

鋼繊維補強をした高性能軽量コンクリート床版の疲労特性に関する実験

Experimental Study on Fatigue Property of Steel Fiber Reinforced High Performance Lightweight Concrete Slabs by Wheel Running Machine

森 大介*, 丸井 浩**, 藤井伸介***, 松井繁之****

Daisuke MORI, Hiroshi MARUI, Shinsuke FUJII and Shigeyuki MATSUI

*工修 太平洋セメント(株) 中央研究所 (〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2)

**太平洋セメント(株) 建材事業推進室 (〒101-8357 東京都千代田区西神田 3-8-1)

***大阪大学大学院生 工学研究科博士前期課程 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

****工博 大阪大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

Fatigue resistance is a property of great importance for reinforced concrete (RC) slabs. Life span of RC slab under fatigue load is able to be estimated by wheel running test.

On the other hand, lightweight superstructure is demanded from point of earthquake-resistance and decrease in construction cost. The new artificial lightweight aggregate, which properties have both higher strength and lower water absorption ratio than ordinary lightweight aggregates, has been developed recently.

In this study, we investigated the fatigue property of high performance lightweight concrete slabs using the new artificial lightweight aggregate by wheel running machine. As a result, we found that the fatigue resistance of steel fiber reinforced high performance lightweight concrete slabs is similar to ordinary RC slabs.

key words : fatigue, wheel running test, high performance lightweight concrete slab, steel fiber

1. まえがき

実橋床版の疲労損傷状況を再現できる輪荷重走行疲労試験の研究が、近年、盛んに行われており、RC床版の疲労寿命予測がこれらの実験データから可能となってきた。それに基づき、実橋梁への床版の採用に関しては、高疲労耐久性であることが必須条件となることはもちろんであり、環境耐久性も満足する一方で、耐震性やトータルコスト低減の観点から橋梁上部工の軽量化が望まれるようになってきている¹⁾。

本研究は、高強度で低吸水性の高性能軽量骨材を用いて作製した高性能軽量コンクリート²⁾(軽量1種)からなる鋼繊維混入鉄筋コンクリート床版の道路橋への適用性を検討したものである。輪荷重走行試験による疲労試験を通じて、本床版の疲労破壊性状、疲労耐久性を、コンクリート種類(普通コンクリートと軽量コンクリート)の相違および鋼繊維の混入有無の比較において検討した。

2. 実験方法

(1) 供試体の種類と概要

床版の供試体の種類を表-1に示す。高性能軽量粗骨材を使用したコンクリートについては、鋼繊維の使用の有無(SIFおよびSPF)で各2体輪荷重疲労試験を行い、普

通コンクリートを使用した供試体(RC)と比較した。試験体の寸法は、3000(長さ)×2000(幅)×180(厚さ)とし、図-1に示す通りに配筋を行った。

高性能軽量コンクリートの使用材料を表-2に、配合を表-3に示す。フレッシュコンクリートの目標スランプは 18 ± 2.5 cm, 目標空気量は 5.5 ± 1.5 %とした。硬化コンクリートの設計基準強度(F_c)は 40N/mm^2 とした。SIFの配合の鋼繊維(SF)はコンクリート 1m^3 に対しほぼ標準の60kgを使用した。なお、RCの配合については、 $W/C=48\%$, $s/a=48\%$ の配合を使用した。

コンクリートの物理的性質を表-3に示す。SIFとSPFを比較すると、鋼繊維の混入により曲げ強度の大幅な向上が認められた。図-4に圧縮強度と割裂引張強度の関係および圧縮強度と曲げ強度の関係を、普通、従来軽量、

表-1 床版供試体の種類

供試体名	粗骨材	鋼繊維
SPF-1	高性能 軽 量	無
SPF-2		
SIF-1		有
SIF-2		
RC	普通	無

表-2 高性能コンクリートの材料

材料の種類	種類, 性状
セメント(C)	早強ポルトランドセメント, 密度3.13g/cm ³
細骨材(S)	砕砂, 表乾密度2.63g/cm ³ , 吸水率1.39%
粗骨材(G)	真珠岩系造粒型, 絶乾密度1.16 g/cm ³ , 24時間吸水率2.8%
高性能AE減水剤(SP)	ポリカルボン酸系
AE助剤(AE)	変形アルキルカルボン酸化合物系陰イオン界面活性剤
鋼繊維(SF)	インデント型, φ0.7×50mm

表-3 高性能軽量コンクリートの配合

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (C×%)		SF (kg)
			W	C	S	G	SP	AE	
SPF	38	48.9	165	434	832	391	1.10	0.001	—
SIF	38	48.9	165	434	832	391	1.40	0.001	60

表-4 コンクリートの物理的性状

記号	強度 (N/mm ²)			静弾性係数 E _c (kN/mm ²)	ポアソン比 ν	単位重量 (t/m ³)
	圧縮	割裂引張	曲げ			
SPF	48.9	3.61	4.52	23.9	0.208	1.79
SIF	46.5	2.95	7.33	21.6	0.222	1.85
RC	39.1	2.78	4.88	29.4	0.164	2.23

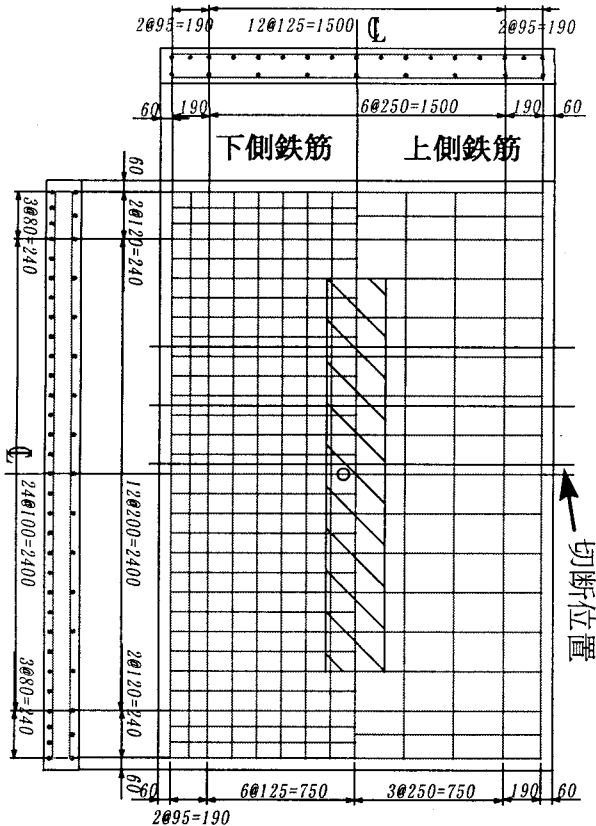


図-1 供試体の配筋

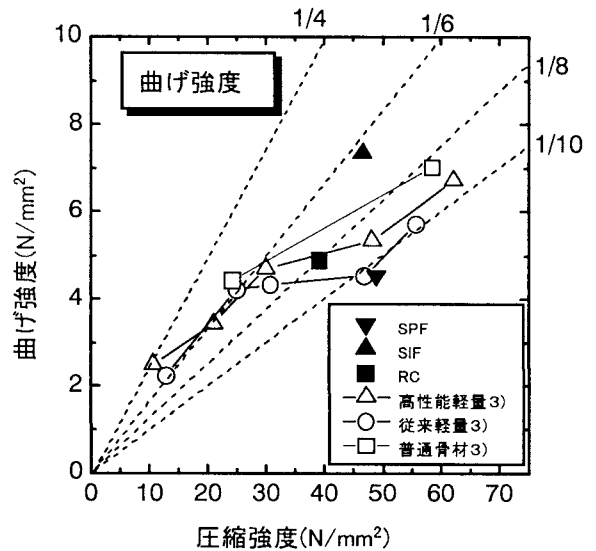
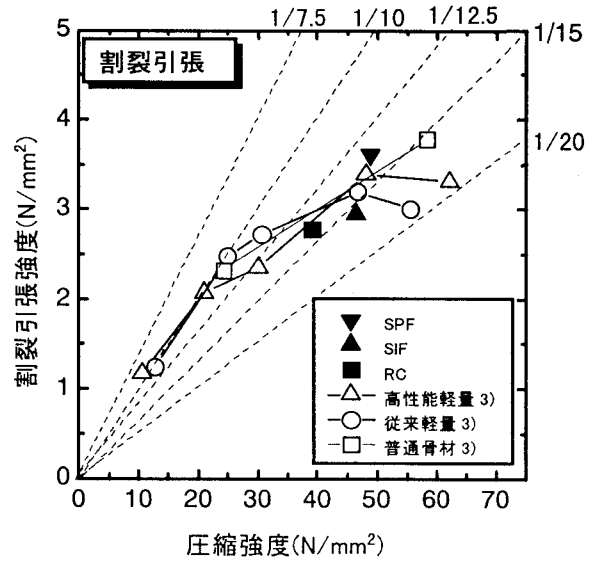


図-2 割裂引張・曲げ強度の圧縮強度との関係

高性能軽量の粗骨材の参考値³⁾と共に示した。本研究で使用する骨材と同様の高性能軽量骨材の強度は、普通骨材と従来軽量骨材の間に位置し、高強度になるほどその傾向は強くなる。なお、本研究での実験値は、床版供試体と同じ気中養生のため、水中28日養生を行った参考値と比較すると若干小さくなっている。

(2) 輪荷重試験方法

輪荷重走行試験は、道路橋床版上を走行する輪荷重を再現することで、床版の耐久性を確認するものである。輪荷重は、図-1の中央斜線部を長辺方向に走行する。輪荷重走行試験の諸元を以下に示す。

- 載荷能力 : 10~30tf
- 荷重移動範囲 : ±100cm(床版中央から)
- 走行速度 : 28往復(56回)/min
- 車輪の径と幅 : 500mm, 300mm

供試体の指示条件は、長辺方向(配力筋方向かつ軸方向)の2辺を単純支持、短辺方向(主鉄筋方向かつ橋軸直角方向)の2辺を横桁による弾性支持とした。これは、2辺弾性支持、2辺自由支持の場合、自由端より破壊が進行し床版の疲労現象を再現できないためである。また、一般的に矩形床版において床版中央に荷重をかけると四隅に浮き上がりが発生する。これを防止するために床版四隅に浮き上がり防止装置を設置した。

載荷荷重は、表-5に示すように、鋼繊維を混入した供試体SIF-1およびSIF-2は、走行回数10万回までを147kN(15tf)、10万回から100万回までを176.4kN(18tf)とした。ただし、SIF-2は試験機の都合上、100万回未達で試験を終了した。鋼繊維を混入していない供試体SPF-1およびSPF-2は、10万回以降に載荷荷重を176.4kNに設定すると、急激に劣化が進行し破壊に至ると予想されたため、10万回以前と同じ147kNとした。比較用の普通コンクリートのRC床版(記号:RC)は、5万回まで147kN、それ以降は176.4kNとした。ここで、147kNという荷重は、設計輪荷重98kNに衝撃係数をかけたものに近く、また実測最大輪荷重という経験から決定した。176.4kNはさらに安全側を考えた荷重である。また走行回数は、147kNを基本荷重とし、一般国道を対象に1日1レーン3万台の交通量を仮定すると、実交通50年分の基本荷重での等価繰り返し回数は、82~86万回と計算される³⁾ことから決定した。

3) 試験後の試験体の観察

輪荷重走行による疲労試験が終了した後の供試体内部のひび割れの状況を調べるため、SIF、SPF(共に2体ずつ)供試体を図-1に示す位置で配力鉄筋と垂直な断面で切断し、断面のひび割れを観察した。

3. 実験結果と考察

(1) 供試体のたわみおよびたわみによる劣化度の進行

輪荷重走行試験による、たわみ-走行回数曲線を図-3および図-4に示す。ここで、各供試体は、静弾性係数が異なり、載荷プログラムも一定ではないため、図-5に示す劣化度-換算走行回数曲線で比較を行った。劣化度(α)は、活荷重たわみをもとに式(1)により与えられる。換算走行回数は、マイナー則により176.4kNに換算した。

$$\alpha = (d - d_1) / (d_2 - d_1) \times 100 \quad (1)$$

ここに、 d : 試験時のたわみ

d_1 : 全断面有効時のたわみ

d_2 : 使用限界時のたわみ

鋼繊維未混入のSPF-1は、走行回数2000回で使用限界状態を超え、58.4万回で破壊に至った。同じくSPF-2は、走行回数2000回で使用限界状態を超え、100万回で破壊に至らず試験を終了した。また、RC供試体は、走行回数20万回で使用限界を超え、28万回で破壊した。また、SPFは、RCと比較すると、破壊に至る走行回数が長くなり良好な結果を得たが、図-5からもわかるように、使用限界に至る走行回数が少なく、劣化度の進行も早い。このことから、鋼繊維なしの高性能軽量コンクリートのままでは疲労耐久性は低いと懸念される。

鋼繊維補強をしたSIF-1は、試験関係上走行回数86万回で、SIF-2は走行回数100万回で試験を終了したが破壊に至らず、良好な疲労耐久性を示した。また、図-5によると使用限界に至る走行回数はSIF-1で74.8万回、SIF-2で65.4回と劣化度の進行はRC、

表-4 輪荷重試験の載荷プログラム

供試体名	147kN(15tf)	176.4kN(18tf)
SPF-1	実験終了 (破壊)まで	-
SPF-2		
SIF-1	10万回	90万回
SIF-2		
RC	5万回	実験終了まで

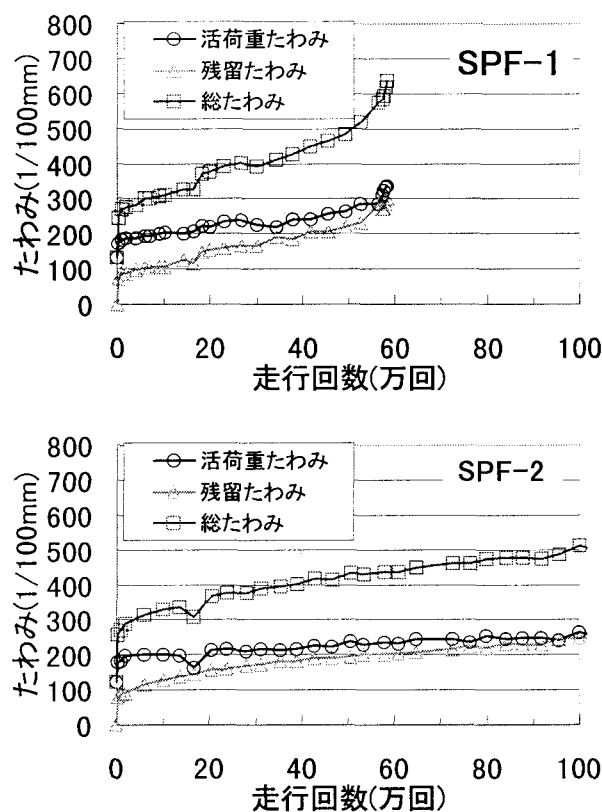


図-3 たわみ-走行回数曲線(SPF)

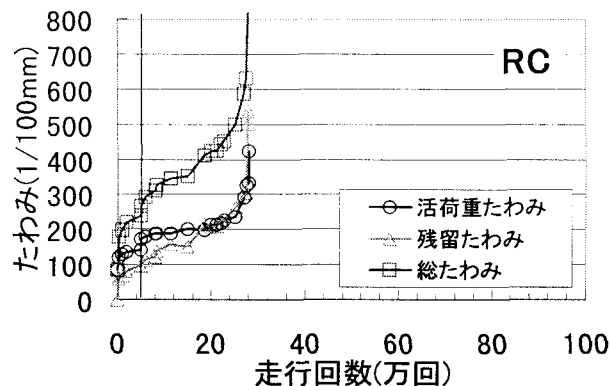
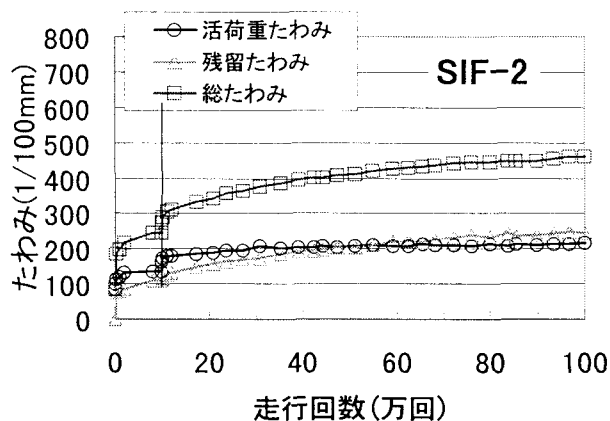
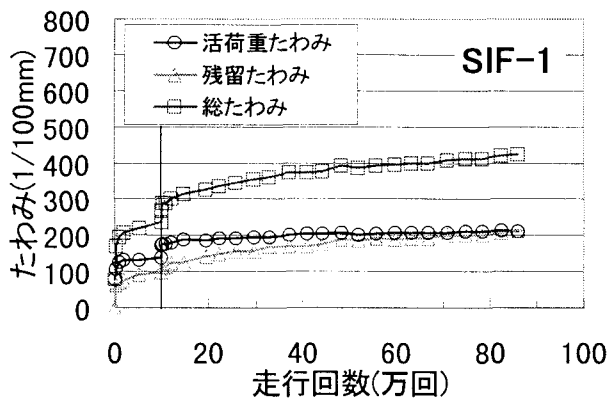


図-4 たわみ-走行回数曲線(SIF・RC)

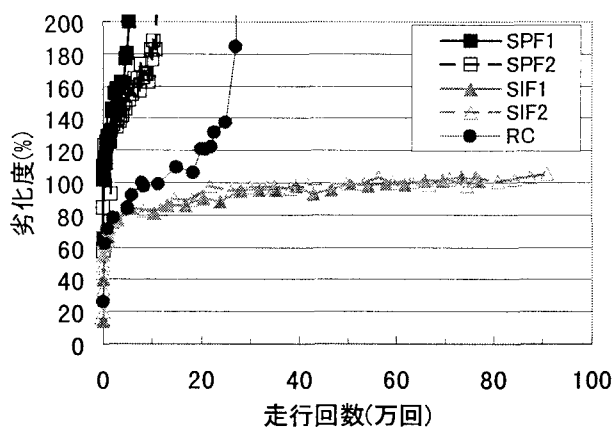


図-5 劣化度-換算走行回数曲線

S P Fに比較して非常に穏やかであった。以上より、鋼繊維で補強した高性能軽量コンクリート床版の疲労耐久性の向上が顕著であり、普通コンクリートを使用したRC床版と比較して十分な疲労耐久性を有していると考えられる。

(2) ひび割れの発生状況

a) 床版下面のひび割れ発生状況およびひび割れ密度

初期段階と実験終了時の床版下面のひび割れの発生状況を図-6に、ひび割れ密度と走行回数の関係を図-7に示す。荷重初期と示したひび割れ図は、実験開始から走行回数1000回までに発生したひび割れである。従来の軽量粗骨材を使用した軽量コンクリート床版は、輪荷重荷初期は試験体の中央部にひび割れが発生し、破壊もしくは実験終了までに床版下部全体にひび割れが発生する傾向が認められた³⁾。高性能軽量コンクリートを使用した本研究の床版は、鋼繊維補強の有無に関わりなく、荷重初期より下面全体にひび割れが発生し、荷重終了までにひび割れの

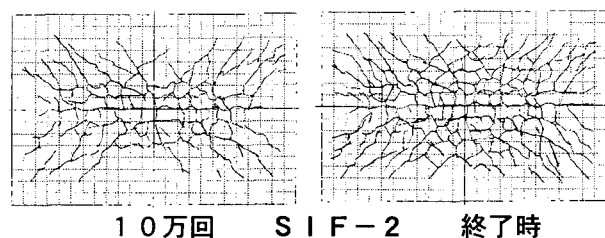
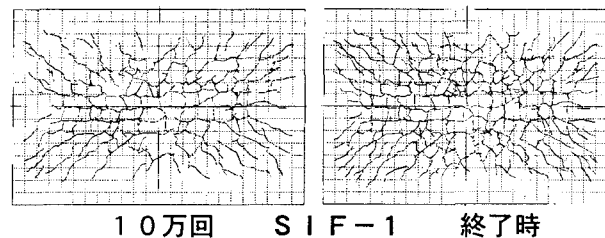
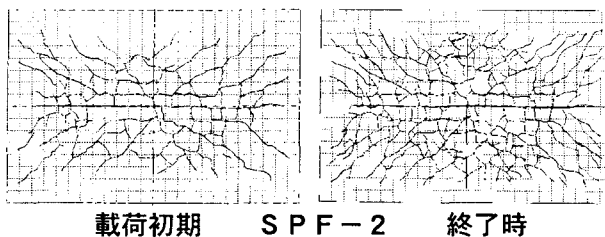
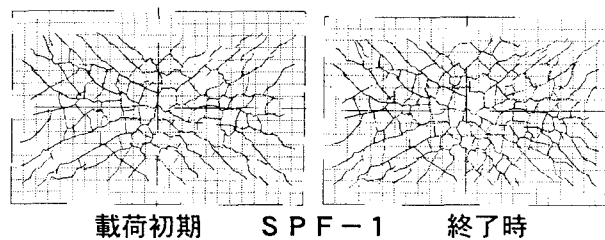


図-6 床版下面のひび割れ発生状況

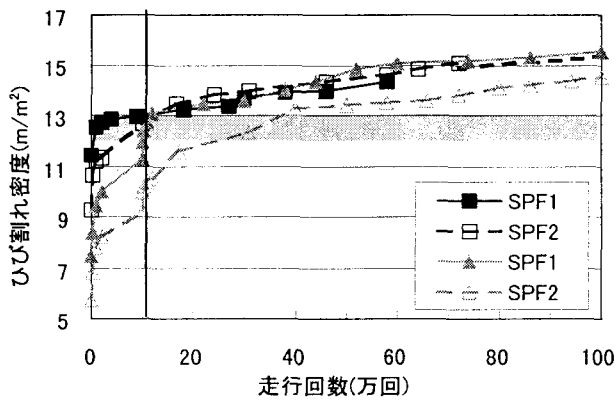


図-7 床版下面のひび割れ密度と走行回数の関係

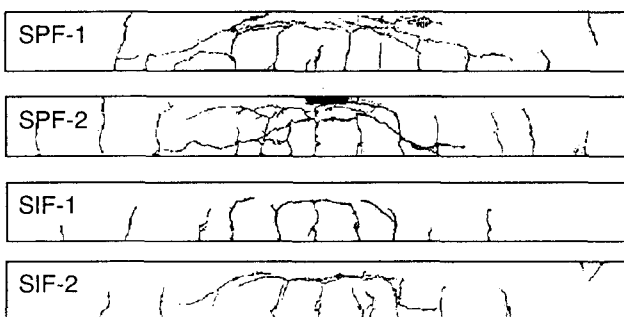


図-8 切断面のひび割れ発生状況(試験終了後)

密度が増える傾向が認められ、ひび割れの分散性がよいことが考えられた。また、本研究で使用した、輪荷重疲労試験機の使用限界となるひび割れ密度はRC床版では12~13m²/m²である³⁾が、高性能軽量コンクリートの場合、繊維補強の有無に関わりなく使用限界となるひび割れ密度は、14~15m²/m²となり、ひび割れ密度も若干多くなることが認められた。また、無補強の場合においても、同様なひび割れの発生傾向が認められたことから、ひび割れの発生機構はコンクリートの特性に起因すると推察された。

b) 切断面のひび割れ

図-1に示した、配力鉄筋に垂直に切断した床版の断面でのひび割れの発生状況を図-8に示す。鋼繊維無補強のSPF-1は、典型的な押し抜きせん断破壊によるひび割れの形態であった。SPF-2は、走行回数100万回以内に破壊に至らなかったが、SPF-1と同等なひび割れの発生状況であり破壊の寸前であったと言える。また、繊維補強をしたSIF-1およびSIF-2は、断面中央の上部に水平方向のひび割れが発生している。これらのひび割れと床版上縁および下縁からの斜めひび割れが繋がることにより破壊に至ると推測される。よって、高性能軽量コンクリートを使用した床版の破壊形態は、RC床版のそれと同様であると言える。ただし、SPFでは斜めひび割れ

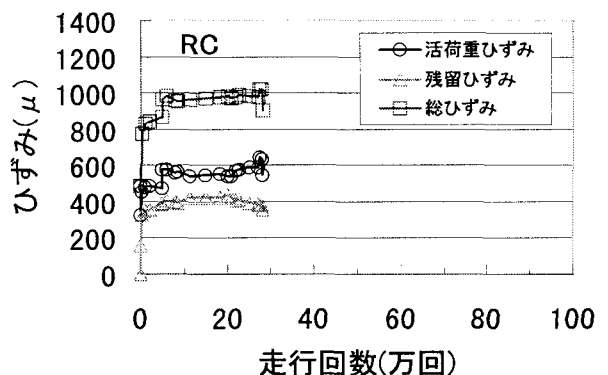
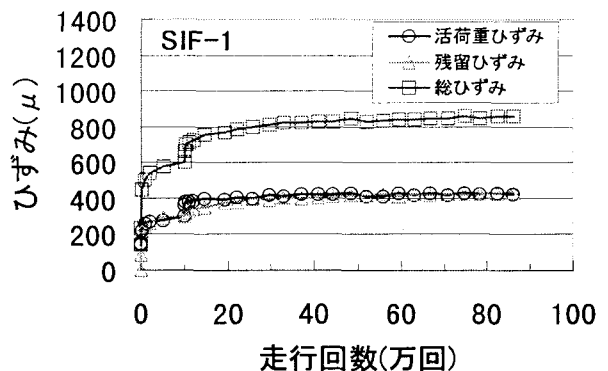
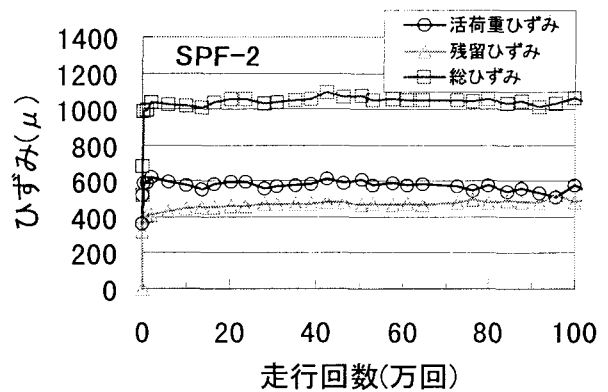
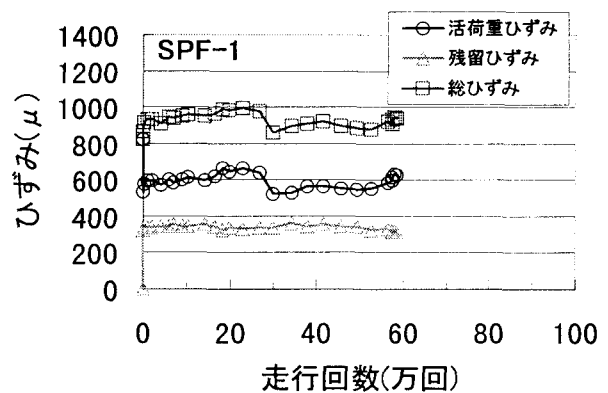


図-9 ひずみ-走行回数曲線

の角度が45度より小さくなっている。またSIF-1では、斜めひび割れの進展がなく、176.4kN荷重下では引張側主鉄筋位置での剥離ひび割れも発生していない。なお、SIF-2は本試験終了後205.8kN(21t)で100万回の載荷をしたため、斜めひび割れが発生し、また、若干の主鉄筋位置での剥離ひび割れが認められる。これらのひび割れ抑制は、とりもなおさず鋼繊維による効果と言える。

(3) 鉄筋のひずみ

図-1の配筋図の中央の○部分の主鉄筋のひずみ-走行回数曲線を図-9に示す。鋼繊維無補強のSPF供試体2体は、RCと同様に走行回数に違いがあるものの、一度ひずみが増加した後、活荷重ひずみが減少する傾向が認められた。この減少傾向は、図-8のひび割れ図でわかるように斜めひび割れの形成によって床版内にタイトアーチが形成され、主鉄筋のひずみが一様化されたためであると推定できる。鋼繊維補強をしたSIF供試体は、SPFに認められた活荷重ひずみの減少はない。これにより、コンクリート中に分散した鋼繊維によりひび割れ進展抵抗性が向上し、鉄筋とコンクリートは合成版として曲げに抵抗しており、疲労耐久性は非常に向上した結果になったようである。また、各試験体の主鉄筋のひずみ量は、降伏値まで達しておらず、鉄筋は健全であることが確認できた。

4. まとめ

高性能軽量粗骨材を使用した、軽量1種コンクリート(高性能軽量コンクリート)で道路橋床版を模擬した試験体を作製し、輪荷重走行疲労試験を行った結果以下の知見が得られた。

(1) 高性能軽量コンクリートに鋼繊維を混入することにより、走行回数100万回でも破壊に至らず、普通コンクリートを使用したRC床版と比較すると大幅に疲労耐久性が向上し、道路橋床版への適用に十分耐えら

れる。

- (2) 輪荷重走行疲労試験により床版下面に発生したひび割れを観察したところ、従来の軽量コンクリート床版と異なりひび割れの分散性がよく、また、使用限界状態のひび割れ密度は通常の床版よりも若干多い。
- (3) 輪荷重走行試験を終了した床版供試体を配力鉄筋に垂直断面で切断し内部のひび割れの発生状況を観察した。その結果、高性能軽量コンクリートを使用した床版の破壊形態は、通常のRC床版と同様であると思われる。
- (4) 床版供試体の中央部の主鉄筋のひずみを計測した結果、鋼繊維補強によりひび割れの発生が抑制されているため、せん断ひび割れの発生が抑えられ、疲労耐久性が向上するものと推察される。また主鉄筋は、176.4kN荷重下では降伏ひずみより大幅に小さく、疲労破壊の心配はない。

参考文献

1. 保坂鐵矢, 山田高裕, 中野幹一郎: 鋼繊維軽量コンクリートを用いた連続合成鉄道橋-阿佐線・物部川橋りょう-, コンクリート工学, Vol. 38, No. 6, pp. 24-30, 2000
2. 岡本享久, 石川雄康, 榎木隆, 笹島昌男: 高性能軽量コンクリート, コンクリート工学, Vol. 37, No. 4, pp. 12-18, 1999
3. 森大介, 石川雄康, 荒井孝文, 國府勝郎: 人工軽量粗骨材を用いたコンクリートの破壊エネルギー挙動について, 軽量コンクリートの性能の多様化と利用の拡大に関するシンポジウム 論文集, pp. 11-16, 2000
4. 松井繁之: 安全工学, Vol. 30, No. 6, 1991
5. 藤井伸介, 松井伸介, 藤木英一: SFLRCの道路橋床版への適用性に関する輪荷重走行試験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 3, pp. 739-744, 2000