

論文

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

阿部 忠*, 伊藤清志**, 深川克彦***

Tadashi Abe, Kiyoshi Ito, and Katsuhiko Fukagawa

*博(工) 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)

**鹿島道路(株) 生産技術本部技術部(〒 112-8566 東京都文京区後楽 1-7-27)

***(株)ケミカル工事 特殊機工部(〒 114-0013 東京都北区東田端 1-7-3)

近年, 道路橋 RC 床版は疲労損傷や材料の劣化により補強対策や床版取替が行われている. これに伴って耐久性を有する床版の開発も進められている. そこで本研究は, 床版の耐久性の向上を図るために, 鋼繊維補強コンクリート (SFRC) で製作した床版, すなわち SFRC 床版を提案し, 実用性を評価するために輪荷重走行疲労実験を実施した. その結果, SFRC 床版供試体には早強セメントに鋼繊維を配合することにより, 普通コンクリートで製作した RC 床版供試体に比して 64.4 倍の等価走行回数が得られた. また, 鋼繊維の架橋効果によりたわみやひずみの増加が抑制されている. よって, SFRC 床版は高耐久性を有する床版であることから道路橋床版として実用的であると考えられる.

キーワード: RC 床版, SFRC 床版, 耐疲労性, 維持管理

1. はじめに

近年, 高度経済成長期に建設された道路橋は, 橋梁の寿命と言われている建設後 50 年を超え, 老朽化の増大に伴う維持管理が重要な課題となっている. とくに, RC 床版においては, 橋梁部材の中で最も過酷な荷重条件となり損傷が著しい. よって, 耐荷力性能および耐疲労性の図るために, 従来の床版構造と異なる耐荷力性能を有する床版構造および材料が開発が進められている. たとえば, 鋼板パネルを鋼桁上に敷設した後, 鉄筋を配筋し, 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”で接合し一体として荷重に抵抗する合成床版などが提案されている^{1), 2)}. また, 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超高強度繊維補強コンクリート (Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete (UFC))³⁾や, 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 (Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC))⁴⁾が床版材料として使用されている. UFC は, プレミックス材にビニロン繊維や鋼繊維を配合したコンクリートであり, ビニロン繊維で補強した場合の圧縮強度は 150N/mm^2 , 鋼繊維配合した場合は 200N/mm^2 を有し, 普通コンクリートの, それぞれ 7.5 倍, 8.3 倍の強度を有している. 鋼繊維配合した UFC を用いた床版については, 引張材に PC 鋼線が配置されている⁵⁾. また, UFC パネルを鋼桁上に敷設した後,

鉄筋を配筋し, コンクリートを打設する合成床版が提案され, 耐疲労性が評価されている⁶⁾. 一方, SFRC は高速道路の RC 床版および鋼床版の補強材として採用されており, 施工時間の制約により, セメントには超速硬セメントが採用され, 材齢 3 時間で設計基準強度である 24N/mm^2 を確保する材料である. しかし, UFC や SFRC は高価な材料であることから特殊な環境条件で使用されているのみである. とくに, SFRC は補強材として開発されたコンクリート材であることから, 一般構造物としてはトンネルのセグメントに使用されているものの, 橋梁構造材料には余り使用されていないのが現状である. そこで, 橋梁床版の長寿命化を図るためのコンクリート材料に SFRC を用いた床版, すなわち道路橋 SFRC 床版を提案を提案する. しかし, 道路橋床版としての実用性を評価するためには, 耐疲労性の評価が重要となる.

そこで本研究は, 2002 年改訂の道示⁸⁾に準拠した RC 床版構造の床版に SFRC を適用した SFRC 床版を提案する. 本実験に用いる供試体は道示より RC 床版の 1/2 モデルとした寸法および鉄筋量を配置し, SFRC は早強セメントを適用する. また, 耐疲労性を評価するために, 同一寸法を有する RC 床版も製作した. SFRC 床版の耐疲労性の評価は輪荷重走行疲労実験を実施し, RC 床版供試体の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からは本提案する SFRC 床版の実用性を検証する.

表-1 RC床版供試体の示方配合

スランブ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 Mity 150
			C	W	S	G	
8.0 ±2.5	39.2	40.0	403	158	726	1094	4.0

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	54.3	368	513	200

表-3 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 ³)					SP (B×%)	AE (B×%)
			C	W	S	G	SF		
8.0 ±2.5	41	53.9	427	175	881	780	120	2	0.004

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の砕石を使用した。示方配合を表-1示す。また、鉄筋はSD295A, D10を使用した。ここで、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、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, 100kg/m³の混入率で配合した。また、早強ポルトランドセメントはセメント構成化合物のうちエーライト(C3S)の含有量が普通ポルトランドセメントに比して多く、比表面積が高いことから材齢7日で普通ポルトランドセメントの材齢28日強度に匹敵する高強度が得られる。また、初期強度発現性に優れるとともに長期材齢においても強度発現性に優れ、普通ポルトランドセメントを上回る高強度を発現し、さらに、セメントの硬化が早く、初期の強度発現性が大きいことから養生期間が短縮されるなどの特徴がある。ここで、また、SFRCの示方配合を表-3に示す。次に、鉄筋はRC床版供試体と同様にD10を用いた。早強ポルトランドセメントを用いたSFRCの材齢4日の強度は52.6N/mm², 材齢7日の圧縮強度は54.3N/mm²である。なお、本実験では早強ポルトランドセメント使用したことから材齢4日の強度は普通ポルトランドセメントを用いたRC床版コンクリートの圧縮強度の1.5倍である。よって、材齢4日後には型枠の撤去も可能となり、短期施工が可能となる。

2.2 供試体寸法および鉄筋の配置

RC床版供試体は2002年改訂の道示⁸⁾に準拠し、その1/2モデルとする。よって、RC床版およびSFRC

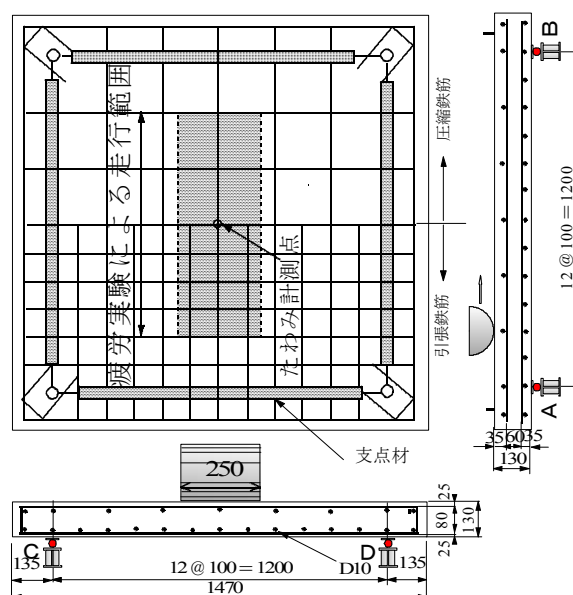


図-1 供試体寸法および鉄筋配置

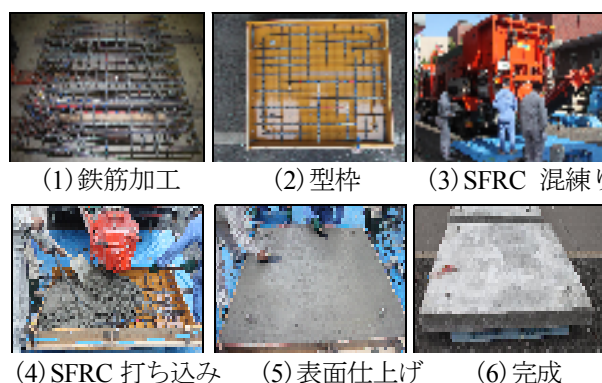


図-2 施工手順

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、図-1に示すRC床版寸法と同様とする。よって、床版全長は全長1,470mm, 支間1,200mm, 厚さ130mm, 鉄筋にはD10を用い、複鉄筋配置とした。

2.3 SFRC床版供試体の施工法

SFRC床版供試体の施工法は、実橋床版としての施工を想定し、また、RC床版の施工法に近い条件での施工法で供試体を製作する。ここで、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))。次に、SFRCを表-3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専用のミキサー車であるジェットモバイル車を用いた(図-2(3)). これは、一般的に SFRC 床版施工では超速硬セメントが使用され、施工現場での SFRC の製造には専用のジェットモバイル車が用いられていることから同様な施工条件とする。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、表面仕上げして養生を行う(図-2(5)). なお、本実験では早強セメントを適用することで早期に型枠の撤去が可能となり、実橋の施工においても工期の短縮が期待できるものと考えられる。また、凍害等により砂利化した劣化床版のコンクリート打換補強においても、超速硬セメント、或いは早強セメントを用いることで工期短縮が可能となる。

3. 実験方法および等価走行回数

3.1 実験装置の概要

本実験には、輪荷重走行振動疲労試験装置を用いる。ここで、輪荷重走行振動疲労試験装置を写真-1に示す。本装置は荷重載荷装置、台車、駆動装置で構成されている。荷重載荷装置、すなわち輪荷重幅は 250mm、直径 400mm であり、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 1400mm、軸方向の支点間は 2000mm である。疲労実験は駆動装置であるモータの回転とクランク・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、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(写真-1)。これは、本供試体の支間が 1200mm であるが、床版厚が 130mm であり、荷重が 45 度に分布することを考慮すと軸方向支点間内全域に荷重が分布するものとなる。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 回走行ごとに 20kN ずつ増加し、供試体が破壊するまで 20,000 回走行ごとに荷重を増加する。たわみ、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



写真-1 実験装置

測する。たわみひずみ計測は 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。計測点は床版中央のたわみおよび床版中央に配置した主鉄筋の中央とする。なお、SFRC 床版の耐疲労性の評価は等価走行回数を得て評価する。

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、2 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(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 であり、道示に規定する輪荷重幅の 50% であることから 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^{9),10)}。

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

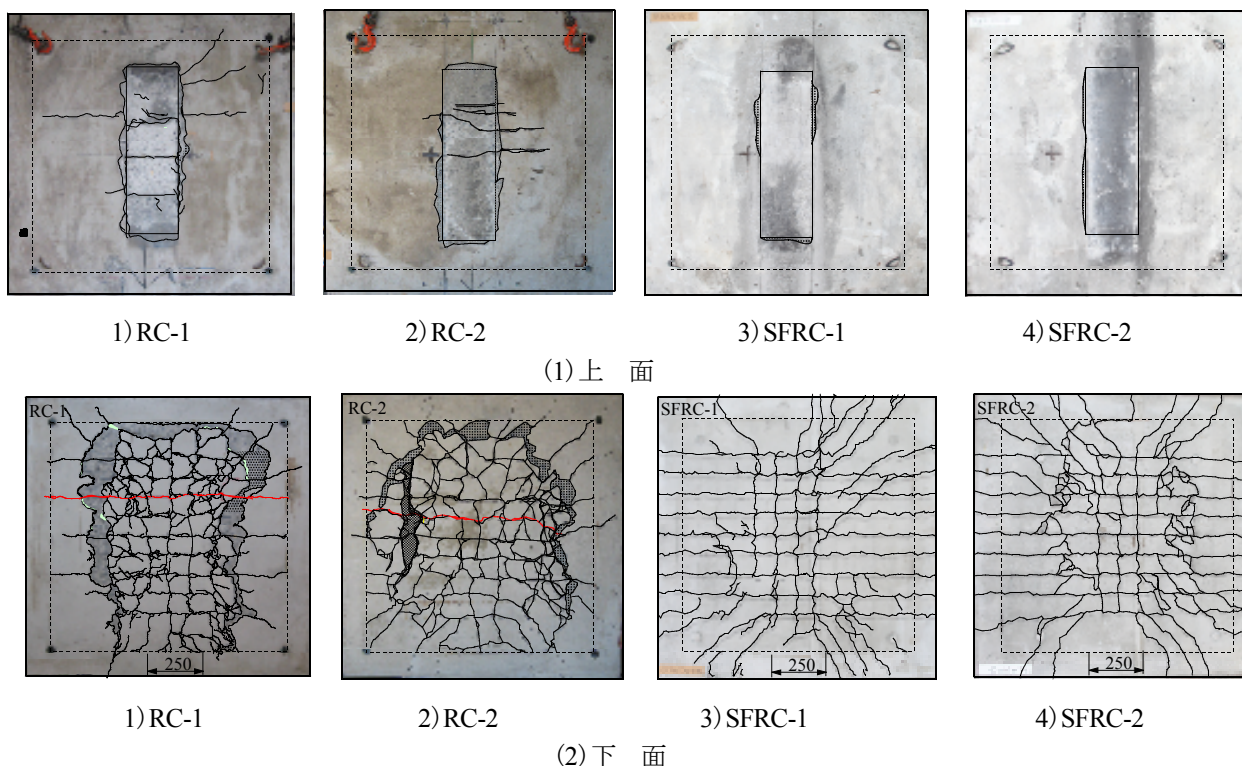
ここで、 N_{eq} : 等価走行回数(回)、 P_i : 載荷荷重(kN)、 P : 基準荷重(= 60kN)、 N_i : 実験走行回数(回)、 m : S-N 曲線の傾きの逆数(= 12.7)

4. 実験結果および考察

4.1 輪荷重走行実験における等価走行回数

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(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				7,938,687	—
	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	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-2	実験走行回数	20,000	20,000	20,000	5,100		514,656,741	64.8
	等価走行回数	772,240	13,137,391	133,126,563	240,367,280	387,403,475		



図ー 2 RC 床版および SFRC 床版の破壊状況

輪荷重走行疲労実験における等価走行回数を表ー 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、RC-1 は 100kN で 10,009 回、RC-2 は 11,810 回走行後に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 で、それぞれ 20,000 回走行し、供試体 SFRC-1 は 140kN で 10500 回、供試体 SFRC-2 は 140kN で 5,100 回走行後に押抜きせん断破壊に至っている。等価走行回数（式(1)）は、供試体 SFRC-1 が 641.91×10^6 回、供試体 SFRC-2 は 387.30×10^6 回であり、この平均等価走行回数 514.65×10^6 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 80.9 倍、供試体 SFRC-2 は 48.8 倍であり、平均が 64.8 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、配合された鋼繊維が引張力を負担、すなわち鋼繊維の架橋効果によるものと考えられる。また、SFRC のセメントには早強ポルトランドセメントを用いたことにより材令 8 時間の圧縮強度が RC 床版の 1.55 倍であり、早強ポルトランドセメントを用いた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。

4.2 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ー 2 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図ー 2(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、下面のひび割れ状況は図ー 2(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 方向のひび割れが発生している。また、輪荷重走行位置から 45 度底面は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。また、供試体 RC-2 の上面の損傷状況も図ー 2(1), 2)に示すように床版中央付近に軸直角方向に貫通ひび割れが発生している。また、下面には図ー 2(2), 2)に示すように 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。

(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ー 2(1), 3)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、下面のひび割れ状況は図ー 2(2), 3)に示すように、主鉄筋および配力筋配置位置下面に 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が見られない。次に、供試体 SFRC-2 の破壊時における床

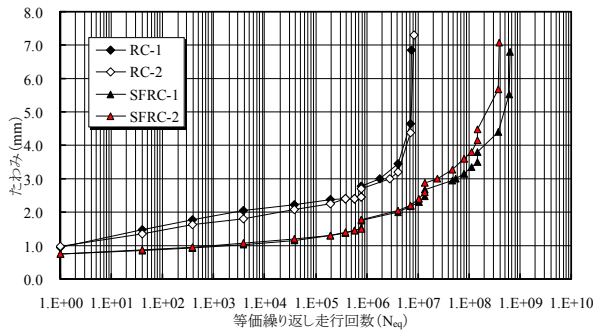


図-3 たわみと等価走行回数

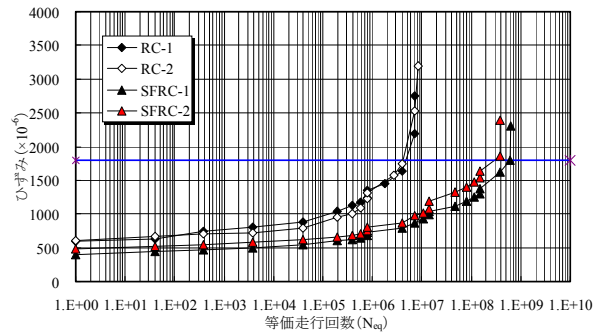


図-4 ひずみと等価走行回数の関係

版上面のひび割れ状況は図-2(1), 4)に示すように、走行面に一部損傷が見られるものの供試体 SFRC-2 と同様に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図-2(2), 4)に示すように、2方向のひび割れが発生し、45度底面の一部にダウエルの影響による離れは見られるものの RC 床版供試体に比してその範囲は少ない。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、早強ポルトランドセメントを用いたことからコンクリートの圧縮強度が高くなり、せん断強度も向上し、斜めひび割れが抑制された結果であると考えられる。破壊は輪荷重走行中に曲げが伴うせん断破壊となった。

4.3 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。

(1) RC床版供試体

供試体 RC-1 は、初期荷重 80kN 載荷時におけるたわみは 0.95mm であり、その後、走行を繰り返すことによりたわみも徐々に増加している。20,000 回走行、すなわち等価走行回数 772,240 回のたわみは 2.5mm である。荷重 100kN に増加した時点のたわみは 2.8mm であり、その後、たわみが 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る。破壊時のたわみは等価走行回数 7,347,504 回で 6.8mm である。また、供試体 RC-2 の初期荷重 80kN 載荷時のたわみは 0.97mm であり、20,000 回走行（等価走行回数 772,240 回）のたわみは 2.4mm である。荷重 100kN 載荷時のたわみは 2.7mm であり、供試体 RC-1 と同様にたわみが 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 である。

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

(2) SFRC床版供試体

供試体 SFRC-1 の初期荷重 80kN 載荷時のたわみは 0.75mm であり、20,000 回走行（等価走行回数 772,240 回）のたわみは 1.5mm である。荷重 100kN に増加した時点のたわみは 1.7mm、20,000 回走行後（等価走行回数 13.90×10^6 回）が 2.6mm、荷重 120kN 増加し、20,000 回走行後（等価走行回数 146.98×10^6 回）のたわみは 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見られない。荷重 140kN 増加した時点のたわみは 3.8mm である。この時点でも急激なたわみの増加は見られないもののたわみが 4.0mm を超えた付近からたわみの増加が著しくなっている。破壊時のたわみは荷重 140kN で 10,500 走行、等価走行回 641.91×10^6 回で 6.8mm である。次に、供試体 SFRC-2 の初期荷重 80kN 載荷時のたわみは 0.77mm であり、20,000 回走行後（等価走行回数 772,240 回）のたわみは 1.5mm である。荷重 100kN に増加し、20,000 回走行（等価走行回数 13.90×10^6 回）で 2.4mm である。荷重 120kN に増加し、20,000 回走行（等価走行回数 146.98×10^6 回）でたわみが 4.2mm である。供試体 SFRC-1 と同様にたわみが床版支間 L の 1/300 付近までは急激な増加は見られない。その後荷重 140kN 増加した付近から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 287.4×10^6 回で破壊に至り、最大たわみは 7.1mm である。

以上のように、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、耐疲労性が大幅に向上する結果となった。また、セメントに早強ポルトランドセメントを用いたことで圧縮強度が高く、同時にせん断強度の向上が図られた結果であると考えられる。

4.4 ひずみと等価走行回数の関係

本実験におけるひずみと等価走行回数の関係を図-4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 載荷時で 600×10^6 あ

り、20,000 回走行後、すなわち等価走行回数 772,240 回のひずみは $1,240 \times 10^6$ である。荷重 100kN に増加した時点のひずみ $1,350 \times 10^6$ であり、その後の走行を繰り返すことによりひずみが徐々に増加した。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 の初期荷重 80kN 載荷時の軸直角方向鉄筋のひずみは 610×10^6 であり、20,000 回走行（等価走行回数 772,240 回）のひずみは $1,240 \times 10^6$ である。その後の荷重増加および走行を繰り返すことにより、供試体 RC-1 と同様な増加傾向を示している。破壊時のひずみが $3,190 \times 10^6$ である。

筆者らは¹⁰⁾、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等を提案している。よって、たわみが床版支間 L の 1/400、すなわち 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 の初期荷重 80kN 載荷時のひずみは 400×10^6 であり、20,000 回走行（等価走行回数 772,240 回）のひずみは 683×10^6 である。荷重 100kN に増加した時点のひずみは 730×10^6 、20,000 回走行後（等価走行回数 13.90×10^6 回）のひずみは 990×10^6 、荷重 120kN 増加し、20,000 回走後（等価走行回数 146.98×10^6 回）のひずみは $1,300 \times 10^6$ 、である。荷重 140kN 増加した時点のひずみは $1,380 \times 10^6$ である。降伏ひずみ $1,840 \times 10^6$ に達した時点の等価走行回数は 620.24×10^6 回である。破壊時のひずみは $2,300 \times 10^6$ である。

次に、供試体 SFRC-2 の初期荷重 80kN 載荷時のひずみは 750×10^6 であり、20,000 回走行後（等価走行回数 772,240 回）のひずみは 800×10^6 である。荷重 100kN に増加し、20,000 回走行（等価走行回数 13.90×10^6 回）で 1080×10^6 である。荷重 120kN に増加し、20,000 回走行（等価走行回数 146.98×10^6 回）のひずみは $1,470 \times 10^6$ 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 362.00×10^6 である。その後の走行でひずみは急激に増加し、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。これは鋼繊維の混入により鋼繊維が引張力を分散し、ひび割れの発生の抑制効果および鉄筋のひずみの増加を抑制している。

5. まとめ

RC 床版のコンクリート材料に SFRC を用いた結果、以下の知見が得られた。

① SFRC 床版は従来の RC 床版の設計法での設計が可能であり、施工においても早強セメントを用いることで、コスト縮減も可能となると考えられる。

② SFRC 材に早強セメントを使用することで材齢 4 日の圧縮強度は 52.6N/mm^2 となり、養生期間の短縮が図れると考えられる。

③ SFRC 床版は RC 床版に比して平均等価走行回数比は 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。これはコンクリートに配合され鋼繊維の架橋効果によるものである。

④ たわみと等価走行回数の関係においては、RC 床版に比してたわみの増加が抑制されている。たわみが床版支間 L の 1/400 に達した付近が補強時期の目安とされているが、SFRC 床版は床版支間 L の 1/400 を超えた後において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) 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.
- 3) 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.
- 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) 田中良弘, 高倉克彦, 阿部忠, 木田哲量, 前堀伸平：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, pp149-154, 2006.
- 6) 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.
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I, II, III, 2002
- 9) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理, 北森出版, 2007.
- 10) 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.
- 11) 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, pp1092-1100, 2013.