

論文 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

小林 朗^{*1}・蔡 華堅^{*2}・下西 勝^{*3}・松井 繁之^{*4}

要旨：ヤング係数が 390kN/mm^2 の中弾性型炭素繊維シートを使用し、繊維目付け量を従来 ($400\text{g/m}^2\sim 450\text{g/m}^2$) よりも少ない 200g/m^2 および 300g/m^2 として補強した RC 床版の輪荷重走行試験を実施し、その疲労耐久性を比較検討した。炭素繊維シートの接着方法は、床版中での滞水防止と補強後の床版コンクリートの観察窓を設けるため、主筋方向と配力筋方向の炭素繊維シートをそれぞれ間隔を開けて貼り付ける「格子接着工法」とした。その結果、従来よりも少ない補強量でも RC 床版の疲労耐久性向上に効果があるが、目付け量の多い方が RC 床版のたわみ低減効果や延命効果が高いことがわかった。

キーワード：炭素繊維シート, RC 床版, 疲労耐久性, 格子接着工法, 輪荷重走行試験

1. はじめに

近年、橋梁などの社会基盤の劣化現象およびその維持管理が社会的な注目を集めている。道路橋の RC 床版は、ひび割れなどの劣化・損傷がたびたび発見され、コンクリートの抜け落ちといった重大な損傷が発生した場合には、橋上の交通に重大な支障を来す恐れがある。このため、これまで縦桁増設工法、上面増厚工法、鋼板接着工法や炭素繊維シート接着工法などの対策が採られてきた。

炭素繊維シート接着工法は、床版下面からの補強工法であるので橋面上の交通に影響を与えずに施工できることや、補強材が軽量で施工性が良いことなどから、近年利用が増加している。首都高速道路公団では、昭和 46 年以前の基準で設計された床版に対して縦桁増設工法で補強を行ってきた。しかし縦桁増設後も一部の床版でひび割れの増加などが確認されたことから、経年変化や重交通下での将来の追加補強方法の一つとして炭素繊維シート接着工法の適用を検討している。

一方従来の炭素繊維シート接着工法は、床版下面全面に炭素繊維シートを接着することから

以下のような問題が指摘されていた。

- a) 補強後の床版の状況を確認する技術が確立されていない。
- b) 橋面防水がない場合、上面から浸透した水分を炭素繊維シートがせき止めて床版コンクリート内に長く滞水する可能性がある。

筆者らは、これらの問題点の解決に向け、主筋方向と配力筋方向の炭素繊維シートをそれぞれ間隔を設けて格子状に接着する工法（以下、「格子接着工法」）を採用することを考え、輪荷重走行試験により、その補強効果の確認を行った¹⁾。また、この工法が縦桁補強済み床版の再補強対策としても有効であることを確認した²⁾。

これまで炭素繊維シート格子接着工法により補強された RC 床版の研究事例は少なく、炭素繊維シートの補強量と補強効果の関係が必ずしも明らかにされておらず、補強量の最適化が図られていない。そこで本研究では、炭素繊維シートとしてヤング係数が 390kN/mm^2 の中弾性型のものを使用して、繊維目付け量を従来 ($400\text{g/m}^2\sim 450\text{g/m}^2$) よりも少ない 200g/m^2 および 300g/m^2 にして補強した RC 床版の輪荷重走行試験を実施し、疲労耐久性を比較検討した。

*1 日鉄コンポジット (株) (炭素繊維補修・補強工法技術研究会) 工修 (正会員)

*2 大阪大学大学院 工学研究科 工修 (学生員)

*3 首都高速道路公団 保全施設部 (正会員)

*4 大阪大学大学院 工学研究科教授 工博 (正会員)

2. 実験概要

2.1 供試体

(1) RC 床版

既往の炭素繊維シート補強床版の輪荷重走行試験は、床版厚が 180~190mm 程度のものが多く、床版厚が薄いものは少ない。そこで、昭和 39 年鋼道路橋示方書で設計・施工された鋼単純合成鉄桁の床版をモデルとし、図-1 に示す幅 2000mm×長さ 3000mm×厚さ 160mm の RC 床版を製作した。配力鉄筋量は主鉄筋量の 25.5%とした。実際の補強対象路線の床版を参考にコンクリートの目標強度を 27N/mm²とした。No.1, No.2 供試体の輪荷重走行試験時のコンクリートの圧縮強度は、それぞれ 34.7, 34.1N/mm²であった。

(2) 補強方法

図-2 に示すように、床版下面に 25cm 幅の炭素繊維シートを 10cm の間隔を空けて格子状に接着した。表-1 に示す 2 体の供試体を準備した。炭素繊維シートの繊維目付量を、No.1 供試体には 200g/m², No.2 供試体には 300g/m²とした。炭素繊維シートの特性を表-2 に示す。

ここで、補強量の指標として炭素繊維シートの引張剛性 S_f を、床版単位幅あたりの炭素繊維シートの引張剛性として式(1)より算定した。

$$S_f = t_f \cdot E_f \cdot b_f (b_f + g) \quad (1)$$

ここに、 t_f , E_f , b_f , g はそれぞれ炭素繊維シートの設計厚さ、ヤング係数、幅、間隔である。

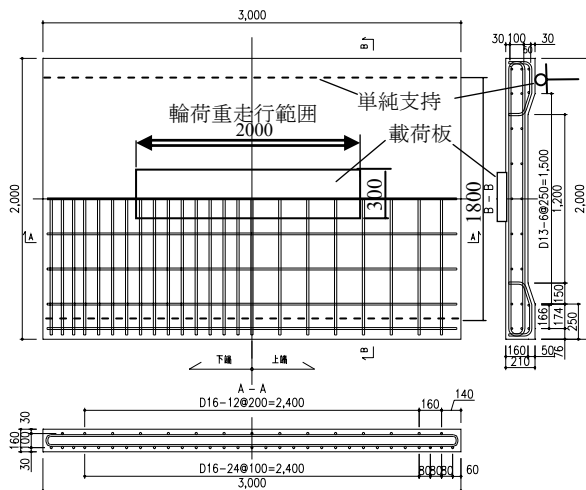


図-1 RC 床版供試体

2.2 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。供試体はハンチ部をスパン 1800mm で支持桁上に丸鋼を介して単純支持し、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荷重した(図-1)。予備荷重として、いずれの供試体も無補強の状態では、100kN の輪荷重を 6 万回走行させ、床版にひび割れ損傷を発生させた。その後、炭素繊維シートを接着・補強して表-3 に示す荷重プログラムによる

表-1 各供試体の補強仕様

供試体	炭素繊維シート			
	繊維目付量 g/m ²	幅 b _f mm	間隔 g mm	引張剛性 S _f kN/mm
No.1	200	250	100	30
No.2	300	250	100	45

表-2 炭素繊維シートの特性

供試体	No. 1	No.2
繊維目付量 g/m ²	206(200)	311(300)
引張強度 N/mm ²	3652 (2900)	3527(2900)
ヤング係数 kN/mm ²	394(390)	418(390)
設計厚さ mm	0.110	0.165

(規格値)

表-3 荷重プログラム

荷重ステップ	荷重(kN)	走行回数(回)
予備荷重	100	60,000
step-1	100	100,000
step-2	120	100,000
step-3	150	600,000
step-4	170	破壊まで

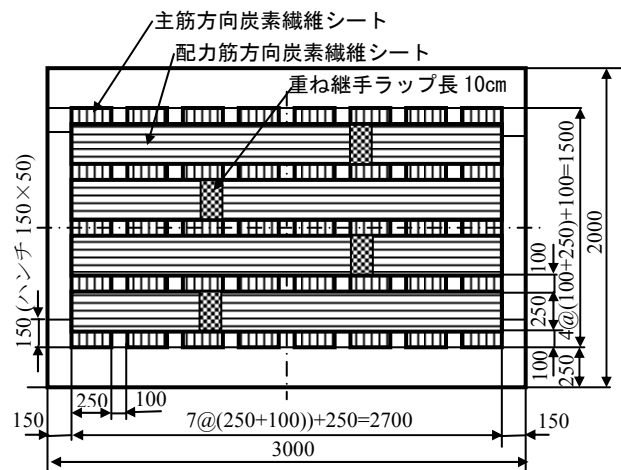


図-2 炭素繊維シートの接着方法

り载荷を行った。各々の载荷ステップに対して、荷重変更の前後および適当な走行回数にて輪荷重の走行を一時中断して、静的に载荷を行い、床版中心線下のたわみを計測した。

3. 実験結果と考察

3.1 初期損傷

いずれの供試体も予備载荷終了時には、図-3に示すように床版下面に200mm以下の間隔で亀甲状の2方向ひび割れが生じていた。No.1供試体の方がひび割れ本数が多くなっている。100kN 载荷時の補強前後の活荷重たわみ（総たわみから残留たわみを減じた弾性たわみ）を表-4に示す。予備载荷終了時の活荷重たわみは、No.1 供試体が1.27mm、No.2 供試体が1.07mmであり、劣化度はそれぞれ0.71、0.51となった。ここで劣化度としては、式(2)で示す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³⁾。

$$D_{\delta} = (W - W_0) / (W_c - W_0) \quad (2)$$

ここに、

W：活荷重たわみの計測値

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 炭素繊維シート補強によるたわみの低減

表-4に示すように炭素繊維シ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された。活荷重たわみの低減率は、No.1が23.6%、No.2が40.2%であり、炭素繊維シートの引張剛性が大きいNo.2の方が低減率が大きくなった。補強後のたわみは、引張側のコンクリートを無視した母床版と炭素繊維シートが完全合成されていると仮定して弾性計算により算定した値よ

り小さくなり、補強後の劣化度は、補強前より小さくなった。ここで補強後の劣化度は、式(2)のたわみの計算値に炭素繊維シートを考慮した値を用いた⁴⁾。

3.3 走行回数とたわみの変化および破壊状況

図-4に示すように、炭素繊維シートの引張剛性の小さいNo.1 供試体は、各荷重ステップでの活荷重たわみがNo.2 供試体に比べて大きくなっている。No.1 供試体は、荷重150kN・合計走行回数80万回までは、たわみが緩やかに増加傾向を示し安定していたが、荷重を170kNに増加させると走行回数に伴うたわみの増加が顕著になり、合計走行回数99.6万回でたわみが急速に増加して押抜きせん断破壊した。破壊後の床版下面と切断面の状況を写真-1に示す。破壊直前の走行回数90万回ごろから打音検査により10cm角程度の異音部が数箇所観察された（写真-1白線部）。床版コンクリートの劣化により、

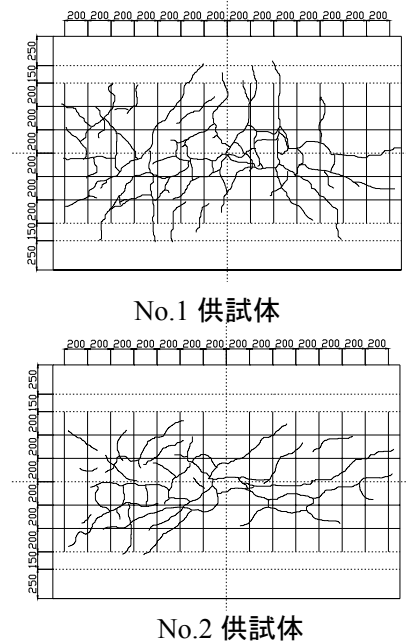


図-3 予備载荷後の床版下面のひび割れ

表-4 たわみの計算値(荷重100kN)

供試体	補強前（予備载荷終了時）				炭素繊維シート補強後				たわみ低減率	
	活荷重たわみ(mm)			劣化度 D_{δ}	活荷重たわみ(mm)			劣化度 D_{δ}	実験 (W-W _r)/W	計算 (W _c -W _{cr})/W _c
	W ₀	W _c	実験W		W _{0r}	W _{cr}	実験W _r			
No.1	0.39	1.64	1.27	0.71	0.39	1.42	0.97	0.56	23.6%	12.9%
No.2	0.41	1.70	1.07	0.51	0.41	1.39	0.64	0.24	40.2%	18.0%

W₀：コンクリートを全断面有効とした弾性計算、W_c：引張側コンクリートを無視した弾性計算

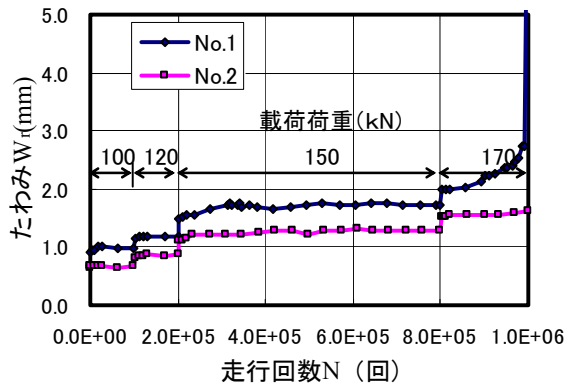


図-4 走行回数と活荷重たわみの変化

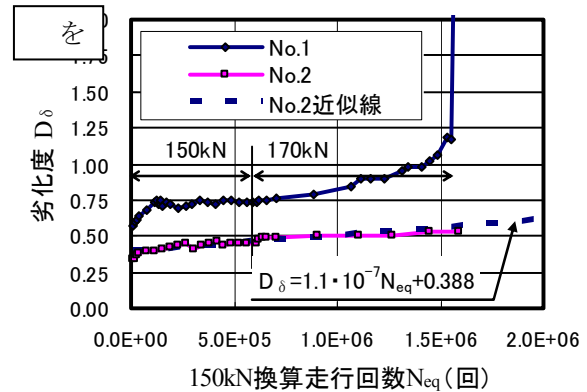


図-5 150kN 換算走行回数と劣化度

コンクリートの表層部のはく離や、ブロック化したコンクリートのずれ動に伴う炭素繊維シートのはく離が生じたものと考えられる。これらのはく離の範囲が進展することはない、その外側（写真-1 破線部）で押抜きせん断破壊により終局に至った。曲げモーメントが最大となる床版中央部では、はく離は発生しなかった。

No.2 供試体は、荷重 170kN、合計載荷回数 100 万回までたわみの顕著な増加がみられず、破壊しなかった。また、はく離は確認されなかった。

3.4 床版の劣化度と破壊寿命

はり状化した床版の押抜きせん断耐力（以下、押抜きせん断耐力と略す）を P_{sx} 、載荷荷重を P 、載荷回数を N 、 C は定数 ($C=1.52$; 乾燥時) として RC 床版の SN 関係式 (3) が提案されている⁵⁾。

$$\text{Log} \left(\frac{P}{P_{sx}} \right) = -0.07835 \text{Log} N + \text{Log} C \quad (3)$$

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式(3)より、各荷重ステップでの載荷回数を一定の評価荷重 P_0 に対して換算した式(4)で示す累積等価載荷回数 N_{eq} を算定した。

$$N_{eq} = \sum_{i=1,j} \left(n_i \cdot \left(\frac{P_i}{P_0} \right)^{\frac{1}{0.07835}} \right) \quad (4)$$

ここに、 n_i は荷重 P_i での載荷回数である。

図-5 には式(2)により算定した劣化度と式(4)より算定した 150kN 換算走行回数（評価荷重を 150 kN とした累積等価載荷回数）の関係を示す。

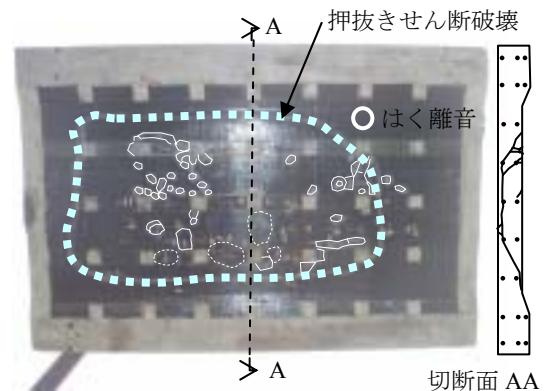


写真-1 破壊状況

いずれの供試体も、荷重 150kN では載荷初期に劣化度の増加が早い、その後増加速度が低くなり安定していた。荷重 170kN に増やすと、No.1 供試体は、150kN 載荷の後期に比べて劣化度の増加傾向が大きくなり、劣化度が 1.0 を超えた付近からさらに増加傾向が顕著となり 1.24 を超えた後、押抜きせん断破壊に至っている。このことから、炭素繊維シートにより補強した RC 床版に対しても、通常の RC 床版と同様に式(2)を用いて床版の劣化度の評価が可能で、劣化度 1.0 を使用限界寿命とみなすことは妥当であると考えられる。

3.5 炭素繊維シートの補強量と寿命延命効果

炭素繊維シートの補強効果は無補強の RC 床版の寿命に対する補強床版の寿命の比（以下、寿命増加率）として検討する。各供試体の断面寸法、鉄筋量・位置、コンクリート強度から炭素繊維シートを考慮しない無補強の RC 床版（母床版）の押抜きせん断耐力 P_{sx0} を算定した。この P_{sx0} を用いて母床版の 150kN 載荷における破壊

回数 N_{c0} を、式(3)より算定した。破壊までの150kN 換算走行回数 N_{equ} を式(4)で計算し、それを補強床版の寿命の実験値とした。表—5 に各供試体の母床版、補強床版の寿命および寿命増加率を示す。なお、No.2 供試体は170kN 載荷でも劣化度の増加傾向に大きな変化はなく安定して緩やかに増加し、100 万回載荷まで破壊に至らなかったため、図—5 に示す劣化度と150kN 換算走行回数の関係を最小二乗近似($D_{\delta} = 1.1 \cdot 10^{-7} N_{eq} + 0.388$)し、線形外挿して劣化度が1.0 になる点から寿命を推定した。寿命増加率の実験値 N_{equ}/N_{c0} は、No.1 供試体で5.44、No.2 供試体(推定値)で19.88 となり無補強床版に比べて、5~20 倍程度の寿命の延びを示した。また炭素繊維シート引張剛性の高いNo.2 の方が寿命増加率が大きくなった。

表—5 には、既往の炭素繊維シート補強床版の輪荷重走行試験^{1),6),7)}の結果から、寿命増加率を試算した値を併せて示した。

炭素繊維シートを接着すると、床版断面の中立軸位置が下がり圧縮領域のコンクリートの有効断面が増加するため、床版の押抜きせん断耐力 P_{sx} も増加する。炭素繊維シートを考慮した断面の押抜きせん断耐力 P_{sxr} を算定した。この P_{sxr} から式(3)により求めた床版の破壊回数の計算値 N_{cr} から算定した寿命増加率の計算値 N_{cr}/N_{c0} は、

1.4~3.2 倍であり、実験値 N_{equ}/N_{c0} の5.4~27.4 倍よりも小さな値となった。炭素繊維シート補強による延命効果は、中立軸の移動によるコンクリートの有効断面の増加から算定される効果より大きいことが分かる。

表—5 の炭素繊維シートの引張剛性と実験の換算破壊回数から算定した寿命増加率の関係を図—6 にプロットした。文献 1)の床版厚が150mm のものを除くと、概ね炭素繊維シートの引張剛性が高くなると寿命増加率が増加する傾向にある。この傾向は、炭素繊維シートを全面接着したものでも格子接着したものでも大きな差は認められず、格子接着でも全面接着と同様の補強効果が得られると考えられる。本実験の厚さ160mm の床版に対しては炭素繊維シートの引張剛性を45kN/mm とすれば10 倍以上の寿命増加率が得られるものと考えられる。

図—6 のデータは、床版厚やコンクリート強度が異なり母床版の耐荷力が異なっている。そこで耐荷力の異なる床版に対する補強効果の統一の評価を試みた。母床版の押抜きせん断耐力 P_{sx0} に対する炭素繊維シート引張剛性 S_f の比を補強材比 ρ_f として式(5)より算出した。

$$\rho_f = S_f / P_{sx0} \quad (5)$$

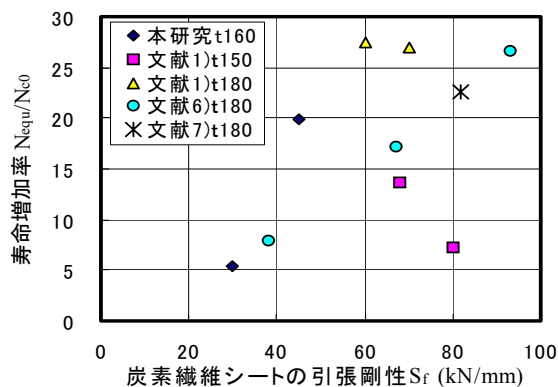
炭素繊維シートの補強材比と寿命増加率の関係を図—7 に示す。図—6 の炭素繊維シートの

表—5 炭素繊維シート補強床版の寿命増加率

供試体	床版厚 mm	炭素繊維シート			押抜きせん断耐力		計算寿命		換算破壊回数 N_{equ} 10 ³ 回	寿命増加率		文献
		貼付方法	引張剛性 S_f kN/mm	補強材比 ρ_f 1/mm	母床版 P_{sx0} kN	補強後 P_{sxr} kN	母床版 N_{c0} 10 ³ 回	補強後 N_{cr} 10 ³ 回		計算 N_{cr}/N_{c0}	実験 N_{equ}/N_{c0}	
No.1	163	格子A	30	0.113	265	272	295	417.9	1,605	1.42	5.44	実験
No.2	163	格子A	45	0.170	264	275	280	467.6	5,565*	1.67	19.88*	
No.3	150	格子A	80	0.379	211	231	16	51	116	3.19	7.25	1)
No.4	150	格子A	68	0.327	208	226	14	40	190	2.86	13.57	
No.5	180	格子B	70	0.254	276	300	512	1,477	13,813	2.88	26.98	
No.6	180	格子B	60	0.217	276	296	491	1,244	13,469	2.53	27.43	
S-GM	180	全面	38	0.130	291	302	1,013	1,586	8,092	1.57	7.99	6)
S-HM1	180	全面	67	0.230	291	310	1,013	2,175	17,345	2.15	17.12	
S-HM2	180	全面	93	0.319	291	316	1,013	2,816	26,951*	2.78	26.61*	
CF600	180	全面	82	0.279	294	317	1,133	2,888	25,587*	2.55	22.58*	

格子A：シート幅250mm 間隔100mm，格子B：シート幅250mm 間隔150mm

*：打ち切りデータ，たわみからの推定値



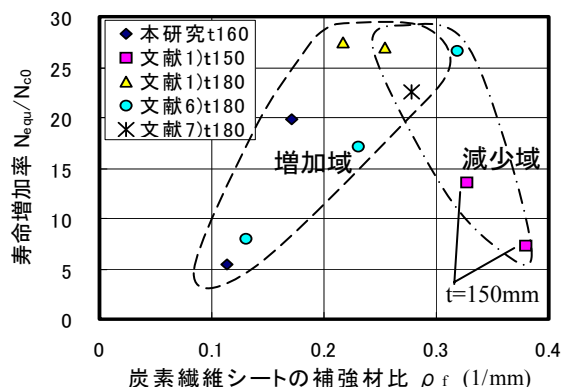
図一六 炭素繊維シートの引張剛性と寿命増加率

引張剛性と寿命増加率の関係に比べて、データの相関が強まり、補強材比 0.25~0.3 程度を境界に、補強材比が増加すると寿命増加率が增加する領域と、寿命増加率が減少する領域の 2 つの領域が見られる。過度に補強量を多くすると補強効果が低下する可能性があること、補強効果を評価する場合、母床版の耐荷力などの性状を考慮する必要があることが示唆された。

炭素繊維シート補強床版の疲労破壊は、床版コンクリート自体の疲労と炭素繊維シートとコンクリート界面の付着疲労破壊の二つの要因を考慮する必要があると考えられる。ここでは、炭素繊維シートによる RC 床版の疲労損傷の抑制効果について炭素繊維シートの引張剛性をパラメータの一つとして検討した結果、炭素繊維シートの補強材比と寿命増加率に相関が見られた。炭素繊維シートによる RC 床版の疲労損傷の抑制メカニズム、および炭素繊維シートの付着疲労によるはく離が補強効果に及ぼす影響については、今後の検討課題である。

4. 結論

- (a) 本研究のモデルとした床版厚 160mm の RC 床版に対しては、炭素繊維シートの引張剛性を 30~45kN/mm と、従来より少ない補強量としても、無補強床版に比べて 5 倍以上の寿命増加率が得られた。
- (b) 本実験では、炭素繊維シートの引張剛性が高い方が、補強後の RC 床版の劣化進行が抑制され高い寿命増加率が得られた。



図一七 炭素繊維シートの補強材比と寿命増加率

- (c) 炭素繊維シートの補強材比 0.25~0.3 程度をピークまでは、補強材比が増加すると寿命増加率が增加する傾向が見られた。

参考文献

- 1) 岡田昌澄, 大西弘志, 松井繁之, 小林朗: 格子配置された炭素繊維シートによる床版補強効果, 第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集 (土木学会), pp.175-180, 2003.6
- 2) 深山大輔, 林聖一郎, 松井繁之, 蔡華堅: 縦桁が増設された RC 床版への連続繊維シートによる再補強に関する研究, 第 59 回土木学会年次学術講演会 CS8, pp.271-272, 2004.9
- 3) 松井繁之, 前田幸雄: 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
- 4) 土木学会鋼構造委員会道路橋床版の調査研究小委員会: 道路橋床版の設計の合理化と耐久性の向上, 土木学会, 2004.11
- 5) 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
- 6) 星島時太郎, 坂井広道, 大田黒博文, 松井繁之: 損傷した道路橋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
- 7) 岸本真輝, 松井繁之: 目付量の大きい CFS で補強した床版の疲労耐久性の検討, 土木学会平成 13 年度関西支部年次学術講演会講演概要 I-23, 2001.6