

# 道路橋床版の耐疲労性向上対策として早強SFRCの床版への適用検討

鹿島道路(株) ○伊藤清志 日大生産工 阿部 忠  
(株)ケミカル工事 深川克彦

## 1. はじめに

近年、RC 床版の耐荷力性能および耐疲労性の向上のための床版構造および材料の開発がなされている。例えば、鋼桁上に敷設した鋼板パネルに鉄筋を配筋してからコンクリートを打設して、鋼板パネルとコンクリートを“ずれ止め”により一体させて荷重に抵抗する合成床版などが提案されている<sup>1)</sup>。また、UFC パネルを鋼桁上に敷設後に鉄筋を配筋し、コンクリートを打設する合成床版も提案され、その耐疲労性が評価されている<sup>2)</sup>。一方、高速道路 RC 床版の補強材として鋼繊維補強コンクリート (SFRC) を用いて鋼床版や RC 床版の補強材として採用され、セメントには超速硬セメントが使用されている。しかし、UFC や SFRC のどれもが高価な材料であり、特殊な施工条件において使用されている。また、SFRC は床版補強材として用いられ、橋梁構造材料としては使用例が少ないのが現状である。

そこで本研究では、1994 年改訂の道示<sup>3)</sup>に準拠した RC 床版の 1/2 となる寸法および鉄筋量を配置し、SFRC に早強セメントを適用した供試体を用いて、輪荷重走行疲労実験による等価走行回数から本提案する SFRC 床版の耐疲労性の評価および破壊メカニズムを検証し、実用性を評価する。

## 2. 供試体の使用材料および供試体寸法

(1)RC 床版供試体 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、鉄筋は SD295A, D10 を使用した。材料特性値を表-1 に示す。

(2)SFRC 床版 SFRC 床版のコンクリートには、早強ポルトランドセメントと 5mm 以下の砕砂および 5mm ~ 15mm の砕石、鋼繊維は長さ 30mm を 100kg/m<sup>3</sup> の混入率で配合し、鉄筋は RC 床版供試体と同様に D10 を用いた。SFRC の示方配合を表-2 に示す。早強ポルトランドセメントを用いた SFRC の圧縮強度は材齢 4 日で 52.6N/mm<sup>2</sup>、材齢 7

表-1 材料特性値

供試体	鉄筋(SD295A, D10)			
	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
RC	35.0	368	513	200
SFRC	54.3	368	513	200

表-2 SFRC 床版供試体の示方配合

スランブ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					SP C×%	AE C×%
			C	W	S	G	SF		
8.0± 2.5	41	53.9	427	175	881	780	100	2	0.004

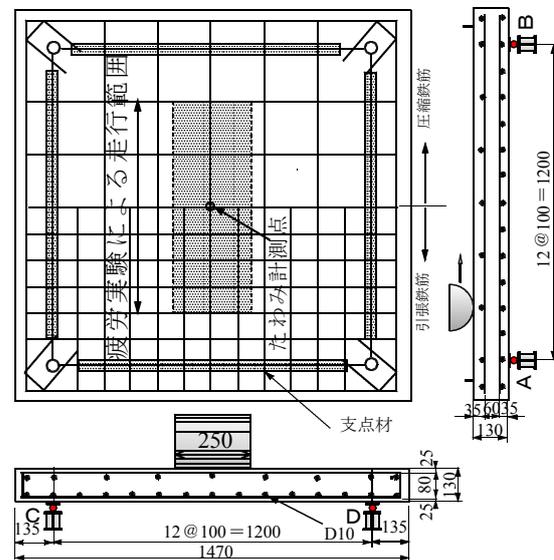


図-1 RC 床版供試体寸法

日で 54.3N/mm<sup>2</sup> である。

(3) 供試体寸法 床版供試体は 2002 年改訂の道示<sup>3)</sup>に準拠した 1/2 モデルとし、RC 床版および SFRC 床版供試体の寸法は、全長 1,470mm、支間 1,200mm、厚さ 130mm。鉄筋は複鉄筋配置として、引張側は軸直角方向および軸方向ともに 100mm 間隔に配置し、圧縮側の鉄筋量は引張鉄筋量の 1/2 とした。軸直角方向および軸方向の有効高さは、それぞれ 105mm, 95mm とした。供試体寸法および鉄筋配置を図-1 に示す。次に、SFRC 床版供試体の寸法は、

The study on high early strength concrete with steel fiber as the improving fatigue durability of slab on the bridge

Kiyoshi ITO, Katsuhiko HUKAGAWA, and Tadashi ABE

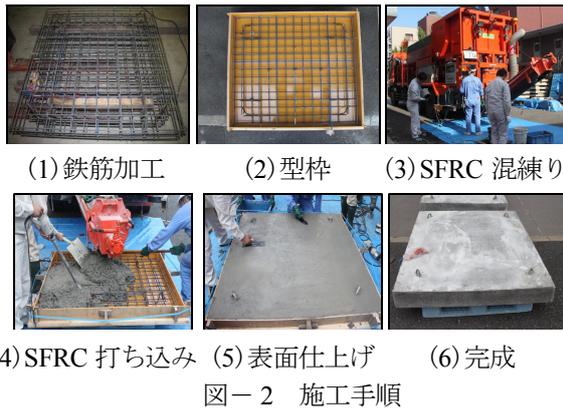


図-1 に示す RC 床版寸法と同様とする。

(4) 供試体作成 SFRC 床版供試体の製作は、実橋床版における施工に準拠した。施工手順を図-2 に示す。

SFRC 床版供試体は、RC 床版供試体と同様に図-1 に示す鉄筋配置および寸法で鉄筋の加工および組み立てを行う(図-2(1))。次に、型枠を製作し、型枠に鉄筋を設置する(図-2(2))。SFRC は表-2 に示す配合で混練りする。SFRC の混練りは、SFRC 上面増厚補強に使用されるジェットモビル車を用いた(図-2(3))。SFRC が混練りした後、直ちに SFRC を打ち込み(図-2(4))、バイブレーターで締め固めを行い、表面仕上げをおこない養生を行う(図-2(5))。

### 3. 輪荷重走行疲労試験

#### (1) 実験方法

輪荷重走行疲労実験は、床版中央から ±450mm の範囲(900mm)で輪荷重を連続走行させるものである。また、荷重載荷方法は、RC 床版および SFRC 床版供試体ともに初期走行荷重を 80kN とし、以後 20,000 回走行毎に 20kN ずつ増加し、供試体が破壊するまで荷重を増加させるステップ載荷とする。たわみとひずみの計測は床版中央および中央に配置された鉄筋で計測し、計測は 1, 10, 100, 1,000, 5,000 回およびこれ以降は 5,000 回走行毎とする。

#### (2) 等価走行回数

本実験における走行疲労実験は、20,000 回毎に荷重を増加し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。等価走行回数は、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)における基準荷重 P は、2002 年改訂道示の活荷重 100kN に安全率を考慮し、本実験装置の車輪幅は 250mm が道示に規定する輪荷重幅の 50%より 60kN とする。また、式(1)における S-N 曲線の傾きの逆数 m には、松井らが提案する S-N 曲線の傾きの逆数  $m = 12.7$  を適用する<sup>4) 5)</sup>。

表-3 RC 床版および SFRC 床版の等価走行回数

供試体	等価走行回数	平均等価走行回数(回)	走行回数比
RC-1	7,347,504	7,938,687	—
RC-2	8,529,870		
SFRC-1	641,910,007	514,656,741	64.8
SFRC-2	387,403,475		

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

ここで、 $N_{eq}$ ：等価走行回数(回)、 $P_i$ ：載荷荷重(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(= 12.7)

## 4. 実験結果および考察

### 4.1 輪荷重走行実験による等価走行回数

輪荷重走行疲労実験における等価走行回数を表-4 に示す。

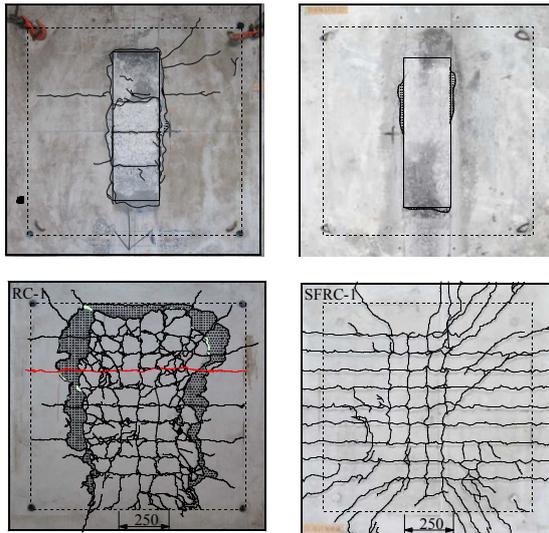
(1)RC 床版供試体 RC 床版供試体は荷重 80kN で 20,000 回走行後、供試体 RC-1 は 100kN で 10,009 回、供試体 RC-2 は 11,810 回走行後に押抜きせん断破壊となっている。供試体 RC-1, 2 の等価走行回数は、各々  $7.34 \times 10^6$  回、 $8.52 \times 10^6$  回となる。SFRC 床版の耐疲労性は、供試体 RC-1, 2 の平均等価走行回数  $7.93 \times 10^6$  回を用いて評価する。

(2)SFRC 床版供試体 SFRC 床版供試体は、荷重 80kN, 100kN, 120kN において 20,000 回走行後、供試体 SFRC-1 は 140kN で 10,500 回、供試体 SFRC-2 は 140kN で 5, 100 回走行後に押抜きせん断破壊となった。等価走行回数は式(1)より供試体 SFRC-1 が  $641.91 \times 10^6$  回、供試体 SFRC-2 は  $387.30 \times 10^6$  回となり、平均等価走行回数は  $514.65 \times 10^6$  回である。RC 床版の等価走行回数との比較では供試体 SFRC-1 は 80.9 倍、供試体 SFRC-2 は 48.8 倍、平均は 64.8 倍となり、大幅な向上となる。これは、鋼繊維の架橋効果による引張力の負担と、早強 SFRC の圧縮強度が大きいことも疲労寿命の向上に大きく寄与したものと考えられる。なお、早強 SFRC の圧縮強度(材齢 8 時間)は RC 床版の 1.55 倍であった。

### 4.2 破壊形状

輪荷重走行疲労実験における RC 床版供試体および SFRC 床版供試体の破壊時におけるひび割れ状況の一例は図-3 に示す。

(1)RC 床版 RC 床版供試体 RC-1 の破壊時における床版上面の損傷状況は、輪荷重走行面の損傷が著しく、ひび割れは軸直角方向に発生し、貫通ひび割れとなっている。次に、床版下面のひび割れ状況は、配置された主鉄筋および



(1) RC-1 (2) SFRC-1

図-3 RC床版およびSFRC床版の破壊状況

配筋筋付近に2方向のひび割れが発生し、輪荷重走行位置から45度の底面にダウエル効果の影響によるはく離が広範囲に渡って発生している。供試体 RC-2 においても同様のひび割れ状況である。また、破壊は両供試体ともに輪荷重走行中に押抜きせん断破壊となった。

(2) SFRC 床版 供試体 SFRC-1 の破壊時における床版上面のひび割れ状況は走行面の一部損傷が見られるものの貫通ひび割れは見られない。また、下面のひび割れ状況は、主鉄筋および配筋筋配置位置下面に2方向のひび割れが発生している。しかし、破壊時のひび割れ状況は輪荷重走行位置から45度の底面に RC 床版供試体に発生したダウエルの影響によるはく離は、見られずない。供試体 SFRC-2 も同様な損傷状況である。これは、SFRC に配合された鋼繊維により RC 床版に見られる斜めひび割れが抑制されたものと考えられる。また、早強 SFRC の大きな圧縮強度によりせん断強度が向上し、斜めひび割れが抑制されたと考えられる。破壊は輪荷重走行中に曲げがともなうせん断破壊となった。

#### 4.3 たわみと等価走行回数

輪荷重走行疲労実験における破壊時の RC 床版供試体および SFRC 床版供試体のたわみと等価走行回数の関係を図-4 に示す。

(1) RC 床版供試体 供試体 RC-1 のたわみは、初期荷重 80kN 載荷時 0.95mm から走行の繰り返しにより徐々に増加し、20,000 回走行(等価走行回数 772,240 回)で 2.5mm、荷重 100kN に増加した時点で 2.8mm となり、3mm を超えた付近の走行からたわみの増加が著しくなってい

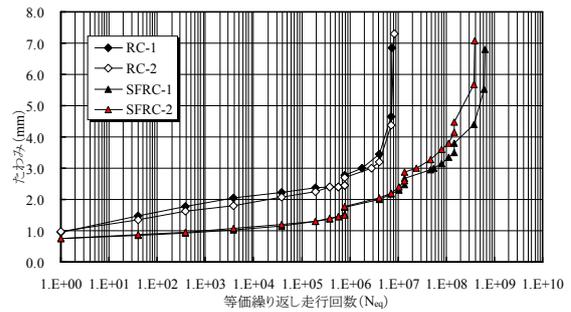


図-4 たわみと等価走行回数

る。破壊時(等価走行回数 7,347,504 回)のたわみは 6.8mm である。また、供試体 RC-2 のたわみは、初期荷重 80kN 載荷時 0.97mm、20,000 回走行(等価走行回数 772,240 回)で 2.4mm、荷重 100kN 載荷時は 2.7mm であり、供試体 RC-1 と同様に 3mm を超えた付近から増加が著しくなり、破壊時のたわみは 7.3mm となる。

以上より、RC 床版のたわみが 3.0mm、すなわち床版支間 L の 1/400 付近で増加が大きくなり、破壊に至っている。よって、この付近で補強対策を行う必要がある。

(2) SFRC 床版供試体 供試体 SFRC-1 のたわみは、初期荷重 80kN 載荷時 0.75mm、20,000 回走行(等価走行回数 772,240 回)で 1.5mm、荷重 100kN 載荷時は 1.7mm であり、20,000 回走行後(等価走行回数  $13.90 \times 10^6$  回)で 2.6mm、荷重 120kN に増加し、20,000 回走行(等価走行回数  $146.98 \times 10^6$  回)では 3.5mm である。たわみが 3mm を超えた付近においても鋼繊維の架橋効果により急激なたわみの増加はなく、荷重 140kN に増加時点で 3.8mm となったが、急激なたわみの増加はないが、たわみが 4.0mm を超えた付近から著しい増加となり、破壊時は荷重 140kN で 10,500 走行(等価走行回数  $641.91 \times 10^6$  回)において 6.8mm である。また、供試体 SFRC-2 のたわみは、初期荷重 80kN 載荷時 0.77mm、20,000 回走行後(等価走行回数 772,240 回)では 1.5mm、荷重 100kN に載荷時して 20,000 回走行(等価走行回数  $13.90 \times 10^6$  回)で 2.4mm、荷重 120kN に載荷し、20,000 回走行後(等価走行回数  $146.98 \times 10^6$  回)で 4.2mm となる。その後、供試体 SFRC-1 と同様にたわみが床版支間 L の 1/300 程度となるまでは急激な増加はなく、荷重 140kN 載荷時よりたわみの増加が著しくなり、走行回数 5,100 回(等価走行回数  $287.4 \times 10^6$  回)で破壊となり、最大たわみは 7.1mm である。このように、SFRC 床版は配合された鋼繊維の架橋効果によりたわみの増加が大幅に抑制され、耐疲労性が大幅に

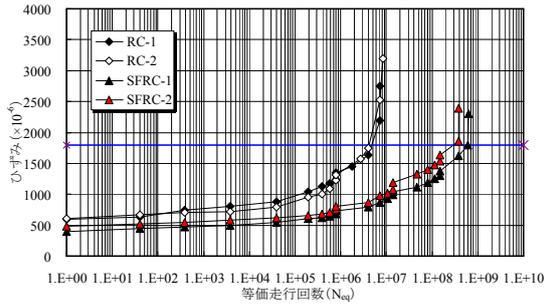


図-5 ひずみと等価走行回数の関係

向上する結果となった。また、早強ポルトランドセメントの圧縮強度が大きいことも、せん断強度の向上に寄与したと考えられる。

#### 4.4 ひずみと等価走行回数

ひずみと等価走行回数の関係を図-5に示す。本実験における鉄筋の降伏ひずみは表-2に示す材料特性値から算定すると、 $1,840 \times 10^6$ となる。

(1) RC床版供試体 RC床版供試体 RC-1の軸直角方向鉄筋のひずみは図-4に示すように初期荷重 80kN 荷重時に  $600 \times 10^6$  あり、20,000 回走行後(等価走行回数 772,240 回)は  $1,240 \times 10^6$ 、荷重 100kN 荷重時に  $1,350 \times 10^6$  となり、その後の走行を繰り返すことにより徐々に増加し、破壊時の軸方向鉄筋のひずみは  $2,750 \times 10^6$  である。また、供試体 RC-2 の軸直角方向鉄筋のひずみは、初期荷重 80kN 荷重時に  $610 \times 10^6$ 、20,000 回走行(等価走行回数 772,240 回)は  $1,240 \times 10^6$  となり、その後の荷重増加と走行の繰り返しでは、供試体 RC-1 と同様な増加傾向となり、破壊時のひずみが  $3,190 \times 10^6$  である。

筆者らは<sup>9)</sup>、RC床版の最大たわみが床版支間 L の 1/400 に達した付近で補強対策を検討することを提案している。今回の実験においても、たわみが床版支間 L の 1/400 となる 3.0mm に達した時点の鉄筋ひずみは、供試体 RC-1, 2 とともに降伏ひずみに達していない。

(2) SFRC床版供試体 供試体 SFRC-1 のひずみは初期荷重 80kN 荷重時に  $400 \times 10^6$ 、20,000 回走行後(等価走行回数 772,240 回)  $683 \times 10^6$ 、100kN 荷重時に  $730 \times 10^6$ 、20,000 回走行後(等価走行回数  $13.90 \times 10^6$  回)に  $990 \times 10^6$ 、更に 120kN 荷重して 20,000 回走行後(等価走行回数  $146.98 \times 10^6$  回)が  $1,300 \times 10^6$ 、140kN 荷重時は  $1,380 \times 10^6$  となり、降伏ひずみ  $1,840 \times 10^6$  に達した時点の等価走行回数は  $620.24 \times 10^6$  回となり、破壊時のひずみは  $2,300 \times 10^6$  である。

次に、供試体 SFRC-2 のひずみは、初期荷重 80kN 荷重時は  $750 \times 10^6$ 、20,000 回走行後(等価

走行回数 772,240 回)  $800 \times 10^6$ 、100kN 荷重後の 20,000 回走行(等価走行回数  $13.90 \times 10^6$  回)  $1,080 \times 10^6$ 、120kN 荷重時の 20,000 回走行(等価走行回数  $146.98 \times 10^6$  回)では  $1,470 \times 10^6$  である。主鉄筋が降伏ひずみに達した時点の等価走行回数は  $362.00 \times 10^6$  となり、その後に急激に増加し、破壊時のひずみが  $2,390 \times 10^6$  である。

以上より、SFRC床版の鉄筋ひずみは、RC床版のひずみ増加に比して大幅に抑制されている。これは早強 SFRC の鋼繊維が引張力を分散し、ひび割れの発生と鉄筋のひずみ増加を抑制していると考えられる。

#### 5. まとめ

- ① 早強セメントを配合した SFRC の材齢 4 日の圧縮強度は  $52.6 \text{N/mm}^2$  となり、超速硬セメントを配合した SFRC と同等な強度を有している。また、養生期間は従来の RC 床版コンクリートに比して短く、全体の工期の短縮が図られ、施工の合理化・省力化が可能となる。
- ② 早強セメントを配合した SFRC 床版は配合された鋼繊維の架橋効果に RC 床版の等価走行回数に比して 64.8 倍となり、耐疲労性が大幅に向上する結果が得られた。よって、SFRC 床版は耐久性が評価され実用できであると言える。
- ③ たわみと等価走行回数の関係においても、RC 床版に比してたわみの増加が抑制されており、たわみが床版支間 L の 1/400 に達した付近を補強時期の目安として、SFRC 床版は床版支間 L の 1/400 を超えた後も急激な増加は見られなく、疲労寿命が大幅に向上している。

#### 「参考文献」

- 1) 土木学会：PART-B 構造物設計指針(合成床版)，1997
- 2) 阿部忠，木田哲量，園木聡，山下壘，田中敏嗣：付着面形状が異なる UFC パネル RC 床版の耐荷力性能および破壊メカニズム，構造工学論文集，Vol.57A，pp.1316-1325，2011
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I，II，III，2002
- 4) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理，北森出版，2007
- 5) 川井豊，阿部忠，木田哲量，高野真希子：道路橋 RC 床版の S-N 曲線に関する一考察，第 7 回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp.263-268，2012
- 6) 伊藤清志，阿部忠，菅野幹男，児玉孝善：道路橋 RC 床版の部分打換補強法における耐疲労性の評価，構造工学論文集，Vol.59A，pp.1092-1100，2013