

CFS 補強 RC 床版の補強効果および押抜きせん断耐荷力評価式[†]

澤 野 利 章* 阿 部 忠* 徐 銘 謙**
木 田 哲 量* 西 林 聖 武**

Experimental Research on the Rehabilitation Effects and Punching Shear Load-Carrying Capacity for the Evaluation Equation of RC Slabs with CFS

by

Toshiaki SAWANO*, Tadashi ABE*, Ming-Chien Hsu**, Tetsukazu KIDA* and Masatake NISHIBAYASHI**

The authors have conducted a fatigue load test due to a fixed point-loading on the reinforced concrete (RC) slabs strengthened with carbon fiber sheets (CFS) on those bottom sides; subsequently, the reinforcement effects by virtue of their residual strengths after the static load tests were evaluated and then the theoretical equation of the load carrying capacity as to the CFS-reinforced RC slabs has been proposed. As the result, the increasing strength ratios of the non-damaged CFS-reinforced RC slab and the CFS-reinforced RC slabs subjected to the stress hysterisises under the running vibration loads of $\pm 20\%$ and $\pm 30\%$ amplitudes were 1.35, 1.24 and 1.09 times in comparison with the static strength of CFS-unreinforced RC slab, respectively. Furthermore, the theoretical equation of punching shear load carrying capacity of the CFS-reinforced RC slab accumulating the CFS-effective increment to that of the ordinary RC slab has been proposed; consequently the theoretical value agrees well with the experimental one whether the CFS-reinforced RC slab is non-damaged or not.

Key words: RC slab, CFS reinforcement, Running vibration fatigue load, Fixed point fatigue load test, Rehabilitation effect, Punching shear load-carrying capacity

1 緒 言

道路橋 RC 床版は、大型自動車の繰り返し荷重の作用により疲労寿命が低下し、ひび割れ損傷が生じることがある。このひび割れ補修・補強法の一つに施工性、工期短縮などの利点がある炭素繊維シート (CFS)、アラミド繊維シート (AFRP) 接着工法がある。道路橋 RC 床版のひび割れ損傷に対する CFS 接着工法は、曲げによるたわみや応力度の低減、コンクリートのひび割れの拘束、疲労寿命の向上など、多くの利点があり^{1)~5)}その施工実績も年々増加している。松井ら¹⁾は、3 種類の CFS を用い、ひび割れ発生させた RC 床版を補強して輪荷重走行試験機による、一定な荷重による疲労実験を行っている。その結果、疲労耐久性の向上やひび割れ面のせん断分担力の回復、床版ねじり剛性の回復などの補強効果が報告されている。また、三上ら³⁾は鉄筋比、シート層数の異なる試験体を用いて静的実験を行い、押抜きせん断性状のモデル化と耐荷力式を提案している。しかし、静荷重および走行荷重が作用する CFS 補強 RC 床版の補強効果および押抜きせん断力学モデルと耐荷力式については研究例が少なく、合理的な設計手法の確立に至っていないのが現状である。

そこで本研究は、CFS 補強 RC 床版の理論押抜きせん断耐荷力を評価するために、未損傷の RC 床版の底面を CFS 補強した供試体と大型自動車荷重を想定した走行振

動疲労荷重を受けた RC 床版の底面を CFS 補強した供試体を用いて、静的実験および定位置での疲労実験を行い、CFS の補強効果を評価するとともに、CFS 補強 RC 床版の押抜きせん断耐荷力に関する力学モデルとその評価式を提案し、CFS 補強 RC 床版の設計押抜きせん断耐荷力評価式の確立への一助とする。

2 実 験 方 法

2・1 供試体材料および寸法

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。材料特性値を Table 1 に示す。次に、補強材には高強度連続カーボンシート (CFS) を用い、その材料特性値を Table 2 に示した。

供試体の寸法は道路橋示方書・同解説 II (以下、現行示方書)⁶⁾に規定する RC 床版寸法の 1/2 モデルとした。供試体寸法および鉄筋の配置を Fig. 1 に示す。

2・2 CFS 接着補強法

道路橋 RC 床版の補修・補強法⁷⁾に従って、未損傷 RC 床版および応力履歴 RC 床版供試体の底面に CFS 接着を行う。両供試体ともに軸方向および軸直角方向の 2 方向に貼り付けした。CFS 接着方法は次の手順で行う。まず、① 未損傷の供試体および応力履歴により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 (引張強

[†] 原稿受理 平成 19 年 1 月 22 日 Received Jan. 22, 2007 ©2007 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 日本大学生産工学部土木工学科 〒275-8575 習志野市泉町, College of Industrial Tech., Nihon Univ., Izumi-cho, Narashino, 275-8575

** 日本大学生産工学部土木工学科 〒275-8575 習志野市泉町, College of Industrial Tech., Nihon Univ., Izumi-cho, Narashino, 275-8575

Table 1 Physical properties of concrete and reinforcements.

Specimen	Compressive strength of concrete N/mm ²	Rebar (SD295A, D10)		
		Yield strength N/mm ²	Tensile strength N/mm ²	Young's modulus kN/mm ²
RC-Slab	35.0	370	511	200

Table 2 Physical properties of Carbon Fiber Sheet (CFS).

Name of CFS	Unit weight (g/m ²)	Thickness (mm)	Tensile strength (N/mm ²)	Young's modulus (kN/mm ²)
High strength of CFS	202	0.111	4420	235

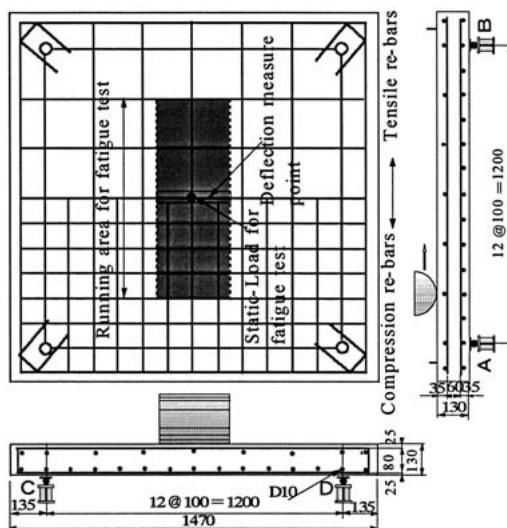


Fig. 1 Specimen size and reinforcement arrangement.

度：30N/mm²以上，曲げ強度：40N/mm²以上）を塗布含浸させる。③ 軸方向に接着用エポキシ含浸樹脂（コンクリート付着強度：1.9N/mm²）でCFSを接着する。④ 接着用含浸樹脂でCFSを接着する。以上の方法により，床版底面を軸方向および軸直角方向に，幅40cmのCFSを支点間内に1層ずつ貼り付けした。

2・3 応力履歴させる方法

応力履歴を与える実験方法は，大型自動車の走行振動による荷重変動を想定した走行振動荷重による4万回走行の疲労実験である。本実験の供試体は，現行示方書に規定するRC床版の1/2モデルであることから，荷重は設計T荷重の1/2である50kNに安全率を考慮した60kN（=50×1.2）を基準荷重とする。したがって，実験は基準荷重60kNに対して荷重振幅が±20%，±30%の片振り荷重とする。走行範囲は支間中央より±40cm，すなわち一走行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。実験は1，10，100，1000，5000回および5000回以降は5000回ごとに，鉄筋ひずみおよびCFSひずみを計測する。応力履歴させる供試体の名称をF-V20，F-V30とする。

2・4 補強効果に関する実験方法

走行振動荷重による4万回走行の疲労実験においてひび割れを受けた供試体の底面をCFS補強した供試体に，Fig. 1に示す床版中央での200万回の疲労実験（以下，定点疲労実験とする）を行い，荷重とひずみの関係から補強効果を評価する。また，無補強供試体の静的実験による最大耐荷力とCFS補強した供試体の定点疲労実験後の静荷重実験を行い，これらから残存耐荷力を得て，補強効果を評価する。

2・4・1 静荷重実験 静荷重実験は，車輪を床版の中央に停止した状態の荷重載荷実験である。荷重の大きさは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床版の静荷重実験における最大耐荷力を基準耐荷力とする。静荷重実験における無補強RC床版供試体名称をN-Sとし，CFS補強RC床版供試体をC-Sとする。

2・4・2 定点疲労実験および静荷重実験 応力履歴CFS補強RC床版には，床版中央で200万回の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%であり，5.0Hzの正弦波形とする。荷重は次の4種類とし，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)と称する。次に，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，名称をそれぞれC-V30(60)，C-V30(77)とした。

200万回の定点疲労実験終了後に，静荷重実験を行い，残存耐荷力を得る。荷重載荷条件は無補強RC床版およびCFS補強RC床版の静荷重実験と同様に荷重5.0kNずつ供試体が破壊するまで増加する段階荷重実験を行う。

3 実験結果および考察

3・1 4万回走行の疲労実験におけるひび割れ状況

走行振動荷重による4万回走行後の疲労実験によるひび割れ状況をFig. 2に示す。

走行振動荷重±20%の場合のひび割れ状況はFig. 2(1)，(2)に示すように，各供試体ともに輪荷重の走行範囲に集中し，軸方向および軸直角方向ともに鉄筋の配置付近にひび割れが発生している。次に，走行振動荷重±30%の場合もFig. 2(3)，(4)に示すように，軸方向および軸直角方向にひび割れが発生している。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。したがって，荷重振幅が大きくなるほどひび割れ損傷が著しくなる。

本実験におけるひび割れ損傷度は，土木研究所の補修・補強に関する設計・施工指針（案）⁷⁾によると，走行振動荷重±20%の場合は損傷度段階がc，走行振動荷重±30%の場合が損傷度段階dの基準に相当するものと考えられる。このひび割れ損傷に対して2・2項で記載した方法により，まず軸方向に1層貼り付け，その後，軸直角方向にCFSを1層ずつ貼り付けした。

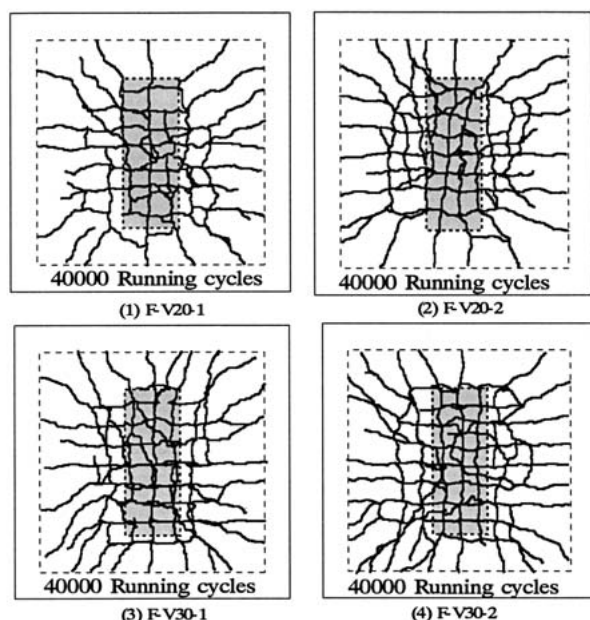


Fig. 2 Cracking pattern of RC slab.

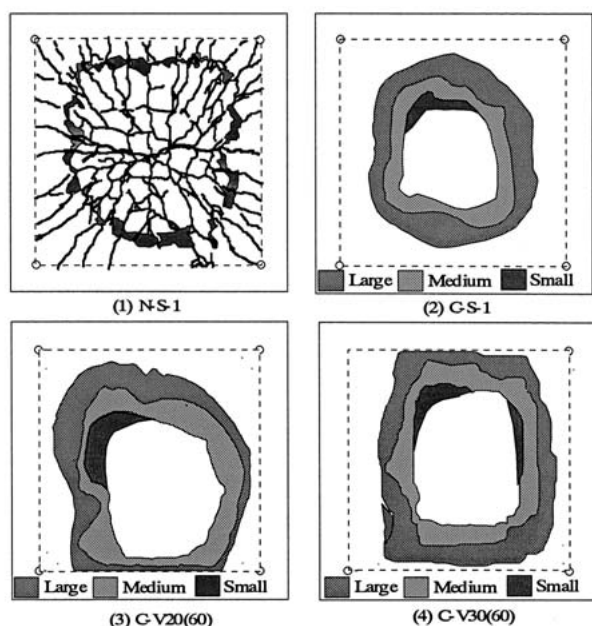


Fig. 3 Cracking patterns and CFS peeled off.

3・2 CFS 補強に関する結果および考察

3・2・1 実験最大耐荷力 無補強 RC 床版, CFS 補強 RC 床版および応力履歴 CFS 補強 RC 床版の実験耐荷力を Table 3 に示す.

無補強 RC 床版の静荷重実験における最大耐荷力は, 供試体 N-S-1, 2 の平均が 237.8kN である. この最大耐荷力の平均と CFS 補強 RC 床版および応力履歴 CFS 補強 RC 床版の最大耐荷力を比較して補強効果を評価する.

CFS 補強 RC 床版の供試体 C-S-1, 2 の最大耐荷力の平均は 318.1kN である. 無補強 RC 床版の最大耐荷力の平均と比較すると 1.34 倍の補強効果が得られた.

応力履歴 CFS 補強 RC 床版の耐荷力は 200 万回の定点疲労実験後の静荷重実験の結果である. 振動荷重 $\pm 20\%$

Table 3 Maximum load carrying capacity and failure modes.

Test Specimen	Maximum load-carrying capacity (kN)	Average value (kN)	Ratio N/C (kN)	Maximum Deflection (mm)	Failure Modes
N-S-1	235.3	237.8	—	13.7	Punching shear failure
N-S-2	240.2			12.8	Punching shear failure
C-S-1	315.3	318.1	1.34	6.5	Punching shear failure
C-S-2	320.9		1.34	6.8	Punching shear failure
C-V20(60)	300.0	300.0	1.26	9.9	Punching shear failure
C-V20(84)	290.3	290.3	1.22	8.6	Punching shear failure
C-V30(60)	275.2	275.2	1.16	8.7	Punching shear failure
C-V30(77)	259.5	259.5	1.09	8.2	Punching shear failure

の供試体 C-V20 (60) は 1.26 倍, 1.22 倍の耐荷力の向上が見られた. また, 振動荷重 $\pm 30\%$ の供試体 C-V30 (60) は 1.16 倍の耐荷力が向上した. なお, 供試体 C-V30 (77) は 259.5kN であることから無補強 RC 床版の最大耐荷力とほぼ同等な結果となった. いずれにおいても, 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 1 層ずつ CFS 補強したことにより, 最大耐荷力が向上する結果となった.

3・2・2 破壊状況 本実験における RC 床版の破壊時のひび割れ状況, CFS のはく離状況の一例を Fig. 3 に示す. なお, Fig. 3 に示したはく離の大小は, 打音法によるはく離部の音を大, 濁音を中, やや濁音のある部分を小とした.

無補強 RC 床版のひび割れ状況は Fig. 3 (1) に示すように, 鉄筋の配置間隔で発生し, また降伏線方向にもひび割れが発生している. 破壊状況は輪荷重の接地面から約 45 度の傾斜角で押抜かれ, 引張鉄筋の底面コンクリートはダウエル効果によりはく離している. 破壊モードは押抜きせん断破壊である.

CFS 補強 RC 床版は Fig. 3 (2) に示すように, 荷重載荷位置から約 45 度の底面に CFS のはく離がみられる. これはコンクリートのダウエル効果による引張破壊している位置である. したがって, 無補強 RC 床版のダウエル効果によりコンクリートがはく離した位置で CFS のはく離が生じている. 破壊モードは, 押抜きせん断破壊となっている.

応力履歴 CFS 補強 RC 床版の振動荷重 $\pm 20\%$ の場合は Fig. 3 (3) に示すように, 定点疲労実験後の静荷重実験における破壊状況は, 輪荷重の接地面から約 45 度の傾斜角で押抜かれ, 引張鉄筋のかぶりコンクリートがはく離し, 同時に CFS のはく離破壊となった. また, 振動荷重 $\pm 30\%$ の疲労荷重を受けた供試体の破壊状況は Fig. 3 (4) に示すように, RC 床版は押抜きせん断破壊し, 荷重載荷位置から約 35 度から 50 度の角度の底面のコンクリートがはく離し, 同時に CFS もはく離した. したがって, 破壊モードは輪荷重直下で押抜きせん断破壊となった.

3・2・3 定点疲労実験の引張鉄筋のひずみ 支間中央における引張鉄筋の荷重とひずみの関係を, 軸直角方向 (主鉄筋) の場合を Fig. 4 (1), 軸方向 (配力筋) の場合を Fig. 4 (2) に示す. また, 200 万回の定点疲労実

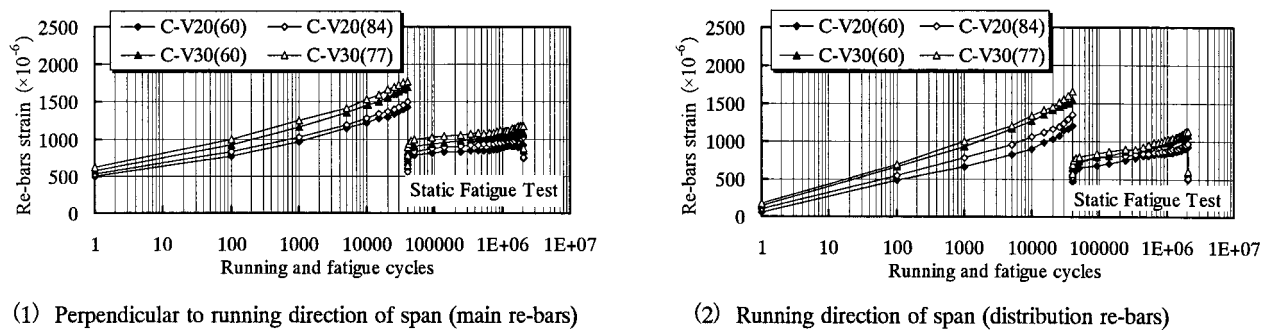


Fig. 4 Relationship between strain and cycle times.

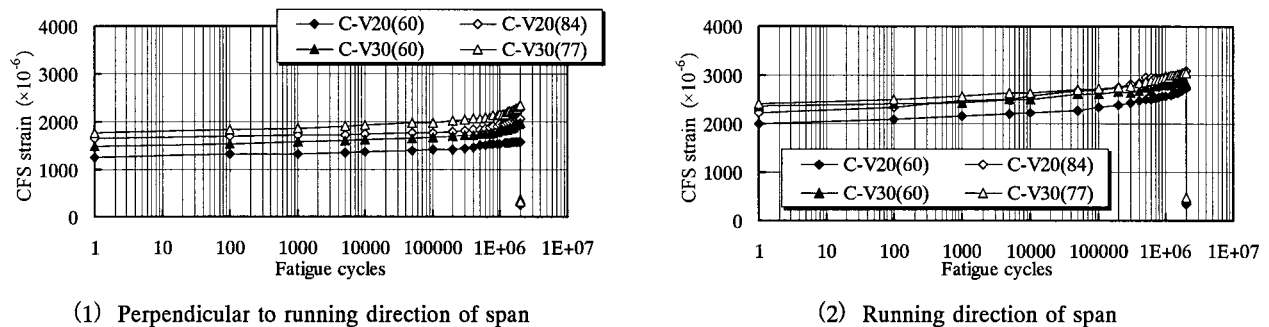


Fig. 5 CFS strain.

験のひずみは走行振動荷重による疲労実験終了後の残留ひずみを初期値とする。走行振動荷重による4万回走行の主鉄筋ひずみは、走行回数が5000回走行付近までは、走行振動荷重 $\pm 20\%$ 、 $\pm 30\%$ ともにひずみが急激に増加するが、その後の走行回数では、わずかなひずみの上昇が見られるが、ほぼ安定している。いずれの場合も鉄筋は降伏に至っていない。CFS補強後の定点疲労実験における軸直角方向の鉄筋ひずみはFig. 4 (1)より、いずれの供試体ともに鉄筋の降伏ひずみ(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CFS-V20 (60)では34%、CFS-V20 (84)では30%低減している。また、供試体CFS-V30 (60)、CFS-V30 (77)で、37%、34%のひずみの低減がみられた。したがって、CFS補強したことにより、鉄筋ひずみの増加が抑制されていることが確認できる。また、軸方向鉄筋のひずみからは鉄筋は降伏に至っていない。

定点疲労実験における軸方向の鉄筋ひずみを示すFig. 4 (2)より、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)で27%、C-V20 (84)で18%低減し、供試体C-V30 (60)、C-V30 (77)で、それぞれ30%、39%の低減が図られた。なお、上限荷重が100kNとした実験を行った供試体C-V20 (84)、C-V30 (77)のひずみの増加が少ないのは、4万走行時の残留ひずみが小さいためである。したがって、軸直角方向の鉄筋ひずみ同様に、走行振動荷重による疲労実験のひずみに対してCFS補強後の疲労実験におけるひずみも大幅に抑制されている。

3・2・4 CFSのひずみ 支間中央におけるCFSのひ

ずみと疲労回数の関係について、軸直角方向をFig. 5 (1)、軸方向をFig. 5 (2)に示す。

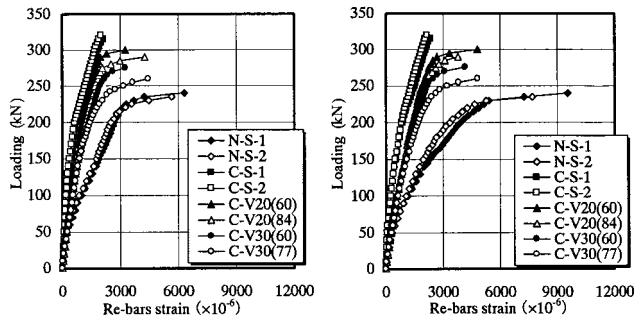
定点疲労実験における200万回載荷の軸直角方向CFSのひずみは、その破断ひずみ(18900×10^{-6})の約17%である。したがって、本実験の荷重条件における200万回の疲労実験では、軸直角方向および軸方向ともにCFSの破断ひずみの20%以下であることから疲労寿命の向上が図られるものと考えられる。

3・2・5 残存実験における引張鉄筋 RC床版およびCFS補強RC床版、応力履歴CFS補強RC床版の支間中央における引張鉄筋の荷重とひずみの関係をFig. 6に示す。

無補強RC床版(N-S)の軸直角方向の引張鉄筋の降伏荷重はFig. 6 (1)に示すように、無補強RC床版の場合の供試体N-S-1, 2で、それぞれ150kN、155kNであり、荷重225kN付近からひずみの増加が著しい。また、軸方向引張鉄筋のひずみはFig. 6 (2)に示すように、降伏荷重は供試体N-S-1, 2で、それぞれ140kN、150kNであり、最大ひずみは軸直角方向引張鉄筋のひずみを上回った。

CFS補強RC床版の引張鉄筋のひずみは、供試体C-S-1, 2ともにCFS補強したことにより急激なひずみの増加が見られない。軸直角方向の引張鉄筋の降伏荷重は、供試体C-S-1, 2で、それぞれ305kN、315.3kNであり、その後の荷重増加に対してひずみは線形的に増加している。また、軸方向引張鉄筋も同様な増加傾向を示している。RC床版供試体の引張鉄筋ひずみと比較すると、軸直角方向、軸方向ともにCFS補強を施したことにより、ひずみの増加が大幅に抑制された。

応力履歴CFS補強RC床版の静荷重実験における軸直



(1) Perpendicular to running direction of span (2) Running direction of span

Fig. 6 Load and strain relationship (Re-bar).

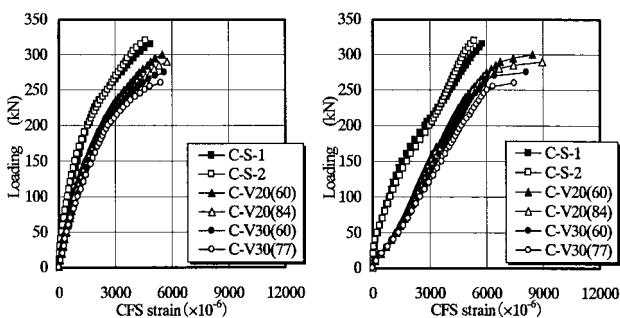
角方向引張鉄筋は、振動荷重 $\pm 20\%$ の疲労荷重を載荷した供試体 C-V20 (60), C-V20 (84) で、それぞれ荷重 285kN, 265kN で降伏している。軸方向引張鉄筋の場合もほぼ同様な増加傾向を示している。次に、振動荷重 $\pm 30\%$ の供試体 C-V30 (60), C-V30 (77) の降伏荷重は 240kN, 220kN である。軸方向引張鉄筋も同様な増加傾向を示している。

RC 床版の降伏荷重と比較すると、軸直角方向引張鉄筋の場合は約 1.8 倍、軸方向引張鉄筋は約 1.6 倍となった。また、荷重振幅 $\pm 30\%$ の RC 床版の降伏荷重と比較すると、軸直角方向および軸方向引張鉄筋ともに約 1.5 倍となり、疲労損傷を受けた RC 床版を CFS 補強することでひずみの増加が大幅に抑制された。

3・2・6 CFS のひずみ 供試体の中央における CFS の荷重とひずみの関係を Fig. 7 に示す。また、CFS の最大ひずみを Table 4 に示す。

CFS 補強 RC 床版は、未損傷の RC 床版を CFS 補強したことから Fig. 7 に示すように、軸直角方向および軸方向ともに CFS のひずみに急激な増加は見られない。最大ひずみは、破断ひずみの 30% 程度である。

応力履歴 CFS 補強 RC 床版の場合は、疲労実験における振動荷重 $\pm 20\%$ の供試体 C-V20 の軸直角方向の CFS ひずみは、荷重 290kN まで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て RC 床版は破壊した。また、振動荷重 $\pm 30\%$ の場合には、供試体 C-V30 は荷重 255kN 付近から CFS ひずみは急激に増加している。これは走行振動荷重による 4 万回走行の疲労実験にお



(1) Perpendicular to running direction of span (2) Running direction of span

Fig. 7 Load and strain relationship (CFS).

Table 4 Coefficients of CFS reinforcing effect.

Test Specimen	Axle-perpendicular direction		Axle direction	
	Strain of CFS	Reduction factor for CFS ($\beta_{cf,12}$)	Strain of CFS	Reduction factor for CFS ($\beta_{cf,11}$)
C-S-1	4890	0.259	5780	0.306
C-S-2	4630	0.245	5350	0.283
C-V20(60)	5493	0.291	8431	0.446
C-V20(84)	5749	0.304	8969	0.475
C-V30(60)	5607	0.297	8117	0.429
C-V30(77)	5418	0.287	7466	0.395

る損傷の大きさが影響したものであると考えられる。

Fig. 7 に示した CFS の荷重とひずみの関係をみると、CFS の破断強度に達する前に RC 床版部が押抜きせん断破壊に至っている。したがって、本実験における CFS が分担する押抜きせん断耐荷力は、最大ひずみと破断ひずみの比を CFS の低減係数と定義して CFS の引張強度に乗じて算出する。なお、筆者らは RC はりに CFS 補強した場合の低減係数についても評価している。これは、CFS のひずみが線形的に増加した最大ひずみ値とシートの破断ひずみとの比から低減係数を評価し、CFS の引張強度に乗じて CFS 補強した RC はりの曲げ耐荷力を評価した⁴⁾。そこで、本研究においても実験値と提案式との整合性を図る意味でも、軸方向および軸直角方向のひずみから、それぞれの低減係数を評価する。よって、CFS の低減係数 (β_{cf}) は式 (1) として与えられる。

$$\beta_{cf} = \varepsilon_{y,cf} / \varepsilon_y \quad (1)$$

ここで、 $\varepsilon_{y,cf}$: CFS の最大ひずみ、 ε_y : CFS の破断ひずみ式 (1) より得た低減係数を Table 4 に示す。

本実験では軸直角方向の CFS の低減係数は 0.245 から 0.304、軸方向は 0.238 から 0.475 の範囲となり、軸方向がやや上回っている。よって、CFS が分担する押抜きせん断耐荷力評価式には Table 4 で示した CFS の低減係数を適用して耐荷力を評価する。

4 理論押抜きせん断耐荷力

4・1 無補強 RC 床版

RC 床版の静的押抜きせん断耐荷力式として土木学会式⁸⁾松井式⁹⁾が挙げられる。また、走行荷重が作用した場合の押抜きせん断耐荷力に関しては筆者ら¹⁰⁾の提案式がある。RC 床版の繊維補強シート補強に関する押抜きせん断耐荷力式には、三上³⁾は土木学会式をもとにした提案式が挙げられる。しかし、本実験の場合は道路橋 RC 床版を対象としていることから RC 床版部の押抜きせん断耐荷力式には松井や筆者らが提案する押抜きせん断耐荷力式に CFS 補強した場合の力学モデルと耐荷力式を提案する。

4・1・1 静荷重実験 松井⁹⁾は、RC 床版の押抜きせん断破壊形状は載荷版の形状と同等な面で陥没し、その角度は 45 度以下で引張鉄筋の位置までせん断破壊し、引張鉄筋のかぶり内は、コンクリートのダウエル効果による破壊を呈するとして、押抜きせん断力学モデルを Fig. 8 のように提案し、押抜きせん断耐荷力を式 (2) と

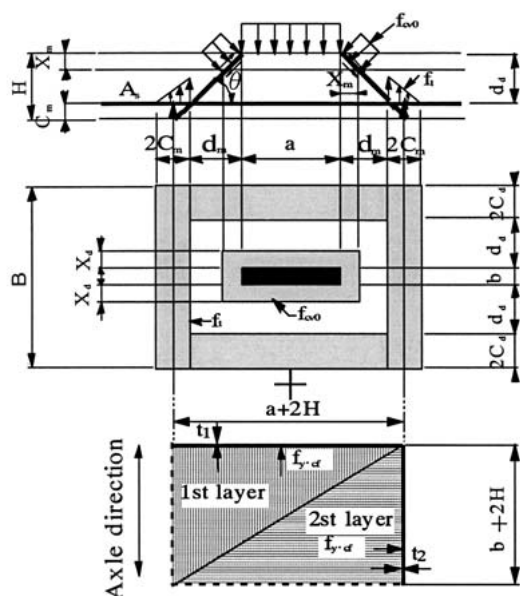


Fig. 10 Mechanical model of punching shear failure for CFS-reinforced RC slab (Static load).

$$V_{cp,CFS} = \{(b+2H)t_1 \cdot f_{y,cf} \cdot \beta_{cf-L1}\} \sin \theta + \{(a+2H)t_2 \cdot f_{y,cf} \cdot \beta_{cf-L2}\} \sin \theta \quad (4)$$

ここで, $f_{y,cf}$: CFS の引張強度 (N/mm^2), t_1, t_2 : CFS の厚さ (mm), $\beta_{cf-L1}, \beta_{cf-L2}$: 軸方向および軸直角方向の CFS 低減係数, θ : 破壊傾斜角 (= 45 度)

2) CFS 補強 RC 床版の押抜きせん断耐荷力: $V_{cp,S.C}$

$$V_{cp,S.C} = V_{cp,RC} + V_{cp,CFS} \\ = f_{cv0} \{2(a+2X_m)X_d + 2(b+2X_d)X_m\} \\ + f_t \{2(4C_d + 2d_d + b)C_m + 2(a+2d_m)C_d\} \\ + \{(b+2H)t_1 \cdot f_{y,cf} \cdot \beta_{cf-L1}\} \sin \theta \\ + \{(a+2H)t_2 \cdot f_{y,cf} \cdot \beta_{cf-L2}\} \sin \theta \quad (5)$$

$$f_{cv0} = 0.688 f_c^{0.610} \quad f_c' = 80 N/mm^2$$

$$f_t = 0.269 f_c'^{2/3}$$

CFS 補強 RC 床版の理論押抜き耐荷力を式 (5) より算出した結果を Table 5 に示す。

応力履歴 CFS 補強 RC 床版は, 走行振動荷重による 4 万回走行の疲労を受けたために, 供試体は軸直角方向および軸方向に鉄筋の配置位置にひび割れが格子状に発生している。したがって, RC 床版の耐荷力の算出には, 筆

Table 5 Experimental and Theoretical load-carrying capacities.

Test Specimen	Experimental maximum load-carrying capacity (P_{max} ; kN)	Theoretical load-carrying capacity			Ratio P_{max}/V_{cp}
		RC slab ($V_{cp,RC}$; kN)	CFS ($V_{cp,CFS}$; kN)	CFS reinforced RC slab (V_{cp} ; kN)	
N-S-1	235.3	227.7	—	—	1.03
N-S-2	240.2				1.05
C-S-1	315.3	227.7	77.6	305.3	1.03
C-S-2	321.0		72.8	300.5	1.07
C-V20(60)	300.0	148.0	97.8	245.8	1.22
C-V20(84)	290.3		103.2	251.2	1.16
C-V30(60)	275.2		97.2	245.2	1.12
C-V30(77)	259.5		91.8	239.8	1.08

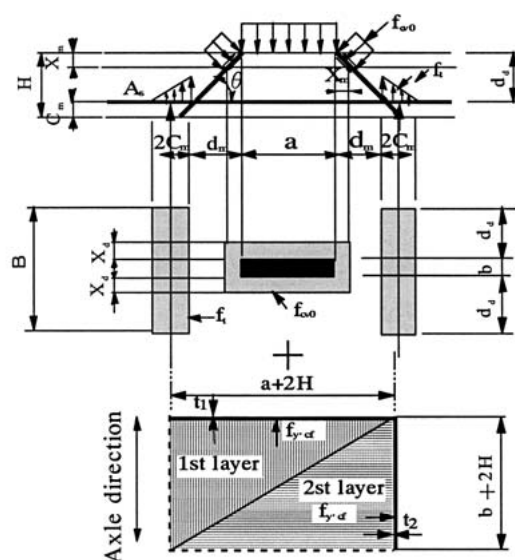


Fig. 11 Mechanical model of punching shear failure for CFS-reinforced RC slab (Running load).

者らが提案した走行荷重が作用した場合の押抜きせん断耐荷力式を適用し, CFS 補強による理論耐荷力とを合計することとする。なお, この場合の供試体は 200 万回の疲労実験後に静荷重実験を行い, 残存耐荷力を得ている。

したがって, CFS の補強効果による耐荷力の分担能は静荷重実験の場合と同様とする。よって, 走行荷重が作用する CFS 補強 RC 床版の押抜きせん断耐荷力学モデルは Fig. 11 として与えられる。また, 走行荷重が作用する CFS 補強 RC 床版の押抜きせん断耐荷力 $V_{cp,RC}$ は式 (6) として与えられる。

$$V_{cp,RC} = V_{cp,RC} + V_{cp,CFS} \\ = f_{cv0} \{2(a+2X_m)X_d + 2(b+2X_d)X_m\} \\ + f_t \{2(2d_d + b)C_m\} \\ + \{(b+2H)t_1 \cdot f_{y,cf} \cdot \beta_{cf-L1}\} \sin \theta \\ + \{(a+2H)t_2 \cdot f_{y,cf} \cdot \beta_{cf-L2}\} \sin \theta \quad (6)$$

$$f_{cv0} = 0.688 f_c^{0.610} \leq f_c' = 80 N/mm^2$$

$$f_t = 0.269 f_c'^{2/3}$$

応力履歴 CFS 補強 RC 床版の押抜きせん断耐荷力を式 (6) より算出した結果を Table 5 に示した。

4・3 実験値と理論値の比較

本実験における CFS 補強 RC 床版の理論押抜きせん断耐荷力を Table 5 に示す。

無補強供試体の場合は, 実験値に対して供試体 N-S-1 で 1.03 倍, 供試体 N-S-2 で 1.05 倍となり, 近似した結果が得られた。

未損傷 RC 床版を CFS 補強した供試体 C-S-1 の CFS 補強理論耐荷力は C-S-1, 2 で, それぞれ 305.3kN, 300.5kN であり, 実験値と比較すると, それぞれ 1.03 倍, 1.07 倍となり, 実験値と近似した結果となった。

また, 応力履歴 CFS 補強 RC 床版の理論押抜きせん断耐荷力は, 供試体 C-V20 (60) は 245.8kN であり, 実験値と理論値の比は 1.22 となり, やや実験値が上回っている。

供試体 C-V20 (84) は 251.2kN で、実験値と理論値の比は 1.16 倍となり、ほぼ近似している。走行振動荷重の場合は、供試体 C-V30 (60), C-V30 (77) で、それぞれ 245.2kN, 239.8kN となり、実験値と理論値の比は、それぞれ 1.12 倍, 1.08 倍となり、かなり近似している。

以上より、CFS 補強 RC 床版の押抜きせん断耐荷力算出には、CFS の引張強度に低減係数を適用したことにより実験値とほぼ近似した結果が得られた。なお、本研究は CFS 補強 RC 床版の実験押抜きせん断耐荷力と理論押抜きせん断耐荷力との整合性を評価したものである。したがって、CFS の引張強度を適用して近似させたものであるが、CFS 補強 RC 床版の設計押抜き耐荷力については、CFS 補強 RC 床版の使用材料に関する材料係数および部材係数を適用することで安全な設計が可能となるものと考えられる。

5 結 言

走行振動荷重による 4 万回走行の疲労実験を行い、応力履歴させた RC 床版底面を CFS 補強した場合の補強効果および評価式を実験から解析した結果、次の結論を得た。

(1) CFS 補強 RC 床版の 200 万回定点疲労実験後の残存耐荷力を無補強 RC 床版の耐荷力と比較すると、未損傷 RC 床版底面に CFS 補強した場合は 1.34 倍の耐荷力が向上し、荷重振幅 $\pm 20\%$ の場合の基準荷重 60kN の供試体では 1.26 倍、基準荷重 84kN のでは 1.22 倍の耐荷力が向上した。また、荷重振幅 $\pm 30\%$ 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荷力向上が見られない。

(2) 200 万回の定点疲労実験後の静荷重実験における CFS の破壊状況は、松井らが提案する押抜きせん断力学モデルに示される輪荷重の接地面から約 45 度の傾斜した引張鉄筋の位置から底面までのダウエル効果の影響を受ける位置ではなく離破壊を呈している。

(3) 200 万回の定点疲労実験における最大ひずみは、軸直角方向および軸方向ともに CFS の破断ひずみの約 20% 程度である。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 万回の定点疲労実験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%、約 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、耐荷力向上が図られるものと考えられる。

(5) 走行振動荷重 $\pm 20\%$, $\pm 30\%$ で、文献 7) に示す損傷度が、それぞれ基準 c と基準 d に相当するひびわれ損傷を受けた RC 床版供試体の底面を 2 方向 CFS 補強し、設計活荷重に対して 1.5 倍と 2.0 倍の荷重で 200 万回の定点疲労実験を行った結果、供試体は破壊することが無く、ひずみの増加も抑制された。さらに、静的実験による残存耐荷力も無補強 RC 床版の最大耐荷力と同等であることから、道路橋 RC 床版の補強法としては有効な施工法の 1 つであると考えられる。

(6) 本実験における CFS の引張強度に対する終局時

のひずみの関係から得た低減係数の平均は、軸方向が 0.280、軸直角方向が 0.389 となった。したがって、理論解析には CFS の引張強度に、本実験より得た低減係数を適用することで、理論耐荷力が推定できるものと考えられる。

(7) CFS 補強 RC 床版の押抜きせん断力学モデルおよび理論押抜きせん断耐荷力式を新たに提案した結果、各供試体ともに実験値と理論値は近似する結果となった。よって、静荷重および走行荷重が作用した場合の CFS 補強 RC 床版の押抜きせん断耐荷力算出の評価式として有用である。

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)に提供して頂きました。ここに付記し、謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) T. Itano and S. Matsui, "Study on RC slabs strengthened by carbon fiber sheets", Proceeding of 1st Symposium on Decks of Steel Highway Bridge, pp.277-282 (1998).
- 2) H. Mikami, N. Kishi, M. Sato and Y. Kurihashi, "Effect of strengthened area on bending capacity of RC beams adhered with FRP sheet", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.21, No.3, pp.1549-1554 (1999).
- 3) H. Mikami, N. Kishi, M. Fuzita and S. Sawada, "Effect of rebar ration on punching shear behavior of RC slab bonded with AERP sheet", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.28, No.2, pp.1459-1464 (2006).
- 4) M. C. Hsu, T. Kida, T. Abe, T. Sawano and K. Minakuchi, "Reinforcing effects and mechanical properties of RC beam with CFS under static and running loads", Journal of Marine Science and Technology, Vol.14, No.2, pp.73-83 (2006).
- 5) M. C. Hsu, T. Abe, T. Kida and T. Sawano, "Reinforced effect of stress-hysteresis RC slabs with carbon fiber sheets under running vibration-load of fatigue failure", Cement Science and Concrete Technology, No.59, pp.434-441 (2005).
- 6) Japan Road Association, "Japanese specifications for highway bridge" (2002).
- 7) Civil Engineering Research Center, "Design and constration guide line for RC member's reinforced and repaired of highway bridge with carbon fiber sheet", Report for Reinforced and Repaired of RC Members (III) (1999).
- 8) JSCE : Standard Specifications for Concrete Structures, Structural Performance Verification, JSCE (2002).
- 9) Y. Maeda and S. Matsui, "Punching shear load equation of reinforced concrete slabs", Proceedins of JSCE, No348/V-1, pp.133-141 (1984).
- 10) T. Abe, T. Kida, M. Takano, T. Sawano and K. Kato, "Punching shear load-carrying capacity of RC slabs under static and running loads", Journal of Structural Engineering, Vol.50A, pp.919-926 (2004).
- 11) H. Okamura, "Limit state design of concrete structural", Concrete Seminar 4, pp.17-18 (1979) Kyouritu Publication.