高弾性 CFRP プレートにより補強した RC 床版の疲労耐久性

Fatigue durability of RC slab strengthened with high modulus CFRP plate

三菱樹脂(㈱)	正会員	加藤貴久(Takahisa	Kato)
三菱樹脂㈱	正会員	久部修弘(Nobuhiro	Hisabe)
大阪工業大学	フェロー	松井繁之 (Shigeyuki	Matsui)

1.はじめに

積雪寒冷地で供用されている道路橋床版の劣化要因として、 凍結防止剤による塩害、 橋面からの浸透水に よる凍結融解、 車両通行による疲労等が挙げられる。 特に、床版上面が凍結融解の影響を受けた床版は、見か けの床版厚さが薄くなっており、輪荷重作用によって疲 労破壊する懸念があり、この床版の補修補強対策が大き な課題となっている。そこで、本研究では、凍害損傷を 想定した床版に補修および CFRP プレート補強を実施し、 輪荷重走行試験による疲労耐久性の評価を行った。図 -1に、本研究の試験フローを示す。

2.実験概要

2.1 RC 床版

供試体は、幅 2300mm×長さ 3000mm×厚さ 170mm の RC 床版とした。試験時のコンクリート圧縮強度は 41.13N/mm² であった。表 - 1 に、試験に使用した床版 の諸元を示す。配筋は 1960 年代に施工された床版をモ デルとして設定した。

2.2 補修補強供試体

補修供試体は、床版上面における劣化部の除去を想定 し、床版上面かぶりコンクリート 4cm をウォータージ ェットによって切削し、ジェットコンクリートを用いて 5cm 復旧した(床版厚さ17cm 18cm)。

補強供試体は、上記補修供試体同様の断面補修を行った後に床版下面側へ CFRP プレート(以下、プレートと称す)を貼付した。プレートの配置は図 - 2 に示すように、橋軸方向、橋軸直角方向共にプレート中心間距離で350mm 間隔の格子状配置とした。ここで、プレートはヤング係数 450kN/mm²、幅 50mm、厚み 1.2mm のもので、鋼材の約 2.3 倍のヤング係数を有しており、曲げ補強効率に優れたものである。引張剛性は、橋軸方向、橋軸直角方向共に 77kN/mm である。写真 - 1 に、ジェットコンクリート施工後の供試体断面状況を、写真 - 2 に、プレート貼付状況を示す。

2.3 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300mmの載荷板上の2000mm範囲に鉄輪を往復 させて載荷した。予備載荷として、両供試体とも無補修 の状態で、ひび割れ密度3~4m/m²程度の損傷を発生さ せた。その後、補修供試体は、上面切削補修後に本載荷、 補強供試体は、上面切削補修後にプレート補強を施し、 養生後本載荷とした。何れも階段状荷重漸増載荷で破壊



図 - 1 本研究の試験フロー

製作床版の諸元 表-1 床版厚さ 17cm 18 cm 40(目標) ck(N/mm²) 主鉄筋(下) 16@100 主鉄筋(上) 16@200 配力筋(下) 13@200 配力筋(上) 13@200 鉄筋材質 SR235



するまで載荷した。

- 3.実験結果及び考察
- 3.1 破壊状況の概要

図 - 3 に補修供試体、補強供試体の走行回数と活荷重 時たわみの変化を示す。載荷荷重は 130kN からスター トし、階段状荷重漸増載荷とした。補修供試体、補強供 試体共に 170kN までの載荷荷重までは安定した挙動を 示し、載荷途中でのたわみの顕著な増加はなかったが、 補修供試体は、載荷荷重を 200kN に増加させた直後か らたわみが急増し、31.8 万回で押し抜きせん断破壊によ り終局に至った。補強供試体は、170kN で 5 万回載荷後 230kN へ荷重を増加させた直後からたわみが急増し、 32.3 万回で押し抜きせん断破壊により終局に至った。載 荷荷重が違うため、延命効果については後述するが、同 一荷重条件下では、補強供試体の方が、活荷重たわみが 小さく、プレートによる補強効果が確認できる。

写真-3にプレート破壊状況の一例を示す。終局時に 一部プレートの破壊が観察されたが、この原因として、 コンクリート床版が押し抜きせん断破壊し、その破壊領 域のプレートに大きなせん断変形が加わったためと考え られる。

3.2 破壊時のひび割れ密度

図 - 4 に補強供試体の破壊時損傷状況を示す。また、 補修供試体の破壊時損傷状況を図 - 5 に示す。どちらの 供試体も版中央から放射線状にひび割れが進展している 傾向は同様である。表 - 3 に、床版中央の範囲内(横× 縦= $1.5m \times 1.8m$)でひび割れ延長を計測し、ひび割れ密 度(m/m^2)を算出した結果を示す。プレートで補強を 行った床版のほうがひび割れ密度が約 1.4 倍大きくなっ ている。これは、補強供試体は荷重を 230kN まで増加 (補修試験体は 200kN まで)させており、それによって 急激にひび割れが増加したことによるものと考えられる。 3.3 走行回数と中立軸深さの関係

図 - 6 に走行回数と中立軸深さの関係を示す。補修供 試体、補強供試体共に上面のウォータージェットによる はつりの際に、圧縮側鉄筋に貼付しているひずみゲージ がほとんど断線したため、データを取得できていない。 唯一データが取得できた補強供試体 S7-2 位置(橋軸直 角方向中央部鉄筋)の上下鉄筋から得られたひずみの勾 配から中立軸位置を算出したものを示している。また、 予備載荷時(床版厚17cm)の走行回数0~200回での中 立軸深さを参考までに併記した。断面厚さの差は考慮し なければならないが、下面補強したことで中立軸深さが 改善され、プレートによる補強効果が確認できる。補強 後、170kN までは中立軸の顕著な移動はほとんどみられ ないが、230kN に荷重を増加させると急激な変化がみら れ、損傷が急激に進行したと推定される。

3.4 走行回数とプレートのひずみ

図 - 7 に走行回数とプレート表面に貼付したひずみゲ ージの値の推移を示す。ひずみゲージの番号は図 - 2 の 位置図に示している。供試体中央部のプレートひずみが 大きく、170kN 載荷までは荷重の増分に応じたひずみの 増加がみられたが、230kN 載荷時には中央部のひずみが



写真-1 ジェットコンクリート施工後の供試体断面状況



写真 - 2 プレート貼付状況





走行回数とたわみの変化(活荷重時)

図 - 3

写真-3 プレート破壊状況の一例

表-3 破壊時のひび割れ密度

供試体	ひび割れ密度
補修供試体(増厚のみ)	9.2m/m ²
補強供試体(増厚+プレート)	13.1m/m ²

減少し、床版周辺部のひずみが増加する傾向がみられた。 これは、床版の変形が、170kN までは主に曲げによる (下に凸の)変形であったものが、230kN に載荷荷重を 増加させた後、載荷板外側のせん断破壊に移行し、床版 変形のモードが変化したためと考えられる。

3.5 床版の劣化度

図 - 8 に走行回数と劣化度の関係を示す。劣化度は式 (1)で示す活荷重たわみによる劣化度 D_{δ} を用いた。この D_{δ} が1 に達すると,床版の使用限界状態となるとされ ている¹⁾。補強後の劣化度はプレートを考慮した値を用 いた。

$$D_{\delta} = \frac{W - W_0}{W_c - W_0} \tag{1}$$

ここに、

W:活荷重たわみの計測値
W₀: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

補強供試体は、130kN、140kN の載荷荷重では劣化度 はほとんど進行していない。170kN の繰返しに対しても 劣化度は緩やかな増加であった。230kN に増加させると 劣化度は急激に増加し、劣化度が 1.0 を超えた後、劣化 度の増加が顕著となり破壊に至っていることからプレー ト補強床版についても、たわみによる劣化度の評価が有 効であると考えられる。一方、補修供試体は、140kN ~ 170kN の繰返しに対して劣化度は緩やかに増加し、 200kN に増加させると劣化度は急激に増加し破壊に至っ た。表 - 4 に補修供試体に対する補強供試体のたわみの 低減率を示す。プレート補強を行うことによって概ね 30%程度のたわみ低減効果があった。

3.6 プレート補強による延命効果

松井らが提案している式(2)に示す RC 床版の S-N 関 係式²⁾を適用して、プレート補強による延命効果を算 出した。ここで、Psx は母床版のみの評価とした。





図-4 補強供試体(増厚+プレート)破壊時状況



図-5 補修供試体(増厚のみ)破壊時状況



図-6 走行回数と中立軸深さ(補強供試体)



Ec = 210000 + 900 (σck - 300) dm,dd:引張側主筋、配力筋の有効高さ(cm) Cm,Cd:主筋、配力筋のかぶり厚さ(cm)

繰返し変動荷重に対してマイナー則が適用できるもの して,各荷重ステップでの載荷回数を一定の評価荷重 P_0 に対する換算した式(3)で示す累積等価載荷回数 N_{eq} を算定した。ここに, n_i は荷重 P_i での載荷回数である.

$$N_{eq} = \sum_{i=1,j} \left(n_i \cdot \left(\frac{P_i}{P_0} \right)^{\frac{1}{0.07835}} \right)$$
(3)

表 - 5 にプレート補強有無による延命効果³⁾を示す。 ここでは、150kN 一定載荷に換算した破壊回数を示して いる。本結果より、補強を実施していない補修供試体に 比べ、プレート補強した補強供試体は、約14 倍の延命 効果があると推定される。

4.まとめ

プレートで補強した RC 床版は、無補強床版、連続繊 維シート補強床版と同様、押し抜きせん断破壊によっ て終局に至った。

補強供試体の中立軸深さ、プレートひずみは、輪荷重 走行試験中安定した挙動を示し、プレートによる補強 効果が継続的に確認されたが、破壊直前には急激な変 動がみられた。

輪荷重走行によって床版の劣化度は漸増し、概ね 1.0 を超過すると破壊に至ることが確認され、プレート補 強供試体でも、たわみによる劣化度の評価が有効であ ることが確認された。

本実験では、プレートで補強することによって補修供 試体に比べ、約14倍の延命効果が確認された。

謝辞

本研究を行うにあたり、土木研究所寒地土木研究所殿の ご協力を頂いた。ここに記し、謝意を表します。

参考文献

1)松井,前田: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

2)松井繁之:道路橋 RC 床版の疲労設計法試案,平成 元年度科学研究費補助金研究成果報告書,1990.3

3)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



図-8 走行回数と劣化度

表-4	たわみの低減率(荷重 130kN)	۱
13 7		,

補修供試体			たわみ低減率	
活荷重たわみ(mm)		少化度		
Wo	Wc	実験₩	为化反	実験値
0.822	1.766	1.68	0.91	(W-Wr) /W
補強供試体			32.1%	
活荷	活荷重たわみ(mm) <i>少化度</i>		計算値	
Wor	Wcr	実験 ⊮r	力心反	(wc-wcr)/wc
0.822	1.278	1.14	0.59	27.6%

*補修供試体に対する補強供試体のたわみ低減率

表-5 プレート補強有無による延命効果

	補修供試体	補強供試体
実験での破壊回数(回)	318,000	323,000
150kN 換算破壊回数(回)	1,256540	17,367,110
比率	1.0	13.8