

輪荷重走行疲労実験による UFC パネル RC 床版の耐疲労性に関する実験研究

Experimental Study on Fatigue Resistance of RC Slab with UFC Panel for Wheel Running Fatigue Test

水口和彦*, 阿部忠**, 木田哲量**, 田中敏嗣***, 新山祐樹****

Kazuhiko Minakuchi, Tadashi Abe, Tetsukazu Kida, Satoshi Tanaka and Yuuki Niiyama

*博(工), 日本大学助教, 生産工学部土木工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

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

***博(工), 太平洋セメント 中央研究所 (〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2)

****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)

The author conducted constant running load fatigue test using RC slab specimens prepared with an ordinary form and specimens of RC slab with two kind of UFC panel. The results of the constant running load fatigue test indicated that the number of running cycles during which RC slabs with UFC panel failed was about 5.29-58.67 times more than RC slabs. The dimpled surface of the UFC increased the adhesion between the UFC panel and the RC slab, which proved the effects of the composite structure. Therefore, the RC slabs with UFC panel increased the load-carrying capacity and fatigue durability performance and was evaluated as a practical structure.

Key Words: RC slab with UFC panel, Fatigue resistance, Number of equivalent cycles

キーワード: UFC パネル RC 床版, 耐疲労性, 等価走行回数

1. はじめに

近年, 建設事業費の縮減により, 道路橋においては施工の合理化・省力化を図ることが重要課題となっている. その対策の1つとして, 鋼桁橋梁では多数主桁構造から少数主桁構造へと構造形式の簡略化が進められており, これに対応するための長支間・高耐久性を有する床版構造が求められている. これらのことから各研究機関や企業では, 床版の長支間化に対応できる新床版の開発が精力的に実施されている.

一方で, RC 部材の施工における場所打ちコンクリート型枠の取り外し工程を省略し, 施工の合理化・省力化, さらに型枠合板の使用を低減することにより森林資源の保護や産業廃棄物を減少させるなどの環境保全効果も期待できる超高強度繊維補強コンクリート (Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete: 以下, UFC と称す) で製作した埋設型枠が提案されている^{1,2)}. UFC は, セメント系材料に鋼繊維を混入したものであり, 圧縮強度が 200N/mm^2 を有する. また, 通常の高強度コンクリートに比べ, じん性にも優れた構造材料であること

から, 道路橋床版に用いることで耐疲労性の向上に寄与するものと考えられる³⁾. ここで, RC 床版部と UFC パネルを合成構造とする場合, その合成効果を高めることが必要となることから, RC 床版部と合成させる UFC パネルの表面 (以下, 合成面と称す) の形状が重要となる.

そこで本研究では, UFC パネルを道路橋 RC 床版に適用させることを目的として, RC 床版の引張鉄筋かぶり内に合成させた構造 (以下, UFC パネル RC 床版と称す) を提案し, 通常の型枠を用いて製作した RC 床版および合成面の形状の異なる 2 タイプの UFC パネル RC 床版の供試体に対して, 輪荷重による走行疲労実験を行い, 等価走行回数, 走行回数とたわみの関係, 走行回数と鉄筋・UFC ひずみの関係, 破壊形状から, UFC パネルの合成面形状の違いが耐疲労性に及ぼす影響について検討する. さらに, UFC パネルと RC 床版部との合成界面に水が浸透した場合の影響を評価するために, 床版上面から水の侵入孔を設けた供試体を製作し, 合成界面への水の侵入が耐疲労性へ及ぼす影響についての検討も行う.

表-1 コンクリートの配合

供試体	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					C	W	S	G	Ad
RC	8.0±2.5	2.0±1.0	39.2	40.0	403	158	726	1094	4.0
U.RC-P									
U.RC-C	8.0±2.5	2.0±1.0	56.0	47.2	304	170	848	954	3.04
U.RC-C-W									

表-2 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)
RC	35	368	568	200
U.RC-P	35	385	520	200
U.RC-C	27	385	520	200
U.RC-C-W	27	385	520	200

表-3 UFC パネルの配合

供試体	単位体積量 (kg/m ³)			
	水 (W)	鋼繊維(FM)	減水剤(SP)	プレミックス(DP)
U.RC-P	180	158	29	2250
U.RC-C	180	157	24	2254
U.RC-C-W				

表-4 UFC パネルの材料特性値

供試体	圧縮強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
U.RC-P	219.4	34.9	55.0
U.RC-C	213.2	32.0	
U.RC-C-W	213.2	32.0	

2. UFC パネルの特徴および供試体の使用材料

2.1 UFC パネルの特徴

UFC パネルは、20~30mm 程度の薄肉であるため製作が容易である。また、高強度で極めて緻密な硬化体構造であるために、塩分などの腐食性因子による浸透を遮断し、さらには耐衝撃性に優れ、凍結による表面の劣化が進行しないなどの特徴がある。RC 床版との界面の構造は、UFC パネルに凹凸を設けることにより、RC 床版と一体性が図られ、合成構造の有効断面として機能させることが可能である。

2.2 配合および使用材料

(1) RC 床版

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 の砕石を使用する。鉄筋は SD295A, D10 を使用する。ここで、コンクリートの配合を表-1、コンクリートおよび鉄筋の材料特性値を表-2 に示す。なお、表-2 に示したコンクリートの圧縮強度は実験時に計測した平均値である。

(2) UFC パネル

UFC パネルの使用材料は、水(W)、ポリカルボン酸

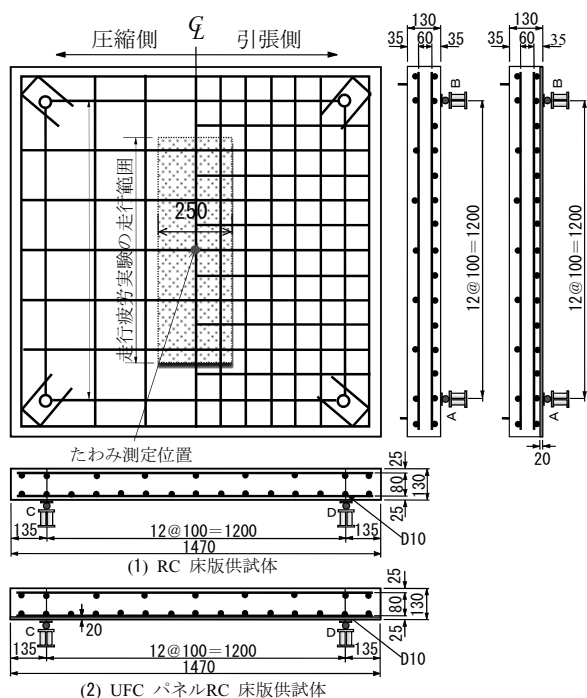


図-1 供試体寸法および鉄筋配置

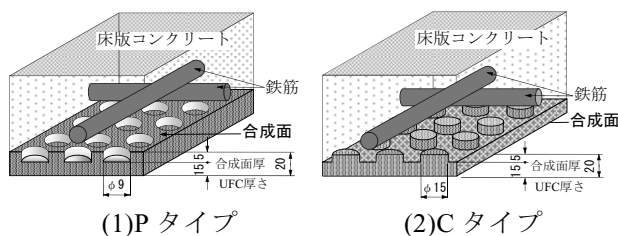


図-2 合成面形状

系の高性能減水剤(SP)、プレミックス材料(DP、密度 2.85g/cm³)および鋼繊維(FM、密度 7.85g/cm³)とする。プレミックス材は珪砂、シリカフェーム、反応性微粉末などが最密充填されるように配合を行う。鋼繊維は長さ 15mm、直径 0.2mm を体積比で 2.0%混練する。また、粗骨材は使用せずに最大粒径 2mm の珪砂を混合する。混和剤使用量は、目標フロー値は 240mm として決定する。ここで、UFC パネルの配合を表-3、UFC パネルの材料特性値を表-4 に示す。

2.3 供試体寸法

本供試体は道路橋示方書・同解説⁴⁾に基づき、RC 床版の設計支間と大型車両の一日一方向あたりの計画交通量 2000 台以上を想定して床版厚、鉄筋量を算出し、その 1/2 モデルとする。

(1) RC 床版供試体寸法および鉄筋配置

RC 床版供試体の寸法は、全長 1470mm、支間 1200mm、厚さ 130mm の等方性版とした。鉄筋は複鉄筋配置とし、主鉄筋および配力筋を 100mm 間隔に配置し、圧縮側鉄筋は引張側鉄筋の 1/2 の量を配置した。また、有効高さは、主鉄筋が 105mm、配力筋は 95mm とした。

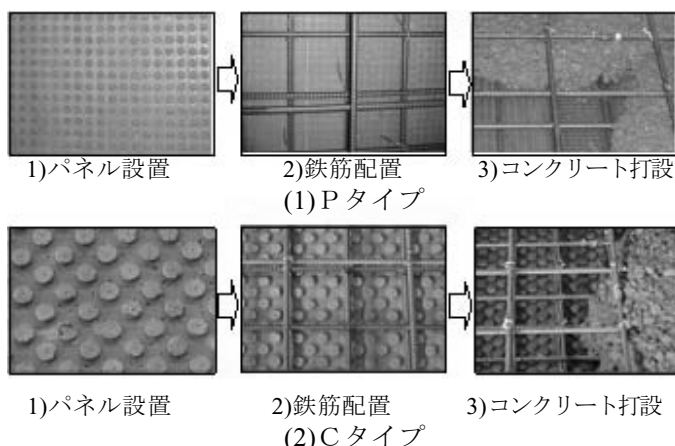


写真-1 UFC パネル RC 床版供試体の施工手順

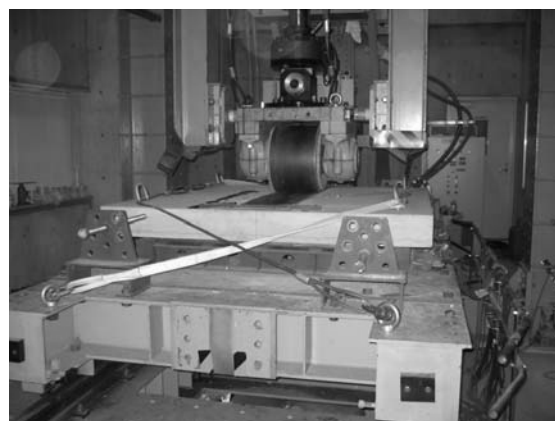


写真-2 輪荷重走行疲労実験状況

ここで、供試体寸法および鉄筋配置を図-1 に示す。

(2)UFC パネル RC 床版供試体

1)UFC パネルの合成面および寸法

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 パネルの合成面の形状が重要となる。本研究では、2 タイプの合成面を使用する。既往研究によると、凸型付き型枠材を用いて付着面に凹部を様に設けたタイプ(以下、P タイプ)を採用しており、P タイプのコンクリートとの打継ぎ面のせん断ひび割れ強度は、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^{5,6,7)}。P タイプの凹部は直径 9mm、合成面厚 5mm であり、合成面におけるコンクリートと UFC の面積比は 4 : 6 である。そこで本研究では、さらなる付着力の向上を図るために、UFC パネルに挿入されるコンクリート量を増加させ、凸部を様に設けた構造(以下、C タイプ)を提案する。C タイプの合成面におけるコンクリートと UFC の面積比は 6 : 4 である。ここで、P タイプの合成面形状および断面形状を図-2(1)に、C タイプの合成面形状および断面形状を図-2(2)に示す。

UFC パネルの寸法は、幅 1470mm、有効厚 150mm、合成面厚は 5mm、全厚 20mm とし、RC 床版のかぶり内に埋設する。製作は、2 タイプの UFC パネル用の型枠に RC を打設する。養生は、前置き時間を 24 時間とし、脱型後の蒸気養生は最高温度 90℃で 48 時間保持する。

2)UFC パネル RC 床版の施工法

UFC パネル RC 床版供試体作製における施工手順を写真-1 に示す。

UFC パネル RC 床版供試体の製作は、予め製作した UFC パネルを設置した後に側面の型枠を作製し(写真-1, 1)), 予め組んでおいた鉄筋を UFC パネルの上部に配置した(写真-1, 2))。その後、コンクリートを打設し(写真-1, 3)), UFC パネルと RC 床版を一体構造とした。コンクリート打設後は通常の RC と同様に側

面の型枠を脱型し、養生を行った。

3)UFC パネル RC 床版寸法および鉄筋配置

UFC パネル RC 床版供試体の寸法および鉄筋配置は、RC 床版供試体と同様である。また、UFC パネルは RC 床版部の引張鉄筋かぶりとして考慮していることから床版厚は 130mm であり、厚さ 20mm の UFC パネルを設置した後、直接鉄筋を配置する。よって、有効高さは主鉄筋が 105mm、配力筋が 95mm である。ここで、UFC パネル RC 床版供試体の寸法および鉄筋配置を図-1 に併記する。

3. 実験方法

3.1 輪荷重走行疲労実験方法

本研究は、UFC パネルと RC 床版を合成構造とした場合の実用性を評価することから、実験では輪荷重走行による疲労実験(以下、走行疲労実験)を行い、耐疲労性に関する検討を行う。

走行疲労実験における走行範囲は、床版中央から両支点方向に±450mm(全長 900mm)とする。この走行範囲は、輪荷重による応力が 45°で床版の底面方向に分布するものと仮定し、設定する。走行範囲を図-1 に併記する。走行疲労実験の各供試体名称は、通常の型枠から製作した RC 床版供試体を RC、合成面を P タイプとした UFC パネル RC 床版供試体を U.RC-P、合成面を C タイプとした供試体を U.RC-C、合成面を C タイプとし、床版上面から水の侵入孔を設け水分を注入する供試体を U.RC-C-W とする。次に、床版供試体は活荷重 100kN で設計し、その 1/2 モデルとしたことから、活荷重 100kN の 1/2 の 50kN に安全率 1.2 を考慮して 60kN を基準荷重とする。各供試体の荷重載荷方法は、RC1,2 は荷重 80kN で 2 万回まで走行し、その後荷重 100kN で走行する。U.RC-P1,2 は荷重 60kN で 2 万回まで走行し、その後荷重 80kN で 2 万回、100kN で 2 万回、100kN 以降は 2 万回ごとに 10kN ずつ増加させる。また、供試体 U.RC-C1,2,3 および供試体

U.RC-C-W は荷重 80kN で 2 万回まで走行し、その後荷重 100kN で 2 万回、100kN 以降は 2 万回ごとに 10kN ずつ増加させる。ここで、実験状況を写真-2 に示す。

4. 実験結果

4.1 等価走行回数

本実験では、2 万回走行ごとに荷重を増加する段階荷重載荷方式を用いたことから等価走行回数を算出して耐疲労性を評価する。ここで、等価走行回数は、マイナー則に従うと仮定すると式(1)として与えられる。なお、本研究は RC 床版の疲労寿命と UFC パネル RC 床版の疲労寿命とを比較し、実用性を検証することから、RC 床版の S-N 曲線を基準とする。したがって、S-N 曲線の傾きの逆数 m には、RC 床版および UFC パネル RC 床版ともに松井らが提案する S-N 曲線の傾きの逆数 12.7 を適用する⁸⁾。

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

ここで、 N_{eq} ：等価繰返し回数(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 ：S-N 曲線の傾きの逆数(=12.7)

本実験における式(1)より算出した RC 床版および UFC パネル RC 床版の等価走行回数 N_{eq} を表-5 に示す。

(1) RC 床版

供試体 RC1,2 の等価走行回数はそれぞれ 7,347,504 回、8,529,870 回で、平均等価走行回数は 7,938,687 回となった。RC 床版の平均等価走行回数を基準として UFC パネル RC 床版の耐疲労性に関する評価を行う。

(2) UFC パネル RC 床版

供試体 U.RC-P1,2 の等価走行回数は、それぞれ 35,727,812 回、48,276,900 回で、平均等価走行回数は 42,002,356 回となった。RC 床版の等価走行回数との比較を行うと、合成面を P タイプとした場合 5.29 倍の等価走行回数となった。

次に、供試体 U.RC-C1,2,3 の等価走行回数はそれぞれ 505,594,259 回、332,737,029 回、558,845,801 回で、平均等価走行回数は 465,725,696 回となった。RC 床版との比較を行うと、合成面を C タイプの場合 58.67 倍の等価走行回数となった。

以上より、UFC パネルと RC 床版を合成構造とすることで RC 床版に比して大幅な耐疲労性の向上が得られる。また、合成面形状の違いによる比較では、合成面を C タイプとした場合、P タイプに比して 11.09 倍の等価走行回数となっている。これは、合成面におけるコンクリートと UFC の面積比を 6:4

表-5 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
RC1	7,347,504	7,938,687	—
RC2	8,529,870		
U.RC-P1	35,727,812	42,002,356	5.29
U.RC-P2	48,276,900		
U.RC-C1	505,594,259	465,725,696	58.67
U.RC-C2	332,737,029		
U.RC-C3	558,845,801		
U.RC-C-W	401,542,728	401,542,728	50.58

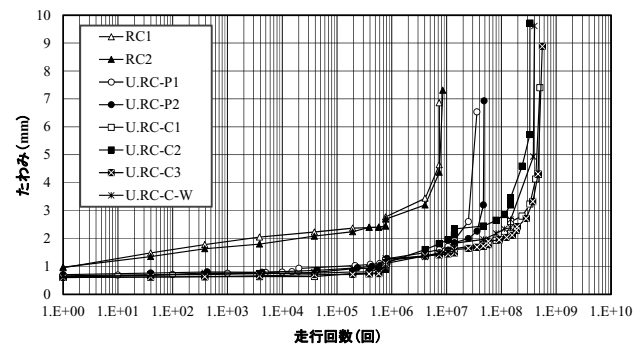


図-3 等価走行回数とたわみの関係

としたことで付着力が向上し、合成効果が向上したためと考えられる。さらに、供試体 U.RC-C-W の等価走行回数は 401,542,728 回で、通常の RC 床版に比して 50.58 倍となっており、水分を注入した場合でも十分な耐疲労性を有する結果となった。しかしながら、同合成面形状である C タイプの供試体と比較すると、等価走行回数は約 86%に低下する結果となり、水分の侵入が耐疲労性に影響を及ぼすことが明らかとなった。

4.2 等価走行回数とたわみの関係

本実験における等価走行回数とたわみの関係を図-3 に示す。

(1) RC 床版

供試体 RC1,2 では、ともに走行回数の増加に伴ってたわみは増加し、走行回数 4.05×10^6 回付近からたわみの増加が著しくなり、破壊時のたわみはそれぞれ 6.9mm、7.3mm であった。

(2) UFC パネル RC 床版

供試体 U.RC-P1,2 では、破壊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、破壊時のたわみはそれぞれ 6.5mm、6.9mm であった。

次に、供試体 U.RC-C1,2,3 は、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 1.47×10^8 回付近からたわみの増加は著しくなり、破壊時のたわみはそれぞれ 7.4mm、9.7mm、8.9mm であった。RC 床版との比較を行うと、UFC パネルを引張鉄筋かぶり内に配置した供試体は、各走行回数ともに RC 床版のたわみを大きく下回っている。これは、

RC床版に比してUFCパネルRC床版は曲げ剛性が向上することからたわみの増加が抑制されたためである。さらに、合成面をCタイプとした場合、Pタイプに比して各走行回数のたわみ増加がさらに抑制されている。また、供試体U.RC-C-Wでは、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 1.47×10^8 回付近から著しくたわみは増加し、破壊時のたわみは 9.6mm であった。ここで、同合成面である供試体U.RC-Cとの比較を行うと、ほぼ同様のたわみ変化を示していることから、本実験の範囲においては水分注入によるたわみ変化の違いは認められなかった。

4.3 等価走行回数と鉄筋ひずみの関係

本実験における等価走行回数と鉄筋ひずみの関係を図-4(1)に示す。

(1) RC 床版

供試体 RC1,2 はともに走行回数の増加に伴い鉄筋ひずみは増加し、走行回数 4.1×10^6 回付近からひずみは急激に増加し、破壊時のひずみは RC1,2 でそれぞれ 5940×10^{-6} , 5855×10^{-6} であった。

(2) UFC パネル RC 床版

供試体U.RC-P1,2はともに走行回数の増加に伴いひずみは緩やかに増加し、破壊直前でのひずみの増加が著しい。破壊時のひずみはU.RC-P1,2でそれぞれ 2480×10^{-6} , 2320×10^{-6} であった。

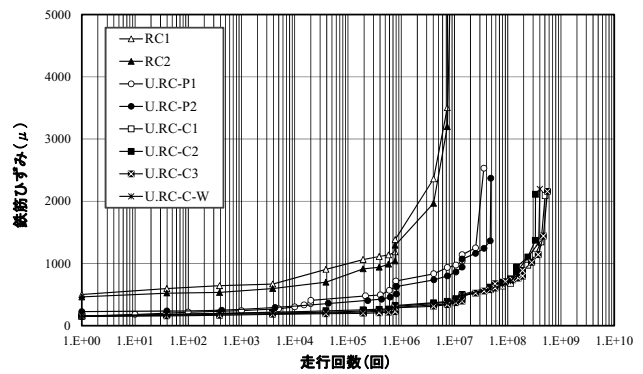
次に、供試体U.RC-C1,2,3は供試体U.RC-Pと同様の挙動を示しており、破壊時のひずみはU.RC-C1,2,3でそれぞれ 2090×10^{-6} , 2112×10^{-6} , 2157×10^{-6} であった。したがって、RC床版に比してUFCパネルRC床版は合成構造とすることで鉄筋ひずみが抑制されるが、合成面の違いにおいてCタイプとした供試体はPタイプに比して鉄筋ひずみがさらに抑制される。また、供試体U.RC-C-Wでは走行回数の増加に伴いひずみはわずかに増加し、破壊直前でひずみの増加が著しくなり、破壊時のひずみは 2196×10^{-6} であった。ここで、水分注入の有無による比較を行うと、ひずみの増加傾向および終局時の値ともにほぼ同様の傾向を示しており、水分の影響による顕著な差異は確認されなかった。

4.4 等価走行回数とUFCひずみの関係

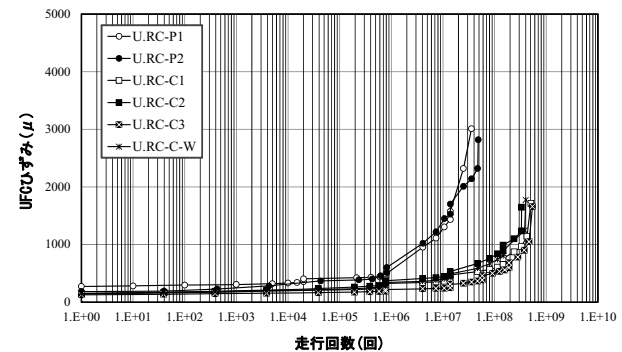
本実験における等価走行回数とUFCひずみの関係を図-4(2)に示す。

供試体U.RC-P1,2はともに走行回数の増加に伴いUFCひずみは増加し、走行回数 7.9×10^5 回付近からの増加は著しくなり、破壊時のひずみはU.RC-P1,2でそれぞれ 3010×10^{-6} , 2820×10^{-6} であった。

次に、供試体U.RC-C1,2,3はともに走行回数の増加に伴いUFCひずみは緩やかに増加し、破壊時のひずみはU.RC-C1,2,3でそれぞれ 1715×10^{-6} ,



(1)等価走行回数と鉄筋ひずみの関係



(2)等価走行回数とUFCひずみの関係

図-4 等価走行回数とひずみの関係

1647×10^{-6} , 1658×10^{-6} となっており、合成面の違いによる比較を行うと、合成面をCタイプとした場合、終局時のひずみがPタイプに比して約50%程度に抑制されていることがわかる。また、供試体U.RC-C-Wは走行回数の増加に伴い緩やかに増加し、破壊時のひずみは 1772×10^{-6} であった。水分注入の有無による比較では、鉄筋ひずみ同様に合成界面に水を注入した供試体の同合成面形状であるCタイプ供試体とほぼ同様な傾向を示している。

4.5 破壊形状

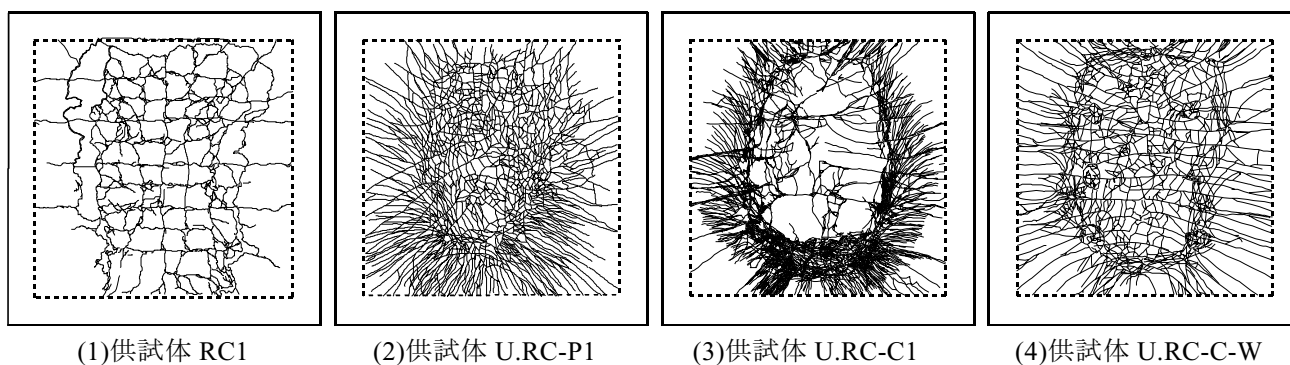
本実験における供試体下面の破壊形状の一例を図-5に示す。

(1) RC 床版

供試体RC1は、軸方向および軸直角方向に100～120mm間隔でひび割れが発生している。これは、軸方向および軸直角方向に配置した鉄筋の間隔とほぼ同じ位置である。また、輪荷重の載荷位置から約45°で押抜かれており、ダウエル効果の影響の範囲ではく離が確認できる。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に至った。

(2) UFC パネル RC 床版

供試体U.RC-P1は、UFCに配合されている鋼繊維による架橋効果により応力が分散され、全体的に無数の微細なひび割れが発生し、輪荷重の走行範囲にはひび割れが密集している。最終的な破壊モード



図ー5 破壊形状の一例

は、輪荷重が走行中に RC 床版が押抜きせん断破壊となると同時に UFC パネルがはく離した。

次に、供試体 U.RC-C1 は、輪荷重の走行範囲から約 45°底面の内側は、架橋効果の影響により微細なひび割れが発生し、約 45°底面の外側は、放射線状にひび割れが発生している。床版の中央部分には微細なひび割れは見られない。最終的な破壊モードは、輪荷重が走行中に UFC パネルの曲げ破壊を伴う押抜きせん断破壊に至り、破壊時においても RC 床版と UFC パネルとの界面のはく離は見られなかった。これは、合成面のせん断強度が高いことから破壊時に曲げ破壊が先行したためと考えられる。供試体 U.RC-C-W は、供試体 U.RC-C1 とほぼ同様な破壊形状を示したが、床版の中央にもひび割れは多く発生した。また、床版上面の侵入孔から水を注入した箇所に微細なひび割れが発生している。これは、水分を注入したことによる合成界面での付着強度の低下など幾つかの要因が考えられるが、この問題に関しては、今後注水箇所の断面切断を行い詳細な検討を行う予定である。

5. まとめ

- ①等価走行回数より、RC 床版に比して UFC パネルと RC 床版を合成構造とすることで合成効果が高まり耐疲労性が大幅に向上する。また、合成面の違いでは C タイプとした UFC パネル RC 床版は、P タイプに比して 11.09 倍の走行回数が得られる。さらに、合成界面に水分を注入した場合は耐疲労性が約 14%低下することが判明した。
- ②等価走行回数とたわみの関係より、RC 床版に比して UFC パネル RC 床版は、曲げ剛性が向上することからたわみの増加が抑制される。また、UFC パネルの合成面形状の違いによってたわみの抑制効果が異なる。
- ③等価走行回数とひずみの関係から、鉄筋・UFC ひずみともに、UFC パネル RC 床版は RC 床版に比して大幅なひずみの抑制が認められた。

④等価走行回数とたわみ・ひずみの関係より、水分の浸透の有無による比較では、顕著な差異は認められなかった。

⑤破壊形状より、全ての供試体で輪荷重走行中に押抜きせん断破壊に至った。ただし、合成面を C タイプとした場合、合成面の付着力が高いことから、UFC パネルの曲げ破壊を伴う押抜きせん断破壊となった。また、合成界面に水分を注入した供試体では、水の注入箇所に微細なひび割れが発生した。

⑥UFC パネル RC 床版は耐疲労性に優れた構造であることが実証された。さらに、合成面を C タイプとした UFC パネル RC 床版は合成構造としてより有効である。

参考文献

- 1)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, 2006
- 2)財団法人土木研究センター：建設技術審査報告書，ダクトルフォーム，2007
- 3)Y. Shimoyama and M.Uzawa, "Properties and application files of Ductal", Journal of research of the Taiheiyo cement corporation, No. 142, pp.55-62, 2002
- 4)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I・II，2004
- 5)新見彩，阿部忠，木田哲量，澤野利章，片桐誠：UFC 埋設型枠 RC 床版の疲労耐久性，第六回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp.69-74，2008
- 6)園木聡，阿部忠，木田哲量，澤野利章，田中敏嗣：UFC 埋設型枠の付着面の改善が静的押抜きせん断耐荷力に及ぼす影響，第 53 回日本学術会議材料工学連合講演会講演論文集，pp.259-260，2009
- 7)阿部忠，新見彩，木田哲量，田中敏嗣：走行振動荷重が作用する UFC 埋設型枠 RC 床版の最大耐荷力および耐久性に関する研究，材料，第 58 巻，第 7 号，pp.619-626，2009
- 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，2007