論文

普通セメントに鋼繊維を配合したSFRC床版の耐疲労性の評価

阿部　忠*，伊藤清志**，深川克彦*** ，澤野利章****

* 博(工)，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）
** 日本大学大学院生産工学研究科（〒 275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1）
*** 株式会社ケミカル工事，特殊機工部（〒 114-0013 東京都北区東田端 1-7-3）
****工博，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）

本研究は，床版の耐久性の向上を図るために，普通セメントに鋼繊維を配合した SFRC 床版の輪荷重走行疲労実験を実施し，耐疲労性を評価した．その結果，SFRC 床版の等価走行回数は RC 床版の等価走行回数に比して 59.8 倍となった．これは，普通セメントに鋼繊維を配合した SFRC の割裂試験による引張強度 5.4N/mm^2，一面せん断試験によるせん断強度 10.5N/mm^2 と高く，輪荷重の走行により発生する 2 方向のひび割れやたわみの増加が抑制された結果である．よって，普通セメントを用いた SFRC 床版は高耐久性を有する床版であり，実用的であると考えられる．

キーワード　*RC 床版，SFRC 床版，引張強度，せん断強度，耐疲労性*

1. はじめに

近年，道路橋 RC 床版は老朽化により，床版取り替えやコンクリート床版打換えなど，大規模な補強対策が実施されている．この様な現状を踏まえて従来の RC 床版に変わる長期間メンテナンスフリーの実現を目指した床版構造や新材料の開発が進められている．たとえば，コンクリート材料においてはプレミックス材に鋼繊維やビニロン繊維を配合した圧縮強度が 150N/mm^2 ～ 200N/mm^2 を発現する超高強度繊維補強コンクリート（UFC）を用いた床版が開発されている[1),2)]．また，超速硬セメントに鋼繊維を配合した鋼繊維補強コンクリート（SFRC）は，3 時間で道路橋示方書・同解説[3)]（以下，道示とする）に規定する設計基準強度 24N/mm^2 を発現するコンクリートであり，高速道路などの RC 床版や鋼床版の補強材[4)]として使用されている．UFC や SFRC は，いずれも高価な材料であることから，一般的には高速道路での使用例が多い．一方，地方公共団体が管理する道路橋床版には安価な材料が要求されている．そこで筆者らは，比較的安価な SFRC 材として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 SFRC 材で製作した RC 床版を提案し[5)]，輪荷重走行疲労実験により耐疲労性を評価している．その結果，SFRC 床版の等価走行回数は，同一寸法を有する 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となった．しかし，筆者らが提案した早強セメントに鋼繊維を配合した SFRC の強度発現は材齢 7 日で 40N/mm^2 を目標としているが，新設床版においては施工期間が長く，早強セメントを用いる必要が無い場合もある．また，地域によっては早強セメントの手配が困難な時期もある．

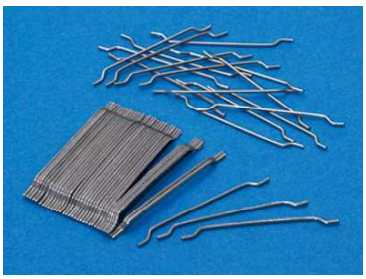
そこで本研究では，橋梁床版の長寿命化を図るために普通セメントに鋼繊維を配合した SFRC を用いた床版，すなわち SFRC 床版の耐疲労性を評価する．本実験に用いる供試体は，道示の規定に基づいて設計した RC 床版の 1/2 モデルとした RC 床版供試体と，RC 床版供試体と同一寸法とした SFRC 床版供試体を製作し，輪荷重走行疲労実験における RC 床版供試体の等価走行回数を基準に SFRC 床版供試体の耐疲労性および破壊状況から，本提案する普通セメントを用いた SFRC 床版の実用性を評価する．

2. 使用材料・供試体寸法および補強方法

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には，普通セメントと 5mm 以下の砕砂および 5mm ～ 20mm の砕石を使用した．ここで，示方配合を表－ 1 示す．また，鉄筋は



写真－1　ドラミックス形鋼繊維

表－1　RC 床版供試体の示方配合

スランプ (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　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	35.0	368	513	200
SFRC	53.6	368	513	200

表－3　SFRC 床版供試体の示方配合

スランプ (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

表－4　強度発現

試験項目		RC床版	普通セメント (SFRC床版)
圧縮強度	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	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	5.4N/mm^2

SD295A，D10 を使用した．コンクリートおよび鉄筋の材料特性値を表－2 に示す．

(2) SFRC床版

SFRC 床版のコンクリートには，普通セメントと 5mm 以下の砕砂および 5mm ～ 15mm の砕石を使用した．また，鋼繊維にはφ 0.62mm，長さ 30mm のドラミックス型鋼繊維を混入量 1.27Vol.%で配合した（写真－ 1）．ここで，普通セメントに鋼繊維を配合した SFRC の配合を表－ 3 に示す．また，鉄筋は RC 床版供試体と同様に D10 を用いた．鉄筋の材料特性値は表－ 2 に併記する．また，要求性能は材齢 28 日で圧縮強度 40N/mm^2 とし，その配合条件を表－ 4 に示す．RC 床版コンクリートの圧縮強度は 35.0N/mm^2，普通セメントを用いた SFRC の材令 28 日の圧縮強度は 52.3N/mm^2 である．

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

2.2　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

(1) 割裂試験による引張強度

1) 試験体寸法

コンクリート標準示方書[6]における割裂引張試験は JIS A 1113 に基づいて実施した．供試体は，JIS A 1132 に基づいてφ 100mm×200mm の円柱を 3 体製作した．

2) 実験方法

割裂試験における荷重速度は，引張応力度の増加率が 0.06 ± 0.04N/mm^2 で実施した。引張強度は式(1)より算出する．

$$f_t = 2P/\pi dL \qquad (1)$$

ここに，f_t：引張強度（N/mm^2），P：最大荷重（N）

3) 引張強度

割裂試験による引張強度を表－ 5 に示す．RC 床版に用いたコンクリートの引張強度の平均は 3.1N/mm^2 ある．また，SFRC の割裂試験による引張強度の平均は 5.4N/mm^2 である．

一方，コンクリートの割裂試験による引張強度の算定には岡村式[7]が用いられ，式(2)として与えられている．

$$\sigma_t = 0.269\ f'_c{}^{(2/3)} \qquad (2)$$

ここで，f'_c：コンクリートの圧縮強度(N/mm^2)

RC 床版コンクリートの圧縮強度が 35.0N/mm^2 の場合の理論引張強度（式(2)）は 2.9N/mm^2 であり，実験値とほぼ近似している．一方，SFRC の圧縮強度 53.6N/mm^2 であり，理論引張強度を算定すると 3.8N/mm^2 である．実験値は 5.4N/mm^2 であることから鋼繊維を混入量 1.27Vol.%で配合したとから 1.6N/mm^2 引張強度が増大したことになる．よって，鋼繊維を配合することで引張強度が大幅に向上する結果が得られた．

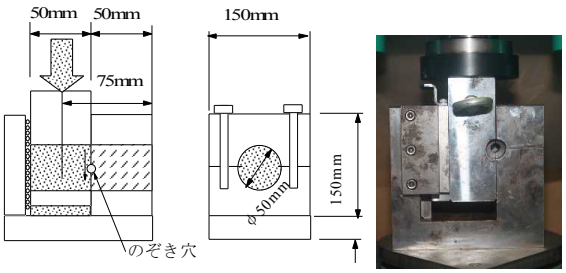
(2) 一面せん断試験によるせん断強度

1) 試験体寸法

一面せん断試験に用いる試験体は，φ 50mm×100mm の円柱を 3 体を製作した．

2) 実験方法

一面せん断試験は，阿部ら[8]が開発したモードⅡ型（縦ずれ）のせん断試験装置を用いて実施した．ここで，阿部らが開発したモードⅡ型の一面せん断試験装



(1) 実験装置の寸法　　(2) 載荷状態

図－5　一面せん断試験

置およびせん断面を図－5に示す.

一面せん断試験は，コンクリートの圧縮載荷法 JIS A 1108 の規定に基づき，加圧速度を毎秒 0.6N/mm^2 で行った．また，モードⅡ型一面せん断試験装置を用いて，供試体を設置する（図－5）.

一面せん断試験法は，モードⅡ型による一面せん断試験によって得られるコンクリートのせん断応力度をせん断強度 τ_{max} と定義し，式(2)より算出する.

$$\tau_{max} = P/A_s \qquad (3)$$

ここで，τ_{max}：一面せん断応強度（N/mm^2），P：破壊荷重，A_s：一面せん断破壊面積（mm^2）

3）一面せん断強度

RC 床版に用いたコンクリートの一面せん断試験によるせん断強度の平均は 6.1N/mm^2 である．また，SFRC のせん断強度は 10.5N/mm^2 である．一面せん断試験によるせん断強度を表－5に記した.

一方，せん断強度の算定式として阿部[8]らは式(4)を提案している.

$$\tau_{max} = 0.688 f_c^{0.610} \leqq f_c = 80\text{N/mm}^2 \qquad (4)$$

ここで，f_c：コンクリートの圧縮強度(N/mm^2)

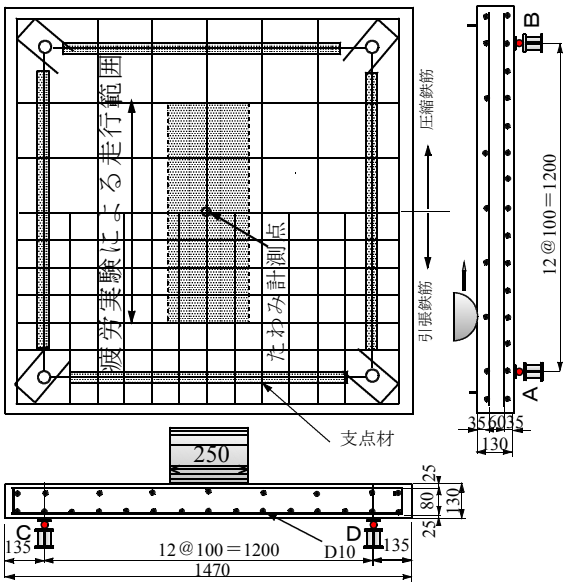
理論によるせん断強度（式(4)）は，RC 床版コンクリートの圧縮強度が 35.0N/mm^2 の場合が 6.0N/mm^2 であり，実験値と近似している．一方，SFRC の圧縮強度 53.6N/mm^2 の場合のせん断強度（式(4)）は 7.8N/mm^2 であり，せん断強度 2.7N/mm^2 増大したことになる．よって，鋼繊維を配合することでせん断強度が大幅に向上する結果が得られた.

以上より，RC 床版の押抜きせん断耐荷力算定式に適用される引張強度およびせん断強度が高いことから，押抜きせん断耐荷力，併せて耐疲労性の向上が図られることになる.

3. 供試体寸法および鉄筋の配置

3.1　RC床版供試体

RC 床版供試体は 2002 年改訂の道示[3]に規定される T 荷重幅 500mm に対して本実験装置の輪荷重幅が 250 mm であり，道示の 1/2 の寸法となる．また，実験に用いる供試体は支間 2.4m，大型車輌の計画交通量 2,000 台として設計し，その 1/2 モデルとする．よって，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 である．ここで，供試体寸法および鉄筋配置を図－2に示す.



図－2　供試体寸法および鉄筋配置

3.2　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．よって，使用鉄筋および配置も図－2に示す寸法とする.

4. 実験方法および等価走行回数

4.1　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 ±450mm の範囲（900mm）に輪荷重を連続走行させる実験である．輪荷重走行疲労実験の荷重載荷方法は，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，20,000 回走行毎に 20kN 増加し，供試体が破壊するまで 20,000 回走行ごとに荷重を増加した．たわみの計測は床版中央とする．たわみの計測は 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．計測点は図－2に併記した．なお，SFRC 床版の耐疲労性の評価は，等価走行回数を算定して評価する.

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					
	等価走行回数	772,240	7,757,629			8,529,870		
SFRC-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(式(3))	772,240	13,137,391	133,126,563	424,177,553	571,213,748		
SFRC-2	実験走行回数	20,000	20,000	20,000	4,901			
	等価走行回数(式(3))	279,604	13,137,391	133,126,563	230,988,243	378,024,438		

4.2　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 万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(5)で与えられる．式(5)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 1994 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(5)における S-N 曲線の傾きの逆数 m には，松井ら[9]が提案する S-N 曲線の傾きの逆数 m ＝ 12.7 を適用する．

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^{n} (P_i/P)^m \times n_i \qquad (5)$$

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）

5. 実験結果および考察

5.1　輪荷重走行実験における等価走行回数

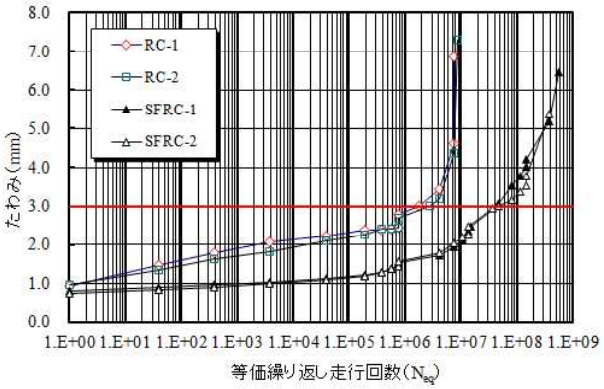
輪荷重走行疲労実験における等価走行回数を表－ 6 に示す.

(1) RC床版供試体

RC 床版供試体は荷重 80kN で 20,000 回，100kN で 10,009 回走行後，押抜きせん断破壊となっている．等価走行回数は，供試体 RC-1，2 で，それぞれ 7.34×10^6 回，8.52×10^6 回である．平均等価走行回数は 7.93×10^6 回であり，この平均等価走行回数より SFRC 床版の耐疲労性を評価する.

(2) SFRC床版供試体

SFRC 床版供試体は荷重 80kN，100kN，120kN ごとに 20,000 回走行し，供試体 SFRC-1 は 140kN で 9,000 回，供試体 SFRC-2 は 140kN で 4,901 回走行後に押抜きせん断破壊となった. 等価走行回数は, 供試体 SFRC-1 が 571.21×10^6 回，供試体 SFRC-2 は 378.02×10^6 回であり，平均等価走行回数は 474.61×10^6 回である．供試体 SFRC-1 の等価走行回数と RC 床版の等価走行回数を比較すると 72.0 倍，供試体 SFRC-2 は 47.6 倍であり，平均が 59.8 倍となり，疲労寿命が大幅に向上する結果となった．これは，輪荷重の走行による床版下面に発生する曲げ引張に対し，鋼繊維を配合することでコンクリートの引張強度や，斜めひび割れに対するせん断強度も向上し，ひび割れが抑制され，疲労寿命の向上に大きく寄与したものと考えられる.



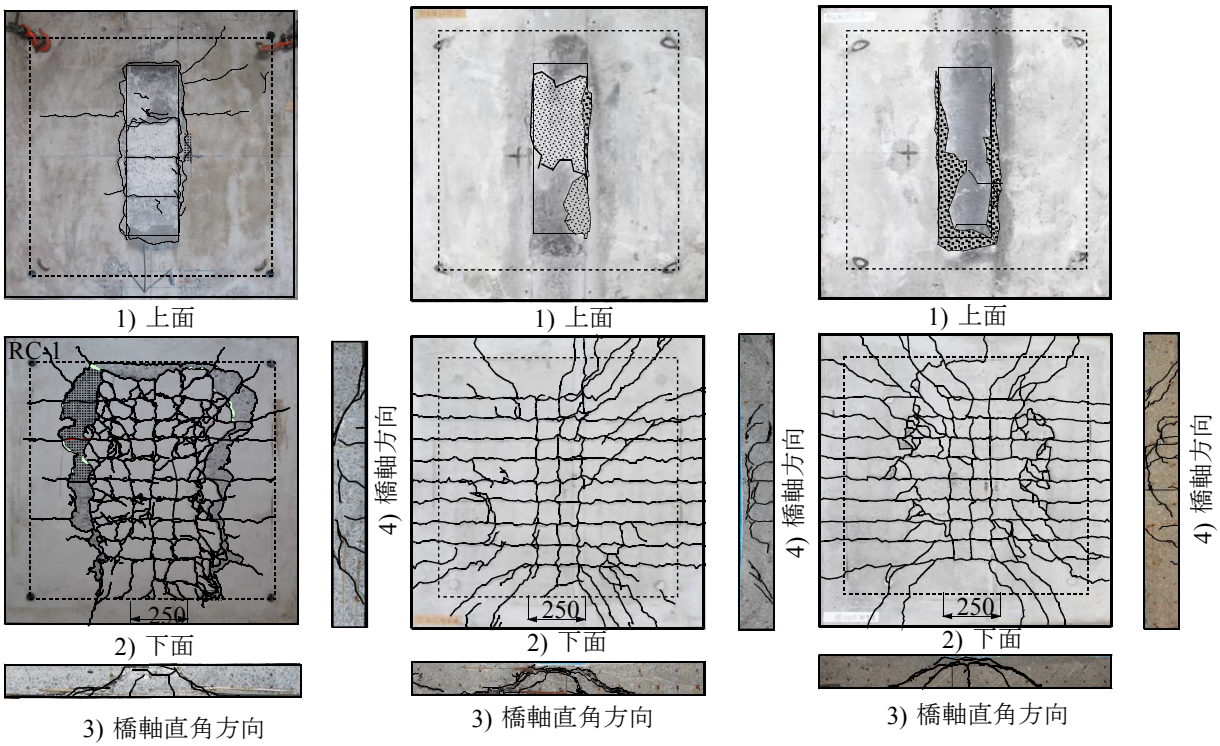
図－3　たわみと等価走行回数

5.2　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－ 3 に示す．なお，実験におけるたわみは各計測回数における最大たわみとする。

(1) RC床版供試体

RC 床版供試体のたわみは，RC-1 の初期荷重 80kN 載荷時は 0.95mm，その後の走行を繰り返すことにより除々に増加し，3mm に達した時点の等価走行回数は 1.81×10^6 回である．破壊時のたわみは 6.8mm，等価走行回数は 7.34×10^6 回である．次に，供試体 RC-2 の初期荷重 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 回であり，破壊時のたわみは 7.3mm，等価走行回数は 8.52×10^6 回である．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 SFCR 床版の効果を検証する.



(1) RC-1　　(2) SFRC-1

図－4　RC 床版および SFRC 床版のひびわれ状況

(2) SFRC床版供試体

SFRC 床版供試体のたわみは，SFRC-1 の初期荷重 80kN 載荷時は 0.82mm，その後の荷重増加と等価走行回数の増加により緩やかに増加するが，RC 床版供試体に比して小さく，急激な増加も見られない．3.0mm に達した時点の等価走行回数は 45.10×10^6 回であり，RC 床版供試体のたわみが 3.0mm に達した時点の等価走行回数平均と比較すると 19.7 倍となった．たわみの増加が 4.0mm 付近までは急激な増加は見れない．これは，鋼繊維を配合したことによりひび割れ進展が抑制され，同時にたわみの増加が抑制されている．破壊時のたわみは 6.8mm で等価走行回は 571.16×10^6 回である．　次に，SFRC-2 は初期荷重 80kN 載荷時が 0.74mm，3.0mm に達した時点の等価走行回数は 47.5×10^6 回となり，RC 床版供試体の等価走行回数の平均の 20.7 倍である．たわみが 3.5mm 付近までは急激なたわみの増加が見られない．破壊時のたわみは 5.4mm で等価走行回数は 377.98×10^6 回である．

以上のように，SFRC 床版ではたわみが床版支間 L の 1/400 に達した後も急激な増加が見られない．これは SFRC 床版に配合された鋼繊維が引張強度を分担し，ひび割れの発生とたわみの増加が抑制され，耐疲労性が大幅に向上する結果となった．

5.3　破壊時のひび割れ状況

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 床版供試体のひび割れ状況を図－ 4 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－ 4(1)1)に示すように軸直角方向にひび割れが発生し，貫通ひび割れとなっている．また，輪荷重走行面の損傷は著しい．次に，床版下面のひび割れ状況は図－ 4(1)2)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渡って発生している．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．

次に，輪荷重走行疲労実験終了後の床版供試体を橋軸直角方向および橋軸方向に切断した写真を図－ 4(1)3)，4)に示す．橋軸直角方向および橋軸方向におけるひび割れは，輪荷重の端部からほぼ 45 度で押抜きせん断破壊となっている．また，軸方向は，圧縮鉄筋付近に水平ひび割れが発生している．

(2) SFRC床版

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図－ 4(2)1)に示すように，走行面に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，床版下面のひび割れ状況は図－ 4(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い．また，輪荷重走行位置から 45 度

の底面の押抜きせん断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減少している．これは，鋼繊維の配合により，せん断強度および引張強度が斜めひび割れや下面のひび割れの伸展を抑制したものと考えられる．しかし，輪荷重走行回数の増加に伴い，本実験では荷重 140kN で疲労実験を行った時点から，供試体上面の輪荷重走行範囲のコンクリート面が輪荷重と鋼板の支圧と摩耗による凹凸が著しくなり，一定な荷重が振動荷重となり，衝撃が作用し，実験を終了した．なお，この今後の課題でもあるが，輪荷重直下のコンクリート面の凹凸を平滑に補修することで，さらに等価走行回数が向上するものと考えられる．

次に，輪荷重走行疲労実験終了後の床版供試体を橋軸直角方向および橋軸方向に切断した写真を図－ 4(2)3)および図－ 4(2)4)に示す．SFRC 床版は，RC 床版供試体 RC-1 に比して等価走行回数が 59.8 倍になるにもかかわらず，床版下面のひび割れは輪荷重走行範囲に集中し，ダウエルの影響が少ない．よって，破壊は輪荷重の摩耗による上面損傷が主であるが，最終的には押抜きせん断破壊となった．

6. まとめ

(1)超速硬セメントの SFRC の混練りは専用のジェットモービル車を用いている．本実験供試体の混練りもジェットモービル車を用いたが，普通セメントを用いた場合は生コンプラントより出荷した後にアジテータトラックに直接鋼繊維を投入，攪拌により混練りが可能となることから，現場の状況に併せて選択できる．

(2)本提案する普通セメントを用いた RC 床版は，道示に規定する設計基準強度 24N/mm^2 を確保できる材齢は 7 日以降である．これに対して本配合条件の SFRC の圧縮強度は材齢 4 時間で 30N/mm^2 確保されることから養生期間の短縮が可能の短縮でき，その後の橋面作業ができることから工程短縮が図れる．

(3)普通セメントに鋼繊維を配合した SFRC は割裂試験による引張強度が 5.4N/mm^2 となり，同一強度を有するコンクリートの理論による引張強度の 1.42 倍となった．また，一面せん断強度も 10.5N/mm^2 となり，普通コンクリートの理論せん断強度の 1.35 倍となり，押抜きせん断耐荷力が向上し，併せて耐疲労性の向上も図られることになる．

(4)SFRC 床版は RC 床版の等価走行回数の 59.8 倍となり，耐疲労性が大幅に向上する結果が得られた．これは，鋼繊維を配合することで引張強度およびせん断強度が向上し，輪荷重走行による押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．

(6)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なれず，耐疲労性が大幅に向上する結果となった．これは，鋼繊維を配合により，材料試験の結果から見られるように引張強度およびせん断強度が高く，耐疲労性が向上したものと考えられる．

(6)RC 床版は，ダウエルの影響を受ける範囲は完全に押抜きせん断破壊形状を示しているが，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，鋼繊維の配合により引張強度，せん断強度が向上したことからはく離に至らず，押抜きせん断破壊となった．

参考文献

1) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)，2008.
2) 田中良弘，高倉克彦，阿部忠，木田哲量，前堀信平：超高強度繊維補強コンクリート床版の輪荷重走行に対する疲労特性，第 5 回道路橋床版シンポジウム講演論文集（土木学会），pp. 149−154, 2006.
3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ，2002.
4) 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，pp. 1270-1281，2010.
5) 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.
6) 土木学会：コンクリート標準示方書.
7) 岡村甫：コンクリート構造の限界状態設計法，コンクリーセミナー4，pp. 17-18，共立出版，1979.
8) 阿部忠，木田哲量，高野真希子，川井豊：道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐荷力および耐疲労性の評価，土木学会論文集 A1，pp.39-54，2011.1
9) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理，北森出版，2007.

（2016 年 7 月 18 日受付）