

普通セメントに鋼繊維を配合した SFRC 床版の耐疲労性評価に関する研究

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 国立台北科技大学 徐 銘謙

1. まえがき

道路橋示方書・同解説(以下、道示とする)¹⁾で設計されたRC床版は100年床版と言われているが、道路橋の維持管理において最も損傷が著しく、建設後30数年で撤去されている事例もあり^{2),3)}、橋梁メーカーや各研究機関では耐荷力性能および耐疲労性の向上のために新床版やコンクリート材料の開発がされている。床版構造では鋼板パネルを鋼桁上に敷設してから鉄筋を配筋し、コンクリートの打設により一体化した合成床版などが提案され^{4),5)}、コンクリート材料では鋼繊維やピニコ繊維を配合した超高強度繊維補強コンクリート(UFC)⁶⁾が東京国際空港のD滑走路に向かう栈橋の床版に使用された⁷⁾。維持補修では、高速道路のRC床版および鋼床版の補強材として超速硬セメントや早強ポルトランドセメント(以下、早強セメントとする)に鋼繊維を配合した鋼繊維補強コンクリート(SFRC)⁸⁾、また超速硬セメント用いたSFRCに比して大幅なコスト縮減を図るために早強セメントまたは普通セメントに低収縮型早強性混和材と鋼繊維を配合した超早強SFRCの開発^{9),10)}もされている。一方、筆者らは、RC床版の建設時に早強セメントに鋼繊維を配合した(以下、早強SFRC)SFRC床版を提案し、輪荷重走行疲労実験による耐疲労性の評価と実用性を検証した¹¹⁾。本研究ではコスト縮減や材料調達の上易さから普通セメントに鋼繊維を配合した(以下、普通SFRC)SFRC床版について輪荷重走行疲労実験による耐疲労性の検証と、たわみと等価走行回数および破壊状況から実用性を評価する。

2. 使用材料および供試体概要

2.1 供試体の使用材料

(1) RC床版供試体

RC床版供試体のコンクリートは、普通セメントと5mm以下の砕砂および5mm~20mmの砕石、鉄筋は材料特性値が降伏強度368N/mm²、引張強度513N/mm²、ヤング係数200kN/mm²のSD295A、D10を使用した。コンクリートの示方配合を表-1示す。

(2) SFRC床版

SFRC床版に用いるコンクリートは、普通セメントと最大寸法15mmの粗骨材と5mm以下の砕砂および鋼繊維

はφ0.62mm、長さ30mmで混入量1.27Vol.%が配合され、普通SFRCの配合条件は超速硬SFRCと同等な強度が材齢28日において発現するものとした。なお、鉄筋はRC床版と同様とする。SFRCの配合を表-2に示す。

2.2 圧縮強度および割裂試験による引張強度

(1) RC床版コンクリート材料特性値

RC床版コンクリートの圧縮強度は表-3に示すように、材齢28日34.8N/mm²、実験時は35.0N/mm²であり、道示に規定するコンクリートの設計基準強度24N/mm²以上が確保されている。また、割裂試験による引張強度は3.1N/mm²である。ここで、岡村¹²⁾によるコンクリートの引張強度を式(1)により求める。

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

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)

岡村式(1)に実験時の圧縮強度35.0N/mm²を適用すると引張強度は2.9N/mm²となり、理論値がほぼ近似となる。ここでRC床版供試体の名称をRC-1、RC-2とする。

(2) 普通セメント用いたSFRCの材料特性値

普通SFRCの圧縮強度は、材齢28日で52.3N/mm²、疲労実験時は53.6N/mm²となり、RC床版コンクリートの1.53倍である。また、割裂試験による引張強度は5.4N/mm²となり、RC床版コンクリートの1.74倍である。なお岡村式(1)にSFRC圧縮強度 $f_c = 53.6\text{N/mm}^2$ を適用した引張強度は3.8N/mm²であり、鋼繊維の架橋効果により1.6N/mm²増大した。ここで、普通SFRCの床版供試体の名称をSFRC-普1、SFRC-普2とする。

2.3 供試体寸法および鉄筋の配置

RC床版供試体およびSFRC床版供試体の寸法は、2002年改訂の道示³⁾に準拠した1/2モデルとし、全長1,470mm、支間1,200mm、厚さ130mm、鉄筋は複鉄筋配置とした。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とする。有効高さは軸直角方向105mm、軸方向95mmである。供試体寸法および鉄筋配置を図-1に示す。

2.4 SFRC床版供試体の施工法

SFRC床版の施工法は、実施工を想定しておこなった。施工手順を写真-1に示す。鉄筋はRC床版供試体と同

Evaluating the fatigue resistance of SFRC slab with steel fibers to ordinary cement

Kiyoshi ITO, Tadashi ABA, Katuhiko FUKAGAWA and Ming-Chien HSU

様な寸法で加工した鉄筋を組立し、製作した型枠に鉄筋を設置する。次に、普通SFRCを表-2に示す配合で混練りする。本実験ではSFRC上面増厚補強などで使用されるジェットモビル車を用いて普通SFRCを混練りする。混練り後は直ちにSFRCを打ち込み、バイブレーターで締め固めを行い、表面仕上げ後に養生を行う。

3. 実験方法および等価走行回数

3.1 実験装置の概要

本装置は荷重装置、台車、駆動装置で構成され、荷重装置は輪荷重幅250mm、直径400mm、最大荷重は500kNで一定荷重および振動荷重(正弦波)で疲労実験が可能な装置である。台車は軸直角方向の支点間が1,400mm、軸方向の支点間は2,000mmである。駆動装置はモータの回転をクランク・アームにより台車を軸方向に往復運動させて走行を再現するものである。

3.2 輪荷重走行疲労実験

輪荷重走行疲労実験は、供試体の支間1,200mm、床版厚130mmにおいて荷重が軸方向支点間内全域に作用するように床版中央から±450mmの範囲(900mm)に輪荷重を連続走行させ、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、20,000回走行ごとに20kN増加させて供試体が破壊するまで荷重増荷させる。また、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、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。なお、耐疲労性の評価は等価走行回数により評価する。

3.3 輪荷重走行実験における等価走行回数

(1) RC床版

1) RC床版のS-N曲線

RC床版およびSFRC上面増厚補強したRC床版の疲労実験における等価走行回数の算定には、松井ら¹³⁾が提案するS-N曲線式の逆数が適用されている。前田らが提案するS-N曲線式は、鉄筋に丸鋼と一部に異形鉄筋を用いたRC床版(S39床版, S43床版)から評価され、式(2)として提案されている。

$$\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.520 \quad (2)$$

ここで、 P : 基準荷重、 P_{sx} : 押抜きせん断耐荷力

2) 等価走行回数

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。なお、式(2)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、実験装置の車輪幅(250mm)が道示に規定する輪荷重幅の50%のため60kN(=100×1.2×1/2)とする。また、式(2)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曲線式(2)より $m = 12.7$ を適用する^{13), 14)}。

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

ここで、 P : 基準荷重(=60kN)、 N_i : 実験走行回数(回)、

表-1 RC床版供試体の示方配合

スラブ厚 (cm)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)				SP (C×%)
			C	W	S	G	
8.0 ±2.5	53.0	45.0	302	160	803	1019	2.00

※C:セメント、W:水、S:細骨材、G:粗骨材

表-2 SFRC床版供試体の示方配合(普通セメント)

スラブ厚 (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					SP (C×%)	AE (C×%)
			C	W	S	G	SF		
8.0 ±2.5	39.5	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の圧縮強度

試験項目	材齢	RC床版	超速硬セメント	普通セメント (SFRC床版)
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	—	19.8N/mm ²
	48時間	20.6N/mm ²	—	30.7N/mm ²
	4日	23.1N/mm ²	59.6N/mm ²	33.8N/mm ²
	7日	28.5N/mm ²	—	41.9N/mm ²
	28日	34.8N/mm ²	—	52.3N/mm ²
	実験時	35.0N/mm ²	—	53.6N/mm ²
割裂試験	実験時	3.1N/mm ²	6.8N/mm ²	5.4N/mm ²

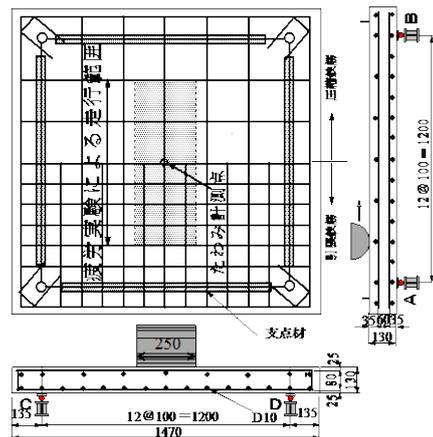


図-1 供試体寸法および鉄筋配置

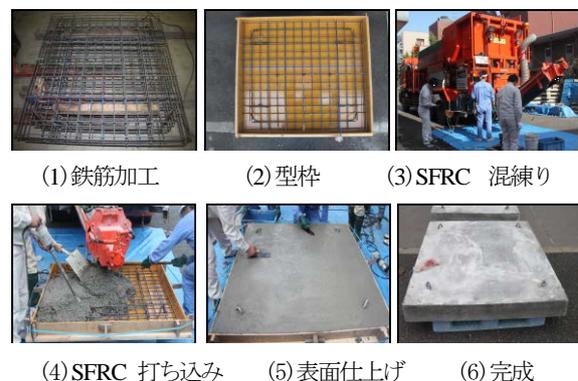


写真-1 施工手順

m : S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値(=12.7)

(2) SFRC床版

SFRCの寿命評価について、水越ら¹⁵⁾は疲労によるひびわれの進展状況を考慮した生存確率95%のS-N曲線

表-4 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	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				7,938,687	—
	等価走行回数	772,240	7,757,629			8,529,870		
SFRC-普1	実験走行回数	20,000	20,000	20,000	9,000		325,859,786	41.0
	等価走行回数	279,604	3,908,872	54,646,519	343,784,153	402,619,148		
SFRC-普2	実験走行回数	20,000	20,000	20,000	4,901		325,859,786	41.0
	等価走行回数	279,604	3,908,872	54,646,519	190,265,429	249,100,424		

式(4)を提案している。

$$S = -9.69 \log N + 102.79 \quad (4)$$

ここで、 $S(\%)$: 上限応力比 (=100×作用最大曲げ応力/静的曲げ強度) 式(3)におけるS-N曲線式は上限応力比(%)であることからS-N曲線の傾き(-0.0969)の逆数の絶対値は $m = 10.3$ である。SFRC床版における等価走行回数 Neq の算定には水越ら¹⁵⁾が提案する式(4)より、マイナー則に従うと仮定すると片対数であることから式(5)として与えられ、S-N曲線の傾きの逆数の絶対値 $m = 10.3$ を適用する。なお、式(4)における基準荷重 P はRC床版同様に60kNとする。また、式(4)における上限応力比 S_i の算定には、載荷荷重 P_i を基準荷重 $P=60kN$ で除して、その1/3とする⁷⁾。

$$Neq = \sum_{i=1}^n [10(S_i - S_0)/(1/m)] \times Ni \quad (5)$$

$$S_i = 1/3 \times (P_i/P)$$

ここで、 Neq : 等価走行回数(回)、 P_i : 載荷荷重(kN)、 P : 基準荷重(60kN)、 S_0 : 上限応力度(SFRCの静的強度の1/3と考える(=0.333))、 N_i : 実験走行回数(回)、 m : S-N曲線の傾きの逆数の絶対値(=10.3)

4. 実験結果

4.1 輪荷重走行実験における等価走行回数

(1)RC床版供試体

RC床版の等価走行回数は供試体RC-1が7.34×106回、RC-2は8.52×106回となり、平均等価走行回数は7.93×106回である。この平均等価走行回数を基準にSFRC床版の耐疲労性を評価する。なお、破壊形状は押抜きせん断破壊となっている。等価走行回数を表-4に示す。

(2)SFRC床版供試体

SFRC供試体の実験走行回数は荷重80kN、100kN、120kNで各20,000回走行し、荷重140kNで供試体SFRC-普1は10,500回、供試体SFRC-普2は5,100回走行後に破壊となり、等価走行回数は水越らが提案するSFRC床版の寿命推定におけるS-N曲線の傾きの逆数の絶対値を式(5)より、供試体SFRC-普1が402.61×106回、供試体SFRC-普2は249.10×106回、平均は325.85×106回となり、RC床版の平均等価走行回数に比して41.0倍となった。

4.2 たわみと等価走行回数の関係

(1) RC床版供試体

供試体RC-1の初期荷重80kN載荷時に0.95mm、20,000

回走行(等価走行回数772,240回)で2.5mmとなり、破壊時の等価走行回数は7.347×106回でたわみは6.8mmである。供試体RC-2は初期荷重80kN載荷時に0.97mm、20,000回走行(等価走行回数772,240回)で2.4mmとなり、破壊時の等価走行回数8.529×106回でたわみは7.3mmである。RC-1、RC-2共にたわみが3mmを超えた付近からたわみの増加が著しくなる。関係を図-2に示す。

(2) SFRC床版供試体

供試体SFRC-普1のたわみは、初期荷重80kN載荷時に0.75mm、20,000回走行で1.44mm、荷重100kNで20,000回走行後が2.34mm、荷重120kNで20,000回走行後は4.04mmとなるが急激な増加は見られず、荷重140kNから増加が著しくなり、破壊時は荷重140kN、9,000回走行(等価走行回402.619×106回)で6.46mmである。次に供試体SFRC-普2のたわみは、初期荷重80kN載荷時に0.74mm、20,000回走行後に1.45mm、荷重100kN、20,000回走行で2.26mm、荷重120kN、20,000回走行後が3.54mmである。供試体SFRC-普1と同様に4.0mm付近までは急激な増加はなく、荷重140kN以降から増加が著しく、走行回数5,100回(等価走行回数249.100×106回)で破壊に至り、たわみは5.36mmである。なお破壊は床版上面コンクリートの凹凸が著しく走行に支障が生じた段階とした。

5.3 破壊時のひび割れ状況

(1)RC床版

供試体RC-1、RC-2のいずれの供試体についても破壊時における上面の損傷状況は軸直角方向に貫通ひび割れが発生し、下面のひび割れ状況は配置された主鉄筋および配力筋付近に2方向ひび割れの発生と、輪荷重走行位置より45度にダウエル効果の影響によるはく離が広範囲に渡り、破壊は輪荷重走行中に押抜きせん断破壊となった。ひび割れ状況を写真-2に示す。

(2)SFRC床版

供試体SFRC-普1、SFRC-普2の破壊時の上面の損傷は、輪荷重走行面に3.0~4.0mmの程度の凹凸が発生により走行不能となり実験終了したが、貫通ひび割れの発生は見られない。また下面のひび割れ状況は、2方向のひび割れが発生しても、輪荷重直下から45度底面にダウエルの影響によるひび割れは見られない。よって、SFRC床版は鋼繊維の架橋効果により斜めひび割れが抑制され、押抜きせん断破壊とならず、曲げの影響に

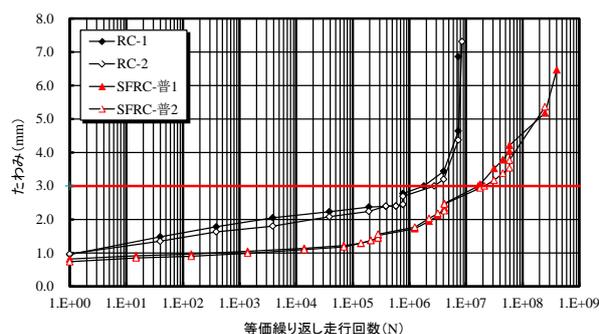


図-2 たわみと等価走行回数

よる2方向のひびわれが進展する結果となった。

5. まとめ

道路橋床版の長寿命化を図るために従来のRC床版に変わるSFRC床版の輪荷重走行疲労実験を行った結果、以下の知見が得られた。

①圧縮強度および割裂試験による引張強度については、普通SFRCの配合を従来からRC床版および鋼床版の補強材として使用されている超速硬SFRCの最終強度を同程度とした結果、高い圧縮強度が得られた。

②等価走行回数は、RC床版に比して普通SFRC床版は41倍となり、耐疲労性が向上される。

③たわみと等価走行回数の関係については、RC床版のたわみは3.0mm(床版支間Lの1/400)に達した後に急激に増加するが、SFRC床版ではたわみが4.0mm(床版支間Lの1/300)付近までは鋼繊維の架橋効果および高圧縮強度により急激な増加が見られない。よって、RC床版は床版支間Lの1/400に達した付近が補強時期として提案⁸⁾されているが、SFRC床版は床版支間Lの1/350付近が補強時期と考えられる。

④破壊状況は、RC床版では2方向ひび割れが発生し、最終的には押抜きせん断破壊となっている。一方、SFRC床版は鋼繊維によりひび割れの進展が抑制され、2方向のひび割れが発生するものの押抜きせん断に至らない。

本研究における普通SFRCは圧縮強度、引張強度も高く、鋼繊維の架橋効果による耐疲労性の向上が確認された。今後は経済性も含めて更なる検討を図りたい。

「参考文献」

- 1). 日本道路協会：道路橋示方書・解説I，II，III，2002.
- 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，2013.11，pp.373-381.
- 3). 小森篤也，阿部忠，水口和彦，岩崎正二，小林朗，張出部を有する実橋RC床版のCFSS上面接着補強法に

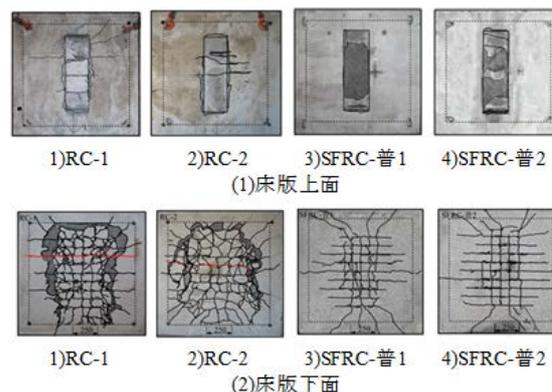


写真-2 RC床版およびSFRC床版の損傷状況

関する研究，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，2013.11，pp.397-404.

4). 土木学会，PART-B 構造物設計指針(合成床版)，1997.

5). 竹内智志，本間進，城島利隆，新田善弘，小島実，鋼コンクリート合成床版橋・常盤橋の設計と施工，橋梁と基礎3011，2011.

6). 土木学会，コンクリートライブラリー「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)」，(2004)

7). 武者浩透，大竹明朗，渡辺典男，大熊光，世界初となるUFCの大規模適用と量産化システムの開発，大成建設技術センター報，第46号，2013，pp.1-10.

8). 阿部忠，木田哲量，高野真希子，小森篤也，児玉孝喜，輪荷重走行疲労実験におけるRC床版上面増厚補強法の耐疲労性の評価法，構造工学論文集，Vol. 56A，2010.3，pp. 1270-1281.

9). 阿部忠，川井豊，山下雄史，一瀬八洋，普通セメントに低収縮型早強性混和剤を配合したSFRC舗装による鋼床版の応力低減効果，土木学会論文集E1，Vol.71，No.2，2015.7，pp.47-62.

10). 渡辺隆史，藤田智一，酒井潤三郎，鎌田修，阿部忠，佐藤常人，低収縮型早強性SFRCを用いた鋼床版の補強工事，雑誌舗装，Vol.50 No.8，2015，pp10-15.

11). 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，第八回道路橋床版シンポジウム論文報告集，2014.10，pp.75-80.

12). 岡村甫：コンクリート構造物の限界状態設計法，コンクリートセミナー4，共立出版，1979，pp. 17-18.

13). 松井繁之：道路橋床版設計・施工と維持管理，森北出版，2007

14). 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，2012，pp.263-268.

15). 水越睦視，松井繁之，東山浩士，内田美生：SFRCの曲げひび割れ進展寿命の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.3，2000，pp.199-204.