

# 一般国道334号斜里町朱円橋の床版補修設計 について

## —床版二重防水と下面繊維補強の提案—

網走開発建設部 網走道路事務所 ○ 林 正人  
 網走開発建設部 道路第1課 松本 朋也  
 寒地土木研究所 寒地構造チーム 三田村 浩

一般国道334号斜里町の朱円橋について、現橋RC床版の補修補強を計画している。床版上面は浸透系防水と一般防水の複合防水で水密性を向上させ、凍害劣化の予防を図った。下面補強量の決定には、目標供用年数に至る余寿命を設定し、交通量予測値と床版耐力からの疲労破壊走行回数を比較する手法を用いた。炭素繊維シートを橋軸方向と直角方向に1層ずつ接着することで床版疲労寿命は20倍以上となり、少量の補強量で目標供用年数を上回る効果を得られることが分かった。

キーワード：疲労破壊、凍害劣化、余寿命、複合防水、炭素繊維シート

### 1. 計画概要

一般国道334号斜里町の朱円橋は、昭和39年に架設された橋長44.0mの2径間単純RC床版合成鉄桁橋である。

図-1に概要図を示す。本橋梁は、幅員が6.0mと狭小で交通安全上の問題があり、その対策事業が望まれてきた。現在、現橋を1車線橋とし、上流側に別途1車線の橋梁を架設するセパレート形式で対策が進められている。

床版下面には、写真-1に示されるようにくもの巣状のひび割れが確認される。ひび割れ密度は10m/m<sup>2</sup>以上であるが、浮きや剥落は認められず、主な要因は活荷重疲労ではなく、打設後の乾燥収縮と考えられた。しかしながら、今後の供用に際しては、活荷重や温度収縮などによる幅や深さの進行から、かぶりコンクリートの浮きや剥落に至ることが懸念されるため、現段階で補強することとした。

近年、積雪寒冷地におけるRC床版の上面は凍害劣化に



下面のひび割れ

写真-1 路面全景と床版下面のひび割れ状況

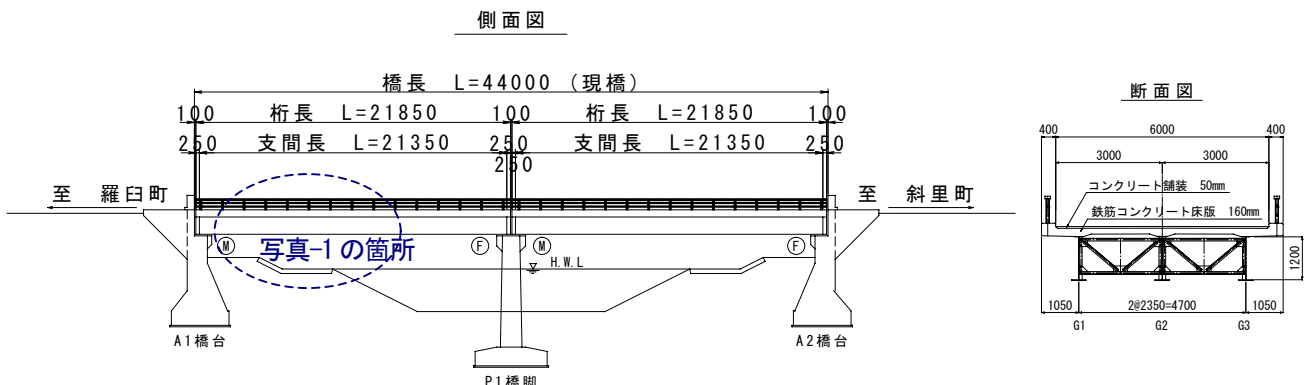


図-1 朱円橋一般図

よりスケーリングや砂利化を起し、それが床版の疲労耐久性に大きく影響することが判ってきた。<sup>1) 2)</sup>

これまで、床版補強工法としては、曲げ耐力の向上による評価から補強量の決定を行なう事例が見受けられた。本橋梁においては、床版の破壊形態が押抜きせん断であることを踏まえた合理的な補修補強を目指し、せん断耐力 (P<sub>sx</sub>) の評価と余寿命の設定から補修・補強工法の決定を行なう設計手法について報告するものである。

## 2. 現橋床版の諸元

現橋の床版は、昭和31年の鋼道路橋設計示方書に準拠して設計されており、床版厚さは16cmである。

表-1に床版の諸元を示す。なお、コンクリートの圧縮強度はコア採取による室内試験より求められた値である。

補修設計に際しては、路面調査により、写真-2に示すように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して設計を行った。

表-1 既設RC床版の諸元

	単位	朱円橋
コンクリート強度 $\sigma_{ck}$	N/mm <sup>2</sup>	42.40
静弾性係数 $E_c$	N/mm <sup>2</sup>	3.18E+04
床版厚さ	cm	16.00
主鉄筋(上面)	-	$\phi 16 @260$
主鉄筋(下面)	-	$\phi 16 @130$
配力筋(上下面共通)	-	$\phi 13 @230$
主鉄筋かぶり(上面)	cm	4.00
主鉄筋かぶり(下面)	cm	4.00



写真-2 路面状況

## 3. 現橋床版の評価

### (1) 疲労耐久性評価方法

鉄筋コンクリート床版 (以下RC床版と称す) の疲労耐

久性については、松井ら<sup>3)</sup>により提案されている押抜きせん断耐力による評価手法を用いる。

RC床版の疲労損傷は、最終的にいくつかの貫通ひび割れが橋軸直角方向に形成され、交通荷重に対する抵抗力が低下することによって進行する。このような場合、RC床版は配力筋のみによって連結され、あたかもある幅の梁を並べたような状態となる。それゆえ、交通荷重のほとんどが主鉄筋断面で支持されることとなる。この梁状化したRC床版の押抜きせん断耐力が疲労耐久性を評価するための重要な指標であり、その押抜きせん断耐力を無次元化の基本耐力として適用し、統一化した評価式として式 (1) が示されている。

$$\text{Log}(P/P_{sx}) = -0.07835 \cdot \text{Log} N + \text{Log} C \quad \dots \text{式 (1)}$$

$$P_{sx} = 2B(\tau_{\text{smx}} \cdot X_m + \sigma_{\text{tmx}} \cdot C_m)$$

$$B = b + 2d_d$$

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<sub>sx</sub>: 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

$\tau_{\text{smx}}$ : コンクリートの最大せん断応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$$(\tau_{\text{smx}} = 0.656 \sigma_{ck}^{0.666})$$

$\sigma_{\text{tmx}}$ : コンクリートの最大引張応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

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

b: 載荷板の配力筋方向の辺長 (cm)

X<sub>m</sub>: 引張側コンクリートを無視した場合の中立軸 (cm)

d<sub>d</sub>: 配力筋の有効高さ (cm)

C<sub>m</sub>: 主筋のかぶり厚さ (cm)

### (2) 交通荷重の設定

疲労耐久性を載荷荷重Pから求められる載荷回数Nの大小によって評価する場合、Nは設定する載荷荷重Pに大きく左右される。架設当時の設計荷重はTL-14であったが、一般国道として供用されてきたことから現在の設計荷重であるB活荷重を想定する。B活荷重の1輪荷重に衝撃係数を考慮して載荷荷重Pを次式より125 kNと設定する。

$$P = P_L' \times 9.80 \times (1+i) \\ = 10 \times 9.80 \times (1+0.28) = 125.47 \text{ kN} \approx 125 \text{ kN}$$

ここに、

P<sub>L</sub>' : 10tf (25tfの後輪荷重)

i : 衝撃係数 (=20/(50+L)=0.28)

L : 支間長 (=21.350m)

### (3) 大型車交通量の設定

現橋床版の疲労破壊までの載荷回数は、式 (1) より

算出される載荷回数から、架設後の大型車交通履歴回数を引算して求める。既往の交通履歴回数を推定するため、平成17年に実施された交通センサデータをを用いて、1方向当たりの大型車交通量を算出することとした。

1方向当たりの大型車交通量

$$= \text{日交通量} \times \text{重方向率} \times \text{大型車混入率}$$

$$= 3691 \times 0.57 \times 0.197$$

$$= 414.5 \quad \approx \quad 420 \text{台/日} \cdot 1 \text{方向}$$

日交通量 : 3,691台/日 (斜里町峰浜)

重方向率 : 57%

大型車混入率 : 19.7%

#### (4) 余寿命の想定

疲労耐久性について、松井式により算出したものを表-2に示す。床版上面劣化を1cm~3cmまで仮定した場合も同様に算出した。当初の床版厚さを有している場合は約2,677万回の耐久性を有していたが、1cmの劣化でも約789万回と30%程度の耐久性にまで低下することとなる。

余寿命は、床版が有する疲労載荷回数から大型車交通の総履歴回数を引いて求められる。

$$\text{余寿命} = (n_{125} - (\text{日大型車交通量} \times 365 \text{日} \times \text{経過年数})) / (\text{日大型車交通量} \times 365 \text{日})$$

$$= (7,886,780 - (420 \times 365 \times 44)) / (420 \times 365)$$

$$= 7.45 \text{年}$$

大型車交通量 : 420台

経過年数 : 44年 (昭和39年架設)

本橋梁の余寿命は7年と判定される。道路橋示方書で規定している目標供用年数100年とすると、残存供用年数は56年であることから、床版下面の補強を併用して疲労耐久性の向上を図り、余寿命延命化を目指した。

また、3cmの凍害劣化した場合では約48万回と2%程度まで低下することとなるため、床版上面の凍害劣化は疲

労耐久性に対して非常に重要である。したがって、これを防ぐことが、床版延命化の有用な対策となる。

#### 4. 補修・補強方法

##### (1) 防水工の選定

床版の疲労耐久性に対して、床版上面の凍害劣化の影響は大きな要素であり、その対策が重要となる。

凍害の劣化因子である水を防ぐのが防水工であるが、架設年次はもとより平成7年までは部分的な防水工しか規定されていなかった。

また、防水工が敷設されていても機能していないものがあることも現場から明らかとなっている。

そのため、道路橋床版防水便覧 (平成19年3月)<sup>4)</sup>に記載している複合防水システム (以下: 二重防水) を本橋梁で採用した。二重防水とは、含浸系防水材料にて床版自体に防水機能を与え、さらにその上から通常の塗膜防水材を行うものである。図-2に二重防水の概要図を示す。

二重防水は以下の特徴がある。

- ・複合防水とすることで、防水性能を高めている。
- ・コンクリート床版上面に発生している微細なクラックに含浸し、クラック補修効果があり表面を改善できる。
- ・上段がアスファルト塗膜防水材であるため、従来と同じ工程でアスファルト舗装の敷設が可能である。

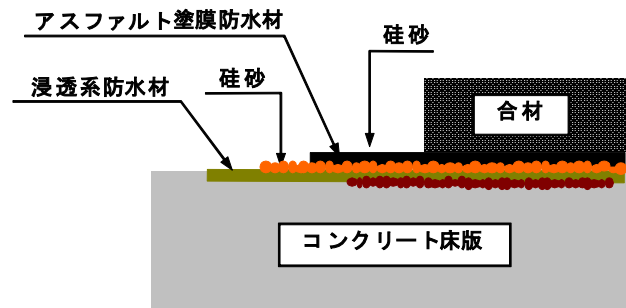


図-2 二重防水概要図

表-2 本橋梁のせん断耐力及び疲労寿命

	単位	当初厚さ	上面1cm劣化	上面2cm劣化	上面3cm劣化
コンクリート強度 $\sigma_{ck}$	N/mm <sup>2</sup>	42.40	42.40	42.40	42.40
最大せん断応力度 $\tau_{smax}=0.656 \sigma_{ck}^{0.606}$	N/mm <sup>2</sup>	6.35	6.35	6.35	6.35
引張側コンクリートを無視した中立軸 $X_m$	cm	3.959	3.683	3.391	3.081
載荷板の配筋方向の辺長 $b$	cm	20.00	20.00	20.00	20.00
引張側配筋筋までの有効高 $dd$	cm	10.55	9.55	8.55	7.55
梁状化したときの梁幅 $B=b+2dd$	cm	41.10	39.10	37.10	35.10
最大引張応力度 $\sigma_{tmax}=0.269 \sigma_{ck}^{2/3}$	N/mm <sup>2</sup>	3.27	3.27	3.27	3.27
引張主鉄筋のかぶり厚さ $C_m$	cm	4.00	4.00	4.00	4.00
$P_{sx} = 2 \cdot B \cdot (\tau_{smax} \cdot X_m + \sigma_{tmax} \cdot C_m)$	N	314165.52	285172.33	256827.35	229163.34
	kN	314.17	285.17	256.83	229.16
<b>疲労寿命</b>					
$P/P_{sx}$ (P=125kN)	-	0.398	0.438	0.487	0.545
150kN換算破壊回数(松井式)	a	7.4277	6.8969	6.3091	5.6853
	$n_{125}=10^3$ 回	26,773,180	7,886,780	2,037,510	484,500
当初厚さに対する比率		100.0%	29.5%	7.6%	1.8%

Masato Hayashi, Tomoya Matsumoto, Hiroshi Mitamura

## (2) 下面繊維シート補強の実験

### a) 実験概要

これまでの床版補強は、上面増厚や下面に多層の連続繊維シートを接着する工法等が行なわれている。しかし、既往の実験にて、床版下面に連続繊維シートを橋軸方向に1層、橋軸直角方向に1層貼り付けるだけで5～10倍程度の耐力が得られることが判ってきた<sup>5)</sup>。

本橋梁でも残存耐久年数を満足するには後者の補強方法で良いことから、その補強効果確認のため、寒地土木研究所において、朱円橋床版をモデルにした供試体を製作し、輪荷重走行試験機による疲労実験を行った。

### b) 供試体の諸元

実験は、補修・補強を施した供試体（以下：補強供試体）を製作して実施した。供試体は、幅 2650mm×長さ 3300mm×厚さ 160mm の RC 床版とした。表-3 に供試体の諸元を示す。

補強供試体は凍害劣化・補修・補強を再現した。予備荷重にて劣化を進行させた後に、上面側は凍害劣化部の補修を想定して、上側鉄筋に定着するようにウォータージェットで 70mm はつり、ジェットコンクリートで復旧した。下面側には補強として、図-3 に示すように炭素繊維シートを格子状に接着した。この繊維シートには、現場の含浸工程を 1 サイクル低減できる、炭素繊維をストランド状に加熱成形してすだれ状に織りこんだシート（以下：繊維シート）を使用した。接着は 25cm 幅繊維シートを 10cm 間隔（≦有効高 12cm）で格子状とした。接着順は、1 層目主鉄筋方向→2 層目配力筋方向である。1 層目の主鉄筋方向はハンチまで接着し、ハンチの補強シートと重ね継手で接続する。ハンチ補強シートは、直シートを鋼製押さえ治具で仮固定してハンチ形状に合わせて接着した。写真-3 に繊維シート貼付状況を示す。

表-3 供試体の諸元

床版厚	160mm
コンクリート圧縮強度	45.30N/mm <sup>2</sup>
鉄筋量	上面 φ 16@260、下面 φ 16@130 配力筋(共通) φ 13@230
材料	炭素繊維シート(すだれ状)
繊維目付量	600g/m <sup>2</sup>
引張強度	3400N/mm <sup>2</sup> 以上
ヤング係数	245kN/mm <sup>2</sup>
接着剤	2液混合常温硬化型エポキシ樹脂

### c) 荷重方法

実験には、クランク式の輪荷重走行試験機を用いた。写真-4 に輪荷重走行試験機を示す。

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 の荷重板上を、走行方向に 2000mm 範囲で鉄輪を往復させて荷重した。

最初に予備荷重にて床版下面に疲労損傷を与えて、その後、床版下面に繊維シート補強を施し、本荷重として 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-6.2 万回まで荷重漸増荷重にて破壊まで行った。

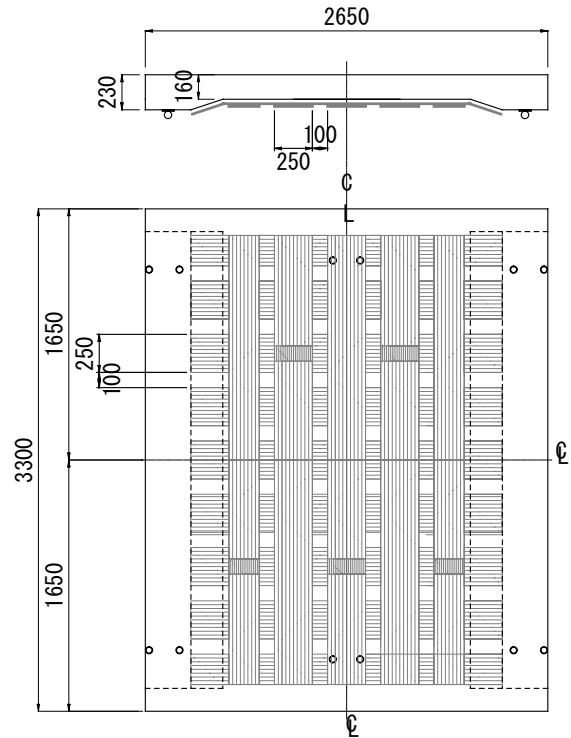


図-3 補強供試体繊維シート貼付図



写真-3 繊維シート貼付状況



強効果であり、その比率は  $1,950/77=25.3$  倍であった。

写真-4 輪荷重走行試験機

d) 実験結果

図-4に走行回数と中央部の活荷重たわみ関係を示す。供試体たわみは、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増加は小さく安定している。260kNに荷重を増加させてからたわみが急増し、累計走行回数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。

累計走行回数を、B活荷重に衝撃係数及び過積載車両の混入や破壊に対する安全率を考慮した150kNで整理すると、換算走行回数は、

$$N_{150} = \sum (P_i/150)^{12.76} \times N_i = 94,950,330 \text{ 回}$$

となる。

実験終了時の状況を写真-5, 6に示す。上面はほとんど損傷が見られない。下面については、端部は接着して支間中央部がハンモック上に吊り下がった状態であった。

シートの破断はなく、支間中央部の剥離に関して、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。

(3) 下面繊維シート補強効果の評価

繊維シート補強による疲労寿命は、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を式(2)より算出し、これを式(1)に代入して算出する。その結果を表-4に整理する。供試体のせん断耐力は410.77kN、150kNに換算した終局走行回数は8,081万回となった。

$$P_{sx} = 2B \left( \tau_{smax} \cdot X_m + \sigma_{tmax} \cdot C_m \right) + 2 \left\{ 0.25 \sigma_{tmax} \cdot C_d (a + 2d_m) \right\} \quad \dots \text{式 (2)}$$

ここに、

a : 載荷板の主筋方向の辺長 (cm)

$d_m$  : 引張側主筋の有効高さ (cm)

$C_d$  : 配力筋のかぶり厚さ (cm)

図-5に、せん断強度比と150kNで整理した走行回数の関係を示す。補強供試体について、上記より求められた理論値と実験結果がほぼ一致していることから、朱円橋床版をモデルとした供試体における繊維シート補強効果が、式(1)および式(2)から同定できると判断する。

したがって、実橋の床版も同様な評価が可能であると考えられる。表-5に朱円橋床版について、上面が1cm劣化した状態で下面補強した場合の終局走行回数を示す。補強しない現況では、表-2の結果を150kN荷重に換算し直して、 $N_{150} = (125/150)^{12.76} \times 789 \text{ 万回} = 77 \text{ 万回}$ となる。表-5の走行回数1,950万回と現況の77万回との差が補

Masato Hayashi, Tomoya Matsumoto, Hiroshi Mitamura

(4) 耐久年数の評価

表-5から朱円橋床版の上面1cm劣化を踏まえた下面

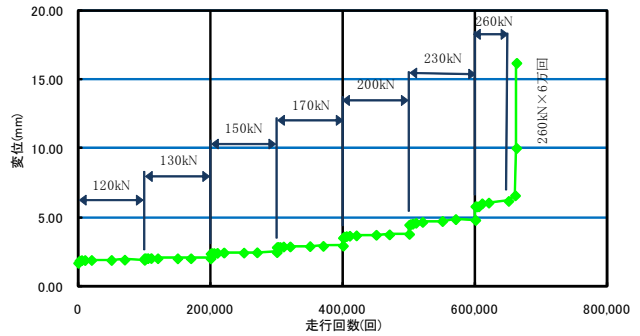


図-4 補強供試体の走行回数と変位関係



写真-5 実験終了時床版上面状況

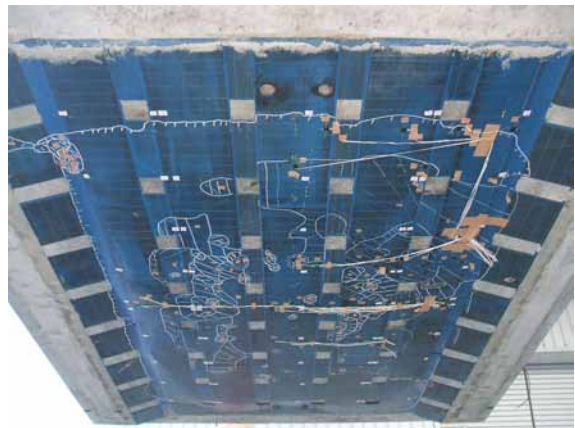


写真-6 実験終了時床版下面状況

表-4 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	$\sigma_{ck}$ N/mm <sup>2</sup>	45.30
コンクリートの最大せん断応力度	$\tau_{smax}$ N/mm <sup>2</sup>	6.615
引張側コンクリートを無視した中立軸	$X_m$ 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	$\sigma_{tmax}$ N/mm <sup>2</sup>	3.418
引張主筋のかぶり厚さ	$C_m$ 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	$C_d$ cm	5.45
引張側主筋までの有効高	$d_m$ cm	12.00
せん断耐力	$P_{sx}$ kN	410.77
$P/P_{sx}$ (P=150kN)		0.365
150kN換算回数予測 (Nfh)		80,812,000

できました。ここに感謝の意を表します。

表-5 朱円橋に床版上面1cm劣化した状態で  
下面補強した場合のせん断耐力及び終局走行回数

	単位	朱円橋
コンクリート強度	$\sigma_{ck}$	$N/mm^2$ 42.40
コンクリートの最大せん断応力度	$\tau_{smax}$	$N/mm^2$ 6.355
引張側コンクリートを無視した中立軸	$X_m$	cm 4.050
載荷板の配筋方向辺長	$b$	cm 20.00
引張側配筋までの有効高	$dd$	cm 9.55
輪荷重に対する床版の有効幅	$B$	cm 39.10
コンクリートの最大引張応力度	$\sigma_{tmax}$	$N/mm^2$ 3.271
引張主筋のかぶり厚さ	$C_m$	cm 4.00
載荷板の主筋方向辺長	$a$	cm 50.00
引張配筋のかぶり厚さ	$C_d$	cm 5.45
引張側主筋までの有効高	$dm$	cm 11.00
せん断耐力	$P_{sx}$	kN 367.76
$P/P_{sx}$ ( $P=150kN$ )		0.408
150kN換算回数予測 (N/fh)		<b>19,505,300</b>

補強後の終局走行回数は約1,950万回となる。これを、疲労耐久年数で評価すると、次式で求められる。

$$\begin{aligned} \text{疲労耐久年数} &= \text{終局回数} / (\text{日大型車交通量} \times 365 \text{ 日}) \\ &= 19,505,300 / (420 \text{ 台/日} \times 365 \text{ 日}) \\ &= 127.2 \text{ 年} \approx 120 \text{ 年} \end{aligned}$$

補強後の疲労耐久年数は約120年となり、上面劣化部を除去した状態で下面繊維シート補強を行った場合でも、残存供用年数56年に対して、十分な耐久性を有していることが確認された。

上面の劣化部を切削したままでは床版上面のかぶり厚が不足することも生ずるが、二重防水によって水の浸入を断ち、凍害劣化を抑制することでかぶり厚不足は補完されると考えている。

#### 4. まとめ

本橋梁で採用した床版補修方法は、実験による検証等から以下の点で有用であると考えられる。

- ①配筋鉄筋による剥離破壊耐力分を考慮したせん断耐力から補強効果が理論的に評価できることが確認された。
- ②朱円橋においては、上面劣化深さ1cmを切削し、床版下面に炭素繊維シートを格子状に1層ずつ接着することで、約120年の疲労耐久性を確保することができた。
- ③二重防水の浸透系防水により、ひび割れにも含浸して表面を改善する効果が期待でき、防水性の向上から床版上面の凍害劣化防止となり、かぶり厚不足への対応も期待される。

床版補修については、上面劣化が1cm程度以下と小さい場合には、劣化部を切削して断面修復は行わずに、二重防水を施工する方法が考えられる。その場合には残存供用年数に見合う疲労耐久性を有していることが条件である。上面の劣化深さが大きな場合には、部分的にでも上側鉄筋までウォータージェットにて除去して断面修復を行なう必要がある。

朱円橋においては、上面劣化部を切削した状態で補修を終了した場合に疲労耐久年数が残存供用年数に満たない判定であったことと、下面のひび割れ状況を勘案して、下面繊維シート補強を行った。その結果、残存供用年数を満足する対策が可能であった。

最後に、本橋梁補修に当たり、大阪工業大学 松井教授におかれましては、現場立会ならびに助言をしていた

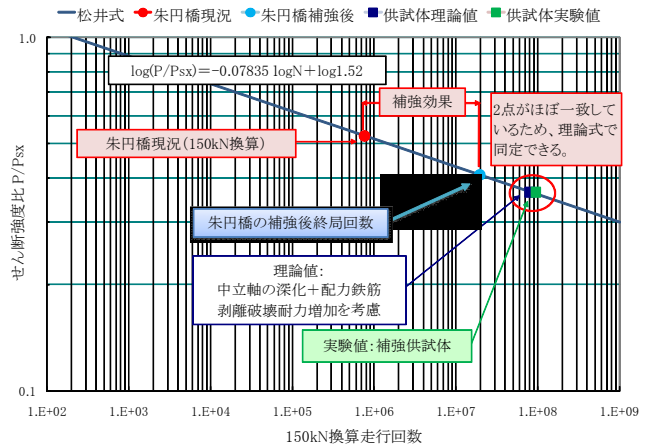


図-5 せん断強度比と終局走行回数の関係

#### 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
- 4) (財)日本道路協会: 道路橋床版防水便覧, 平成19年
- 5) 小林, 蔡, 下西, 松井: 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, No. 2, 平成17年