

論文

CFRP格子筋下面増厚補強したRC床版の補強効果および耐疲労性の評価

永井幸太* 阿部忠** 小森篤也***

* 日本大学大学院 生産工学研究科土木工学専攻 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

** 日本大学 生産工学部土木工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

*** 新日鉄住金マテリアルズ株式会社コンポジットカンパニー 社会資本材料事業部 技術部
(〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町3-8)

RC床版の下面増厚補強に用いる引張材には鉄筋が用いられている。最近では、炭素繊維で一体形成された CFRP 格子筋が用いられている。そこで本研究では、引張材に鉄筋と同等な性能を有するワイヤーメッシュと CFRP 格子筋を配置した下面増厚補強におけるそれぞれの補強効果および耐疲労性を評価した。その結果、同一寸法を有する RC 床版供試体に比してワイヤーメッシュを用いた供試体は 3.1 倍、CFRP 格子筋を用いた補強法は 3.8 倍の補強効果が得られた。よって、下面増厚補強の引張材に CFRP 格子筋を配置した補強法は有効的であるといえる。

キーワード：RC 床版, CFRP 格子筋, 下面増厚補強

1. はじめに

近年、高度経済成長期に建設された道路橋は老朽化が進み、その維持管理が重要な課題となっている¹⁾。道路橋長寿命化修繕計画における橋梁点検結果では、橋梁部材の中で損傷が著しいのは道路橋 RC 床版である。現在、供用されている RC 床版の設計基準においては昭和 31 年、39 年、48 年の基準で設計された床版が多く、平成 6 年改定の道路橋示方書・同解説（以下道示と称す）では、設計活荷重が 100kN へ増大された。また、昭和 30 年代の設計基準に比して床版厚が厚くなり、鉄筋量も多い。したがって、平成 6 年改定の道示に規定する B 活荷重に対応させるためには、耐荷力性能および耐疲労性の向上を図るための補強対策の検討が必要となる。一方、老朽化した RC 床版は、2 方向のひび割れの発生や、鉄筋の露出などの損傷に加え、塩害・凍害の複合劣化など多種にわたっている。これらの損傷を受けた RC 床版の耐荷力性能の向上を図るため補強法対策として、RC 床版上面、あるいは下面からの補強法が提案されている。上面からの補強法には、鋼繊維補強コンクリート (SFRC) を既設 RC 床版の上に厚さ 60mm 程度増厚する補強法が採用され、多くの施工実績がある。また、下面からの補強法には引張補強材に鉄筋を配置し、ポリマーセメントモルタル (PCM) の吹き付けにより 40mm ~ 50mm 程度増厚補強が施され、いずれにおいても施工実績がある。最近では、鉄筋に変わる引張補強材として軽量で施工性に優れ、鉄筋と同等以上の材料特性を有する炭素繊維 (CFRP) 格子筋が開発された。これは、鉄筋を用い

た場合は軸直角方向と軸方向に配置することから、交差部は鉄筋径の 2 倍の厚さとなる。また、CFRP 格子筋は一体形成されていることから、鉄筋を配置した場合に比して増厚層が薄くなり、死荷重が軽減される。しかし、CFRP 格子筋は比較的新しい材料であることから、耐疲労性の評価、破壊メカニズムの検証については、あまり行われていないのが現状である。

そこで本研究は、実験供試体に鉄筋と同等な材料特性を有するワイヤーメッシュと CFRP 格子筋を配置して PCM 吹き付け工法により施工した下面増厚補強床版を用いて輪荷重走行疲労実験を行い、同一寸法を有する RC 床版と比較して補強効果および耐疲労性を評価する。また、たわみと等価走行回数との関係から下面増厚補強法における健全度評価を行い、下面増厚補強法の維持管理手法の構築への一助としたい。

2. RC床版下面の損傷状況および補強対策

2.1 RC床版の設計基準

昭和 31 年、39 年改定の設計基準では、設計活荷重が 80kN、RC 床版厚は有効高さ 11cm 以上とされ、主鉄筋の許容応力度は 1200kg/cm²、配力筋は主鉄筋の 25 % が配置されている。一方、平成 6 年改定の道示では、活荷重が 100kN、床版厚は $d_o = 30L + 110$ に、大型車両量の計画交通量を考慮した割増係数 k_i が適用され、昭和 30 年代の床版に比して大幅に厚く設計されている。したがって、B 活荷重に対応させるためには床版厚を厚くする補強対策が必要となる。



(1)鉄筋露出 (2)塩害によるはく離

写真-1 RC床版の下面損傷状況

2.2 RC床版の下面の損傷事例

道路橋 RC 床版の損傷状況を分類すると、塩害・凍害による上面損傷と車両の走行疲労によるひび割れや鉄筋の露出などの下面損傷がある。ここで、下面損傷が著しい RC 床版の損傷事例を写真-1 に示す。写真-1(1)に示す RC 床版は、海岸線から数キロの位置に建設された床版であり、鉄筋が露出し、発錆が見られ、かぶり厚も不足している。次に、写真-1(2)の床版は、積雪寒冷地域の床版であり、融雪剤散布による塩害で鉄筋に発錆が見られると同時に、かぶりコンクリートのはく離や漏水も著しい。

以上のように、床版下面の損傷状況には、2 方向のひび割れの他に、かぶり不足による鉄筋の露出、塩害により鉄筋が腐食し、かぶりコンクリートが剥落するなどの損傷も多い。これらの下面損傷に対す補強対策として下面増厚補強が施されている。

2.3 RC床版の下面補強法

RC 床版の劣化過程が加速期（前期）に相当する床版には、炭素繊維シート（CFS）を用いた接着補強や鋼板接着補強法が多く採用されてきた²³⁾。一方、鉄筋の露出や漏水、コンクリートのはく離など、劣化過程が加速期（後期）に相当する床版には、下面増厚補強法が採用されている。下面増厚補強法は引張補強材に鉄筋を用い、PCM 吹付けによる増厚を行う工法が一般的である。しかし、引張補強材に配置する鉄筋は、主鉄筋方向と配力筋方向に交差して配置することから、交差部の断面が鉄筋径の 2 倍となる。さらに、増厚かぶりを考慮すると増厚層が厚くなり、死荷重の増加も懸念されている。一方、CFRP 格子筋は一体形成されていることから厚さが 4.5mm 程度であり、鉄筋を格子状に配置した場合と比較すると、厚さが減少し、死荷重の軽減が図られる。本研究では、鉄筋と同等な性質を有するワイヤーメッシュと新材料である CFRP 格子筋を配置した下面増厚補強法における補強効果および耐疲労性、破壊メカニズムを検証する。

3. 供試体概要および使用材料

3.1 供試体概要

本実験に用いる供試体は、2002 年の道示²⁾の規定に

表-1 コンクリート示方配合

スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	配合表 (kg/m)				
				C	W	S	G	Ad
8.0±2.5	2.0±1.0	39.0	40.0	403	158	726	1094	4.0

表-2 RC床版の材料特性値

供試体	コンクリート圧縮強度 (N/mm ²)	鉄筋(SD295A)			
		使用鉄筋	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
RC床版	35	D10	368	516	200

表-3 引張部材の材料特性値

補強材の種類	引張弾性率 (kN/mm ²)	断面積 (mm ²)	本数/m	引張剛性 (kN・m)
ワイヤーメッシュ	200	8.04	20	32.15
CFRP格子筋	103.7	17.50	20	36.30

基づいて設計し、供試体寸法を 1/2 モデルとする。供試体は基準となる RC 床版供試体、下面増厚においてはワイヤーメッシュ、CFRP 格子筋を、それぞれ引張補強材として用いた下面増厚補強供試体を 2 体製作する。

3.2 使用材料

(1) RC床版

RC 床版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 ~ 20mm の砕石を使用する。設計基準強度は道示に規定に基づいて 24N/mm² 以上とした。配合条件を表-1 に示す。鉄筋には SD295A、D10 を用いた。ここで、RC 床版コンクリートおよび鉄筋の材料特性値を表-2 に示す。下面増厚補強に用いる引張補強材にはワイヤーメッシュおよび CFRP 格子筋を配置する。補強法は RC 床版下面に引張補強材を設置し、PCM 吹付工法けによる下面増厚補強を施すものとする。

(2) ワイヤーメッシュおよびCFRP格子筋

本実験供試体に用いるワイヤーメッシュは φ3.2mm 網目寸法 50mm×50mm を用いる。ワイヤーメッシュの引張強度は縦 653N/mm²、横 630N/mm² である。

次に、CFRP 格子筋は、ワイヤーメッシュと同等な格子間寸法を考慮することから網目寸法を 50mm×50mm、厚さ 4.2mm の CFRP 格子筋を用いる。CFRP 格子筋の引張強さは 1,902N/mm²、引張弾性率 103.7kN/mm² である。ここで、ワイヤーメッシュと CFRP 格子筋の剛性比較を表-3 に示す。

(3) ポリマーセメントモルタル

下面増厚補強法に用いられる PCM の要求性能は、付着強度 1.7N/mm² 以上、圧縮強度が 27N/mm² 以上が要求されている⁹⁾。そこで、本供試体の下面増厚補強材には、吹付け施工が可能な繊維混合プレミックス型ポリマーセメントモルタルを用いる。この材料は、流動性にも優れた材料であり、吹付けにおいて格子筋隙間などへの充填性も良い。ここで、繊維混合プレミッ

表-4 PCM配合表

項目	単位量(kg/m ³)		水結合比 (%)
	プレミックス粉体	水	
PCM	1860	595	32

表-5 プライマーの付着強度

試験体	試験体厚 (mm)	接着荷重 (N)	接着応力 (N/mm ²)	変位量 (mm)
No.1	75.0	4573.0	2.33	0.82
No.2	75.0	5888.1	3.00	0.64
No.3	75.0	4895.1	2.49	0.47
Ave.	75.0	5118.7	2.61	0.64

クスの配合を表-4, 材齢4日の圧縮強度は32.7N/mm²であり, 実験時の圧縮強度は44.3N/mm². なお, 輪荷重走行疲労実験は材齢28日以降に実施する.

(4) 増厚界面に用いるプライマー

榑原ら⁹⁾は, PCMと既設床版コンクリートの付着性を高めるため, プライマーの塗布が好ましいとされている。よって, 本実験供試体においても既設RC床版と下面増厚層の界面にはアクリルエマルジョン系プライマー(以下, プライマーとする)を塗布する。ここで, プライマーの引張試験における付着強度を表-5に示す。引張試験にはインストロン万能試験機を使用し, 引張試験は材齢28日で実施した。引張り試験での付着強度は2.61N/mm²であり, 要求性能である付着強度1.7N/mm²以上が確保されている。

3.3 供試体寸法および鉄筋の配置

(1) RC床版供試体

RC床版供試体の寸法は, 全長1,470mm, 支間1,200mm, 床版厚130mmとする。鉄筋は複鉄筋配置とし, 引張主鉄筋にD10を100mm間隔で配置し, 有効高を105mmとする。また, 圧縮側には引張鉄筋量の1/2を配置する。供試体名称はRC-1とする。ここで, RC床版供試体の寸法および鉄筋配置を図-1(1)に示す。

(2) 下面増厚補強床版供試体

下面増厚補強床版供試体における鉄筋配置, 概略寸法を図-1(2)に示す。また, 本供試体におけるワイヤーメッシュ, CFRP格子筋の配置および下面増厚寸法を図-2に示す。ワイヤーメッシュを配置した場合の供試体寸法は図-2(1)に示すように, 既設RC床版供試体に直接ワイヤーメッシュを配置した場合の格子部の厚さは6.4mmとなる。増厚層の厚さを25mmとした場合のかぶり厚は18.6mmとなる。一方, CFRP格子筋を配置した場合は図-2(2)に示すように格子部の厚さが4.2mmである。よって, 下面増厚を25mmとした場合は20.8mmとなる。供試体の諸元と名

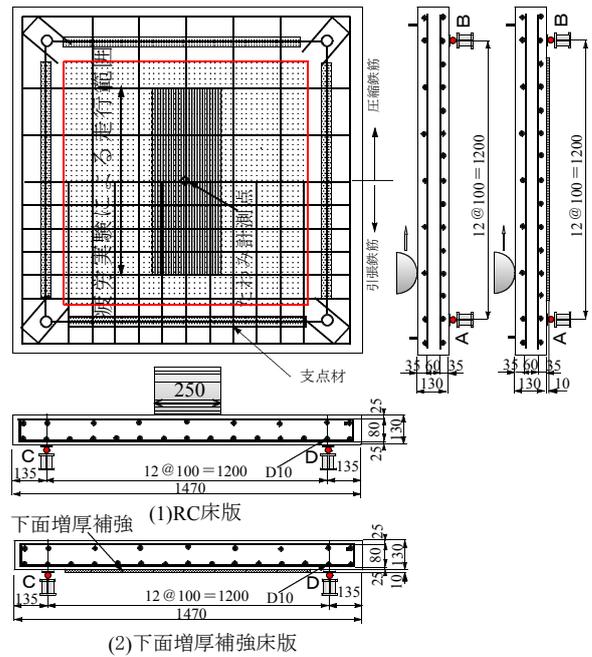


図-1 供試体寸法および鉄筋配置

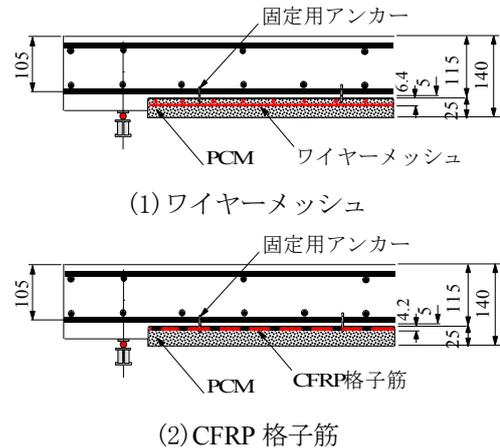


図-2 下面増厚寸法

表-6 供試体条件

供試体	界面処理	補強材
RC-1	無補強	—
RC-W	プライマー	ワイヤーメッシュ
RC-C	プライマー	CFRP格子筋

称を表-6に示す。

4. 補強方法

4.1 下面増厚補強床版の概要

下面増厚補強用供試体は, 床版のかぶり不足や下面コンクリートのはく落などの15mm程度の下面損傷を想定する。その表面を研掃し, PCMで厚さ25mm増厚する。よって, 供試体下面かぶり内の幅1,100×1,100mmの範囲に引張補強材を配置する。



(1)表面研掃 (2)アンカー取付 (3)引張材取付取 (4)PCM吹き付け (5)吹き付け完了 (6)表面処理
プライマー塗布

図-4 下面増厚補強手順

表-7 実験走行回数および等価走行回数

供試体		荷 重			等価走行回数 合計	走行 回数比
		80 kN	100 kN	120 kN		
RC-1	実験走行回数	20,000	10,010		7,347,504	—
	等価走行回数	772,240	6,575,264			
RC-W	実験走行回数	20,000	20,000	1,340	22,832,607	3.1
	等価走行回数	772,240	13,137,391	8,922,976		
RC-C1	実験走行回数	20,000	20,000	4,100	27,996,469	3.8
	等価走行回数	772,240	13,137,391	14,086,838		

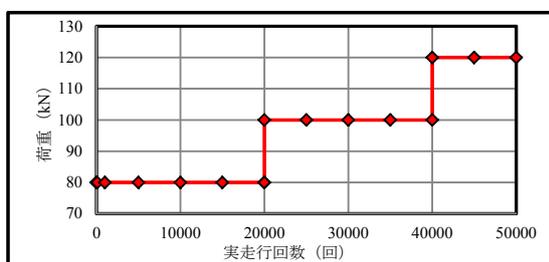


図-5 荷重載荷条件

験による等価走行回数 N_{eq} 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⁷⁾。基準荷重 P は、本供試体は 1/2 モデルであることから、活荷重 100kN の 1/2 に安全率 1.2 を考慮して 60kN とする。

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^n (P_i/P)^m \times n_i \quad (1)$$

4.2 下面増厚補強法の施工手順

CFRP 格子筋を用いた下面増厚補強法は「CFRP グリッド増厚・巻立て工法によるコンクリート構造物の補修・補強 設計・施工マニュアル (案)」⁵⁾に準拠して製作する。ここで、下面増厚補強法における施工手順を図-4 に示す。これらの施工手順は実橋 RC 床版の下面増厚補強法と同等である。

5. 実験方法および等価走行回数

5.1 実験方法と荷重条件

補強効果および耐疲労性の評価は、供試体の設計荷重である基準荷重と実験走行回数の関係から等価走行回数を求得評価する。たわみ計測は、輪荷重走行 1, 10, 100, 1,000, 5,000 回、以後 5,000 回走行ごと計測する。本実験の荷重載荷条件を図-5 に示す。供試体 RC-1 における破壊時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。

5.2 等価走行回数

輪荷重走行疲労実験では、20,000 回走行ごとに荷重を増加させることから、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 N_{eq} を算出して補強効果および耐疲労性を評価する。輪荷重走行疲労実

験による等価走行回数 N_{eq} 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⁷⁾。基準荷重 P は、本供試体は 1/2 モデルであることから、活荷重 100kN の 1/2 に安全率 1.2 を考慮して 60kN とする。

6. 結果および考察

6.1 等価走行回数

本実験における RC 床版供試体および下面増厚補強床版供試体の等価走行回数 N_{eq} を表-7 に示す。

(1) RC床版

供試体 RC-1 の等価走行回数は 7.34×10^6 回である。この RC 床版供試体の等価走行回数 N_{eq} 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) 下面増厚補強床版

供試体 RC-W の等価走行回数は 22.83×10^6 回であり、無補強 RC 床版の 3.1 倍の等価走行回数を得られた。供試体 RC-C の等価走行回数は 27.99×10^6 回であり、無補強 RC 床版の 3.8 倍の補強効果を得られた。また、供試体 RC-W の 1.2 倍の等価走行回数を得られた。

6.2 たわみと等価走行回数の関係

本実験における等価走行回数とたわみの関係を図-6 に示す。土木研究所では、RC 床版の疲労破壊実験

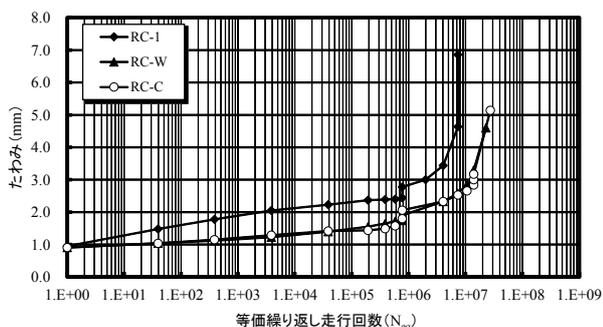


図-6 たわみと等価走行回数の関係

に基づく研究成果を報告している。これによると、疲労損傷度と床版の総たわみ率（総たわみ量/載荷荷重）の関係について劣化過程と疲労損傷度（潜伏期：0.0～0.2，進展期 0.2～0.5，加速期：0.5～0.8，劣化期：0.8～1.0）の関係を示している。また、玉越ら⁸⁾は、疲労損傷度 $D (= N/N_f)$ 、 N ：繰返し回数、 N_f ：破壊に至る繰返し回数（以下、破壊走行回数とする）から健全度区部（健全度 I（潜伏期）： $D < 0.1$ ，II（潜伏期）： $0.1 \leq D < 0.2$ ，III（進展期）： $0.2 \leq D < 0.5$ ，IV（加速期）： $0.5 \leq D < 0.8$ ，V（劣化期）： $0.8 \leq D < 1.0$ ）を設定し、破壊走行回数に乗じて、健全度を評価している。一方、阿部らの既往の研究によるとたわみが床版支間 L の $1/400$ に達した付近で補強対策を必要があると提案されている^{9) 10)}。そこで、本実験では RC 床版のたわみが 3mm となる等価走行回数を、前後のたわみと等価走行回数の関係から補間法により算出し、この時点の等価走行回数と破壊時の等価走行回数の比から RC 床版および下面増厚補強床版の健全度および、補強効果を評価する。

(1) RC床版

RC 床版供試体 RC-1 のたわみは、図-4 に示すように荷重 80kN 載荷時の初期たわみは、供試体 RC-1 が 0.95mm である。たわみが 3mm ，すなわち床版支間 L の $1/400$ を超えた付近からたわみの増加が大きくなり、その後の走行により破壊に至っている。供試体 RC-1 のたわみが 3mm に達した時点の等価走行回数は 1.98×10^6 回である。破壊時のたわみは等価走行回数 7.34×10^6 回で 6.86mm である。ここで、疲労損傷における累積損傷度の関係から健全度を評価するとたわみが 3mm に達した時点の累積損傷度は $0.27 (= 1.98 \times 10^6 / 7.34 \times 10^6)$ となり、進展期に相当する損傷である。

(2) 下面増厚補強床版

供試体 RC-W のたわみと等価走行回数の関係は図-4 に示すように、 80kN 時の初期たわみは 1.0mm であり、その後の走行で徐々にたわみが増加している。たわみが 3.0mm を超えた付近から急激に増加している。これは、増厚界面のはく離が開始されたものと考えら

れる。たわみが 3mm に達した時点の等価走行回数は 13.00×10^6 回であり、供試体 RC-1 の 6.6 倍である。その後、荷重を 120kN に増加し、走行した後、たわみが急激に増加し、破壊時の等価走行回数は 22.83×10^6 回で、最大たわみは 4.6mm である。たわみが 3mm に達した時点の破壊走行回数との比は 0.56 であり、健全度ランクは IV，劣化過程は加速期の前期に相当とする。

一方、供試体 RC-C のたわみと等価走行回数の関係は、供試体 RC-W とほぼ同等な増加傾向を示している。供試体 RC-C は、荷重 80kN 時の初期たわみは 0.91mm であり、その後の走行で徐々にたわみが増加している。他の供試体と同様にたわみが 3mm を超えた付近から急激に増加している。これは、供試体 RC-W と同様に増厚界面ではなく離が開始されたものと考えられる。たわみが 3mm に達した時点の等価走行回数は 13.91×10^6 回であり、RC 床版供試体の 1.07 倍であり、わずかに上回っている。その後、荷重を 120kN に増加し、走行した後、破壊に至った。破壊時の等価走行回数は 27.99×10^6 回で、最大たわみは 5.14mm である。たわみが 3mm に達した時点の破壊走行回数との比は 0.50 であり、健全度ランクは III，劣化過程は進展期に相当とする。

以上より、供試体 RC-W および供試体 RC-C は、それぞれの材料の引張抵抗によりたわみの増加が抑制され、耐疲労性が向上している。また、たわみが床版支間 L の $1/400$ を越えると、たわみの増加が著しくなり、はく離と同時に押抜きせん断破壊に至っている。劣化過程は進展期から加速期（前期）に達する前に、次期の補強対策の検討が必要になるものと考えられる。

6.3 破壊状況

本実験における破壊時の損傷状況を図-5，切断面の破壊状況を図-6 に示す。

(1) RC床版 (RC-1)

RC 床版の破壊時の損傷状況は図-6 (1) に示すように、床版上面には軸直角方向にひび割れが発生している。床版下面には 2 方向ひび割れが発生している。また、輪荷重位置から 45 度底面に押抜きせん断破壊に伴うはく離が見られる。

(2) ワイヤーマッシュ下面増厚補強床版 (RC-W)

供試体 RC-W の破壊時の損傷状況は図-6 (2) に示すように、輪荷重走行面には、押抜きせん断破壊に伴うひび割れが見られる。下面増厚部のひび割れ状況は、RC 床版下面のひび割れ状況とは異なり、不規則に 2 方向ひび割れが発生している。破壊後に打音法を行いはく離状況を確認すると、輪荷重走行位置から 45 度底面の外側のはく離が著しい。次に、切断面の破壊状況を図-7(1)に示す。軸直角は輪荷重走行位置か

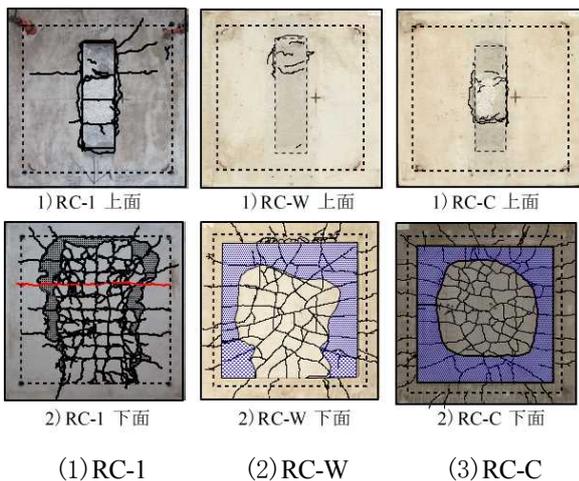


図-6 破壊状況

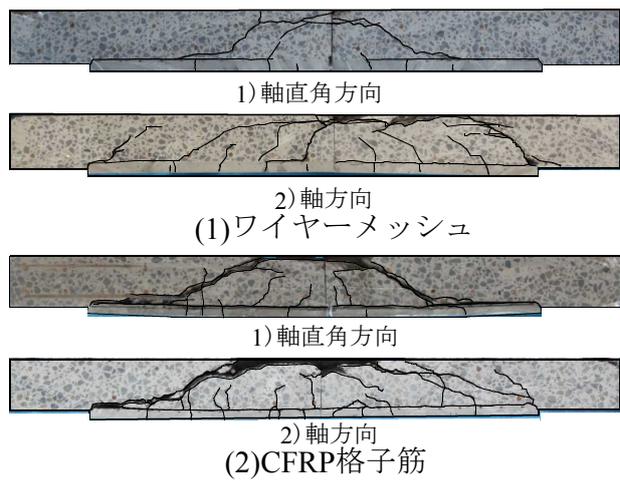


図-7 切断面

ら 45 度のせん断ひび割れが発生している。また、増厚界面のはく離状況は、輪荷重直下では、はく離がみられない。

(3) CFRP 格子筋を配置した下面増厚補強床版 (RC-C)

供試体 RC-C の破壊状況は図-6(3)に示すように、上面には押抜きせん断破壊に伴う損傷が見られるものの貫通ひび割れの発生は見られない。下面には 2 方向のひび割れが発生している。図-7(2)より、供試体 RC-W と比較してひび割れが多く発生しており分散されている。床版中央で押抜きせん断破壊となり、増厚部は完全にはく離している。

8. まとめ

本研究では従来の鉄筋と同等な性質を有するワイヤーメッシュを配置した供試体と比較的新しい材料である CFRP 格子筋を配置した下面増厚補強法における補強効果および耐疲労性の検証を行った結果、以下の知見が得られた。

(1) RC 床版下面に引張補強材としてワイヤーメッシュを配置して増厚補強した供試体は、同一寸法を有する RC 床版供試体の 3.1 倍の補強効果が得られた。同様に、CFRP 格子筋を配置して増厚補強した供試体は 3.8 倍の補強効果が得られた。また、ワイヤーメッシュの供試体の 1.2 倍の補強効果が得られた。

(2) たわみと等価走行回数の関係においては、RC 床版供試体、ワイヤーメッシュおよび CFRP 格子筋を配置した供試体ともにたわみが床版支間 L の 1/400 を超えた付近から急激な増加が見られる。維持管理においての健全度評価では RC 床版、下面増厚床版ともに、累積損傷度から算定される健全度評価では進展期で次期の補強対策の検討が必要となる。

(3) 破壊時のひび割れ状況は RC 床版の輪荷重走行範囲から 45 度で押抜きせん断破壊となる。一方、ワイヤ

ーメッシュ、CFRP 格子筋を配置し、PCM を吹付けにより下面増厚補強した供試体は、破壊時には完全にはく離し、押抜きせん断破壊となる。したがって、健全度ランク III、劣化過程は進展期に達した付近から打音法によるはく離の診断が必要になるものと考えられる。

参考文献：

- 1) 土木学会：道路橋床版の維持管理マニュアル、2012.6.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I, II, III, 2002.
- 3) 土木学会：道路橋床版の維持管理マニュアル、2012.6.
- 4) 山崎淳，池田甫：道路橋補修・補強事例集，「道路橋補修・補強事例集」編集委員会，pp. 71-72, 2013.5.
- 5) FRP グリッド研究会：CFRP グリッド増厚・巻立て工法によるコンクリート構造物の補修・補強設計・施工マニュアル(案)，2001.4.
- 6) 榎原弘幸ほか：ポリマーセメントモルタルの接着強度に及ぼすコンクリート下地処理法の影響，材料，Vol.52, No.9, pp.1082-1088, 2003.9.
- 7) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理，森北出版，2007.10.
- 8) 玉越隆史ほか：道路橋の計画的管理に関する調査研究—橋梁マネジメントシステム(BMS)，国土交通省国土技術政策総合研究所 (2009)
- 9) 阿部忠ほか：輪荷重走行疲労実験における RC 床版上面増厚補強法の耐疲労性の評価法，構造工学論文集，Vol. 56A, pp. 1270-1281, 2010.3.
- 10) 阿部忠ほか：SFRC 上面増厚補強 RC 床版の輪荷重走行疲労実験による S-N 曲線式の提案，構造工学論文集，Vol. 58A, pp. 1156-1165, 2012.3