## 連続繊維シート接着工法の道路橋RC床版の 疲労耐久性向上効果に関する検討

## 小林 朗1・松井 繁之2

<sup>1</sup>正会員 新日鉄住金マテリアルズ株式会社 コンポジットカンパニー 社会資本材料事業部技術部 (〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町3-8) E-mail:a-kobayashi@nck.nsmat.co.jp

<sup>2</sup>フェロー会員 大阪大学名誉教授 (〒614-8289 京都府八幡市美濃山一ノ谷4 大阪工業大学内) E-mail: shigeyuki.matsui@oit.ac.jp

連続繊維シートを床版下面に接着することにより,RC床版の疲労耐久性が向上することが知られている.一方,連続繊維シートのヤング係数,厚さおよび積層数などの物理的な性質がRC床版の疲労寿命の延命効果に及ぼす影響については十分には明らかにされていなかった.そこで既往の連続繊維シート補強床版の輪荷重走行試験結果を収集し,FRPシートの延命効果について検討した.その結果,連続繊維シート接着による1)押抜きせん断耐力の向上効果,2)床版の異方性度の改善による最大せん断力低減効果,3)ひび割れの拘束効果の3つの効果を考慮することにより,その延命効果が予測できることが分かった.

Key Words : FRP sheet, RC slab, fatigue, wheel running test, prediction of fatigue life

## 1. はじめに

道路橋のRC床版(以下「RC床版」と記す)は、車両 の通行による繰返し荷重を直接受ける部材であり、輪荷 重走行に対する疲労耐久性が要求される.一方、近年の 車両の大型化や重交通の影響、あるいは古い設計基準で 設計製作されたRC床版では床版厚や鉄筋量が不足して いるものも多く、ひび割れ損傷が発生しやすく最終的に は陥没に至る損傷が報告されている.RC床版の疲労損 傷は,輪荷重の繰返し走行により一方向ひび割れから二 方向ひび割れの発生,細網化,ひび割れの貫通,版の梁状化 へと段階的に移行し、最終的には押抜きせん断破壊によ る抜け落ちに至る.筆者らの一人は、このRC床版の疲 労劣化過程を再現できる輪荷重走行試験機を開発し、 RC床版のSN関係式を提案している<sup>1)</sup>.

これまで、疲労耐久性が不足すると考えられるRC床 版に対しては、鋼板接着工法、縦桁増設工法、上面増厚 工法や下面増厚工法など種々の対策が行われてきた.近 年では、施工性がよく橋面上の通行止めを必要としない 連続繊維シート(以下,FRPシート)接着工法をRC床版 の補強に使用する例が増加している.RC床版の補強で は、炭素繊維シート接着工法の施工事例が多いが、跨線 橋などではアラミド繊維シートが用いられる事例もある. FRPシート接着工法は、FRPシートを床版の引張応力作 用面にエポキシ樹脂などの接着剤を含浸させながら接着 し、床版コンクリートと一体化する工法である.この工 法では、FRPシートが引張材として機能し、たわみや鉄 筋の応力度を低減し、曲げひび割れの開口挙動を拘束し、 床版の疲労耐久性を向上させる効果がある.FRPシート 接着工法によるRC床版の疲労耐久性向上については、 FRPシートを下面に接着補強したRC床版の輪荷重走行試 験により、疲労寿命が無補強床版に比べて大幅に伸びる ことが確認されている<sup>20-14</sup>.

FRPシート接着工法によるRC床版の補強設計は,道路 橋示方書(以下,道示)に準拠して設計曲げモーメント を負荷したときの既設鉄筋およびコンクリートの発生応 力度が許容応力度以下となるようにFRPシートの種類 (ヤング係数および繊維目付量)および積層数を決定す る方法や,補強対象床版を模擬した試験床版にFRPシー トを接着補強して輪荷重走行試験を行い床版の疲労耐久 性を確認してFRPシートの補強仕様を決定する手法など が取られているが,統一的な設計手法が確立されていな いのが現状である.

本論文では、実験例の多い炭素繊維シートに加えてア ラミド繊維シートで補強したRC床版の輪荷重走行試験 結果をもとに、FRPシートによるRC床版の疲労耐久性向 上効果について、FRPシートによる補強メカニズムと補 強床版の寿命予測について検討する.

## 2. FRPシート補強によるRC床版の疲労耐久性向 上メカニズムのモデル化

## (1) RC床版のS-N関係式

松井らの輪荷重走行試験機を用いた研究<sup>1</sup>によれば, RC床版の疲労寿命は,梁状化した床版の押抜きせん断耐力(以下,押抜きせん断耐力と略す)*P*<sub>sx</sub>を用いて式 (1a)~(1c)で表される.

$$log\left(\frac{P}{P_{sx}}\right) = -0.07835 log N + C$$
(1a)

$$P_{sx} = 2B(\tau_{s\,max} \cdot X_m + \sigma_{t\,max} \cdot C_m) \tag{1b}$$

$$B = b + 2d_d \tag{1c}$$

ここに、N:載荷回数、C:定数(乾燥時;C=1.52, 湿潤時;C=1.24)、P:載荷荷重、 $P_{sx}$ :はり状化し た床版の押抜きせん断耐力、B:輪荷重に対する床版の 有効幅、 $\tau_{smax}$ :コンクリートの最大せん断応力度 ( $\tau_{smax} = 0.252\sigma_{ck} - 0.00251\sigma_{ck}^2$ )、 $\sigma_{tmax}$ :コンクリー トの最大引張応力度( $\sigma_{tmax} = 0.269\sigma_{ck}^{2/3}$ )、 $\sigma_{ck}$ :コンク リートの圧縮強度、b:載荷板の配力筋方向の辺長、  $X_m$ :引張側コンクリートを無視した場合の主筋断面の 中立軸深さでコンクリートのヤング係数 $E_c$ を  $E_c = 900(\sigma_{ck} - 29.4) + 20580$ として計算する、 $d_d$ :配 力筋の有効高さ、 $C_m$ :主筋のかぶり厚さであり、単位 は、(mm)、(N)、(N/mm<sup>2</sup>)である. 式(la)~(lc)に示されるように、RC床版の疲労寿命は、

式(Ia)~(IC)に示されるように、RC床版の疲労寿前は、 コンクリート強度、床版厚、主鉄筋および配力鉄筋配置 と断面積などの床版の構造諸元、輪荷重の載荷幅の影響 を受ける.上述のS-N式は、大阪大学のクランク式輪荷 重走行試験機(図-1)を用いた疲労試験結果から得られた ものであるが、他機関の輪荷重走行試験機でも、P<sub>x</sub>を 用いて概ね同様のS-N関係式が得られているものの、S-N関係の勾配や定数Cは試験機により異なり統一されて いないのが現状である<sup>15</sup>.本論文では、大阪大学の輪荷 重走行試験機を用いて行われた、FRPシート補強床版の 輪荷重走行試験結果を用いて検討を進める.

輪荷重走行試験を行う場合,一定の荷重で走行させる と破壊までの試験期間が長くなることがあり,設定した 載荷回数ごとに荷重をステップ状に増加させる荷重漸増 載荷試験が行われることが多い.この場合,繰返し変動 荷重に対してマイナー則が適用できるものとして,式 (la)より各荷重ステップでの載荷回数を一定の評価荷重  $P_0$ に対して換算した式(2)で示す等価累積載荷回数 $N_{eq}$ を 算定して評価する.ここに, $n_i$ は,荷重 $P_i$ における載荷 回数である.



図-1 クランク式輪荷重走行試験機

$$N_{eq} = \sum_{i=I,j} \left( n_i \cdot \left( \frac{P_i}{P_0} \right)^{m = \frac{I}{0.07835}} \right)$$
(2)

## (2) FRPシートによるRC床版の疲労耐久性向上効果に 関する既往の研究

FRPシートを下面に接着したRC床版の輪荷重走行試験 では、荷重の繰返しに伴ってたわみが漸増し、最終的に は無補強のRC床版と同様に押抜きせん断破壊すること が確認されている.そこで補強後も式(la)のような、梁 状化した床版の押抜きせん断耐力を用いてS-N関係が示 されるとして種々の検討が行われている.FRPシートが 既設RC断面に完全合成されているとしてP<sub>sx</sub>を計算して 式 (la)のRC床版のS-N関係から算定した破壊回数Nよ り既往のFRPシート補強床版の輪荷重走行試験結果大き な破壊回数を示し、その補強効果はシートの剛性を考慮 して合成断面として算定したP<sub>sx</sub>の増加によるものより 大きくなる<sup>II)</sup>.

FRPシート補強床版の疲労耐久性に影響を及ぼす要因 としては、FRPシートの材料特性(ヤング係数,引張強 度,繊維目付量),FRPシートの積層数,FRPシートの 接着方法(全面貼,格子貼)など補強仕様にかかわるも のと,母床版の構造諸元(床版厚,鉄筋量および配置) およびコンクリート強度の他に補強前に予備載荷で導入 した初期損傷状態,使用した輪荷重走行試験機や荷重条 件などがある.

察らは、FRPシートの補強効果を式(1)のS-N関係式に 容易に取り入れる方法についての検討を行い、FRPシー ト補強により、コンクリートの見かけの引張強度が1.5 倍に増加するとみなす方法および配力鉄筋によるかぶり コンクリートの破壊に対する抵抗力がFRPシート補強に より増加するとの考えから、押抜きせん断耐力P<sub>sx</sub>の算 定時にせん断破壊する領域での配力鉄筋による剥離破壊 耐力分を加えた式を提案している<sup>16,17</sup>.この方法は、補 強後のRC床版の寿命を比較的精度よく予測できるが、 接着したFRPシートのヤング係数や厚さなどの物理的な 性質によらず、見かけのコンクリート強度を増加させた り、かぶりコンクリートの破壊領域を広く算定しており、 FRPシート接着による床版の延命効果のメカニズムを明 らにするためにはさらに検討が必要と考えられる.

## (3) FRPシートによるRC床版の疲労耐久性向上効果の メカニズムの検討

FRPシート補強したRC床版に対しても式(1)のように梁 状化したRC床版の押抜きせん断耐力を用いてS-N関係式 が示されるものとして,FRPシートの補強効果が以下の 3つのメカニズムによるものと考えた.

- a. 補強により押抜きせん断耐力P<sub>sx</sub>が増加すれば床 版の寿命は長くなる.
- b. 補強により主鉄筋方向断面に発生する最大せん断 力が低減すれば床版の寿命は長くなる.
- c. 補強によりひび割れ面の劣化が抑制され定数項C が増加すれば床版の寿命は長くなる.

以下にそれぞれの補強効果について概説する.

a) 圧縮有効断面増加によるP<sub>sx</sub>の増加

FRPシートを床版下面に接着することにより、中立軸 が床版下面側に移動する. 図-2に示すように主筋方向断 面の中立軸の深さ $X_m$ が大きくなると、中立軸上部のコ ンクリートのせん断耐力 $P_1$ が増加し、RC床版の押抜き せん断耐力 $P_{sr}$ が増加する.

## b) 異方性度の改善よる最大せん断力の低減

古い基準で設計されたRC床版は,配力筋方向の鉄筋 量が少なく,主筋方向に比べて配力筋方向の曲げ剛性が 小さい直交異方性板となっている.配力筋方向の曲げ剛 性が低下すると,荷重を分担する床版の主鉄筋方向断面 の有効幅が減少し,主鉄筋方向断面の発生せん断力が増 加する.実際に,昭和39年道示など古い規準で作成され, 配力鉄筋量が少ないRC床版に疲労損傷が発生しやすい. FRPシートを床版下面の配力筋方向に接着することで配 力筋方向の曲げ剛性が増加し床版の異方性度が改善され, 図-3に示すよう荷重の分布幅が拡大し,これに伴い同じ 荷重を載荷した時の断面の最大せん断力が低減する.こ の効果については3章で有限要素解析によりさらに検討 する.

#### c) FRPシートによるひび割れ面の劣化抑制効果

既往のRC床版の輪荷重走行試験機による疲労試験に おいて滞水環境下では、すりみがきやたたきによるひび 割れ面の劣化が促進され、乾燥時に比べ疲労耐久性が大 幅に低下する<sup>18</sup>.ただし湿潤時でもRC床版のS-N線の傾 きは変わらず、低寿命側に平行移動する.このため式 (1a)では湿潤時と乾燥時では定数Cが異なる値となる. FRPシートを床版下面に接着すると、床版コンクリート 下面のひび割れを跨いだFRPシートがひび割れを拘束し、 既往の研究によれば補強後は活荷重によるひひ割れ開閉 量が減少している<sup>2)</sup>. ひび割れの開閉を拘束することで、 すりみがきやたたきによるひび割れ面の劣化を抑制し、 湿潤時とは逆にRC床版の疲労耐久性を向上する効果が 得られ、これは式(1a)では定数項Cの値がシート補強に よって増加することで示されると考えられる.

#### (4) FRPシートの補強効果のS-N関係式での表記

前節で述べた、FRPシートの床版の疲労寿命に対する 3つの補強効果のS-N関係式での表記について検討する. FRPシート補強床版の破壊回数を $N_r$ 、中立軸の深化を考 慮した押抜きせん断耐力を $P_{sxr}$ 、異方性の改善による最 大せん断力の低減を考慮した修正荷重を $P_r$ 、ひび割れ面 の劣化抑制効果を考慮した定数項を $C_r$ として、補強床 版に対して式(3)が成り立つとする.

$$log\left(\frac{P_r}{P_{SXT}}\right) = -0.07835 log N_r + C_r \tag{3}$$







	床版	海田	床版	コンクリート			<del></del>											
供試体名	タイプ	週 円 一 七 士	厚	圧縮強度	繊維	接着	ヤング係数	厚さ	引張剛性	人								
		小刀音	(mm)	$(N/mm^2)$	種類	方法	$(N/mm^2)$	(mm)	(kN/mm)	附人								
t15N		520	150	33.6	無補強													
t15Cg80	+15		620	150	33.4	CFIM	格子1	430,000	0.255	78.3	6)							
t15Cg68	115	339	150	32.8	CFIM	格子1	434,000	0.217	67.3	]								
t15Ag50			150	28.4	AF	格子1	126,000	0.572	51.5	14)								
t16N			163	32.3	無補強					10)								
t16Cg30			163	34.8	CFIM	格子1	394,000	0.111	31.2	11)								
t16Cg45	t16	S39	163	35.7	CFIM	格子1	418,000	0.165	49.3	11)								
t16Ag24					160	47	AF	格子1	118,000	0.286	24.1	12)						
t16Ag36			160	43.4	AF	格子1	118,000	0.430	36.2	12)								
t18aN			180	30.3	無補強													
t18aCw38				180	30.3	CFHT	全面	230,000	0.167	38.4								
t18aCw66			180	30.3	CFIM	全面	460,000	0.143	65.8	] 4)								
t18aCw92						180	30.3	CFHM	全面	640,000	0.143	91.5						
t18aCw54	t18a	S43	180	31.4	CFHT	全面	245,000	0.222	54.4	8)								
t18aCw82a									180	29.3	CFHT	全面	245,000	0.333	81.6	0)		
t18aCw82b											180	30.7	CFHT	全面	245,000	0.333	81.6	(9)
t18aCw82c											180	35.8	CFHT	全面	245,000	0.333	81.6	16)
t18aCw82d			180	31.6	CFHT	全面	253,000	0.333	84.2	5)								
t18bCg68	+19h	\$42	180	36.3	CFIM	格子2	430,000	0.255	68.5	6								
t18bCg58	1180	545	180	36.2	CFIM	格子2	434,000	0.217	58.9	0)								

表-1 供試体一覧

注 S39:昭和 39 年鋼道路橋示方書, S43:昭和 43 年道路橋示方書

CFHT:高強度炭素繊維, CFIM:中弾性炭素繊維, CFHM:高弾性炭素繊維, AF:アラミド繊維

格子 1:シート幅 250mm-シート間隔 100mm, 格子 2:シート幅 250mm-シート間隔 150mm

一定荷重Pでの補強前のRC床版(以下,母床版)の 破壊回数 $N_0$ とFRPシート補強床版の破壊回数を $N_r$ の比 を式(4)に示すように寿命増加率 $\alpha_f$ と定義する.

$$\alpha_f = \frac{N_r}{N_0} \tag{4}$$

式(la)と式(4)よりは $\alpha_f$ は、式(5)に示すように寿命増加 率 $\alpha_f$ は、 $\alpha_n$ :中立軸の深化による $P_{sx}$ の増加による寿命 増加率、 $\alpha_q$ :異方性度の改善による寿命増加率および  $\alpha_c$ :ひび割れ面の劣化抑制効果による寿命増加の3つの 寿命増加率の積で示される.

$$\alpha_f = \frac{N_r}{N} = \alpha_n \alpha_q \alpha_c = \left(\frac{P_{SXT}}{P_{SX}}\right)^m \left(\frac{P}{P_r}\right)^m \left(\frac{C_r}{C}\right)^m \tag{5}$$

ここに、mは式(la)のS-N関係式の傾きの逆数であり、 m = 1/0.07835 = 12.76である.

## 3. FRPシート補強の床版の寿命増加率の定式化

## (1) FRPシート補強床版の輪荷重走行試験結果

既往のFRPシート補強床版の輪荷重走行試験結果を整理して、2章で述べたFRPシートの補強メカニズムに基づきFRPシート補強床版のS-N関係の定式化を試みる.

FRPシートで補強したRC床版の輪荷重走行試験は、 種々の研究機関で実施されているが、輪荷重走行試験機 によりRC床版のS-N関係式が異なるので、ここでは評価

表-2 供試体の鉄筋配置

床版	主	筋	配力筋			
タイプ	下側	上側	下側	上側		
t15	D16@150	D16@300	D13@300	D13@300		
t16	D16@100	D16@200	D13@250	D13@250		
t18a	D16@100	D16@200	D16@125	D13@250		
t18b	D16@150	D16@300	D13@140	D13@280		

\* 主鉄筋かぶりは上側下側とも 30mm



#### 図-4 RC床版供試体(t16)

事例の多い大阪大学の輪荷重走行試験機を用いた試験結果455,0889,10,11,12,14,16)で原則として破壊まで載荷を行ったデータを用いて検討することとする.供試体の一覧を表-1に示す.試験床版は,幅2000mm×長さ3000mm,床版厚は150mm,160mm,180mmの3種類で,橋軸方向の支持部にハンチを有するもので,鉄筋配置などの諸元を表-2

に示す.一例として床版厚160mmの供試体を図4に示す. 供試体は、ハンチ部をスパン1800mmで支持桁上に丸鋼 を介して単純支持し、スパン中央部の幅300mmの載荷板 上の2000mm範囲に鉄輪を往復させて載荷した.2体を除 いて補強前に予備載荷を行い床版下面に2方向ひび割れ を発生させた後に、床版下面に一方向性のFRPシートを 主筋方向および配力筋方向に各1層ずつエポキシ樹脂接 着剤で接着して補強している.FRPシートは炭素繊維シ ート(高強度、中弾性、高弾性)およびアラミド繊維シ ートで、ヤング係数や厚さが異なりまた、全面接着した ものと格子接着したものがあり、補強仕様を表-1に示す. ここでFRPシートの引張剛性は、FRPシートのヤング係 数と厚さの積であり、格子接着したものについてはFRP シートの幅と間隔から単位幅あたりの平均剛性を算出し ている.

表-3に示すようにFRPシートによる補強後,荷重を 100kNから210kN程度まで段階的に増加させる荷重漸増 載荷により床版が押抜きせん断破壊するまで載荷したが, 破壊前に載荷を終了したものも一部ある. なおすべて の供試体で,FRPシートの部分的な剥離の進行は見られ たものの,FRPシートの破断や全面的な剥離は生じてい ない.表-3に示す各供試体のS-N関係を図-5に示す.荷 重を段階的に増加させているため,破壊回数として式 (2)により,150 (kN)の一定載荷重に換算した換算走行 回数を示した.また各供試体のP<sub>sx</sub>は,補強前の母床版 の値を用いている.各供試体の破壊時の換算走行回数は,



式(1)のRC床版のS-N関係式より長寿命側にプロット され、FRPシート補強による疲労耐久性向上効果が確認 されている.次節から、このFRPシート補強床版の輪荷 重走行試験結果をもとに、前章で定義した3つの補強効 果 $a_n$ ,  $a_q$ ,  $a_c$ をそれぞれ算定する.なお、母床版の計 算破壊回数 $N_0$ は、それぞれの供試体のコンクリート強 度、床版厚および鉄筋配置から式(1)により算定し、 実験により得られた換算破壊回数を $N_0$ で除した値を、 各供試体の寿命増加率の実験値 $a_{exp}$ とした.

#### (2) 寿命増加率の算定

#### a) 中立軸の深化による寿命増加率α<sub>n</sub>

FRPシートと床版コンクリートが完全合成され平面保

				母床版	寿命
	母床版	載荷履歴	実験換算	計算	増加率
供試体名	Psx	荷重 P_(kN)•N_k 回+荷重 P_(kN)•N_k 回+•••••	破壊回数	破壞回数	実験値
	(kN)		(回)	(旦)	αexp
t15N	210.3	98kN100k 回+118kN310k 回	1.45E+04	1.56E+04	
t15Cg80	205.7	98kN100k回+118kN100k回+147kN142k回	1.16E+05	1.17E+04	9.9
t15Cg68	204.9	98kN100k回+118kN100k回+147kN236k回	1.89E+05	1.12E+04	16.9
t15Ag50	198.5	100kN100k回+120kN100k回+150kN71k回	7.74E+04	7.48E+03	10.3
t16N	260.9	147kN40k回+177kN62k回	5.29E+05	2.44E+05	
t16Cg30	259.8	100kN100k回+120kN100k回+150kN600k回+170kN196k回	1.57E+06	2.31E+05	6.8
t16Cg45	260.7	100kN100k 回+120kN100k 回+150kN600k 回+170kN290k 回*	2.04E+06 *	2.42E+05	8.4 *
t16Ag24	260.4	100kN100k回+120kN100k回+150kN600k回+176kN196k回	1.48E+06	2.38E+05	6.2
t16Ag36	260.2	100kN100k回+120kN100k回+150kN600k回+176kN200k回	1.59E+06	2.35E+05	6.8
t18aN	291.7	147kN50k 回+177kN230k 回	1.89E+06	1.01E+06	
t18aCw38	289.4	147kN50k 回+177kN954k 回	7.70E+06	9.15E+05	8.4
t18aCw66	289.4	147kN50k 回+177kN978k 回+206kN158k 回	1.69E+07	9.15E+05	18.5
t18aCw92	289.4	147kN50k回+177kN810k回+206kN140k回*	1.46E+07 *	9.15E+05	15.9 *
t18aCw54	291.9	147kN50k 回+177kN800k 回+206kN120k 回	1.33E+07	1.02E+06	13.0
t18aCw82a	289.0	150kN100k 回+180kN700k 回+210kN154k 回	1.85E+07	8.99E+05	20.6
t18aCw82b	292.5	150kN100k 回+180kN700k 回+210kN4k 回	7.56E+06	1.05E+06	7.2
t18aCw82c	302.1	150kN100k回+180kN700k回+210kN598k回	5.11E+07	1.59E+06	32.2
t18aCw82d	293.0	147kN50k回+177kN700k回+206kN200k回*	1.72E+07 *	1.07E+06	16.0 *
t18bCg68	270.7	147kN50k回+177kN700k回+206kN141k回	1.37E+07	3.91E+05	35.1
t18bCg58	270.5	147kN50k回+177kN640k回+206kN144k回	1.34E+07	3.88E+05	34.5

表-3 FRPシート補強床版の輪荷重走行試験結果

\* 未破壊打切り, 換算破壊回数および母床版計算破壊回数の評価荷重は 150kN

	母	中立軸	深化	異方性度改善					ひび割れ拘束			計算破	実験換算
	床版	補強後		異方性度		無次元せん断力			Im増		$\alpha_{\rm f} =$	壞回数	破壞回数
供試体名	Psx	Psxcf	αn	補強前	補強後	補強前	補強後	$\alpha_{q}$	加率	αc	0m0q0c	$\alpha_f N_0$	Nexp
	(kN)	(kN)		I <sub>d</sub> /I <sub>m</sub>	I <sub>dt</sub> /I <sub>mr</sub>	<b>Q*</b> <sub>0</sub>	Q*r		Im/Im0			(回)	(回)
t15Cg80	205.7	226.7	3.47	0.317	0.576	1.149	1.078	2.25	1.391	19.90	155.4	1.82E+06	1.16E+05
t15Cg68	204.9	223.2	2.98	0.317	0.549	1.149	1.085	2.09	1.332	13.50	83.8	9.38E+05	1.89E+05
t15Ag50	198.5	205.8	1.58	0.319	0.434	1.149	1.115	1.46	1.136	3.17	7.3	5.48E+04	7.74E+04
t16Cg30	259.8	267.5	1.46	0.269	0.371	1.164	1.133	1.42	1.104	2.45	5.1	1.17E+06	1.57E+06
t16Cg45	260.7	272.8	1.78	0.269	0.421	1.164	1.119	1.67	1.167	4.06	12.1	2.92E+06	2.04E+06 *
t16Ag24	260.4	266.6	1.35	0.264	0.349	1.166	1.140	1.34	1.088	2.15	3.9	9.24E+05	1.48E+06
t16Ag36	260.2	268.9	1.52	0.266	0.380	1.165	1.130	1.48	1.123	2.87	6.5	1.52E+06	1.59E+06
t18aCw38	289.4	300.1	1.59	0.641	0.689	1.064	1.053	1.13	1.120	2.79	5.0	4.59E+06	7.70E+06
t18aCw66	289.4	307.7	2.19	0.641	0.717	1.064	1.048	1.21	1.206	5.47	14.5	1.33E+07	1.69E+07
t18aCw92	289.4	314.2	2.86	0.641	0.738	1.064	1.044	1.28	1.281	9.47	34.5	3.16E+07	1.46E+07 *
t18aCw54	291.9	307.0	1.90	0.641	0.706	1.063	1.050	1.18	1.168	4.10	9.2	9.40E+06	1.33E+07
t18aCw82a	289.0	310.4	2.49	0.639	0.666	1.064	1.058	1.07	1.240	7.06	18.8	1.69E+07	1.85E+07
t18aCw82b	292.5	314.1	2.49	0.640	0.667	1.064	1.058	1.07	1.241	7.11	18.9	1.99E+07	7.56E+06
t18aCw82c	302.1	324.2	2.46	0.644	0.732	1.063	1.045	1.24	1.252	7.66	23.5	3.73E+07	5.11E+07
t18aCw82d	293.0	315.2	2.54	0.641	0.730	1.063	1.045	1.25	1.249	7.52	23.8	2.55E+07	1.72E+07 *
t18bCg68	270.7	295.5	3.05	0.589	0.747	1.075	1.042	1.50	1.315	12.02	54.8	2.14E+07	1.37E+07
t18bCg58	270.5	292.0	2.65	0.590	0.730	1.075	1.045	1.44	1.270	8.74	33.3	1.29E+07	1.34E+07

表-4 FRPシート補強による寿命増加率および補強床版の破壊の算定

\* 未破壊打切り床版におけるたわみ増加らの推算値

持が成り立つものとして、コンクリートの引張強度を無 視して中立軸を求め、式(1b)、(1c)より補強後の床版の押 抜きせん断耐力 $P_{sxr}$ を算定した.この $P_{sxr}$ から式(5)に より中立軸の深化による寿命増加率 $\alpha_n$ を算定した結果 を表-4に示す、算定したは $\alpha_n$ は、1.5から3.5の範囲にあ り実験により得られた補強床版の寿命増加率の実験値  $\alpha_{exp}$ の6から35より小さな値となっており、FRPシート による延命効果は、FRPシートによる中立軸の移動を考 慮しただけでは不十分なことがわかる.

## b) 異方性度の改善による寿命増加率 $\alpha_q$

主鉄筋量に比べて配力鉄筋量が少ないため、RC床版 は、ひび割れ後は主鉄筋方向に比べて配力鉄筋方向の曲 げ剛性が小さい直交異方性板となる. 直交異方性板では、 異方性度によって作用する曲げモーメントおよびせん断 力の分布が異なる. そこで直交異方性を考慮した板要素 を用いた有限要素解析により、異方性度が曲げモーメン トおよびせん断力の分布、特に最大せん断力に及ぼす影 響について検討した. 解析は、輪荷重走行試験に用いた 橋軸方向3m、橋軸直角方向2m、支持スパン1.8mの床版 を用い、床版中央上面の載荷板(300mm×120mm)に等 分布荷重を負荷した. 解析は、対象性を考慮して図-6に 示すように1/4領域をモデル化して行った.

異方性は、直交異方性材料の材料特性として入力した. 主筋方向のヤング係数Ey=27000N/mm<sup>2</sup>、ポアソン比 0.1667とし、配力筋方向のヤング係数を $E_x = \gamma E_y$ とし、 配力筋方向と主筋方向の剛比 $\gamma$ を0.3から等方性の1.0ま で変化させて解析を行った.解析により得られた主筋方 向のせん断力分布を図-7に示す.主筋方向および配力筋 方向、それぞれの着目断面での最大曲げモーメントおよ び最大せん断力を,剛比ッで整理したものが図-8である. これより配力筋方向の剛性が低く剛比ッが低いほど, 配力筋方向の曲げモーメントおよびせん断力が低減し, 逆に主筋方向の最大曲げモーメントおよび最大せん断力

が増加することがわかる.

各剛比での主筋方向の最大せん断力を,配力筋方向と 主筋方向の剛性が等しいγ=1の時の最大せん断力で除 して正規化した無次元化最大せん断力Q\*と剛比γとの関 係を図-9に示す.床版寸法3×2m,支持スパン1.8m単純支 持,載荷板12×30cmの場合無次元化最大せん断力の近 似式を式(6)に示す.

 $Q^* = 0.139\gamma^2 - 0.397\gamma + 1.261$  (6) なお無次元化せん断力は、床版の寸法、荷重および支 持条件が同じであればヤング係数の絶対値よらず剛比 $\gamma$ によって決まることを別途解析を行い確認した.

**RC**床版の疲労寿命は、梁状化した主筋方向断面の最 大せん断力に支配されるので、床版の異方性度の改善に よる寿命増加り $\alpha_q$ は、補強前後の最大せん断力の比を 用いて式 (5) 式により式 (7) で示される.

$$\alpha_q = \left(\frac{Q_0^*}{Q_r^*}\right)^{12.76} \tag{7}$$

式(6), (7)から $\alpha_q$ を算定した結果を表-4に示す.ここ で $\gamma$ は、主筋方向と配力筋方向との床版の曲げ剛性の比

で曲げ剛性をそれぞれ
$$I_m, I_d$$
として $Y = {I_d}/{I_m}$ とした.



母床版の配力鉄筋比の小さい場合およびFRPシートの引 張剛性が高い場合に $\alpha_q$ は、大きくなる傾向にある.

## c) ひび割れ面の劣化抑制による寿命増加率α<sub>c</sub>

残る一つ寿命増加率 $\alpha_c$ は、式(5)から各供試体の寿命 増加率の実験値 $\alpha_{exp}$ を $\alpha_n$ と $\alpha_q$ の算定値の積で除したを  $\alpha_c$ として検討する.

$$\alpha_c = \frac{\alpha_{exp}}{(\alpha_n \alpha_q)} \tag{8}$$

 $\alpha_{exp} \geq \alpha_n \alpha_q$ の計算値との関係を図-10に示す.図-10で は全ての点で $\alpha_{exp}$ が $\alpha_n \alpha_q$ を上回っているが、 $\alpha_n \alpha_q$ が5 以下の領域と5を超える領域で明らかに異なった挙動を 示している. $\alpha_n \alpha_q$ が5以下の領域では $\alpha_n \alpha_q$ が増加に伴 って $\alpha_{exp}$ も増大し、正の相関関係が認められるが、こ れに対して $\alpha_n \alpha_q$ が5を超える領域の2点では、逆に $\alpha_{exp}$ の低下傾向が認められる.この2点の供試体t15Cg68、 t15Cg80は、床版厚が薄く配力鉄筋が少なく異方性が強 い床版を引張剛性の高いFRPシートで補強したため、  $\alpha_n \alpha_q$ が大きくなっている.薄く異方性度の高い母床版 を引張剛性の高いFRPシートで補強した場合、FRPシー トの負担する引張力が高くなり、それに伴ってFRPシー トとコンクリート界面の付着せん断応力も高くなり付着



疲労破壊が早期に進行した可能性がある.この2供試体 については、実験時にFRPシートのひずみ測定により補 強後の載荷時にFRPシートに1000μを超えるようなひず みが発生し、載荷に伴い徐々にはく離が進行していたこ とが観察されている.同様に土木研究所で行われた実験 では、FRPシートの補強量が一定値より大きくなると、 補強量の増加に伴い疲労寿命が低下することが報告され ている<sup>3</sup>.ある一定値以上にFRPシートの補強量を増加 させるとFRPシートと床版コンクリート界面の付着応力 が過大となりはく離疲労が早期に進行しFRPシートによ る床版の延命効果が低下する可能性があること、その指標として $a_n a_q$ が利用できる可能性が示唆されたが、 FRPシートの補強量の大きな場合のはく離疲労の可能性についてはさらに検討が必要である.ここでは、他の供試体と異なった傾向を示したこの2点を除外して、以降の検討を進める.

一般に作用Sに対する疲労寿命Tは、式(9)で示される

$$\log(S) = -k \cdot \log(T) + \beta \tag{9}$$

補強前後の寿命比すなわち寿命増加率は、βが一定と仮 定すれば補強前後の寿命増加率として式(10)が得られる.

$$\log\left(\frac{T_r}{T_0}\right) = \frac{1}{k}\log\left(\frac{S_0}{S_r}\right) \tag{10}$$

ここに、添え字0は補強前、rは補強後を示す.ここでは、ひび割れ開閉による床版コンクリートの疲労損傷がひび割れ開閉幅に依存するものと仮定して式(10)の

 $S_0/_{S_r}$ として補強前後のひび割れ開閉幅に着目する.

コンクリートの曲げひび割れ幅の増減は、鉄筋の配置 やかぶりが同一でコンクリートの収縮やクリープ等によ るひび割れ幅の増加が無視できるとすれば鉄筋応力度の 増加量に比例する.鉄筋応力度は作用曲げモーメントが 同じであれば、断面2次モーメントの逆比に比例する. 式(1)では主筋方向の貫通ひび割れにより梁状化した 床版を想定しているので、主筋方向断面に着目し、FRP シートが完全合成されているものとして、引張側のコン クリートを無視して断面計算により補強前後の主筋方向 の床版の断面2次モーメントを算定した.式(8)より算定 したα<sub>c</sub>の実験値と補強前後の主筋方向の断面2次モーメ

ントの比 $^{I_{mr}}/_{I_{m0}}$ を両対数グラフ上にプロットしたもの が図-11である.なお、輪荷重走行試験で破壊前に載荷 を中止した供試体については除外している.図-11で $\alpha_c$ の実験値と $^{I_{mr}}/_{I_{m0}}$ は概ね線形関係にあることがわかる.

そこで $T_r/T_0 = \alpha_c$ として両者が式(10)の関係にあるものとして、線形回帰を行い式(11)を得た.

$$\log(\alpha_c) = 9.07 \log\left(\frac{I_{mr}}{I_{mo}}\right) \tag{11}$$

# (3) FRPシート補強床版の破壊回数の実験値と計算値の比較

評価荷重150kNにおける、母床版の計算破壊回数 $N_0$ に 上述の手法で算定した寿命増加率 $\alpha_f = \alpha_n \alpha_q \alpha_c$ を乗じて 算定した計算破壊回数を**表-4**に示し、実験で得られた換 算破壊回数との関係を図-12に示す。補強量が過大で剥 離破壊が先行したとして式(11)の回帰で除外した2点を除 いて、計算破壊回数と実験から得られた換算破壊回数は



図-12 換算破壊回数の実験値と計算値

概ね良好な一致をみせており、この2点を含めても相関 係数は0.91と高い相関性を示している.

また,式(11)では回帰から除外した破壊に至る前に 載荷を中止した3体の床版厚180mm供試体については, 他の破壊に至った供試体が荷重180kN載荷時に活荷重た わみが2.0mmを超えたのちたわみが急増して押抜きせん 断破壊に至ったことから,荷重180kNの載荷時のたわみ-載荷回数の関係を外挿して活荷重たわみが2.0mmを超え る載荷回数から推定破壊回数を算定した.参考のためこ の3体についても実験換算破壊回数の推定値と計算破壊 回数を図-12中に示しているが,推定値と計算値は概ね よい一致をみている.

## 4. FRPシート補強床版の寿命算定法の提案

## (1) FRPシート補強床版の疲労寿命の算定手順

3. で述べたようにFRPシートで補強した床版の疲労寿 命は、式(1)で算定した母床版の疲労寿命に寿命増加率  $\alpha_f = \alpha_n \alpha_q \alpha_c を乗じることで推定できることが分かった.$ ここでは、FRPシート補強床版の疲労寿命の算定法について、その手順を以下に示す.

## a) 床版の断面諸量の算定

母床版およびFRPシート補強床版の,主筋方向断面の 中立軸高さ,主筋方向および配力筋方向の断面2次モー メントを算定する.この時,コンクリートの引張強度は 無視し,FRPシートは床版下面に完全合成されているも として平面保持が成り立つものとする.またコンクリー

トのヤング係数は $E_c = 900(\sigma_{ck} - 29.4) + 20580$ とする.

FRPシートを間隔をあけて格子状に接着する場合には、 FRPシートの幅と間隔を考慮した平均厚さをFRPシートの厚さとする.

## b) *α<sub>n</sub>の*算定

a)で算定した補強前後の主筋方向断面の中立軸高さを 用いて母床版および補強後の床版の押抜きせん断耐力を 算定する.式(12)により*a*<sub>n</sub>を算定する.

$$\alpha_n = \left(\frac{P_{SXT}}{P_{SX}}\right)^{12.76} \tag{12}$$

## c) *α<sub>q</sub>*の算定

補強前後の主筋方向断面の最大せん断力を有限要素解 析などにより算定し式(13)によりα<sub>g</sub>を算定する.

$$\alpha_q = \left(\frac{Q_0}{Q_r}\right)^{12.76} \tag{13}$$

床版の支持スパン1.8m単純支持,載荷板120×300mmの 場合は,a)で算定した主筋方向および配力筋方向の断面 2次モーメントから補強前後の剛比 $\gamma$ を算定し式(6),(7)か ら $\alpha_a$ を算定することができる.

#### d) *α* <sub>c</sub>の算定

**a**)で算定した補強前後の主筋方向断面の断面2次モー メントから式(14)よりα<sub>c</sub>を算定する

$$\alpha_c = \left(\frac{I_{mr}}{I_{m0}}\right)^9 \tag{14}$$

#### e) FRPシート補強床版の疲労寿命の算定

評価荷重Pに対する母床版の疲労寿命を式(1)により計算し、上で求めた寿命増加率 $\alpha_f = \alpha_n \alpha_q \alpha_c$ を乗じてFRP シート補強床版の疲労寿命を算定する.ただし、 $\alpha_n \alpha_q$ が5を超える場合は本手法の適用外であり、FRPシート の補強量が過大で補強効果が算定値より低くなる可能性 があるので注意を要する.

## (2) FRPシート補強床版のS-N関係

(1)で述べた母床版の寿命と寿命増加率からFRPシート 補強床版の疲労寿命を算定する方法は、補強により母床 版がどの程度延命化されるかを推定する上で有用な手法 である.一方で、補強床版のS-N関係としては示されて いないので、構造諸元が異なる母床版やこれらの床版を 補強した場合の疲労耐久性を比較する上では、RC床版 のS-N関係式である式(1)の形で補強床版のS-N関係式が 示されていることは有用である.そこで、FRPシート補



強床版の見かけの押抜きせん断耐力が増加するもとのして、FRPシート補強床版のS-N関係について検討する. 母床版の押抜きせん断耐力P<sub>sx0</sub>,補強後の床版の見かけの押抜きせん断耐力をP'sxrとし、補強前および補強後の 床版のS-N関係はそれぞれ式(15),(16)で示されるとする.

$$log\left(\frac{P}{P_{SX0}}\right) = -0.07835log(N_0) + C \tag{15}$$

$$log\left(\frac{P}{P_{sxr}'}\right) = -0.07835log(\alpha_f N_0) + C$$
(16)

式(15)と式(16)より,式(17)が得られる.

$$log\left(\frac{P_{SXT}'}{P_{SX0}}\right) = 0.07835log(\alpha_f)$$
(17)

したがって、FRPシート補強床版の見かけの押抜きせん断耐力 $P'_{sxr}$ は、式(18)で示される.

$$P_{sxr}' = \alpha_f^{0.07835} P_{sx0} \tag{18}$$

図-13は、補強床版の押抜きせん断耐力を式(18)で算定 した場合の、S-N関係を示したものである。補強量が過 大で剥離破壊が先行したとして回帰で除外した2体を除 いて、補強床版の破壊時の換算走行回数は、式(1)のRC 床版のS-N関係式の近傍にプロットされ良い相関を見せ ている。したがって、前節の手法で寿命増加率α<sub>f</sub>を算 定し、式(18)によりFRPシート補強床版の見かけの押 抜きせん断耐力を評価することにより、FRPシート補強 床版のS-N関係は、式(1)のRC床版のS-N関係式を用いて 示せることが分かった。

## 5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す.

(1) FRPシートによるRC床版の補強効果として, a)中立 軸の深化による押抜きせん断耐力の増加, b)異方 性度の改善による最大せん断力の低減, c)FRPシー ト接着によるひび割れ面の劣化抑制の3つの効果を 示し,寿命増加率 $\alpha_f = \alpha_n \alpha_q \alpha_c$ を定義した.

- (2) 既往のFRPシート補強床版の輪荷重走行試験結果を もとに、寿命増加率 $\alpha_f = \alpha_n \alpha_q \alpha_c$ の定式化を行っ た.その結果、提案する手法で算定した寿命増加 率と母床版の疲労破壊回数を用いることで、FRPシ ート補強床版の疲労破壊回数を精度よく予測でき ることが分かった.
- (3) ただしFRPシートの補強量が過大となると、寿命増 加率が低減する可能性があること、特に床版厚が 薄く異方性の強い床版を引張剛性の高いFRPシート で補強した場合にその可能性が高くなる.
- (4) 寿命増加率 $\alpha_f = \alpha_n \alpha_q \alpha_c \varepsilon$ 用いたFRPシート補強床 版の疲労寿命の算定手順を示した.また寿命増加 率を考慮してFRPシート補強床版の見かけの押抜き せん断耐力を用いて算定することで、従来のRC床 版のS-N関係式を用いてFRPシート補強床版の疲労 寿命を推定できることを示した.

本検討では補強前の母床版に2方向ひび割れを発生さ せた後に補強を行ったRC床版の試験結果を用いて疲労 寿命の算定法の定式化を行ったが,算定式には母床版の 劣化度を考慮していない.補強前のRC床版の劣化度は, 補強後の床版の寿命に影響を及ぼすと考えられる.特に, 著しく劣化の進行し残存寿命の短い床版を補強した場合 には,ここで示した算定法よりも補強床版の疲労寿命が 短くなることが予測される.したがって,補強前のRC 床版の劣化度を考慮したFRPシート補強床版の寿命予測 手法の提案および適用限界の設定は,今後の課題である.

#### 参考文献

- 1) 松井繁之:橋梁の寿命予測,安全工学Vol.30 No.6, pp432-440, 1991
- 2) 森成道,松井繁之,若下藤紀,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), pp25-32, 1995
- 松尾伸二,西川和廣,内田賢一,宇治公隆,小林 朗:炭素繊維シートにより補強された RC 床版の疲労 耐久性,第53回土木学会年次学術講演会 CS27, pp.52-53,1998
- 4) 星島時太郎,坂井広道,大田黒博文,松井繁之:損 傷した道路橋床版の炭素繊維シートによる補強効果 に関する実験的研究,橋梁と基礎, Vol.32, No.9, pp.23-28, 1998
- 5) 岸本真輝,松井繁之:目付量の大きい CFS で補強し た床版の疲労耐久性の検討,土木学会平成 13 年度関

西支部年次学術講演会講演概要 I-23, 2001

- 6) 岡田昌澄,大西弘志,松井繁之,小林朗:格子配置 された炭素繊維シートによる床版補強効果,第三回 道路橋床版シンポジウム講演論文集(土木学会), pp.175-180,2003
- 7) 三上浩,田村富雄,角田敦,廣瀬清泰,堀川都志 雄:二方向アラミド繊維シート接着補強床版の疲労 耐久性評価の一手法,第三回道路床版シンポジウム 講演論文集(土木学会),pp169-174,2003
- 8) 前田俊也,小牧秀之,坪内賢太郎,上東泰:緩衝剤 を用いた炭素繊維シート接着工法による劣化床版の 補強効果,コンクリート構造物の補修補強アップグ レード論文集(日本材料学会), Vol3., PP329-334, 2003
- 9) 蔡華堅,松井繁之,三村知男:経編みタイプ炭素繊 維シートの RC 床版補強に対する適用効果に関する研 究,第 59 回土木学会年次学術講演会 CS8, pp.269-270, 2004
- 深山大介,林聖一郎,松井繁之,蔡華堅:縦桁が増 設された RC 床版への連続繊維シートによる再補強に 関する研究,第 59 回土木学会年次学術講演会 CS8, pp.271-272, 2004
- 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, NO2 pp1513-1518, 2005
- 12) H. K. Chai, N. Nakajima, H. Onishi, S. Matui: Application of AFS Strengthening of Deteriorated RC Bridge Slabs Sublected to Wheel Load, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, NO2 pp1531-1536, 2005
- 田村富雄,蔡華堅,雨宮民郎,松井繁之:低目付け アラミド繊維シートによる道路橋 RC 床版補強に関す る研究,第 60 回土木学会年次学術講演会 5-503, pp.1005-1006,2005
- 14) 小林健二郎,中島恒道,松井繁之:道路橋 RC 床版の AFRP シート補強による疲労耐久性の検討および施工, 第61回土木学会年次学術講演会 6-109, pp.37-38, 2006
- 15) 土木学会鋼構造委員会道路橋床版の合理化検討小委 員会:道路橋床版の要求性能と維持管理技術,土木 学会,2004
- 16) H.K.Chai: Improvement of RC slab fatigue durability by FRP sheet strengthening,大阪大学学位論文, 2005
- 17) 松井繁之:道路橋床版 設計施工と維持管理,森北 出版,2007
- 18) 松井繁之:床版損傷に対する水の振舞い,第43回土
  木学会年次学術講演会 I-3, pp.6-7,1988

## STUDY OF STRENGTHENING EFFECT WITH CARBON FIBER SHEETS FOR DURABILITY INCREASING OF RC HIGHWAY BRIDGE SLABS

## Akira KOBAYASHI and Shigeyuki MATSUI

FRP Sheets bonding method can improve fatigue durability of RC slabs. A prediction methord of fatigue durability for RC slabs with FRP sheets reinforcement was proposed in this paper. It was clarified that the pro-posed method can be predict the fatige life of RC slabth strengthened with FRP sheets.