

UFC パネルを用いた道路橋 RC 床版の耐疲労性の評価に関する研究

日大生産工(院) ○山下 壘 日本大学 木田哲量

日本大学 阿部 忠 太平洋セメント(株) 田中敏嗣

1. はじめに

鋼道路橋 RC 床版では、施工の合理化・省力化、さらには環境保全を図るために新工法・新材料の開発が行われている。コンクリートの新材料の一つに、超高強度繊維補強コンクリート (UFC)があり、UFC で製作した埋設型枠 (UFC パネル)工法が提案されている。UFC パネルは高強度、高じん性に優れた材料であり、型枠脱型が不要で施工の省力化も可能である¹⁾。この特性と有効的に活用するために、RC 床版の引張鉄筋かぶり内に UFC パネルを合成した構造 (UFC パネル RC 床版)²⁾を開発した。しかし、道路橋床版は大型自動車による輪荷重の影響を受けることから、実用性を評価するには耐疲労性の確保が重要である。そこで本研究では、通常型枠を用いて製作した床版厚 13cmRC 床版と UFC パネル RC 床版および軽量化を図った床版厚さを 2cm 軽減した床版厚 11cmUFC パネル RC 床版の 2 タイプを用いた輪荷重走行による疲労実験を行い、松井らが提案する S-N 曲線の傾きの逆数 $m=12.7$ を適用した等価走行回数をもとに耐疲労性を評価した。

2. 供試体概要

2.1 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と最大寸法20mmの粗骨材を用いた。コンクリートの圧縮強度は 35N/mm^2 である。また、鉄筋はSD295A、D10を用いた。コンクリートおよび鉄筋の材料特性値を表-1に示す。次に、UFCパネルの使用材料は、シリカフェウム、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の珪砂が混合されている。混和剤使用量は、目標フロー値を240mmとして決定した。UFCの材料特性値を表-2に示す。

2.2 供試体寸法および鉄筋配置 本供試体は、道路橋示方書⁴⁾に基づいてRC床版の設計支間1200mmとし、大型車両の1日1方向あたりの計

画交通量が2000台以上を想定して床版厚、鉄筋量を算出し、その1/2モデルとした。本供試体寸法および鉄筋配置を図-1に示す。供試体は道路橋示方書に基づいて実橋床版の1/2モデルとした。ここで、通常の型枠を用いたRC床版供試体をRC13-F、床版厚13cmのUFCパネルRC床版供試体をU.RC13-Fと称する。また、既往の研究

表-1 コンクリートおよび鉄筋の材料特性値

供試体	コンクリート 圧縮強度 (N/mm^2)	鉄筋 (SD295A, D10)		
		降伏強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)
RC13	35	368	568	200
U.RC13	35	385	520	200
U.RC11	35	357	507	200

表-2 UFC の材料特性値

供試体	圧縮強度 (N/mm^2)	曲げ引張強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)
U.RC13	219.4	34.9	55.0
U.RC11	200.4	32.7	55.0

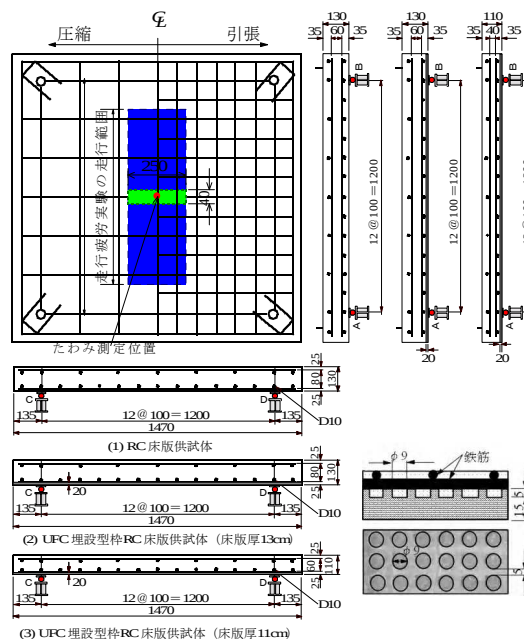


図-1 供試体寸法および合成面

Study on the Valuation of Fatigue Resistance of Load Bridge RC slab Using UFC Panel

by Rui YAMASHITA,

Tetsukazu KIDA, Tadashi ABE and Satoshi TANAKA



図-2 施工手

表-3 等価走行回数および耐用年数

供試体	等価走行回数 (回)	平均等価走行回数 (回)	走行回数比	耐用年数 (年)	平均耐用年数 (年)
RC13-F-1	5,653,074	6,307,316	-	7.7	8.6
RC13-F-2	6,961,558			9.5	
U.RC13-F-1	28,827,114	38,529,128	6.11	39.5	52.8
U.RC13-F-2	48,231,141			66.1	
U.RC11-F-1	8,675,989	13,671,862	2.17	11.9	18.8
U.RC11-F-2	18,667,735			25.6	

よりUFCパネルRC床版は通常のRC床版に比して1.25倍の耐荷力が向上することから³⁾、2cm厚の軽量化を図った床版厚11cmの供試体を作成した。また、床版厚11cmのUFCパネルRC床版供試体をU.RC11-Fと称する。RC13、U.RC13およびU.RC11供試体は、支間120cmの正方形版とし、鉄筋は複鉄筋配置とした。引張主鉄筋および配力筋は10cm間隔に配置し、圧縮側は引張鉄筋量の1/2を配置した。RC13およびU.RC13の有効高さは、軸方向、軸直方向でそれぞれ、10.5cm、9.5cm、U.RC11の有効高さは、軸方向、軸直方向それぞれ8.5cm、7.5cm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2cmとした。UFCパネルとRC床版との合成効果を高めるために、UFCパネルの合成面に凹部を一樣に設けた構造であるPタイプ付着面を採用した。Pタイプの凹部は直径9mm、付着面厚5mmであり、凹部の面積率は40%である。断面形状および付着面形状を図-1に併記する。UFCパネルRC床版の製作は、あらかじめ製作したUFCパネルを底面に設置し、鉄筋を配置して、コンクリートを打設して一体構造とする。施工手順を図-2に示す。

3. 実験方法

3.1 走行疲労実験 走行疲労実験では、輪荷重を供試体中央から±45cmの走行範囲で繰返し走行させる。この走行範囲は、輪荷重が45°で床版供試体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いる。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。荷重の載荷は荷重100kN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。走行速度は1走行0.9mを6.5secで走行させる0.14m/sとする。

4. 実験結果および考察

4.1 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、マイナー則に従うものとした式(1)として与える。

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

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⁵⁾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および耐用年数を表-3に示す。表-3より、RC床版の平均等価走行回数は、6,307,316回である。床版厚13cmUFCパネルRC床版の平均等価走行回数は38,529,128回であり、RC床版に比して6.11倍となった。また、床版厚11cmUFCパネルRC床版の平均等価走行回数は、13,671,862回となり、RC床版に比して2.17倍となった。また、本供試体は、大型車両が1日1方向当たりの計画交通耐量を2000台以上として設計を行ったことから、等価走行回数による耐用年数は、等価走行回数を計画交通量2000台で除し、これを365日で除して算出した。RC床版供試体の場合は8.6年、床版厚13cmUFCパネルRC床版供試体は52.8年、床版厚11cmUFCパネルRC床版供試体は18.8年に相当する。したがって、UFCパネルとRC床版を合成することで耐疲労性が向上した。床版厚11cmUFCパネルRC床版の等価走行回数および耐用年数は通常の床版厚13cmのRC床版に比して同等以上の耐疲労性を有していることから床版厚2cmの軽減が可能である。

4.2 等価走行回数とたわみの関係 等価走行回数とたわみの関係を図-3に示す。図-3より供試体RC13-F-1,2は、ともに走行回数の増加に伴いたわみは増加し、走行回数 7.93×10^5 回から増加が著しい。終局時のたわみは、それぞれ6.7mm、6.0mmである。供試体U.RC13-F-1,2は、ともに終局時付近まで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

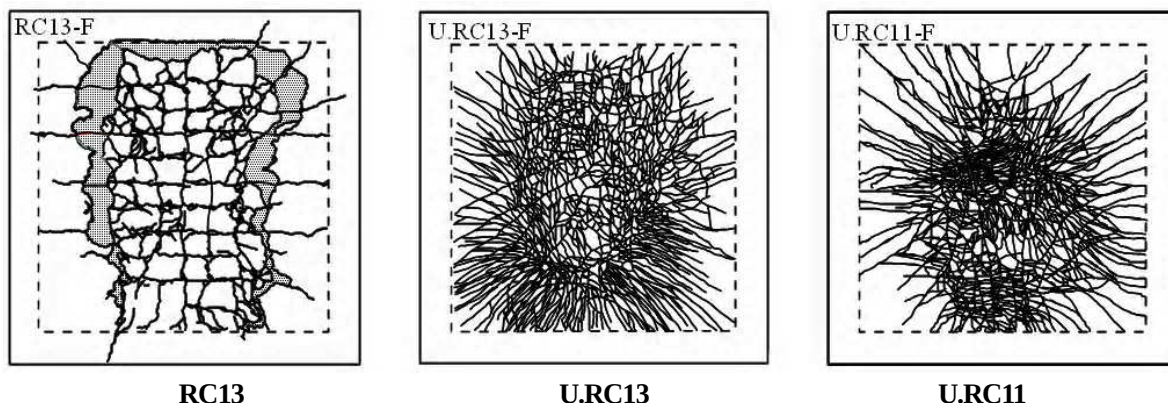


図-4 破壊状況

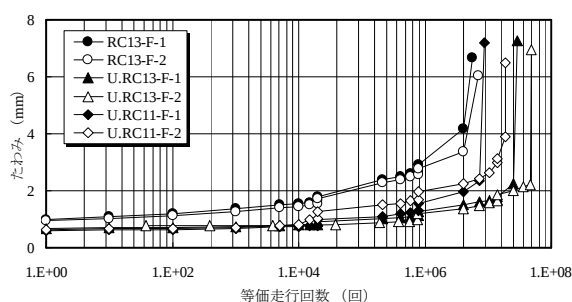


図-3 等価走行回数とたわみの関係

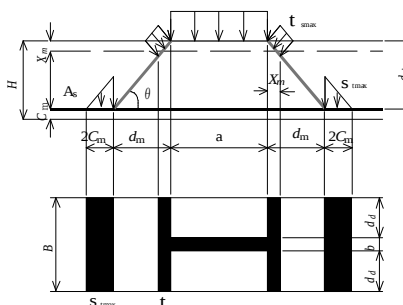


図-5 押抜きせん断力学モデル

体 U.RC13-F-1,2 でそれぞれ 7.3mm、6.9mm である。供試体 U.RC11-F-1,2 は、ともに走行回数の増加に伴い徐々にたわみは増加し、走行回数 7.93×10^5 回からたわみの増加が大きくなり、終局時のたわみはそれぞれ 7.2mm、6.5mm である。また、各走行回数において供試体 U.RC13、U.RC11 は供試体 RC のたわみを下回った。したがって、UFC パネル RC 床版は曲げ剛性が向上したためたわみの増加が抑制された。

4.3 破壊状況 本実験の RC 床版供試体と UFC パネル RC 床版供試体における破壊状況の一例を図-4 に示す。RC 床版供試体の破壊状況は、軸直角方向および軸方向に鉄筋間隔とほぼ同じ寸法 10cm～12cm 間隔で格子状にひび割れが発生している。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。UFC パネル RC 床版供試体の破壊状況は、供試体 U.RC13、U.RC11 とともに、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。これは、UFC に配合されている鋼繊維の架橋効果により荷重が分散されたためである。最終的な破壊モードは、輪荷重が走行中に押抜きせん断破壊すると同時に破壊位置で UFC パネルが

はく離した。UFC パネルのはく離は破壊時までみられなかった。よって、UFC パネル RC 床版は合成構造として使用が可能である。

4.4 S-N 曲線 道路橋 RC 床版としての実用性の評価には耐疲労性が重要である。UFC パネル RC 床版を道路橋 RC 床版として使用するため、本研究における UFC パネル RC 床版の耐疲労性を評価しなければならない。RC 床版の耐疲労性の評価には S-N 曲線が採用されている。本研究では、松井らが提案する RC 床版の S-N 曲線を適用する。その S-N 曲線式を式(2)⁹⁾に示す。

$$\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.52 \quad (2)$$

ここで、 P ：基準荷重、 P_{sx} ：はり幅 B の押抜きせん断耐力、 N ：等価走行回数

なお、道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐荷力 (P_{sx}) の評価式⁹⁾には式(3)が採用されている。すなわち、はり幅を考慮した押抜きせん断力学モデルを図-5 のようにしている。

$$P_{sx} = 2B(f_v x_m + f_t C_m) \quad (3)$$

$$B = b + 2d_d$$

$$\tau_{smax} = 0.252 f_c - 0.00251 f_c^2 \quad (3.1)$$

$$\sigma_{tmax} = 0.269 f_c^{2/3} \quad (3.2)$$

ここで、 B ：はり状化のはり幅(mm)、 b ：載荷板の軸方向の辺長(mm)、 x_m ：主鉄筋方向の中立深さ(mm)、 d_d ：配力筋の有効高さ、 C_m ：引張鉄

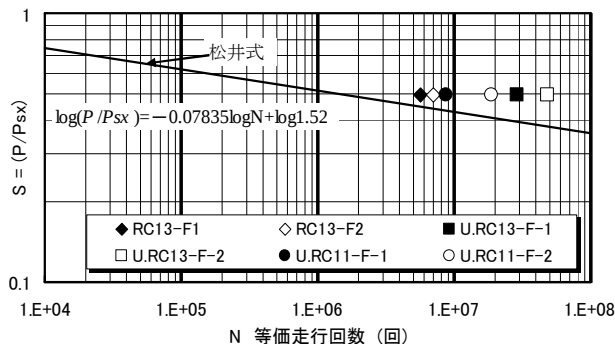


図-6 S-N 曲

筋のかぶり(mm)、 $\tau_{s\max}$: コンクリートのせん断強度(N/mm^2)、 $\sigma_{t\max}$: コンクリートの引張強度(N/mm^2)、 f_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm^2)

RC床版のS-N曲線における縦軸Sの算出は、松井らが提案した押抜きせん断耐力(P_{sx})を用いて算出する。横軸は式(1)より算出した等価繰返し回数(N_{ep})とする。本研究における破壊時の輪荷重の接地面は $250\text{mm} \times 50\text{mm}$ であるので、軸方向の辺長 b は 50mm とする。また、引張主鉄筋のかぶり C_m は 25mm 、配力筋の有効高さ d_d は 95mm である。次に、コンクリートのせん断強度およびコンクリートの引張強度は、式(3.1)、(3.2)より算出した。その結果、コンクリートのせん断強度 $\tau_{s\max} = 5.75 \text{ N}/\text{mm}^2$ 、コンクリートの引張強度 $\sigma_{t\max} = 2.88 \text{ N}/\text{mm}^2$ である。よって、はり状化のはり幅 B の押抜きせん断耐力は $P_{sx} = 120.8\text{kN}$ となった。

次に、RC床版に関するS-N曲線を図-6に示す。また、平成14年版の道路橋示方書に準拠して製作したRC床版供試体を用いた輪荷重走行による疲労実験を実施した実験結果を図-6に併記した。RC13、U.RC13、U.RC11は、すべて松井式のS-N曲線を上回り、耐疲労性が確認された。松井式におけるS-N曲線は昭和39年版の道路橋示方書に基づいて製作したことから主鉄筋と配力筋の比は引張側が $1:0.32$ 、圧縮側が $1:0.68$ であるが、本供試体は平成14年版に準拠して製作し、さらに主鉄筋と配力筋の比は引張側および圧縮側で $1:1$ に配置したことによりS-N曲線が上回る結果となった。

5. まとめ

①等価繰返し回数による走行回数は、床版厚 13cm RC床版に比して、床版厚 13cm UFCパネル RC床版が 6.11 倍、床版厚 11cm UFCパネル RC床版が 2.17 倍となった。また、大型車両1日1方向あたりの計画交通量 2000 台以上とした場合における、各供試体の耐用年数

は床版厚 13cm RC床版が 8.6 年、床版厚 13cm UFCパネル RC床版が 52.8 年となり、疲労寿命も大幅に向上した。次に、床版厚 11cm UFCパネル RC床版の耐用年数は 18.8 年となった。したがって、RC床版に比して疲労寿命が 10.2 年向上することから 2cm 厚の軽量化が可能である。

②等価走行回数とたわみの関係から、各走行回数におけるUFCパネル RC床版のたわみは通常のRC床版のたわみを下まわっている。したがって、UFCパネル RC床版は曲げ剛性が向上したためにたわみの増加が抑制され、疲労耐久性が向上する結果となった

③破壊状況は、RC床版は押抜きせん断破壊となり、UFC埋設型枠 RC床版供試体はRC床版部が押抜きせん断破壊と同時にUFCパネルがはく離した。UFCパネルに配合した鋼繊維の架橋効果により応力の分散が見られた。UFCパネルのはく離は破壊時までほとんど見られなかった。

④松井式によるS-N曲線と本研究の結果を比較すると、UFCパネル RC床版はこれらの曲線を上回っていることから、UFCパネルとRC床版を合成することで耐疲労性に優れた構造であることが実証された。

⑤軽量化を図り床版厚 11cm としたUFCパネル RC床版は、床版厚 13cm のRC床版と同等以上の疲労耐久性を保有しているため、床版厚 2cm の軽減が図られることが実証された。

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，ダクトアルフォーム。
- 2) 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。
- 3) 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，Vol27，No1，pp.289-294，2009。
- 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：道路橋床版，設計・施工と維持管理，森北出版株式会社，2007。
- 6) 前田幸雄，松井繁之：鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐力の評価式，土木学会論文集，第348号，V-1，pp.133-141，(1984)