンクリート部材の補修・補強に関する 共同研究報告(Ⅲ),1999.
- 8)松井繁之:橋梁の寿命予測,安全工学,vol.30,No.6, pp.432-440,1991.