

論文

有効高を考慮してCFRP格子筋を配置した接着剤併用下面増厚補強法の耐疲労性に関する研究

小森篤也*, 阿部 忠**

*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)

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

本研究は、ワイヤーメッシュを既設 RC 床版に直接設置する下面増厚補強と CFRP 格子筋を増厚層内に配置した下面増厚補強した RC 床版供試体を用いて輪荷重走行疲労実験を行い、耐疲労性を評価した。その結果、同一寸法を有する RC 床版に比して、ワイヤーメッシュを用いた供試体は 3.1 倍、増厚層内に CFRP 格子筋を配置した供試体は 8.1 倍の補強効果が得られた。また、接着剤を増厚界面に塗布した補強においても、それぞれ 16.4 倍、22.7 倍の補強効果が得られた。よって、増厚層内に CFRP 格子筋を配置した下面増厚補強法および増厚界面に接着剤を塗布し、増厚層内に CFRP 格子筋を配置することで、耐疲労性が大幅に向上する結果が得られ、実用的な補強法と言える。

キーワード：RC床版, CFRP格子筋, 下面増厚補強法, 耐疲労性

1. はじめに

高度経済成長期に建設された道路橋は、建設後 50 年が経過し、老朽化した橋梁が増加することから、その維持管理が重要な課題となっている。道路橋部材のなかで損傷が著しい部材は RC 床版である。たとえば、海岸線に建設された床版は、飛来塩分などにより鉄筋の錆汁がコンクリート表面に沈着している。とくに、かぶり不足により鉄筋の露出による発錆が見られる床版は、断面厚や鉄筋量が不足していることから、耐力性能の向上を図るための補強対策が必要となる。

一方、このような劣化した RC 床版の補強法として鋼板接着補強¹⁾なども施されている。また、ひび割れやたわみの増大を抑制するための補強法としては連続繊維シート (CFS) 接着補強が実施されている²⁾。さらに、RC 床版のかぶりコンクリートのはく離など下面の損傷が著しい床版の補強には、引張補強材に鉄筋を配置してポリマーセメントモルタル吹付による下面増厚補強が施されている¹⁾。そこで本研究では、下面増厚補強法における従来の鉄筋配置と同等な特性値を有するワイヤーメッシュおよび CFRP 格子筋を配置した下面増厚補強における補強効果および耐疲労性を検証する。よって、試験体は、ワイヤーメッシュを既設 RC 床版コンクリート下面に設置し、PCM 吹き付けして下面増厚補強した供試体および RC 床版の曲げ抵抗を引張補強材増厚層内に CFRP 格子筋を配置した下面増厚補強した供試体とする。さらには増厚界面に接着剤を塗布した補強法における耐疲労性を検証し、RC 床版の下面増厚補強法の一助としたい。

2. 使用材料および供試体寸法

2.1 供試体概要

本実験に用いる供試体は、2002 年改定の道路橋示方書・同解説 (以下、道示とする)³⁾の規定に基づいて設計し、実験装置の輪荷重幅 250mm と道示に規定する輪荷重幅 500mm の比によるモデル化を行うものとする。よって、RC 床版供試体寸法は実橋の 1/2 モデルとする。

2.2 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 の砕石を使用した。鉄筋には SD295A, D10 を用いた。実験時におけるコンクリート圧縮強度は 35N/mm² である。鉄筋の降伏強度は 368N/mm², 引張強度が 516N/mm², 弾性係数は 200kN/mm² である。

(2) 下面増厚補強床版

従来の下面増厚補強法の引張補強材には φ 6mm の異形鉄筋が格子状に配置されている。一方、CFRP 格子筋は一体形成されることから厚さが 4.2mm 程度であり、交差部は鉄筋の 1/3 程度の厚さとなる。よって、増厚寸法を同一とした場合は CFRP 格子筋は増厚界面から有効高を考慮した配置法が可能となる。本供試体には、ワイヤーメッシュを増厚界面に直接配置した下面増厚補強および CFRP 格子筋を増厚界面から 10mm の位置に設置した供試体を作成する。そして増厚界面および補強材に接着剤を塗布し、ワイヤーメッシュ、

CFRP 格子筋をそれぞれ配置した場合の補強効果を検証する。

既設 RC 床版のコンクリートおよび鉄筋は、RC 床版供試体と同様とする。次に、ワイヤーメッシュは、 ϕ 3.2mm 網目寸法 50mm \times 50mm の市販品を用いる。ワイヤーメッシュの引張強度は縦は 653N/mm²、横が 630N/mm² である。また、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 \times 50mm、厚さ 4mm 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-1 に示す。

下面増厚補強に用いるセメントモルタルには、一般的に吹付け工法に用いられている市販品のポリマーセメントモルタル（以下、PCM とする）を用いる。この材料は既設 RC 床版下面から吹付け施工が可能である。ここで、本実験供試体に用いる PCM の配合を表-2 に示す。なお、PCM にはビニロン繊維が配合されているが、詳細は公表されていない。実験時の PCM の圧縮強度は 44.3N/mm² である。

既設 RC 床版コンクリートと PCM の付着性を高めるために、プライマーの塗布や水のプレウェッティングなどの処理を行なうことが一般的である。

一部の供試体の下地処理には従来型の施工法として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）を用いた。ここで、プライマーの性能を表-3 に示す。

道路橋 RC 床版の上面補強法として、超速硬セメントモルタル、超速硬無収縮モルタルを用いた場合、輪荷重走行による疲労を受けた際に、増厚界面で早期にはく離し、再補修・補強が行なわれた事例もある。これを改善するために専用のエポキシ系接着剤（以下、接着剤とする）を塗布した補修・補強法が提案され、耐疲労性が評価され、実施工されている⁴⁾。そこで、本下面増厚補強法においても、既設 RC 床版コンクリートと増厚界面・格子筋との付着性を高めるために一部の供試体には、専用の打継用エポキシ系接着剤を用いた。本実験に用いた接着剤の性能を表-3 に併記する。

2.3 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 とした。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、有効高さを 105mm とした。また、圧縮側には引張鉄筋量の 1/2 を配置した。無補強の供試体名称は RC 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、作成した供試体の有効高さなど詳細を一覧を表-4に示す。

表-1 各補強材の剛性比較

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 \cdot mm)	剛性比
ワイヤーメッシュ	200	8.0384	20	32.15	0.88
CFRP格子筋	103.7	17.5	20	36.30	1.0

表-2 PCM の配合

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-3 プライマーおよび接着剤の性能

材料	試験体厚 (mm)	接着荷重 (N)	接着応力 (N/mm ²)	変位量 (mm)
プライマー	75.0	5118.7	2.61	0.64
接着剤	75.0	4,671.3	2.38	0.47

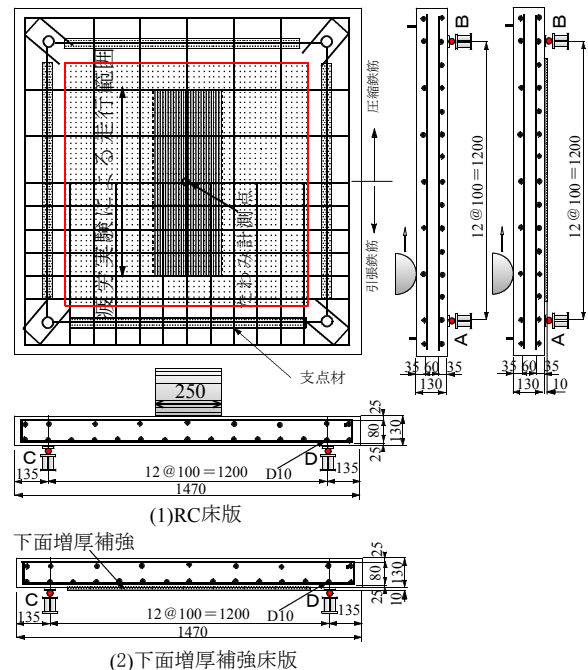


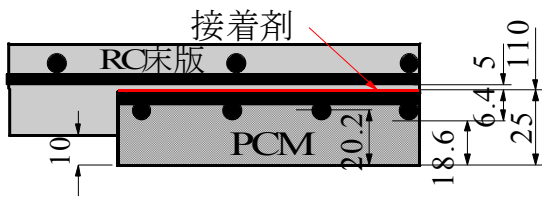
図-1 RC 床版および下面増厚補強床版供試体

表-4 供試体の一覧

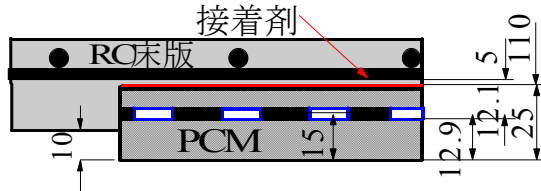
供試体	補強材	プライマー	スペーサー	床版厚み (mm)
RC	なし (無補強)			130
RC-W	ワイヤーメッシュ	エマルジョン	なし	140
RC-C2	CFRP格子筋	エマルジョン	10mm	
RC-WA	ワイヤーメッシュ	接着剤	なし	
RC-C.A2	CFRP格子筋	接着剤	10mm	

(2) 下面増厚補強床版供試体

すべての補強用 RC 床版は未損傷でありかぶり不足の床版や床版下面コンクリートのはく離など下面劣化した損傷を想定し、RC 床版供試体の下面の 1,100 \times 1,100mm の範囲を 15mm あらかじめ箱抜きした。ワイヤーメッシュを増厚界面に配置した後、PCM を厚さ 25mm で吹付け増厚補強する。よって、軸直角

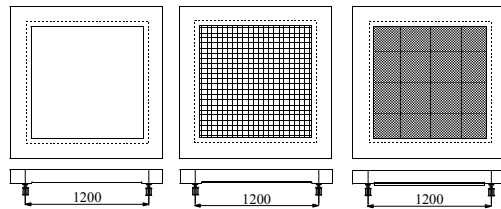


(1) ワイヤーマッシュ



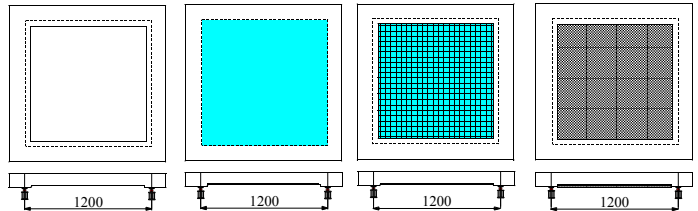
(2) CFRP 格子筋

図-2 下面増厚補強床版断面寸法



1)下地処理 2)引張補強材 3)PCM 増厚

(1) 下面増厚補強



1)下地処理 2)接着剤塗布 3)引張補強材 4)PCM 増厚

(2) 接着剤塗布型下面増厚補強

図-3 下面増厚補強手順

方向のワイヤーマッシュから上縁までの有効高さは116.6mm、床版全厚は140mmである。この供試体をRC-Wとする。次に、CFRP格子筋に有効高を設ける供試体は、増厚界面から10mmの位置に設置し、CFRP格子筋の位置から上縁までの有効高は125mm、床版全厚は140mmである。この供試体をRC-C2とする。さらに、耐疲労性の向上を図るために増厚界面および補強材に接着剤を塗布する供試体を作成する。ワイヤーマッシュを増厚界面に設置し接着剤を塗布した供試体をRC-W.A、スペーサーを用い増厚界面から有効高を10mm変化させCFRP格子筋を設置し接着剤を塗布した供試体をRC-C.A2とする。ここで、下面増厚補強床版供試体の寸法および鉄筋配置を図-1(2)に示す。また、CFRP格子筋増厚界面に設置した場合の断面寸法および増厚界面から10mmの有効高を設けた供試体の断面寸法を図-2に示す。

3. 補強方法

3.1 下面増厚補強床版の概要

補強法は、FRP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)⁹⁾に準拠して製作する。施工手順を図-3に示す。

従来型の下面増厚補強法は図-3に示すように、増厚範囲の1,100×1,100mmの範囲を下面から下地処理として研掃し(図-3(1))、ここで、付着性を高める目的でプライマー、或いは接着剤を塗布し(図-3(2))、養生後、引張補強材CFRP格子筋を設置する(図-3(3))。その後、PCMを15mm吹付けし、2時間後のこりの10mmを吹き付けて、表面仕上げを行う(図-3(4))。

4. 実験方法および等価走行回数

4.1 実験方法

RC床版および下面増厚補強床版供試体を用いて輪荷重走行疲労実験を行う。実験荷重は80kNから20,000回走行し、20,000回走行ごとに荷重を増加する、段階荷重載荷とする。たわみ、ひずみの計測は各荷重ごとに1, 10, 100, 1000回とし、それ以降は5000回ごとに計測する。下面増厚補強法における補強効果は基準荷重に対する等価走行回数を算定し、RC床版の等価走行回数を基準に補強効果および耐疲労性を評価する。

4.2 等価走行回数

輪荷重走行疲労実験では、2万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⁶⁾。なお、RC床版および下面増厚補強床版供試体は、道示Iに準拠して1/2モデルとした。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。

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

ここで N_{eq} ：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)

表－5 実験走行回数および等価走行回数

供試体		荷 重				数 合計	走行 回数比
		80 kN	100 kN	120 kN	130 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-C2	実験走行回数	20,000	20,000	6,880		59,688,956	8.1
	等価走行回数	772,240	13,137,391	45,779,325			
RC-W.A	実験走行回数	20,000	20,000	16,000		120,373,177	16.4
	等価走行回数	772,240	13,137,391	106,463,546			
RC-C.A2	実験走行回数	20,000	20,000	20,000	1,091	167,051,536	22.7
	等価走行回数	772,240	13,137,391	133,079,433	20,062,472		

5. 結果および考察

5.1 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実験走行回数および等価走行回数 N_{eq} (式(1))の算定結果を表－5に示す。

(1) RC床版供試体

無補強 RC 床版供試体 RC の等価走行回数は 7.347×10^6 回であり、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) プライマーを塗布した下面増厚床版供試体

増厚界面に直接ワイヤーメッシュを設置し、PCM を吹付けした供試体 RC-W の等価走行回数は 22.823×10^6 回であり、RC 床版供試体の等価走行回数の 3.1 倍の補強効果が得られた。

次に、CFRP 格子筋の引張力を高める目的で増厚界面から 10mm の位置の増厚層内に CFRP 格子筋を配置した供試体 RC-C.S の等価走行回数は 59.688×10^6 回であり、RC 床版供試体の 8.1 倍の補強効果が得られた。また、ワイヤーメッシュを用いた供試体 RC-W の等価走行回数に比して 2.6 倍の補強効果が得られた。

(3) 接着剤を塗布した下面増厚床版供試体

増厚界面に接着剤を塗布した後、ワイヤーメッシュを配置した供試体 RC-W の等価走行回数は 120.373×10^6 回であり、RC 床版供試体の等価走行回数の 16.4 倍の補強効果が得られた。また、接着剤を塗布しない供試体 RC-W の等価走行回数の 5.3 倍の補強効果が得られた。本来 CFRP 格子筋と PCM は付着性が低いが接着剤を塗布することで、付着性が向上し、耐疲労性が評価される結果となった。

増厚界面に接着剤を塗布した後、増厚層内の 10mm の位置に CFRP 格子筋を配置した供試体 RC-C.S.A の等価走行回数は 167.051×10^6 回であり、RC 床版供試体の等価走行回数に比して 22.7 倍の補強効果が得られた。また、増厚界面にプライマーを塗布した供試体 RC-C.S の等価走行回数の 2.80 倍の補強効果が得られ

た。よって、増厚界面に接着剤を塗布し、増厚層内の 10mm の位置に CFRP 格子筋を配置した供試体は破壊時付近まで一体性が確保され、補強効果がえられたものと考えられる。

以上より、ワイヤーメッシュおよび CFRP 格子筋を配置した下面増厚補強法は、同一寸法を有する RC 床版の等価走行回数に比して、大幅に増加している。とくに、増厚層内に CFRP 格子筋を配置し、上縁までの有効高を高くすることで耐疲労性が向上する結果となった。また、増厚界面に専用のエポキシ系接着剤を塗布することで、既設 RC 床版コンクリートと一体性が確保され耐疲労性が大幅に向上する結果となった。

5.2 破壊状況

本実験における破壊時の損傷状況を図－4に示す。なお、図に示すはく離範囲は打音法による判定である。

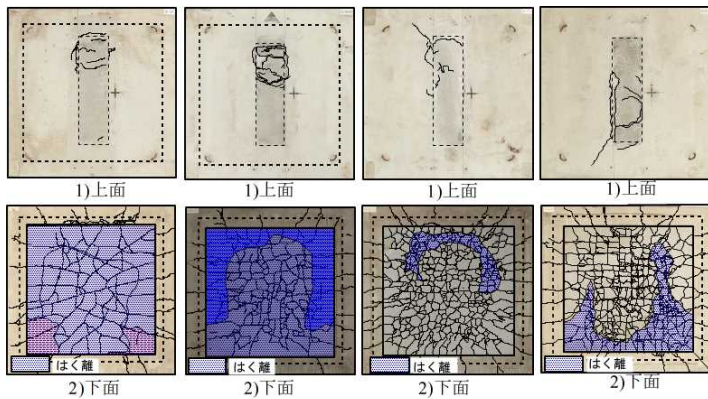
(1) RC床版供試体

無補強 RC 床版の破壊時の損傷状況は床版下面には 2 方向ひび割れが発生し、押抜きせん断破壊に伴うはく離が見られる。

(2) プライマーを塗布した下面増厚床版供試体

増厚界面に直接ワイヤーメッシュを配置した、PCM を吹付けした供試体 RC-W 破壊時の損傷状況は図－4(1)に示すように、床版上面は押抜き破壊による陥没が見られる。下面は破壊時には押抜きせん断破壊に起因するダウエル効果が及ぼす範囲から内側においてもはく離が発生している。

増厚層内の 10mm の位置に CFRP 格子筋を配置した供試体 RC-C.S の破壊時の損傷状況は図－4(3)に示すように、上面は押抜きせん断破壊した付近に陥没が見られる。次に、下面は供試体 RC-W と同様に輪荷重から 45 度下面の内側にはく離が見られないが、外側の支点方向にはく離が見られる。2 方向のひび割れが CFRP 格子筋の位置に発生し、ひび割れの分散効果が得られているものと考えられる。また、増厚界面から 10mm の位置に CFRP 格子筋を配置し、有効高の変化により補強効果の向上が見られる。



(1)RC-W (2)RC-C2 (3)RC-W.A (4)RC-C.A2
 図-4 下面増厚補強床版の破壊状況

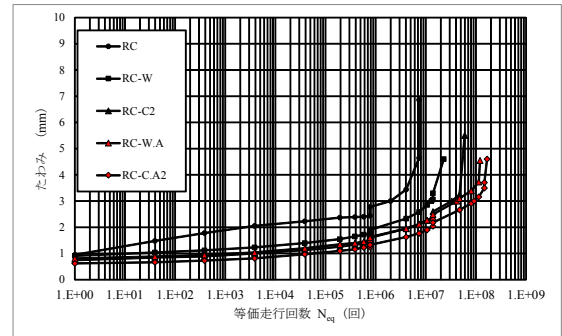


図-5 たわみと等価走行回数の関係

(3) 接着剤を塗布した下面増厚床版供試体

増厚界面に接着剤を塗布した後、ワイヤーメッシュを配置した供試体 RC-W.A の上面損傷は、供試体 RC-W とほぼ同様である。下面は、接着剤の効果により、破壊時付近まで一体性が確保され、はく離範囲が抑制されている。また供試体 RC-W に比してひび割れが分散されている。はく離は押抜きせん断破壊した下面の一部がはく離している。

増厚界面に接着剤を塗布した後、増厚層内の 10mm の位置に CFRP 格子筋を配置した供試体 RC-CA2 の上面は押抜きせん断破壊となった位置は陥没が見られる。下面は、接着剤および増厚層内に CFRP 格子筋を配置したことから、破壊時まで一体性が確保され、有高の変化により、ひび割れが分散されている。破壊状況は供試体 RC-C2 に比して、はく離範囲が抑制され、ひび割れはより格子筋に沿って発生している。

そして、接着剤を塗布した供試体 RC-W.A の等価走行回数の 2.8 倍であるものの損傷状況、ひび割れ間隔もほぼ同様である。

以上より、等価走行回数の比率に見られるように、増厚層内に CFRP 格子筋を増厚層内に配置することで既設 RC 床版の引張力を鉄筋と CFRP 格子筋で引張力を分担し、ひび割れの分散効果によりはく離が抑制されている。また、増厚界面に接着剤を塗布し、増厚層内に引張補強材を配置することは、破壊時付近まで一体性が確保され、さらなる耐疲労性の向上に大きく寄与する結果となった。

5.4 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-5 に示す。

(1) RC床版供試体

RC 床版供試体のたわみは図-5 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。阿部らはたわみが床版支間 L の 1/400 (活荷重たわみの場合は 1/800 としている) に達した付近で補強対策を必要であると提案されている⁴⁾。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を比較して補強効果を評価する。よって、RC 床版供試体 RC のたわみが 3mm に達した時点の等価走行回数は 1.980×10^6 回である。破壊時のたわみは 6.86mm である。

(2) プライマーを塗布した下面増厚床版供試体

ワイヤーメッシュを増厚下面に配置した供試体 RC-W のたわみと等価走行回数の関係は、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。たわみが 3mm に達した時点の等価走行回数は 13.910×10^6 回であり、RC 床版供試体の 7.0 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、破壊時のたわみは 5.14mm である。たわみが床版支間 L の 1/400 付近から端部からたわみの増加が著しいことから、この付近ではく離が開始されたものと考えられる。

増厚層内に CFRP 格子筋を配置した供試体 RC-C2 は、荷重 80kN 載荷時のたわみは 0.75mm であり、増厚下面にワイヤーメッシュを配置した供試体 RC-W に比して、初期たわみは減少している。たわみが 3mm に達した時点の等価走行回数は 33.100×10^6 回であり、RC 床版に比して 16.7 倍である。たわみが 3.2mm 越えた付近から急激に増加し始め、破壊時のたわみは等価走行回数 59.68×10^6 回で、5.51mm である。よって、界面から 10mm の位置に CFRP 格子筋を配置することでたわみの増加が抑制された。

(3) 接着剤を塗布した下面増厚床版供試体

接着剤を塗布し、ワイヤーメッシュを配置した供試体 RC-W.A は、荷重 80kN 時の初期たわみは 0.8mm 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 3mm に達した時点の等価走

行回数は 41.40×10^6 回であり、RC 床版供試体の 21.0 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 120.37×10^6 回で、最大たわみは 4.55mm、であり、たわみが抑制されている。破壊状況は、押抜きせん断破壊と同時に一部がはく離した。破壊時のたわみは等価走行回数 140.385×10^6 回で、最大たわみ 4.73mm である。

増厚界面に接着剤を塗布した後、増厚層内の 10mm の位置に CFRP 格子筋を配置した供試体 RC-C.A2 の荷重 80kN 時の初期たわみは 0.63mm 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 3mm に達した時点の等価走行回数は 92.300×10^6 回であり、RC 床版供試体の 46.6 倍、増厚界面にプライマーを用いた供試体 RC-C2 に比して 2.8 倍であり、たわみが抑制されている。たわみが 3.0mm を超えた後の走行疲労実験においても急激なたわみの増加はみられない。破壊時のたわみは等価走行回数 167.051×10^6 回で、最大たわみ 4.6mm である。

以上より、下面増厚補強法においては、ワイヤーメッシュおよび CFRP 格子筋を増厚下面から 10mm の位置に配置した供試体はそれぞれ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。とくに、増厚界面に接着剤を塗布することにより、破壊時付近まで一体性が確保され、たわみの増加がさらに抑制され、耐疲労性が向上する結果が得られた。

6. まとめ

(1) プライマーを使用し、従来から施工されている下面増厚補強法として引張補強材にワイヤーメッシュを用いた供試体は、RC 床版供試体の 3.1 倍、また、増厚層内 10mm の位置に CFRP 格子筋を配置した供試体は、RC 床版供試体の 8.1 倍、ワイヤーメッシュを用いた供試体に比して 2.6 倍の補強効果が得られた。よって、ほぼ同じ剛性をもつ補強材を用いた場合、増厚層

内、すなわち RC 床版上面までの有効高をとることで耐疲労性が大幅に向上する結果が得られた。

(2) 増厚界面と各補強材にエポキシ樹脂系接着剤を塗布した補強法では、ワイヤーメッシュを配置した供試体は RC 床版供試体の 16.4 倍、CFRP 格子筋を増厚層内に配置した供試体は、22.7 倍、ワイヤーメッシュを配置した供試体に比して 1.4 倍の補強効果が得られた。よって、接着剤を塗布して引張補強材にワイヤーメッシュ、増厚層内 10mm の位置に CFRP 格子筋を配置することで耐疲労性が向上した。

(3) RC 床版の破壊状況は輪荷重載荷位置から 45 度底面の損傷が著しい。ワイヤーメッシュおよび増厚層内に CFRP 格子筋を用いた供試体は、破壊と同時にはく離している。しかし、接着剤を塗布することではく離が抑制された。破壊時においても付着界面の一体性が確保され、輪荷重載荷位置から 45 度底面のみはく離している。

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
- 2) 元燦豪，阿部忠，木田哲量，高野真希子，小森篤也：CFS・CFSS 補強した RC 床版の補強効果および耐疲労性，構造工学論文集，Vol. 58A，pp. 1189-1196，2012.3
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I，II，III，2002
- 4) 阿部忠，木田哲量，高野真希子，小森篤也，児玉孝喜：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
- 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) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理，森北出版，2007