

積雪寒冷地における既設 RC 床版の延命手法について

Study on method for extending life of RC slab built in cold, snowy regions

土木研究所寒地土木研究所 ○ 正会員 三田村浩 (Hiroshi Mitamura)
 土木研究所寒地土木研究所 正会員 石川博之 (Hiroyuki Ishikawa)
 北海道開発技術センター 正会員 赤代恵司 (Keiji Shakushiro)
 大阪工業大学 フェロー 松井繁之 (Shigeyuki Matsui)

1. はじめに

道路橋の鉄筋コンクリート床版の劣化因子としては、大型車両の輪荷重の繰返し作用による疲労が主に考えられてきた。しかし、積雪寒冷地である北海道の橋梁床版では、写真-1に示すように滞水による凍結融解の繰返し作用により、床版上面のかぶりコンクリート部分がスケーリングや砂利化に進展することで有効床版厚が減少し、それにより疲労耐久性能が大きく低下することが判ってきた。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¹⁾²⁾。しかし、必要な残存供用年数を確保できない場合には、これらの補修のほかに床版下面に補強を実施しなければならない。

本報告は、残存供用年数を確保し既設床版の寿命を延命させる一手法として、上面損傷部を補修し、下面を補強した床版供試体を製作し、輪荷重走行試験による疲労耐久性能の評価を行った。

2. 実験概要

2.1 実験計画

実験は、基準とする供試体（以下：基準供試体）と補修・補強を施した供試体（以下：補強供試体）の2供試体で実施した。補強供試体は、図-1に示す順序で予備載荷により下面側にひび割れを発生させ、凍害劣化を模擬するため床版上面 20mm の部分を切削し、その後ウォータージェットで 70mm のコンクリート部分を除去し、再びジェットコンクリートで補修した後、下面側を CFRP 繊維シートで補強した供試体において輪荷重走行試験を実施した。

2.2 RC 床版の諸元

図-2に供試体形状およびゲージ等の配置を示す。供試体は、幅 2650mm×長さ 3300mm×厚さ 160mm の RC 床版とした。表-1に床版の諸元を示す。供試体は、昭和 39 年に施工された実橋梁の床版をモデルとして設定し、鉄筋については、実橋モデルに併せて SR235 の丸鋼を用いている。

2.3 補強供試体

補強供試体は、上面側の補修としてジェットコンクリートで復旧し、下面側の補強として、含浸工程を 1 サイ



写真-1 凍害損傷（砂利化）状況

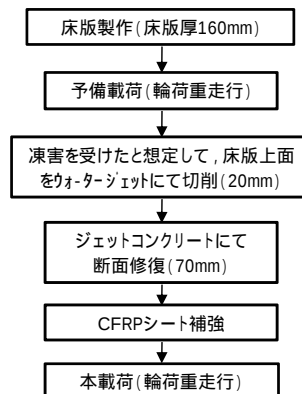


図-1 補修補強実験フロー

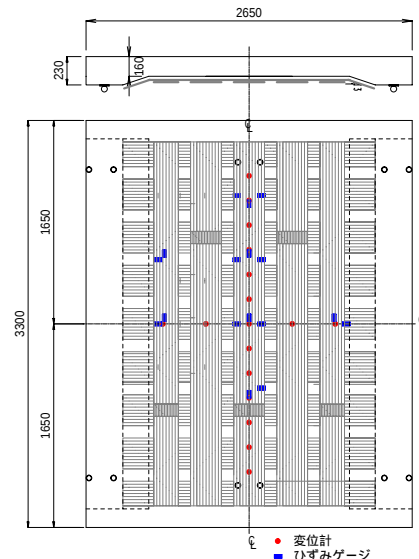


図-2 供試体形状・ゲージ配置図

クルを低減できる、炭素繊維をストランド状に加熱成形後にすだれ状に織りこんだ繊維シート（以下：繊維シート）を使用した。接着は25cm幅シートを10cm間隔（有効高12cm）で格子状に接着した。

2.4 載荷方法

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2辺単純支持、2辺弾性支持とし、スパン中央部の幅500mmの載荷板上の2000mm範囲に鉄輪を往復させて載荷した。図-3に載荷プログラムを示す。基準供試体については、120kNから荷重漸増載荷にて破壊まで行った。補強供試体については、最初に予備載荷としてたわみ劣化度0.5を目標に載荷を行った。その後、本載荷として上面補修後にシート補強を施し、基準供試体と同様に、120kNから荷重漸増載荷にて破壊まで行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 基準供試体

図-4に基準供試体の走行回数とたわみの変化を示す。基準供試体については、120kNから階段状漸増載荷を行い、載荷荷重を200kNに増加させて後に、たわみが急増し、41.8万回・活荷重たわみ11.2mmの時点で押抜きせん断破壊により終局に至った。

150kN荷重による走行回数（ N_{150} ）に換算すると

$$N_{150} = \sum \left(\left(\text{載荷荷重} / 150\text{kN} \right)^{12.76} \times \text{載荷回数} \right) = 1,008,600 \text{ 回}$$

となる。これに対して、松井式³⁾から求められるせん断耐力及び終局走行回数（ N_f ）を表-2に示す。基準供試体のせん断耐力 $P_{sx} = 316.5\text{kN}$ と150kN荷重とのせん断強度比は0.474であるから、

$$\begin{aligned} a &= (\text{Log}1.52 - \text{Log}(P/P_{sx})) / 0.07835 \\ &= (\text{Log}1.52 - \text{Log}0.474) / 0.07835 = 6.459 \\ N_f &= 10^a = 10^{6.459} = 2,877,600 \text{ 回} \end{aligned}$$

となる。実験結果の走行回数は N_f に比べると約1/3程度であった。これは、松井式のせん断耐力算定が異形棒鋼を選定していたのに対し、本実験では現橋に同定して丸鋼を選定したため、コンクリートとの付着力の差が大きく影響したものと推察される。

3.2 補強供試体

1) 予備載荷

予備載荷は、一般的に疲労劣化により補修が必要となるひび割れ密度 5m/m^2 を目標としている。しかし、ひび割れ密度で管理するとバラツキが大きくなることから同様の評価となるたわみ劣化度を用いることとし、その目標値を0.5相当に設定した。その結果、150kN×2千回載荷にて活荷重たわみが目標値の4.02mmに達し載荷終了とした。

無補強時の理論たわみ（荷重150kN）

δ_0 ：全断面有効	1.62mm
δ_c ：引張側コンクリート無視	6.42mm

表-1 製作床版の諸元

名称	版厚	鉄筋量	Co強度	備考
基準供試体	160mm	上面 $\phi 16@260$ 下面 $\phi 16@130$	43.23N/mm ²	
補強供試体		配筋筋(共通) $\phi 13@230$	45.30N/mm ²	上面補修 下面補強

材料	炭素繊維シート(すだれ状)
繊維目付量	600g/m ²
引張強度	3400N/mm ² 以上
ヤング係数	245kN/mm ²
接着剤	2液混合常温硬化型エポキシ樹脂

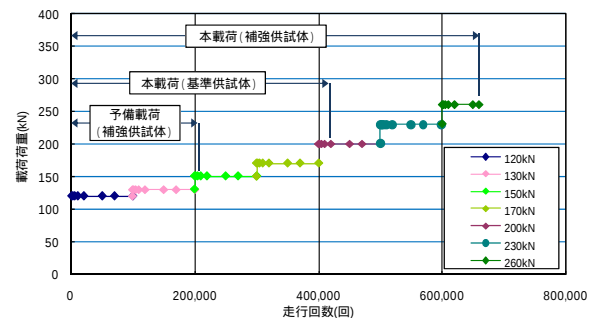


図-3 載荷プログラム

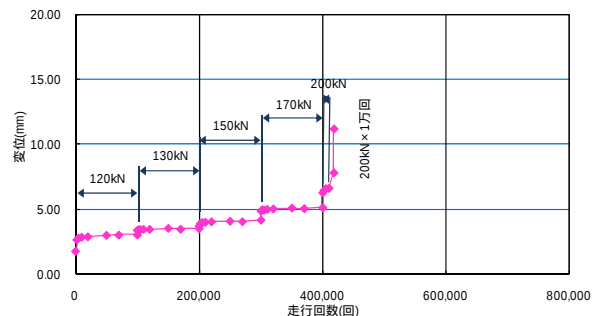


図-4 基準供試体の走行回数と変位関係

表-2 松井式によるせん断耐力及び終局走行回数

	単位	基準供試体
コンクリート強度 σ_{ck}	N/mm ²	43.23
最大せん断応力度 $\tau_{smax}=0.656 \sigma_{ck}^{0.606}$	N/mm ²	6.43
引張側コンクリートを無視した中立軸 X_m	cm	3.928
載荷板の配筋筋方向の辺長 b	cm	20.00
引張側配筋筋までの有効高 d_d	cm	10.55
梁状化したときの梁幅 $B=b+2d_d$	cm	41.10
最大引張応力度 $\sigma_{tmax}=0.269 \sigma_{ck}^{2/3}$	N/mm ²	3.31
引張主鉄筋のかぶり厚さ C_m	cm	4.00
$P_{sx}=2 \cdot B \cdot (\tau_{smax} \cdot X_m + \sigma_{tmax} \cdot C_m)$	N	316445.67
	kN	316.45
P/P_{sx} ($P=150\text{kN}$)	-	0.474
150kN換算回数予測 (N_f)		2,877,600

$$\text{劣化度 } D = (\delta - \delta_0) / (\delta_c - \delta_0)$$

ただし、

D ：劣化度 ($0 < D < 1$)

δ ：床版中央におけるたわみ（実測値）

δ_0 ：全断面のコンクリートを有効と見なした時の床版中央におけるたわみ（計算値）

δ_c ：中立軸以下の引張側コンクリートを無視した床

版中央におけるたわみ(計算値)

劣化度 0.5 相当の活荷重たわみ

$$\delta = 0.5 \times (\delta_c - \delta_0) + \delta_0$$

$$= 0.5 \times (6.42 - 1.62) + 1.62 = 4.02 \text{ mm}$$

2) 本載荷

図 - 5 に補強供試体の走行回数とたわみの変化を示す。補強供試体は、各荷重段階での活荷重たわみが基準供試体よりも小さくなり、荷重を上げた段階毎で増加は見られるが荷重が一定の間はたわみの増加は殆ど少なく安定している。260kN に荷重を増加させてから、たわみが急増し 66.2 万回・活荷重たわみ 16.2mm の時点で押抜きせん断破壊により終局に至った。

150kN 荷重による走行回数に換算すると

$$N_{150} = 94,950,330 \text{ 回} \quad \text{となる。}$$

破壊時の状況を写真 - 2 に示す。下面の繊維シートが全体的に剥離して、端部のみ接着してハンモック上に吊り下がった状態であった。しかし、シートの破断はなく、剥離に関しても、コンクリートとシートの接着面が剥がれたのではなく、両者は接着したままの状態でもコンクリートの押し抜きせん断線から剥離していた。

図-6 に鉄筋及びシートひずみと走行回数の関係を示す。ひずみは、荷重の漸増载荷に応じて徐々に大きくなり、たわみと同様に荷重が一定の間は安定して推移する。なお、荷重を 230kN に上げた時点でシートのひずみゲージが損傷し、以降のデータは欠測となっている。

3) 繊維シート補強による疲労寿命

繊維補強による疲労寿命の算出は、松井らにより提案されている配力鉄筋による剥離破壊耐力分を考慮したせん断耐力から算出する。せん断耐力は 410.77kN、150kN に換算した終局走行回数は 8,081 万回となった。

表 - 3 にせん断耐力及び終局走行回数を示す。

$$\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \cdot \log N + \log C$$

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

$$B = b + 2d_d$$

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

 τ_{smax} : コンクリートの最大せん断応力度(kgf/cm²)

$$(\tau_{smax} = 0.656 \sigma_{ck}^{0.606})$$

 σ_{tmax} : コンクリートの最大引張応力度(kgf/cm²)

$$(\sigma_{tmax} = 0.269(\sigma_{ck})^{2/3})$$

a, b: 載荷板の主筋方向, 配力筋方向の辺長(cm)

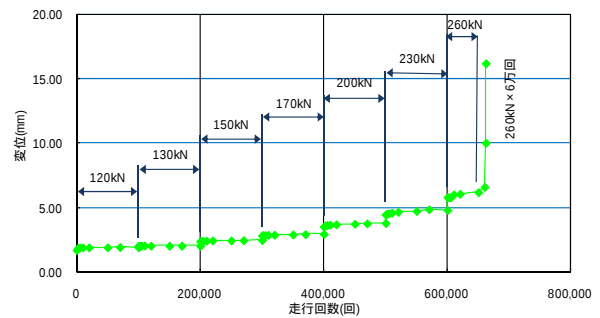
X_m: 引張側コンクリートを無視した場合の中立軸 (cm)d_m, d_d: 引張側主筋, 配力筋の有効高さ(cm)

図 - 5 補強供試体の走行回数と変位関係



写真 - 2 破壊状況

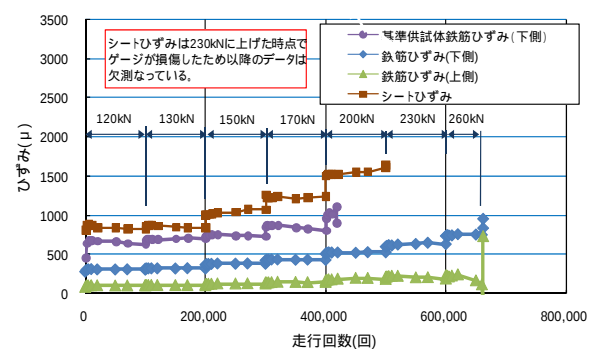


図 - 6 ひずみと走行回数関係

C_m, C_d: 主筋, 配力筋のかぶり厚さ(cm)

3.3 剛性の変化

図 - 7 に状態別の荷重とたわみ関係を示す。初期剛性に対して劣化度 0.5 まで載荷した時点での剛性は大きく低下している。これは、輪荷重の繰返し疲労により下面側にひび割れが発生しているためである。併せて、凍害

劣化を模擬して 2cm 切削した場合は、圧縮抵抗領域が減少することで更に大きく低下する。また、上面側の復旧のみでは予備載荷時の劣化状態までしか、剛性の回復は認められなかった。これは、すでに下面側に発生したひび割れの影響が残存するためと考えられる。このため、下面側のひび割れに対しては、繊維シートで補強することで、ひび割れ幅が抑制され剛性はほぼ初期剛性まで回復することが確認できた。

3.4 繊維シート補強による延命効果

表 - 3 に繊維シート補強による延命効果を示す。

実験結果での補強効果は、基準供試体が 101 万回で終局に至ったのに対して、補強供試体は 9,459 万回となったことから約 94 倍の補強効果が得られた。

また、理論式で求められる補強効果は、基準供試体が 288 万回に対して補強供試体は 8,081 万回であることから約 28 倍となる。これらのことから、実験結果における基準供試体は丸鋼鉄筋の付着力の低下で理論式より少ない走行回数となり、補強供試体は丸鋼鉄筋の付着力の低下が下面側の繊維シートの付着力によって抑制されたことによるものと推察される。したがって、実験供試体に異形棒鋼を考慮した場合には、およそ $9,495 / 288 = 33$ 倍の補強効果があるものと考えられる。

4. まとめ

疲労劣化した床版に対して、繊維シートにより下面補強した場合の補強効果について下記の知見が得られた。

疲労損傷した床版について、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となり、併せて高い疲労耐久性の向上が確認できた。

基準供試体に比べて、下面に繊維シート補強した供試体は、約 94 倍の寿命延伸効果が得られた。異形棒鋼を用いた床版についても約 33 倍の補強効果があるものと考察される。

松井式によるせん断耐力及び終局走行回数算定式および配力鉄筋による剥離破壊耐力分を考慮したせん断耐力算定式からおよそその補強効果を評価できることが確認できた。

今後は、凍害損傷を受けた床版の余寿命に関する実験等を進めて、北海道における最適な床版の補修・補強方法の策定を研究していく予定である。

参考文献

- 1) 安達，三田村，本田，松井：積雪寒冷地における橋梁床版の劣化度に関する考察，土木学会年次論文集，平成 20 年
- 2) 小野，林川，三田村，松井：積雪寒冷地における RC 床版の疲労耐久性向上について，土木学会年次論文集，平成 20 年
- 3) 松井繁之：道路橋床版～設計・施工と維持管理 平成 19 年

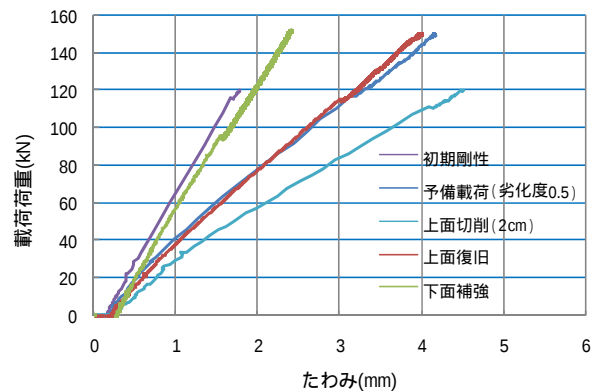


図 - 7 状態別荷重とたわみ関係

表 - 3 配力鉄筋による剥離破壊耐力分を考慮したせん断耐力及び終局走行回数

	単位	補強供試体
コンクリート強度	σ_{ck} N/mm ²	45.30
コンクリートの最大せん断応力度	τ_{smax} N/mm ²	6.615
引張側コンクリートを無視した中立軸	Xm cm	4.220
載荷板の配力筋方向辺長	b cm	20.00
引張側配力筋までの有効高	dd cm	10.55
輪荷重に対する床版の有効幅	B cm	41.10
コンクリートの最大引張応力度	σ_{tmax} N/mm ²	3.418
引張主筋のかぶり厚さ	Cm cm	4.00
載荷板の主筋方向辺長	a cm	50.00
引張配力筋のかぶり厚さ	Cd cm	5.45
引張側主筋までの有効高	dm cm	12.00
せん断耐力	Psx kN	410.77
P/Psx (P=150kN)		0.365
150kN換算回数予測 (Nfh)		80,812,000

表 - 4 繊維シート補強による延命効果

	基準供試体	補強供試体
計算による破壊回数 (回)	2,877,600	80,812,000
比率	1.0	28.1
実験での破壊回数 (回)	418,000	662,000
150kN換算破壊回数 (回)	1,008,600	94,950,330
比率	1.0	94.1
計算による破壊回数に対する比率		33.0

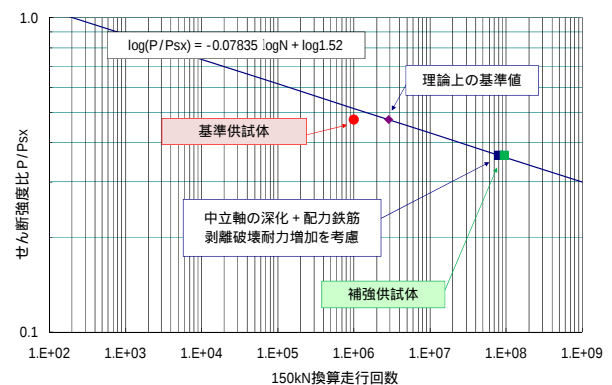


図 - 8 S - N 曲線