

継手部付き UFC パネルを用いた道路橋 RC 床版の疲労耐久性に関する実験研究

日大生産工(院) ○山下 暎 日本大生産 阿部 忠 日本大生産 木田哲量  
日本大生産 澤野利章 太平洋セメント(株) 田中敏嗣

1. はじめに

近年、建設事業のコスト縮減および建設施工における工期短縮を図るために、超高強度繊維補強コンクリート (Ultra high-strength Fiber Reinforced Concert : 以下、UFC) で製作した埋設型枠 (以下、UFC パネル)<sup>1)2)</sup> と RC 床版を合成した UFC パネル RC 床版が提案されている<sup>3)</sup>。この UFC パネルは 2 次養生として蒸気養生が必要であることから現場での施工が不可能である。そのため、UFC パネルは工場で製作後、架設現場までトラックで輸送し、橋軸方向に並列配置させるために、継手部を設ける必要がある。しかし、継手部が弱点部になる可能性ある。さらに、曲げ変形が生じた場合には継手部に引張力が作用し、RC 部と UFC パネルとの接合部にはく離が生じる原因となると考えられる。

そこで本研究は、UFC パネルの継手部を重ね継手構造とし、軸直角方向および軸方向の曲げ引張力に抵抗させるためにコアを設け、そのコア内にコンクリート、UFC 棒、鋼棒の 3 種類の材料を挿入した供試体を用いて輪荷重走行疲労実験を行い、等価走行回数、破壊形状およびたわみから継手部付き UFC パネル RC 床版の実用性を検証する。

2. UFC パネルの施工法

2.1 UFC の施工手順 UFC パネルを用いた橋梁建設現場における施工概念は図-1 になる。まず、工場で UFC パネルの製作および鉄筋その加工を行う (図-1 (1)、(2))。これは、UFC の凝結時間が 18~20 時間必要なためであり、UFC 打設後の 1 次養生は常温

で 48 時間、その後の 2 次養生は 90℃で 24 時間の蒸気養生の必要があるためである。次に、UFC パネルの製作および鉄筋加工した後、橋梁建設現場までトラック輸送を行う (図-1 (3))。現場では、輸送された UFC パネルを橋梁主桁上に橋軸方向に順次並列に設置する。そして、加工した鉄筋を順次配置してコンクリートを打設し、UFC パネルと一体構造化させる (図-1 (4))。その施工手順からすると、主桁施工と並行して UFC パネルの製作および鉄筋加工が可能であり、型枠の脱型が省略できることから工期の短縮、施工の合理化が可能となる。

3. 供試体概要

3.1 使用材料 RC床版のコンクリートには、普通ポルトランドセメント、5mm以下の砕砂および5mm~20mmの砕石 (JIS-A5005) を用いた。コンクリートの圧縮強度はRC床版および継手部を設けてないUFCパネルRC床版が35N/mm<sup>2</sup>、継手部付きUFCパネルRC床版が32N/mm<sup>2</sup>である。また、鉄筋はSD295A、D10を用いた。RC床版の鉄筋の降伏強度、引張強度およびヤング係数は、それぞれ385 N/mm<sup>2</sup>、520 N/mm<sup>2</sup>、200 kN/mm<sup>2</sup>である。UFC パネルRC床版の鉄筋の降伏強度、引張強度およびヤング係数は、それぞれ368 N/mm<sup>2</sup>、568 N/mm<sup>2</sup>、200 kN/mm<sup>2</sup>である。次に、UFCパネルの使用材料は、シリカフェーム、珪砂、反応性微粉末などを最密充填理論に基づいて配合したプレミックス材、ポリカルボン酸系の高性能減水剤および直径0.2mm、長さ15mmの鋼繊維を体積比の2%で練混した。粗骨材は用いず、最大粒径2mmの珪砂を混

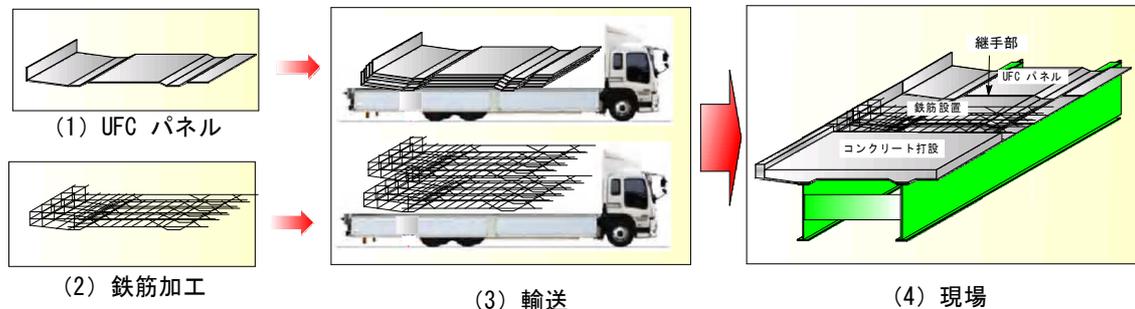


図-1 UFC パネル RC 床版の施工システム

Experimental Study on  
Fatigue Resistance of Load Bridge RC slab Using UFC Panel with lap joint  
by Rui YAMASHITA,  
Tadashi ABE, Tetsukazu KIDA, Toshiaki SAWANO, and Satoshi TANAKA

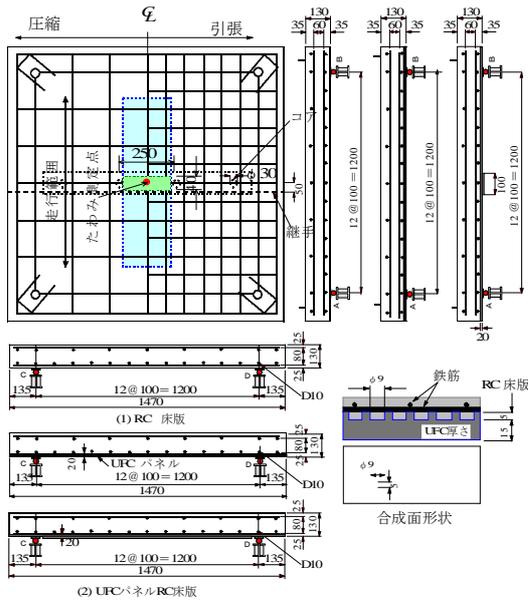


図-2 供試体寸法

合している。UFCの圧縮強度、曲げ強度およびヤング係数は、それぞれ219.4N/mm<sup>2</sup>、34.9 N/mm<sup>2</sup>、55.0 kN/mm<sup>2</sup>である。混和剤使用量は、目標フロー値を240mmとして決定した。なお、UFCパネルの養生は、前置き時間を48時間とし、脱型後の蒸気養生は最高温度90℃を24時間保持して行った。

**3.2 供試体寸法および鉄筋配置** 本実験に用いた供試体寸法および鉄筋配置を図-2に示す。供試体は現行道路橋示方書<sup>4)</sup>に基づいて設計し、実床版の1/2モデルとした。すなわち、RC床版およびUFCパネルRC床版の寸法は、全長1470mm、支間1200mm、床版厚130mm、継手部の厚さは20mmである。鉄筋は複鉄筋配置とし、主鉄筋および配力筋は100mm間隔に配置し、圧縮側は引張鉄筋量の1/2を配置した。各供試体の有効高さは、軸方向、軸直方向でそれぞれ、105mm、95mmとした。また、UFCパネルは引張主鉄筋のかぶり内に配置し、厚さを20mmとした。また、UFCパネルとRC床版の底面コンクリートとの合成効果を高めるためには、UFCパネルの合成面形状が重要となる。一般的に、UFCパネルの合成面形状には、凹部を一樣に設けたPタイプが採用されている。Pタイプは直径9mm、合成面厚5mmであり、この凹部にコンクリートが打設されて一体構造となる。よって、面積率は、注入されるコンクリートは40%、UFCは60%となる。なおPタイプは、コンクリートとの合成面のせん断強度が母材コンクリートと同程度の値を示していることから、十分な付着が得られることが確認されている<sup>2),3)</sup>。ここで、Pタイプの構造、合成面形状および寸法を図-2に併記する。UFCパネルの寸法は幅1470mm、板厚15mm、面厚は5mmとし、RC床版のかぶり内に埋設する。UFCパネルRC床版供試



図-3 実験供試体の施工方法

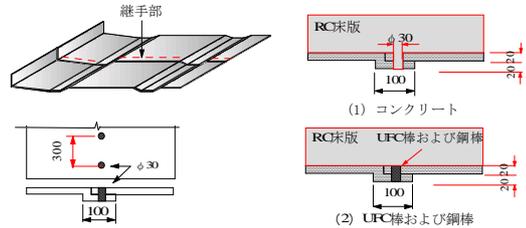


図-4 継手の構造

体の作製手順を図-3に示す。まず、図-1に示す施工システムに基づいて、製作された厚さ20mmのUFCパネルを底面に配置したパネルの上面に直接引張鉄筋を配置し、コンクリートを打設して、一体構造とした。

**3.3 継手部の構造** 建設現場に輸送されたUFCパネルは、主桁上に橋軸方向に順次並列設置する。この場合、UFCパネル間には継手構造を設ける必要がある。継手部は、橋軸直角方向および橋軸方向の曲げ引張力に抵抗させるためにUFCパネル端部を重ね合わせる構造、すなわち重ね継手構造とした。重ね継手とする場合のUFCパネル端部にコアを設け、ピンを挿入して一体構造とする。この場合のピンは単せん断となる。ここで、本研究で提案する継手構造を図-4に示す。継手部を100mm重ね合わせ、曲げ引張抵抗用材料配置のためにφ30mmの孔を300mm間隔に配置した。孔の直径は、骨材に最大寸法25mmの碎石を用いたため、コンクリート打設時に碎石が孔に注入されるようにφ30mmとした。UFCパネル設置後、コア内にコンクリート打設時に直接コンクリートを注入させて連結する場合(図-4(1))、コア内にUFCで製作した円形棒(SS400、φ30mm)を挿入して連結する場合(図-4(2))。コア内に丸鋼(φ30mm)を挿入して連結する場合(図-4(2))の3タイプの材料を用いて、疲労耐久性を評価する。なお、UFC円柱および丸鋼はエポキシ系の接着剤で接着させた。

#### 4. 実験方法

**4.1 走行疲労実験** 走行疲労実験は、輪荷重を供試体中央から±450mmの走行範囲で繰返し走行させる実験である。この走行範囲は、輪荷重が45°で床版の底面方向に分布すると仮定し、床版支間内に輪荷重が分布するものとして定めた。次に、本供試体は実道路橋の1/2モデルとしたことから、設計活荷重100kNの1/2の50kNに安全率1.2を考慮した60kNを基準荷重とする。荷重は荷重100kN

表-1 等価走行回数

供試体	等価走行回数 (回)	平均等価 走行回数 (回)	等価走行回数比 U.RC/RC
RC-FR-1	7,347,504	7,938,687	—
RC-FR-2	8,529,870		
U.RC-FR-1	35,727,812	41,980,907	5.29
U.RC-FR-2	48,234,001		
U.RC-FR-J1	229,443,344	229,443,344	28.90
U.RC-FR-J2	411,761,165	411,761,165	51.87
U.RC-FR-J3	549,679,168	549,679,168	69.24

までは2万回走行毎に20kNずつ、荷重100kNからは10kNずつ増加させる段階荷重とする。走行平均速度は1走行距離900mmを6.5secで走行させる0.14m/sとする。ここで、通常の型枠を用いたRC床版供試体をRC-FR、継手部を設けていないUFCパネルRC床版供試体をU.RC-FR、継手部付きUFCパネルRC床版供試体をU.RC-FR-Jと称する。

## 5. 実験結果および考察

**5.1 等価走行回数** 本実験における走行疲労実験は段階荷重を採用したことから、等価走行回数は、マイナー則に従うと仮定し、式(1)を用いて算出した。

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

ここで、 $N_{ep}$ : 等価走行回数(回)、 $P_i$ : 載荷荷重(kN)、 $P$ : 基準荷重(=60kN)、 $n_i$ : 荷重 $P_i$ の走行回数(回)、 $m$ : 松井らが提案するS-N曲線<sup>5)</sup>の傾きの逆数(=12.7)とする。

式(1)より算出した等価走行回数を表-1に示す。表-1より、RC-FRの平均等価走行回数は7,938,687回である。U.RC-FRの平均等価走行回数は42,002,356回であり、RC床版の5.29倍となった。次に、軸方向の支間中央に継手部を設けて、φ30mmのコア内にコンクリートを注入した供試体U.RC-FR-J1、UFC棒を挿入した供試体U.RC-FR-J2、鋼棒を挿入した供試体U.RC-FR-J3の等価走行回数は、それぞれ229,443,344回、411,761,165回、549,679,168回である。供試体RC-FRと供試体U.RC-FR-J1,2,3の等価走行回数を比較すると、それぞれ28.90、51.87、69.24倍となった。したがって、UFCパネルRC床版は疲労耐久性に優れた構造であることが実証された。φ30mmのコアに挿入される材料のせん断強度は、供試体U.RC-FR-J1に注入したコンクリートのせん断強度は $5.7\text{N/mm}^2$  ( $f_{c0} = 0.688f_c^{0.610}$ 、 $f_c$ : コンクリートの圧縮強度(=32N/mm<sup>2</sup>))となる。また、供試体U.RC-FR-J2にはUFC棒を挿入したことからUFCの一面せん断試験を行った結果、せん断強度は23.0N/mm<sup>2</sup>であった<sup>6)</sup>。次に、供試体U.RC-FR-J3は、SS400の丸鋼

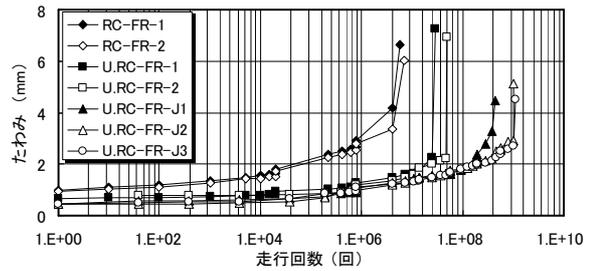


図-5 たわみと等価走行回数の関係

を使用したことから鋼材のせん断強度は80N/mm<sup>2</sup>である。よって、単せん断強さ( $\rho_c = \tau A_c$ 、 $\tau$ : コアに挿入される材料のせん断強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $A_c$ : 挿入材料の断面積(mm<sup>2</sup>))は、供試体U.RC-FR-J1が40.3N、供試体U.RC-FR-J2は162.4N、供試体U.RC-FR-J3は565.2Nとなる。したがって、挿入される材料のせん断強度の差によって疲労耐久性に大きく影響する結果となった。本実験では、全供試体ともに300mm間隔で継手部を設けたが、継手部に挿入する材料や間隔の検討が必要となる。

**5.2 等価走行回数とたわみの関係** たわみと等価走行回数の関係を図-5に示す。供試体RC-FR-1,2は、等価走行回数の増加に伴いたわみも増加し、走行回数 $7.73 \times 10^5$ 回からたわみの増加が著しい。終局時のたわみは、それぞれ6.9mm、7.3mmである。供試体U.RC-FR-1,2は、ともに終局時付近まで等価走行回数の増加に伴い緩やかにたわみは増加し、終局時のたわみは供試体U.RC-FR-1,2で、それぞれ6.5mm、6.9mmである。次に、供試体U.RC-FR-J1,2,3は、等価走行回数の増加に伴い緩やかにたわみは増加し、走行回数 $5.80 \times 10^7$ 回付近から急激なたわみの増加が著しく、終局時のたわみは供試体U.RC-FR-J1,2,3で、それぞれ4.5mm、4.8mm、4.7mmである。なお、U.RC-FRおよびU.RC-FR-JはRC-FRに比して、各等価走行回数におけるたわみの抑制が著しい。これは、UFCパネルの曲げ剛性が高いことからたわみが抑制されたものと考えられる。また、U.RC-FR-JはU.RC-FRに比してたわみが抑制されている。これは、U.RC-FR-Jは重ね継手構造としたことにより、U.RC-FRに比べて中央部の床版厚が20mm厚くなっているため、さらに曲げ剛性が向上し、たわみが抑制されたと考えられる。

**5.3 破壊状況** 本実験における破壊状況の一例を図-6に示す。供試体RC-FRは、ひび割れは軸直角方向および軸方向に鉄筋間隔とほぼ同じ寸法100mm~120mm間隔で格子状に発生している。最終的には、輪荷重が走行中に押抜きせん断破壊となった。供試体U.RC-FRの破壊状況は、輪荷重が走行する範囲にひび割れが密集し、全体に微細なひび割れが発生している。最終的な破壊モードは、

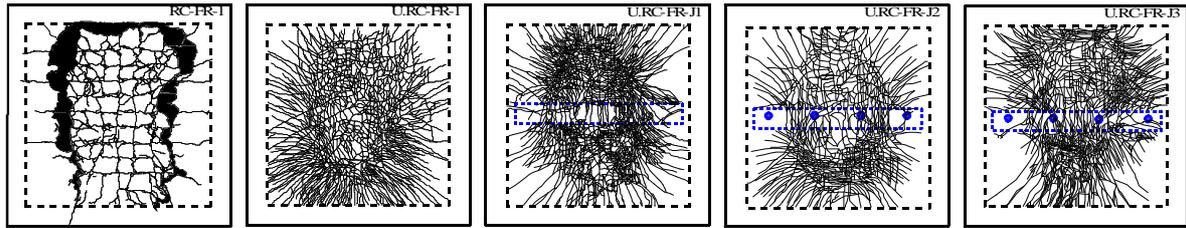


図-6 供試体破壊状況一例



1) U.RC-FR

2) U.RC-FR-J1

3) U.RC-FR-J2

4) U.RC-FR-J3

図-7 断面方向の供試体破壊状況一例

輪荷重が走行中に RC 部が押抜きせん断破壊と同時に合成面がはく離した。供試体 U.RC-F-J には、継手部を設けた中央付近に微細なひび割れはみられず、軸方向に曲げ引張力によるひび割れが発生している。これは、重ね継手部のコア内に挿入したコンクリート、UFC 棒、鋼棒のいずれの供試体も同様なひび割れ状況である。また、輪荷重が折り返す付近では微細なひび割れが発生している。RC 床版部は押抜きせん断破壊となり、UFC の継手部は曲げ破壊となった。次に、各供試体の断面方向の破壊状況の一例を図-7 に示す。供試体 U.RC-FR は、ほぼ 45°の合成面が押抜きせん断破壊によってはく離している。次に、継手部のコア内にコンクリートを注入した供試体 U.RC-FR-J1 は、曲げ引張力によって重ね継手の単せん断面でコンクリートがせん断され、上部の UFC パネルと下部の UFC パネルが軸直角方向にずれを生じている。また、UFC 棒を挿入した供試体 U.RC-FR-J2 は、単せん断面で UFC 棒がせん断されているものの大きなパネルのずれはみられない。コア内に鋼棒を挿入した供試体 U.RC-FR-J3 は、鋼材を用いたことからせん断強度が大きく単せん断面でせん断されることがなく破壊時まで形状を保っている。したがって、施工における合理化を考慮するならば、RC 床版コンクリートを打設時に、直接コア内にコンクリート注入させる方法が適切であると考えられる。この場合は、重ね継手の断面に生じる軸引張力からコアのサイズおよび間隔を決定する必要がある。

## 6. まとめ

①等価走行回数は、RC 床版に比して、UFC パネル RC 床版で 5.29 倍、継手部付き UFC パネル RC 床版で継手部に設けたコアにコンクリート、UFC 棒、鋼棒を挿入した供試体はそれぞれ、28.90、51.87、69.24 倍となった。

②等価走行回数とたわみの関係から、各等価走行回数における UFC パネル RC 床版のたわみは RC 床版のたわみを下回っている。したがって、UFC パネル RC と RC 床版を合成したことにより曲げ剛性が向上し、たわみの増加が抑制された。また、継手部付き UFC パネル RC 床版は UFC パネル RC 床版に比してたわみの増加が抑制されている。すなわち、コンクリート、UFC 棒、鋼棒を挿入することにより曲げ引張力に抵抗する構造となり、疲労耐久性が向上した。

③UFC パネル RC 床版は、輪荷重の接地面から 45°の傾斜角で押抜きせん断破壊となり、合成面ではダウエル効果が及ぼす範囲に微細なひび割れが密集し、はく離破壊となっている。また、継手部を設けた UFC パネル RC 床版は継手部で曲げ引張破壊となり、鋼繊維の架橋効果がみられた。

④継手部付き UFC パネル RC 床版は、RC 床版および継手部を設けなかった UFC パネル RC 床版と同等以上の疲労耐久性を保有しているため、継手部が弱点部とならないことが実証された。

## 参考文献

1) 財団法人土木研究センター：建設技術審査報告書，ダクトフォーム． 2) 牧隆輝，田中敏嗣，阿部忠，木田哲量：RPC 埋設型枠を用いた RC はりの載荷試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.289-294，2009． 3) 阿部忠，木田哲量，新見彩，高野真希子，田中敏嗣：UFC 埋設型枠 RC 床版の合成面のせん断強度および理論押抜きせん断耐力式，構造工学論文集，Vol.55A，pp.1478-1496，2005． 4) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I，II，2005． 5) 松井繁之：道路橋床，設計・施工と維持管理，森北出版株式会社，2007． 6) 阿部忠，木田哲量，徐銘謙，澤野利章：道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐荷力評価式に関する研究，構造工学論文集，Vol.53A，pp.199-207，2007．