

論文 SFLRC の道路橋床版への適用性に関する輪荷重走行試験

藤井伸介^{*1}・松井繁之^{*2}・藤木英一^{*3}

要旨：本研究は、橋梁上部工の軽量化の可能性の検討を目的として、人工軽量骨材と鋼繊維を混入した鋼繊維補強軽量コンクリートを床版に用いた場合の疲労耐久性について、輪荷重走行試験機により実験したものである。また、鉄筋量を従来の標準的な RC 床版のものと同半分にしたもの、鋼繊維の有無、ならびに鋼繊維の種類をパラメータにして RC 床版と比較検討し、疲労耐久性が十分大きいことを確認した。

キーワード：疲労耐久性、人工軽量骨材、鋼繊維、鉄筋量

表-1 供試体種類

供試体種類	コンクリート	混入鋼繊維	鉄筋量
RC	普通	無し	フルタイプ
PF	軽量	フック	
FF		インデント	
IF		フック	ハーフタイプ
FH		インデント	
IH			

1. はじめに

近年、合理化橋梁の床版としては、耐久性の高い床版を採用することが必須となっている。一方、1995年の阪神・淡路大震災を契機に、橋梁上部工は軽量化が望まれるようになった。これらの要求を満たすためには、構造的な面では床版厚をできるだけ薄くするということが考えられる。しかし、RC床版の設計法は現在定着している。そこで材料的な面で床版の単位重量を小さくするということが考えられる。本研究では粗骨材に人工軽量骨材を用い、それに伴う静弾性係数やせん断強度、曲げ強度の低下を補うため鋼繊維を混入した鋼繊維補強軽量コンクリート(SFLRC)により橋梁床版を設け、製作することを考え、輪荷重走行試験機を用いた疲労試験を行い、その結果の相互間、ならびに既存のRC床版との比較によって適用性を検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

供試体の種類を表-1、コンクリートの種類を表-2、鋼繊維の諸元を表-3¹⁾、配筋図を図-1に示す。なお使用した鉄筋は全てSD295B、D16である。

供試体のパラメータを鉄筋量と鋼繊維の種類に定め、まず軽量骨材を使用した床版の安全性の検討として、従来の標準的なRC床版と同じ鉄筋量の供試体(以下フルタイプ)を作製した。さらにコンクリートの軽量化と鋼繊維の混入により鉄筋量を減らすことができるか否かを調査するため、鉄筋量を約半分にした供試体(以下ハーフタイプ)も用意した。それぞれのコンクリート中に、形状の異なるインデントタイプ(I)またはフックタイプ(F)の鋼繊維を混入したものをそれぞれ1体ずつ、計4体となる。さらに鋼繊維混入の有無による比較用にフルタイプの鋼繊維を混入していない供試体も作製した。

2.2 実験方法

輪荷重走行試験機は、道路橋RC床版上を走行する輪荷重を再現させることで、床版の耐久性を確認するものである。輪荷重走行試験機の

*1 大阪大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (正会員)

*2 大阪大学大学院教授 工学研究科 土木工学専攻 工博 (正会員)

*3 人工軽量骨材協会 (正会員)

表－2 コンクリートの諸元

供試体種類	コンクリート	SF (kg/m ³)	水セメント比 W/C(%)	細骨材率 S/A(%)	単位重量 (kN/m ³)	圧縮強度 f(N/mm ²)	静弾性係数 Ec(kN/mm ²)	ポアソン比 ν	引張強度 ft(N/mm ²)	曲げ強度 fb(N/mm ²)	せん断強度 τ (N/mm ²)
RC	普通	—	48	48	22.3	39.1	29.4	0.164	2.78	4.88	4.74
PF					18.7	39.4	18.0	0.196	3.35	3.58	4.72
FF	人工軽量	60	48	56	19.3	50.7	22.1	0.203	4.10	7.45	7.82
IF						46.1	20.8	0.193	3.56	7.33	7.44
FH						50.7	22.1	0.203	4.10	7.45	7.82
IH						46.1	20.8	0.193	3.56	7.33	7.44

諸元を以下に示す。

載荷能力 : 10～30tf

荷重移動範囲床版中央から : ±100cm

走行速度 : 28 往復/min

車輪の径と幅 : 500mm, 300mm

供試体の支持条件は、長辺方向(配力筋方向かつ橋軸方向)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－4 に示すように、走行回数 10 万回までを 147kN、10 万回から 100 万回までを 176.4kN とした。ただし FF は実験機の都合上、90 万回で実験を終了した。比較用の 18cm 普通コンクリート(RC)床版は 5 万回までは 147kN、それ以降は 176.4kN であった。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。また走行回数については、この 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、実行通 50 年分の等価繰り返し回数は走行回数 82～86 万回と計算されることから決定した。

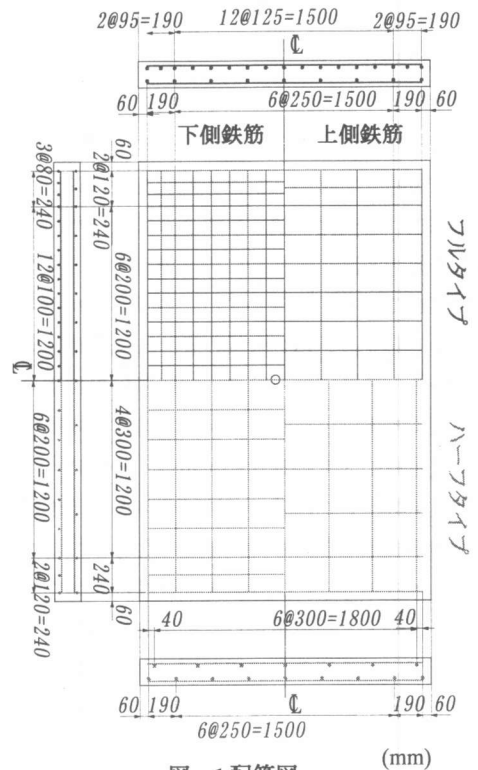
3. 実験結果

3. 1 たわみ

今回、疲労試験を行った 5 体と、比較用に以前試験が行われた標準的な RC 床版のたわみ－走行回数曲線を図－2 に示す。グラフ中の枠内

表－3 鋼繊維の性質と混入量

タイプ	寸法 (mm)	形状	混入量 (kg/m ³)	体積比 (1本当たり)
F	φ0.8×60	両端フック付 結束型	60	1.567
I	φ0.7×50	インデント型	60	1



図－1 配筋図

表－4 載荷プログラム

供試体種類	147kN(15tf)	176.4kN(18tf)
RC	5万回	破壊
PF	破壊	—
FF	10万回	80万回
IF		90万回
FH		
IH		

は使用限界状態の活荷重たわみの理論値を示し、グラフ中の●はその理論値をプロットしたもの

である。ここで理論値は次に示すような偏微分方程式によってあらわされる。

$$D_x \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2H \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = q(x, y)$$

$$H = \beta \sqrt{D_x D_y} \quad \text{ここに}$$

D_x : 主鉄筋断面の板剛性

D_y : 配力筋断面の板剛性

PF は初期の段階からたわみは大きく、急激なたわみの増加を見せ 2000 回で使用限界状態を超え、7.36 万回で押し抜きせん断破壊した。比較用の RC 床版は 20 万回で使用限界状態を超え、28 万回で破壊した。鋼繊維補強を行っていない人工軽量コンクリート床版は、普通コンクリート床版より明らかに疲労耐久性が低いことがわかる。鋼繊維補強なしでは軽量コンクリート床版は、実橋での適用は難しいと言える。他の 4 体については、FF は 82.2 万回で使用限界状態を超え、IF、FH、IH は実験終了時まで使用限界状態には至らなかった。また 4 体とも PF に比べたわみの増加はなだらかであり、実験終了時まで破壊には至らなかった。このことから鋼繊維混入による疲労耐久性の向上が顕著に見られたと言える。混入した鋼繊維の違いで比較すると、フルタイプでもハーフタイプでも鋼繊維 I の方が鋼繊維 F よりもたわみが小さい。これは鋼繊維の形状よりも、鋼繊維 I の方が鋼繊維 F に比べ、単位体積あたりの本数が約 1.6 倍多かったためと言える。このことは他の実験でも確認されている。

3. 2 ひび割れ密度

初期段階と実験終了時のひび割れ図を図-3 に、ひび割れ密度-走行回数曲線を図-4 に示す。破壊していない 4 体についてひび割れ図を見ると、10 万回では荷重直下付近でのひび割れが多く、実験終了時は全体にひび割れが進展している。ひび割れ密度による使用限界状態は、

今回用いた疲労試験機では 12~13m/m² である。FF が使用限界状態に達している(62.6 万回→70 万回)が、その他の供試体はひび割れ密度に関しては問題ないと言える。

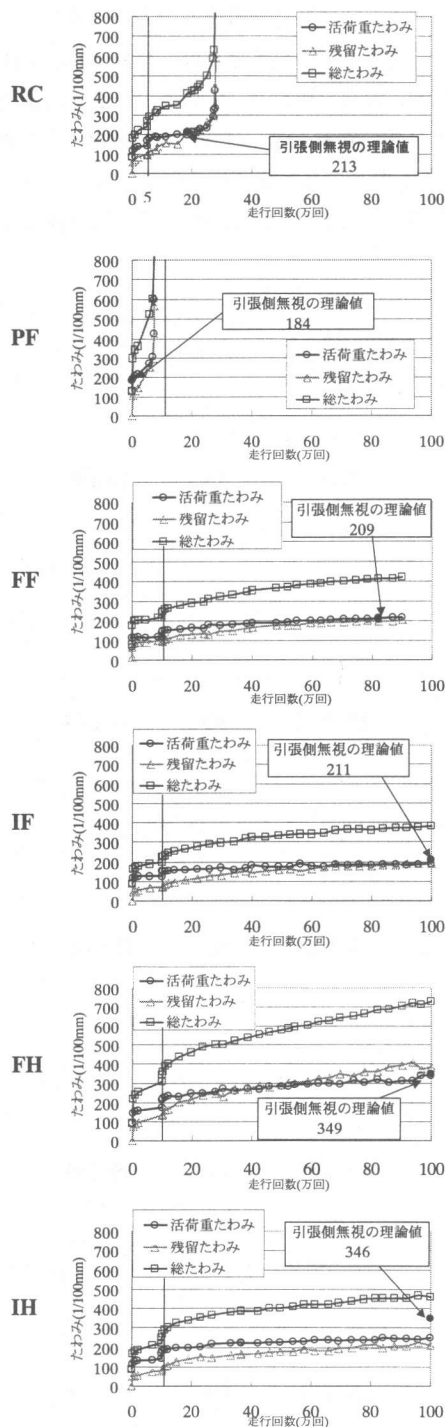


図-2 たわみ-走行回数曲線

3.3 ひずみ

図-1中の○の位置の主鉄筋のひずみ-走行回数曲線を図-5に示す。IHは途中で測定不可能となった。たわみと同様、鋼繊維の違いで比較すると全体的に鋼繊維Fの方がひずみは大きい。総ひずみを見ると、FF, FH, IHの3体は非常に大きい値を示している。そこで設計上問題が無いか検討するため、静的測定時に荷重98kN 荷重で許容引張応力度を超えていないかを調べたところ、FFは33.6万回で、FHは11

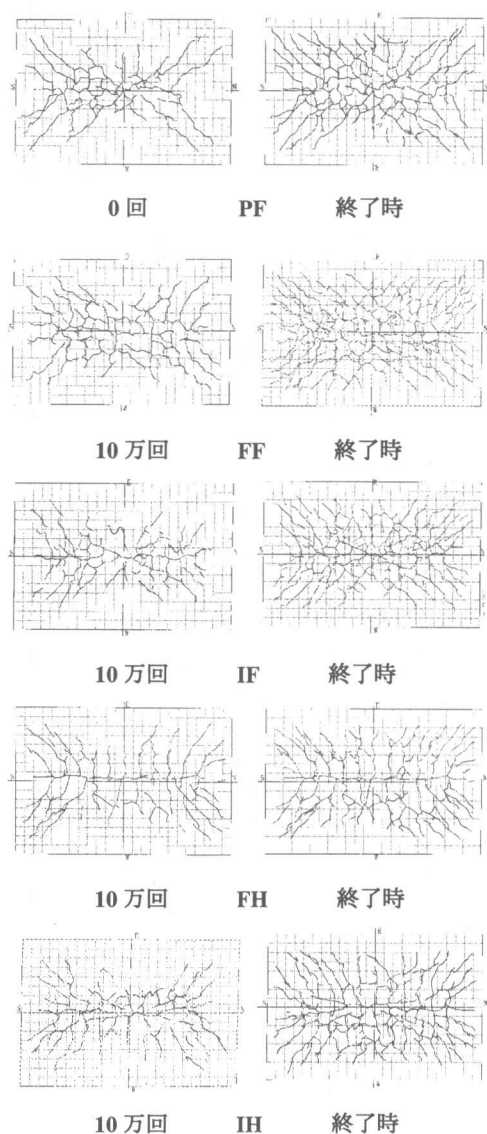


図-3 ひび割れ図

万回で許容引張応力度を超えている箇所があり、IHは測定可能であったところでは実験終了時

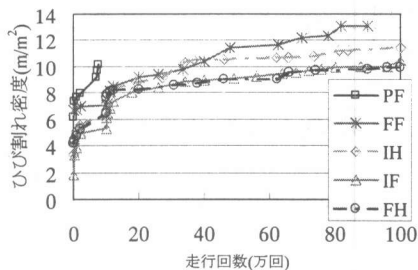


図-4 ひび割れ密度-走行回数曲線

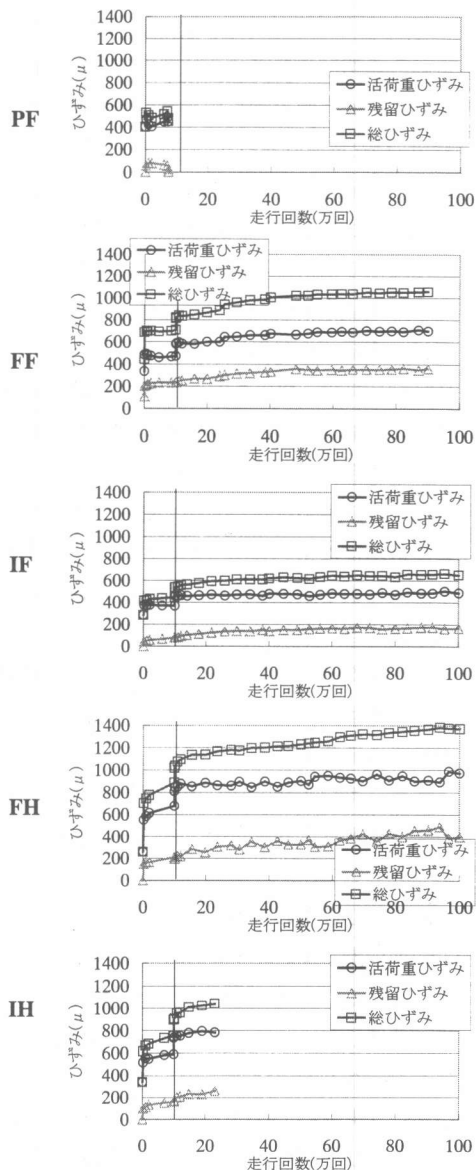


図-5 ひずみ-走行回数曲線

まで許容引張応力度を超えているものは無かった。また全てのひずみゲージにおいて静的測定時に荷重 176.4kN 载荷でも降伏強度以上の値を示したものは無く、限界状態には達していなかった²⁾。

4. マイナー則を用いた換算回数

今回実験を行った SFLRC 床版と、比較用 RC 床版の各測定項目における限界状態に達した走行回数を 176.4kN での走行回数に換算した。実験終了時までたわみの使用限界に至らなかったものは、たわみの増加勾配を一定に直線的に伸ばし、使用限界たわみに到達したときの回数とした。それを表-5 に示す。現在 SFLRC 床版の S-N 曲線が存在しないため、RC 床版の S-N 曲線の傾きの逆数を用いた。SFLRC 床版において、RC 床版の S-N 曲線を用いるのは適当ではないが、176.4kN 換算することによりその誤差は小さいものと考えられる。FF, IF, IH の3体は全ての項目において RC 床版を上回る、もしくは実験終了時まで限界状態に達しないという結果となった。よってこの3体の疲労耐久性は RC 床版と比較しても十分大きいと言える。

5. FEM 解析による断面量の推定

5. 1 解析手法

床版の劣化具合を残存する断面量から判断するため、有限要素法による直交異方性版の解析により、断面量の推定を行う。一般に、直交異方性版の変形挙動は 3.1 に示した偏微分方程式によってあらわされる。

床版支間中央の縦断面におけるたわみ分布性は、直交異方性度 α 、およびねじり剛性の低下 β によって変化する。ここで α 、 β は、

$$\alpha = \frac{D_y}{D_x} \quad H = \beta \sqrt{D_x D_y}$$

で表されるパラメータである。

RC 床版の剛性を算定するに当たって最初に直交異方性度 α を決定する必要がある。通常、

表-5 マイナー則による使用限界の換算回数

	RC	PF	FF	IF	FH	IH
147kNの走行回数	5.000	7.360	10.00	10.00	10.00	10.00
176.4kNの走行回数	23.00	0.000	80.00	90.00	90.00	90.00
実験終了時	23.49	0.718	80.98	90.98	90.98	90.98
たわみ	20.00	0.200	82.20	173.8	114.1	338.4
換算	15.49	0.020	73.18	164.8	105.1	329.4
ひび割れ密度	—	—	70.00	100.0	100.0	100.0
換算	—	—	60.98	90.98	90.98	90.98
鉄筋の総ひずみ	27.40	—	33.60	100.0	11.00	100.0
換算	22.89	—	24.58	90.98	1.976	90.98

(単位: 万回)

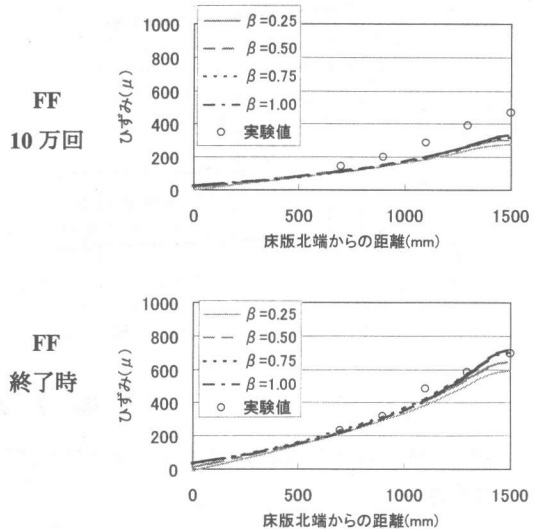


図-6 ひずみの実験値と解析値の分布の一例

直交異方性度、ねじり剛性の低下及び断面量の算定は以下の手順で算定する。①供試体中央もしくは中央より 20cm 離れた点のたわみを 1.0 とし、縦断面における実測たわみ比分布を描く。②これに対し、主鉄筋断面の版剛性のある値(たとえば、全断面有効)と仮定し、配力筋断面の異方性度を 1.0 から変化させていき、それぞれに関して理論たわみを計算する。③この理論たわみの値からそれぞれの異方性度でのたわみ比分布を求め、①の実測たわみ比分布の倍率を変化させつつ重ね合わせ、数値的に最も一致する α を決定する。④①でその点のたわみを 1 とした点での絶対たわみが等しくなるように断面量を仮定し、その値を主鉄筋断面の断面量とする。⑤その結果、配力鉄筋断面の断面量は「④で得た断面量×③で得た異方性度 α 」で決定できる。⑥以上を $\beta=1.0, 0.75, 0.50, 0.25$ の 4 通り繰り返す。

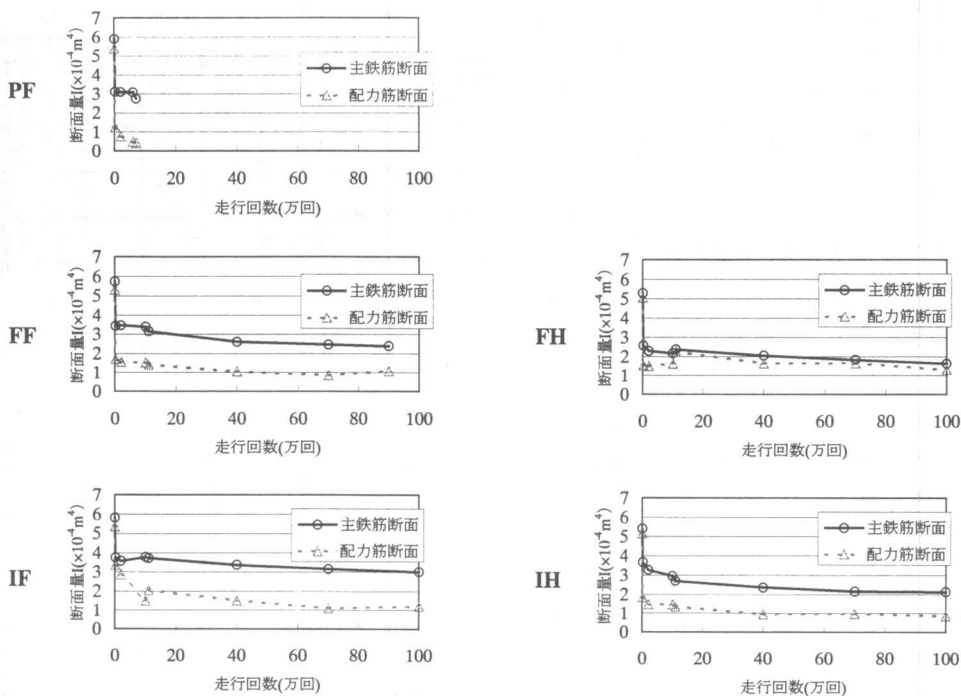


図-7 断面量の推移

返し、鉄筋のひずみ分布と重ね合わせ1通りに絞り込む。

5. 2 解析結果

5. 1 の⑥で β を求める際のひずみの実験値と解析値の分布の一例を図-6に示す。破壊していない4体については、10万回走行時には実験値と解析値はあまりあっていない。これは主鉄筋断面を均一な断面量として解析したため、実際には初期段階から荷重直下で局所的な劣化が起こり、実験値のほうが大きな値を示しているためである。しかし、100万回走行時には実験値と解析値はあっていると言える。これはひび割れ図と見比べてもわかるように、走行回数を追うごとに全体的に劣化が進行し均一断面に近づいたためである。よって初期の段階では $\beta=1$ とし、解析により推定された断面量の推移を図-7に示す。走行回数0回時は全断面有効の値とした。特に配力筋断面で数ヶ所、断面量の回復がある。これは実際には回復しているのではなく、解析する上で、上記のような問題があったことによるものである。

6. まとめ

人工軽量骨材を使用しても、鋼繊維補強することによりRC床版と同等以上の疲労耐久性を持たせることが可能であり、さらに鉄筋量を減らしても混入する鋼繊維によってはRC床版と同等以上の疲労耐久性を持たせることが可能であることが確認できた。

謝辞

本研究は、人工軽量骨材協会の「鋼繊維補強軽量コンクリート研究委員会」の支援を受けて行ったものである。ここに、委員会諸氏に謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 人工軽量骨材協会：人工軽量骨材コンクリート技術資料，No. 13，1998.11
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅱ鋼橋編，1996.12