

積雪寒冷地における RC 床版の疲労耐久性向上について

Study on durability improvement of reinforced concrete slabs in snowy cold region

小野 貴之*, 三田村 浩**, 林川 俊郎***, 松井 繁之****

Takayuki Ono, Hiroshi Mitamura, Toshiro Hayashikawa, Shigeyuki Matsui

*工学士, 北海道大学大学院, 工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8)

**博士 (工学), (独) 土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3-1-34)

***工博, 北海道大学大学院教授, 工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8)

****工博, 大阪工業大学教授, 八幡工学実験場 (〒614-8289 京都府八幡市美濃山一ノ谷 4)

RC slabs in Hokkaido have been charged frost damage that originates in meteorological conditions of the snowy cold region and salt damage because of splaying of antifreezing agent, besides fatigue damage by wheels similar to a general region. Some RC slab specimens were cut from actual highway bridges that had been used in Hokkaido, and new RC slab specimens were built for comparison, and their durability was examined by the wheel running machine. In this study, remaining fatigue life of RC slabs in snowy cold region was quantitatively evaluated, and the durability improvement of RC slabs that were repaired with jet-concrete and were reinforced with CFRP was investigated.

Key Words: snowy cold region, RC slab, fatigue durability, wheel running machine, life-extending effectiveness

キーワード: 積雪寒冷地, RC 床版, 疲労耐久性, 輪荷重走行試験, 延命効果

1. はじめに

道路橋の RC 床版の劣化要因は, 大型車両の輪荷重の繰り返し作用による疲労劣化が主たる要因とされ, それに加え床版に生じたひびわれに雨水が浸入すると疲労耐久性が著しく損なわれるといわれている¹⁾. 特に北海道においては, 積雪寒冷な気象条件から起因する「凍害」や凍結防止剤散布による「塩害」といった材料劣化を受ける過酷な状況にあるといえ, 全国の都市圏に比べ交通量が少ないにも関わらず, 毎年十数橋の床版打替えが行われている. 今後は図-1 に示すように高度経済成長時代に建設された膨大な数にのぼる橋梁の維持管理時代の到来に備え, 維持管理に資する更なる効率化が求められている.

積雪寒冷地である北海道の床版においては, 大型車輪荷重の繰り返しによる疲労劣化のほか, 雨水の凍結融解の繰り返しに起因する「凍害」, 冬期の道路維持管理としての凍結防止剤散布に起因する「塩害」が床版の疲労劣化と複合することから, 他地域と比べて非常に劣悪な環境下に置かれていると考えられる.

写真-1 は凍害により床版上面が劣化損傷を受けたと見られる事例である. 輪荷重等により発生した舗装や床版のひび割れから雨水・融雪水が浸入し, 長年にわたる凍結と融解の繰り返し作用により床版上面のコンクリート表面にスケーリングが発生し, かぶりコンクリートが砂利化したものと考えられる. これが積雪寒冷地における床版特有の劣化損傷のパターンである.

本研究では北海道内の既設橋梁から切り出した床版と,

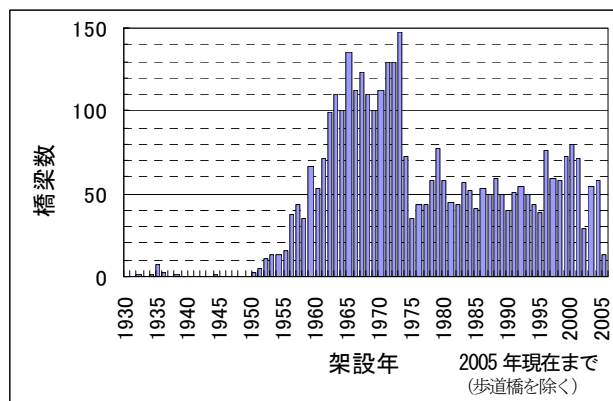


図-1 北海道開発局が建設した橋梁数

それをモデルとして新たに製作した床版の輪荷重走行試験機による疲労実験を行い、積雪寒冷地特有の劣化作用を受けた床版の寿命の低下と余寿命の算定を行った。さらに劣化損傷を再現した床版にジェットコンクリートによる上面の補修やCFRP プレートによる下面の補強を行ったものについても同様の実験を行い、補修・補強効果による疲労耐久性向上度（延命効果）を検討した。特にCFRP プレートによる床版補強における寿命増加率については、補強による中立軸の深化、床版異方性度改善、ひび割れ面劣化の抑制といった3つの効果に分けて検討を行った。



写真-1 凍害による床版の劣化損傷事例

2. 輪荷重走行試験機による疲労実験

2. 1 輪荷重走行試験機

わが国の輪荷重走行試験機は、走行部の機構によりクランク式と自走式に大別される。本研究で使用したものは写真-2 のようにクランク式であり、モーターによりフライホイールを回転させ、ロッドを介して走行輪を往復運動に変換させる仕組みとなっている。車輪部分は鉄輪またはゴムタイヤの装着が可能であるが、今回の実験では鉄輪を使用した。輪荷重試験機の諸元を表-1 に示す。この試験機は最大 300kN までの任意の鉛直荷重を載荷することができ、車輪の往復によって実橋床版の破壊形態である「押抜きせん断破壊」を再現することができ



写真-2 輪荷重走行試験機

表-1 輪荷重走行試験機諸元

項 目		仕 様
性能	最大荷重	300kN
	走行速度	1440 往復／時
	走行範囲	± 1.0m
供試体寸法	橋軸方向 (車輪移動方向)	3.00m
	橋軸直角方向	支間 1.8 m～2.5m
	床版厚	16cm～40cm (治具改良により 40cm 以上可)

るものである。

2. 2 実験供試体

2. 2. 1 橋梁諸元

実験の供試体となる床版のうち、実際に積雪寒冷地特有の劣化作用を受けている床版として、既設の橋梁から3体の供試体を切り出した。この橋梁は北海道内陸部に国道 39 号に架橋されている神仙橋で、昭和 31 年の鋼道路橋設計示方書で設計された、橋長 56.4m で図-2 に示すような単純開断面箱桁橋であり、42 年間供用されたものである。橋梁諸元を表-2 に示す。また、床版を切り出した位置（平面図）を図-3 に示す。

なお、神仙橋は上川郡上川町にあり、図-4 に示す凍害危険度の区分図²⁾によると、凍害の危険度が最も高い5にランクされる位置に架橋されていたものである。上川

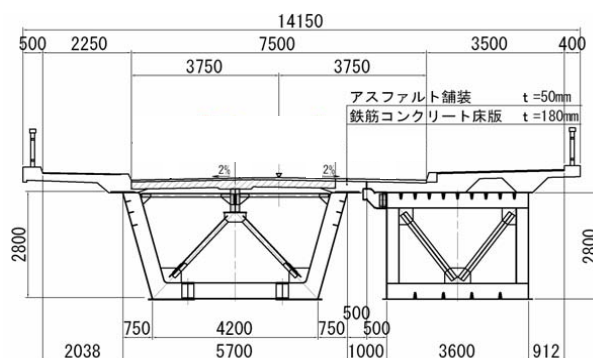


図-2 神仙橋断面図

表-2 橋梁諸元

橋 梁 名	神仙橋（しんせんばし）
架 橋 位 置	北海道上川町 （一般国道 39 号）
橋 種	単純開断面箱桁
橋 長	L = 56.4m
床 版 支 間	L = 2.85m
架 設 年 次	1963 年 (供用 42 年間)
適 用 示 方 書	昭和 31 年 鋼道路橋設計示方書
架 け 替 え 理 由	床版劣化

表-4 材料試験結果

材料試験	単位	既設①	既設②	既設③
コンクリート強度 σ_{ck}	N/mm ²	45.5	41.0	49.8
静弾性係数 E_c	kN/mm ²	26.2	27.3	31.4
中性化深さ (床版下面, 最大値)	mm	14.5	17.5	20.5
塩分含有量	kg/m ³	0.10	0.02	0.02
骨材の アルカリシリカ 反応性試験	アルカリ濃度 減少量	mmol/l	126	126
	溶解シリカ量	mmol/l	109	111

の範囲であり、鋼材のかぶり(32mm) -10mm以上には達していないことから、中性化による劣化は受けていないと判断された。床版に含まれる塩分量は、冬期に散布される凍結防止剤の影響によるものと推察されるが、鉄筋位置の塩分含有量は腐食発生限界濃度(1.2kg/m³)に達していないことから、塩害による劣化は受けていないと判断された。アルカリ骨材反応については、溶解シリカ量がアルカリ濃度減少量以下となったこと、また、コアからの観察においても骨材が変色を受けていないことから、アルカリ骨材反応はないと判断された。

試験結果から、塩害による劣化は潜伏期の状態であり、床版の寿命低下に影響を与えていないと考えられる。しかし、舗装及び床版のひび割れ等により塩分浸透の度合いは異なるため、試験値より塩分量が多い箇所が存在している可能性もある。

試験結果や目視などから、本供試体の床版は水の浸入によるコンクリートのすり磨き現象と、その水が冬期に凍結・融解を繰り返した凍害によって、床版上面コンクリートが劣化した状態と推察できる。

2. 2. 4 製作供試体

実際に供用されていた橋梁から切り出した供試体のほかに、これらと対比するための供試体を製作した。製作した供試体による実験には大きく3つの目的があった。

まず、神仙橋の床版と同じ諸元の床版を作り、神仙橋新設時を再現したものを1体製作した。また、床版の劣化に対する水の影響を明確にするための床版を2体製作した。これらは床版上面に水を張った状態と乾燥状態との比較を行うためのものである。

このほか、積雪寒冷地床版の補修・補強に関する効果の検証を目的に3体の供試体を作製した。

以上、製作した供試体が6体、既設橋梁の床版供試体が3体、全部で9体の供試体について輪荷重試験機による疲労破壊実験を行った。これらの供試体を区別するために、表-5に示すような名称、記号を付けた。供試体の諸元を表-6に示す。

なお、製作供試体は実験時に安定したコンクリート強度を保つために、全て早強コンクリートを用いた。

表-5 供試体の名称・記号

供試体の種類	名称・記号
神仙橋から切り出した供試体	既設①, ②, ③
神仙橋と同じ諸元で製作した供試体	基準供試体
水の影響を調べるために製作した供試体	水張り供試体, 水張り基準供試体
補修・補強効果を検証するための供試体	製作A, B, C

表-6 切り出した供試体の諸元

供試体寸法 (cm)		230×300×18
鉄筋の材質		SR235
主鉄筋 (mm)	上側	φ16@200
	下側	φ16@100
配力筋 (mm)	上側	φ13@200
	下側	φ13@200
コンクリート圧縮強度 (N/mm ²)		41 以上

2. 2. 5 供試体の補修・補強方法

補修・補強効果を検証するために作製した3体の供試体「製作A, B, C」の設計は、神仙橋の劣化した床版をモデルとし、既設床版に見られたように、凍害による砂利化で床版上面の劣化損傷が1cm進行した状況を再現するもの(床版厚t=17cm)とした。

3体の供試体のうち、製作Aを補修・補強用の基準供試体としたため補修・補強を行わず、製作Bと製作Cはそれぞれ異なる方法で補修・補強を施した。

製作Bは補修効果を検証するための供試体であり、まず予備荷重で損傷区分c~d程度(ひび割れ密度3~4m/m²程度)の状態とし、走行部上面かぶりコンクリート4cmをウォータージェットではつり、ジェットコンクリートにて5cmの厚さに補修した。(写真-5)

製作Cは補強効果を検証するための試験体であり、製作Bと同様に上面をジェットコンクリートで補修し、さ

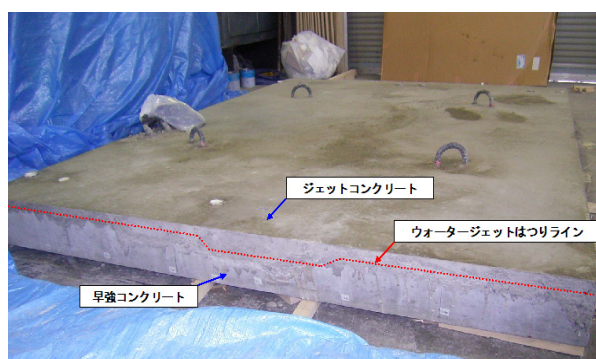


写真-5 ジェットコンクリートによる補修



写真-6 CFRP プレートによる補強

らに床版の疲労劣化プロセスに見られる，走行する輪荷重によるひび割れの伸展を抑制するための補強材として CFRP プレートを床版下面に格子状に接着して補強した（写真-6）．CFRP プレートの場合，格子の隔間が広く取れ，床版の状況確認が容易であるという利点もある．

今回の実験で使用したジェットコンクリート，CFRP プレート及び接着剤の物性値をそれぞれ表-7，表-8，表-9 に示す．

表-7 ジェットコンクリートの物性値

圧縮強度	35.9 N/mm ²
静弾性係数	20.9 kN/mm ²

表-8 CFRP プレートの物性値

ヤング係数	450 kN/mm ²
引張強度	1200 N/mm ²
幅×厚さ	50mm×1.2mm
重量	109g/m

表-9 接着剤の物性値

エポキシ系接着剤	
圧縮強度	70 N/mm ² 以上
ヤング係数	4000 N/mm ² 以上
コンクリートへの接着強度	1.5 N/mm ² 以上

2. 3 実験方法

2. 3. 1 供試体の支持

実橋床版は橋軸方向に連続な一方向性版としての挙動を示す．実験に使用する供試体の橋軸方向の寸法は試験機の制約より 3.0m である．これを 2 辺支持・2 辺自由の支持状態にすると，端部から早期に破壊する．そのため，支間方向（短辺部）に弾性支持部を設け，一方向性版としての実橋の断面力振幅状態を擬似的に再現させる必要があった．したがって，供試体を輪荷重走行試験機の架台上に供試体を設置するときの支持方式は，走行方向（長

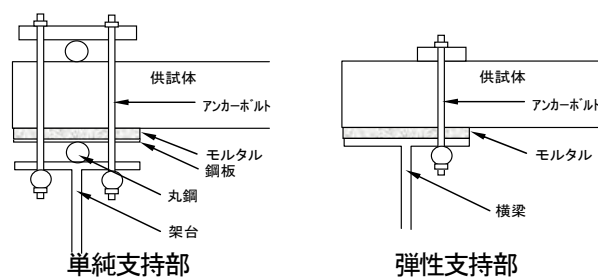


図-5 単純支持部と弾性支持部の固定方法

辺部）は 2 辺単純支持，支間方向（短辺部）は 2 辺弾性支持とした．

単純支持部は回転を拘束しないよう図-5 に示すとおり，架台と供試体の間に丸鋼を配置するとともに，丸鋼と供試体の間にモルタルを敷いて不陸を調整した．また，横梁となる弾性支持部は，FEM 解析で 1 方向性版でのモーメント比（ M_x/M_y ）および変位量を先に算出しておき，その数値に近似する剛度を持つ H 鋼（150×150mm）とした．横梁と供試体の間にはモルタルを敷いて不陸を調整した．さらに，各支持部においてはアンカーボルトにより供試体の浮き上りを防止した．

なお，本実験では床版支間（単純支持間隔）を 2m，弾性支持の H 鋼間隔を 2.55m とした．

2. 3. 2 荷重載荷面の確保

クランク式の輪荷重走行試験機の車輪に鉄輪を用いた場合，車輪を直接床版に接触させると載荷荷重は線荷重として床版に作用するため，適切な試験を実施することができない．そこで荷重載荷面積を確保するために写真-7 のように車輪と床版の間に鋼製ブロックを敷設し，実交通荷重に近い荷重状態を再現した．本実験で使用した鋼製ブロック 1 個の大きさは 12cm×30cm である．

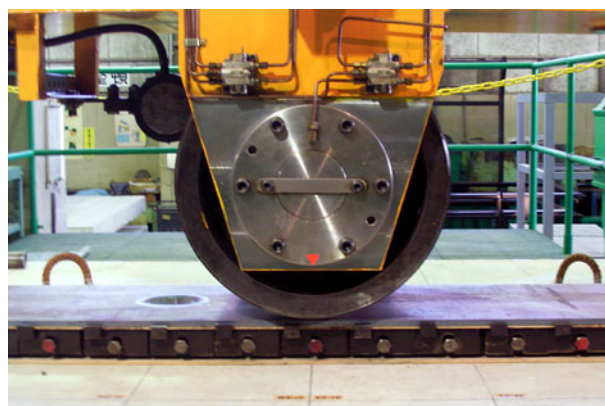


写真-7 鋼製ブロック

2. 3. 3 荷重載荷プログラム

実験の走行荷重は図-6 に示す階段状荷重漸増載荷プログラムを採用し，初期荷重は実橋床版の損傷度から早期の破壊が予想されたため，やや小さめの 130kN とした．また床版たわみの経時変化を調べるため，一定の走行回

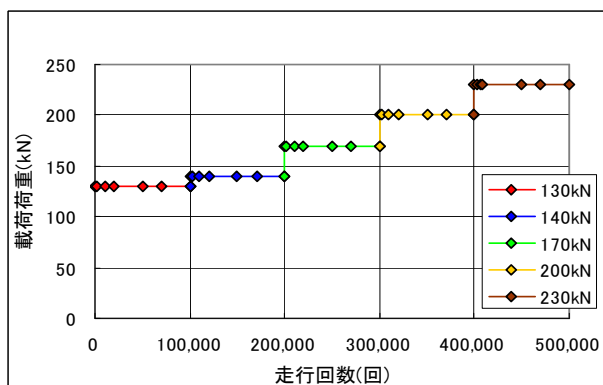


図-6 荷重載荷プログラム

数において、輪荷重による静的載荷時および無載荷時のたわみを計測し、さらに製作床版においては、内部鉄筋のひずみ量を計測した。

3. 実験結果

3. 1 破壊までの走行回数

輪荷重走行試験に関する大阪大学の研究成果では横軸を破壊までの走行回数 (N) および縦軸を載荷荷重 (P) と供試体が梁状化した後の押し抜きせん断耐力 (P_{sx}) の比で表わした S-N 曲線及び S-N 式 (松井式) ⁴⁾ が示されている。

$$\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.52 \quad (1)$$

ここで、P：載荷荷重

P_{sx} ：梁状化した床版の押し抜きせん断耐力

N：走行回数 (輪荷重の繰返し回数)

この S-N 曲線とマイナーの線形累積被害則によって、各供試体に対して階段荷重載荷の破壊までの走行回数を 150kN の一定荷重に補正した。ある一定の荷重に換算する等価繰返し回数は、マイナー則を適用した次式 ⁵⁾ により算出する。

$$DI = \sum \left(\frac{p_i}{p} \right)^m n_i \quad (2)$$

ここで、DI：等価繰返し回数 (回)

p_i ：荷重 (kN)

p：基準荷重 (kN)

m：S-N 曲線の傾きの逆数 (12.76)

n_i ：荷重 P_i の回数

さらに輪荷重試験機の手車輪幅を大型自動車の車輪接地幅に換算した破壊回数を求めた。実験で使用了車輪と実際の大型自動車の車輪幅は異なるため P_{sx} の値も異なるが、このような (P/P_{sx}) の相違による換算回数は、(1) 式より各 (P/P_{sx}) に応じた破壊回数を求め、その比に換算前の破壊回数を乗じることにより算出する。

基準供試体、既設①～③、製作 A～C の破壊回数を表-10 に、水張り供試体、水張り基準供試体の破壊回数を表-11 に示す。

水張り供試体の実験は床版上面に水を張った状態で実験を行うものであるが、これは写真-8 のように床版上面の周りに小さな堰を設け、水がこぼれないようにして水深 1cm 程度を保った。

既設①～③の換算破壊回数は神仙橋新設時を再現した基準供試体と比較すると約 1/150～1/320 となり、製作 B 及び製作 C は製作 A と比べそれぞれ 6.7 倍と 93 倍とな



写真-8 水張り供試体の実験状況

表-11 水張り供試体の破壊回数

	水張り供試体	水張り基準供試体
実験での破壊回数 (回)	40,000	79,000
150kN・自動車接地幅に換算した破壊回数	86,000	945,000
比率	1/10.99	1.0

表-10 各供試体の破壊回数

	基準供試体	既設①	既設②	既設③	製作A	製作B	製作C
実験での走行回数 (回)	408,000	103,000	152,000	106,000	226,200	318,000	323,000
150kN・自動車接地幅に換算した破壊回数	76,728,120	238,280	518,060	255,490	2,568,910	17,318,080	238,979,330
比率	基準供試体を 1.0 とした場合	1.0	1/322	1/148	1/300	1/29.9	3.1
	製作Aを 1.0 とした場合	29.9	1/10.8	1/5.0	1/10.1	6.7	93.0

った。また、水張り供試体の破壊回数は水張り基準供試体に比べ約 1/11 となった。

床版下面を CFRP プレートで補強した製作 C の実験終了後の破壊状況（床版下面）を写真-9 に示す。



写真-9 CFRP プレートの破壊状況

3. 2 積雪寒冷地床版の疲労耐久性

既設床版は42年間供用され、既にその間に輪荷重を受けているので、破壊回数は基準供試体に比べ当然小さいものとなる。既設床版が供用期間中に受けた輪荷重の回数は、架橋位置の大型車交通量（平成11年度道路交通センサス）と軸重頻度分布の測定データ⁹⁾から計算すると1年間に15,300回（150kN換算）となり、42年間では約64万回となる。軸重頻度分布は他橋のデータであるため、実際とはやや異なるとは考えるが、この64万回を差し引き、さらに水の影響による破壊回数の低下を1/10として基準供試体の換算破壊回数に当てはめても760万回程度となることから、既設①～③の換算破壊回数は非常に小さい値であることがわかる。すなわち、既設①～③の疲労寿命は「供用期間に受けた輪荷重の影響＋水の影響」より大きく下回っており、この差が凍害等による寿命低下と考えられる。このことから水の影響と凍害等の複合劣化を受けた既設床版は、疲労余寿命が著しく低下するということがわかった。これは、床版上面のコンクリートが砂利化することによって曲げ圧縮領域の一部を失い、せん断耐力が低下すると同時に曲げ引張りによる床版下面のひび割れの伸展がそれを助長することで、疲労耐久

性が低下するものと推察され、積雪寒冷地ではない一般的な床版の疲労破壊とメカニズムは同様である。

3. 3 余寿命の算定

1年間に受ける輪荷重の回数を前述した 15,300 回を用いて各供試体の余寿命を試算したものが表-12 である。既設床版の余寿命が 15～34 年となり、床版が水に浸るような条件が続くとすれば、余寿命は1～3 年ということになり、この床版は供用下において破壊が起きる寸前であったということになる。

一方、補修・補強を施した製作 B、C の余寿命はそれぞれ 1,130 年と 15,600 年という計算になる。ただし、基準試験体である製作 A は劣化した既設床版をモデルにして製作したものであったが、換算破壊回数を比べると既設①～③の 5～10 倍の差があるので、このことを考慮して単純に割り返すと、製作 B、C の余寿命はそれぞれ 113 年～226 年と 1,562 年～3,124 年となる。これは実用的に十分な延命効果といえるが、仮に補修・補強後にも水の影響が作用し続けるとすれば、製作 B、C の余寿命はそれぞれ約 10～20 年および約 140～280 年ということになる。このため、補修・補強後も水の影響を可能な限り排除することが重要である。

製作 A と既設①～③との余寿命の差の原因は明確ではないが、既設床版には目視で確認できない微細なひび割れが多く存在していたことなど、見た目では判断できない疲労の蓄積があったと考えられる。

4. CFRP プレートによる補強効果の検討

ジェットコンクリートによる床版の補修によって、製作 B の換算破壊回数が製作 A の 6.7 倍となったが、これは新設時の断面を再生することで断面剛性が上がったことが要因であることは明らかである。

一方、CFRP プレートによる補強によって、製作 C の換算破壊回数は製作 A の 93 倍、製作 B の 13.8 倍となった。大阪大学の研究⁷⁾では、連続繊維シートによる床版補強効果の定式化が試みられており、補強後の寿命増加率が定量的に求められている。ここでは CFRP プレートによる補強効果を定量的に検証するため、大阪大学の研

表-12 各供試体の余寿命

	既設①	既設②	既設③	製作A	製作B	製作C
150kN・自動車接地幅に換算した破壊回数 a	238,280	518,060	255,490	2,568,910	17,318,080	238,979,330
1年間の疲労輪数（センサス軸重データ）b（輪）	15,300	15,300	15,300	15,300	15,300	15,300
水の影響による補正 c	1/ 10.99	1/ 10.99	1/ 10.99	1/ 10.99	1/ 10.99	1/ 10.99
余寿命 d=a/b（年）	15.6	33.9	16.7	167.9	1,131.9	15,619.6
水の影響を考慮した余寿命 e=a/b*c（年）	1.4	3.1	1.5	15.3	103.0	1,421.3

究における連続繊維シートを CFRP プレートに置き換えて、寿命増加率の算定を試みた。

4. 1 CFRP プレートによる疲労耐久性向上メカニズムのモデル化

RC床版の疲労寿命は、前述した松井式（(1)式）で表される。この式中の P_{sx} は、さらに以下のように表わされる。

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

ここで、 τ_{smax} ：コンクリートの最大せん断応力度（kgf/cm²）
 X_m ：引張側コンクリートを無視した場合の圧縮側から中立軸までの距離
 B ：梁状化したときの梁幅 $B = b + 2d_d$
 B ：載荷板の配筋方向の辺長
 d_d ：引張側配筋の有効高さ
 σ_{smax} ：コンクリートの最大引張り応力度（kgf/cm²）
 C_m ：主鉄筋のかぶり厚さ

連続繊維シートによるRC床版の補強効果については、(1)式を基に大阪大学の研究により次の3種類の効果を寿命増加率として算定する手法が提案されている。

- 補強により押抜きせん断耐力 P_{sx} が増加すれば床版の寿命は長くなる。
- 補強により断面に作用する最大せん断力が低下すれば床版の寿命は長くなる。
- 補強によりひび割れ面の劣化が抑制され定数項（ $\log 1.52$ ）が増加すれば床版の寿命は長くなる。

ここでは連続繊維シートを CFRP プレートに置き換えて検討することとした。RC 床版を CFRP プレートによって補強した場合の寿命増加率を α_f とし、上記 a)～c)の寿命増加率 α_n 、 α_q 、 α_c とした場合、これらの関係は、(3)式のように考えられている。

$$\alpha_f = \alpha_n \cdot \alpha_q \cdot \alpha_c \quad (4)$$

以下の項で上記の a)～c)についての具体的な計算、すなわち α_n 、 α_q 、 α_c の計算を試みた。

4. 1. 1 補強による中立軸の深化による P_{sx} の増加

CFRPプレートを床版下面に接着し、CFRPプレートと床版コンクリートが完全合成され、剥離を考慮しなければ中立軸が床版下面側に移動する。主筋方向断面の中立軸の深さ X_m が大きくなると、中立軸上のコンクリートの負担せん断力が増加し、床版の押抜きせん断耐力 P_{sx} が大きくなる。コンクリートの引張強度を無視して算定した中立軸を求め、補強後の床版の押抜きせん断耐力 P_{sx} を算定する。補強前の床版の押抜きせん断耐力を P_{sx0} とすると、S-N関係(1)式より、中立軸の低下に伴う P_{sx} の増加によ

る寿命増加率は次式で表される。

$$\alpha_n = (P_{sx}/P_{sx0})^m = (P_{sx}/P_{sx0})^{12.76} \quad (5)$$

ここで、 α_n ：中立軸の移動に伴う P_{sx} の増加に起因する寿命増加率

P_{sx} ：CFRPプレートの引張剛性を考慮して算出した補強後の押抜きせん断耐力

P_{sx0} ：補強前の押抜きせん断耐力

m ：S-N曲線の傾きの逆数（12.76）

床版下面の CFRP 補強の条件のみが異なる製作 B と製作 C の中立軸の位置および押抜きせん断耐力を求め、寿命増加率を計算すると表-13 のようになった。

中立軸の深化によって、製作 C は製作 B に比べ、寿命増加率が 2.32 倍になると計算された。

表-13 中立軸の深化による寿命増加率

	X_m (mm)	P_{sx} (kN)
製作 B	49.8	317.7
製作 C	54.7	339.4
$\alpha_n = (339.36/317.66)^{12.76} = 2.32$		

4. 1. 2 床版の異方性度改善による最大せん断力の低減

RC床版は配筋方向の鉄筋量が少なく、コンクリートのひび割れ後は主筋方向に比べて配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の有効幅が減少し、最大せん断力が増加する。しかしCFRPプレートを床版下面に接着することで配筋方向の曲げ剛性が回復し、床版の異方性度が改善される。これに伴い、同じ荷重を載荷した時の最大せん断力が低下する。

RC床版の疲労寿命は、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の増加率は、補強前後の最大せん断力の比から (5) 式で表される。

$$\alpha_q = (Q_0/Q_r)^m = (Q'_0/Q'_r)^m = (Q'_0/Q'_r)^{12.76} \quad (6)$$

ここで、 α_q ：床版の異方性度の改善による補強効果

Q_0 ：補強前の最大せん断力

Q_r ：補強後の最大せん断力

Q'_0 ：等方性板の最大せん断力で正規化した補強前の無次元化最大せん断力

Q'_r ：等方性板の最大せん断力で正規化した補強後の無次元化最大せん断力

m ：S-N曲線の傾きの逆数（12.76）

異方性度の改善前後の無次元化最大せん断力は、直交

異方性を考慮した板要素を用いて有限要素解析によって求めた。ここで、異方性度は主筋方向断面、配筋方向断面の断面2次モーメントの比 (I_x/I_y) として算定した。断面2次モーメントはコンクリートの引張側を無視し、CFRPプレートは床版下面に完全合成されているものとして計算した。解析モデルは輪荷重走行試験に用いた供試体とし、床版中央の48×30cmの範囲で板厚中心に等分布荷重を載荷した。

前項と同様に、製作Bと製作Cの無次元化最大せん断力を求め、寿命増加率を計算するとは表-14のようになった。

床版の異方性度改善によって、製作Cは製作Bに比べ、寿命増加率が2.23倍になると計算された。

表-14 異方性度改善による寿命増加率

	I_x/I_y	Q'
製作B	0.361	1.15
製作C	0.563	1.08
$\alpha_q = (1.15/1.08)^{12.76} = 2.23$		

4. 1. 3 補強によるひび割れ面劣化の抑制効果

RC床版の輪荷重走行試験機による疲労試験では、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ことが知られている。ただし湿潤時でもRC床版のS-N曲線の傾きは変わらず、低寿命側に平行移動する。このため(1)式は乾燥時の定数として $\log 1.52$ が与えられているが、湿潤時では定数が異なる値となる。CFRPプレートを床版下面に接着すると、ひび割れを跨いだプレートがひび割れを拘束し、活荷重によるひび割れ開閉量が減少している。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(1)式では定数項の値がCFRPプレ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。

実験により得られた寿命増加率は、中立軸の移動による P_{sx} の増加による寿命増加率 α_n と異方性度の改善に伴う最大せん断力の低減による寿命増加率 α_q の双方を考慮した寿命増加率より大きくなった。この原因がCFRPプレート補強によるひび割れ面の劣化抑制効果等であると考えられる。そこで(3)式より、寿命増加率の実験値 α_{exp} を $\alpha_n \cdot \alpha_q$ の積で除して、 α_n および α_q 以外の効果をひび割れ面の劣化抑制効果として寿命増加率 α_c を算出した。

$$\alpha_c = \alpha_{exp} / (\alpha_n \cdot \alpha_q) = 13.8 / (2.32 \times 2.23) = 2.67$$

ひび割れ面の劣化抑制効果等によって、製作Cは製作Bに比べ、寿命増加率が2.67倍になると計算された。

5. まとめ

北海道内の供用橋梁から積雪寒冷地特有の劣化作用を受けた床版を切り出し、さらに補修・補強を施した床版を製作して輪荷重走行試験機による疲労試験を行い、積雪寒冷地床版の疲労耐久性及び補修・補強効果について検討した。本研究のまとめおよび考察を以下に示す。

- (1) 水の影響によるRC床版の疲労寿命は約1/10に低下するのに対し、水の影響と凍害の複合劣化を受けた床版の疲労寿命は、約1/150～1/320になった。
- (2) 上面で1cm程度の凍害劣化と下面のひび割れ密度3～4m/m²程度の床版において、上面における劣化部除去とジェットコンクリートによる補修で、疲労寿命は6.7倍となった。
- (3) (2)と同様の床版に対し、さらにCFRPプレートの接着による補強を行った床版では疲労寿命が93倍となった。
- (4) CFRPプレートによって補強した場合の延命効果を3種類の効果に分けて考える理論に基づき、実験によって得られた寿命増加率13.8倍を中立軸の深化による寿命増加率2.32倍、異方性度改善による寿命増加率2.23倍、ひび割れ面劣化の抑制による寿命増加率2.67倍の積で表わした。

本研究で実施した補修・補強によって、RC床版の疲労耐久性の向上がみられ、特にCFRP接着による補強では一般的な供用年数を大きく超える延命効果が試算された。今回の実験では、北海道で凍害を受けたと考える既設床版をモデル化して補修・補強し、その疲労耐久性の向上を確認したが、北海道以外の地域でも凍結・融解が繰り返されれば同様の床版劣化が起こると考えられ、さらに凍害が原因ではなくても、水の浸入によるすり磨き現象などによって床版上面のコンクリートが砂利化し、圧縮領域が欠損した床版や、ある程度ひび割れが進行した床版にも、今回と同様の補修・補強は有効であると考えられる。

ただし、製作Aと既設①～③に余寿命の差が見られたように、目視で同程度のひび割れ密度であっても、疲労損傷の程度には違いがあるとみられ、現時点ではひび割れ密度による具体的な余寿命の推定は難しいと考える。したがって、今後はひび割れ密度以外の指標による余寿命の予測についての検討が必要である。

また、CFRPプレートによって補強した場合の効果を3種類に分けて試算したが、今回のひび割れ面の劣化抑制効果等による寿命増加率の計算は、実験結果からの逆算によって求めたものである。今後は床版の断面緒量や補強材料の引張剛性などをパラメータとして同様の実験を繰り返し、複数の実験データから、補強効果の定式化を検討すべきであると考えられる。

謝辞

CFRP プレートによる補強効果の検討については、連続繊維シートを用いた補強効果の適用を助言していただくなど、小林朗氏（日鉄コンポジット（株））から有益な情報とともに多大なる協力を得ました。ここに記して謝意を表わします。

参考文献

- 1) 松井繁之：道路橋床版，森北出版，2007.
- 2) 長谷川寿夫ほか：コンクリート構造物の耐久性シリーズ／凍害，技報堂出版，1988.
- 3) 気象庁：気象庁ホームページ気象統計情報／平年値（上川，統計期間 1979～2000）
- 4) 前田，松井：輪荷重移動装置による道路橋床版の疲労に関する研究，第 6 回コンクリート工学年次講演会論文集，pp221-224,1984.
- 5) 道路橋床版の設計の合理化と耐久性の向上，（社）土木学会／鋼構造委員会，平成 16 年 11 月
- 6) 三田村，安達，石川：橋梁床版を用いた車両軸重測定と測定データから推定した床版の残存寿命，寒地土木研究所月報 No637，pp2-16,2006.
- 7) 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.
(2008 年 9 月 18 日受付)