論文

RC 床版の主鉄筋方向挙動に及ぼす CFRP シート接着補強方向の影響

田中良樹*，村越潤**，玉越隆史*，新藤竹文***

*　（国研）土木研究所 構造物メンテナンス研究センター（〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6）
** 博（工）　首都大学東京教授　都市環境学部（〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1）
*** 工博　炭素繊維補修・補強工法技術研究会（〒103-0021 東京都中央区日本橋本石町 1-2-2）

シート補強された RC 床版の疲労損傷機構の解明に向けて，主鉄筋方向のみに CFRP シートを貼り付けた RC 床版供試体 1 体の輪荷重走行試験を行った．また比較のため，配力鉄筋方向のみに CFRP シートを貼り付けた RC 床版供試体 1 体の輪荷重走行試験も実施した．その結果，主鉄筋方向のみにシート接着した場合，シートの初期損傷があっても，補強後の走行初期の段階で主鉄筋方向の鉄筋ひずみやひび割れ幅が抑制され，主鉄筋方向の挙動の改善が見られた．また，配力鉄筋方向のみシート接着した場合であっても，配力鉄筋方向だけでなく，主鉄筋方向の挙動もある程度改善されることが分かった．

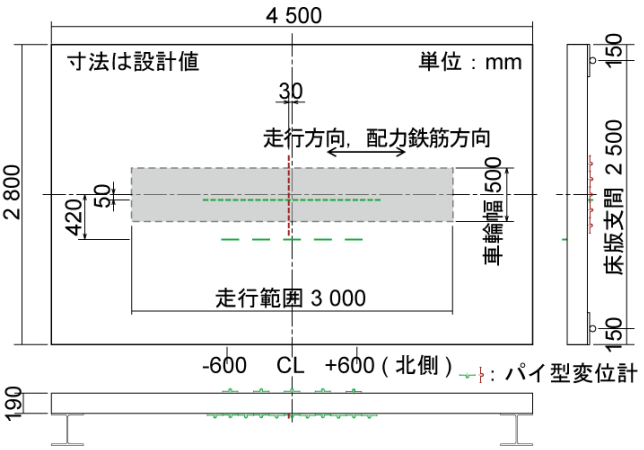
キーワード：炭素繊維シート，補強，（シートの）*接着方向，*（シートの）*破断*

1. はじめに

炭素繊維シート（以下，シート）による鉄筋コンクリート床版（RC 床版）の補強事例において，類似の RC 床版であっても補強量が異なる場合が見られる．著者らは，シート補強された RC 床版の疲労損傷機構が必ずしも十分に解明されていないことがその一つの要因であると考え，同機構の解明と性能照査型補強設計法の構築に向けて，輪荷重走行試験による検討を行っている [1]．その検討の一環として，シートの接着方向が RC 床版の挙動や疲労耐久性に及ぼす影響を確認するため，初期損傷を与えた RC 床版供試体 2 体に，それぞれ主鉄筋方向のみまたは配力鉄筋方向のみにシート接着を施した後，それらの輪荷重走行試験を実施した．その結果を用いて，補強前後の RC 床版の挙動の変化を比較検討した．そのうち本文では，主として RC 床版の主鉄筋方向の挙動に着目して，主鉄筋方向または配力鉄筋方向それぞれのシート接着補強の影響について述べる．

2. 試験方法

供試体 CF4, CF5 の RC 床版部の形状寸法を図－1 に，主な諸元を表－1 にそれぞれ示す．両供試体の RC 床版の諸元は共通であり，昭和 39 年の道路橋示方書を適用した床版に概ね相当する．シートの諸元と施工時の温度及び材料試験結果を表－2 に示す．また，シートの貼り付け方法を図－2 に示す．供試体 CF4 はシートを主鉄筋



図－1　供試体の形状寸法

表－1　RC 床版供試体の主な諸元（CF4, 5 共通，設計値）

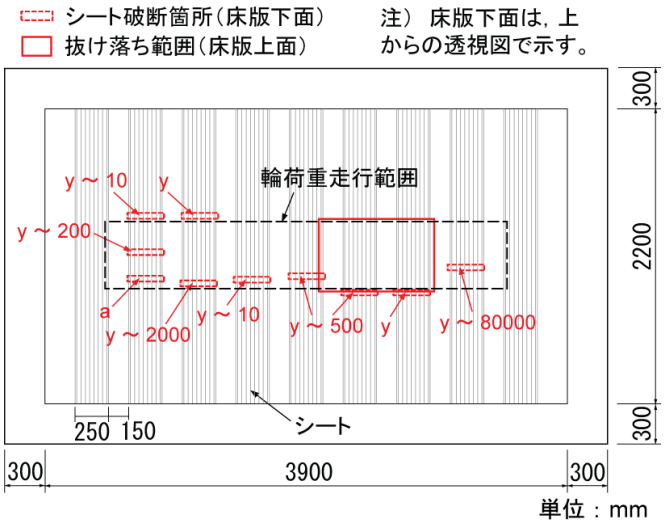
	主鉄筋			配力鉄筋			床版厚 (mm)
	呼び径	間隔 (mm)	上縁からの距離* (mm)	呼び径	間隔 (mm)	配力鉄筋比(%)	
上段	D16	300	30	D10	300	32	190
下段	D16	150	160	D13	300		

*) 床版上縁から鉄筋中心までの距離

表－2　シートの諸元，施工時温度，引張試験結果

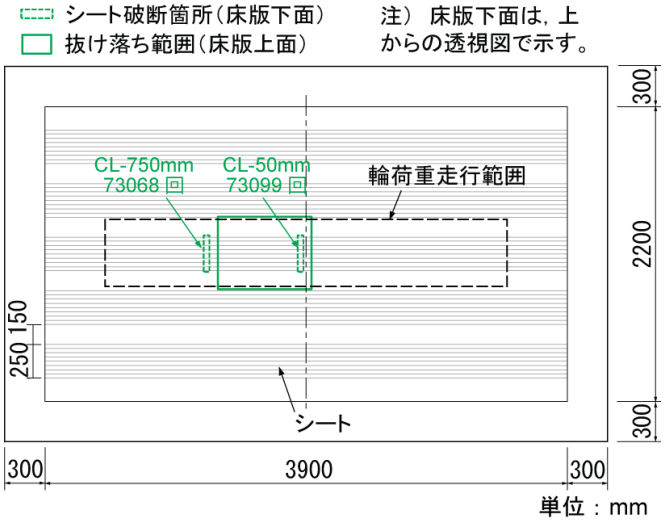
供試体	シートの種類	接着剤の種類	繊維目付量 (g/m^2)	設計厚さ (mm)	養生時温度 1) (℃)	引張強度 2) (N/mm^2)	弾性係数 2) (×10^3 N/mm^2)
CF4	高弾性型	一般用	300	0.143	24	2510	726
CF5					30	2430	700

1) シート養生期間中の平均温度，2) 5 本の平均値



y ～ 10：数値はシート破断を確認した時の繰返し数，いずれも 147kN 時。
y は養生載荷時から生じていたことを表す。
a：「147kN 時，200 回」から「196kN 時，45000 回」までの間にシート破断が徐々に伸展した。

(a) 供試体 CF4



シート破断は，抜け落ち時（196kN，約73000回）に発生した。

(b) 供試体 CF5

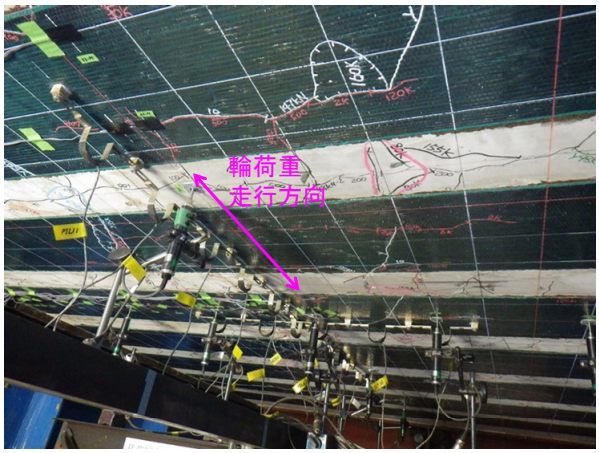
図－2 シートの貼り付け方法，シートの損傷箇所，及び抜け落ち範囲

表－3 補強前及び補強後の繰返し数

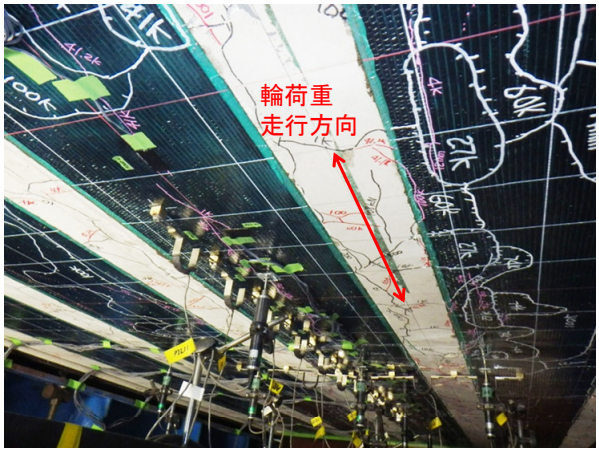
供試体	コンクリート圧縮強度[1] (N/mm²)	コンクリート静弾性係数[1] (×10³ N/mm²)	補強前	補強後		
			目標変位まで 147kN，15rpm (回)	養生載荷[2] 68kN，5rpm (回)	147kN，15rpm (回)	196kN，15rpm (回)
CF4	26.2	21.1	220,000	98,000	294,000	78,664
CF5	25.1	21.1	40,963	98,000	41,000	73,251

1) 補強前開始時，補強後開始時及び試験終了時の平均値，各 3 本，計 9 本の平均値，2) 7 日間

方向のみに，供試体 CF5 はシートを配力鉄筋方向のみにそれぞれ 1 層ずつ床版下面に接着した．著者らの既往の試験[1]における格子貼りの各方向の貼り方と一致するように，シート間の距離を 150mm とした．養生期間中，供試体 CF4 はシートを貼り終えた直後から，供試体 CF5 はシートを貼り終えてから 1 日後に，供用中での養生を想定して 68kN で輪荷重を走行させた（以下，養生載荷）[2]．



写真－1 CF4 の試験状況



写真－2 CF5 の試験状況

表－4 走行載荷時及び養生載荷時の主な事象

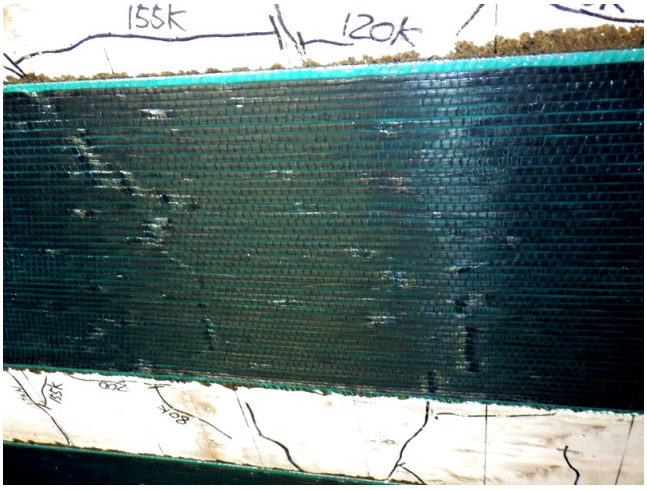
供試体	CF4	CF5
補強前 147kN	■18 万回 ・CL-600mm で動的載荷時変位 9.1mm ■22 万回 ・CL-600mm の位置での静的載荷時変位 8.2mm，動的載荷時変位 9.4mm	■4.1 万回 ・CL-600mm の位置での静的載荷時変位 8.1mm，動的載荷時変位 9.1 mm
養生載荷 68kN	・走行範囲のシートすべてでシート破断（部分破断含む），いずれも載荷ブロック直下かそのやや外側	・繊維に沿った樹脂割れ
補強後 147kN	■500 回 ・シート部分破断箇所のほとんどが，幅 250mm にわたって全破断 ■0.6 万回 ・シート破断箇所付近で浮きが見られ始める	■2.7 万回 ・シートの浮きが見られ始める
補強後 196kN	■0.6～1 万回 ・シート破断箇所で浮き ■7.8 万回 ・CL-600mm での動的載荷時変位 12mm，上面に抜け落ちの兆候 ・別の箇所 CL+400～600mm で抜け落ち	■走行直後～6 万回 ・シートの浮きが拡大，走行範囲直下のシートは CL-650～800mm 及び CL+1000～1700mm の範囲のみで浮き ■7.3 万回 ・シート破断，CL-600mm で動的載荷時変位 12mm，上面に抜け落ちの兆候 ・CL-300mm で抜け落ち，床版下面は片側(図－2(b)の上辺側)の剥離が顕著

供試体の支持は 2 辺（長辺）を単純支持，他の 2 辺を弾性支持とした．図－1 に示した網掛け部分に輪荷重を走行載荷させた．表－3 に，各供試体の補強前及び補強後の走行繰返し数を示す．両供試体ともに，初期損傷を与

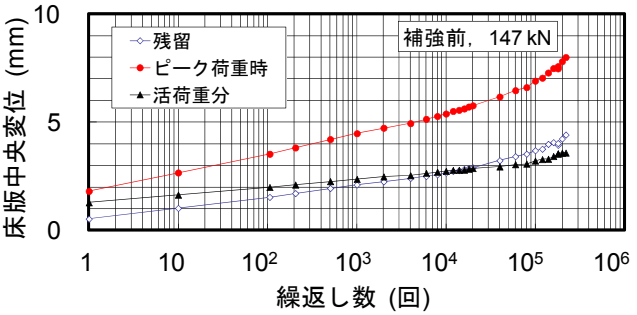
えるため，補強前の RC 床版供試体に静的載荷時における床版中央の変位が 8mm になるまで 147kN で走行載荷を行った．補強後は，それぞれの補強前と同じ荷重，繰返し数で走行載荷を行った後，荷重を 196kN に上げて抜け落ちが生じるまで走行載荷を行うこととした．走行載荷の途中で，所定の回数ごとに床版中央での静的載荷を行った．その際に変位，ひび割れ幅，鉄筋ひずみ等を測定するとともに（以下，SS データ），その直前 60 秒間の走行載荷時の各波形データを記録した（以下，DT データ）．本文で示す補強後のデータは，補強時点で初期化した値で示す．ひび割れ幅は，図－1 に示すとおり，上下面のひび割れを対象として，パイ型変位計を用いて測定した．上下面ともに，コンクリートのひび割れは，鉄筋位置に概ね沿って出る傾向があることから，鉄筋を跨ぐようにパイ型変位計を配置した（基長 150mm）．写真－1～2 に示すとおり，シート補強後の床版下面のパイ型変位計は，シート上の補強前と同じ位置に設置した．ここでは，その測定値をシート接着後のひび割れ幅に相当する値とする．シートの浮きの確認は小型のハンマーによる叩き調査によった．

3. シートの初期損傷と破断

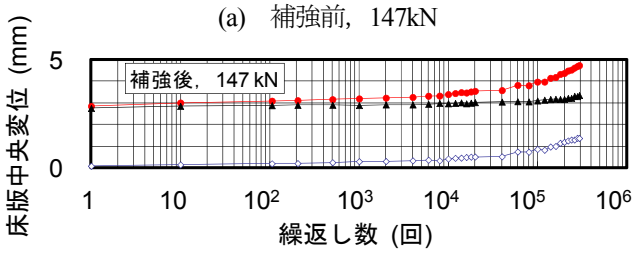
図－2 には，各供試体のシートの破断箇所及び抜け落ち範囲を併せて示した．表－4 に，走行載荷時及び養生載荷時の主な事象を示す．既往の試験[1)]では，シートの



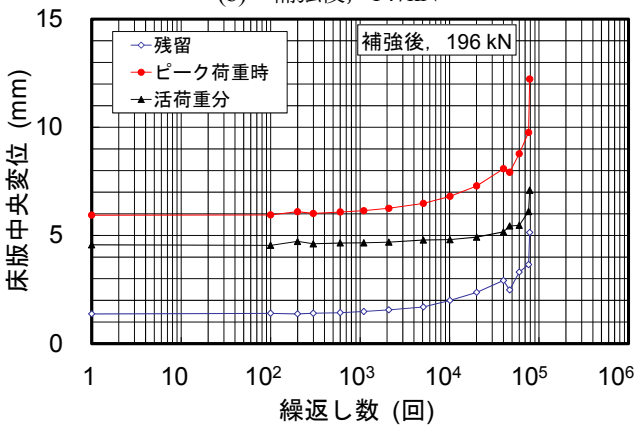
写真－3　CF4 のシートの初期損傷例



(a)　補強前，147kN

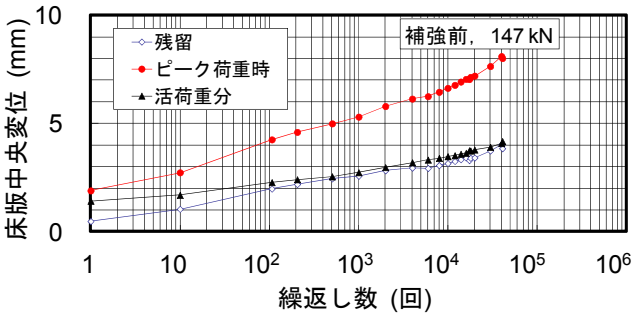


(b)　補強後，147kN

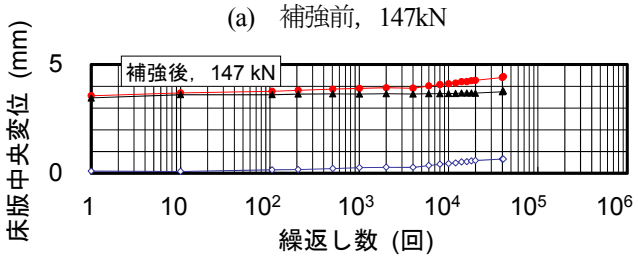


(c)　補強後，196kN

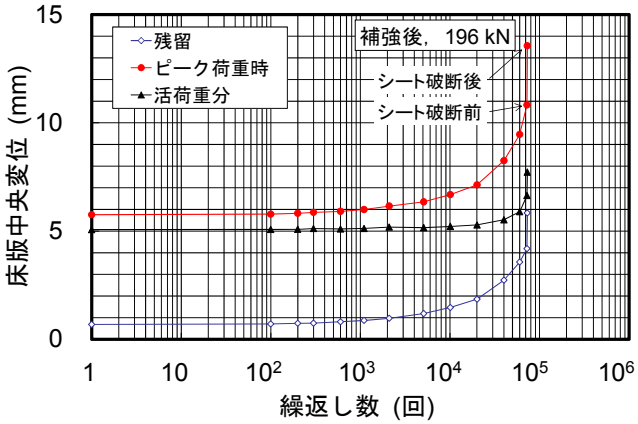
図－3　CF4 の床版中央変位の変化（SS データ）



(a)　補強前，147kN



(b)　補強後，147kN



(c)　補強後，196kN

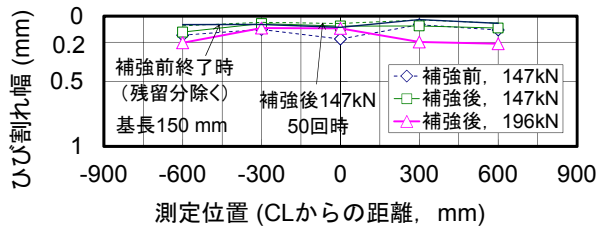
図－4　CF5 の床版中央変位の変化（SS データ）

破断が配力鉄筋方向シートで多く見られた．主鉄筋方向シートの施工の翌日，配力鉄筋方向シートの接着後早々に養生載荷を開始したことがその一因として挙げられる．一方，供試体 CF4 は，主鉄筋方向シートの接着後早々に養生載荷を開始したため，主鉄筋方向シートであってもシートの破断が見られた．写真－3 に供試体 CF4 に見られたシートの初期損傷の例を示す．シートの初期損傷は，養生載荷の比較的早期に見られ，貼り付け前に生じていたコンクリートのひび割れに沿って見られた．シートの初期損傷の多くは，繊維の縒れであるが，部分的に繊維の破断も含まれる．シートの破断の多くは，図－2(a)に示すように，養生載荷時や補強後の載荷早々に，いずれも輪荷重走行範囲直下またはそのやや外側のシートの初期損傷箇所で生じた．それらのシート破断は，補強後 147kN 時の 500 回までに，走行範囲直下のほとんどのシートで見られた．

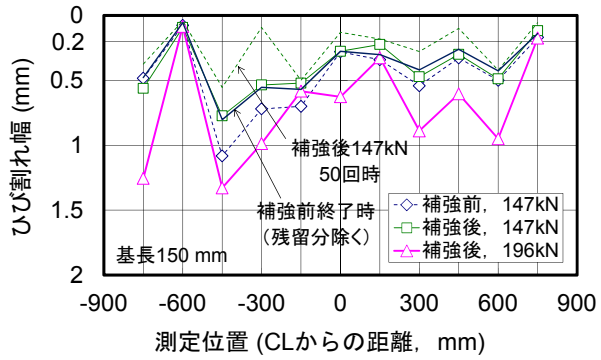
供試体 CF5 は，シート施工から養生載荷までに 1 日開けたことから，シートの繊維を破断させるような初期損傷は見られなかった．シートの破断は抜け落ち直前に図－2(b)に示した 2 箇所で見られた．

4. シート接着された RC 床版の全体挙動

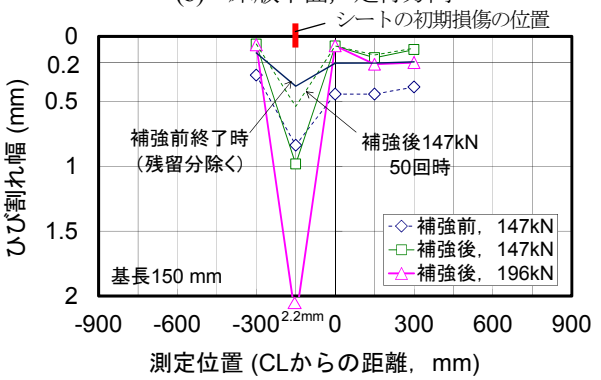
図－3～4 に，供試体 CF4，CF5 それぞれの繰返し数ごとの静的載荷における床版中央変位の変化を示す．図中，載荷時の測定結果を「ピーク荷重時」，除荷時の測定結果を「残留」，それらの差を「活荷重分」として，それぞれ示す．補強後の繰返し数は，荷重条件ごとの繰返し数で示した．補強前の変位は，いずれも走行載荷の開始直後から変位が徐々に増加する傾向が見られた．補強後，いずれの方向のシート接着であっても，活荷重分のたわみが若干改善された．また，補強後，147kN で走行載荷を行った場合，同じ荷重で行った補強前よりも繰返し数に伴う変位の増分が小さくなった．これは，



(a) 床版上面，走行方向

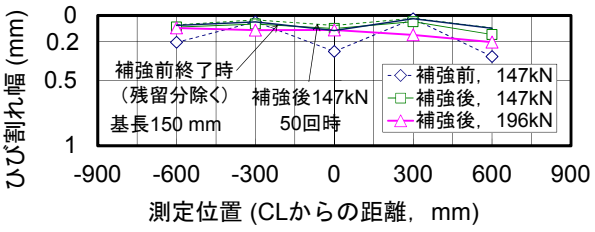


(b) 床版下面，走行方向

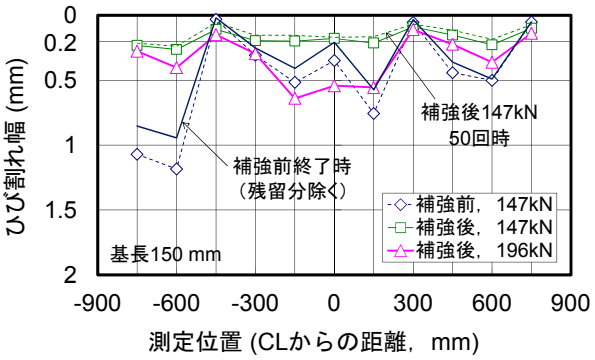


(c) 床版下面，走行直角方向

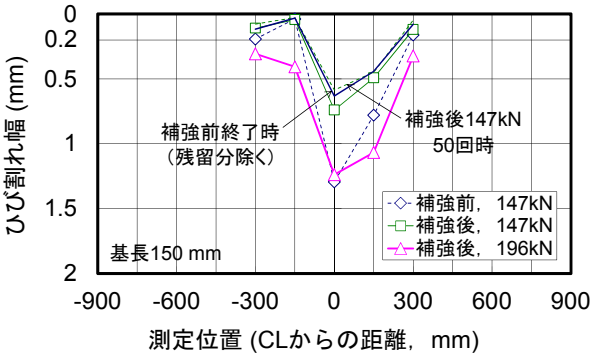
図－5 CF4 のパイ型変位計によるひび割れ幅
(DT データの最大値)



(a) 床版上面，走行方向



(b) 床版下面，走行方向

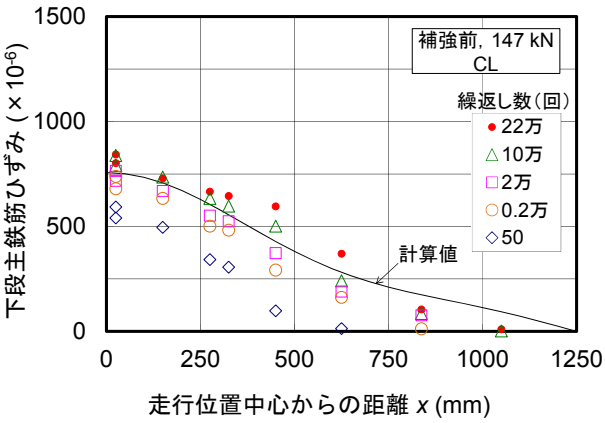


(c) 床版下面，走行直角方向

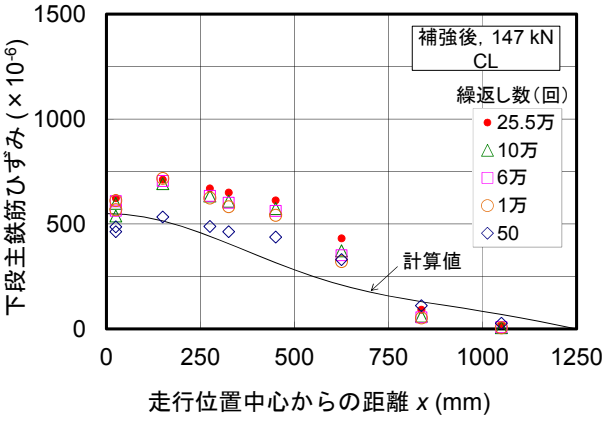
図－6 CF5 のパイ型変位計によるひび割れ幅
(DT データの最大値)

補強前にコンクリートの曲げひび割れがほとんど発生していたことによるところが大きいが，同荷重，同繰返し数で補強後の活荷重変位が補強前よりも小さいのは，シートの補強効果によると考えられる．供試体 CF4 はシートの初期損傷やそれに伴う破断が見られたにもかかわらず，ある程度の補強効果が見られた．両供試体ともに，補強後，荷重を 147kN から 196 kN に増加させた後は，変位の増分が急増して，抜け落ちに至った．

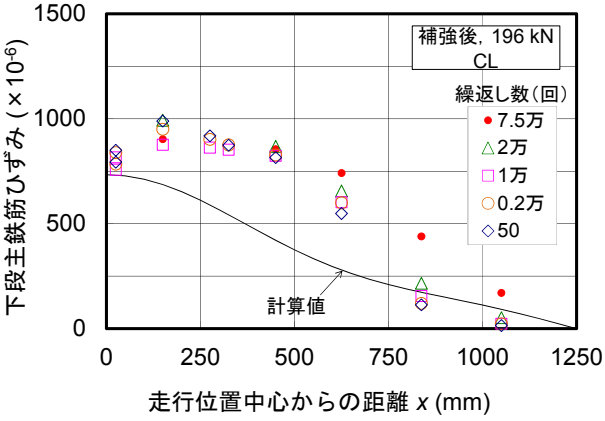
図－5～6 に，供試体 CF4，CF5 それぞれのひび割れ幅を示す．ひび割れ幅は，走行中の輪荷重の位置によって大きく変化することから，それぞれ走行中の最大値を示した．また，補強前後の変化を比較するため，補強前終了時の残留分を除いた値と，147kN，50 回時の値も示す．同図(a)～(c) は，それぞれ床版上面の走行方向に開閉するひび割れの幅（以下，走行方向のひび割れ幅という，走行直角方向，主鉄筋方向等についても同様），床版下面の走行方向のひび割れ幅，同走行直角方向のひび割れ幅を示す．補強後，シート破断がない限り，シート



(a) 補強前，147kN

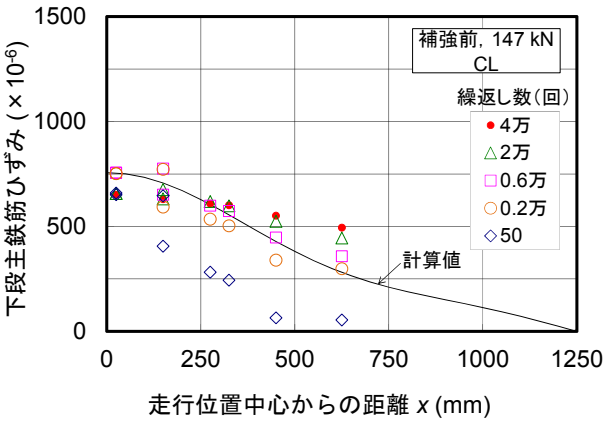


(b) 補強後，147kN

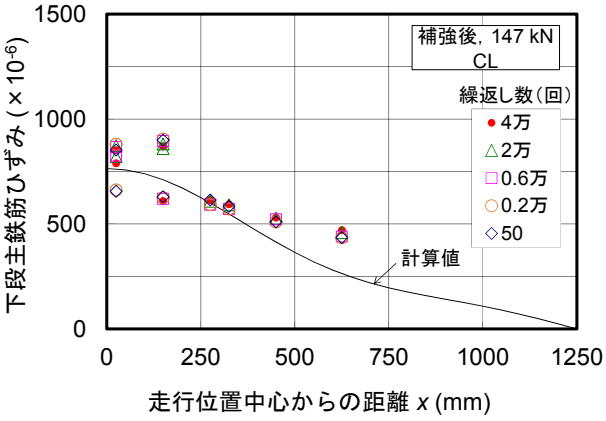


(c) 補強後，196kN

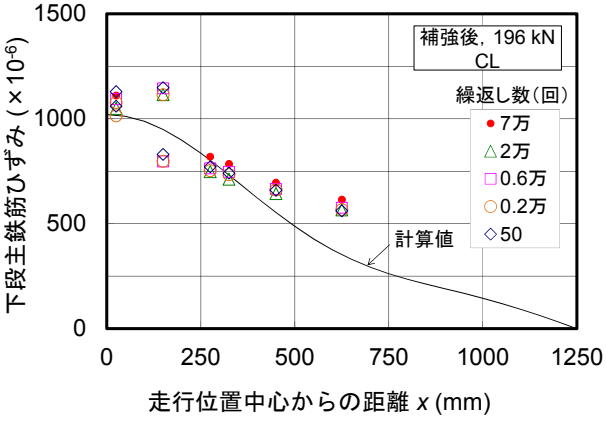
図－7　CF4 の床版中央下段主鉄筋のひずみ分布
（DT データ，輪荷重位置は中央，残留ひずみを除く）



(a) 補強前，147kN



(b) 補強後，147kN



(c) 補強後，196kN

図－8　CF5 の床版中央下段主鉄筋のひずみ分布
（DT データ，輪荷重位置は中央，残留ひずみを除く）

接着の方向に応じて，供試体 CF4 は，主鉄筋方向のひび割れ幅が抑制され，供試体 CF5 は，配力鉄筋方向のひび割れ幅が抑制される傾向がそれぞれ見られた（図－5(c)，図－6(b)）．CF4 のひび割れ幅測定箇所におけるシートの初期損傷と破断は，補強前のひび割れ幅が著しく大きい箇所で見られた．シート破断が見られた箇所では，ひび割れ幅の増加がその位置で集中して，顕著に生じる傾向が見られた．

図－6(c)は供試体 CF5 の走行直角方向のひび割れ幅を示した．補強の直前と直後でひび割れ幅の明確な変化は見られなかったが，方向が 90°異なる配力鉄筋方向のシート接着であっても，4.1 万回走行による走行直角方向のひび割れ幅の増加は小さく，主鉄筋方向の挙動がある程度改善されていたと考えられる．なお，供試体 CF4 では（図－5(b)），シートの初期損傷の影響があっても，補強後走行初期の段階では，方向が 90°異なる主鉄筋方向のシート接着によって，走行方向のひび割れ幅がある程度抑制される傾向が見られた．

5. 補強前後における主鉄筋の挙動

図－7～8 に，床版中央下段主鉄筋のひずみの分布を示す．ひずみは鉄筋の側面のみで測定した箇所と，鉄筋の上下両面でひずみを測定した箇所があり，後者の場合はその平均値で示す．繰返し数ごとに記号を変えて示す．いずれも各繰返し数における残留ひずみを減じた値を示す．また，版理論に基づく主鉄筋ひずみの計算値を示す．計算ひずみは，供試体の設置条件と同様に 2 辺単純支持，2 辺弾性支持とし，引張側コンクリートを無視した RC 断面として，2 章に示した諸元を用いて直交異方性版理論により算定した．両供試体ともに，補強前の走行初期（概ね CF4 は 2 万回まで，CF5 は 2000 回まで）には，既往の無補強 RC 床版の輪荷重走行試験[3]と同様に，計算値と同程度のひずみ分布が見られ，版の曲げモーメント分布に概ね沿った分布形状であったことが分かる．繰返し数の増加に伴い，床版中央から 500mm 程度までの下段主鉄筋のひずみ分布が版の曲げモーメント分布から，軸方向に変化がほとんどないタイドアーチのタイ状の分布形状に移行する傾向が見られた[3),4)]．

図－7(b)に示す供試体 CF4 の補強後，147kN の載荷では，シート接着によって，計算値が低下するのと同様に，走行位置中心から 625mm の範囲のひずみが一旦低下した．ただし，同 450～625mm の範囲のひずみは計算値よりも若干高い傾向が見られ，補強前に見られたタイ状の分布が十分には解消されていなかった．

図－8(b)に示した計算値のとおり，供試体 CF5 の補強後，147kN における床版中央付近の主鉄筋ひずみの計算値は，配力鉄筋方向のシート接着を考慮しても，補強前とほとんど変化しない．試験結果でも，補強の直前と直後で鉄筋ひずみの明確な変化は見られなかった．しかしながら，補強後において，補強前のような計算ひずみからのかい離の増加がほとんど見られなかった．このことは，図－6(c)で供試体 CF5 の走行直角方向のひび割れ幅の増加が抑制されていたことと傾向が一致する．

配力鉄筋量が少ない RC 床版では，輪荷重走行試験の早期に配力鉄筋方向の挙動が版としての挙動から膜のような挙動に移行して，その分主鉄筋の負担が増加する傾向が見られた[3)]．上記の図－6(c)や図－8(b)の結果は，配力鉄筋方向のシート接着によって，配力鉄筋方向の版としての挙動がある程度改善され，繰返し走行載荷の下での主鉄筋方向の負担が軽減されたことを示唆するものと考えられる．

6. まとめ

RC 床版供試体 2 体の下面に，それぞれ主鉄筋方向のみまたは配力鉄筋方向のみにシートを貼り付けて，輪荷重走行試験を実施した．得られた結果は次のとおりである．

(1) 主鉄筋方向のみにシート接着した場合，シートの初期損傷があっても，補強後の走行初期の段階では，主鉄筋方向の鉄筋ひずみやひび割れ幅が抑制され，主鉄筋方向の挙動の改善が見られた．

(2) 配力鉄筋方向のみシート接着した場合であっても，配力鉄筋方向だけでなく，主鉄筋方向の鉄筋ひずみやひび割れ幅の増加が抑制されていた．この点から，配力鉄筋方向のシート接着が，90°異なる主鉄筋方向の挙動もある程度改善する効果があることが分かった．

本試験結果については，配力鉄筋方向の挙動への影響を含めて，さらに分析を行うとともに，一連の試験結果と合わせて，シート補強された RC 床版の疲労損傷機構の解明と性能照査型補強設計法の検討に役立てる予定である．

参考文献

1) 村越潤，田中良樹，吉田英二，新藤竹文，近藤富士夫：格子状に炭素繊維シート接着補強された RC 床版の輪荷重走行下における破壊性状，土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集，Ⅰ，pp. 425-426，2015.

2) 建設省土木研究所，炭素繊維補修・補強工法技術研究会：コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書（II），共同研究報告書第 230 号，1999.10.

3) 田中良樹，村越潤，長屋優子：鉄筋コンクリート床版の疲労耐久性に及ぼす配力鉄筋の影響，第 7 回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp.161-168，2012.6.

4) 長屋優子，村越潤，田中良樹：繰返し移動荷重を受ける鉄筋コンクリート床版のひび割れ挙動に関する検討，コンクリート工学年次論文集，pp. 907-912，2008.

（2016 年 7 月 18 日受付）