

鋼繊維補強コンクリートを用いた道路橋RC床版の耐疲労性に関する研究

日大生産工(院) ○伊藤清志 日大生産工 阿部 忠 日大生産工 澤野利章
 (株)ケミカル工事 深川克彦

1. はじめに

道路橋 RC 床版の維持管理において、損傷が著しい床版は、PC 床版あるいは合成床版に取り替えやコンクリートによる床版打換えなどの大規模な修繕が施されている¹⁾。RC 床版の損傷事例が多いにも関わらずコンクリートを材料とする新床版の開発は余り行われていないのが現状である。筆者ら^{2), 3)}は、道路橋 RC 床版の上面増厚補強工事に用いられている SFRC に着目し、床版コンクリートに早強セメントに鋼繊維を混入した SFRC 床版を提案した。しかし、早強セメントは時期によって入手が困難な材料である。そこで本研究では、年間通じて入手が可能な普通セメントに鋼繊維を混入した SFRC の床版を提案し、輪荷重走行疲労実験により耐疲労性を評価し、普通セメントに鋼繊維を混入した SFRC 床版の実用性を検証する。

2. 床版供試体

2.1 使用材料

(1)RC床版供試体 コンクリートには 5mm 以下の砕砂および 5mm ～ 20mm の砕石と普通セメントを使用し、鉄筋は SD295A, D10 を用いる。ここで、RC の示方配合を表－1 に示す。

(2)SFRC床版 コンクリートには 5mm 以下の砕砂および 5mm ～ 15mm の砕石と早強セメントおよび普通セメントを使用し、鋼繊維には ϕ 0.62mm、長さ 30mm の両端フック型鋼繊維を混入量 1.27Vol.% で混入する。また、鉄筋は RC 床版供試体と同様に D10 を用いる。ここで、早強セメントを用いた SFRC-早の示方配合を表－2、普通セメントを用いた SFRC-普の示方配合を表－3 に示す。また、圧縮強度を表－4、割裂試験による引張強度および一面せん断試験によるせん断強度を表－5 に示す。

2.2 床版供試体寸法

(1)RC床版供試体 RC 床版供試体は 2014 年改訂の道路橋示方書・同解説⁴⁾(以下、道示とする)に規

表－1 RC の示方配合

スラブ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位水量(kg/m ³)				SP (C×%)
			C	W	S	G	
8.0±2.5	53.0	45.0	302	160	803	1019	2.0

※ C : セメント, W : 水, S : 細骨材, G : 粗骨材

表－2 SFRC-早の示方配合

スラブ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					SP (C×%)	AE (C×%)
			C	W	S	G	SF		
8.0 ±2.5	40	51.2	430	170	890	788	100	2.0	0.25

※ C : セメント, W : 水, S : 細骨材, G : 粗骨材, SF : 鋼繊維, SP : 減水剤, AE : AE 剤

表－3 SFRC-普の示方配合

スラブ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					SP (C×%)	AE (C×%)
			C	W	S	G	SF		
8.0 ±2.5	41	53.9	427	175	881	780	100	2.0	0.25

表－4 強度発現

試験項目	RC (普通セメント)	SFRC-早 (早強セメント)	SFRC-普 (普通セメント)	超速硬セメント
圧縮強度	2時間	—	—	19.2N/mm ²
	3時間	—	—	26.9N/mm ²
	4時間	—	—	33.6N/mm ²
	24時間	13.0N/mm ²	27.0N/mm ²	—
	48時間	20.6N/mm ²	42.6N/mm ²	—
	4日	23.1N/mm ²	52.6N/mm ²	59.6N/mm ²
	7日	28.5N/mm ²	53.3N/mm ²	—
	28日	34.8N/mm ²	—	—
	実験時	35.0N/mm ²	54.3N/mm ²	—
割裂試験	実験時	3.1N/mm ²	5.8N/mm ²	6.8N/mm ²

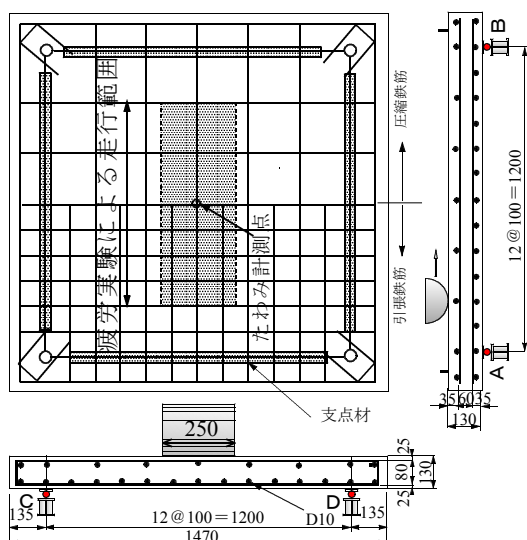
表－5 圧縮強度, 引張強度, せん断強度

供試体	RC床版(材齢28日)			SFRC床版(材齢28日)		
	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	せん断強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	せん断強度 (N/mm ²)
1	35.3	2.9	6.2	54.2	5.7	10.6
2	34.7	3.2	5.9	52.7	5.2	10.1
3	35.1	3.1	6.1	53.8	5.4	10.8
平均	35.0	3.1	6.1	53.6	5.4	10.5
理論	35.0	2.9	6.0	53.6	3.8	7.8

定される床版の 1/2 モデルとする。よって、RC 床版供試体の寸法は、全長 1,470mm、支間 1,200mm、厚さ 130mm で鉄筋は複鉄筋配置とし、引張側は軸直角方向および軸方向ともに 100mm 間隔に配置、

A study on fatigue resistance of RC slab with the steel fiber reinforced concrete on road bridge.

Kiyoshi ITO, Tadashi ABE, Toshiaki SWANO, and Katsuhiko HUKAGAWA



図－１ 供試体寸法および鉄筋の配置

圧縮側の鉄筋量は引張鉄筋量の 1/2 とする．軸直角方向および軸方向の有効高さは、それぞれ 105mm, 95mm である．ここで、供試体寸法および鉄筋配置を図－１に示す．ここで、RC 床版供試体を RC-1, 2 とする．

(2)SFRC床版供試体 SFRC 床版供試体は、RC 床版供試体と同様とする．早強セメントおよび普通セメントを用いた SFRC 床版を SFRC-早 1, 2 および SFRC-普 1, 2 とする．

2.3 理論引張強度およびせん断強度

割裂試験による理論による引張強度は、岡村⁶⁾が提案する引張強度式(1)を用いる．

$$\sigma_t = 0.269 \cdot f_c^{(2/3)} \quad (1)$$

ここで、 σ_t ：コンクリートの引張強度 (N/mm²)， f_c ：コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

次に、せん断強度式にな阿部⁶⁾らが提案する一面せん断強度式(2)を用いる．

$$\tau_{\max} = 0.688 f_c^{0.610} \leq f_c = 80 \text{ N/mm}^2 \quad (2)$$

ここで、 $\tau_{\max}$ ：せん断強度 (N/mm²)， f_c ：コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

以上より、理論による引張強度および一面せん断試験によるせん断強度を表－５に併記した．

3. 実験方法および等価走行回数

3.1 輪荷重走行疲労実験

輪荷重走行疲労実験は、床版中央から $\pm 450\text{mm}$ の範囲 (900mm) に輪荷重を連続走行させ、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、供試体が破壊するまで 20,000 回走行毎に 20kN 増加させるステップ載荷とする．そして、たわみ計測は床版中央とし、1, 10, 100, 1,000, 5,000 回および 5,000 回以降は 5,000 回走行ごとに行う．計測点を図－１に併記する．

3.2 輪荷重走行実験における等価走行回数

本実験における走行疲労実験は、20,000 回ごと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(3)で与えられる．式(3)における基準荷重は、本供試体は 1/2 モデルとしたことから 2014 年改訂以降の道示に規定する活荷重 100kN に安全率を考慮し、その 1/2 である 60kN とする．また、式(3)において、松井ら⁷⁾が提案する S-N 曲線の傾きの逆数 $m = 12.7$ を適用する．

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^n (P_i/P)^m \times n_i \quad (3)$$

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 輪荷重走行実験における等価走行回数

輪荷重走行疲労実験における等価走行回数を表

表－６ RC 床版および SFRC 床版の等価走行回数

供試体		荷 重				等価走行回数	平均等価走行回数 (回)	走行回数比
		80 kN	100 kN	120 kN	140 kN			
RC-1	実験走行回数	20,000	10,009				7,938,687	—
	等価走行回数	772,240	6,575,264			7,347,504		
RC-2	実験走行回数	20,000	11,810				8,529,870	
	等価走行回数	772,240	7,757,629					
SFRC-早1	実験走行回数	20,000	20,000	20,000	10,500		514,656,741	64.8
	等価走行回数	772,240	13,137,391	133,126,563	494,873,812	641,910,007		
SFRC-早2	実験走行回数	20,000	20,000	20,000	5,100		474,619,093	59.8
	等価走行回数	772,240	13,137,391	133,126,563	240,367,280	387,403,475		
SFRC-普1	実験走行回数	20,000	20,000	20,000	9,000		474,619,093	59.8
	等価走行回数	772,240	13,137,391	133,126,563	424,177,553	571,213,748		
SFRC-普2	実験走行回数	20,000	20,000	20,000	4,901		378,024,438	
	等価走行回数	772,240	13,137,391	133,126,563	230,988,243			

ー 6 に示す。

(1) RC床版供試体

RC 床版供試体は荷重 100kN で、供試体 RC-1 が 10,009 回走行後に、供試体 RC-2 は 11,810 回走行後に押抜きせん断破壊となる。等価走行回数は、供試体 RC-1 が 7.34×10^6 回、供試体 RC-2 は 8.52×10^6 回となり、等価走行回数の平均は 7.93×10^6 回である。この等価走行回数の平均を基準として SFRC 床版の耐疲労性を評価する。

(2) SFRC床版供試体

1) 早強セメントを用いたSFRC床版 供試体 SFRC-早 1 の破壊時の等価走行回数は 641.91×10^6 回、供試体 SFRC-早 2 は 387.30×10^6 回であり、等価走行回数の平均は 514.65×10^6 回である。RC 床版の等価走行回数の平均と比較すると 64.8 倍である。

2) 普通セメントを用いたSFRC床版 供試体 SFRC-普 1 の破壊時の等価走行回数は 571.21×10^6 回、供試体 SFRC-普 2 は 378.02×10^6 回である。等価走行回数の平均は 474.61×10^6 回であり、RC 床版の等価走行回数の平均と比較すると 59.8 倍である。

以上より、早強セメントおよび普通セメントを用いた SFRC 床版は、道示の規定に準拠し、その 1/2 モデルとした RC 床版と比較して等価走行回数が大幅に向上する結果が得られた。

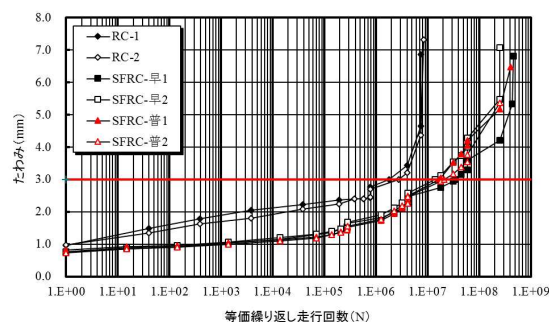
4.2 たわみと等価走行回数の関係

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－2 に示す。

(1) RC床版供試体 RC 床版供試体 RC-1 は、初期荷重 80kN 載荷時は 0.95mm であり、走行ともに徐々にたわみが増加している。たわみが床版支間 L の 1/400、すなわちたわみが 3mm に達した時点の等価走行回数は 1.81×10^6 回、破壊時のたわみは 6.8mm で等価走行回数は 7.34×10^6 回である。次に、供試体 RC-2 は、初期荷重 80kN 載荷時は 0.97mm、3.0mm に達した時点の等価走行回数は 2.77×10^6 回、破壊時のたわみは 7.3mm である。なお、たわみが 3.0mm に達した時点の平均等価走行回数は 2.29×10^6 回であり、これを基準に SFRC 床版の効果を検証する。

(2) SFRC床版供試体

1) 早強セメントを用いたSFRC床版 供試体 SFRC-早 1 は、初期荷重 80kN 載荷時のたわみ 0.75mm であり、等価走行回数の増加により緩やか



図－2 たわみと等価走行回数

にたわみ増加するものの、RC 床版供試体に比較して増加が小さい。たわみが 4.0mm を超えた付近から増加が著しくなり、破壊時のたわみは 6.8mm である。次に、供試体 SFRC-早 2 は初期荷重 80kN 載荷時が 0.76mm、たわみが 4.0mm 付近より増加が著しくなり、破壊時のたわみは 7.1mm である。

2) 普通セメントを用いたSFRC床版 供試体 SFRC-普 1 は、初期荷重 80kN 載荷時のたわみ 0.75mm、荷重増加と等価走行回数の増加により緩やかに増加している。たわみが 4.0mm 付近より増加が著しくなり、破壊時のたわみは 6.46mm である。次に、供試体 SFRC-普 2 は初期荷重 80kN 載荷時が 0.74mm、破壊時のたわみは 5.36mm である。

以上より、早強・普通セメンに鋼繊維を混入した SFRC 床版では、ともにたわみが床版支間 L の 1/400 に達した後も急激な増加が見られない。これは、鋼繊維の混入によりひび割れの伸展が抑制されるとともにたわみの増加も抑制され、耐疲労性の向上に繋がったものと考えられる。

4.3 破壊時のひび割れ状況

輪荷重走行疲労実験による破壊時の RC 床版供試体および SFRC 床版供試体のひび割れ状況を図－3 に示す。

(1) RC床版 RC 床版供試体 RC-1 の破壊時の床版上面の損傷状況は図－3(1)、1)に示すように軸直角方向に貫通ひび割れが発生し、輪荷重走行面の損傷は著しく、床版下面のひび割れ状況は図－3(2)、1)に示すように、配置された主鉄筋および配力筋付近に 2 方向のひび割れとダウエルの影響によるはく離が広範囲に発生し、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る。

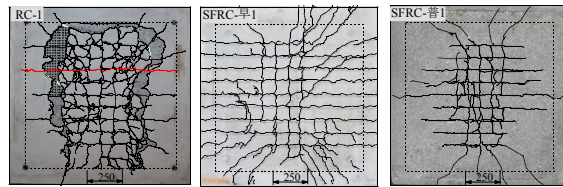
(2) SFRC床版

1) 早強セメントを用いたSFRC床版 供試体 SFRC



1) RC-1 2) SFRC-早 1 3) SFRC-普 1

(1) 床版上面の損傷状況



1) RC-1 2) SFRC-早 1 3) SFRC-普 1

(2) 床版下面の損傷状況

図－ 3 RC 床版および SFRC 床版の損傷状況

-早 1 の破壊時における床版上面のひび割れ状況は図－ 3(1), 2)に示すように、走行面に一部損傷が見られるが貫通ひび割れは見られない。また、床版下面のひび割れ状況は図－ 3(2), 2)に示すように、主鉄筋のひび割れに対して配力筋方向のひび割れが少なく、輪荷重走行位置から 45 度に底面の押抜きせん断破壊に起因するダウエルが及ぼす範囲のひび割れは、RC 床版の破壊時のひび割れに比して少ない。

2) 普通セメントを用いた SFRC 床版 供試体 SFRC-普 1 の破壊時における床版上面のひび割れ状況は図－ 3(1), 3)に示すように、走行面の損傷が著しいが貫通ひび割れは見られない。また、床版下面のひび割れ状況は図－ 3(2), 3)に示すように、主鉄筋と配力筋配置位置に 2 方向ひび割れが発生するが、押し抜きせん断破壊には至らず、はく離も見られない。

以上より、SFRC 床版は鋼繊維の架橋効果により押し抜きせん断破壊には至らず、曲げの影響から 2 方向ひび割れが進展すると考えられる。

6. まとめ

(1) SFRC 床版の等価走行回数は、RC 床版に比して早強セメントを用いた SFRC-早は 64.8 倍、普通セメントを用いた SFRC-普は 59.8 倍となり、鋼繊維を混入することで引張強度およびせん断強度が向上され、輪荷重走行による押し抜きせん断耐破壊に対する耐疲労性が向上したものであると考えられる。

(2) たわみと等価走行回数との関係では、RC 床版はたわみが床版支間 L の $1/400$ に達した付近からたわみが急激に増加し、押し抜きせん断破壊となっている。一方、SFRC 床版は床版支間 L の $1/350$ 付近までは急激なたわみの増加は見られず、耐疲労性が大幅に向上している結果である。また、SFRC 床版においてはたわみが床版支間 L の $1/350$ 付近から補強対策が必要であると考えられる。

(3) 破壊状況は、RC 床版では 2 方向ひび割れとはく離を生じ、最終的にはダウエルの影響を受ける範囲は完全に押し抜きせん断破壊形状を示している。一方、SFRC 床版では、輪荷重位置から 45 度底面のダウエルの影響を受ける範囲は、鋼繊維の混入により引張強度、せん断強度が向上したことからはく離に至らず、また押し抜きせん断破壊に至っていないが、RC 床版の 50 倍以上の等価走行回数となることから、走行面に生じた凹凸により実験継続が困難となり終了とした。

以上より、早強セメントおよび普通セメントに鋼繊維を混入した SFRC 床版は、鋼繊維の架橋効果により耐疲労性が大きく向上する結果が得られた。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼橋の大規模修繕・大規模更新(解説と事例)，2016
- 2) 伊藤清志，阿部忠，岩崎正二，大塚祐二：塩害・凍害の複合劣化を受けた RC 床版の上面増厚補強法による耐疲労性の評価，コンクリート構造物の補修・補強アップグレード論文・報告集，第 13 巻，pp.373-381，2013.11
- 3) 阿部忠，伊藤清志，深川克彦：鋼繊維補強コンクリートを用いた道路橋床版の耐疲労性の評価，第 8 回道路橋床版シンポジウム論文報告集(土木学会)，pp.75-80，2015.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I，II，III，2002.
- 5) 岡村 甫：コンクリート構造の限界状態設計法，コンクリートセミナー 4，共立出版，pp. 17-18，1979.
- 6) 阿部忠，木田哲量，徐銘謙，澤野利章：道路橋 RC 床版の押し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. 199-207，2007.3
- 7) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理，森北出版，2007.