

論文

FRP 部材を用いた RC 床版補強工法の延命効果に関する研究

山崎敏宏*, 内田達大**, 荒木美柚**, 梶原淳生***, 新倉利之****, 笠嶋憲男*****

* 株式会社 IHI インフラ建設 鋼保全技術部 (〒590-0977 大阪府堺市堺区大浜西町 3)

** 株式会社 IHI インフラ建設 鋼保全技術部 (〒135-8710 東京都江東区豊洲 3 丁目)

*** 東京都立大学 大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1 丁目)

**** パシフィックコンサルタンツ株式会社 橋梁保全室 (〒101-8462 東京都千代田区神田錦町 3 丁目)

***** 株式会社栗本鐵工所 コンポジットプロジェクト室 (〒527-0108 滋賀県東近江市小八木町)

現在、劣化した RC 床版の更新工事が実施され、耐久性に優れた PC 床版に順次取り替える工事が進められている。しかし、床版取替工事には長期にわたる交通規制が必要となり、交通渋滞による社会的影響は少なくない。そこで、軽量の FRP を用いた部材で床版を下面からサポートすることによって、床版の延命化を図る工法を開発した。本研究では、延命効果を確認するために、その効果の指標として、補強を行うまでの損傷度合いの設定、および、補強部材の配置をパラメータにして、計 3 体の輪荷重走行試験を実施し、激しい損傷に至った床版でも相当十分な疲労耐久性が保証できることを検証した。

キーワード：延命化, FRP, 輪荷重走行試験, 耐疲労性

1. はじめに

道路橋コンクリート床版（以下、RC 床版）は、大型車両の増加や厳しい環境下での老朽化などによって、橋梁の損傷が加速度的に増加している。そのような現状から、高速道路や国道といった主要道路において、RC 床版の取替工事が実施されている。床版取替工事では、交通規制を伴い社会的損失が生じ、路線によっては迂回路が確保できないため、部分的な断面補修など応急的な処置しか対応できないケースもある。また、床版取替工事費用の増加により、床版取替工事の予算確保も困難となってきた。

以前より、長期間の交通規制が不要で、確実に RC 床版を補強する工法として、アンダーデッキパネル工法 (IS パネル) がある。しかし、鋼材で構成されていることから単位面積当たりの重量が大きくなり、補強効果は高いものの、上部構造・下部構造に耐力力の余裕が必要となる。そこで、軽量で耐久性、耐食性にも優れる繊維強化プラスチック (Fiber Reinforced Plastic, 以下、FRP) を用いた RC 床版の延命を可能とする『FS グリッド (FRP サポートグリッド)』の開発を行うに至った。図-1 に FS グリッドを装着した補強概要図を示す。

本研究では、この補強効果を把握するために、諸条件を変えた輪荷重走行試験を行い、補強による延命効果の検証を行った。

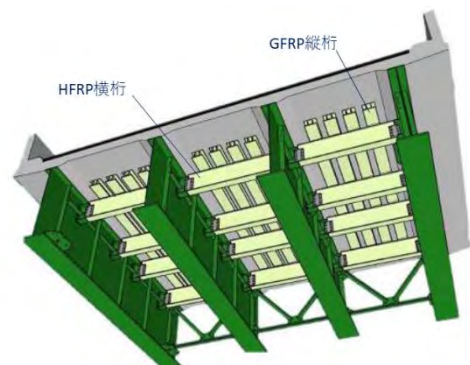


図-1 FS グリッドによる補強概要図

2. FS グリッドの構造

FS グリッドは、RC 床版の下面に配置した FRP 製の縦桁と横桁で構成した格子状の部材にて RC 床版の変形を押さえ、疲労耐久性を向上させるものである。床版下面に配置したダブルウェブ断面の縦桁を、主桁間に配置した I 断面の横桁で支持し、主桁ウェブに取り付けた鋼製ブラケットを介して、主桁に力を伝達させる構造としている。横桁と鋼製ブラケットの接合には、高力ボルトを用いた摩擦接合方式を採用した。縦桁にはガラス繊維強化プラスチック（以下、GFRP）を用い、横桁にはガラス繊維と炭素繊維を複合したハイブリッド FRP（以下、HFRP）の 2 種類を使用している。炭素繊維は高い弾性率

が必要な横桁フランジの一部のみに用いている。いずれもエポキシ樹脂をマトリックスとした¹⁾。図-2 に FRP 桁の断面形状を示す。

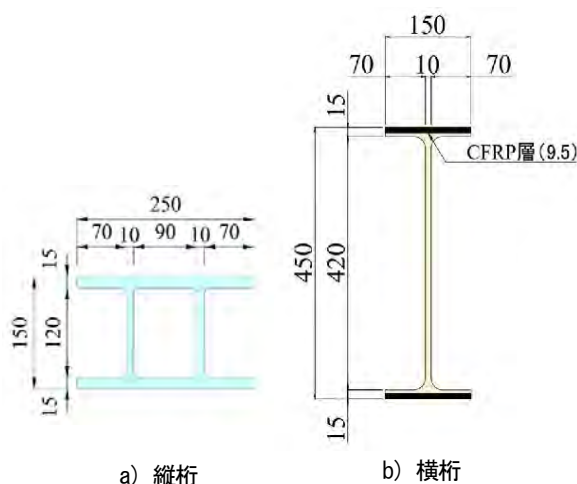


図-2 FRP 桁断面形状

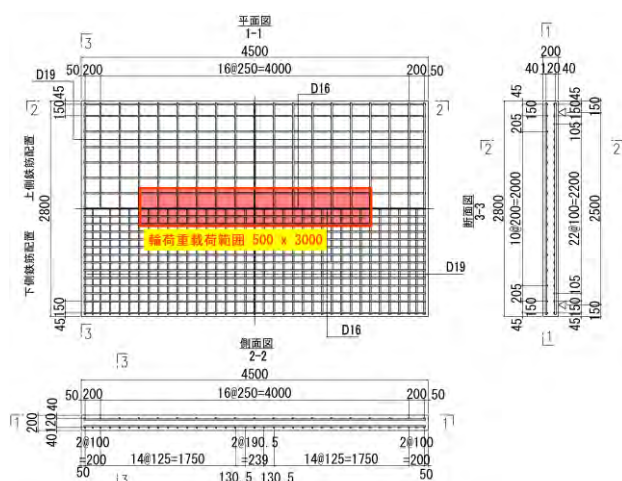


図-3 輪荷重走行試験の供試体図と輪荷重載荷の範囲

表-1 コンクリートの配合

目標値		単位量(kg/m ³)				
呼び強度 (N/mm ²)	S1 (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	空気 量 (%)	W C S G AD
21	18±2.5	4.5±1.5	62	46.9	4.5	180 291 845 980 2.91

表-2 RC 床版の力学特性

供試体	走行試験開始日		材齢 28 日	
	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	二面せん断強度 (N/mm ²)
I	31.8	30.1	2.34	6.6
II	35.4	28.3	2.43	6.9
III	29.7	29.4	2.14	6.0

表-3 走行試験機の仕様

項目	仕様
形状寸法	供試体最大寸法 幅 2.8m×長さ 4.5m×厚さ 0.35m
	車輪の種類 鉄輪 (直径 750mm×幅 320mm)
駆動	走行範囲 ±1.5m (±0.5m/±1.0m/±1.25m に変更可)
	フライホイール回転数 15~35rpm (通常運転 20rpm)
載荷	最大載荷力 490kN (50t)
	ストローク 最大 300mm (シンダーストローク最大 400mm)

3. RC 床版の諸元

3.1 適用床版

輪荷重走行試験の供試体とした RC 床版は、昭和 47 年の道路橋示方書・同解説（以下、道示）で設計された RC 床版（以下、RC47）を用いた。それ以前に設計された、昭和 39 年鋼道路橋設計示方書の RC 床版（以下、RC39）の方が、耐荷性能や耐久性能が劣っており、損傷が激しいことから、すでに取替えや補修・補強の完了している橋梁が多い。このため、これから損傷報告が増えるであろうと考えられる RC47 を用いて輪荷重走行試験を実施した。

3.2 供試体概要

(1) 供試体形状

RC 床版供試体は、長さ 4,500mm×2,800mm×床版厚 200mm とした。鉄筋については、主鉄筋として D19 を上段 250mm、下段 125mm 間隔で配置、配力筋として D16 を上段 200mm、下段 100mm 間隔で配置した。図-3 に供試体の概要図を示す。

(2) 使用材料

コンクリート配合を表-1 に示す。鉄筋は SD345 の呼び径 D19、D16 を使用した。

(3) コンクリート品質管理試験

フレッシュコンクリート性状は、試験体の製作時にスランプ (JISA11011)、空気量 (JISA1128: 空気室圧力法) および温度を確認した。硬化コンクリート性状は、試験体と同一養生を行う供試体により載荷開始時、FRP 補強後の載荷開始時、試験終了時に圧縮強度 (JISA1108) を確認した。また、材令 28 日時には、割裂引張強度 (JIS A1113)、二面せん断強度 (JCISF6) についても確認した。今回の輪荷重走行試験に用いた RC 床版の力学特性を表-2 に示す。

4. 試験方法と FS グリッドによる供試体の補強方法

4.1 試験条件

(1) 載荷方法および支持条件

試験は、(株) IHI インフラシステムが所有する輪荷重走行疲労試験機 (クランク式) で実施した。走行試験機の仕様を表-3 に示す。なお、荷重載荷範囲は図-3 に併記している。供試体は支間 2.5m とし、床版支間方向の支持は供試体と支持桁上フランジの間に丸鋼を設置した単純支持とし、橋軸方向の支持は端横桁を利用した弾性支持とした。また、供試体の浮き上がりを防止するために、固定具で供試体を支持桁に固定した。

(2) 載荷プログラム

一次載荷にて所要の床版ひび割れが生じるまで輪荷重を走行させ、初期損傷を与える。まず、157kN を 5 万回まで載荷させ、その時点で後述する劣化度 D₈ に到達しな

い場合は、19.6kN ずつ荷重を上げて所定の劣化度まで載荷する。所定の劣化度を確認した後、FS グリッドによる補強を行い、二次載荷を行う。初期荷重を 157kN として 10 万回走行ごとに 78kN ずつ荷重を増加、破壊に至るまでの試験を実施するものとした。破壊に至らない場合、40 万回で試験を終了し、載荷後の床版の損傷状況を確認することとした。

4.2 FS グリッドの設置条件と一次載荷による損傷

FS グリッドは、横桁 2 本と複数本の縦桁を 1 ユニットとして構成している。対傾構間隔の中で 2 ユニットを配置し、ユニット同士の間隔（以下、ユニット間隔）をパラメータ（50, 80, 300mm）として、その位置を供試体の橋軸方向の中央になるように FS グリッドを配置した。ユニット間隔は 50mm を標準（供試体 I）とするが、対傾構位置は、床版のハンチ高が低い場合、縦桁を配置することができないこともある。このため、対傾構をかわすために、ユニット間隔を 300mm に広げたケース（供試体 II）を設定した。ユニット間隔を 300mm とした供試体 II では、後述するように、ユニット間で曲げ卓越型のひび割れが生じたため、ユニット間隔を 80mm としたケース（供試体 III）を設定した。これは、供試体の配筋有効高さが 144mm であるため、ユニット同士の間隔をそれ

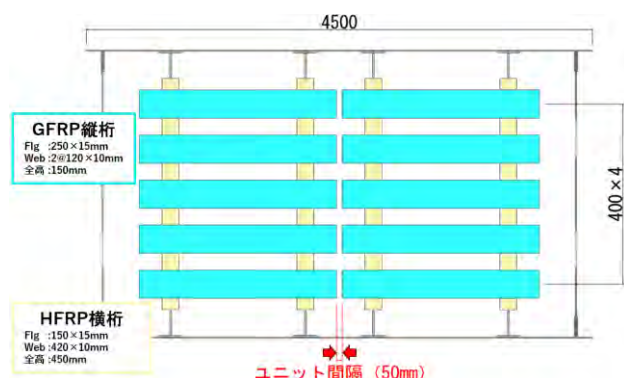


図-4 FS グリッドの配置 (供試体 I)

表-4 供試体パラメータ

供試体	ユニット間隔 (mm)	床版と縦桁の縁切り	劣化度および劣化度判定基準		
			劣化度 D_δ	活荷重たわみ δ_L (mm)	ひび割れ密度 C_d (m/m ²)
I	50	無し	0.7	1.975	7.0
II	300	無し	0.7	1.975	7.0
III	80	有り	0.9	2.302	9.0

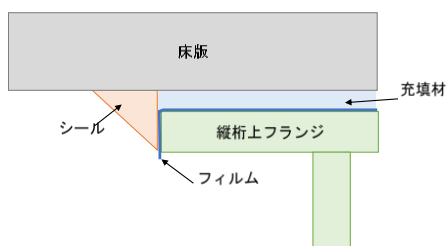


図-5 フィルムによる縁切りのイメージ図 (供試体 III)

以下に設定すれば、押し抜きせん断によるコンクリートの抜け落ちは生じないと考え、この配筋有効高さの 1/2 をユニット間隔 (144mm/2=72mm→80mm) としたものである。図-4 に、配置図 (ユニット間隔 50mm の例) を示す。FS グリッドは、一次載荷による初期損傷を与えた後に設置した。

本研究では、床版の劣化度をパラメータ ($D_\delta=0.7, 0.9$) として検討を行った。供試体 I, II では劣化度 $D_\delta=0.7$ とし、供試体 III では $D_\delta=0.9$ (床版の使用限界付近) を目標として、一次載荷により床版に初期損傷を与えた。劣化度は、床版の活荷重たわみとひび割れ密度を指標にして、設定した劣化度に到達したことを判定した。表-4 に、供試体のパラメータを示す。ここで、劣化の算出方法について、式(1)に示す。

$$D_\delta = \frac{\delta_L - \delta_o}{\delta_c - \delta_o} \quad (1)$$

ここに、 D_δ : たわみによる劣化度、 δ_L : 活荷重によるたわみ、 δ_c : 引張側コンクリート無視の場合の理論たわみ、 δ_o : 全断面有効の場合の理論たわみである。

なお、後述するように、床版と縦桁の変形挙動の違いにより、床版にひび割れが生じた (供試体 I, II)。そこで、供試体 III では、不陸調整のために床版と縦桁との間に注入するエポキシ樹脂による接着力の縁切りを目的にフィルムを挟み込むこととした。図-5 にフィルムによる縁切りのイメージ図を示す。

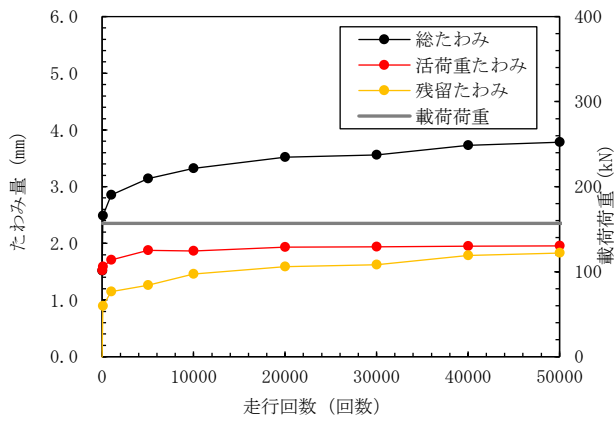
供試体 I, II では、走行回数 5 万回 (157kN) で、活荷重たわみ、ひび割れ密度がそれぞれ 1.96, 1.95mm, 7.3, 8.0m/m² に到達したため、この時点で一次載荷を終了した。供試体 I の走行回数とたわみを図-6 (a) に、一次載荷終了時のひび割れ状況を図-7 (a) に示す。

供試体 III では、157kN で 5 万回、177kN で 2 万回、196kN で 5 万回、216kN で 13 万回の計 25 万回走行させ劣化度 0.9 に到達した。この回数は 157kN 等価載荷回数で 856 万回に相当し、RC47 の破壊走行回数と同等となる。一次載荷終了時の活荷重たわみは 157kN 載荷時で 2.26mm、ひび割れ密度は 10.3m/m² であった。図-6 (b) に走行回数とたわみを、図-7 (b) に一次載荷終了時のひび割れ状況を示す。

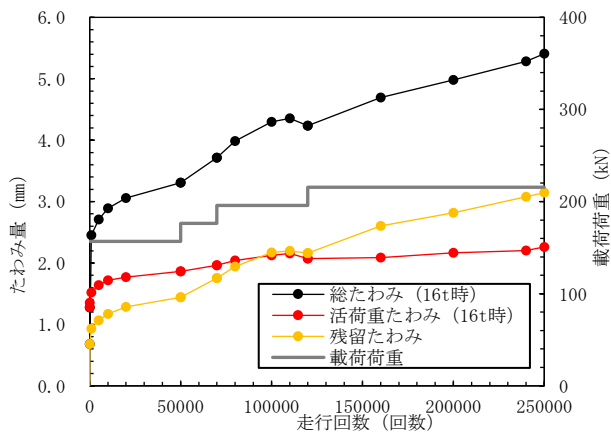
5. 二次載荷試験の結果と考察

5.1 供試体 I, II (劣化度 0.7)

補強後の活荷重たわみは、供試体 I で 0.85mm、供試体 II で 0.89mm となり、補強前のたわみに対してそれぞれ 43%, 46% に低減された。この低減率は、事前に FEM 解析により算出した結果とよく一致している²⁾。どちらも走行回数が 10 万回を超え、荷重を 235kN に上げた時点から残留たわみに微増が見られたものの、活荷重たわみに大きな変化は見受けられなかった。走行回数が 30 万回

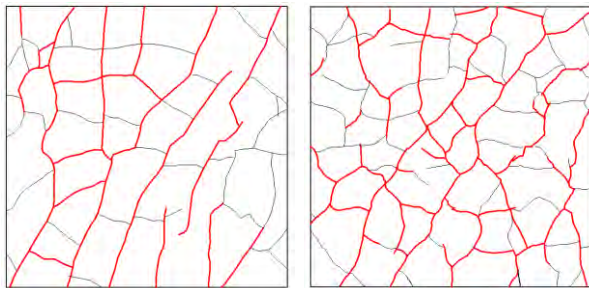


(a) 供試体 I



(b) 供試体 III

図-6 一次載荷走行回数とたわみ



(a) 供試体 I

(b) 供試体 III

注) 0.1mm 以上のひび割れを計上 (赤線)

図-7 一次載荷終了時ひび割れの状況 (1m×1m)

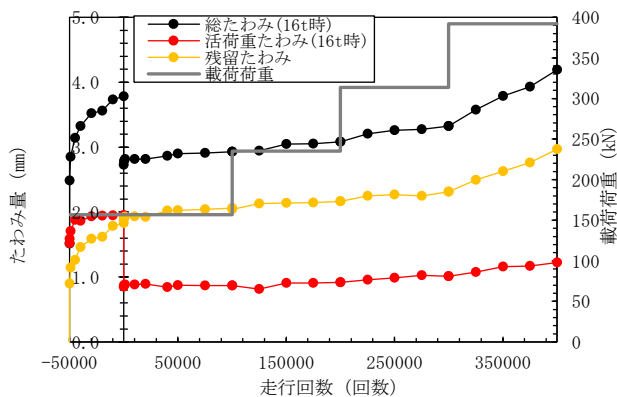


図-8 二次載荷走行回数とたわみ (供試体 I)

を超え、荷重を 392kN に上げたあたりから、残留たわみや活荷重たわみが増加し始めた。走行回数とたわみの関係を図-8 に示す。

試験終了後、床版を切断し、床版内部のひび割れ状況を確認した。供試体 I、II とも縦桁端部よりひび割れが生じ、床版上面に向かって進展している。図-9 に供試体 I の橋軸方向切断面を示す。床版下面には不陸調整のため、エポキシ樹脂を充填する構造としている。移動する荷重に対する変形が、床版と縦桁で異なるため、鉛直方向および水平方向にずれが生じ、エポキシ樹脂を介して床版にひび割れを発生させたものと考えられる。供試体 II では、300mm に設定したユニット間で、曲げ卓越型のひび割れが確認できた。図-10 に供試体 II の橋軸直角方向切断面を示す。

5.2 供試体 III : 劣化度 0.9

供試体 III では、フィルムの設置、ユニット間隔の設定を行い、劣化度を 0.9 に上げて試験を実施した。図-11 に走行回数とたわみの関係を示す。補強後の活荷重たわみは 0.97mm となり、補強前 2.26mm の 43% となった。走行回数が 10 万回を超え、荷重を 235kN に上げてから 5 万回走行させる間に、残留変位が大きく増加し、それ以降も微増の傾向が見られた。しかし、この前後での活

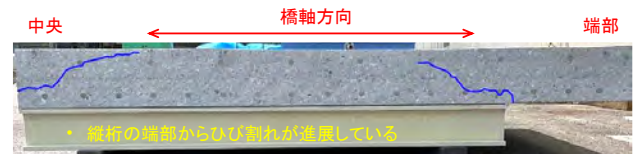


図-9 橋軸方向床版切断面 (供試体 I)

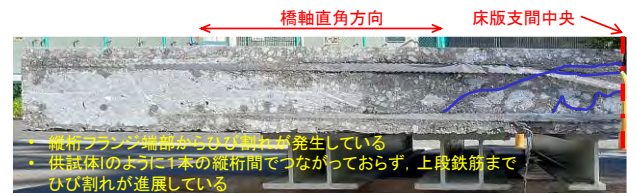


図-10 橋軸直角方向床版切断面 (供試体 II)

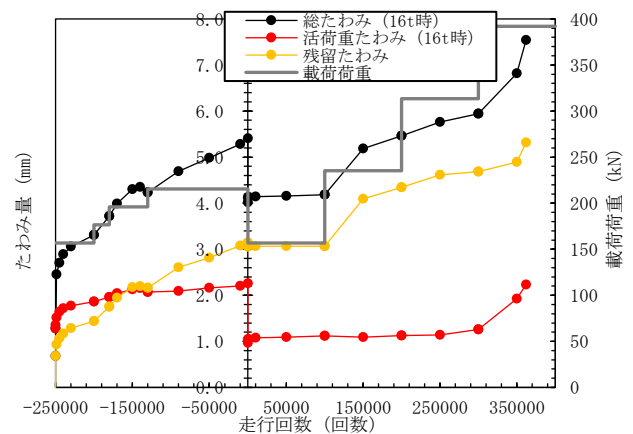


図-11 二次載荷走行回数とたわみ (供試体 III)

荷重たわみに変化がないことから、床版剛性としては変化していないと考えられる。一次載荷時の216kNでひび割れが生じ、その荷重を越えた235kN載荷時に、床版内部でずれが生じ、局部的に残留たわみが大きくなったものと推測する。

供試体Ⅲもそれまでと同様に、走行回数が30万回を超えあたりから、活荷重たわみが増加し始めた。残留たわみを含めた総たわみ量が10mmを超えたため、36.2万回で走行を終了した。

試験終了後、床版を切断し、床版内部のひび割れ状況を確認した。図-12に橋軸直角方向の切断面を、図-13に橋軸方向の切断面を示す。橋軸方向では、上段鉄筋に沿った水平ひび割れが確認でき、橋軸直角方向の切断面をみると、斜めせん断のひび割れが確認されたが、これは、土木研究所で行われた輪荷重走行試験のRC47-1の破壊時ひび割れ状況³⁾に良く似ており、補強前の一次載荷で生じたひび割れであると推測できる。また、供試体Ⅰ、Ⅱとは異なり、縦桁端部からのひび割れは見受けられなかった。縦桁の上に設置したフィルムによって、床版と縦桁の縁切り機能が有効に働いたものと考えられる。

5.3 FSグリッドの損傷確認

輪荷重走行試験中、および試験終了後に、FSグリッドの状態を確認した。部材の変形や、添接板のずれ、ボルト軸力の減少もなく、試験前からの変状は見受けられなかった。これらから、輪荷重走行試験によるFSグリッドの劣化等はなかったといえる。

6. 補強による延命効果とその後の維持管理

6.1 FSグリッド補強後の荷重支持機構

一次載荷において床版の使用限界近くまで疲労させた床版に対して、コンクリートの剥離を伴う押抜きせん断破壊が生じずに、たわみ増加によって終局状態に近づいた。これは、FSグリッドによる床版格間全体の支持による効果によるもので、FSグリッドで補強された床版は、繰返し載荷に対しても、比較的緩やかに破壊に至ると推定される。このことは、図-14に示す、FSグリッドの荷重分担率の推移からも確認できる。ここで、FSグリッドの荷重分担率は、作用する輪荷重のうち、FSグリッドが

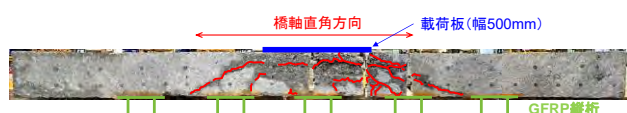


図-12 橋軸直角方向床版切断面（供試体Ⅲ）



図-13 橋軸方向床版切断面（供試体Ⅲ）

分担する荷重の割合であり、事前に床版のないFSグリッド単体のひずみと作用荷重の関係を計測しておくことで、床版がある状態において、輪荷重の作用時に横桁に設置されたひずみゲージの値から推定するものである。それは、式(2)より算定される。

$$c_{ij} = \begin{bmatrix} c_{11} & \cdots & c_{15} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{51} & \cdots & c_{55} \end{bmatrix}, \quad \varepsilon_{jk} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \cdots & \varepsilon_{14} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varepsilon_{51} & \cdots & \varepsilon_{54} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$P = \sum_{k=1}^4 \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^5 [c_{ij}^T]^{-1} \cdot \varepsilon_{jk}$$

ここに、 P はFSグリッドが分担する荷重、 c_{ij} はキャリブレーション時に縦桁との交差点 j ($j=1\sim5$) 点に単位荷重 $P_e=1\text{kN}$ を載荷した時の計測点 i ($i=1\sim5$) のひずみ値（影響係数行列）、 ε_{jk} は k 番目 ($k=1\sim4$) の横桁において、輪荷重走行試験時の計測点 j のひずみ値である。なお、ひずみの計測点は、縦桁との交差点における横桁の下フランジ下面とした。

図-14に示す荷重分担率の推移(59~78%)によると、活荷重たわみが増加する35万回付近においても、FSグリッド側の支持力の急激な増加はなく、床版本体の支持機構が失われていないことを示している。

6.2 FSグリッドの延命効果

繰返し載荷による作用に対する使用限界については、松井らが提案しているRC床版のS-N関係式⁴⁾に、繰返し変動荷重に対してマイナー則が適用できるものとして、各荷重ステップでの載荷回数を一定の評価荷重 P_0 に対して換算した式(3)で示す累積等価載荷回数 N_{eq} を算定した。

$$N_{eq} = \sum (P_i / P_0)^m n_i \quad (3)$$

ここに、 N_{eq} ：基準荷重 P_0 に換算した等価繰返し走行回数、 P_i ：実際に載荷した荷重(kN)、 P_0 ：基準荷重(本検討では157kN)、 n_i ：荷重 P_i の走行回数、 m ：12.76でS-N曲線の傾きの逆数である。

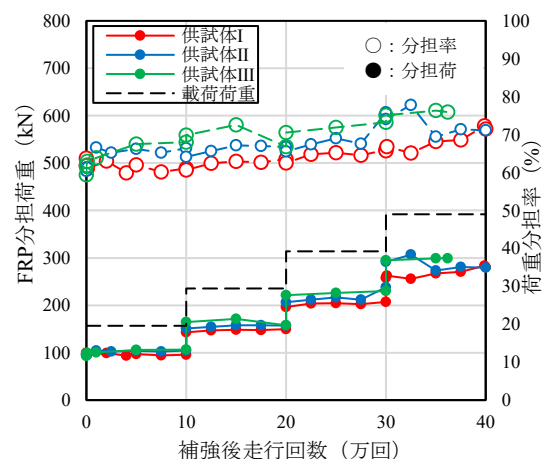


図-14 FSグリッドの荷重分担率

使用限界については、たわみの増加する直前の走行回数を使用限界として設定する事例⁵⁾を参考にした。本実験においては、補強後30万回と35万回で勾配が変化し、35万回から36.2万回で更に勾配が変化している測定結果を踏まえ、図-15のように、活荷重たわみが増加する点を使用限界として設定した。この結果、32.4万回を使用限界と捉え、157kN等価載荷回数に換算し、補強効果を算出した(表-5)。その結果、劣化度0.9に至るまでの回数の416倍となり、100倍以上の延命効果が得られることが確認された。

6.3 FSグリッド補強後の維持管理

今回の供試体全てにわたり、30万回を越えてから、ユニット間のひび割れの挙動が顕著になってきている。FSグリッドは床版下面を完全に覆う構造ではないため、床版下面のひび割れを観察することができる(図-16)。FSグリッド補強後の使用限界の判断として、近接目視によるひび割れ状態を指標とすることができる。

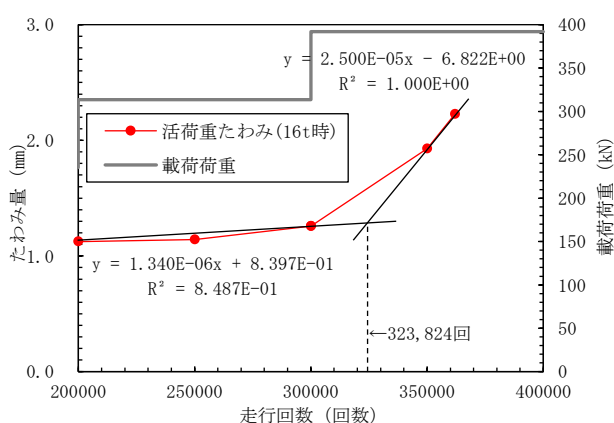


図-15 活荷重たわみの変化点による使用限界の推定

表-5 補強後の延命効果

	走行回数	157kN 累積 等価載荷回数	補強効果	載荷荷重
劣化度 0.7	5 万回	5 万回	—	157kN-5 万回
劣化度 0.9	25 万回	856 万回	1	157kN-5 万回, 177kN-2 万回, 196kN-5 万回, 216kN-13 万回
使用限界	32.4 万回	35 億 6,065 万回	416 倍	157kN から 10 万回毎に 78kN 増



図-16 床版下面のひび割れの状況

7. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 劣化度 0.7 および 0.9 まで損傷させた RC47 床版に対して、FS グリッドによる補強を行った結果、補強前の活荷重たわみを 45%程度に押さえることができること、また、床版に作用する荷重の 60~75%を分担することが確かめられた。
- (2) 床版と縦桁との間に充填するエポキシ樹脂は、接着力が高く、床版にひび割れを生じさせることが分かった。フィルムによる床版と縦桁との縁切りを実施した結果、縦桁端部からのひび割れを防止することができた。
- (3) ユニット間隔を 300mm とした供試体IIは、その間で曲げ卓越のひび割れが生じた。供試体IIIでは、押し抜きによる損傷寸前まで劣化させたが、それ以降の進展がなかったことから、ユニット間隔を配筋有効高以下に押さえることは有効であると考えられる。
- (4) 破壊直前まで損傷させた床版に対しても、補強後は、少なくともその損傷までに至った期間の 100 倍以上の延命効果はあることが確認できた。

謝辞：本研究を進めるにあたり、中村一史東京都立大学准教授、松井繁之大阪大学名誉教授には、多大なるご指導および、貴重なご意見をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 梶原淳生, 中村一史, 小林拳祐, 花村光一, 新倉利之: 引抜成形 FRP 桁の曲げ特性に関する実験的検討と等方性材料に基づいたたわみの評価, 土木学会論文集, 80 巻, 14 号, 23-14011, 2024.5
- 2) 小野寺涼, 中村一史, 小林拳祐, 花村光一, 新倉利之: FRP パネルを用いた劣化した床版の性能回復に関する解析的検討, 土木学会, 第 79 回年次学術講演会講演概要集, CS6-35, 2024.
- 3) 国総研資料第 28 号: 道路橋床版の疲労耐久性に関する試験, 2002.3
- 4) 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.
- 5) 内海和仁, 濱野真彰, 松井繁之, 山口恒太, 田中伸幸: 軽量骨材を使用した道路橋 RC 床版に対する炭素繊維シート補強工法の補強時期と効果の相関に関する研究, 土木学会論文集 Vol.77/No.2, pp.55-64, 2021.

(2024 年 7 月 12 日受付)