

柔軟型ポリウレア樹脂と高弾性型 CFS を用いた道路橋 RC 床版の耐疲労性評価

新日鉄住金マテリアルズ(株) ○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床版の代表的な疲労損傷であるひび割れなどに対する補修・補強材として、炭素繊維シート（以下、CFSとする）などのFRP材料が使用され、多く施工の実施もみられる¹⁾。FRPによる補修補強対策は、鋼板接着補強工法などに比して重機などの大型機械が基本的に必要なく、また施工が簡便であることから、積極的に活用されている。そして、1999年には旧建設省土木研究所から²⁾昭和39年（1964年）鋼道路橋示方書³⁾（以下、道示という）に準拠したRC床版にCFS下面接着補強を施し、輪荷重走行試験の結果から最適なCFSの引張剛性は82kN/mmであることが示されている。また、岡田ら⁴⁾の研究によりRC床版へのCFS引張剛性は68 kN/mmが望ましいことが輪荷重走行試験の結果から示された。そして、CFS格子接着補強法が提案され、最近では、地方公共団体が実施している道路橋長寿命化修繕計画における点検が容易となる補強法として実施されている。しかし、補強材であるCFSの引張剛性に注目すると、小林⁵⁾の研究により一定以上CFSの引張剛性を高めても耐疲労性の向上は見込まれないことも報告されている。また、道路橋RC床版は押し抜きせん断破壊により終局を迎えることも知られており、CFSの引張剛性と押し抜きせん断耐力に着目した研究では、阿部ら⁶⁾により、高強度型CFSを用い接着層を1層、2層、3層、4層（引張剛性を、27kN/mm、54kN/mm、81kN/mm、108kN/mm）と変化させ、すなわちCFSの引張剛性を高めて一定走行荷重実験で押し抜きせん断耐力を評価したが、CFSの引張剛性を高めても押し抜きせん断耐力の向上は得られないことが報告されている。しかし、新井ら⁷⁾により、ポリウレア樹脂柔軟層をCFSとコンクリートの間に塗布することでCFSの界面剥離破壊エネルギーや付着強度が、エポキシ樹脂材料を用いた場合に比して数倍に増大し、FRPの引張剛性を変化させても同様に界面剥離破壊エネルギーや付着強度が向上することも報告されている。そこで本研究では、RC床版下面に土木研究所での共同研究報告書記載の引張剛性に比して1.6倍の引張剛性

となる高弾性型CFSおよびポリウレア樹脂柔軟層を用い、CFS接着補強した床版供試体を用いて輪荷重走行実験を行い、等価走行回数の算定からポリウレア樹脂柔軟層を用いたCFS接着補強RC床版の耐疲労性を評価する。このポリウレア樹脂柔軟層は、従来行われてきたエポキシ樹脂系プライマーをポリウレタン樹脂プライマーに、またパテ材による不陸修正工に用いる材料をエポキシ樹脂からポリウレア樹脂パテ材に変更するのみであり、施工工程の増加はない。

2 実験方法および測定方法

2.1 供試体概要

本実験に用いる供試体は、2002年の道示⁸⁾Ⅱに規定に基づいて設計し、供試体寸法のモデル化は道示Ⅱに規定する活荷重載荷面幅500mmを基準に、本実験装置における輪荷重幅が250mmであることから1/2モデル（＝250/500）とした。ここで、本研究に用いる床版供試体の一覧を表1に示す。

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、コンクリートの設計基準強度は27N/mm²を目標として配合した。鉄筋にはSD295A、D10を用いた。実験時におけるコンクリートの圧縮強度および鉄筋の材料特性値を表2に示す。

(2) CFSおよび接着樹脂

本実験に用いたCFSは、目付量300g/m²、設計厚み0.143mmの高弾性型CFSおよびプライマーとしてウレタン樹脂プライマーまたはエポキシ樹脂プライマー、不陸修正材としてポリウレア樹脂パテ材またはエポキシ樹脂パテ材、そしてCFSの接着にはエポキシ樹脂含浸接着剤を用いる。ここで、CFSおよび接着樹脂の材料特性値をそれぞれ表3、4、5、6に示す。ポリウレア樹脂パテ材を用いる供試体には、溶剤型ポリウレタン樹脂プライマーを用い、プライマーおよびポリウレア樹脂パテ材共に、指触乾燥時間が短いことから、施工工程の短縮に効果的となり省力化に役立つ。そして、

A study on fatigue durability of strengthen RC slabs using high modulus type CFS and poly-urea soft layer

Atsuya KOMORI, Akihiro TATEISHI and Tadashi ABE

ポリウレタ樹脂パテ材はエポキシ樹脂パテ材に比して弾性率が1/10と低く、伸びは約250倍となる弾性パテ材である。本研究に用いるエポキシ樹脂プライマー及びパテ材は、一般的に用いられているプライマーとパテ材である。含浸接着樹脂は、従来から用いられている市販のエポキシ樹脂接着剤を用いる。本研究では、表3に示すCFSを用い、ポリウレタ樹脂柔軟層の有無をパラメータとした補強断面構成材料の違いから、耐疲労性を検証する。

2.3 供試体寸法および鉄筋の配置

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、引張主鉄筋にD10を100mm間隔で配置し、有効高は117mmである。また、配力筋も軸直角方向と同様に100mm間隔で配置し、有効高を107mmとした。また、圧縮側には引張鉄筋量の1/2を配置した。表1に示す無補強床版RC-Cおよび補強RC床版RC-HMP、RC-HMNは、すべて同じ床版を使用する。本研究では、初期損傷を与えない条件で試験を行う。ここで、実験に用いたRC床版の配筋図および輪加重走行範囲を図1に、CFS接着補強RC床版のCFS割付を図1に示す。

(1) CFS接着補強工法の概要

補強供試体は、RC床版供試体の支間1,200mm×1,200mmの内側の1,100mm×1,100mmの範囲に、目付量300g/m²、設計厚0.143mmの高弾性型CFSを軸直角方向および軸方向に各1層接着する。今回は、ひび割れ観察のためCFSを格子状に接着補強することから、CFSを100mm幅に切断し、50mmの隙間を開け格子状に接着する。下地処理は、施工範囲をディスクサンダーにて全面ケレンし、エアブローで清掃して研掃完了とする。

(2) ポリウレタ樹脂パテ材を用いる CFS 接着補強法

ポリウレタ樹脂パテ材を用いる、供試体RC-HMPは、墨だしが完了したRC床版下面に表4に示すポリウレタ樹脂プライマーの主剤・硬化剤を混合し、ローラー刷毛にて0.20kg/m²となるよう均一に塗布する。指触乾燥を待ち次工指触乾燥を待ち次工程に移る。次に表5に示すポリウレタ樹脂パテ材の、主剤・硬化剤を混合しCFS接着面に左官ゴテを用い1mm厚となるように塗布する。そして、高弾性型CFSを、表6に示す常温硬化型2液性エポキシ樹脂を用い含浸接着させる。

(3) ポリウレタ樹脂を用いないCFS接着補強法

ポリウレタ樹脂柔軟層を用いないCFS接着補強供試体RC-HMNは、CFS接着補強の際、すべてエポキシ樹脂を用い接着補強法を行う。墨だしが完了したRC床版下面に表4に示すエポキシ樹脂プライマーの主剤・硬化剤を混合し、ローラー刷毛で0.2kg/m²となるよう均一に塗布する。プライマーとして用いるエポキシ樹脂は翌日まで硬化

表1 供試体の一覧

供試体名	CFS	ポリウレア 樹脂	補強材引張剛性 (kN/mm)	床版厚 (mm)
RC-C	なし			130
RC-HMP	高弾性型	あり	62.2	
RC-HMN		なし		

表2 床版コンクリートの使用材料

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)	引張弾性率(kN/mm ²)
RC床版	35	D10	368	516	200

表3 高弾性型CFSの材料特性値

種類	目付量(g/m ²)	引張強度(N/mm ²)	引張弾性率(kN/mm ²)
高弾性型CFS	302	2,280	6.52

表4 プライマーの材料特性値

成分	ポリウレタン樹脂(溶剤型)	エポキシ樹脂(無溶剤型)
配合比(重量比)	1:1	2:1
指触乾燥時間(時間)	1.5	8

表5 パテ材の材料特性値

成分	ポリウレタ樹脂パテ材	エポキシ樹脂パテ材
配合比(重量比)	3:1	2:1
指触乾燥時間(時間)	3.5	8
引張弾性率(N/mm ²)	480	---
圧縮弾性率(N/mm ²)	---	4,852
伸び(%)	492	2.5
引張強度(N/mm ²)	21.0	---
圧縮強度(N/mm ²)	---	89.2

表6 含浸接着樹脂の材料特性値

試験項目	材料特性値	試験方法他
硬化物比重	1.17	JIS K 7112
可使時間(分)	31	温度上昇法(250g)
引張強さ(N/mm ²)	46	JIS K 7161
曲げ強さ(N/mm ²)	82	JIS K 7171
引張せん断強さ(N/mm ²)	18	JIS K 6850
塗膜硬化時間(時間)	7	ドライイングレコーダー

しないため、プライマー塗布後に静置養生をおこなう。翌日以降、表5に示すエポキシ樹脂パテ材の主剤・硬化剤を混合し、左官ゴテで1mm厚となるよう均一に塗布する。そして、プライマーと同様、翌日まで静置養生し、ポリウレタ樹脂柔軟層を用いるRC-HMP供試体と同様に、表6に示す常温硬化型エポキシ樹脂を用い、CFSを含浸接着

させる。これら2種類の補強供試体は、7日以上常温で静置養生し、試験に供する。

3. 等価走行回数および耐疲労性の評価

3.1 実験方法

輪荷重走行試験は、20,000 回ごとに荷重を増加する段階荷重载荷により床版が破壊するまで床版中央から900mmの範囲に走行を行う。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算定し評価する。また、すべての床版供試体の初期走行荷重は、80kN とし、20,000 回走行ごとに荷重を20kN 増加させる。また、130kN 以降は10kNずつ荷重を増大させる。以降は無補強RC床版供試体、RC-C における破壊時の等価走行回数を基準に、2種類の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。

3.2 等価走行回数

輪荷重走行実験では、2万回走行ごとに荷重を増加させることから、基準荷重と载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 曲線の傾きの逆数の絶対値 m には、松井らが提案するRC 床版のS-N 曲線の傾きの逆数の絶対値12.7 を適用する⁹⁾。なお、本供試体は、1/2モデルであることから、基準荷重 P は活荷重100kNの1/2に安全率1.2を考慮して60kNとする。そして、補強床版に対するS-N 曲線の傾きの逆数の絶対値を通常のRC 床版と同様に12.7 とすることは、補強効果の検証などの観点から妥当であることを筆者らの研究¹⁰⁾で示している。

これらの道路橋 RC 床版での他所での補強床版の耐疲労性の評価に関する実験研究においても松井らが提案する 12.7 が適用されている¹¹⁾。

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

ここで、 N_{eq} ：等価走行回数（回）、 P_i ：载荷荷重（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、無補強および補強RC床版の等価走行回数結果を表7に示す。

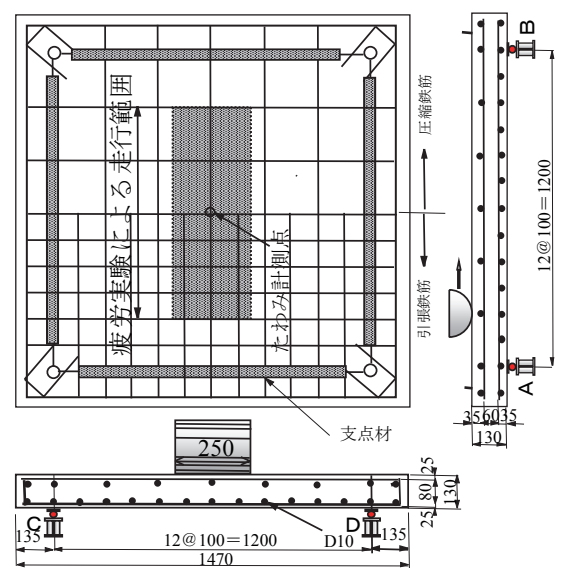


図1 RC床版の配筋図および輪荷重走行範囲

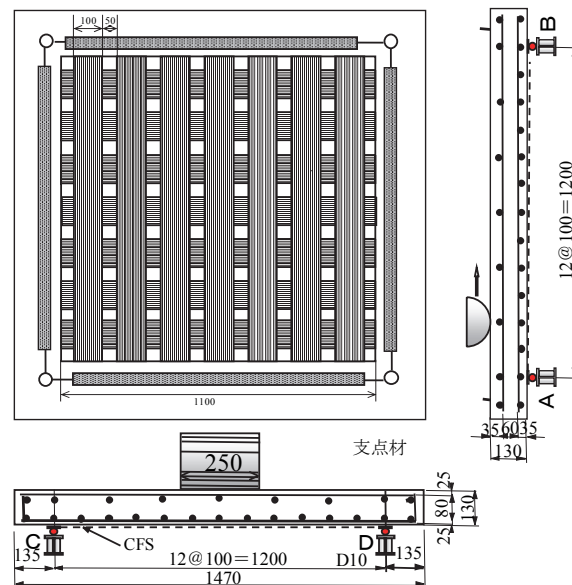


図2 補強RC床版のCFS割付

(1) 無補強RC床版

無補強RC床版RC-Cの破壊等価走行回数は、 6.35×10^6 回となり、このRC床版供試体の平均等価走行回数 N_{eq} を基準にCFS補強床版の補強効果および耐疲労性を評価する。

(2) ポリウレア樹脂柔軟層を用いる補強RC床版

ポリウレア樹脂柔軟層を使用する補強RC床版RC-HMPの破壊等価走行回数は、 197.95×10^6 回となり、無補強RC床版RC-Cに比して約31.1倍の等価走行回数を得られ、大幅な耐疲労性の向上が確認された。この等価走行回数は、高い引張剛性のCFSを用いた既往の研究⁵⁾と異なる結果である。これは、ポリウレア樹脂柔軟層を用いることによる定着長さの増大で広い範囲のCFSが曲げ引張応力を分担し等価走行回数の増大が得られたものと考えられる。

表 7 等価走行回数結果（基準荷重＝60kN）

供試体		荷重と走行回数				等価走行回数 合計	走行 回数比
		80 kN	100 kN	120kN	130kN		
RC-C	実験走行回数	20,000	1,322			6,359,573	—
	等価走行回数	772,240	5,587,332				
RC-HMP	実験走行回数	20,000	20,000	20,000	2,770	197,945,168	31.1
	等価走行回数	772,240	13,137,391	133,079,433	50,956,105		
RC-HMN	実験走行回数	20,000	20,000	6,990		60,420,893	9.5
	等価走行回数	772,240	13,137,391	46,511,262			

(3) ポリウレア樹脂柔軟層を用いない補強RC床版

ポリウレア樹脂柔軟層を用いず、エポキシ樹脂のみで補強されたRC床版RC-HMNの破壊等価走行回数は、 60.42×10^6 回となり、無補強RC床版RC-Cに比して約9.5倍の等価走行回数が得られ一定の耐疲労性の向上が確認された。しかし、この補強RC床版供試体RC-HMNの等価走行回数は、供試体RC-HMPと比して約69.5%低下しており、引張剛性を高めたCFS接着補強法を用いた既往の研究⁵⁾と同様の結果である。

5. まとめ

本研究では、道路橋RC床版に一般的に使用されているCFSの引張剛性に比して、約1.6倍の引張剛性となる高弾性型CFSを用い、新たに開発されたポリウレア樹脂柔軟層を不陸修正材に用いて、補強効果と耐疲労性を評価した結果、以下の事項が得られた。

- (1) ポリウレア樹脂パテ材は、道路橋RC床版にCFSを接着する際の不陸修正材として使用可能であり、約490%の伸び性能をもつ低弾性型のパテ材である。
- (2) ポリウレア樹脂パテ材を柔軟層として床版下面CFS接着補強に用いる場合、ポリウレタン樹脂プライマーを塗布し、次にポリウレア樹脂柔軟層を塗布、その後エポキシ樹脂でCFSを接着させる工程で道路橋RC床版のCFS接着補強が可能である。
- (3) 等価走行回数の評価では、同条件の無補強RC床版に比して、エポキシ樹脂を用いCFS接着補強したRC床版の等価走行回数は約9.5倍、ポリウレア樹脂を用い、CFS接着補強したRC床版の等価走行回数は31.1倍となり、ポリウレア樹脂を不陸修正材に用いることで大幅に耐疲労性

が向上した。

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) 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.
- 3) 日本道路協会：鋼道路橋示方書，1964.
- 4) 岡田昌澄，大西弘志，松井繁之，小林朗：格子配置された炭素繊維シートによる床版補強効果，第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.75-180，2003.6
- 5) 小林朗，蔡華堅，西 勝，松井 繁之：炭素繊維シート格子接着工法により補強したRC床版の疲労耐久性，コンクリート工学年次論文集，Vol.27, No.2, pp.1513-1518, 2005.7
- 6) 阿部忠，木田哲量，澤野利章，小森篤也，樋田俊一：積層数の異なるCFS補強RC床版の補強効果および力学特性，第57回理論応用力学講演会，2008.6
- 7) 新井崇裕，山野辺慎一，玉野慶吾：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
- 8) 日本道路協会：鋼道路橋示方書・同解説，2002.
- 9) 松井繁之：道路橋床版設計・施工と維持管理，森北出版，2007.
- 10) 川合豊，阿部忠，高野真希子：道路橋RC床版におけるS-N 曲線の一考察，土木学会，第7回床版シンポジウム論文集，pp.263-268，2012.
- 11) 三田村浩，佐藤京，本田幸一，松井繁之：道路橋RC床版上面の凍害劣化と疲労寿命への影響，土木学会，構造工学シンポジウム論文集，pp.1420-1431, Vol.55A, 2009.3.