

CFS 接着補強法にポリウレア樹脂を用いた RC 床版の輪荷重 走行実験による補強効果および耐疲労性の評価

日鉄ケミカル&マテリアル株式会社 ○小森篤也, 立石晶洋, 日大生産工 阿部忠

1. はじめに

道路橋 RC 床版の下面からの補強法は、ひび割れの抑制効果が期待でき、塩害にも強い CFS 接着補強法¹⁾が多く採用されている。しかし、CFS の破断強度が非常に高いことから CFS の性能を十分に発揮する前に、はく離破壊に至ることが知られており、この問題に対し阿部ら^{2),3)}は、CFS を 2 層、3 層、4 層接着した場合の高強度型 CFS の引張強度に対する低減係数を評価している。これによると、CFS を多く積層しても耐疲労性の向上は得られないことを示す結果が報告されている。そして、新井ら⁴⁾は、CFS および連続繊維ストランドシート（以下、CFSS という）補強においてプライマーとシート接着用エポキシ樹脂の間にポリウレア樹脂パテを塗布し、柔軟層を設けることで、引張応力分担範囲が数倍に拡大することから CFS および CFSS の界面はく離破壊が抑制されるとの静的試験結果が報告されている。そこで本研究では、RC 床版の CFS 接着補強法においてプライマーとエポキシ樹脂接着剤との間にポリウレア樹脂パテを塗布し、当該層を柔軟層とし、その上に CFS を接着補強した供試体に輪荷重走行疲労実験から、耐疲労性を評価する。実験では、同一条件で製作した無補強 RC 床版を基準として、多積層接着を行った場合と同等な引張剛性となる中弾性および高弾性型の 2 種類の CFS を用いて下面補強した供試体を製作し、ポリウレア樹脂パテ/エポキシ樹脂パテ材を用いた供試体で比較する。各 CFS 接着補強された供試体の輪荷重走行疲労実験による等価走行回数からポリウレア樹脂パテによる柔軟層を設けた CFS 接着補強法の耐疲労性の検証を行い、ポリウレア樹脂パテの有効性

を評価する。

2. 使用材料・供試体寸法および補強方法

2.1 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、コンクリートの設計基準強度は27N/mm²としている。また、鉄筋にはSD295A, D10を用いる。なお、CFS接着補強するRC床版供試体も同様の材料で製作した。コンクリートの圧縮強度および鉄筋の材料特性値を表-1に示す。

(2) CFS

本実験に用いたCFSは、中弾性型 (CFS-M) および高弾性型 (CFS-H) とともに繊維の目付量は306g/m²で、設計厚は、それぞれ0.165mm, 0.143mmである。ここで、CFSの材料特性値を表-2に示す。なお、表-2に示す補強材の引張剛性は格子張りでCFSを接着するため非接着部分を考慮し式(1)より算出した。

$$\text{引張剛性} = \{(\text{設計厚み} \times \text{引張弾性係数}) / 3\} \times 2 \quad (1)$$

式(1)より、引張剛性は中弾性型 (CFS-M) が46.53 kN/mm, 高弾性型 (CFS-H) が63.49kN/mmと求められる。

(3) プライマーおよび接着剤

従来のCFS接着補強法では、接着効果を高めるためにエポキシ樹脂プライマー（プライマーA）と不陸修正のためのエポキシ樹脂パテ、さらにCFS接着用のエポキシ樹脂接着剤が用いられている。

一方、本論文で提案するCFS接着補強法では、接着効果を高めるためのプライマーにポリウレタン樹脂プライマー（プライマーB）を用いた。次に、プライマーBとCFSの間にポリウレタン樹脂パテを用いることでCFSの定着長を

Evaluation of Strengthen Effect and Fatigue Durability Under the Wheel Loading Fatigue Test for the CFS Bonded RC Slab with Poly-urea Layer
Atsuya KOMORI, Akihiro TATEISHI, and Tadashi ABE

拡大し、はく離を抑制させる効果が期待できる柔軟層を設け、CFSの接着にはエポキシ樹脂接着剤を用いる。ここで、プライマー、エポキシ樹脂、ポリウレア樹脂の性能を表-3に示す。不陸修正に用いるエポキシ樹脂パテの伸びが2.5%に対して、ポリウレア樹脂パテの伸び率は492%であり、エポキシ樹脂パテの196倍である。よって、広い範囲で応力分担効果が期待できることから、耐疲労性の評価では、その効果が得られるものと考えられる。

2.2 供試体寸法および鉄筋の配置

(1) RC床版供試体寸法およびCFS補強実験に用いるRC床版供試体は、1994年以降の道路橋示方書・同解説(道示)⁵⁾の規定に準拠して設計し、その1/2モデルとする。供試体寸法は、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、引張主鉄筋はD10を100mm間隔、配筋筋も同様に100mm間隔で配置した。有効高さは、それぞれ105mm、95mmである。また、圧縮側には引張鉄筋量の1/2を配置した。ここで、RC床版供試体の寸法および鉄筋配置を図-1に示す。なお、RC床版供試体の記号をRC-1とする。

(2) CFS接着補強範囲および寸法

CFSの接着補強の補強範囲は、RC床版の支間内である1,100×1,100mmの範囲とする。よって、CFSは幅、100mm、長さ1,100mmとし、格子間を50mmとする。

(3) CFS接着補強法

CFS接着補強法の概略を図-2に示す。従来のCFS補強法は図-2(1)に示すように、プライマーAを塗布し、不陸修正材であるエポキシ樹脂パテを塗布し、その上にCFSをエポキシ樹脂接着剤で軸方向、軸直角方向に接着補強する。補強手順は、コンクリート研掃後、墨だしを行い、CFSの接着範囲以外をマスキングテープで養生する。次に、プライマーAを混合し、ローラー刷毛で0.20kg/m²となるよう均一に塗布し、24時間の養生を行う。養生終了後エポキシ樹脂パテを1mm厚となるよう均一に塗布し、8時間以上の養生を行う。次に、エポキシ樹脂接着剤を塗布し、幅100mm、長さ1,100mmに切断したCFSで1層目の接着補強を行う。その後、8時間以上の養生を行い、2層目のCFSを接着補強する。

実施工における研掃から補強終了までの日数は、養生時間の関係から3日~4日程度を要する。ここで、中弾性型CFSをエポキシ樹脂で接着補強した供試体記号をRC-CM.E、高弾性型CFS

表-1 RC床版の使用材料の特性値

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)	弾性係数 (kN/mm ²)
RC	34.2	368	516	200
RC-CM	31.9			
RC-CH	32.0			

表-2 CFSの材料特性値

シート種類	繊維目付量 (g/m ²)	設計厚さ (mm)	引張強度 (N/mm ²)	引張弾性係数 (kN/mm ²)	引張剛性 (kN/mm)
CFS M	306	0.165	3,773	423	46.53
CFS H	306	0.143	2,766	666	63.49

表-3 プライマー、エポキシ樹脂パテ、ポリウレア樹脂パテ、エポキシ樹脂接着剤の性能

使用材料	試験項目	単位	エポキシ	ポリウレア	試験方法
プライマー	混合物粘度	mPa·s	500	56	B型粘度計
パテ材	圧縮強度	N/mm ²	86	—	JIS K 7181
	圧縮弾性係数	N/mm ²	6,300	—	JIS K 7181
	引張強度	N/mm ²	—	9	JIS K 7161
	伸び	%	2.5	492	JIS K 7161
	引張弾性係数	N/mm ²	—	73	JIS K 7161
	比重		2	1	水中置換法
エポキシ樹脂接着剤	引張強度	N/mm ²	45	—	JIS K 7161
	曲げ強度	N/mm ²	83	—	JIS K 7171
	引張せん断強度	N/mm ²	15	—	JIS K 6850
	可使時間	分	—	45	ガードナー法

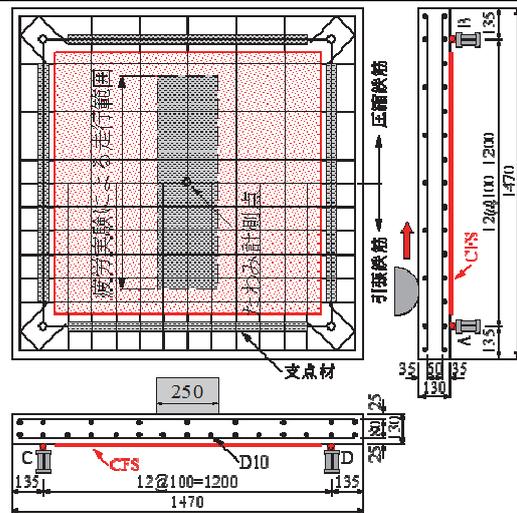
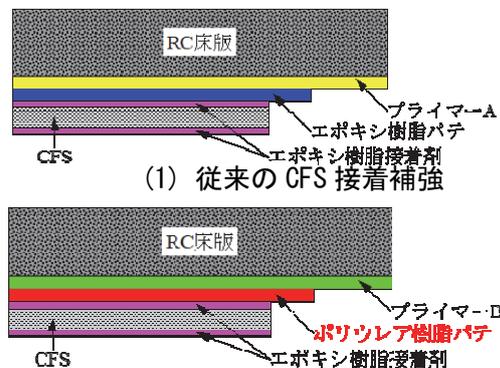


図-1 供試体寸法および鉄筋配置



(2) ポリウレア樹脂を用いたCFS接着補強

図-2 CFS接着補強法の概略

を用いた供試体記号を RC-CH.E とする。

(4) ポリウレア樹脂パテを用いる CFS 接着補強法

ポリウレア樹脂パテを用いる CFS 接着補強法は、図-3(2)に示すように、プライマーBを塗布し、不陸修正材であるポリウレア樹脂パテを塗布し、その上に CFS をエポキシ樹脂接着剤で軸方向、軸直角方向に接着補強する。補強法は、従来の CFS 接着補強法と同様に図-4に示す手順で補強する。プライマーBの主剤と硬化剤を混合し、ローラー刷毛で 0.20kg/m²となるよう均一に塗布し、指触乾燥時間である 3.5 時間の養生を行う。次に、ポリウレア樹脂パテの主剤と硬化剤を混合し CFS 接着面に左官コテを用い 0.6mm 厚となるように塗布し、柔軟層を設け、3.5 時間の養生を行う。そして、幅 100mm、長さ 1,100mm に切断した CFS をエポキシ樹脂で含浸接着させ、1 層目の CFS 補強を行う。続いて、2 層目を同様の手法で接着補強する。実施工においては、養生時間が短いことから 2 日～3 日で終了する。ここで、中弾性型 CFS にポリウレア樹脂パテを用いて接着補強した供試体記号を RC-CM.P、高弾性型 CFS にポリウレア樹脂パテを用いた供試体記号を RC-CH.P とする。

3. 等価走行回数および耐疲労性の評価

3.1 実験方法

輪荷重走行疲労実験は、車輪幅 250mm で走行範囲は床版中央から軸方向に±450mm の範囲（全長 900mm）を連続走行させるものである。荷重載荷方法は荷重 80kN、100kN で 20,000 回走行し、その後は 20,000 回走行毎に 10kN ずつ荷重を増加させ、供試体が破壊するまで走行させた。たわみおよびひずみの計測は 1, 10, 100, 1,000, 5,000 回および 5,000 回以降は 5,000 回走行ごとに行い、計測点は床版中央部とした。

3.2 等価走行回数

本実験では、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} 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おける等価走行回数 N_{eq} は、マイナー則に従うと仮定すると、式(2)で与えられる。なお、式(2)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

表-4 等価走行回数および走行回数比

供試体	CFSの種類	等価走行回数 合計	走行回数比	
	樹脂の種類		CM.E/P/RC	CM.P/CM.E
RC-1	— —	6,359,573	—	—
RC-CM.E	中弾性 エポキシ	93,457,862	14.7	—
RC-CM.P	中弾性 ポリウレア	133,681,120	21.0	1.43
RC-CH.E	高弾性 エポキシ	60,420,893	9.5	—
RC-CH.P	高弾性 ポリウレア	197,945,168	31.1	3.28

曲線の傾きの逆数の絶対値 $m=12.7^6$ を適用する。また、本供試体の基準荷重は、道示に規定される床版の 1/2 モデルとしたことから、活荷重 100kN の 1/2 に安全率 1.2 を考慮した 60kN とする。

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^n (P_i/P)^m \times n_i \quad (2)$$

ただし、 N_{eq} ：等価走行回数（回）、 P_i ：載荷荷重（kN）、 P ：基準荷重（60kN）^{7,8)}、 n_i ：実験走行回数（回）、 m ：S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値（=12.7）とする。

4. 実験結果

4.1 等価走行回数

本実験により求められた、無補強および CFS 接着補強 RC 床版の等価走行回数結果を表-4 に示す。

(1) RC 床版供試体

RC 床版供試体 RC-1 の等価走行回数は表-4 より、 6.359×10^6 回である。この供試体 RC-1 の等価走行回数を基準として中弾性型および高弾性型 CFS 補強床版の補強効果および耐疲労性を評価する。

(2) 中弾性型 CFS を用いた補強供試体

中弾性型の CFS を接着補強した供試体 RC-CM.E の等価走行回数は 93.457×10^6 回であり、供試体 RC-1 に比して 14.7 倍の補強効果が得られている。そして、ポリウレア樹脂パテを用いて CFS 接着補強した供試体 RC-CM.P の等価走行回数は 133.681×10^6 回であり、供試体 RC-1 に比して 21.0 倍の補強効果が得られている。また、供試体 RC-CM.E の等価走行回数と比較すると 1.43 倍の補強効果が得られている。

(3) 高弾性型 CFS を用いた補強供試体

高弾性型の CFS を用いて従来の CFS 接着補

強を行った供試体 RC-CH.E の等価走行回数は 60.420×10^6 回である。供試体 RC-1 との比較を行うと、9.5 倍の補強効果が得られている。一方、ポリウレア樹脂パテを用いて補強した供試体 RC-CH.P の等価走行回数は 197.954×10^6 回であり、供試体 RC-1 に比して 31.1 倍の補強効果が得られている。また、供試体 RC-CH.E の等価走行回数との比較では 3.28 倍の補強効果が得られている。

以上より、プライマーB と CFS 接着層の間にポリウレア樹脂パテを柔軟層として形成することで、新井ら⁴⁾の研究と同様に応力分担範囲が広がり、曲げ引張応力を広い範囲で分担できることから、等価走行回数が大幅に向上したものと考えられる。

4.2 ひずみと等価走行回数の関係

(2) CFS のひずみと等価走行回数の関係

CFS の主筋方向のひずみは図-3 より、供試体 RC-CM.E の 1 走行後のひずみは 428×10^{-6} 、供試体 RC-CM.P は 460×10^{-6} であり、ほぼ同等の値となっている。しかし、等価走行回数 0.579×10^6 回付近から従来の CFS 接着補強した RC-CM.E のひずみの増加が大きくなり、供試体 RC-CM.P を上回っている。一方、高弾性型の CFS を用いた供試体 RC-CH.E、RC-CH.P においても 1 走行後のひずみは、それぞれ 430×10^{-6} 、 480×10^{-6} であり、ほぼ同様の値となっている。その後、等価走行回数 0.193×10^6 付近までは、両供試体ともほぼ同様の増加を示しているが、それ以降になると供試体 RC-CH.E のひずみが徐々に上回る傾向が見られる。破壊時付近の供試体 RC-CH.E のひずみは 1530×10^{-6} である。一方、供試体 RC-CH.P のひずみは等価走行回数 147.007×10^6 回では、ほぼ CFS の破断ひずみに近い 1890×10^{-6} であるが、破壊付近では 900×10^{-6} と低下しており、この間に CFS が部分的に破断したものと考えられるが、ポリウレア樹脂パテによる応力再分配の効果によってひずみの値は低下に留まっている。

以上より、ポリウレア樹脂パテを用いた供試体のひずみは、初期段階では従来の接着補強と同様の挙動を示すが、等価走行回数が増大するにつれてひずみが大きくなり最終的にははく離破壊から CFS の破断に移行した。

5. まとめ

(1)等価走行回数より、中弾性型の CFS を用い

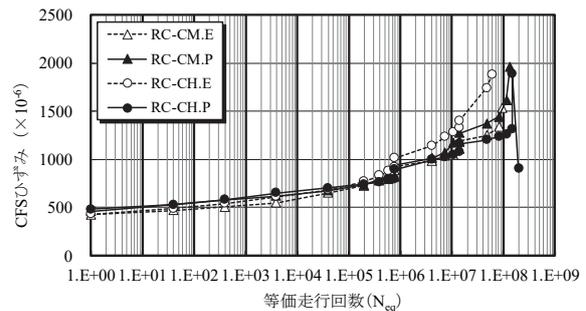


図-3 CFS のひずみと等価走行回数の関係

て従来の補強法で製作した供試体の等価走行回数は RC 床版の 14.7 倍、ポリウレア樹脂パテを柔軟層として設けた供試体は 21.0 倍の補強効果が得られた。次に、高弾性型の CFS を用いて従来の補強法で製作した供試体の等価走行回数は、RC 床版の 9.5 倍、ポリウレア樹脂パテを用いた供試体は 31.1 倍となり、ポリウレア樹脂パテを塗布し、柔軟層を形成することで、はく離が抑制され、耐疲労性の向上が図られた。

(2)CFS のひずみ測定結果から、初期のひずみ発生は各供試体に差異はないものの、阿部らの既往の研究結果と異なり高弾性型 CFS では破断ひずみまで、中弾性型 CFS においてもポリウレア樹脂パテ材を用いることで用いない場合に比して大きなひずみ分担効果を有することが確認された。これらのことから引張剛性の高い補強を施した場合でも耐疲労性の向上が確認され有効な補強法と言える。

「参考文献」

- 1)建設省土木研究所：炭素繊維接着工法による道路橋コンクリート部材の補修・補強に関する設計・施工指針(案)，コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書(III)，1999
- 2)Tadashi Abe *et-al*: Reinforcement Effect and Mechanical Characteristics of RC Slabs with Different Number of Layers, THEORETICAL AND APPLIED MECHANICS JAPAN, Vol.57, pp.95-103, 2009
- 3)澤野利章ら：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：材料，Vol.56, No.10, pp.977-984, 2007.10
- 4)新井崇裕ら，：ポリウレア樹脂層を有する炭素繊維シート補強工法の付着特性に関する研究，鹿島技術研究所年報，Vol.62, pp.45-52, 2014.9
- 5)日本道路協会：道路橋示方書・同解説I, II, 2002
- 6)松井繁之：道路橋床版設計・施工と維持管理，森北出版，2007