

論文 積雪寒冷地における RC 床版の下面 FRP シート補強に関する研究

三田村 浩^{*1}・石川 博之^{*2}・赤代 恵司^{*3}・松井 繁之^{*4}

要旨：積雪寒冷地の RC 床版は、床版上面の凍害劣化によるスケーリングや砂利化により有効床版厚が減少し疲労耐久性が著しく低下する。床版上面の凍害劣化部の除去、断面修復、防水工により凍害損傷を抑制し、下面補強により延命化を図る補強方法が考えられている。そこで、凍害劣化を模擬して上面のはつり後、超硬コンクリートにより断面修復し、下面を FRP シートにより補強した RC 床版の輪荷重走行試験を行いその疲労耐久性を検討した。なお下面補強には施工性に優れたストランド型炭素繊維シートを使用した。その結果、床版支間中央載荷、偏心載荷いずれの場合でも無補強に比べ 10 倍以上の大幅な延命効果が確認された。

キーワード：RC 床版、凍害劣化、輪荷重走行試験、疲労耐久性、断面修復、FRP シート

1. はじめに

道路橋の RC 床版は、輪荷重の繰り返し走行によりひび割れ損傷を生じ、劣化が進むと押抜きせん断破壊に至り、床版上面から床版内部に水分が浸透すると劣化が著しく加速されることが明らかになっている。さらに近年、積雪寒冷地においては、写真-1 に示すように床版上面のコンクリートが凍害劣化によりスケーリングや砂利化を起し有効床版厚が減少し疲労耐久性が大きく低下することが判ってきた¹⁾。そのため、寒冷地特有の劣化損傷を受けた既設 RC 床版の延命手法を策定することが急務となっている。

延命手法として、凍害損傷を受けた部分のみを補修し、確実な防水工の施工により凍害の損傷を抑止することで、残存供用年数が確保できる場合は補強を行わない方向で研究中である²⁾。この方法では床版上面の凍害劣化のない断面性能に回復するものの、活荷重による床版下面からのひび割れ損傷による剛性低下や劣化進行の抑制に対する補強効果は期待できない。そのため上面の補修のみでは、必要な残存供用年数を確保できない場合には、上面の補修に加えて床版下面から補強を行い活荷重に対する疲労耐久性の向上を図る必要がある。

床版下面からの補強工法として連続繊維シート接着工法が広く利用されている。本工法は、床版下面に連続繊維シート（以下、FRP シート）を接着することにより、床版の曲げ剛性を回復してたわみの抑制を図ると共に、ひび割れを拘束することにより活荷重による床版下面からの劣化を抑制し疲労耐久性を向上させるもので、ひび割れ観察と滞水防止のために FRP シートの間隔をあげて格子状に接着する工法も実用化されている。³⁾

しかしながら、上面が凍害により劣化した床版に対する下面の FRP シート補強の適用性に関する検証は十分

に行われていない。そこで本研究では、北海道内の 45 年前に架設された鋼桁橋の RC 床版をモデルに床版試験体を製作し、上面の凍害劣化を模擬して上面をウォータージェットによりはつり、超硬コンクリートにより断面修復したのち、下面の FRP シートによる補強を行いその補強効果について輪荷重走行試験により検証し、補強床版の寿命算定法について検討した。

また、輪荷重の走行位置が主桁近くに偏ると最大せん断力が増加し疲労耐久性の低下が懸念され、とくに下面補強を行う場合にはハンチ角部からの応力集中によるひび割れの進展を防止するためにハンチ部まで補強材を延伸して接着する必要があるとされている⁴⁾。そこでハンチ部を FRP シートで補強し、載荷位置を偏心させた輪荷重走行試験を行いその影響について検討した。

2. 供試体および実験方法

2.1 供試体

(1) 実験床版の諸元

実験用床版は、北海道内の昭和 39 年に架設された橋長 44m の 2 径間単純 RC 床版合成鋼桁橋を対象として選定した。本橋は、有効巾員 6.0m、床版支間 2.35m の 3 主桁橋であり、昭和 31 年鋼道路橋設計示方書に準拠して



写真-1 凍害損傷（砂利化状況）

*1 (独) 土木研究所 寒地土木研究所寒地構造チーム主任研究員 博(工) (正会員)

*2 (独) 土木研究所 寒地土木研究所寒地構造チーム上席研究員 (正会員)

*3 (社) 北海道開発技術センター 常任理事

*4 大阪工業大学 八幡工学実験場構造実験センター特任教授 工博 (正会員)

設計されており、床版厚は 160mm で鉄筋には丸鋼が使用されている。実橋からコアを採取して測定したコンクリートの圧縮強度は 42.4N/mm²であった。路面調査により、舗装損傷が確認されていることから、床版上面が 1cm 凍害劣化していると推定された。

この橋梁の RC 床版を模擬して表-1 に諸元を示す実験床版を新たに製作した。

(2) 供試体の種類と補強方法

表-2 に示す 3 体の実験床版を製作した。No.1 は、補強を行わない基準床版である。

No.2 は、床版上面の凍害劣化を補修した上で下面を FRP シート補強することを模擬した供試体である。予備荷重により床版下面にひび割れ損傷を発生させた後、上面の凍害劣化部の補修を想定して、床版上面の深さ 20mm まで機械はつりし、上側鉄筋に定着するようにウォータージェットで 70mm までコンクリートを除去し、再び超早硬セメントコンクリートで当初の床版厚まで断面復旧した後、下面を FRP シートにより補強した。

No.3 は、比較として床版上面が健全な状態で床版下面を FRP シート補強した供試体であり、予備荷重により床版下面にひび割れ損傷を発生させた後、FRP シートで補強した。本供試体では、偏心荷重の影響についても検討した。

表-1 実験床版の諸元

コンクリート強度 σ_{ck}	N/mm ²	45.3
静弾性係数 E_c	N/mm ²	31800
床版厚さ t	mm	160
主鉄筋 (上面)	—	$\phi 16@260$
主鉄筋 (下面)	—	$\phi 16@130$
配力鉄筋 (上下面共通)	—	$\phi 13@230$
主鉄筋かぶり (上面)	mm	40
主鉄筋かぶり (下面)	mm	40
床版寸法 (橋軸方向)	mm	3300
(橋軸直角方向)	mm	2650
支持桁間隔	mm	2350

表-2 供試体の種類

No.	下面補強	上面劣化・補修	荷重位置
No.1	なし	なし	中央
No.2	FRP シート	70mm 断面修復	中央
No.3		なし	中央/偏心

表-3 FRP シートの材料特性

連続繊維	高強度型炭素繊維
形状	ストランド型シート
繊維目付量	600 g/m ²
設計厚さ	0.333mm
引張強度	3950N/mm ² [3400 以上]
ヤング係数	2.59×10 ⁵ N/mm ² [2.45×10 ⁵]

[] 内は規格値

床版下面の補強仕様は、No.2, No.3 共通とし、図-1 に示すように 25cm 幅の FRP シートを 10cm の間隔 (間隔≦有効高さ) で接着する格子接着とした。なお、FRP シートとしては、表-3 に材料特性を示すストランド型炭素繊維シートを使用した。従来型の連続繊維シートは、施工現場で接着剤を含浸させて FRP 化する必要があり、含浸作業に手間がかかるのみでなく、含浸不良や浮き膨れの発生など工事品質の点でも課題があった。特に寒冷地においては、低温時に樹脂が増粘し含浸性が低下するため、施工性の改善が望まれていた。ストランド型炭素繊維シートは、工場で連続繊維束に樹脂を含浸して加熱硬化して FRP ストランドを製造し、これをすだれ状にシート化したもので、不陸修正工や現場含浸作業が不要で施工性がよく工期短縮が可能であり、工事品質確保の点でも優れている⁵⁾。

FRP シートの接着は、1 層目を主筋方向、2 層目を配力筋方向とした。コンクリート表面をディスクサンダーでケレンしたのち、プライマー塗布およびエポキシパテによる不陸修正は行わずにペースト状の接着剤を塗布して FRP シートを貼り付けた。1 層目の主筋方向はハンチ手前まで接着し、ハンチ補強シートと主筋方向シートを重ね継手で接続した。2 層目は、実橋での継手接続を考慮して 2 分割して従来型の炭素繊維シートと同様にラップ長 100mm の重ね継手で接続した⁶⁾。

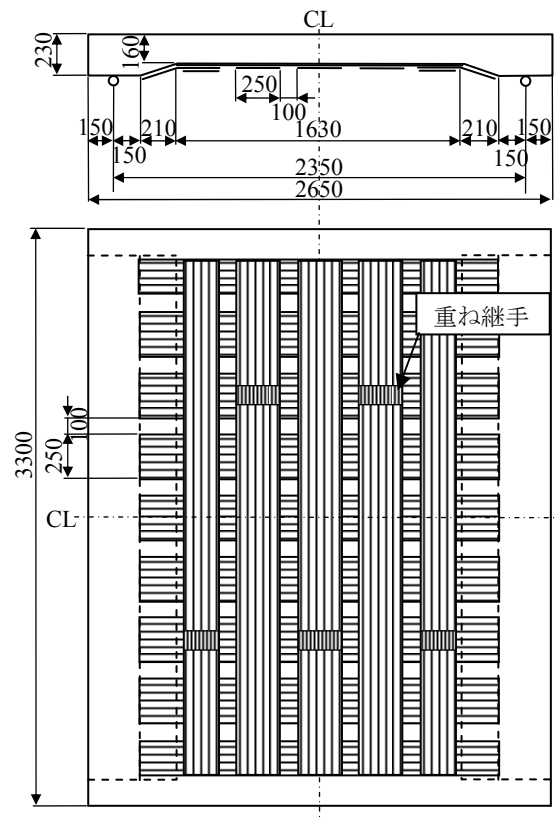


図-1 FRP シート貼付図 単位(mm)

2.2 実験方法

実験には、クランク式の輪荷重走行試験機を用いた。供試体は支持桁上に丸鋼を介して2辺単純支持し、橋軸方向の端部は横梁により2辺弾性支持とした。スパン中央の幅 500mm の載荷板上を、走行方向に 2000mm の範囲で鉄輪を往復させて載荷した（以下、中央載荷）。偏心載荷の場合には、図-2に示すように載荷板をハンチ方向に 400mm 移動して設置し鉄輪を往復させた。

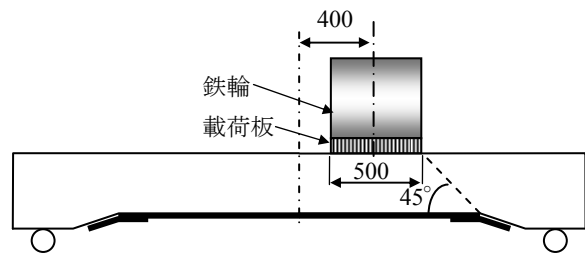


図-2 偏心載荷位置

No.2, No.3 供試体は補強前に予備載荷としてたわみによる劣化度が 0.5 となるまで床版中央を輪荷重を走行させて損傷を与えた。なお、たわみによる劣化度 D_0 は式(1)から算定した⁷⁾。活荷重たわみは、輪荷重載荷時のたわみから除荷時の残留たわみを減じた弾性たわみである。

$$D_0 = (W - W_0) / (W_c - W_0) \quad (1)$$

ここに、

D_0 : 劣化度

W : 活荷重たわみの計測値

W_0 : コンクリート全断面有効のたわみ計算値

W_c : 引張側コンクリート無視のたわみ計算値

No.1, No.2 (補強後) は、中央載荷により 120kN-10 万回, 130kN-10 万回, 150kN-10 万回, 170kN-10 万回, 200kN-10 万回, 230kN-10 万回, 260kN-10 万回の載荷プログラムとし、床版が破壊するまで繰返し載荷した。

No.3 は補強後、中央載荷により 120kN-10 万回, 130kN-10 万回, 150kN-10 万回, 170kN-28 万回, 200kN-35 万回の荷重漸増載荷を行った後、支持桁位置を移動して偏心載荷により、130kN-5 万回, 150kN-10 万回, 170kN-10 万回, 200kN-10 万回, 230kN-破壊までの荷重漸増載荷を行った。適時、輪荷重の走行を停止して床版中央で輪荷重を静的に載荷して床版下面のたわみ、鉄筋ひずみ、FRP シートのひずみを測定した。

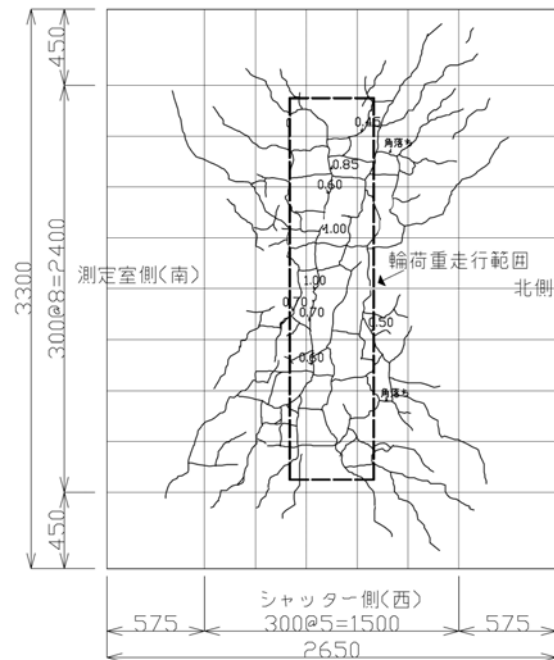


図-3 予備載荷後のひび割れ状況 (No. 3)

表-4 予備載荷前後の活荷重たわみ (mm)

供試体	予備載荷前	予備載荷終了	上面断面復旧後	下面補強後
No.2	2.05	4.09	3.96	2.09
No.3	2.00	4.10	—	2.04

3. 実験結果と考察

3.1 初期損傷と上面補修および下面補強後の床版剛性

No.2, No.3 とも、120kN-10 万回, 130kN-10 万回, 150kN-2 千回載荷により活荷重たわみが 4.1mm まで増加し、たわみの劣化度 0.5 に達し、ほぼ同様のひび割れ状況となった。予備載荷終了時の No.3 のひび割れ状況を図-3に示すが、ひび割れの本数は少なく床版中央部に橋軸方向（主鉄筋断面）に主たるひび割れが進展した。ひび割れ幅は、最大 1.0mm に達し角落ちも発生するなど、ひび割れ密度は小さいものの個々のひび割れ幅は大きくなっている。これは実験床版が丸鋼を用いているため、異型鉄筋を用いた RC 床版に比べ鉄筋の付着切れによりひび割れが分散せず、主たるひび割れに劣化が集中したためと考えられる。

予備載荷開始前、予備載荷終了時、上面断面復旧後、

下面シート補強後の床版中央の活荷重たわみの計測値（150kN 換算）を表-4に示す。薄板解析による理論たわみは、全断面有効の場合、無補強 1.62mm、下面補強後 1.15mm、引張側コンクリート無視の場合、無補強 6.42mm、下面補強後 4.44mm であり、計測値はその間にあり中立軸まで達しないひび割れが生じていたと考えられる。予備載荷により活荷重たわみは 2 倍程度に増加し劣化度 0.5 に達した。No.2 は、上面をウォータージェットで 70mm はつりとった後、超速硬化コンクリート（圧縮強度 69.3N/mm²、ヤング係数 34100N/mm²）で断面復旧しているが、予備載荷終了時と断面復旧後の活荷重たわみはほぼ等しく、断面復旧により上面劣化の生じていないコンクリート断面と同等の曲げ剛性を回復することが可能であるが、初期の剛性を回復するには至っていない。下面を FRP シートで補強することにより、活荷重たわみは補強前の約 1/2 に低減され、予備載荷前の初期剛性に近くなった。

3.2 たわみの変化と破壊状況

図-4に中央載荷時の床版中央の活荷重たわみと走行回数(回)の関係を示す。無補強のNo.1は、200kNに荷重を増加させた直後にたわみが急増し、200kN-1.82万回載荷時に活荷重たわみが11.15mmに増加して押抜きせん断により破壊した。

上面を断面修復後下面補強したNo.2と下面補強したNo.3の活荷重たわみは、同じ荷重ステップではほぼ同等で無補強のNo.1より小さく、No.1の破壊した200kN載荷時でもたわみは安定していた。No.2は260kN-6万回載荷以降たわみが急増し押抜きせん断破壊した。床版上面には載荷ブロック端部で陥没が見られ、橋軸直角方向に約30cm間隔の貫通ひびわれが見られ終局時には梁状化していた。床版コンクリートの押抜きせん断破壊部の境界でFRPシートが剥離していたが端部は接着しており、支間中央部がハンモック状に吊り下がった状態であった。FRPシートの剥離は、コンクリートとFRPシートの界面ではなくコンクリートの表層内で剥離し、FRPシートにはコンクリートが付着した状態であった。FRPシートの破断やシートの重ね継手部の剥離はなかった。

No.3は、200kN-35万回まで床版中央で載荷しNo.2と同様のたわみ状況であることを確認した後、載荷位置を端部に移動して130kNから荷重を漸増させて載荷し、200kN-10万回載荷後、230kNに荷重を増加し3.6万回載荷時に、たわみが急増しハンチ側で床版コンクリートが陥没して押抜きせん断破壊により終局に至った(写真-2)。FRPシートは破断せず、ハンチ部のコンクリートの押抜き破壊部にそって剥離した。剥離は、FRPシートとコンクリートの界面ではなく、FRPシートにコンクリートが付着した状態でコンクリート内部で生じていた。

3.3 鉄筋およびシートのひずみの変化

図-5に床版中央下側主鉄筋のひずみと走行回数(回)の関係を示す。無補強のNo.1の主鉄筋ひずみは各荷重ステップの初期で最大で同じ荷重ステップでは載荷回数とともにひずみが減少する鋸刃状の傾向を示し、特に荷重170kNで減少傾向が顕著である。これは本実験では丸鋼

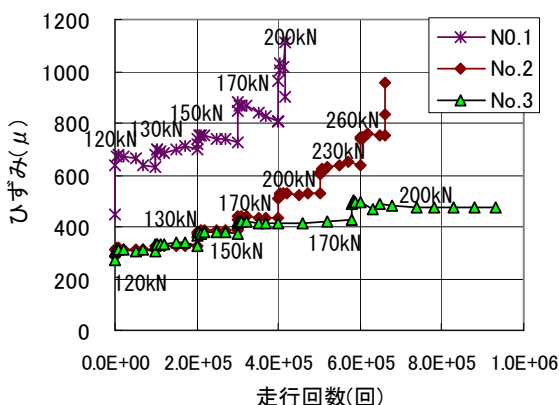


図-5 床版中央下側主鉄筋ひずみと走行回数



写真-2 No.3 実験終了時の下面の状況

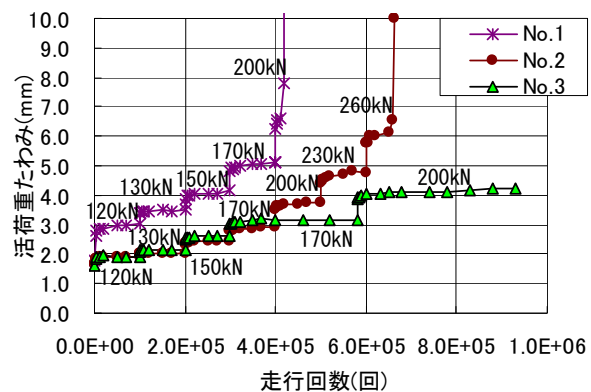


図-4 走行回数と活荷重たわみ(中央載荷)

を用いているため繰り返し載荷により鉄筋の付着切れが進行していくためと考えられる。

下面補強したNo.2とNo.3の主鉄筋ひずみは、No.1の概ね1/2程度に大幅に低減されている。また各荷重ステップでの鉄筋ひずみはほぼ一定となっており、No.1のようにひずみが鋸刃状に低下する傾向は見られない。これは、床版下面のFRPシートが引張力を分担し鉄筋の応力が低減されるとともに、ひび割れの開閉動を拘束するため鉄筋のひび割れ近傍での付着切れを抑制したためと考えられる。図-6には床版下面中央橋軸直角方向のFRPシートのひずみと走行回数(回)の関係を示す。FRPシートのひずみは、同じ荷重レベルの鉄筋ひずみの2倍以上

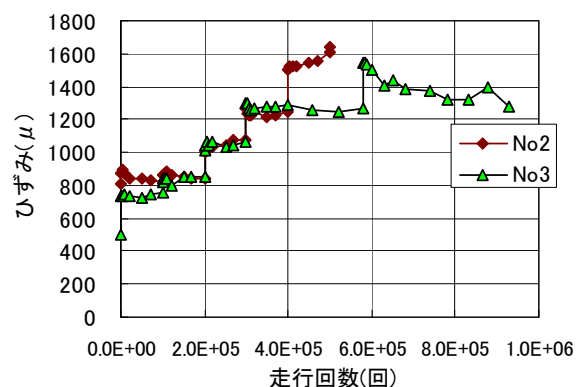


図-6 床版中央主筋方向シートひずみと走行回数

の大きな値を示している。荷重 200kN に荷重ステップを上げた後、FRP シートのひずみの減少傾向がみられ、付着劣化が徐々に進行しているものと考えられる。なお No.2 は荷重を 230kN に増加させたところでひずみゲージが剥離したため以降の計測ができていない。

3.4 下面 FRP シート補強による延命効果の評価

(1) RC 床版の劣化度と換算走行回数

はり状化した床版の押抜きせん断耐力を P_{sx} 、載荷荷重を P 、載荷回数を N 、 C は定数($C=1.52$;乾燥時)として RC 床版の SN 関係は式 (2)で示される⁴⁾。

$$\text{Log}\left(\frac{P}{P_{sx}}\right) = -0.07835 \text{Log}N + \text{Log}C \quad (2)$$

押抜きせん断耐力 P_{sx} は式(3)で示される。

$$P_{sx} = 2B(\tau_{smax} \cdot X_m + \sigma_{tmax} \cdot C_m) \quad (3)$$

ここに、

B : 輪荷重に対する床版の有効幅で $B=b+2d_d$

b : 載荷板の軸方向の辺長

d_d : 配力鉄筋の有効高さ

τ_{smax} : コンクリートの最大せん断応力度

σ_{tmax} : コンクリートの最大引張応力度

X_m : 引張側コンクリート無視の主筋断面中立軸の床版上縁からの距離

C_m : 主筋のかぶり厚さ

$$N_{eq} = \sum_{i=1,j} \left(n_i \cdot \left(\frac{P_i}{P_0} \right)^{\frac{1}{0.07835}} \right) \quad (4)$$

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(2)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(4)で示す累積等価載荷回数 N_{eq} を算定した。ここに、 n_i 、 P_i 載はそれぞれ i ステップ目における載荷回数および荷重である。

図-7には式(1)により算定した劣化度と、 B 活荷重に衝撃や過積載車の混入を考慮して評価荷重を 150 kN とし式(4)より算定した累積等価載荷回数 (以下、150kN 換算走行回数) の関係を示す。No.1 は、150kN 換算走行回数 1.0×10^6 回で劣化度が 0.8 に達した後、急速に劣化度が大きくなり 1.0 を超えて破壊した。No.2 と No.3 の中

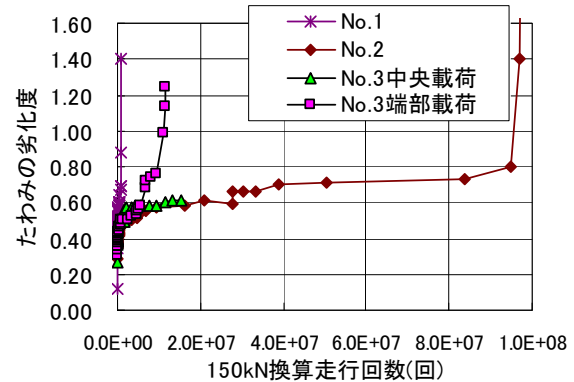


図-7 走行回数と劣化度の変化

央載荷では、No.3 の途中打ち切り回数まで劣化度と換算走行回数の関係がほぼ同じであり、断面修復の影響がないことがわかる。No.2 は、劣化度が 0.8 に達した後、急速に大きくなり換算走行回数 9.5×10^7 回で破壊に至り No.1 の約 95 倍の耐久性を示した。

(2) 偏心載荷

No.3 の偏心載荷では、換算走行回数 1.1×10^7 回で劣化度が 1 を超過して破壊し、無補強基準床版 No.1 の 11 倍の耐久性を示した。中央載荷の No.2 よりも早期に破壊しているが、No.3 は中央載荷により換算走行回数 1.5×10^7 回の載荷を行い劣化が進行していたこと、荷重位置をハンチ側に偏心したので載荷板端面での最大せん断力が中央載荷に比べて増加したことが原因と考えられる。式 (4)では、作用せん断力比の 12.76 乗で換算載荷回数は大きくなるので、最大せん断力の増加が寿命に及ぼす影響度を算定した。偏心載荷による最大せん断力の増加を考慮するために、薄板要素を用いた FEM 解析により中央載荷と偏心載荷の最大せん断力を計算した。その結果、偏心載荷では最大せん断力は中央載荷の 1.1 倍となり、寿命影響度は 3.4 倍となった。No.3 は、この寿命影響度を考慮して換算破壊回数を補正して検討した。

(3) 補強床版の破壊回数および寿命増加率の評価

荷重 150kN での式(2)から計算した破壊回数と実験からえた換算破壊回数および無補強床版と比較した寿命増加率を表-5に示す。FRP シート補強を行った RC 床版の寿命の計算は、蔡らの提案する計算法に従って、FRP

表-5 150kN換算破壊回数および寿命増加率の算定

供試体	No.1	No.2	No.3	No.3補正	
コンクリート強度 (N/mm ²)	43.2	45.3	41.7	41.7	
無補強の押抜きせん断耐力 P_{sx} (kN)	316.6	321.8	312.8	312.8	
補強後の押抜きせん断耐力 P_{sxc} (kN)	—	410.3	397.2	397.2	
150kN換算破壊回数	無補強床版計算値 N_{c0} (回)	2.88E+06	3.55E+06	2.47E+06	2.47E+06
	補強床版計算値 N_{cr} (回)	—	7.87E+07	5.21E+07	5.21E+07
	実験値 N_{exp} (回)	1.01E+06	9.50E+07	1.13E+07	3.84E+07
	実験 N_{exp} /補強床版計算 N_{cr}	—	1.21	0.22	0.74
寿命増加率	実験 N_{exp} /基準床版実験 N_{c0} (No.1)	1.0	94.1	11.2	38.1
	実験 N_{exp} /無補強床版計算 N_{c0}	0.35	26.7	4.6	15.6

シート補強による中立軸深さの増加と FRP シートによる配力鉄筋方向のかぶりコンクリートの引張破壊耐力増加分を考慮した押抜きせん断耐力 P_{sxcf} を式(5)より算定し、式(2)により破壊回数算定した⁸⁾。

$$P_{sxcf} = 2B(\tau_{smax} \cdot X_m + \sigma_{tmax} \cdot C_m) + 2\{0.25 \sigma_{tmax} \cdot C_d(a+2d_m)\} \quad (5)$$

ここに、

a : 載荷板の主筋方向の辺長

d_m : 引張側主筋の有効高さ

C_d : 配力筋のかぶり厚さ

無補強床版の破壊回数は、実験値が計算値の 0.35 倍と早期に破壊している。式(2)の SN 関係式が異形鉄筋を用いた RC 床版に導かれたものであるのに対して、本研究では実橋に即して丸鋼を用いて実験床版を作成した。そのため、鉄筋の付着切れが生じてひび割れ幅が大きくなり、コンクリート内骨材のインターロッキング作用と鉄筋によるダウエル作用が低減され、異形鉄筋を用いた RC 床版より寿命が短くなったものと考えられる。

FRP シート補強した試験体の 150kN 換算破壊回数は、無補強の基準床版 No.1 の実験値と比較すると中央載荷した No.2 は 94.1 倍、偏心載荷でせん断力の補正を行った場合で 38.1 倍となり、FRP シート補強により大幅な破壊回数の増加が見られる。無補強床版破壊回数の計算値と比較した寿命増加率もそれぞれ 26.7 倍、15.6 倍と顕著な十分な延命効果が認められる。

式(5)を用いた補強後の破壊回数の算定値と実験値を比較すると中央載荷で 1.21 倍、偏心載荷でせん断力の補正を行った場合で 0.74 倍と比較的よく一致している。また、丸鋼を使用した RC 床版の疲労寿命は、異形鉄筋を用いた RC 床版より短くなるが、FRP シート補強によりひび割れが拘束され鉄筋の付着切れが抑制されるので異形鉄筋の床版の下面を補強した場合と同等まで延命されたものと推定される。以上のように上面の凍害劣化部を除去し断面修復補修した RC 床版の下面を FRP シートで補強する筆者らの提案する積雪寒冷地床版の補強工法においても式(2)、式(5)により補強後の床版の寿命予測が可能であると考えられる。

4. まとめ

凍害劣化した RC 床版の上面を断面修復し下面を FRP シート補強した場合の疲労耐久性について輪荷重走行試験による検討を行い以下の結論を得た。

(1) 丸鋼を用いた無補強基準供試体は、RC 床版の SN 式から算定される寿命の 1/3 程度で破壊したが、鉄筋の付着切れが影響しているものと考えられる。

- (2) 疲労損傷した床版に対して、上面補修では初期剛性は回復できないが、下面補強することで剛性の回復が可能であり、高い疲労耐久性の向上が確認された。
- (3) FRP シートを考慮した押抜きせん断耐力式を用いることで RC 床版の SN 関係式から補強後の RC 床版の寿命を算定することが可能である。
- (4) ハンチ部まで FRP シートを接着することで偏心載荷においても疲労耐久性が向上した。偏心載荷では、中央載荷に比べて最大せん断力が増加するためその影響を適切に考慮する必要がある。

謝辞

本研究を行うにあたり、大阪工業大学と共同研究を実施している小林朗氏には、実験の実施に際しご協力を頂いた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 小野貴之、三田村浩、林川俊郎、松井繁之：積雪寒冷地における RC 床版の疲労耐久性に関する研究、第 6 回道路橋床版シンポジウム論文報告集、pp.75-80、2008.6
- 2) 小野貴之、林川俊郎、三田村浩、松井繁之：積雪寒冷地における RC 床版の疲労耐久性向上について、第 63 回土木学会年次学術講演概要集、1-428、pp.855-856、2006.9
- 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報告集、Vo27, No.2、pp.1513-1518、2005.7
- 4) 阪神高速道路公団、阪神高速道路管理技術センター：道路橋 RC 床版のひび割れ損傷と耐久性、1991
- 5) 小林朗、佐藤靖彦、高橋義裕、立石晶洋：FRP スtrandシートの材料特性と RC 梁の曲げ補強効果に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vo30, No.3、pp.1561-1566、2008.7
- 6) 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)、整理番号 235 号、pp.39-41、1999.12
- 7) 松井繁之、前田幸雄：道路橋 RC 床版の劣化度判定法の一提案、土木学会論文集、第 374 号/I-6、pp.419-426、1986.10
- 8) 蔡華堅：IMPROVEMENT OF RC SLAB FATIGUE DURABILITY BY FRP SHEET STRENGTHENING、大阪大学大学院工学研究科博士論文、2005.12