論文　走行振動疲労荷重を受けたCFS補強RC床版の補強効果および残存耐力

阿部　忠[*1]・木田　哲量[*2]・徐　銘謙[*3]・澤野　利章[*4]

要旨：本研究は，走行振動疲労荷重を受けて応力履歴したRC床版を炭素繊維シート(CFS)で接着補強した場合の補強効果と残存耐力に関する実験研究である。応力履歴は，走行振動荷重による４万回走行の疲労実験で行った。また，補強効果は200万回の定点疲労実験と定点疲労実験後に静荷重実験を行って得た残存耐力得から評価した。その結果，無補強RC床版の耐力に比して，未損傷のRC床版をCFS補強した供試体は1.34倍の補強効果が得られた。また，無補強RC床版の耐力に比して応力履歴RC床版をCFS補強した供試体の残存耐力は荷重振幅±20%，±30%それぞれで1.24倍，1.13倍耐力が向上した。

キーワード：RC床版，炭素繊維シート，走行振動荷重，応力履歴，残存耐力，補強効果

１．はじめに

道路橋RC床版のひび割れ損傷におけるひび割れ補修・補強法の一つに施工性，工期短縮などに利点がある炭素繊維シート(CFS)接着工法がある[1)~5)]。

そこで本研究では，無補強RC床版の押抜きせん断耐力を基準に未損傷RCはりをCFS補強した場合および，走行振動荷重による4万回走行の疲労実験によって，応力履歴させたRC床版をCFS補強してから，定点疲労荷重を与えた後の静荷重実験による残存耐力からCFSの補強効果を評価した。

２．使用材料・寸法および補強方法

2.1　使用材料

供試体のコンクリートには普通ポルトランドセメント，粗骨材には最大寸法20mmの骨材を使用した。また，鉄筋はSD295A，D10を使用した。材料特性値は，コンクリートの圧縮強度が35N/mm^2，鉄筋の降伏強度が370N/mm^2，引張強度は510N/mm^2，弾性係数が200kN/mm^{2}である。CFSは目付量202g/m^2，厚さ0.111mmの高強度連続カーボンシートとし，その材料特性値は引張強度が4420N/mm^2，弾性係数は235kN/mm^{2}である。

2.2　供試体寸法および鉄筋の配置

RC床版は，複鉄筋配置とし，4辺単純支持とする．供試体の寸法は現行示方書[6)]の規定より設計し，1/2モデルとした。供試体の寸法は，支間長を120cm，供試体の張り出し部は13.5cmとし，全長は147cmである。鉄筋の配置は複鉄筋配置とし，引張側の軸直角方向および軸方向にD10をともに10cm間隔で配置し，有効高さをそれぞれ10.5cm，9.5cmとする。また，圧縮側には引張鉄筋量の1/2を配置した。供試体寸法および鉄筋の配置を**図１**に示す。

2.3　応力履歴RC床版のCFS接着補強法

CFSの貼り付けは，供試体の上面を輪荷重が走行する方向を軸方向とると，軸方向の支間内に１層，軸直角方向の支間内に１層貼り付けした。CFSの貼り付け方法は，①ひび割れ損傷を受けた供試体の底面をコンクリートサンダーで平滑に仕上げ，下地処理を行う。②エポキシプライマーを塗布含浸させる。③軸方向に接着用含浸樹脂でシートを接着する。④軸直角方向に接着用含浸樹脂でシートを接着する。接着方法を**図２**に示す。

*1日本大学　生産工学部土木工学科教授　博（工学）　（正会員）
*2日本大学　生産工学部土木工学科教授　工博　（正会員）
*3日本大学大学院　生産工学研究科　工修
*4日本大学　生産工学部土木工学科助教授　工博　（正会員）

３．実験方法

3.1　応力履歴の実験方法(F-V20, F-V30)

応力履歴のための走行振動荷重は，基準荷重60kNに対して荷重振幅を±20%，±30%の片振り荷重とし，走行は**図１**に示すように輪荷重を軸方向に走行させる。走行範囲は支間中央より±40cm，すなわち１走行80cmとする。走行速度は１往復1.6mを9.0secで走行する0.18m/sとし，振動数は1.8Hzの正弦波形とする。走行回数は4万回とし，1，10，100，1000，5000回および5000回以降は5000回走行ごとに，鉄筋ひずみを計測する。応力履歴した供試体の名称は荷重振幅±20%, ±30%を，それぞれF-V20，F-V30とする。

3.2 補強効果に関する実験方法

(1)　静荷重実験（N-S, C-S)

無補強RCはりおよびCFS補強RC床版は，静荷重実験を行って最大耐力を得る。静荷重実験は輪荷重を床版の中央に停止した状態で，荷重を5.0kNずつ増加する段階荷重載荷とし，供試体が破壊するまで荷重を増加する。無補強RC床版の名称をN-S, 未損傷RC床版底面をCFS補強した供試体をCFS補強RC床版と称し，C-Sとする。なお，無補強RC床版の静荷重実験における最大耐力を基準耐力とする。

(2)　応力履歴CFS補強RC床版の定点疲労実験および静荷重実験（C-V20, C-V30)

1) CFS補強RC床版の定点疲労実験

応力履歴RC床版をCFS補強した供試体を応力履歴CFS補強RC床版と称し，供試体中央で200万回定点の疲労実験を行う。定点疲労実験の荷重振幅は基準荷重に対して±20%，±30%の5.0Hzの正弦波形とする。荷重は，基準荷重60kNで荷重振幅±20%と基準荷重84kNで荷重振幅±20%の片振り荷重とし，供試体名称をそれぞれC-V20(60)，C-V20(84)とする。また，基準荷重60kNで荷重振幅±30%，基準荷重77kNで荷重振幅±30%の片振り荷重とし，供試体名称はF-V20，F-V30を，それぞれC-V30(60)，C-V30(77)とする。

2) 定点疲労実験後の静荷重実験

200万回の定点疲労実験終了後は静的実験を行い，残存耐力を得る。荷重載荷条件は，3.2(1)に示した供試体が破壊するまで荷重を5.0kNずつ増加させる段階載荷である。この場合の最大耐力を残存耐力とする。

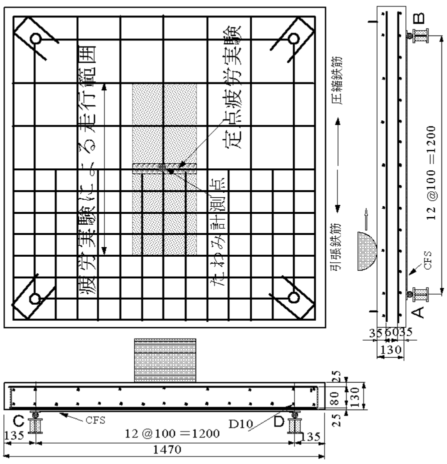


図１　供試体寸法・鉄筋配置

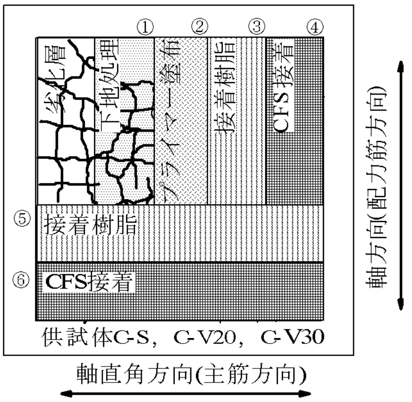


図２　CFSの貼り付け方法

４．走行振動荷重による疲労実験の結果

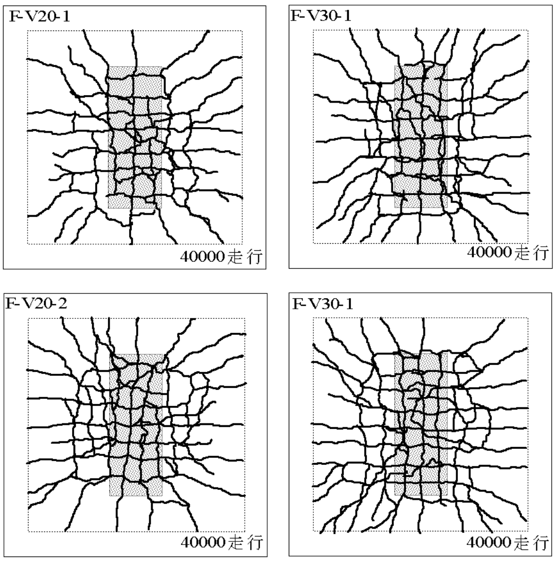
4.1 走行振動荷重による疲労実験のひび割れ状況

走行振動荷重±20%の場合のひび割れ状況は**図３**(1)に示すように，供試体F-V20-1，2ともに輪荷重の走行範囲に集中し，軸直角方向およびと軸方向に配置した鉄筋の位置で発生している。また，輪荷重の走行端部から床版の隅角方向にもひび割れが発生している。次に，走行振動荷重±30%の場合も**図３**(2)に示すように，供試体F-V30-1，2ともに軸方向および軸直角方向に発生している。走行振動荷重±20%の場合のひび割れと比較すると，走行振動荷重±30%の場合が広範囲に渡ってひび割れが発生している。このひび割れしている底面にCFSを軸方向および軸直角方向に１層ずつ貼り付けした。

4.2　荷重とひずみの関係

(1)　応力履歴時の鉄筋ひずみと走行回数の関係

走行振動荷重による4万回走行した床版中央に配置されている軸直角方向の主鉄筋のひずみは，走行回数が5000回走行付近までは，走行振動荷重



(1) F-V20　　　(2) F-V30

図３　走行振動荷重４万回走行時のひび割れ状況

±20%，±30%とも急激に増加するが，その後の走行回数では，わずかの上昇が見られるがほぼ安定している（図４(1)）。4万回走行時のひずみは，走行振動荷重±20%の供試体F-V20-1，2でそれぞれ，1420×10^{-6}，1470×10^{-6}である。また，この時点での残留ひずみは，約670×10^{-6}である。次に，走行振動荷重±30%の供試体F-V30-1，2のひずみは，それぞれ，1700×10^{-6}，1780×10^{-6}である。また，このときの残留ひずみは，約750×10^{-6}である。いずれにおいても鉄筋は降伏に至っていない。

軸方向，すなわち配力筋のひずみは，供試体F-V20-1，2で，それぞれ1200×10^{-6}，1340×10^{-6}である（図４(2)）。また，このときの残留ひずみは，約500×10^{-6}である。次に，供試体F-V30-1，2のひずみは，それぞれ，1550×10^{-6}，1650×10^{-6}である。また，このときの残留ひずみは，約570×10^{-6}である。いずれにおいても鉄筋は降伏に至っていない。

(2) 定点疲労実験における鉄筋のひずみ

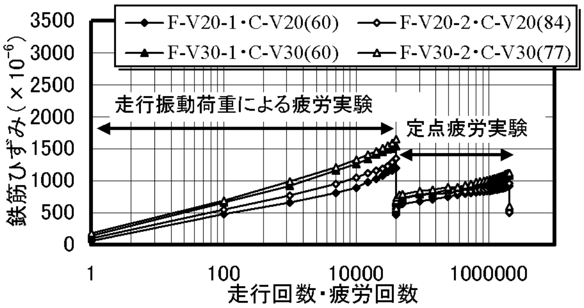
図４に示した鉄筋ひずみは走行振動荷重による疲労実験後の残留ひずみを初期値とした。

軸直角方向鉄筋における定点疲労実験のひずみは，C-V20(60), (84)で，それぞれ917×10^{-6}, 1015×10^{-6}である（図４(1)）。また，供試体C-V30(60), (77)で，それぞれ1072×10^{-6}，1135×10^{-6}となり，いずれも鉄筋の降伏ひずみ(1840×10^{-6})に達していない。走行振動荷重による4万走行時のひずみに比して供試体C-V20(60)が34%，C-V20(84)が30%低減している。また，供試体C-V30(60), C-V30(77)で，37%, 34%のひずみが低減した。したがって，CFS補強したことにより，主鉄筋ひずみの増加が抑制されていることが確認できる。

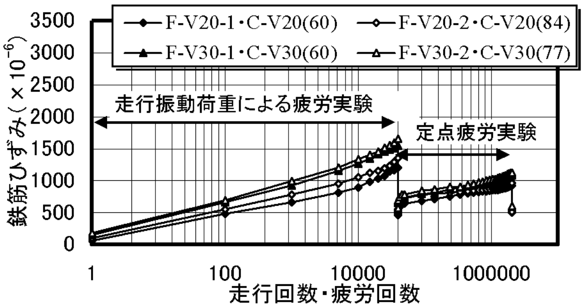
軸方向鉄筋における定点疲労実験のひずみは，供試体C-V20(60)，(84)で，それぞれ925×10^{-6}, 967×10^{-6}である。また，供試体C-V30(60)，(77)で，それぞれ1086×10^{-6}，1020×10^{-6}である（図４(2)），軸方向鉄筋もCFS補強することで鉄筋ひずみが低減されている。走行振動荷重による4万回走行時のひずみに比して供試体C-V20(60), (84)で，それぞれ27%，18%低減し，供試体C-V30(60), (77)の場合は，30%，39%の低減が図られた。したがって，軸直角方向鉄筋のひずみ同様に，走行振動荷重による疲労実験のひずみに対してCFS補強後の定点疲労実験のひずみ増加も大幅に抑制されている。

4.3　定点疲労実験におけるCFSのひずみ

軸直角方向CFSのひずみは，供試体C-V20(60),

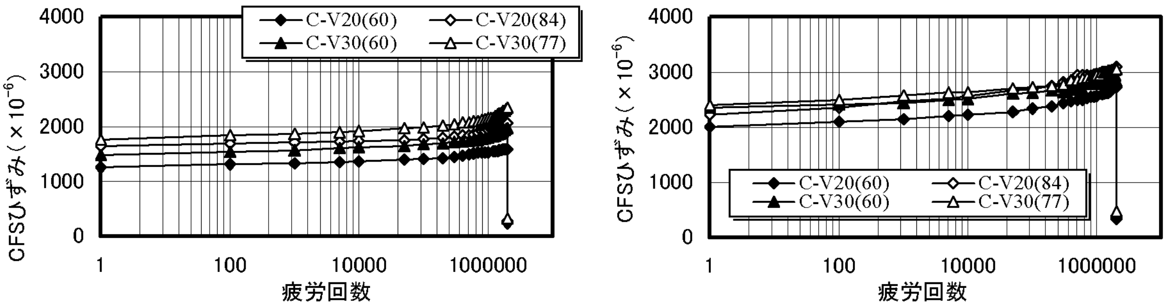


(1) 軸直角方向



(2) 軸方向

図４　鉄筋のひずみと走行回数・疲労回数の関係



(a) 軸直角方向　　　　(b) 軸方向

図５　CFS のひずみ

(84)で，それぞれ1590×10^{-6}，2069×10^{-6} であり，残留ひずみは244×10^{-6}，289×10^{-6}である（**図５(1)**）。また，供試体C-V20(60)，(77)の場合のひずみは，それぞれ1974×10^{-6}，2069×10^{-6}であり，残留ひずみは376×10^{-6}，327×10^{-6}である。

軸方向CFSのひずみは，供試体C-V20(60)，(84)で，それぞれ2730×10^{-6}，3097×10^{-6}であり，残留ひずみは341×10^{-6}, 387×10^{-6}である（**図５(2)**）。また，供試体C-V20(60)，(77)の場合のひずみは，それぞれ1974×10^{-6}，2069×10^{-6}であり，残留ひずみは440×10^{-6}，470×10^{-6}である。

以上より，本実験の荷重載荷条件内では，CFSを軸直角方向と軸直角方向の２層貼り付けたことから，200万回の疲労実験においても，軸直角方向および軸方向ともにCFSのひずみの急激な増加は見られない。また，CFSの破断ひずみは材料特性値より18900×10^{-6}であり，CFSは破断ひずみの20%以下で破壊に至った。したがって，疲労寿命の向上が図られたものと考えられる。

５．実験耐力および荷重とひずみの関係

5.1　最大耐力および残存耐力

(1)　無補強RC床版の最大耐力

無補強RC床版の静荷重実験における最大耐力は**表１**より，供試体N-S1，2の最大耐力の平均の237.8kNである。この最大耐力とCFS補強RC床版および応力履歴CFS補強RC床版の最大耐力と比較して補強効果を評価する。なお，破壊は押抜きせん断破壊である。

(2)　CFS補強RC床版の最大耐力

表１　最大耐力および疲労実験後の残存耐力

供試体名	実験方法	最大・残存耐力 (kN)	平均最大・残存耐力 (kN)	耐力比 N/CFS (kN)	最大たわみ (mm)
N-S1	静荷重実験	235.3	237.8	―	13.7
N-S2		240.2			12.8
C-S1	静荷重実験	315.3	318.1	1.34	6.5
C-S2		320.9		1.34	6.8
C-V20(60)	200万回の定点疲労	300.0	300.0	1.26	9.9
C-V20(84)	実験後静荷重実験	290.3	290.3	1.22	8.6
C-V30(60)	200万回の定点疲労	275.2	275.2	1.16	8.7
C.V30(77)	実験後静荷重実験	259.5	259.5	1.09	8.2

N-:無補強RC床版、C-S:CFS補強RC床版、C-V20(60):応力履歴CFS補強RC床版、(V20(60):基準荷重60kNに対して荷重振幅±20%の定点疲労実験)、C-V30(60):応力履歴CFS補強RC床版、(V30(60):基準荷重60kNに対して荷重振幅±30%で定点疲労実験)

未損傷RC床版の底面を２方向にCFS補強した供試体C-S1，2の最大耐力の平均，すなわち残存耐力は318.1kNである。無補強RC床版の最大耐力は237.8kNであるから，CFS補強RC床版との耐力比は1.34倍となる補強効果が得られた。なお，破壊は押抜きせん断破壊である。

(3)　応力履歴CFS補強RC床版の残存耐力

走行振動荷重±20%で4万回走行の疲労実験で応力履歴した後にCFS補強したRC床版に200万回の定点疲労実験後の静荷重実験における残存耐力を**表１**に示した。よって，供試体C-V20(60)は300kNであり，無補強RC床版(N-S)の最大耐力に比して1.26倍耐力が向上した。また，供試体C-V20(84)の残存耐力は290.3kNとなり，無補強RC床版(N-S)に比して1.22倍の耐力の向上が見られた。次に，供試体C-V30(60)の残存耐力は275.2kNとなり，耐力が1.16倍向上した。また，供試体C-V30(77)の場合の残存耐力が259.5kNであることから 1.09倍となり，無補強RC床版の耐力とほぼ同等な結果となった。いずれにおいても，残存耐力の面からもひび割れ損傷を受けたRC床版を軸方向および軸直角方

向にそれぞれ１層ずつCFS補強したことにより，補強効果が明らかにされた。供試体の破壊は輪荷重直下で押抜きせん断破壊となった。押抜き破壊となった部分はCFSがはく離している。

5.2 静荷重実験における鉄筋のひずみ

(1) 無補強RC床版（N-S）

軸直角方向引張鉄筋のひずみは図６(1)より，無補強RC床版の降伏荷重は供試体N-S1，2で，それぞ150kN，155kNであり，荷重225kN付近からひずみの増加が著しく終局時のひずみは，6300×10^{-6}，5660×10^{-6}である。したがって，無補強RC床版は終局荷重の63%で降伏している。また，軸方向の引張鉄筋のひずみは図６(2)より，無補強供試体の降伏荷重は供試体N-S1，2で，それぞれ140kN，150kNであり，終局時のひずみは，それぞれ9550×10^{-6}，7690×10^{-6}である。終局時のひずみは軸直角方向のひずみと比較すると，増加が著しい。

(2) CFS補強RC床版（C-S）

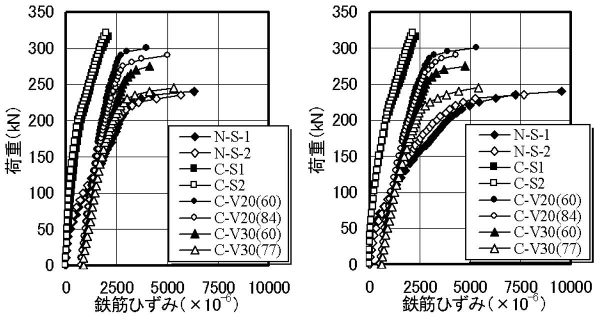
軸直角方向引張鉄筋のひずみはCFS補強RC床版の降伏荷重は供試体C-S1，2で，それぞ305kN，315.3kNであり，その後の荷重増加においては急激なひずみの増加が見られなく終局時のひずみは，2140×10^{-6}，2010×10^{-6}である。CFS補強を施したことにより，引張主鉄筋のひずみの増加も抑制されている。 また，軸方向引張鉄筋のひずみはCFS補強RC床版の降伏荷重は供試体C-S1，2で，それぞ280kN，300kNであり，その後の荷重増加においては急激なひずみの増加が見られなく，終局時のひずみは2350×10^{-6}，2160×10^{-6}である。軸直角方向鉄筋と同様にCFS補強を施したことにより，軸方向引張鉄筋のひずみの増加も抑制されている。

(3) 応力履歴CFS補強RC床版

応力履歴CFS補強RCはりの鉄筋ひずみは，定点疲労実験における残留ひずみを初期値として図６に示した。

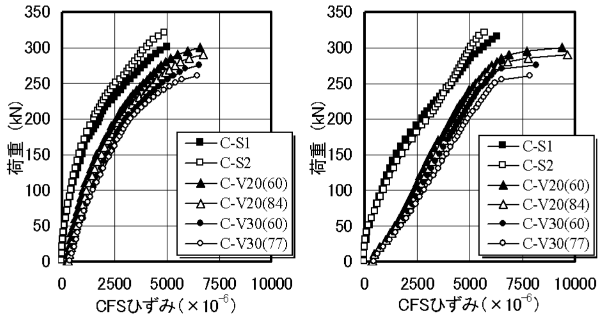
軸直角方向引張鉄筋は図６(1)より，振動荷重±20%の供試体CFS-V20(60)の降伏荷重は205kNであり，終局時のひずみが3990×10^{-6}である。また，C-V20(84)の降伏荷重は185kNであり，終局時のひずみは，5027×10^{-6}である。次に，振動荷重±30%の供試体C-V30(60)は荷重160kNで降伏し，終局時のひずみは4111×10^{-6}である。供試体C-V30(77)は荷重160kNで降伏し，終局時のひずみが5331×10^{-6}である。無補強RC床版の平均降伏ひずみと比較すると，供試体C-V20(60)，(84)で，それぞれ1.88倍，1.74倍となった。また，供試体C-V30(60)，(77)の場合は，1.57倍，1.48倍となった。

軸方向引張鉄筋は荷重振幅±20%の供試体C-V20(60)の降伏荷重は195kN，終局時のひずみは5344×10^{-6}である。また，供試体C-V20(84)の場合の降伏荷重190kNであり，終局時のひずみは4302×10^{-6}である。次に，荷重振幅±30%の供試体C-V30(60)の降伏荷重は175kNで，ひずみが4752×10^{-6}である。供試体C-V30(77)の場合は荷重160kNで降伏し，終局時のひずみが5345×10^{-6}である。無補強RC床版の降伏荷重と比較すると，供試体C-V20(60)，供試体C-V20(84)で，それぞれ1.72倍，1.62倍である。また，供試体C-V30(60)，C-V30(77)の場合は，それぞれ1.55倍，1.49倍となり，軸直角方向引張鉄筋と同様に降伏荷重も向上している。したがって，RC



（1）軸直角方向　（2）軸方向

図６　荷重とひずみの関係（鉄筋）



（1）軸直角方向　（2）軸方向

図７　荷重とひずみの関係（CFS）

床版の底面を２方向にCFS補強することにより，軸直角方向および軸方向ともに鉄筋のひずみの増加も抑制されている。

5.3 CFSのひずみ

(1) CFS補強RC床版

軸直角方向CFSの終局時のひずみは**図７(1)**に示すように，供試体C-S1，2の場合，それぞれ4890×10^{-6}，4630×10^{-6}である。また，軸方向のCFSは，それぞれ，5780×10^{-6}，5350×10^{-6}である。未損傷RC床版をCFSで補強した供試体であることから，いずれも，破断ひずみ(18900×10^{-6})の30%程度で破壊に至っている。

(2) 応力履歴CFS補強RC床版

軸直角方向CFSの終局時のひずみは**図７(1)**に示すように，供試体C-V20(60)，供試体C-V20(84)の場合，それぞれで6650×10^{-6}，6760×10^{-6}である。次に，供試体C-V30(60)，C-V30(77)の場合，それぞれ6550×10^{-6}，6480×10^{-6}である。いずれの供試体ともに，破断ひずみの30%付近で破壊している。

軸方向CFSの終局時のひずみは**図７(2)**に示すように，供試体C-V20(60)の荷重290kNまではほぼ線形的に増加し，その後の荷重増加でひずみは急激に増加し，終局時のひずみは9441×10^{-6}である。また，C-V20(84)の場合は，荷重275kNまでは線形的に増加し，終局時のひずみは9657×10^{-6}である。次に，供試体C-V30(60)の場合は荷重は260kNまで線形的に増加するが，その後の荷重増加で急激に歪みが増加し，終局時のひずみは8170×10^{-6}，供試体C-V30(77)の場合も，荷重は255kNで急激に増加し，終局時のひずみは7870×10^{-6}である。いずれの供試体ともに軸直角方向に比して，V20の場合が1.5倍，V30の場合が1.4倍のひずみとなっている。いずれの供試体ともに破断ひずみに達していない。

６．まとめ

(1)無補強RC床版の最大耐力に比して未損傷RC床版にCFS補強した場合は1.34倍耐力が向上した。

(2)無補強RC床版の最大耐力と応力履歴RC床版にCFS補強した場合は，200万回の定点疲労実験後の残存耐力を比較すると，荷重振幅±20%の場合の基準荷重60kNでは1.26倍，基準荷重84kNでは1.22倍耐力が向上した。また，荷重振幅±30%の場合の基準荷重60kNでは1.16倍，基準荷重77kNでは1.09倍となり，荷重振幅が大きくなるほど耐力向上は小さくなる。

(3)200万回の疲労実験におけるCFSの最大ひずみは，軸直角方向，軸方向ともにCFSの破断ひずみの約20%以下である。したがって，底面を２方向に１層ずつCFS補強することでCFSのひずみの増加も抑制できた。

(4)200万回の疲労実験後の静荷重実験における最大荷重時のCFSひずみの平均は，軸直角方向が5500×10^{-6}，軸方向は8200×10^{-6}となり，それぞれ破断ひずみの約30%，45%で破壊となった。したがって，CFSを２層貼り付けすることで，疲労寿命の増加，耐力向上が図られるものと考えられる。

謝辞：

本実験に際しまして，炭素繊維シートは日鉄コンポジット（株）に提供して頂ました。ここに付記し，謝意を表します。

参考文献：

1) たとえば，高橋義幸ほか：コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.3， pp.509-514，1998
2) たとえば，三上浩ほか：コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3， pp. 1549-1554，1999
3) 村田賢佑ほか：CFS補強した応力履歴RCはりの力学性状に関する実験研究，セメント・コンクリート論文集，No.58，pp. 510-517，2004
4) 星島時太郎ほか：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 98-9，pp.1-6，1998
5) 岡田昌澄ほか：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，pp.175-180，2002
6) 日本道路橋会：道路橋示方書・同解説Ⅰ，Ⅱ，2003