

論文 CFRP プレートを用いた床版の疲労耐久性向上に関する研究

加藤 貴久^{*1}・久部 修弘^{*1}・松井 繁之^{*2}・三田村 浩^{*3}

要旨:本研究はCFRPプレートにより補強されたコンクリート床版の疲労耐久性向上効果を把握することを目的として、既往の研究より薄い16cmの床版を対象とし、さらにCFRPプレート補強量を低減させた供試体で輪荷重走行試験を実施した。実験の結果、平均断面剛性(EA)52kN/mmの補強量で、無補強供試体に比べて約11倍以上の延命効果が確認された。

キーワード: CFRPプレート, 疲労耐久性, 輪荷重試験, 炭素繊維, RC床版

1. はじめに

近年、車両交通荷重の規制緩和による車両の大型化や、塩害・凍害等の外的要因による劣化に起因する道路橋床版の損傷事例が報告され、既設RC床版の疲労耐久性能の向上対策が求められている。この対策方法の一つとして、炭素繊維シートを用いて疲労耐久性の向上効果を確認した研究¹⁾はこれまで多数実施されているが、CFRPプレートを用いた実験事例はほとんどない。そこで、本研究ではCFRPプレートを用いたRC床版の疲労耐久性能向上効果について実験的研究を行った。

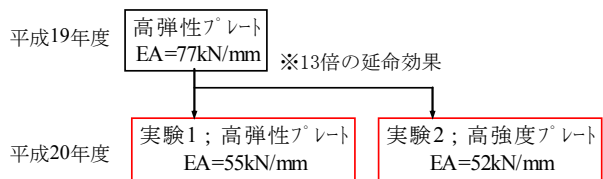
CFRPプレート接着工法は、工場ですべてCFRP硬化板として製品化されたものを施工時にパテ状の接着剤でコンクリート表面に貼り付けるだけの工法であり、炭素繊維シート接着工法に比べ、工期短縮や、含浸作業を必要とするシート工法より品質が安定するといった特徴を有している。また、床版補強の場合、維持管理上の観点から、床版下面の経過観察や床版上面からの浸透水対策上、極力コンクリート躯体面を露出できる補強方法が望ましいと考えられる。炭素繊維シート補強の場合、シート幅250mmをシート中心間隔で350~400mm程度で格子状に貼り付ける事例が多く、この場合コンクリートの露出面は100~150mm角と非常に小さい。一方、これに対して、CFRPプレート補強の場合、炭素繊維シートに比べ繊維体積率が大きいこと、配置間隔をあけることが可能となり、補強後のコンクリート露出面を大きく取ることが可能となる(写真-1)。

図-1に本研究の検討フローを示す。H19年度は、床版厚180mmの床版を対象として、高弾性プレートを350mm間隔で配置(EA=77kN/mm)したもので無補強床版に比べ、約13倍の延命効果を確認している²⁾。

本研究(H20年度)では、床版厚160mmの床版を対象として、さらに経済性を考慮し、補強量を低減させたもので延命効果を確認した。



写真-1 CFRPプレート補強適用事例



(EA: 断面剛性=CFRPのヤング係数×断面積/貼付間隔)

図-1 検討フロー

表-1 使用材料

コンクリート	圧縮強度 40.14N/mm ²	
	弾性係数 26,989N/mm ²	
CFRPプレート	実験1(HM412)	実験2(GM1012)
種類	高弾性	高強度
厚み/幅(mm)	1.2/40	1.2/100
公称断面積(mm ²)	48.0	120.0
引張強度(N/mm ²)	1,200	2,400
弾性係数(N/mm ²)	450,000	170,000
エポキシ樹脂 硬化物性 (プレート貼付用)	曲げ強度 50N/mm ² 以上	
	引張せん断強度 10N/mm ² 以上	
	圧縮強度 70N/mm ² 以上	
	圧縮弾性率 4000N/mm ² 以上	

*1 三菱樹脂(株)環境資材事業部(正会員)

*2 大阪工業大学 教授 工博(正会員)

*3 土木研究所寒地土木研究所 寒地構造チーム 博(工)(正会員)

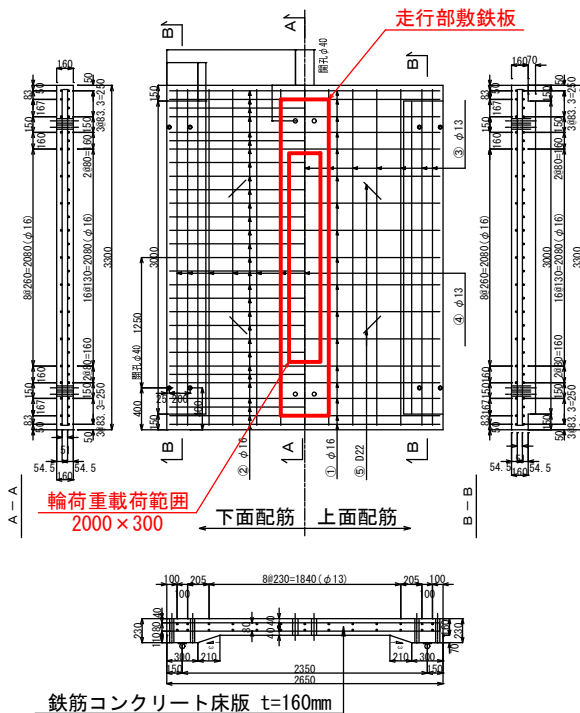


図-2 供試体

2. 実験概要

2.1 RC 床版

図-2 に供試体図を示す。供試体寸法は、2650mm×3300mm とし、支間長 2350mm，ハンチ有りとした。床版厚みは S30 年～40 年代に多く施工され、補修補強が必要とされる厚さ 160mm の床版とした。配筋は、主筋上側 φ16@260 下側 φ16@130，配力筋 φ13@230 とし、コンクリート強度は、目標 40N/mm² とした。供試体の輪荷重走行試験時のコンクリート圧縮強度は、40.14N/mm² であった。

2.2 CFRP プレート補強供試体

表-1 に使用した材料を示す。CFRP プレートは、高弾性 CFRP プレート（幅 50mm、厚さ 1.2mm）による補強²⁾において床版厚さ 180mm を対象とした 350mm 格子間隔の実験では、格間からのコンクリートの抜け落ち等の破壊は生じていないことから、図-3 に示す橋軸方向断面における床版の押し抜きせん断線による影響範囲を目安にして、CFRP プレートの幅、間隔、種類を変えることで、経済性を考慮した補強量とした。

試験供試体は無補強 1 体、補強 1 体とし、CFRP プレートの中心間距離で橋軸方向に 350mm，橋軸直角方向に 450mm の格子状配置とした。尚、橋軸方向の配置間隔を狭くしたのは、補強対象となる既設床版の配力筋量が少ないことを考慮し、床版の異方性改善を目的としたものである。

本研究では、図-4 に示す荷重フローの通り、一体の補強供試体で 2 ケースの荷重を行った。

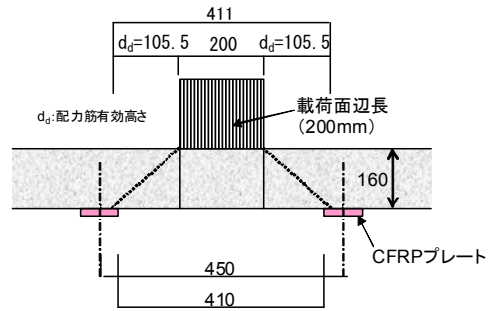


図-3 押し抜きせん断線による影響

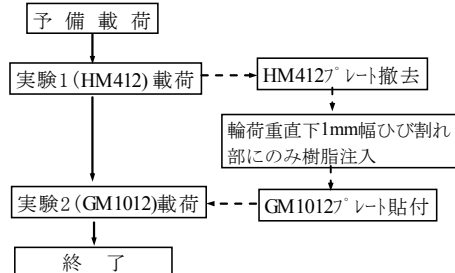


図-4 荷重フロー

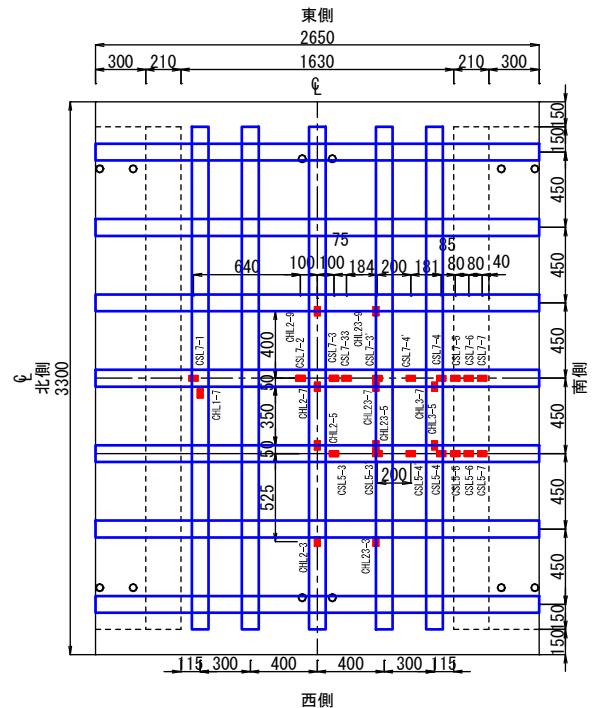


図-5 CFRP プレート配置とひずみゲージ位置

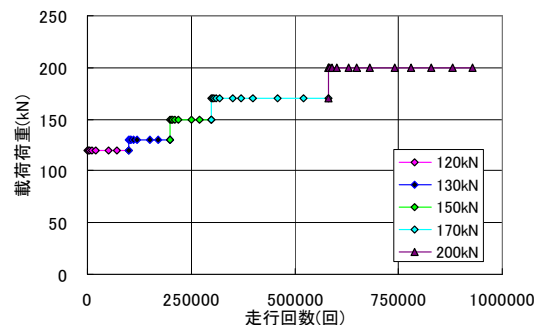


図-6 荷重プログラム

補強供試体の実験1は、高弾性CFRPプレート(幅40mm, 厚さ1.2mm)を用い、断面剛性を、橋軸方向62kN/mm, 橋軸直角方向48kN/mm(平均55kN/mm)とし、実験2は、高強度CFRPプレート(幅100mm, 厚さ1.2mm)を用い、橋軸方向58kN/mm, 橋軸直角方向45kN/mm(平均52kN/mm)とした。2ケースの補強量は、同程度の断面剛性となるようにした。図-5に実験1と2のCFRPプレート配置及びひびみゲージ位置を示す。

2.3 試験方法

载荷には、クランク式の輪荷重試験機を用いた。供試体は2辺単純支持、2辺弾性支持とし、スパン中央部の载荷用敷鉄板上の幅300mm, 長さ2000mm範囲に鉄輪を往復させて载荷した(図-2中に表記)。予備载荷として、無補強状態で、120kN, 130kNでそれぞれ10万回, 150kNで2千回, 合計20.2万回走行させ、劣化度0.5程度まで载荷し、その後CFRPプレートによる補強を施した。CFRPプレート補強後の载荷プログラムは図-6に示す漸増载荷方法とした。

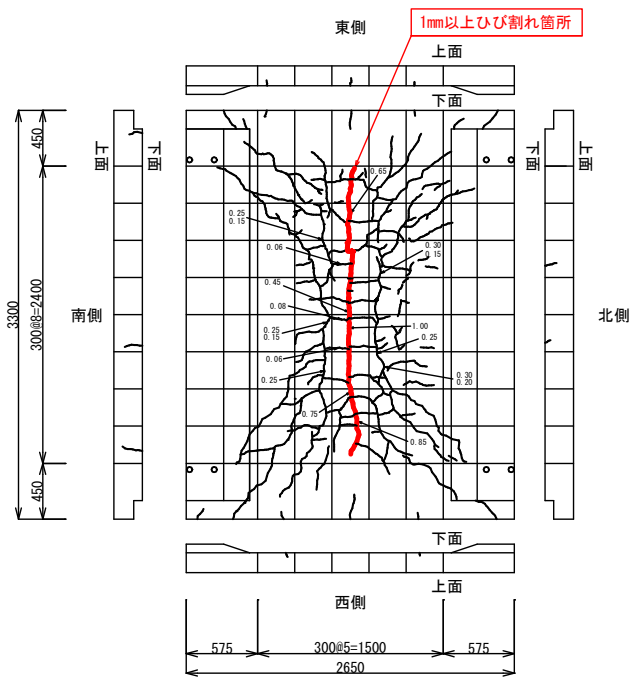


図-7 予備载荷後のひび割れ図

3. 試験結果及び考察

3.1 予備载荷

予備载荷後の床版下面には図-7に示すように、亀甲状の2方向ひび割れが生じた。輪荷重直下の橋軸方向には、幅1mm以上の大きなひび割れが確認され、周辺のひび割れ幅は、0.15mm~0.3mm程度であった。予備载荷終了時(走行回数合計20.2万回)の活荷重たわみは、4.06mmであり、劣化度は0.54であった。既往の研究報告³⁾では初期損傷の劣化度は0.5程度であることから、ここで予備载荷を終了した。

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されている⁴⁾。

$$D_\delta = (W - W_0) / (W_c - W_0) \quad (1)$$

ここに、 W : 活荷重たわみ計測値

W_0 : 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

3.2 本载荷

図-8に無補強供試体とCFRPプレート補強供試体の走行回数と活荷重たわみ変化を示す。

3.2.1 無補強供試体

無補強供試体は200kNに荷重を上げたところで急激に活荷重たわみが増加し、走行回数約41.8万回で押し抜きせん断破壊に至った。

3.2.2 実験1(HM412)補強供試体

载荷初期の120kN時(走行回数5万回終了時点)に配力鉄筋方向中央のCFRPプレートが部分的に剥離した。これは、予備载荷で1mm以上のひび割れが入っていた部

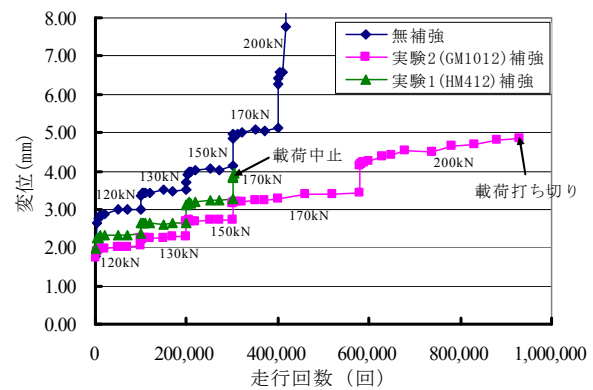


図-8 走行回数と活荷重たわみ変化

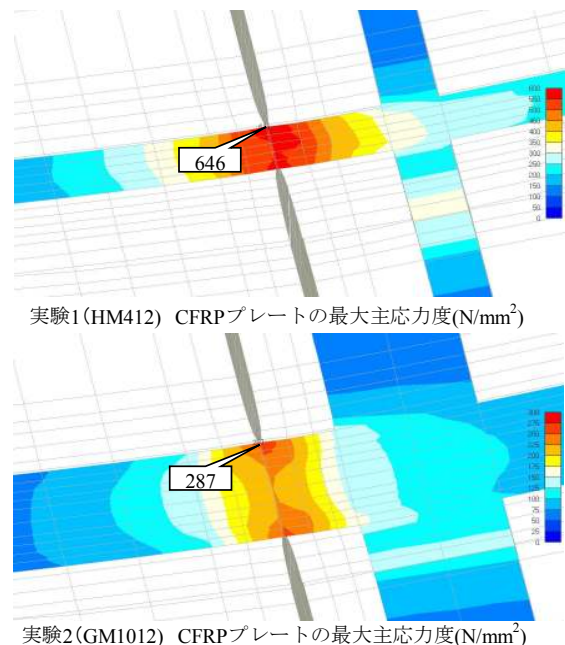


図-9 CFRPプレート主応力比較(解析結果)

分の直下であったため、ひび割れの動きに追従できずにこの CFRP プレートだけ早期に剥離が進展したと考えられる。その後、荷重が進むにつれ主鉄筋方向の CFRP プレートの部分的な剥離が進行した。150kN 時に主鉄筋方向の CFRP プレート (2ヶ所) が大きく剥離し、170kN に荷重を上げた時点で、1 箇所剥離した主鉄筋方向の CFRP プレートと反対側の CFRP プレートがせん断破壊したので、走行回数 30.5 万回で荷重を終了した。尚、この時点で床版たわみの劣化度 (前述 3.1 参照) は 0.67 まで進行していた。

3.2.3 CFRP プレート補強仕様の解析

実験 1 による補強において、配力鉄筋方向はひび割れ直下の中央の 1 本のみ早期に剥離したが、他の CFRP プレートは比較的剥離が進行しなかった。それに対して、主鉄筋方向は剥離発生後、剥離が進行し、その範囲が漸増した。これは、実床版ではひび割れ部の動きが大きく、1 枚あたりの断面剛性の大きい CFRP プレートではひび割れ部界面に発生するせん断応力が大きく発生したためではないかと推察されることから、ひび割れを考慮した解析を行った。

図-9 に 100kN の輪荷重を床版中央に作用させた際の荷重点直下の主鉄筋方向 CFRP プレートの最大主応力を示す。CFRP プレート応力は、実験 1(HM412)と実験 2(GM1012)で比較を行っている。解析は、FEMAP with NX NASTRAN を用いた静的弾性解析とし、引張側コンクリート無視とした断面で中立軸位置までひび割れ深さがあると仮定し、実際の床版のひび割れ状況を参考にしたひび割れ配置モデルを使用した。コンクリートと CFRP プレートの境界条件は、コンクリートと CFRP プレート間に樹脂層として厚さ 2mm、弾性係数 7911N/mm² のソリッド要素を設け、コンクリート要素並びに CFRP プレート要素のどちらも剛結させ、弾性変形のみ生じ、剥離は起こらないものと仮定した。使用要素タイプは、CFRP プレートをプレート要素、その他をソリッド要素とし、総要素数は約 62,000、総節点数は約 70,000 とした。この解析結果によると、プレート種類の差による CFRP プレートの最大発生応力の差は、約 2.3 倍となる。実験 1 では、断面剛性の大きな高弾性プレートを用い、接着幅が狭いため、ひび割れ界面での発生応力が大きく出やすくなったものと考えられる。

3.2.4 実験 2(GM1012) 補強供試体

3.2.3 の解析結果から、単位長さあたりの補強量は実験 1 とほぼ同様とし、CFRP プレートのヤング係数が低い高強度を、かつプレート幅が広いものを選択することによって、CFRP プレート応力の低減を行い、界面発生せん断応力の緩和を図ることとした。

実験 2 による補強は、実験 1 で補強した CFRP プレ-

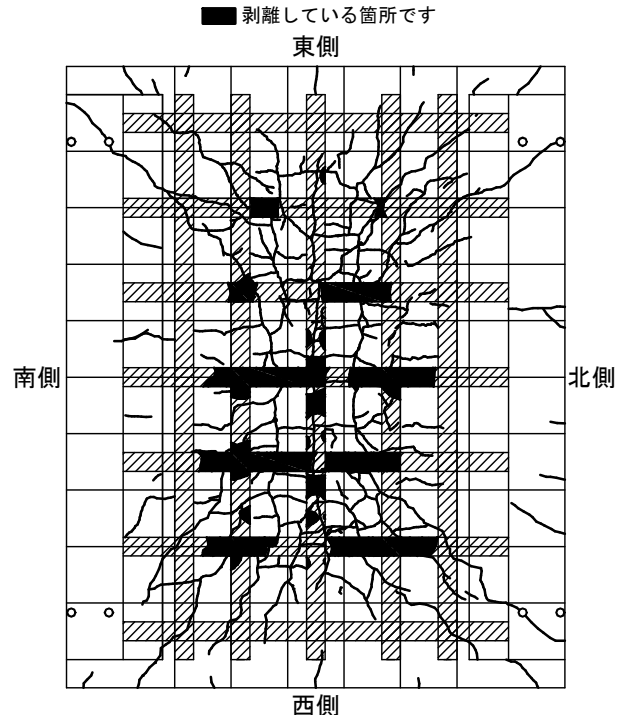


図-10 CFRP プレート剥離・ひび割れ状況 (実験 2 補強荷重終了時)

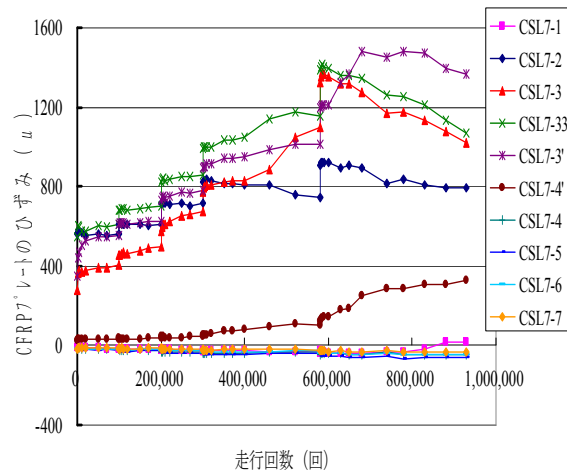


図-11 橋軸直角方向 CFRP プレートひずみ (実験 2 補強)

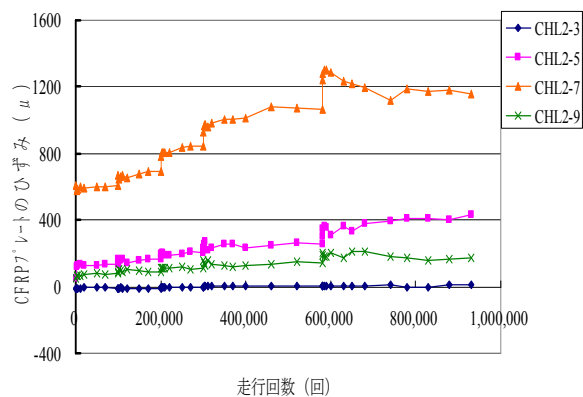


図-12 橋軸方向 CFRP プレートひずみ (実験 2 補強)

トを全て撤去し、輪荷重直下の損傷が激しいひび割れ幅 1mm 以上の箇所のみエポキシ樹脂注入を施した後に、高強度 CFRP プレートによる補強を行った。エポキシ樹脂注入を施したひび割れ(約 2.4m)については、図-7 に併記している。

载荷は実験 1 と同様、図-6 に示す载荷プログラムで行なった。载荷結果は、200kN に荷重を上げた後、活荷重たわみの漸増傾向がみられたが、概ね安定した挙動を示し、合計走行回数 93 万回まで破壊しなかったため、その時点で载荷終了とした。

図-10 に载荷終了後の CFRP プレート剥離状況とひび割れ図を示す。CFRP プレートの剥離は見られたものの床版は押し抜きせん断破壊に至っていない。CFRP プレートの剥離は打音検査により各载荷段階で確認を行った。最初の剥離は、150kN 载荷 10 万回走行終了時点で供試体中央部付近に貼り付けた橋軸直角方向のプレート 2 枚で確認され、その後 200kN に荷重を増加させた時点で橋軸直角方向に貼り付けた CFRP プレートの剥離が部分的に進行し、载荷回数が増加するに従い剥離箇所が漸増した。一方、橋軸方向に貼り付けた CFRP プレートの剥離進行は橋軸直角方向に比べ、少ない結果となった。剥離部分は、橋軸直角方向では、約 3.8m(貼付長さの約 25%)、橋軸方向では、約 1.2m(貼付長さの約 8%)程度であった。この原因については検討中である。

図-11 に CFRP プレートの橋軸直角方向ひずみを、図-12 に橋軸方向のひずみを示す。橋軸直角方向に貼り付けた CFRP プレートは、走行回数 60 万回(200kN 载荷時)において中央部で剥離が進行したことで応力負担が低下し、剥離が生じていない端部での応力負担が増加していることが分かる。橋軸方向については、供試体中央部で若干剥離が進行したことでひずみが低下しているものの载荷終了まで大きな低下を示さなかった。

3.3 CFRP プレート補強によるたわみの低減効果

CFRP プレートを床版下面に接着することにより活荷重たわみが低減する。表-2 に予備载荷終了時の活荷重たわみを示す。活荷重たわみ低減率は、予備载荷時に比べ実験 1 では 20.7% $\{1-(2.37/2.99)\} \times 100=20.7$ 、実験 2 では 32.1% $\{1-(2.03/2.99)\} \times 100=32.1$ であった。実験 1 では、CFRP プレート貼付け前にひび割れ注入を施していない。実験 1, 2 の CFRP プレートの補強剛性はほぼ等しいので、このたわみの差がエポキシ樹脂注入による効果と考えられるが、実験 2 の場合の方が荷重载荷の累積回数が多いため、今後検討を加える必要がある。

3.4 走行回数と劣化度

実験 2 供試体の走行回数と劣化度を図-13 に示す。無補強供試体は、200kN に増加させると劣化度は増加し

表-2 活荷重たわみ(荷重 120kN:10 万回走行時)

	活荷重たわみ(mm)		
	W_0	W_C	W
無補強	1.18	5.03	2.99
実験 1	1.18	3.56	2.37
実験 2	1.18	3.61	2.03

W_0 : 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

W : 活荷重たわみ計測値

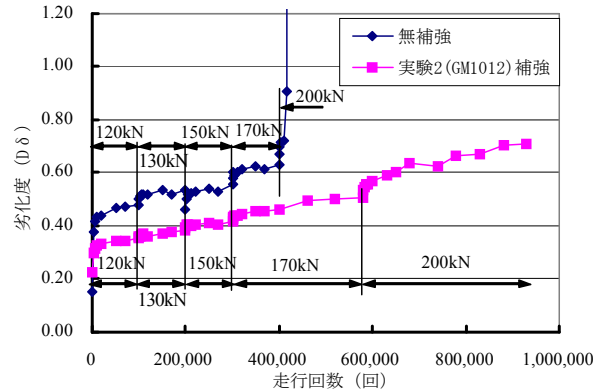


図-13 走行回数と劣化度

表-3 実験 2 (GM1012) 補強有無による延命効果 (载荷終了時点)

	無補強	実験 2	比率
実験の破壊回数(回)	418,200	930,000	—
150kN 換算破壊回数(回)	1,326,085	15,200,850	11.5 以上
$P_{sx}(kN)$	315.96	395.14	17.4

※余寿命増加率： $(395.14/315.96)^{12.76}=17.4$

200kN 载荷にて劣化度 1.0 を超えた後に破壊に至っている。実験 2 供試体は、载荷荷重 200kN、走行回数合計 93 万回で载荷終了時の活荷重たわみは 4.85mm で、劣化度は 0.71 であり破壊にまで至っていない。

3.5 実験 2 (GM1012) 補強による延命効果

繰返し変動荷重に対してマイナー則が適用できるものとして、各荷重ステップでの载荷回数を一定の評価荷重 P_0 に対する換算した式(2)で示す累積等価载荷回数 N_{eq} を算定した。ここに、 n_i は荷重 P_i での载荷回数である。

$$N_{eq} = \sum_{i=1,j} \left(n_i \cdot \left(\frac{P_i}{P_0} \right)^{\frac{1}{0.07835}} \right) \quad (2)$$

表-3 に実験 2 (GM1012) 補強の無補強供試体に対する延命効果を示す。ここでは、150kN 一定载荷に換算した破壊

回数を示している。本結果より、無補強供試体に比べ、高強度 CFRP プレート補強した供試体は、荷重を終了した時点で約 11 倍の延命効果があると推定される。

3.6 実験 2 (GM1012) 補強後の S-N 関係の推定

連続繊維シートを用いた輪荷重走行試験の結果から、松井らは連続繊維シートで補強された床版押し抜きせん断耐力 (P'_{sxi}) 評価式(3)⁵⁾ を提案している。

$$\text{Log} (Pr/P'_{sxi}) = -0.07835 \cdot \text{Log} N + \text{Log} 1.520 \quad (3)$$

$$P'_{sxi} = 2B(f_v \cdot X_m + f_t \cdot C_m) + 2\{0.25f_t \cdot C_d(a + 2d_m)\}$$

$$B = b + 2d_d$$

ここに、

N : 荷重回数

Pr : 荷重荷重

P'_{sxi} : はり状化した床版の押し抜きせん断耐力

B : 荷重に対する床版の有効幅

f_v : コンクリートのせん断強度 (N/mm²)

$$(f_v = 0.656 \cdot f_c^{0.606})$$

f_t : コンクリートの引張強度 (N/mm²)

$$(f_t = 0.269 \cdot f_c^{2/3})$$

f_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

a, b : 荷重板の主筋方向、配力筋方向の辺長(mm)

X_m, X_d : 引張側コンクリートを無視した場合の、主筋断面、配力筋断面の中立軸深さ(mm)

d_m, d_d : 引張側主筋、配力筋の有効高さ(mm)

C_m, C_d : 主筋、配力筋のかぶり厚さ(mm)

この P'_{sxi} を用いた S-N 線式を図-14 に示す。この図には、これまでに行われた高強度炭素繊維シート、中・高弾性炭素繊維シートを、それぞれ全面もしくは格子貼り補強した床版のデータ³⁾ が併記されている。また、高弾性 CFRP プレート(幅 50mm, 厚さ 1.2mm)による格子貼りの疲労試験結果²⁾ についても図中にプロットしている。今回実施した高強度 CFRP プレート補強供試体は破壊に至っていないものの、概ね連続繊維シートの式と同様の傾向にあることが窺える。

高強度 CFRP プレートを床版下面に貼ることにより、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し得るせん断力が増加し、床版の押し抜きせん断耐力 P_{sx} が大きくなる。無補強と高強度 CFRP プレート補強の中立軸の位置及び押し抜きせん断耐力を求め、実験終了までの余寿命を計算すると表-3 に示すように 11 倍の延命効果となるが、荷重を破壊まで続けると図-14 の S-N 曲線まで耐えると予想すると、余寿命増加率は 17.4 倍程度になると計算される。

4. まとめ

(1)16cm 厚床版において、高弾性 CFRP プレートで幅が

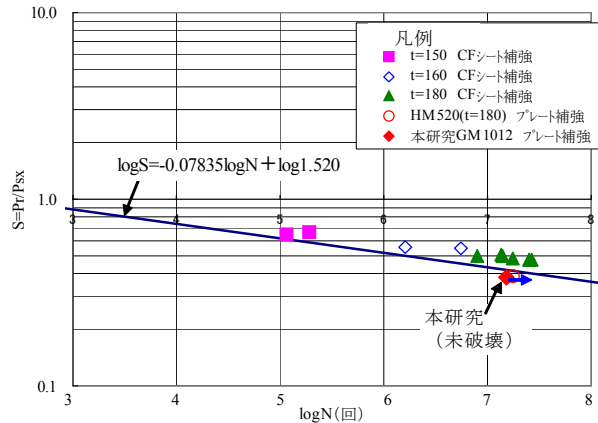


図-14 連続繊維シート評価式

狭いものを用いるよりも、同程度の断面剛性で弾性係数が低い高強度 CFRP プレートをを用いた方が、CFRP プレート界面の発生応力が緩和され疲労延命効果が期待できることが確認された。

- (2)16cm 厚床版に対して、高強度 CFRP プレートの補強量を橋軸方向 58kN/mm, 橋軸直角方向 45kN/mm として格子接着(橋軸方向 350mm 間隔, 橋軸直角方向 450mm 間隔) 補強することで概ね 11 倍以上の延命効果が確認された。
- (3)本研究の範囲内では、連続繊維シートで補強された床版押し抜きせん断耐力評価式を用いて CFRP プレート補強床版の評価も可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 例えば、星島時太郎, 坂井広道, 太田黒博文, 松井繁之: 損傷した道路床版の炭素繊維シートによる補強効果に関する実験的研究, 橋梁と基礎, vol.32, No.9, pp.23-28, 1998.9
- 2) 加藤貴久, 久部修弘, 松井繁之: 高弾性 CFRP プレートにより補強した RC 床版の疲労耐久性, 平成 20 年度土木学会北海道支部論文集, 第 65 号, E-27, 2009.1
- 3) 小林朗, 蔡華堅, 下西勝, 松井繁之: 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, コンクリート工学論文集, vol.27, No.2, pp.1513-1518, 2005.6
- 4) 松井繁之, 前田幸雄: 道路橋 RC 床版の劣化度判定の一提案, 土木学会論文集, 第 374 号/I -6, pp.419-426, 1986.10
- 5) 松井繁之編著; 道路橋床版 設計・施工と維持管理, 森北出版株式会社, 2007 年 10 月 2 日発行, pp.213-250