

UFC 埋設型枠 RC 床版の疲労耐久性

Fatigue durability performance of the composite structure consisting of RC slab with the permanent form made from UFC

新見 彩^{*1}, 阿部 忠^{*2}, 木田哲量^{*2}, 澤野利章^{*2}, 片桐 誠^{*3}
 Aya Niimi, Tadashi Abe, Tetukazu Kida, Toshiaki Sawano, Makoto Katagiri

^{*1} 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)

^{*2} 日本大学 生産工学部 土木工学科 (〒275-8575, 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

^{*3} 太平洋セメント株式会社 (〒285-8655, 千葉県佐倉市大作 2-4-2)

The aim of this study is to experimentally evaluate the practicality of the composite structure consisting of the permanent form made from Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete (UFC) and the reinforced concrete (RC) slab. The author conducted a static load test and constant running load fatigue test using RC slab test specimens prepared with an ordinary form and test specimens of RC slab with the permanent form made from UFC. The results of the static load test indicated that the load-carrying capacity of RC slabs with the permanent form made from UFC was about 1.2 times larger than the RC slabs prepared with the ordinary form. The results of the constant running load fatigue test indicated that the number of running cycles during which RC slabs with the permanent form made from the UFC failed was about 6.3 times more than RC slabs. The dimpled surface of the permanent form made from the UFC increased the adhesion between the permanent form made from UFC and the RC slab, which proved the effects of the composite structure. In addition, RC slabs with the permanent form made from UFC was superior to RC slabs in terms of both strain and deflection. Therefore, the RC slabs with the permanent form made from the UFC increased the load-carrying capacity and fatigue durability performance and was evaluated as a practical structure.

Key Words: RC slab, permanent form made from UFC, constant running load fatigue test, failure mechanism, fatigue durability

1. はじめに

鋼道路橋床版に対しては、コスト縮減、施工の合理化・省力化、さらには環境保全効果も期待し、超高強度繊維補強コンクリート (Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete : UFC) で製作した埋設型枠¹⁾ (UFC 埋設型枠) が提案されている。この UFC 埋設型枠は、RC・PC はり部材の底面および側面の型枠材として採用されている他、最近では床版下面のはく離防止、塩害対策用補強型枠としても採用されている^{2), 3)}。しかし、UFC 材の力学特性⁴⁾ を有効に活用した合成構造についての研究はほとんど行われていないのが現状である。

そこで本研究では、鋼道路橋 RC 床版の施工の合理化・省力化、耐久性の向上を図るために、RC 床版の引張鉄筋のかぶり内に UFC 埋設型枠を合成させた UFC 埋設型枠 RC 床版についての実用性を評価する。まず、通常型枠を用いて作製した RC 床版供試体 (以下、RC 床版供試体と称する) と UFC 埋設型枠 RC 床版供試体を用いて、静荷重実験および走行疲労実験を行う。静荷重実験における耐荷力、破壊メカニズムおよび走行疲労実験における破壊走行回数、破壊メカニズム、走行回数とひずみ・たわみの関係から UFC 埋設型枠 RC 床版の実用性を評価する。

2. 供試体の使用材料および寸法

2.1 使用材料および配合

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 の粗骨材を使用した。また、鉄筋には 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 埋設型枠の使用材料は、水、ポリカルボン酸系の高性能減水剤、プレミックス材料および直径 0.2mm、長さ 15mm の鋼繊維を体積比で 2.0% 配合した。プレミックス材料は、セメント、シリカフェューム、珪砂微粉末などが最密充填理論⁵⁾に基づき配合されており、粗骨材は用いず最大粒径 2mm の珪砂が骨材として混合されている。UFC の配合表を表-2 に示す。

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)		
		降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
RC	35	368	568	200
U.RC	35	385	520	200

表- 2 UFC の配合

単 位 量 (kg/m ³)			
水	高強度鋼繊維	減水剤	プレミックス
180	158	29	2250

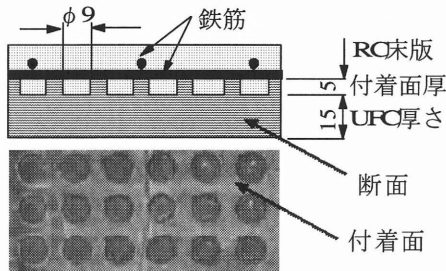
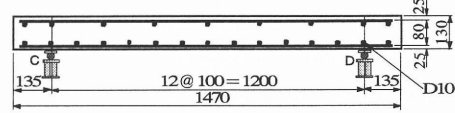
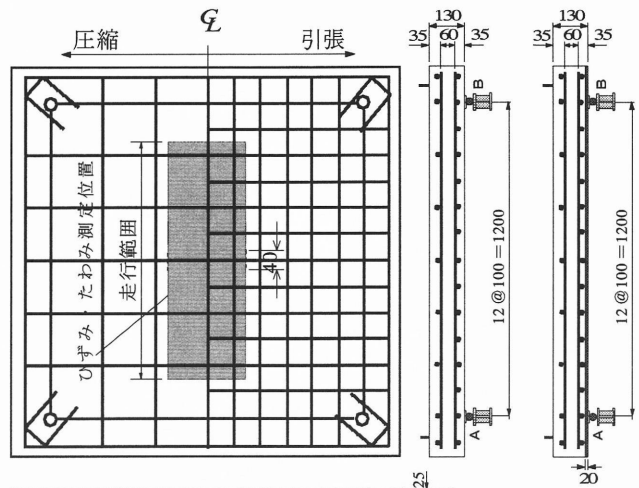


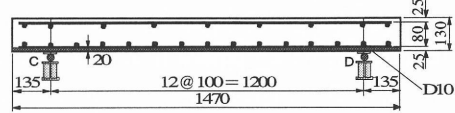
図- 1 UFC 埋設型枠の断面形状および付着面形状

表- 3 UFC の材料特性値

圧縮強度 (N/mm ²)	曲げ引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
219.4	34.9	55

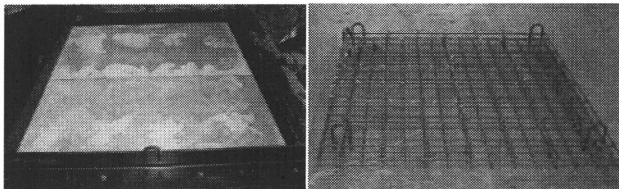


(1) RC 床版供試体



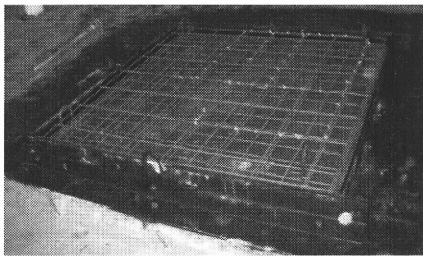
(2) UFC 埋設型枠RC 床版供試体

図- 2 供試体寸法および鉄筋配置



UFC 埋設型枠の設置

鉄筋の組立



鉄筋の配置



コンクリートの打設

写真- 1 UFC 埋設型枠 RC 床版供試体の施工手順

2.2 UFC 埋設型枠の作製

UFC 埋設型枠を作製する際に、UFC 埋設型枠と 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、UFC 埋設型枠の付着面の作製が重要となる。そこで本研究では、UFC 埋設型枠の付着面を凹部（ディンプル）を一様に設けた P タイプを採用した。P タイプは凹部の直径を 9mm、付着面厚を 5mm としていることから、凹部の面積率は 40% である。UFC 埋設型枠の断面形状および付着面形状を図- 1 に示す。

また、UFC 埋設型枠の養生は、初期湿潤養生として 35°C で 36 時間行った後に脱型し、最高温度 90°C を 48 時間保持して蒸気養生を行った⁶⁾。UFC の材料特性値を表- 3 に示す。

2.3 UFC 埋設型枠 RC 床版供試体の作製

UFC 埋設型枠 RC 床版供試体の作製は、UFC 埋設型枠を設置した後に側面の型枠を作製し、予め組んでおいた鉄筋を UFC 埋設型枠の上部に配置する。その後は、コンクリートを打設し、UFC 埋設型枠と RC 床版を一体構造とする。コンクリート打設後は通常の RC と同様に脱型し、水中養生を行う。UFC 埋設型枠 RC 床版供試体の施工手順を写真- 1 に示す。

2.4 供試体寸法および鉄筋配置

道路橋示方書・同解説 II⁷⁾に基づいて、RC 床版の設計支間と大型車両の 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さ、および鉄筋量を決定した。

供試体の寸法は、全長 147cm、支間 120cm、厚さ 13cm の等方性版とした。鉄筋は複鉄筋配置とし、軸直角方

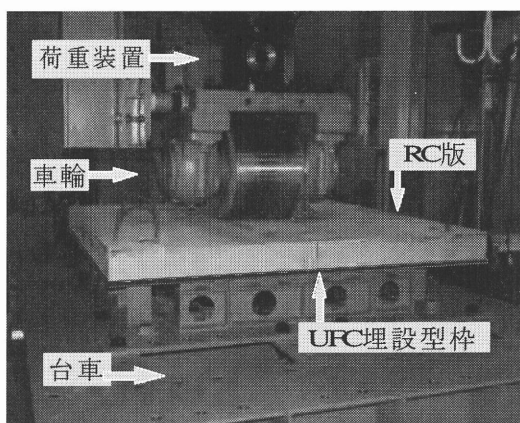


写真-2 走行試験装置

向および軸方向に 10cm 間隔で配置し、圧縮側は引張側の 1/2 を配置する。有効高さは、軸直角方向、軸方向でそれぞれ、10.5cm, 9.5cm とした。供試体寸法および鉄筋配置を図-2 に示す。

なお、本供試体の記号は RC 床版供試体を RC とし、UFC 埋設型枠 RC 床版供試体を U.RC とする。

3. 実験方法

3.1 試験機の概要

本実験に用いた走行試験装置は、輪荷重 350kN の車輪（幅：25cm、直径：40cm）と供試体を設置した台車をモータとクランク・アームにより水平方向へ往復運動させて荷重の走行状態を実現するものである。走行試験装置を写真-2 に示す。

3.2 静荷重実験

静荷重実験は、最大応力が生じる支間中央に輪荷重（25cm×4cm）を静止して荷重を載荷する実験である。荷重の大きさは、引張主鉄筋が降伏するまでは 10.0kN ずつ増加させ、降伏後は供試体が破壊するまで 5.0kN ずつ増加させる段階荷重とした。供試体名称は RC-S, U.RC-S とする。また、実験は 2 体ずつ行い供試体記号を 1, 2 とする。

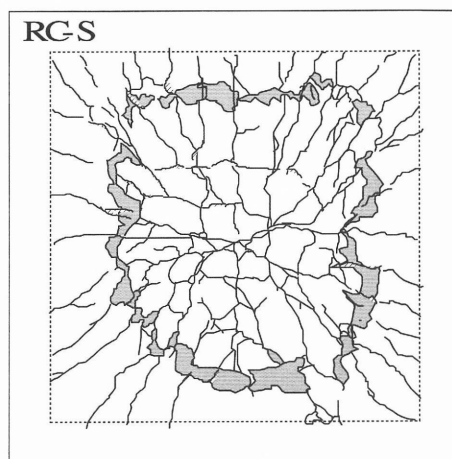
3.3 走行疲労実験

走行疲労実験は、輪荷重に対して軸方向に台車を往復運動させ、床版中央から±45cm の範囲で繰り返し走行状態を実現させる実験である。荷重の載荷方法は、20,000 回走行毎に 100kN までは 20kN ずつ、100kN からは 10kN ずつ荷重を増加させる。走行速度は、0.9m を 6.5sec で走行させる 0.14m/sec とする。供試体名称は RC-F-R, U.RC-F-R とする。また、実験は 2 体ずつ行い供試体記号を 1, 2 とする。

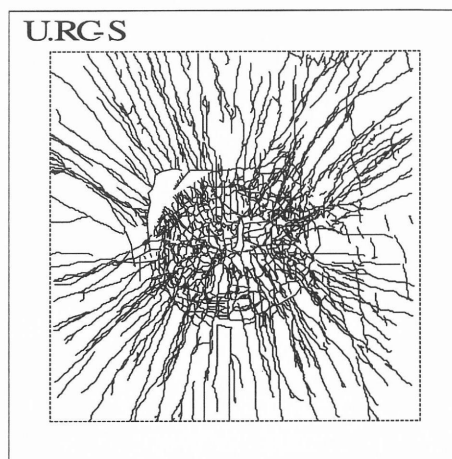
4. 静荷重実験による実験結果および考察

4.1 破壊メカニズム

静荷重実験における RC 床版供試体および UFC 埋設型枠 RC 床版供試体のひび割れ状況の一例を図-3 に示す。



(1) RC 床版



(2) UFC 埋設型枠 RC 床版

図-3 静荷重実験におけるひび割れ状況の一例

RC 床版供試体の場合の破壊状況は、ひび割れが隅角部方向に発生しており、引張鉄筋かぶり底面はダウエル効果により、コンクリートがはく離し、最終的な破壊モードは押抜きせん断破壊となった。また、UFC 埋設型枠 RC 床版供試体の場合の破壊状況は、輪荷重の接地面から 45°の分布面にダウエル効果によりひび割れが密集している。これは、UFC 材に配合されている鋼繊維の架橋効果によりひび割れが分散された結果である。破壊は RC 床版部が押抜きせん断破壊に至ると同時に UFC 埋設型枠の一部がはく離した。

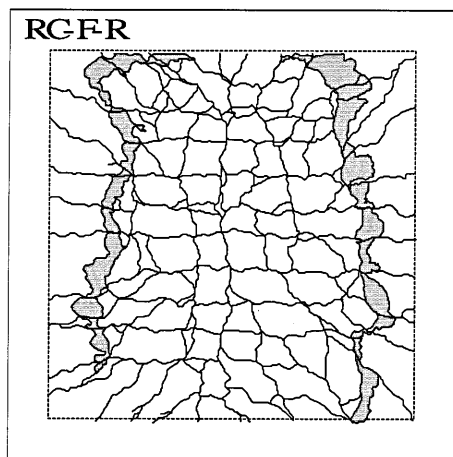
4.2 最大耐荷力

静荷重実験における実験最大耐荷力および破壊モードを表-4 に示す。

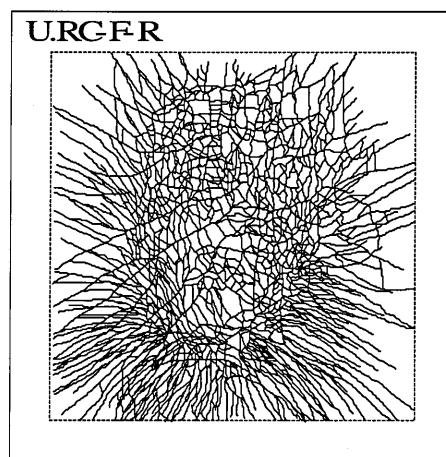
RC 床版供試体の耐荷力は RC-S-1, RC-S-2 でそれぞれ 235.2kN, 240.2kN であり、その平均耐荷力は 237.7kN である。UFC 埋設型枠 RC 床版の供試体の耐荷力は U.RC-S-1, U.RC-S-2 でそれぞれ 299.6kN, 289.7kN であり、その平均耐荷力は 294.7kN である。RC 床版供試体と UFC 埋設型枠 RC 床版供試体を比較すると、UFC 埋設型枠 RC 床版供試体の耐荷力が RC 床版供試体の耐荷力の約 1.24 倍となった。これは、UFC 埋設型枠の付着

表- 4 実験最大耐荷力および破壊モード

供試体	最大耐荷力 (kN)	平均耐荷力 (kN)	耐荷力比	破壊モード
			U.RC / RC	
RC-S-1	235.2	237.7	—	押抜きせん断破壊
RC-S-2	240.2			押抜きせん断破壊
U.RC-S-1	299.6	294.7	1.24	押抜きせん断破壊
U.RC-S-2	289.7			押抜きせん断破壊



(1) RC 床版



(2) UFC 埋設型枠 RC 床版

図- 4 走行疲労実験におけるひび割れ状況の一例

面を凹型としたことにより付着力が得られ、UFC 埋設型枠に配合された鋼繊維の架橋効果が発揮され、ひび割れが抑制されたためである。以上より、UFC 埋設型枠 RC 床版は耐荷力が向上するため、設計厚さの減少が可能となり、全体的な軽量化が図れると考えられる。

5. 走行疲労実験による実験結果および考察

5.1 破壊メカニズム

走行疲労実験における RC 床版供試体および UFC 埋設型枠 RC 床版供試体のひび割れ状況の一例を図- 4 に示す。

RC 床版供試体の場合は、軸直角方向および軸方向に 10cm～12cm 間隔でひび割れが発生し、格子状を形成している。このひび割れ間隔は、軸直角方向および軸方向に配置した鉄筋間隔とほぼ同じ寸法である。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となった。UFC 埋設型枠 RC 床版供試体の場合は、全体的にひび割れが発生し、走行範囲にはひび割れが密集している。これは、UFC 埋設型枠と RC 床版部の付着力が得られ、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、UFC 埋設型枠が引張力を分担したためである。また、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となり、破壊位置で UFC 埋設型枠がはく離した。UFC 埋設型枠のはく離は終局時までほとんどなく UFC 埋設型枠 RC 床版は合成構造として適用可能であると評価できる。

5.2 破壊走行回数

走行疲労実験はステップ漸増荷重により行ったが比較するために等価走行回数により破壊走行回数を算出する。ここで、破壊時の等価走行回数を破壊走行回数とする。

破壊走行回数はマイナー則に従うと仮定し、式(1)より算出する。なお、本供試体は実橋床版の 1/2 モデルであることから設計活荷重は 50kN である。したがって、基準荷重は設計活荷重 50kN に安全率 1.2 を考慮して 60kN とし、基準荷重 60kN の一定荷重として破壊走行回数を算出する。また、S-N 曲線の傾きの逆数 m には松井らが提案する S-N 曲線⁸⁾の傾きの逆数 12.76 を適用する。

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

ここで、 N_{ep} : 荷重 P での走行回数 (回)

P_i : 載荷荷重 (kN)

P : 基準荷重 (=60kN)

n_i : 荷重 P_i での走行回数 (回)

m : S-N 曲線の傾きの逆数 (=12.76)

式(1)より算出した破壊走行回数および破壊モードを表- 5 に示す。

表- 5 より、破壊走行回数は、RC 床版供試体の場合は、供試体 RC-F-R-1, RC-F-R-2 でそれぞれ、5,546,882

表- 5 破壊走行回数および破壊モード

供試体	初期荷重 (kN)	走行回数 (回)	破壊走行回数 (回)	平均破壊走行回数 (回)	破壊走行回数比
					U.RC/RC
RC-F-R-1	60	47700	5546882	6356950	-
RC-F-R-2	60	49392	7167017		
U.RC-F-R-1	60	66760	29801214	39862937	6.27
U.RC-F-R-2	80	55574	49924659		

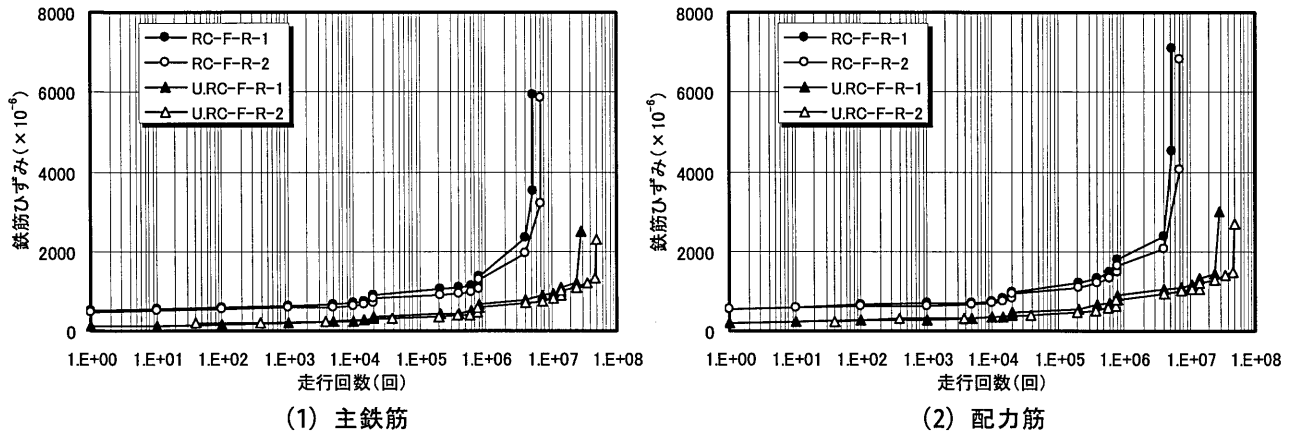


図- 5 走行回数と鉄筋ひずみ

回, 7,167,017 回であり, その平均破壊走行回数は 6,356,950 回であった. UFC 埋設型枠 RC 床版供試体の場合は, 供試体 U.RC-F-R-1, U.RC-F-R-2 でそれぞれ, 29,801,214 回, 49,924,659 回であり, その平均破壊走行回数は 39,862,937 回であった. ここで, RC 床版供試体と UFC 埋設型枠 RC 床版供試体の破壊走行回数を比較すると, UFC 埋設型枠 RC 床版供試体が RC 床版供試体の約 6.3 倍となった. これは, UFC 埋設型枠と RC 床版部の合成効果が発揮されたことと UFC に配合された鋼繊維の架橋効果によりひび割れが抑制されたためであると考えられ, UFC 埋設型枠 RC 床版は疲労耐久性に優れていると評価できる.

5.3 走行回数とひずみの関係

走行疲労実験における床版中央に配置した主鉄筋および配力筋の走行回数とひずみの関係を図- 5 に示す.

軸直角方向, すなわち主鉄筋における走行回数とひずみの関係は, RC 床版供試体の場合は, RC-F-R-1, RC-F-R-2 とともに走行回数の増加に伴いひずみは緩やかに増加し, 793,000 回付近で主鉄筋が降伏した. 降伏後はひずみの増加が著しい. 終局時のひずみは, RC-F-R-1, RC-F-R-2 でそれぞれ, 5940×10^{-6} , 5855×10^{-6} である. UFC 埋設型枠 RC 床版供試体の場合は, 供試体 U.RC-F-R-1 は走行回数の増加に伴い緩やかにひずみは増加し, 24,948,500 回付近から増加が著しい. U.RC-F-R-2 は走行回数の増加に伴い緩やかにひずみは増加し, 46,966,200 回付近から増加が著しい. 終局

時のひずみは, U.RC-F-R-1, U.RC-F-R-2 でそれぞれ, 2480×10^{-6} , 2320×10^{-6} である. ここで, 終局時のひずみにおいて RC 床版供試体と UFC 埋設型枠 RC 床版供試体を比較すると, UFC 埋設型枠 RC 床版供試体が RC 床版供試体に比して約 59%ひずみが抑制された.

軸方向, すなわち配力筋における走行回数とひずみの関係は, RC 床版供試体の場合は, RC-F-R-1, RC-F-R-2 とともに走行回数の増加に伴いひずみは緩やかに増加し, 20,000 回付近からひずみの増加がやや大きくなり, 793,000 回付近で配力筋が降伏した. 降伏後はひずみの増加が著しい. 終局時のひずみは, RC-F-R-1, RC-F-R-2 でそれぞれ, 7098×10^{-6} , 6811×10^{-6} である. UFC 埋設型枠 RC 床版供試体の場合は, 供試体 U.RC-F-R-1 は走行回数の増加に伴い緩やかにひずみは増加し, 24,948,500 回付近から増加が著しい. U.RC-F-R-2 は走行回数の増加に伴い緩やかにひずみは増加し, 46,966,200 回付近から増加が著しい. 終局時のひずみは, U.RC-F-R-1, U.RC-F-R-2 でそれぞれ, 2998×10^{-6} , 2700×10^{-6} である. ここで, 終局時のひずみにおいて RC 床版供試体と UFC 埋設型枠 RC 床版供試体を比較すると, UFC 埋設型枠 RC 床版供試体が RC 床版供試体に比して約 59%ひずみが抑制された.

以上より, 主鉄筋, 配力筋ともに終局ひずみにおいては, UFC 埋設型枠 RC 床版供試体は RC 床版供試体に比して大幅に低減されている. これは, UFC 埋設型枠 RC 床版供試体において RC 床版部と UFC 埋設型枠の付着が

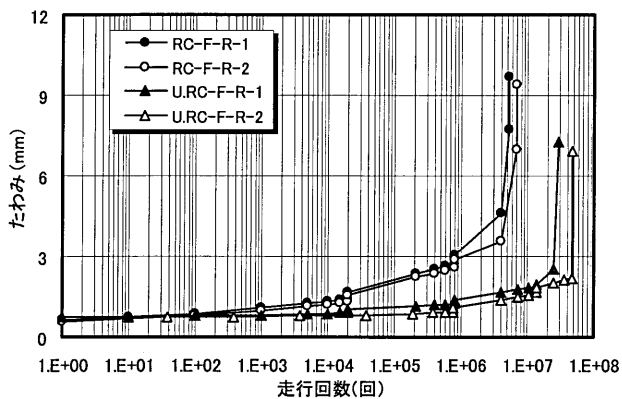


図-6 走行回数とたわみ

良好であるため、合成効果が得られ、UFC 埋設型枠が引張力を分担している。

また、主鉄筋と配力筋のひずみを比較すると、主鉄筋のひずみに比して配力筋のひずみが大きくなっている。これは、本供試体の支持条件を4辺単純支持としたことと輪荷重の接地面が主鉄筋方向は250mm、配力筋方向は40mmであることから荷重分布幅の影響によるものであると考えられる。

5.4 走行回数とたわみの関係

走行疲労実験における床版中央の走行回数とたわみの関係を図-6に示す。

RC 床版供試体の場合は、RC-F-R-1、RC-F-R-2 ともに走行回数の増加に伴いたわみは徐々に増加し、20,000 回付近から増加が著しい。終局時のたわみは、RC-F-R-1、RC-F-R-2 でそれぞれ、9.7mm、9.4mmである。UFC 埋設型枠 RC 床版供試体の場合は、U.RC-F-R-1 は走行回数の増加に伴い緩やかにひずみたわみは増加し、7,361,000 回付近から増加が大きくなり、24,948,500 回付近から増加が著しい。U.RC-F-R-2 は走行回数の増加に伴い緩やかにたわみは増加し、772,900 回付近から増加が大きくなり、46,966,200 回付近から増加が著しい。終局時のたわみは、U.RC-F-R-1、U.RC-F-R-2 でそれぞれ、7.3mm、6.9mm である。ここで、終局時のひずみにおいて RC 床版供試体と UFC 埋設型枠 RC 床版供試体を比較すると、UFC 埋設型枠 RC 床版供試体が RC 床版供試体に比して約 26%たわみが抑制された。また、各走行回数におけるたわみも UFC 埋設型枠 RC 床版供試体が RC 床版供試体に比して抑制された。これは、UFC に配合されている鋼繊維の架橋効果によりひび割れが抑制されたためである。

6. まとめ

(1) 静荷重実験における耐荷力は、RC 床版と UFC 埋設型枠 RC 床版を比較すると、UFC 埋設型枠 RC 床版の耐荷力が約 1.24 倍となった。これは、UFC 埋設型枠の付着面を凹型としたことにより付着力が得られ、UFC に

配合された鋼繊維の架橋効果が発揮されたためひび割れが抑制されたためである。

(2) 静荷重実験において、荷重とひずみの関係および荷重とたわみの関係から、UFC 埋設型枠 RC 床版は RC 床版に比してひずみ・たわみが抑制されたことから、UFC 埋設型枠の付着性の向上、鋼繊維による架橋効果が顕著に現れたことを示唆している。

(3) 走行疲労実験における破壊走行回数は、RC 床版に比して UFC 埋設型枠 RC 床版が約 6.3 倍となった。また、走行回数とひずみの関係および走行回数とたわみの関係からも、UFC 埋設型枠 RC 床版供試体は RC 床版供試体に比してひずみ・たわみが大幅に抑制されたことから、UFC 埋設型枠と RC 床版部の付着性が良好であり、UFC 埋設型枠 RC 床版は疲労耐久性に優れた構造であると評価できる。

(4) 静荷重実験および走行疲労実験の破壊メカニズムから、UFC 埋設型枠 RC 床版は鋼繊維の架橋効果により UFC 埋設型枠が引張力を分担し、ひび割れが分散している。

(5) UFC 埋設型枠 RC 床版における静荷重実験の耐荷力向上および走行疲労実験の破壊走行回数の向上、ひずみ・たわみの抑制から、UFC 埋設型枠 RC 床版は合成構造として実用的であると評価でき、RC 床版の軽量化が図れるものと考えられる。

参考文献

- 1) 牧隆輝, 田中敏嗣, 阿部忠, 木田哲量: RPC 製埋設型枠を用いた 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, 2005
- 2) 阿部忠, 木田哲量, 反田泰人, 片桐誠: UFC 埋設型枠を用いた RC はりの耐荷力および破壊状況, コンクリート工学年次論文集, vol.29, No.3, pp.1447-1452, 2007
- 3) 下山善秀, 鶴澤正美: ダクタルの特性と応用分野, 太平洋セメント研究報告, No.142, pp.55-62, 2002
- 4) 土木研究センター: 建設技術審査証明報告書「高強度セメント系材料を用いた高耐久性薄肉埋設型枠「ダクタルフフォーム」」, 2005
- 5) 武者浩透, 大竹明郎, 関文夫, 大熊光, 児玉明彦, 小林忠司: 無機系複合材料 (RPC) を用いた酒田みらい橋の設計と施工, 橋梁と基礎, vol.36, No.11, pp.2-11, 2002
- 6) 中山良直, 柳原英克, 狩野兼義, 鹿嶋圭介: コンクリート構造物の高耐久化—ダクタルフフォームの製造と適用事例—, 川田技報, vol.25, pp.92-93, 2006
- 7) 社団法人日本道路協会: 道路橋示方書 (I 共通編・II 鋼橋編)・同解説, 2002
- 8) 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, pp.49-51, 2007