

CFRP 格子筋で下面増厚補強された道路橋 RC 床版の 主筋ひずみ低減効果

日大生産工 (院) ○小森 篤也 日大生産工 阿部 忠

1 はじめに

道路橋RC床版は交通量の増大・積載荷重の増大などの影響を受け、輪荷重疲労による損傷が報告されている¹⁾。これらの床版の補強法には繊維補強コンクリートを用いた床版上面増厚補強、連続繊維シート接着・鋼板接着などによる床版下面補強などがあり実用化されている。

本研究では、既設道路橋RC床版の疲労対策として、ポリマーセメント系材料による下面増厚と炭素繊維強化FRP格子筋（以下CFRP格子筋という）を複合させ、道路橋床版の補強法および補強効果を評価する。

供試体は実橋RC床版寸法の1/2モデルの無補強RC床版供試体、補強材として、塩害などによる耐食性に優れ、格子が平面になり薄層・軽量であるCFRP格子筋を用いたCFRP補強供試体、CFRP格子筋の有効高さを変化させた計3種類の下面増厚補強床版供試体を作成し、輪荷重走行疲労実験にて補強効果、耐疲労性の評価および床版主鉄筋の応力低減効果に関し実験を行い、実用性を評価する。

2 供試体の種類と諸元

(1) RC床版基準供試体

実験に用いる供試体は、すべて2002年の道路橋示方書²⁾（以下道示という）の規定に基づいて設計し、実験装置の車輪幅が250mmであることから、道示に規定する輪荷重幅500mmとの比によってモデル化し、すべて1/2モデルとする。供試体のコンクリートには、普通ポルトランドセメントと5mm以下の砕砂および5mmから20mmの砕石を使用した。鉄筋にはSD295A、D10を用いた。実験時における、床版コンクリート圧縮強度および鉄筋の材料特性値を表1に示す。供試体の寸法は、全長1,470mm、床版厚130mmとする。鉄筋は複鉄筋配置とし主鉄筋にD10を100mm間隔で配置し、有効高さを105mmとする。また、圧縮側には引張鉄筋量の1/2を配置する。供試体の諸元をFig.1に示す。

ここで無補強RC床版をRC-1とする。

表1 床版コンクリートおよび鉄筋の材料特性

供試体	コンクリート 圧縮強度 N/mm ²	鉄筋 (SD295A、D10)		
		降伏強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	引張弾性率 kN/mm ²
RC床版	35.0	370	511	200

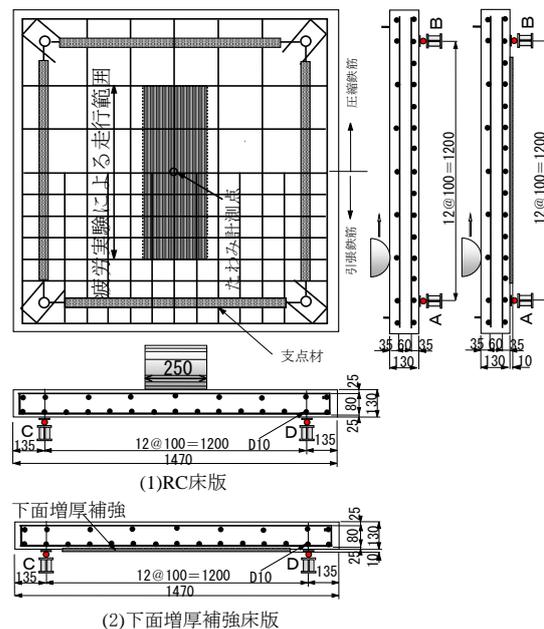


Fig.1 供試体の寸法

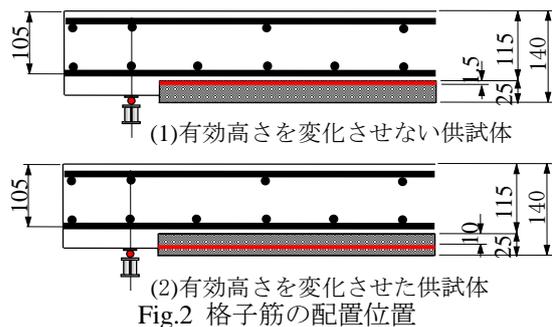


Fig.2 格子筋の配置位置

(2) 補強床版供試体

RC床版の下面増厚補強の補強材は、CFRP格子筋を使用する。

床版供試体は Fig.2 に示すようにすべて床版下面側に設置され、増厚による施工厚みはすべて

A study on rebar stress reduction, installed CFRP grid for the under surface of strengthened RC slabs.

Atsuya KOMORI and Tadashi ABE

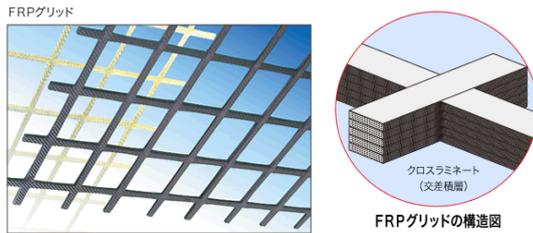


Fig.3 CFRP 格子筋の積層構造

表 2 供試体の一覧

供試体	補強材	鉄筋有効高	補強材有効高	床版総厚
RC-I	なし	105mm	なし	130mm
RC-C1	CFRP格子筋		117mm	140mm
RC-C.S			127mm	140mm

表 3 CFRP 格子筋の諸元

断面寸法 (mm)		網目寸法 (mm)		引張強さ (N/mm ²)		引張弾性率 (N/mm ²)
縦	横	縦	横	縦	横	
4.37×4	4.37×4	50	50	1,902	1,902	103,700

表 4 PCM の諸元

材料	圧縮強度 (N/mm ²)	接着性能	
		接着強度 (N/mm ²)	せん断強度 (N/mm ²)
PCM	44.3	2.61	5.74

25mm とする。そして、既存床版の損傷部の撤去を想定し床版下面を 15mm 窪ませた供試体を作成したため、総床版厚みは 10mm の増厚となる。補強供試体の補強材の設置は、無補強 RC 床版の 15mm 窪ませた位置に直接アンカーにて固定し設置したものを RC-C1、10mm 高さのスペーサーを用い有効高さを設けた補強供試体を RC-C.S とする。

CFRP 格子筋は Fig.3 に示すように 2 方向の格子筋であるが、厚みは補強筋 1 層分で確保され鉄筋と比較し薄層での補強材設置が可能となる。

各補強材は実験に用いる床版が、実橋床版の 1/2 寸法であるため補強材の CFRP 格子筋は実橋で使用されている D10 鉄筋の 1/2 の剛性となるように設計し、CFRP 格子筋もほぼ同じ剛性となるように設計し市販品の 4mm 厚みの CFRP 格子筋を使用する。

下面増厚は市販のポリマーセメントモルタル（以下 PCM という）の吹付施工で行い仕上げ表面は左官仕上げとする。ここで、ワイヤーメッシュで補強する供試体を RC-W、CFRP 格子筋を使用した供試体を RC-C1 とする。ここで、各供試体の一覧を表 2 に示し、補強材および実験時の PCM の諸元を表 3 に示す。なお、増厚界面には、汎用で使用されているアクリル樹脂系ポリマーエマルジョンのプライマーを打継界面の吸水防止剤として使用する。

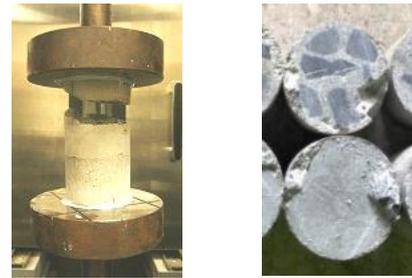


Fig. 4 直接引張試験と一面せん断試験状況

工程	作業内容ほか
下地処理工	サンダーケレン
清掃	エアブロー
アンカー穿孔	ハンマードリル
プライマー塗布	アクリルエマルジョン
補強材の設置	アンカー固定
モルタル吹付	PCM
仕上げ・養生	左官仕上げ

Fig. 5 施工手順

要素試験として、接着強度は、コンクリートと PCM が打ち継ぎされた 50mmφ 寸法の供試体の直接引張試験で求め、せん断強度は同様の供試体を一面せん断試験によりせん断付着強度を求める。試験結果を表 4 に、直接引張試験状況と一面せん断試験状況を Fig.4 に示す。

すべての床版供試体は予備載荷など特別な事前損傷は与えていない。ここで施工手順を Fig.5 に示す。

3 実験方法

全ての床版供試体の実験は、輪荷重走行疲労実験にて行い、下面増厚補強法の補強効果および耐疲労性の評価は 20,000 回ごとに荷重を段階的に増加させる段階荷重増荷により行う。そして、基準荷重に対する実験荷重と実験走行回数から等価走行回数を求める。供試体の設置条件は Fig.1 に示すように、支間 1,200mm とする。本実験の RC 床版供試体の輪荷重走行疲労実験における車輪幅は 250mm であり、道示に規定する T 荷重幅 500mm の 1/2 であることからすべての供試体も 1/2 モデルとする。よって、RC 床版供試体の基準荷重は道示に規定する活荷重 100kN の 1/2 に安全率 1.2 を考慮して 60kN とする。段階荷重増荷は、荷重 80kN から 20,000 回走行し、20,000 回走行ごとに荷重を 20kN 増加

表 5 等価走行回数結果

供試体		荷重と実走行回数			等価走行回数	等価走行回数比
		80kN	100kN	120kN		
RC	実走行回数	20,000	11,410	--	7,347,504	1
	等価走行回数	772,240	6,574,264			
RC-C1	実走行回数	20,000	20,000	4,100	27,996,369	3.8
	等価走行回数	772,240	13,137,391	14,086,838		
RC-C.S	実走行回数	20,000	20,000	6,880	59,688,956	8.1
	等価走行回数	772,240	13,137,391	4,579,325		

する段階荷重載荷とする。基準荷重に対する等価走行回数を算出し、基準供試体である無補強RC床版の等価走行回数を基準に、下面増厚補強床版供試体の補強効果および耐疲労性を評価する。あわせて床版主鉄筋のひずみ測定から発生応力の算出を行い等価走行回数・たわみとの関係を考察する。

4 等価走行回数の算定方法

本実験では、2万回走行ごとに荷重を増加する段階荷重載荷としたことから、基準荷重と載荷荷重および実験走行回数の関係から等価走行回数 Neq を算出して補強効果および耐疲労性を評価する。等価走行回数 Neq は、マイナー則に従うと仮定すると、式(1)で与えられる。なお、式(1)に適用するS-N曲線の傾きの逆数 m には、松井らが提案するRC床版のS-N曲線の傾きの逆数12.7を適用する³⁾。また、RC床版供試体は、道示に規定に準拠し、その1/2モデルであることから、基準荷重は、道示に規定する活荷重100kNの1/2に安全率1.2を考慮した60kNとし、等価走行回数を算定する。

RC床版のS-N曲線の傾きの逆数12.7を適用する³⁾。なお基準荷重 P は、60kNである。

$$Neq = \sum_{i=1}^n (P_i/P)^m \times N_i \quad (1)$$

ここで、 Neq ：等価走行回数（回）、 P_i ：載荷荷重（kN）、 P ：基準荷重：60kN、 n_i ：実験走行回数（回）、 m ：S-N曲線の傾きの逆数(=12.7)

5 実験結果および考察

5.1 等価走行回数による比較

(1)RC床版基準供試体

補強が施されていない無補強RC床版RC-1の、等価走行回数 Neq は 7.35×10^6 回である。このRC床版供試体の平均等価走行回数 Neq を基準に下面増厚補強床版の補強効果および耐疲労性を評価する。

(2)CFRP格子筋補強供試体

増厚界面にCFRP格子筋を設置し、ポリマーセメントモルタルを吹付けした供試体RC-C1の等価走行回数は 27.99×10^6 回であり、RC床版の3.8倍の補強効果

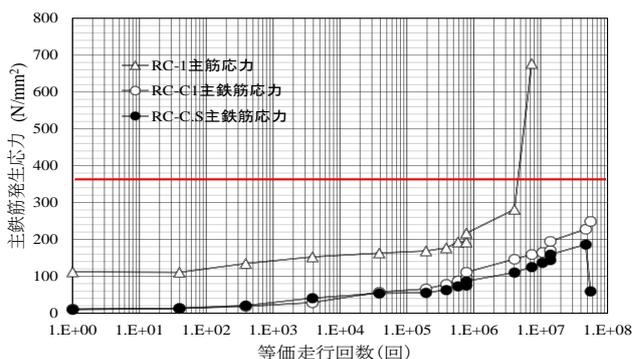


Fig. 6 等価走行回数と主筋発生応力の関係

が得られた。

(3)有効高さを変化させたCFRP格子筋補強供試体
増厚界面からスペーサーを用い10mm浮かせた位置にCFRP格子筋を設置し、ポリマーセメントモルタルを吹付けした供試体RC-C.Sの等価走行回数は 59.68×10^6 回であり、無補強RC床版の8.1倍の補強効果が得られた。増厚界面にCFRP格子筋を設置した場合とCFRP格子筋の有効高さを変化させた供試体の等価走行回数の比較では3.2倍の増大となった。

5.2 等価走行回数と床版主鉄筋応力

床版主鉄筋の発生応力は、鉄筋にひずみゲージを設置し、各走行後条件での荷重を載荷した条件で測定している。各供試体の等価走行回数と主筋発生応力の関係をFig.6 に示す。

(1)RC床版基準供試体

無補強である供試体RCの初期載荷時の発生応力は 111.8 N/mm^2 であり、走行を繰り返すことにより主筋発生応力はゆるやかに増加していき、20,000回走行後（等価走行回数で 7.7×10^5 回）走行荷重を100kNに増大させた後に急激に増大し、その後 40.6×10^5 回以降に鉄筋降伏に至っている。その後押し抜きせん断破壊で試験を終了した。

(2)CFRP格子筋補強供試体

増厚界面にCFRP格子筋を設置したRC-C1供試体の初期載荷時の主筋発生応力は、 11.1 N/mm^2 であり無補強RC床版の1/10まで低減している。そして100kNに荷重増大させた際にも、発生応力は 95.3 N/mm^2 となり無補強床版RC供試体の初期載荷時の発生応力を下回り床版下面増厚補強の効果が確認される。その後走行荷重を120kNに増大させた際に

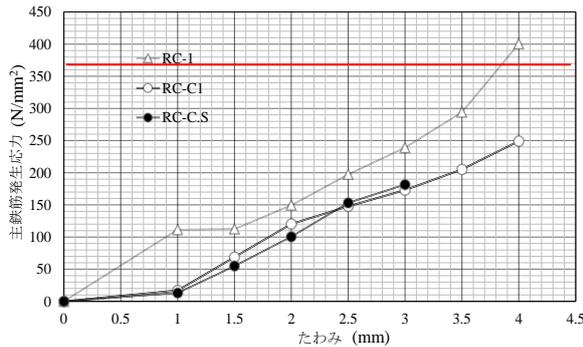


Fig.7 たわみと主筋発生応力の関係

も発生応力は195.2N/mm²となり鉄筋降伏に至らないまま床版コンクリートの押し抜きせん断破壊で試験を終了した。

(3)有効高さを変化させたCFRP格子筋補強供試体

有効高さを10mm変化させた供試体RC.C.Sの初期載荷時の発生応力は、9.8N/mm²でありもっとも小さい。走行荷重を100kNに増大させた際にも86.6N/mm²、120kN増大時にも144.5N/mm²となり120kN増大時にてRC-C1と比較し、発生応力は約35%低減されている。本供試体も同様に、床版主鉄筋は降伏を向かえず押し抜きせん断破壊にて試験を終了した。有効高さを設けることによりCFRP格子筋の応力分担が増大し床版主鉄筋の発生応力低減に効果があることが確認された。

5.3 床版中央のたわみと床版主鉄筋発生応力

床版中央部にて測定したたわみと主筋発生応力の関係をFig.7に示す。測定は荷重を載荷した条件で実施している。

(1) RC床版基準供試体

基準となる供試体RCのたわみ1.0mmの時の鉄筋発生応力は111.7N/mm²でありこの時点の積載荷重は80kNである。またたわみ2.0mm時点での発生応力は149N/mm²である。そして、たわみ1.5mmから3.5mmの範囲では線形的に発生応力は増大し、その後たわみが約3.8mmに到達する際に鉄筋降伏し押し抜きせん断破壊で試験を終了した。

(2)CFRP格子筋補強供試体

増厚界面にCFRP格子筋を設置した供試体RC-C1のたわみ1mm時点の発生応力は17.1N/mm²となり約84%低減している。その後たわみが2.0mmで120N/mm²であり線形的に増大している。この時点で無補強供試体に対して低減率は20%まで近接している。

無補強供試体に近接することはひび割れなど何らかの損傷が増厚部位に発生したことが推測されるがしかし、たわみが2mmから4mmの間はほぼ線形に発生応力は推移し鉄筋降伏に至る前に押し抜きせん断破壊にて試験を終了した。

(3)有効高さを変化させたCFRP格子筋補強供試体

増厚界面から10mm有効高さを変化させた供試体RC-C.Sのたわみ1mm時点の発生応力は13N/mm²と最も低くその後たわみが2mmになった時点では100N/mm²となり有効高さを変化させない供試体RC-C1よりも約20%の低減率となった。たわみが1mmから2.5mmの間は線形的に発生応力が増加しているもののその後の発生応力は有効高さを変化させないRC-C1供試体とほぼ同様の発生応力となった。

6 まとめ

(1)無補強RC床版と引張材にCFRP格子筋を増厚下面に設置して、PCM吹付け工法により下面増厚した供試体と、有効高さを考慮し補強材を設置した床版供試体は、いずれも基準RC床版の等価走行回数と比較で3.8倍と8.1倍の等価走行回数が得られ下面増厚による補強効果が確認された。

(2)全てのRC床版供試体の破壊状況は、押し抜きせん断破壊に至っているが、等価走行回数と主鉄筋発生応力の関係およびたわみと鉄筋主応力の関係から無補強床版は、走行を重ねるにあたり主鉄筋降伏まで引張応力が発生している。一方、補強された床版供試体の床版主鉄筋は降伏にいたっておらず、補強材の応力分担効果が確認され、補強効果が確認された。

(3)CFRP格子筋とPCMを用いた床版下面増厚補強法は、床版主鉄筋の鉄筋応力の低減および道路橋RC床版の長寿命化に効果的であり、実用的な補強法であると考えられる。

「参考文献」

- 1) 国土交通省：地方自治体の長寿命化修繕計画に関する最近の動向, 国土交通省道路局 国道・防災課道路保全企画,(2011)
- 2) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 I, II, III, (2002)
- 3) 松井繁之:道路橋床版 設計・施工と維持管理, 森北出版, (2007)