

ポリプロピレンファイバーコンクリート床版の疲労特性と耐久性

Fatigue Durability of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete Decks under Running Wheel Load

渡海大輔*・松井繁之**・東山浩士***・水越睦視****・星島時太郎*****

Daisuke TOKAI, Shigeyuki MATSUI, Hiroshi HIGASHIYAMA, and Mutsumi MIZUKOSHI, and Tokitaro HOSHIJIMA

*工修 川崎重工業(株)鉄構・機器事業部播磨工場(〒675-0155 兵庫県加古郡播磨町新島 8)

**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)

***博(工) 近畿大学助手 理工学部土木工学科(〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)

****工修 住友大阪セメント(株)セメント・コンクリート研究所 基盤技術研究グループ
(〒551-0021 大阪市大正区南恩加島 7-1-55)

*****三菱化学産資(株)企画室部長(〒100-0005 東京都千代田区丸の内 1-8-2)

Several kinds of fibers such as steel fiber, carbon fiber and polypropylene fiber have been mixed in the concrete to improve the toughness and restrain the stiffness decreasing after cracking.

In Canada, the deck slab, which was entirely free of steel reinforcement and was thereby freed from deterioration due to corrosion of the steel, was developed. Static tests of the steel-free deck slabs had been done and the failure mode of them were recognized to be a punching shear failure. The failure load was thought to be sufficient against the design wheel load. But fatigue tests under running wheel load of them have not been conducted in Canada. In this paper, the fatigue durability of the steel-free deck slabs are investigated in Japan in collaborating with Canadian researchers. The fatigue tests of steel-free deck slabs are conducted by using the Wheel Running Machine of Osaka University.

Key words: arching action, PFRC, steel-free deck slabs, wheel running test, fatigue durability

1. はじめに

コンクリートは周知のとおり圧縮に対しては強いが引張に対しては非常に弱いという材料特性を有している。この引張力に対するコンクリートの欠点を補うために、コンクリートマトリックス中に鋼繊維、炭素繊維、ポリプロピレン繊維等の繊維を混入させる手段が開発されてきた¹⁾。繊維をコンクリートマトリックスに混入させ、それらの繊維がコンクリートマトリックスと一体化することによって引張強度、曲げ強度だけでなく靱性の向上も図ることができる。これらはコンクリートのひび割れ発生後の剛性低下を抑制するためであると認識されている。これらの繊維補強材を混入させた繊維補強コンクリートを様々な部材に適用することによってより合理的な構造物を作ることが可能となっている。本研究室では繊維補強コンクリートを道路橋床版に適用することによって疲労荷重下でのひび割れ進展が抑制され、床版の疲労耐久性向上に繋がるものと考え、輪荷重走行試験機を用いて様々な供試体の疲労耐久性向上に関する研究を行ってきた。

カナダでは凍結防止用の岩塩散布のため激しい塩害を招き、通常の鉄筋はもちろん、エポキシコーテッド鉄筋でさえも腐食が早期に起きたという経験から、鉄筋を床版内に一切配置せず、コンクリートのアーチ機構で耐荷力を期待した床版

構造が開発された。ただし、床版下面の引張応力によるコンクリートのひび割れをポリプロピレン繊維で抑制しており、アーチ機構を確保するため、上フランジ間を鋼のストラップで固定している。カナダの Salmon 川橋でその構造形式の床版を有する合成桁橋を試験的に施工し供用している。鉄筋を配置しないため、腐食による床版の劣化の心配が要らないだけでなく、配筋の作業を省略できて、施工性は大幅に向上すると言われている。採用にあたってこの構造形式の合成桁橋をモデル化した供試体の静的載荷試験を実施して、床版は押抜きせん断破壊を呈するが耐荷力は十分であることを確認している^{2),3),4)}。しかしながら、本形式床版の疲労耐久性は照査されていない。そこで大阪大学で小型モデルと実物大モデルのポリプロピレンファイバーコンクリート床版(以下 PFRC 床版)を製作し、輪荷重走行試験を行い、国際協同研究を行うこととなった。まず小型輪荷重走行試験機用の縮小版 PFRC 床版を作成し、静的試験および疲労試験を行ったが、荷重の大きさの制約、床版スパンに対してフランジ幅が大きかったこと等からいずれの床版も破壊に至らず、耐久性評価が正しく行われなかった。続いて実物大モデルの床版について大型の輪荷重走行試験機による疲労試験を行った。本報告はこの後者の結果を示し、耐久性の評価を加えたものである。

表-1 ホリフロビレンファイバー

Designation	Compressive Strength	Young's Modulus	Splitting Tensile Strength	Bending Strength	Converted Bending Strength	Shear Strength	Poisson's Ratio
	(MPa)	(GPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	—
PFRC1	68.4	31.4	5.08	6.70	2.72	—	—
PFRC2	44.7	25.2	3.96	5.54	2.30	7.21	0.194
(core)	40.5	21.9	4.69	—	—	—	—
PFRC3	49.2	29.2	4.00	6.40	2.77	8.50	0.192

2. 実験概要

図-1 に供試体図を、表-1 に PFRC の材料特性を示す。

供試体は PFRC1, PFRC2, PFRC3 の 3 体である。供試体床版寸法は橋軸方向に3000mm, 橋軸直角方向に2100mm, 主桁間隔 1800mm であり, 実橋のほぼフルモデルとなっている。主桁間を結ぶ引張部材として 600mm のピッチで断面積 450mm² のストラップを配置した。主桁および横桁にコンクリート床版を剛結するためスタッドを配置した。ただし, PFRC1 において横桁は主桁に結合しなかった。PFRC2 および PFRC3 においては横桁と主桁とは図-1 に示すようにボルトで連結した。

カナダの示方書(CHBDC)では最小床版厚は 175mm 以上と規定されているが, 床版厚 150mm でも設計輪荷重に対して十分な押抜きせん断耐荷力を有するというカナダにおける実験結果に基づいて本供試体は 150mm 厚とした。

材料特性はカナダで実施された Salmon 川橋の PFRC 床版をほぼ再現したものである。PFRC2 では部材中における材料特性を確認するために試験終了後にコアリングを行った。その材料特性も併せて記載してある。これにより材料試験用のテストピースと床版部材中のコンクリートの材料特性には有為な差異は無いと言える。

図-2 に疲労載荷に用いた輪荷重走行試験機を示す。試験機の能力は以下に示すとおりである。

- 載荷能力 : 98kN~294kN
- 荷重移動範囲 : 床版中央から±1000mm
- 走行速度 : 58 回/分(最大速度 12.2km/h)
- 車輪の径と幅 : 500mm, 300mm

本試験機の手車輪は耐久性を確保するために鉄輪としているので, このまま載荷した場合は線荷重がかかることとなり好ましくない。そこで, 床版上面に鉄製ブロックを多数並べ, その上に鉄板を乗せた軌道を形成し, その上に車輪を走行させている。

軌道下に敷くブロックの大きさは載荷面積 300mm × 120mm, 高さ 50mm でこれは道路橋示方書に規定されている輪荷重の載荷面積 500mm × 200mm の各辺を 60%に縮小したものである。ブロックは 19 個設置し, ブロック間の隙間は 5mm とした。

図-3 に測定項目図を示す。床版中央の直交軸下で橋軸方向および橋軸直角方向に 20cm ピッチで高感度変位計(感度 1/1000mm)を配置し, 床版の活荷重たわみおよび残留たわみを測定した(図-3(a))。ストラップに発生する張力をひずみゲージで測定した(図-3(b))。また, PFRC2 および PFRC3 については床版上下面においてコンクリートのひずみを測定した(図-3(c), 図-3(d))。各供試体において以上の計

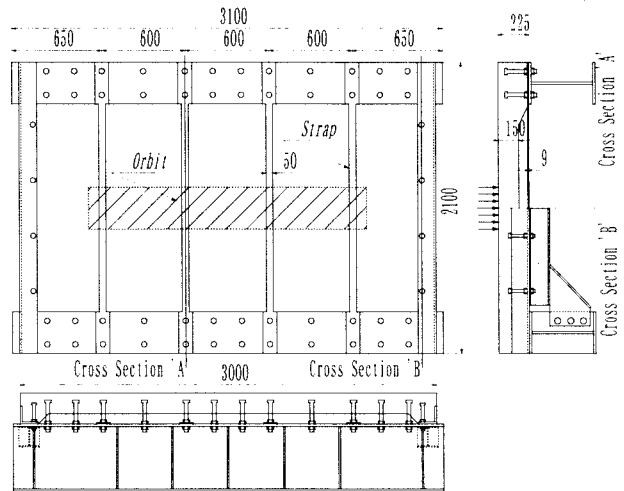


図-1 供試体図(PFRC2, PFR3)

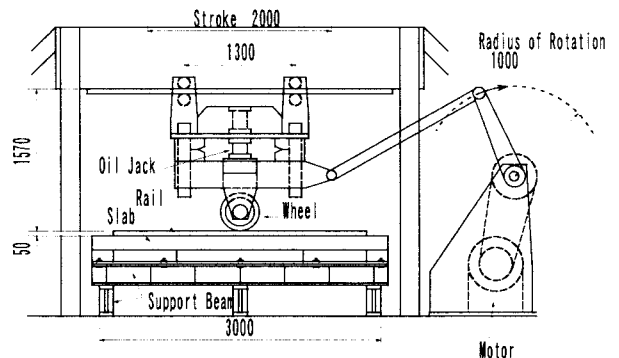


図-2 輪荷重走行試験機

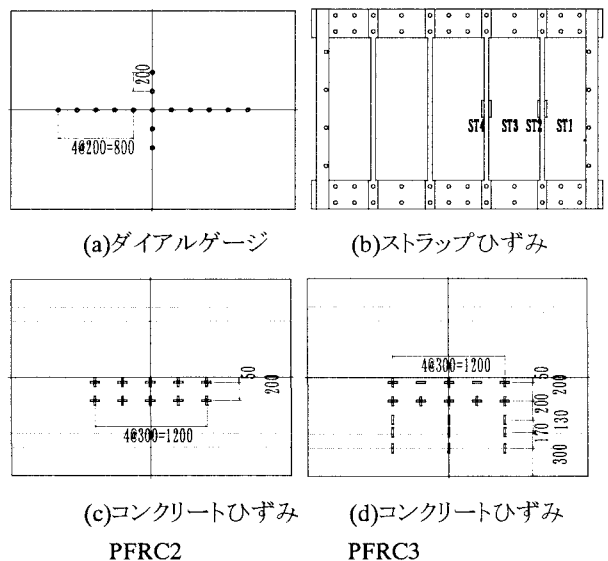


図-3 測定項目図

測は動的走行を所定の回数毎に停止し、床版中央での静的載荷のもとで行った。ただし、PFRC3 については床版中央および中央から±60cm 離れた位置の 3 点での載荷・測定を行った。以降、床版中央を C 点、床版中央から+60cm の地点を S 点、-60cm の地点を N 点と呼ぶことにする。

3. 実験結果

3.1 破壊性状およびひび割れ性状

表-2 に載荷プログラムを示す。すべての供試体で、最初に 117.6kN で 2 万回走行させており、PFRC1 では続いて 147 kN で 2 万回走行、さらに 176.4kN に荷重を上げて走行させたが 21.8 万回の時点で床版端が曲げ破壊した。PFRC2 では 147kN で 2 万回走行後、176.4kN に上げたが PFRC1 の 2 倍以上の 47.4 万回走行させた時点で走行路の端部付近で押抜きせん断破壊した。PFRC3 については 147kN で走行載荷を続行させ、98 万回走行させたが破壊に至らず、載荷を終了した。

図-4 に載荷終了時のひび割れ図を示す。床版下面で橋軸方向に1本のひび割れが発生しているのは曲げモーメントによるものである。直角方向にも 50cm 間隔で発生した。そして波線で示したひび割れで床版が 2 つに分離した。この PFRC1 の破壊形式は降伏線理論で説明できる端部での Y 字形ひび割れ形成が原因し、それがせん断力の繰返しによって全厚を貫通したと言える。自由端には横桁を取り付けていたため、その辺が回転中心としてひび割れで囲まれた三角形の剛体回転で破壊してしまった。カナダの静的試験においても横桁とコンクリート床版部材とを合成しなかったときには端部でこのような複合モードで破壊したと報告されている²⁾。PFRC2 は横桁を主桁に連結したが、やはり荷重の走行終端より外側が三角形のひび割れを発生した。その結果、荷重が最も端部に来たときに橋軸方向への荷重の有効幅が減少し、橋軸直角方向でオーバーロードになり、せん断破壊を呈して破壊した。これらより、この形式の床版は押し抜きせん断型の横桁付近での劣化が顕著であると言える。PFRC3 は最大載荷荷重が他の 2 体よりも小さかったため、破壊には至らなかった。しかし、4で述べるように載荷終了後、床版を切断しひび割れ状況を観察した結果、ほぼ使用限界状態に達していたと判断できる状況であった。

全ての供試体において破壊に至るまで RC 床版のように橋軸直角方向に貫通ひび割れが発生し、梁状化することがなかったが、ひび割れ本数が少ないためひび割れ面の開き、ずれ、段差の全モードの挙動は大きかった。PFRC3 で 148kN、100 万回走行時のひび割れの開きをクラックゲージで測定したところ 0.9~1.4mm 程度であり、鉄筋コンクリート床版での使用限界ひび割れと言われる 0.2~0.3mm を大幅に越えていた。床版内に鉄筋を配置しないためひび割れが集中したためである。縮小版 PFRC 床版においても初期の中央載荷で載荷点直下に橋軸方向のひび割れが形成されたが、ある走行回数から偏心載荷させると新たに発生するひび割れは輪荷重走行下だけであった⁵⁾。また、縮小版 PFRC

表-2 載荷プログラム

Designation	Load(kN)	Loading passes
PFRC1	117.6	20,000
	147	20,000
	176.4	218,000
		Bending failure
PFRC2	117.6	20,000
	147	20,000
	176.4	474,000
		Punching Shear failure
PFRC3	117.6	20,000
	147	980,000
		not failure

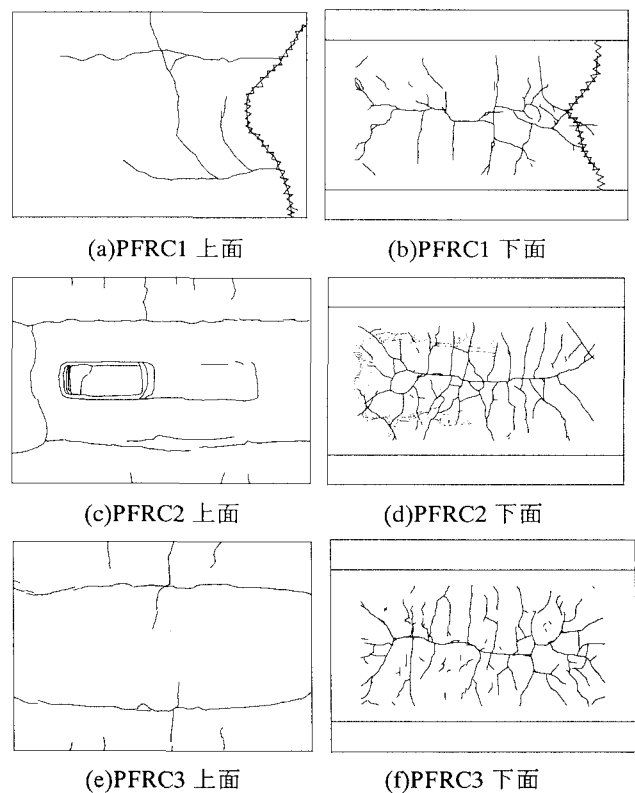


図-4 ひび割れ図

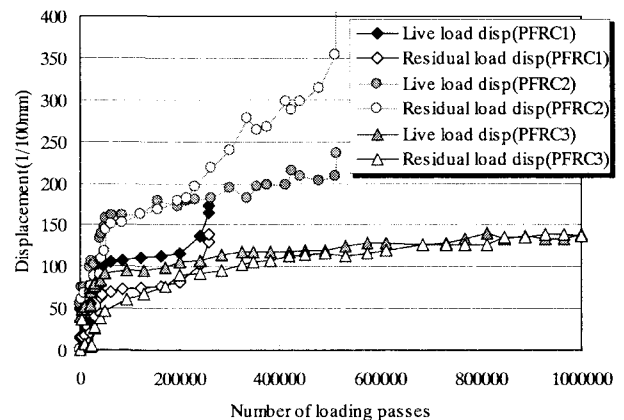


図-5 たわみ-走行回数

床版においても同様に横桁付近では Y 字形の斜め方向ひび割れが早期に発生していた。

3.2 たわみ性状

図-5 にたわみ-走行回数を示す。PFRC1 の 176.4kN 時に活荷重たわみが 1mm を超えたところで安定期に入っている。その後、20 万回走行を越えたところでたわみが急増しているが、これは横桁付近の Y 字形ひび割れの進展によって荷重に抵抗する橋軸方向有効幅が減少したためである。PFRC2 の活荷重たわみ、残留たわみは 176.4kN 時に 1.7mm を超えたところで安定期に入っている。活荷重たわみは破壊に至るまで漸増しているのに対し、残留たわみは 20 万回走行を超えたところから顕著に増加している。これは支持桁の上フランジ内側縁上の床版上面で支持桁方向にひび割れが発生したためである。活荷重たわみが 2mm、残留たわみが 3.5mm を超えたところで破壊に至っている。PFRC3 の活荷重たわみ、残留たわみは 147kN で載荷した初期の段階から載荷終了時まで漸増はしているが非常に安定していた。

図-6 に PFRC2 の床版中央縦断面における橋軸方向たわみ分布を示す。荷重の増加、走行回数の増加とともにそれぞれの値が大きくなっていく。RC 床版では橋軸方向のたわみ分布はなだらかな分布曲線を描くのに対して、PFRC 床版では鉄筋がないため、載荷点で尖った形になっていると言える。

図-7 に PFRC2 の橋軸直角方向たわみ分布を示す。この方向の分布も V 字のように 2 つ折れのたわみ分布となった。やはりひび割れが集中するためと思われる。

3.3 コンクリートのひずみ状況

図-8 に橋軸方向のコンクリートのひずみ分布(PFRC2)を示す。橋軸方向のたわみ分布と同様、PFRC 床版では橋軸方向には特に補強が行われていないため、床版中央の横断方向のひび割れが開口し、その部分で尖った形になっている。

図-9 に PFRC3 の床版上下面における橋軸直角方向ひずみ分布を示す。図-9(a), (b)より 2 万回走行後に上面においては桁付近でひずみが引張側からゼロに近づき、下面においては桁付近での圧縮力が大きくなっている。これは輪荷重の走行に伴って負曲げ部で橋軸方向の上面ひび割れが発生するとともに、橋軸直角方向にアーチの耐荷機構が形成されるためである。

3.5 ストラップのひずみ性状

図-10 に床版中央側のストラップ(ST3, 4)のひずみ-走行回数曲線を示す。たわみ-走行回数曲線とほぼ同じ傾向の挙動を示すことからアーチ効果を保持するためのストラップが有効に働いていることが推察できる。全ひずみが最終的に最大であった PFRC2 では 750 μ 程度となっているが、CHBDC によって設計したストラップの断面は降伏に対して十分安全であることが分かる。

3.7 RC 床版との寿命比較

PFRC 床版の寿命と床版厚 18cm の一般的な RC 床版の寿命とを比較することにした。ただし、RC 床版の寿命について

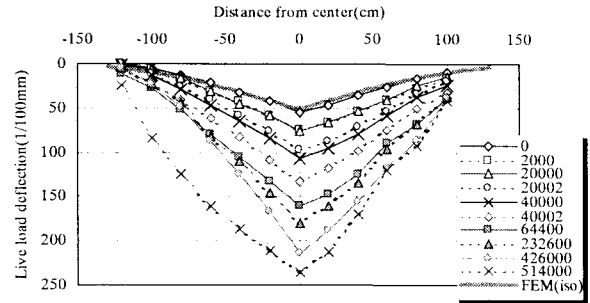


図-6 橋軸方向たわみ分布(PFRC2)

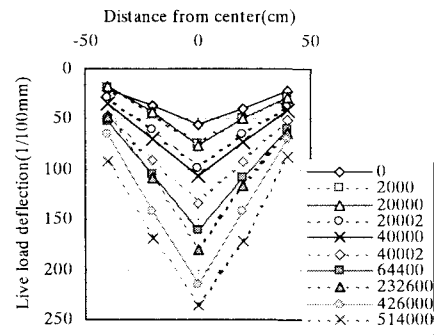


図-7 橋軸直角方向たわみ分布(PFRC2)

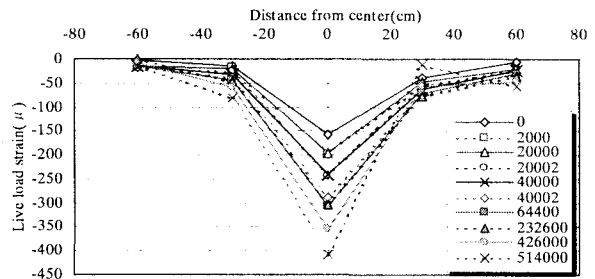
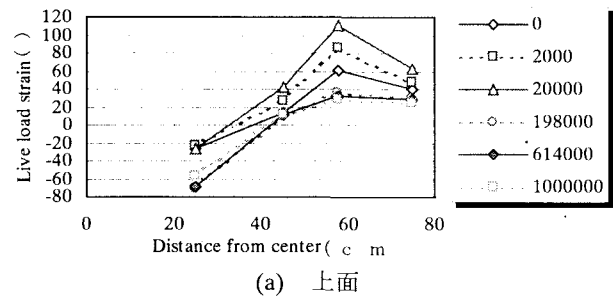
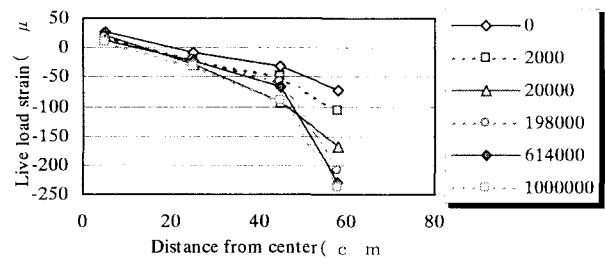


図-8 橋軸方向コンクリートひずみ分布(PFRC2)



(a) 上面



(b) 下面

図-9 橋軸直角方向コンクリートひずみ分布(PFRC3)

では次式⁹⁾に示す単純支持の RC 床版に関する S-N 曲線により求めた。

$$\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.52 \quad (1)$$

式(1)より求められた RC 床版の寿命は 147kN において 32.8 万回、176.4kN において 3.2 万回であった。

これより PFRC 床版は 18cm 厚床版より高い疲労耐久性を有すると言える。しかし、本床版では端部からの破壊が生じることを考えると、過積載車に対する安全性を確保する意味において横桁から主桁間隔の 1.5 倍離れた位置までは鉄筋の配置、あるいはカーボンシートの接着といった曲げの補強を推奨したい。

4. ひび割れ進展解析

PFRC2 および PFRC3 は試験終了後に横断面で切断した。図-11 にその断面におけるひび割れ進展状況を示す。軌道直下および負曲げを受けるエリアでのひび割れが確認できた。PFRC2 において軌道直下にアーチリブ下縁に沿うひび割れが見られた。また、破壊に至らなかった PFRC3 においても断面をカットするとアーチの圧縮域と考えられる領域の下縁に沿って水平方向のひび割れが進展していた。表-3 に橋軸直角方向ひび割れ断面でのアーチリブ高さを示す。これに対して床版を橋軸直角方向の梁部材と扱ったときの梁理論による中立軸を計算し、比較している。ただし、橋軸方向のたわみ分布から有効幅を 120cm としている。実測による圧縮領域は計算より若干大きくなっているのはファイバーの効果によるものと考えられる。

ひび割れ進展に伴う応力状態の変化を調べることにした。解析にはコンクリート専用プログラム SBETA を用いた。PFRC の引張軟化曲線には別途に試験(RILEM 法に基づいた切欠き梁の材料試験)を行い、それにより得た引張軟化曲線を採用した(図-12)。

図-13 にメッシュ図を示す。境界条件としては桁の面外方向の変形は微小であるが、ハンチ部上端の断面で床版に負曲げによるひび割れが発生しているので 2 ヒンジアーチとして挙動するものと仮定し両フランジの内側でピンと考えた。

図-14 に解析における終局時のひび割れ図を示す。ひび割れの分散性状に若干の差異はあるものの、ひび割れ進展の傾向は図-11 とほぼ同じであると言える。これより圧縮側コンクリートアーチのせん断耐荷力が載荷板端による作用せん断力より小さくなるとせん断破壊に至ることが分かる。

図-15、図-16 に曲げひび割れ発生前後における最大主応力分布、せん断応力分布を示す。ただし、曲げひび割れ発生後の応力状態は終局に至る直前のものである。

図-15(a),(b)より曲げひび割れ発生前は軌道直下およびハンチ端の上面において引張応力が顕著になっているのに対し、曲げひび割れ発生後は載荷端よりほぼ斜め 45° 方向の床版厚中央付近においても引張主応力が発現している。この引張主応力によってせん断ひび割れが発生するわけである。

図-16(a),(b)より曲げひび割れ発生に伴ってせん断応力の

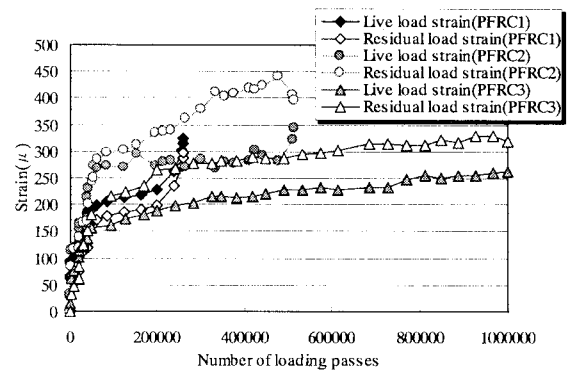


図-10 ストラップ(ST3, 4)のひずみ-走行回数

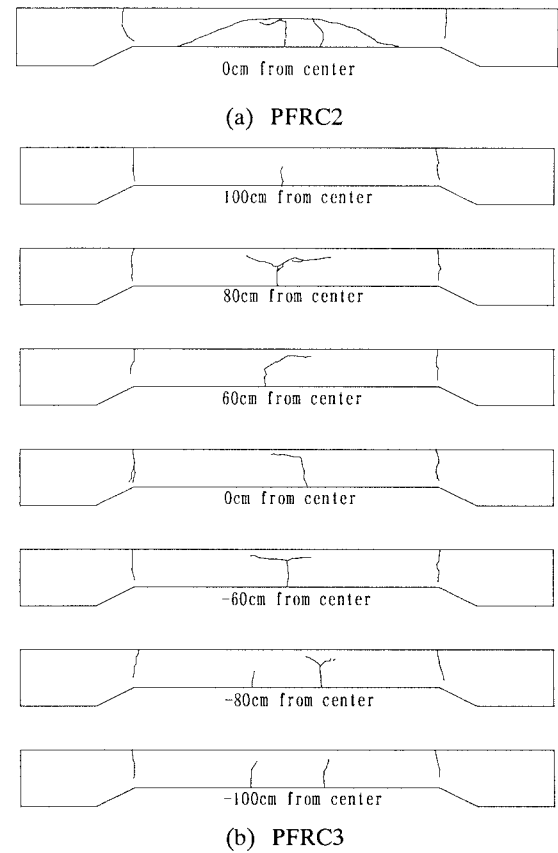


図-11 橋軸直角方向ひび割れ断面図

表-3 実験でのアーチリブ深さと梁理論による中立軸

Designation	Height of arch rib(mm)	Neutral axis(mm)
PFRC2	50.0	46.2
PFRC3	50.2	43.3

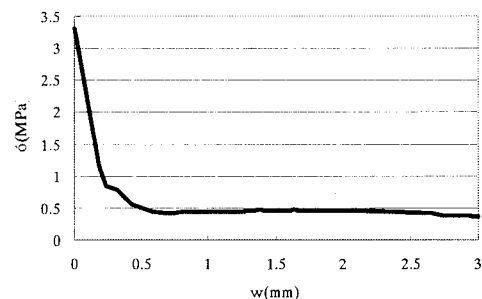


図-12 PFRC の引張軟化曲線

絶対値が大きい領域は床版厚中央付近に凝縮された形になっており、PFRC2 の橋軸直角方向におけるせん断破壊面と一致していることが分かる。

PFRC2 において 176.4kN 荷重時に押抜きせん断破壊に至ったが、これは曲げひび割れ発生後に図-16(b)のようなせん断応力状態になり、アーチの圧縮域の下縁に沿ってせん断ひび割れが進展し、残った圧縮リブ部のせん断耐力が外力に抵抗できなくなったところで押抜きせん断破壊に至ったものと考えられる。

5. まとめ

- 1)PFRC 床版は鉄筋を配置しておらず、ストラップはコンクリートと付着界面を有しないことから、床版下面にひび割れが発生する場合、本数が少ないためひび割れ幅が大きくなり、外観上好ましくない。主桁上の負曲げ部にもひび割れが発生する可能性は大きい。
- 2)既往の研究で得られている S-N 曲線から求められる一般的な 18cm 厚の RC 床版の疲労寿命と比較すると、PFRC 床版の方が耐久性は高い。ただし、本実験での荷重輪荷重は設計輪荷重に比して過酷な状態であるとは言え、過積載車に対する安全性確保という意味においては床版端部の補強が必要であろう。
- 3)曲げひび割れ形成後にコンクリートのせん断ひび割れ発生によってアーチ圧縮域の下縁位置に傘状のひび割れが形成され、アーチの圧縮リブ部のせん断耐力が外力に抵抗できなくなったところで押抜きせん断破壊に至る。そして、鉄筋が入っていないため、破壊は脆性的に発生する。床版端部では床版下面側にのみ鉄筋を配置することを勧告したい。

参考文献

- 1)小林一輔：繊維補強コンクリート特性と応用，pp.2-9，1981.10.
- 2)Bakht, B. and Agrwal, A. C.: Deck Slabs of Skew Girder Bridges, Canadian Journal of Civil Engineering, V22, No.3 pp.514-523, 1995.
- 3)Mufti, A. A. and Newhook, J. P.:Punching Shear Strength of Restrained Concrete Bridge Deck Slabs, ACI Structural Journal, No95/S33, pp375-381, 1998.7.
- 4)Hewitt, B. E. and deV. Batchelor, B.:Punching Shear Strength of Restrained Slabs, Journal of the Structural Division, ASCE 101(ST9), pp.1837-1853, 1975.
- 5)東山浩士・松井繁之・渡海大輔・BAKHT, B.:PFRC 床版の疲労耐久性に関する実験的研究，土木学会第 53 回年次学術講演会，pp34-35，1998.10.
- 6)松井繁之：橋梁の寿命予測—道路橋 RC 床版の疲労寿命予測，安全工学，Vol.30, No.6, pp.432-440, 1991.

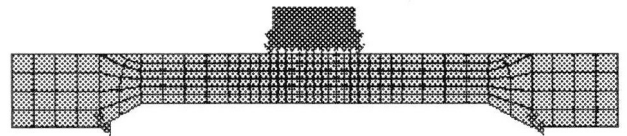


図-13 メッシュ図



図-14 終局段階のひび割れ図

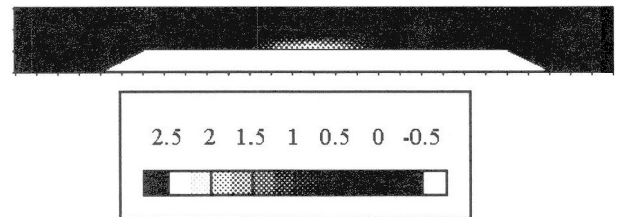


図-15(a) 曲げひび割れ発生前の最大主応力分布

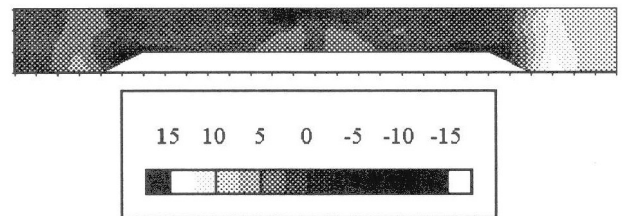


図-15(b) 曲げひび割れ発生後の最大主応力分布

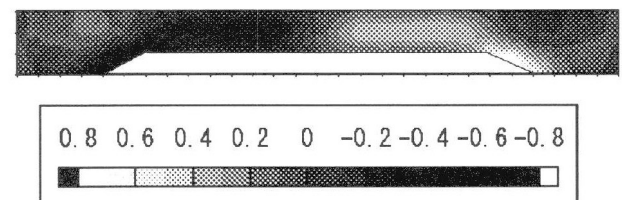


図-16(a) 曲げひび割れ発生前のせん断力分布

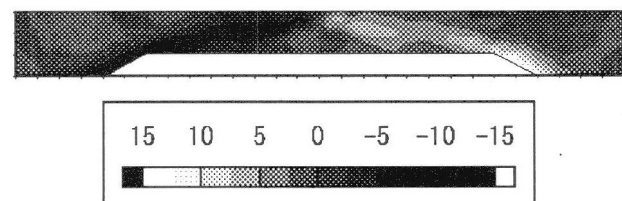


図-16(b) 曲げひび割れ発生後のせん断力分布