

報告 輪荷重試験機を用いた中央載荷・偏心載荷による CFRP プレート補強 RC 床版の疲労耐久性に関する研究

加藤 貴久^{*1}・細川 真利^{*2}・西 弘明^{*3}・渡辺 忠朋^{*4}

要旨：本研究では、CFRP プレートを既設 RC 床版下面に接着する補強工法による、RC 床版の疲労耐久性の向上を確認することを目的に、実物大 RC 床版を用いて輪荷重走行試験を実施した。補強材と既設コンクリート間の接着面に作用する付着応力は輪荷重の走行位置によって変化することを考慮し、本試験においては、床版中央部の範囲と支点寄りに偏心させた範囲の 2 通りの走行範囲による輪荷重走行試験を実施した。実験の結果、輪荷重の走行位置に関わらず、RC 床版下面への CFRP プレートの接着工法によって RC 床版の疲労耐久性が大幅に向上することが確認された。

キーワード：RC 床版, CFRP プレート, 偏心載荷, 疲労耐久性, 輪荷重走行試験

1. はじめに

既設鉄筋コンクリート床版（以後、RC 床版と呼ぶ）の疲労破壊に対する補強工法として、様々な補強方法が提案・実用化されてきた。しかしながら、多く施工実績を有する床版下面への鋼板接着工法においても、浸透した水が RC 床版と鋼板の間に滞水することで疲労耐久性を大幅に低下させるなど、補強効果の確実性に問題を残しているのが現状である。近年、炭素繊維シート（以後、CF シートと呼ぶ）やアラミド繊維シートを格子貼りにすることで排水効果が期待出来る接着工法が実用化され、施工事例が増加しているものの、床版下面を比較的多く覆ってしまうため補強後の既設床版の変状確認が難しい点が指摘されている。

一方、本研究で対象とする炭素繊維強化プラスチック板（以後、CFRP プレートと呼ぶ）を RC 床版下面に接着する工法は、写真-1 のように既設床版面の露出を大きく確保できることから、橋面からの浸透水の滞水を防ぐとともに、補強後の既設床版面の経過観察が容易となる利点を有する。近年では、本工法で補強された RC 床版の疲労耐久性に関する研究報告が増えつつある^{1),2)}。

本研究では、CFRP プレートの接着補強による RC 床版の疲労耐久性の向上を確認することを目的に、輪荷重走行試験を実施した。RC 床版の断面力分布は、同じ荷重強度の輪荷重であっても輪荷重の走行位置によって変化する。これに伴い、補強材と既設コンクリート間の接着面に作用する付着応力の大きさと分布も異なる。実際の交通荷重は必ずしも主桁間中央を走行するとは限らないことから、走行位置による補強効果の確認が必要と考えられる。また、偏心載荷した RC 床版の静載荷による

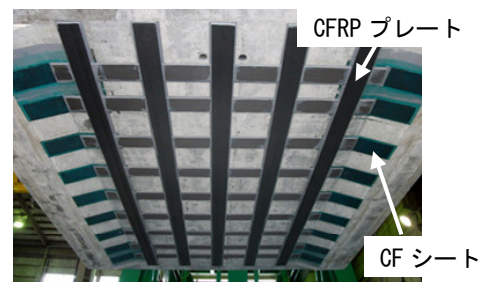


写真-1 補強供試体下面

表-1 実験供試体

供試体	載荷位置	補強の有無	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
Case1	中央載荷	無補強	43.23	25.4
Case2		CFRP 下面補強	45.03	27.3
Case3	偏心載荷	無補強	43.82	23.6
Case4		CFRP 下面補強	43.04	26.1

押抜きせん断耐力の評価³⁾や RC 梁に CFRP 補強を施し偏心載荷した実験⁴⁾は報告されているものの、下面補強した RC 床版に対する輪荷重走行試験を行った報告は少ない。そこで本研究では、床版中央部の範囲と、支点寄りに偏心させた範囲の 2 通りの走行範囲による輪荷重走行試験を実施して、CFRP プレートの接着工法による疲労耐久性の向上効果について確認した。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

実験供試体は、損傷事例が多く報告されている昭和 40 年代前後に架設された床版の補強を想定して、昭和 39

*1 三菱樹脂インフラテック（株） 防水補強部（正会員）

*2（株）北武研究所 技術部 修士(工学)

*3（独）土木研究所寒地土木研究所 寒地構造チーム 上席研究員 博士(工学)（正会員）

*4 北武コンサルタント（株） 取締役副社長 博士(工学)（正会員）

表-2 使用材料

鉄筋 (SR235)		
配筋方向	直角方向	走行方向
鉄筋径(mm)	φ16	φ13
配置間隔(mm)	上面側	230
	下面側	
補強材		
補強材種別	CFRPプレート	CFシート
幅(mm)	100	125
厚さ(mm)	1.2	0.333×2層
ヤング係数(kN/mm ²)	170	245
引張強度(N/mm ²)	2400	3400
配置間隔(mm)	330	330
補強剛性EA(kN/mm)	62	62
エポキシ樹脂硬化物性(CFRP接着樹脂)		
圧縮強度	50N/mm ² 以上	
圧縮弾性率	1000N/mm ² 以上	
引張せん断強度	10N/mm ² 以上	

■配筋ひずみゲージ ■主鉄筋ひずみゲージ ■CFシート ■CFRPプレート ■輪荷重走行範囲

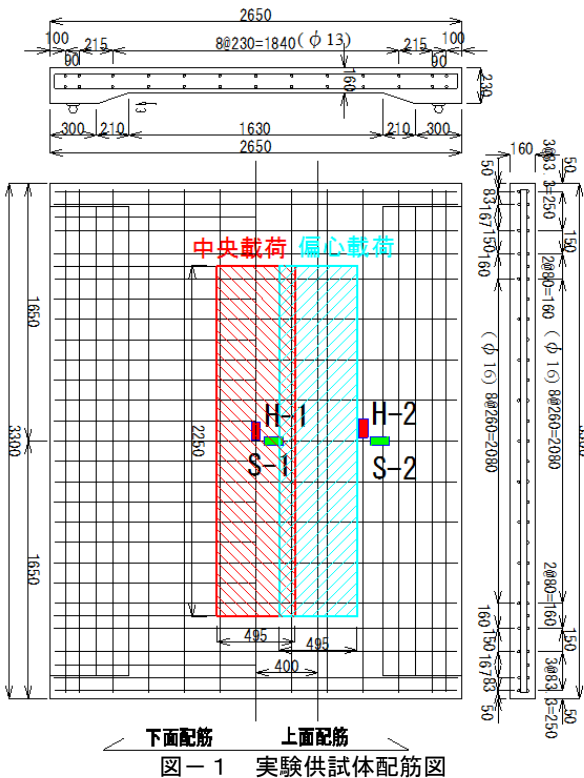


図-1 実験供試体配筋図

年に施工された実橋のRC床版をモデルとした。

供試体は、表-1に示す4体とし、中央荷重及び偏心荷重それぞれに無補強供試体と補強供試体を製作した。補強材、鉄筋、エポキシ樹脂の材料特性を表-2に示す。図-1に供試体寸法及び配筋図を示す。

補強供試体のCFRPプレートの配置図を図-2及び図-3に示す。補強供試体について、既往の研究⁴⁾では、ハンチ隅角部(ハンチ先端の凹部)においてCFシートの剥離が発生すると同時に、この位置から荷重点に向か

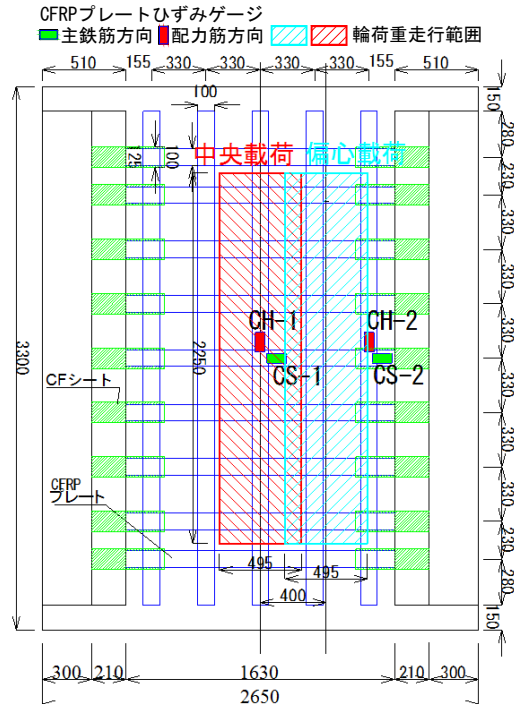


図-2 CFRPプレート及びCFシート配置図

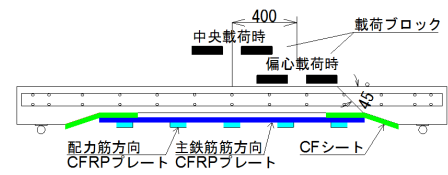


図-3 走行直角方向断面図

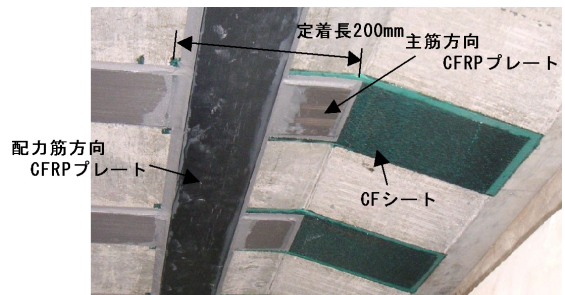


写真-2 ハンチ部補強ディテール

うせん断ひび割れが発生したことが報告されている。このことから、ハンチ部分の貼り付けディテールは図-3及び写真-2に示すようにCFRPプレートと同剛性となるCFシートと組み合わせる仕様とした。

2.2 実験方法

荷重プログラムを図-4に示す。荷重プログラムは、全ての供試体で同一とした。補強供試体は、補強前に荷重150kNを1千回まで走行させる予備荷重を実施し、初期損傷を与えた。下面のひび割れは走行方向に1mm程度の大きなひび割れが3本程度発生し、微細な0.1mm~0.3mm程度のひび割れが版全体に亀甲状に発生した。

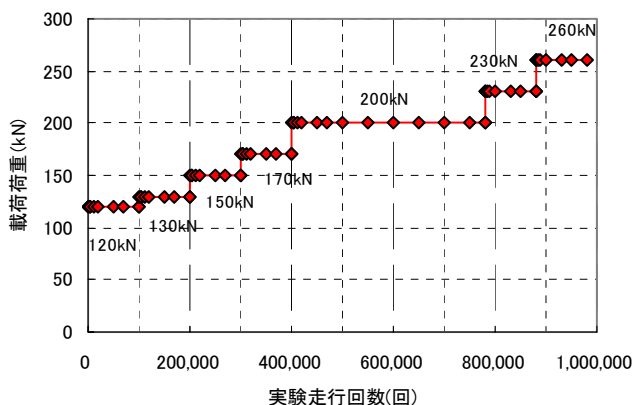


図-4 荷重載荷プログラム



写真-3 母床版の損傷状況

Case 4 供試体の方が、Case2 供試体よりもひび割れは多く観察された。予備載荷終了後にコンクリート面をケレンし、ひび割れ幅 1 mm 以上の箇所のみ樹脂注入を行い、その後、補強材を接着した。なお、予備載荷終了時のたわみによる劣化度を算出すると、Case2 供試体は 0.5 程度、Case 4 供試体は 0.4 程度であった。劣化度の算出には、式(1)に示す活荷重たわみによる劣化度 D_{δ} を用いた⁵⁾。

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

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である。

3. 実験結果

3.1 破壊に至るまでの損傷進展

Case1 供試体は、200 kN に荷重を上げたところで急激に活荷重たわみが増加し、総走行回数約 41.0 万回で押抜きせん断破壊に至った。

Case2 供試体は、荷重 170 kN までは補強材の剥離は見られず、荷重 200 kN の 1 万回走行終了後に橋軸直角方向の CFRP プレートで僅かに剥離が確認された。その後、走行回数の増加に伴って剥離範囲が漸増し、荷重 260 kN の走行回数 1 千回で押抜きせん断破壊に至った。この際、ハンチ部が破壊の起点となることはなかった。補強供試体の下面側コンクリート露出面の損傷状況の一例を写真-3 に示す。本工法では、コンクリート露出面を広く確保できていることから、目視で損傷状況の推移を容易に観察することが出来た。

Case3 供試体は、Case1 と同様 200 kN に荷重を上げたところで活荷重たわみが急増し、総走行回数 41.5 万回で押抜きせん断破壊で終了した。

Case4 供試体は、荷重 200 kN の走行回数 10 万回で補強材に剥離が確認された。Case4 供試体は、Case2 供試体に比べてたわみ量が小さくひび割れの開閉量も小さいため剥離まで時間を要したと考えられる。その後、荷重 230 kN の走行回数 3.6 万回で押抜きせん断破壊に至った。



写真-4 ハンチ部の状況 (Case4 供試体 破壊直前)

3.2 載荷終了時の破壊状況

打音検査と目視観察により確認した実験終了後の下面のひび割れ状況を図-5 に示す。凡例のように、各変状部位について色分けした。

Case1, 3 供試体を比較すると、ダウエル効果によって剥離剥落範囲が異なっている。Case1 供試体は左右対称であるのに対し、Case3 供試体は右側のハンチ部分に集中し、ハンチ内部にまで剥離剥落範囲が及んでいた。

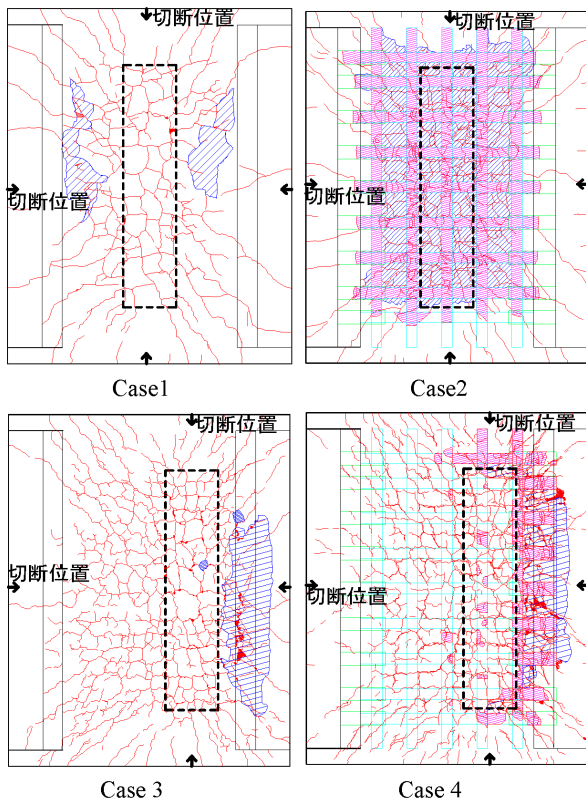
Case2, 4 供試体を比較すると、無補強の場合と同様に剥離範囲が異なった。Case2 供試体は、コンクリートと CFRP プレートが接着されたまま、かぶりコンクリートの表層がひび割れる形態で、補強材が剥離した。その範囲は床版全体に及び、膜のような状態となった。

一方、Case4 供試体は、ハンチ部に集中して剥離が生じた。ただし、図-5 中に示したハンチ部全体に、補強材の剥離が進展したのは、床版破壊時直前であった。Case4 供試体の破壊直前の損傷状況を写真-4 に示す。実験時の経過観察から、破壊時直前までは、ハンチ隅角部で、かぶりコンクリートの表層を伴いながら局所的な補強材の剥離が見られたものの、最終的には補強材の定着が完全に喪失し押抜きせん断破壊に至った。なお、Case2, 4 供試体共に補強材の破断は見られなかった。

3.3 走行回数

本実験においては、輪荷重走行試験における載荷荷重を漸増階段状載荷としたことから、一定荷重の等価走行

— クラック [] 輪荷重走行範囲 ▨ コンクリート剥離範囲
▨ コンクリート剥落範囲 ▨ CFRPプレートとCFシートの剥離範囲



図ー5 実験終了後の供試体下面のひび割れ状況

回数に換算して、補強による疲労耐久性の増加量を評価する。等価走行回数は、マイナー則に従うと仮定すると式(2)で与えられる⁵⁾。本研究はRC床版の疲労寿命と実用性を検証することから、松井らが提案⁵⁾するS-N曲線の傾きの逆数 m には 12.7 (1/0.07835) を適用する。偏心荷重も同様の式で算出し 4 体の比較を行った。表ー3に、式(2)により算出した等価走行回数を示す。

$$D_{II} = \sum \left(\frac{P_i}{P} \right)^m \cdot n_i \quad (2)$$

ここに、 D_{II} : 等価走行回数 (回)、 P_i : 荷重 (kN)、 P : 基準荷重 ($P=150\text{kN}$)、 m : S-N 線図の傾きの逆数 ($m=12.76$)、 n_i : 荷重 P_i の走行回数 (回) である。

無補強供試体に対する荷重位置による影響を見ると、Case1 供試体は、荷重 200 kN の 1,000 回、Case3 供試体は、荷重 200 kN の 1,500 回でたわみが急増し、破壊に至った。輪荷重の荷重位置が支点に近い Case3 供試体は、中央荷重の Case1 供試体に比べて同一荷重時でせん断力は大きくなるが、せん断耐力も増加することで、同程度の疲労耐久性を有する結果になったものと考えられる。

補強効果を見ると、中央荷重の Case1, 2 供試体では、CFRP プレートで補強することによって約 40 倍の延命効果が得られた。一方、偏心荷重の Case3, 4 供試体では、約 20 倍の延命効果が得られた。上記の通り、輪荷重の走

表ー3 実験時の実走行回数と 150kN 等価走行回数

供試体	実験時(回)	150kN 換算時(回)	延命効果
Case1	4.10×10^5	1.01×10^6	39.7 (Case2 / Case1)
Case2	8.81×10^5	4.00×10^7	
Case3	4.15×10^5	1.21×10^6	19.9 (Case4 / Case3)
Case4	8.16×10^5	2.40×10^7	

行位置に関らず、CFRP 補強によって大幅に疲労耐久性が向上することが確認された。ただし、偏心荷重の場合は、中央荷重と比べると疲労寿命の増加量が少ない。その理由として、偏心荷重は支点側のせん断力が大きくなるため補強材と既設コンクリート間の接着面に作用するせん断応力が大きくなり、繰返し荷重によって付着疲労による接着面の剥離が早期に進展したことが一因と推察される。

3.4 実験終了後の切断面のひび割れ状況

切断面のひび割れ状況を図ー6に示す。赤がひび割れ、青は実際の供試体の外形と鉄筋の位置を表す。

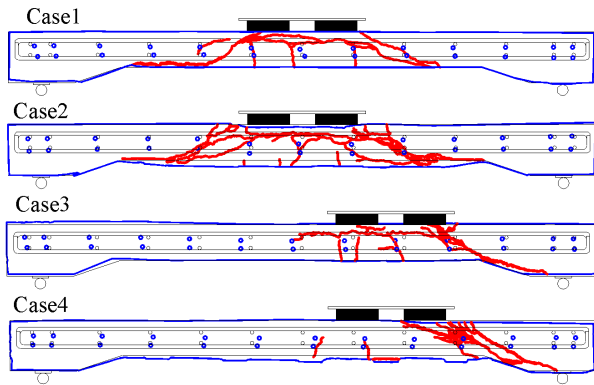
(1) 直角方向

Case1, 2 供試体は、①曲げひび割れ、②上側主鉄筋に平行な水平ひび割れ、③下側主鉄筋から下のダウエル効果によるひび割れ、④荷重ブロック端部から斜め下へ伸びるひび割れが、ほぼ左右均等に発生している。Case 2 供試体は、CFRP プレートが剥離の際周辺のコンクリートを伴い膜状に剥離した。

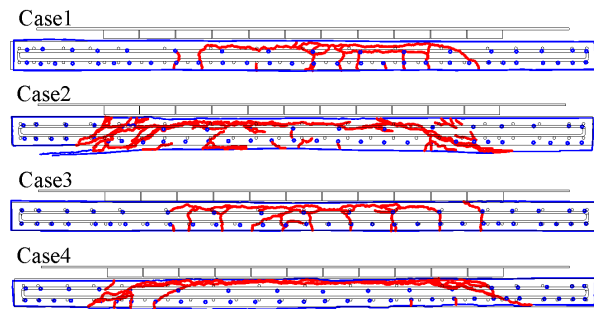
Case 3, 4 供試体のひび割れは右側ハンチ部に集中した。Case 4 供試体は、上側主鉄筋に沿う水平方向のひび割れは殆ど見られなかった。Case 3 供試体は、ダウエル効果によるひび割れがハンチ部にまで達している。このため、せん断耐力としてはかぶりが厚い分、ダウエル効果の抵抗分が増加したと考えられる。Case 4 供試体は、せん断力の大きく発生するハンチ側に荷重ブロック端部から伸びる斜めひび割れとダウエル効果によるひび割れのみが発生した。樹脂注入痕から予備荷重時に発生したと思われる曲げひび割れはあるものも、補強後には曲げひび割れや上側主鉄筋に平行な水平ひび割れは発生していない。補強により曲げ剛性が増加した分、相対的にせん断剛性は低下し、せん断力の大きく発生するハンチ側に損傷が集中したものと考えられる。

(2) 走行方向

Case 1, 3 供試体では上下主鉄筋の揃う位置で曲げひび割れが発生し、ある幅の梁を並べた状態となる梁状化となった。一方、Case 2, 4 供試体は明瞭な曲げひび割れは発生せず梁状化は見られなかった。Case 2, 4 供試体は、曲げ剛性が向上し最終段階まで曲げひび割れが発生していない。そのため梁状化は起こらず版全体で抵抗し補強材の剥離と共に、後述する鉄筋応力の急増に見られるよ



(a) 直角方向断面



(b) 走行方向断面

図—6 実験終了後の切断面のひび割れ状況

うに、母床版が耐力負担することでせん断破壊に至ったと推定される。

3.5 走行回数とたわみ及びひずみの関係

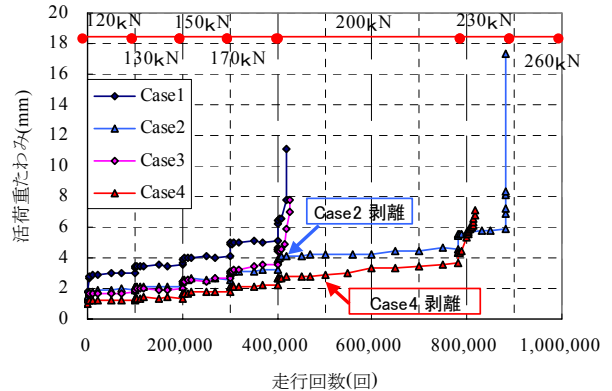
(1) 走行回数と走行範囲中央のたわみの関係

走行回数と輪荷重走行範囲中央の活荷重たわみの関係を図—7に示す。活荷重たわみは載荷たわみから残留たわみを差し引いた値である。Case2, 4 供試体については CFRP プレートの剥離が確認された時点を図中に示している。

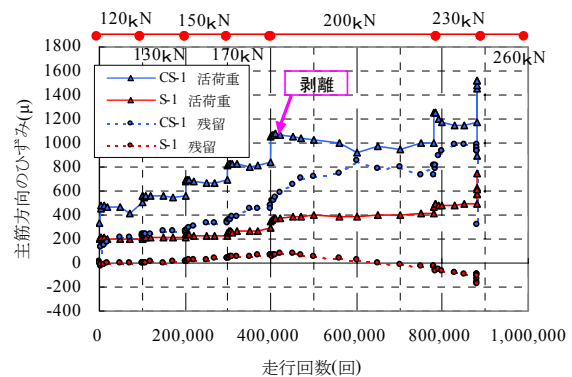
Case1, 2 供試体は、活荷重たわみが約 6mm, Case3, 4 供試体では、活荷重たわみが約 4.5mm で立ち上がった。一方、Case 2, 4 補強供試体は、CFRP プレートの剥離に伴う活荷重たわみの急激な変化は見られない。部分的な剥離が供試体全体の剛性低下を招くまでには至っていないためであると推察する。

(2) 走行回数とひずみの関係

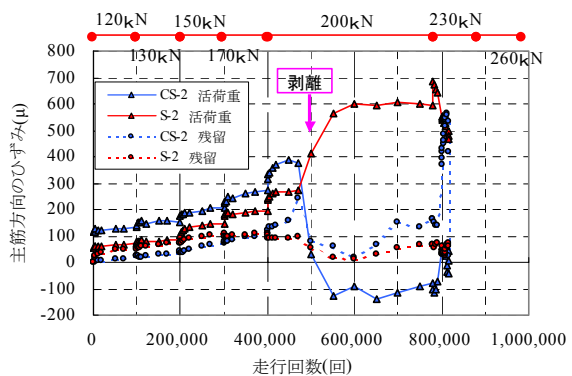
Case 2, 4 補強供試体について、剥離に伴う CFRP プレートと鉄筋のひずみの分担の変化を確認する。図—1 及び図—2 にひずみ計測位置を示した。Case 2 供試体は、図—8 に示すように、剥離の始まりをきっかけに走行直角方向の活荷重ひずみは僅かであるが減少した。一方、鉄筋ひずみ S-1 に活荷重ひずみの変化は見られない。剥離に伴い CFRP プレートが負担する活荷重ひずみは小さ



図—7 各供試体の走行回数と活荷重たわみとの関係



図—8 主鉄筋と CFRP プレートのひずみの変化 (Case2)



図—9 主鉄筋と CFRP プレートのひずみの変化 (Case4)

くなるものの、その分を鉄筋で負担するまでには至らず、鉄筋応力の急増は起こらなかったと考えられる。

Case 4 供試体は、図—9 に示すように、主鉄筋方向のひずみで剥離に伴い鉄筋応力の急増が起きている。剥離に伴い CFRP プレートの活荷重ひずみが減少しその分鉄筋ひずみが増加している。これは、中央載荷では、剥離状況や切断面の状況から判断して床版全体で抵抗しているため、一部が剥離しても鉄筋応力の急増は起きなかったためと推察される。偏心載荷では、せん断力が大きく作用し剛性が変化するハンチ隅角部の先端において、剥離に伴いそれまでの一体性が崩れることで、応力の伝達之急激に変化したと推察される。

3.6 既往 S-N 曲線との比較

連続繊維シートを用いた異形鉄筋床版の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の押抜きせん断耐力 (P'_{ssi}) 評価式 (式(6)) を提案している⁵⁾。Case2, 4 供試体共に、配力筋方向の補強材は破断していなかったため、文献 5)より式(6)が適用できる破壊形態であると考えた。一方、赤代らは丸鋼鉄筋を用いた床版の輪荷重走行試験の結果から評価式 (式(4)) を提案している⁶⁾。本実験結果について、松井らの提案式 (式(3)) 及び赤代らの提案式 (式(4)) と比較した。図-10に既往の S-N 曲線との関係を示す。図中には参考データとして、過去実施した CFRP プレート補強結果もプロットした^{1), 2)}。

本研究の全ての供試体が、松井らの提案式 (式(3)) 及び赤代らの提案式 (式(4)) との間に位置することから、CFRP プレートで補強された床版において、中央荷重及び端部荷重を行った場合でも、既往の研究で提案されているこれらの評価式での評価が可能であると考えられる。

$$\text{Log} (P_r/P_{sx}) = -0.07835 \cdot \text{Log} N + \text{Log} 1.520 \quad (3)$$

$$\text{Log} (P_r/P_{sx}) = -0.09121 \cdot \text{Log} N + \text{Log} 1.520 \quad (4)$$

$$P_{sx} = 2B(f_v \cdot X_m + f_i \cdot C_m) \quad (5)$$

$$P'_{ssi} = 2B(f_v \cdot X_m + f_i \cdot C_m) + 2\{0.25f_i \cdot C_d(a + 2d_m)\} \quad (6)$$

$$B = b + 2d_d, \quad f_v = 0.656 \cdot f'_c{}^{0.606}, \quad f_i = 0.269 \cdot f'_c{}^{2/3}$$

ここに、 N : 荷重回数, P_r : 荷重荷重, P_{sx} : 梁状化した床版の押抜きせん断耐力 (Case1, 3 に適用) である。但し、補強供試体 (Case2, 4) に対しては、梁状化したシート補強床版の押抜きせん断耐力 P'_{ssi} を式(3)及び式(4)の P_{sx} に適用する。 B : 輪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/mm^2), f_i : コンクリートの引張強度 (N/mm^2), f'_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2), a, b : 荷重板の主筋方向, 配力筋方向の辺長 (mm), X_m : 引張側コンクリートを無視した場合の、主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) である。

4.まとめ

本研究では、CFRP プレートにより下面補強した RC 床版について、中央荷重と支点寄りに偏心荷重した 2 通りの荷重方法で輪荷重走行試験を実施し、本工法による補強を確認した。主な内容は、以下の通りである。

- 1) 試験の結果、輪荷重の走行位置に関わらず、CFRP プレートによる補強によって RC 床版の疲労耐久性が大幅に向上することが確認された。補強供試体の疲労耐久性について、無補強供試体に対する破壊時 150kN 等価走行回数の比で評価すると、本研究で実施した輪荷重走行試験では、中央荷重で約 40 倍、偏心荷重で約 20 倍であり、無補強供試体の疲労寿

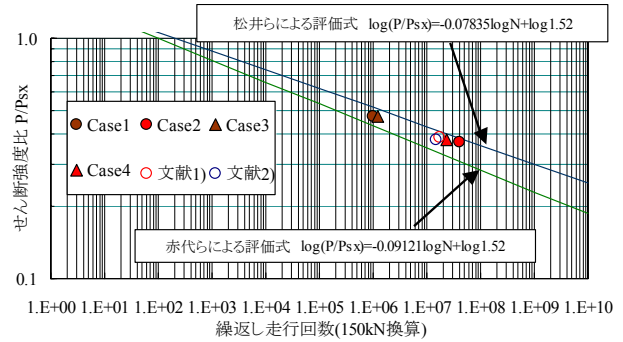


図-10 既往の S-N 曲線との関係

命に対して 10 倍以上の補強効果を確認できた。

- 2) 無補強供試体では、荷重位置による破壊時走行回数への影響は見られなかった。荷重位置が支点に近い偏心荷重では、床版に作用するせん断力が大きくなるが、耐力も増加したことが影響したと推察される。
- 3) 補強供試体では、いずれの荷重位置の場合でも、コンクリートと補強材が接着されたままかぶりコンクリートの表層のひび割れる形態で補強材の局所的な剥離が開始した。中央荷重に比べて偏心荷重で補強効果が少ない要因として、偏心荷重では、局所的な剥離に対する応力の再分配による抵抗ができないことや、中央荷重に比べて接着面に作用するせん断応力が大きくなることが挙げられる。
- 4) 既往の研究で提案された疲労寿命評価式と実験結果の比較から、CFRP プレートで補強された床版においても、荷重位置に関らず既往の評価式により概ね評価が可能であることが確認された。

参考文献

- 1) 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 年土木学会北海道支部論文集第 65 号, E-27, 2008
- 2) 加藤貴久, 久部修弘, 松井繁之, 三田村浩: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, 2010
- 3) 東山浩士, 松井繁之, 伊藤定之: 偏心荷重した RC 床版の押し抜きせん断耐荷力, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, 2001
- 4) 加藤暢彦, 横山広, 堀川都志雄, 園田恵一郎: ひび割れ損傷 RC 床版の CFRP 補強工法における端部処理と補強効果, 構造工学論文集, Vol.45A, 1999
- 5) 松井繁之: 道路橋床版 設計・施工と維持管理, 森北出版, 2007.10
- 6) 赤代恵司, 三田村浩, 渡辺忠朋, 岸徳光: 丸鋼鉄筋を用いた RC 床版の疲労耐久性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.57A, 2011