

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

北海道大学大学院工学研究科 ○正員 小野 貴之 (Takayuki Ono)
 土木研究所寒地土木研究所 正員 三田村 浩 (Hiroshi Mitamura)
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 林川 俊郎 (Toshiro Hayashikawa)
 大阪工業大学 フェロー 松井 繁之 (Shigeyuki Matsui)

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。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。

本研究では北海道内の既設橋梁から切り出した床版と、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疲労耐久性向上のメカニズムから寿命増加の3種類の効果に分けて検討を行った。

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

本研究で使用した輪荷重走行試験機はクランク式であり、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。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るものである。

2.2 実験供試体

(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

で国道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の単純開断面箱桁橋であり、42年間供用されたものである。

神仙橋は図-1に示す凍害危険度の区分図¹⁾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る。

○内の数値は凍害危険度

凍害危険度	凍害の予想程度
5	極めて大きい
4	大きい
3	やや大きい
2	軽微
1	ごく軽微

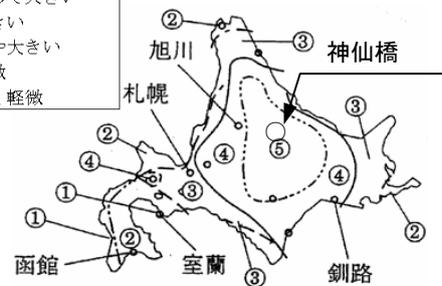


図-1 凍害危険度の区分図

(2) 既設床版の損傷評価

神仙橋の舗装撤去後の床版上面状況を写真-1に示す。床版上面は広範囲にわたって凍害の影響と見られるスケールリングが発生しており、手でコンクリートを剥がすことが可能なほど脆弱であった。上面かぶりコンクリートには層状の剥離箇所があり、一部鉄筋が露出している箇所も確認できた。また、下面のひび割れ幅は0.10mm～0.15mm程度、ひび割れ密度は2～6m/m²程度であり、ひび割れ箇所から多数の遊離石灰が発生していた。



写真-1 床版上面の状況

(3) 既設床版の材料試験結果

神仙橋の床版上面に発生した砂利化現象や床版下面にみられた遊離石灰の発生要因を推定するため、供試体近傍からコアを採取し、中性化、アルカリ骨材反応、塩分量を調べた。その結果を表-1に示す。

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した。

表-1 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 アルカリシカ 反応性試験	アルカリ濃度 減少量	mmol/l	126	126	126
	溶解シカ量	mmol/l	109	111	113

(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1体を製作した。

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体の供試体を製作した。

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。

(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進行した状況再現するもの(床版厚 $t=17\text{cm}$)とした。

3体の供試体のうち、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、BとCはそれぞれ異なる方法で補修・補強を施した。

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 $3\sim 4\text{m}^2$ 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-2)

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

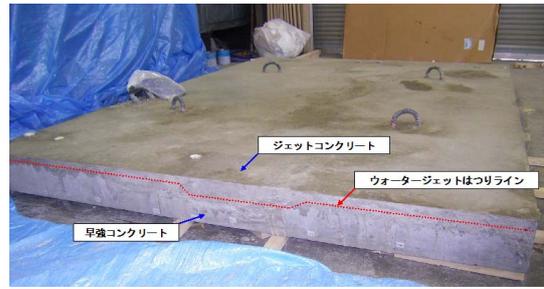


写真-2 ジェットコンクリートに補修



写真-3 CFRPプレートによる補強

プレートを床版下面に格子状に接着して補強した。(写真-3) 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。

2.3 荷重載荷プログラム

実験の走行荷重は国土交通省の輪荷重走行試験で用いられている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た。

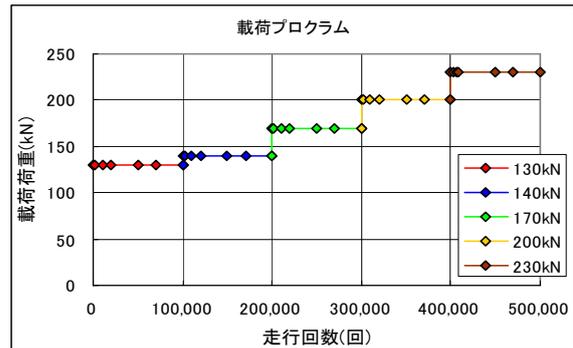


図-5 荷重載荷プログラム

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)²⁾が示されている。

表-2 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	1/4.4	3.1
	製作Aを 1.0とした場合	29.9	1/10.8	1/5.0	1/10.1	1.0	6.7	93.0

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

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、さらに輪荷重試験機の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。基準供試体、既設①～③、製作 A～C の破壊回数を表-2 に、水張り供試体、水張り基準供試体の破壊回数を表-3 に示す。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。

表-3 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

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³⁾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。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。

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⁴⁾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

連続繊維シートによる RC 床版の補強効果については前述した松井式 ((1)式) を基に小林らにより次の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。

- 補強により押し抜きせん断耐力 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、(2) 式のように考えられている。

$$\alpha_f = \alpha_n \cdot \alpha_q \cdot \alpha_c \quad (2)$$

以下の節で α_n 、 α_q 、 α_c の計算を試みた。

4. 2 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することにより、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、床版の押し抜きせん断耐力 P_{sx} が大

きくなる。

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-4 のようになり、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-4 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. 3 異方性度改善による最大せん断力の低減

RC床版は配力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力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。

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表-5 のようになり、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-5 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. 4 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、湿潤時に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(2)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 3~4m² 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大きな延命効果が試算された。

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) 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。
- 2) 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。
- 3) 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。
- 4) 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。