

FRP合成床版の輪荷重走行試験機による階段状載荷試験

A fatigue test of FRP-RC composite slab by step up cyclic loading using a wheel-running machine

石崎 茂*、久保圭吾*、松井繁之**

Shigeru ISHIZAKI, Keigo KUBO and Shigeyuki MATSUI

*株式会社酒井鉄工所 技術開発部 (〒590-0831 大阪府堺市出島西町 3-1)

**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)

A FRP-RC composite slab was developed for the highway bridge deck intending to the elongation of life span and the shortening of construction period. In order to certify the durability of FRP-RC composite slabs, a fatigue test by using wheel-running machine that simulate actual running wheel load was carried out using full-size specimen with the thickness of 23cm. The dynamic running load was changed from 157kN up to 392kN with intervals of 19.6kN by every 40000 cycles as a stair shaped step up loading.

From the result of the fatigue test, it was clarified that the FRP-RC composite slab has much higher durability compared with the RC slab designed by JSHB. Because the slab endured under the final loading step of 392kN. The paper describes and discusses the result of the fatigue test.

Key Words : glass fiber reinforced plastics, composite slab, fatigue test

1. はじめに

近年の交通量の増大と車両の大型化により、道路橋床版を取り巻く環境は過酷な状況になってきている。さらに、コスト縮減および、現場作業の省力化の観点から、中小スパンの鋼橋では少主桁化が進み、床版支間が長大化してきている。このため、高い耐久性を有し、かつ、長支間に対応できる床版が求められており、これらを解決できる床版の1つとして、図-1の概念図に示すようなFRP合成床版を開発した。本床版の主な特長を以下に示す。

- ①FRP製永久型枠の拘束効果により引張側コンクリートのひび割れの進展が抑制されるため、耐久性が向上する
- ②FRPパネルが軽量のため現場架設が容易である
- ③床版施工用の足場や支保工が不要で、現場工期を短縮できる
- ④FRPが耐食性に優れた材料であるため、維持管理が容易となる
- ⑤FRPには自由に着色が可能で景観に配慮できる

本床版に関しては、すでに200kN前後の荷重による輪荷重走行試験機を用いた疲労試験でその耐久性が確認されており^{1) 2)}、さらに、実橋に適用することで、施工性の確認も行っている³⁾。

ここでは、比較的大きな荷重に対する本床版の耐久性を確認するために実施した157~392kNの階段状載荷による輪荷重走行試験の結果について述べると共に、本試験方法による試験結果に対する耐久性評価法について提

案する。なお、本試験は、建設省土木研究所、(財)土木研究センター、民間企業19社17グループ20工法による「道路橋床版の輪荷重走行試験機における疲労耐久性評価手法の開発に関する共同研究」の一環として行われたものである。

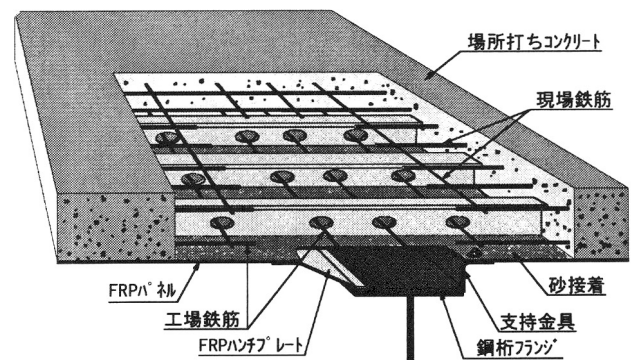


図-1 FRP合成床版の概念図

2. 試験の概要

実験に用いた実物大供試体は、床版支間3.0mの連続版で、B活荷重、大型車日交通量2,000台以上として設計したもので、床版厚はFRP底板を含む全厚で23cmとした。この供試体の概要を図-2に示す。なお、本供試体には、現場継手部の疲労耐久性を確認するため、中央付近に1カ所の継手を設けた。また、供試体構成材料の力学特性は表-1に示すとおりであった。

各载荷回数ごとの床版中央におけるたわみを活荷重たわみと残留たわみに分離し、その変化状況を示したものが図-4である。ここに、残留たわみとは、くり返し载荷後の除荷時のたわみであり、活荷重たわみは総たわみから残留たわみを差し引いた弾性たわみを示す。なお、図中には、RC8とPRC50の試験結果も併記した。これより、FRP合成床版のたわみは、共に52万回の载荷終了まで、急激な変化はみられず、最終段階まで本床版が健全であったことが確認できた。また、FRP合成床版の活荷重たわみは、RC8と比較すると、初期段階で約1/2、RC8が破壊する直前の24万回付近では、約1/3であり、剛性低下が少ないことが確認できる。PRC50との比較では、残留たわみはほとんど変わらないが、活荷重たわみは、初期の载荷時から最終の载荷後まで終始PRC50の70%程度であり、FRP合成床版はPRC50と比べ剛性が高く、荷重のくり返し载荷による剛性低下も少ないことがわかった。

各载荷段階毎の床版中央载荷時の载荷縦断面における活荷重たわみ曲線の変化状況を図-5に、中央の横断面における活荷重たわみ曲線の変化状況を図-6に示す。図中には、FRPパネルと鉄筋コンクリートを合成した断面で、コンクリートの全断面を有効とした場合、および引張側コンクリートを無視した場合の理論曲線も併記した。なお、各载荷回数毎のたわみ値は、すべて157kNに線形換算したものである。これより、载荷縦断面、载荷横断面とも、载荷初期では全断面有効の理論曲線にほぼ一致するたわみ分布となるが、载荷回数の増大に伴って徐々にたわみが増加し、引張側コンクリート無視の理論曲線に近づいていくことが分かる。しかし、たわみの大きさは392kN、52万回载荷後でも引張無視の理論曲線の1/2程度であった。これは、FRPパネルがコンクリートを拘束し引張りひび割れの進展を抑制するため、版の剛性低下が少なくなるものと考えられる。また、载荷縦断面のたわみ分布で52万回载荷時のたわみがFRPの継目付近で折れ曲がった形状となっている。これは、FRPの継目の接着部が剥離し、そこにひび割れが集中したためと考えられる。

図-7に継手部中央πゲージの開口量と走行回数との関係を示す。開口量は载荷荷重333kN、走行回数38万回までは0.02mm以下の小さい値を示しているが、これ以降、開口量が増加しており、この時点でFRPパネルの接着が剥離したものと思われる。これは、輪荷重走行時の下面状況の観察から、車輪の移動によりFRPのラップ部に引き剥がそうとする力が作用しているものと推察でき、この面外方向の力によって接着部に剥離が生じたものと思われる。このため、開口量の計測値には水平方向の開きのみでなく、鉛直方向のずれも加算されていると考えられるが、392kN、52万回载荷後でも開口量は、0.12mmであった。

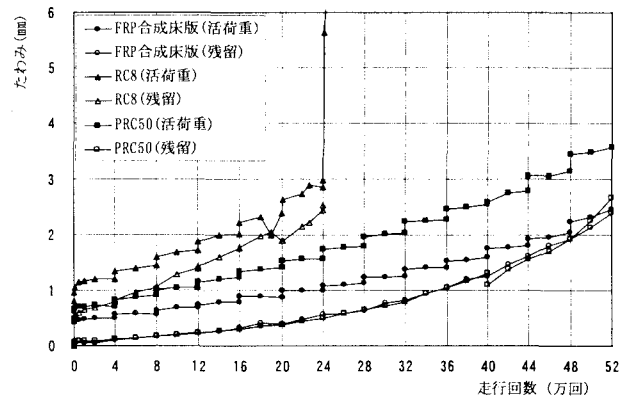


図-4 荷重-たわみ曲線

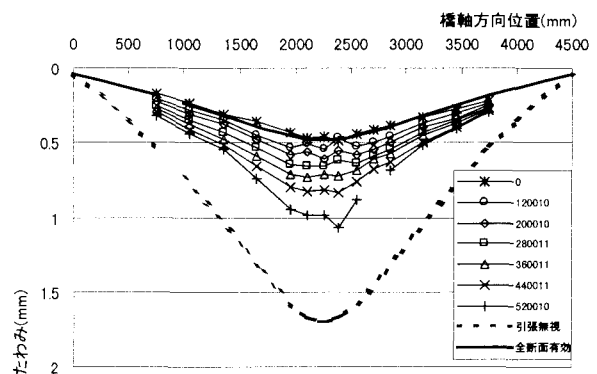


図-5 载荷縦断面の活荷重たわみの分布(157kN換算値)

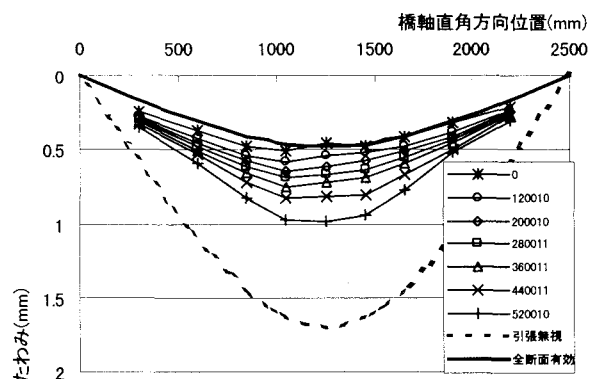


図-6 载荷横断面の活荷重たわみの分布(157kN換算値)

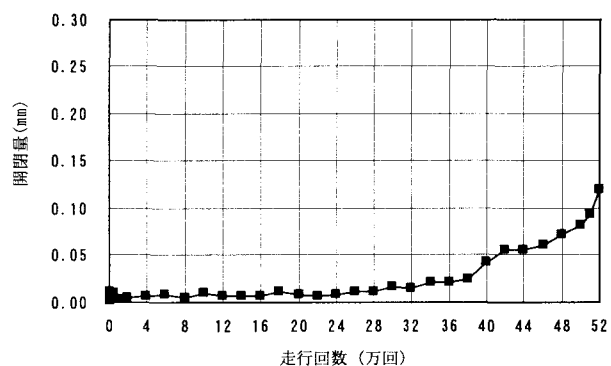


図-7 継手部中央の開口量(157kN換算値)

筋、FRPリブ上面、上側主鉄筋における測定値である。また、本図には、全断面有効の場合と引張側コンクリートを無視した場合の中立軸位置も併記している。これより、ひずみは、最終の52万回を除いて概ね直線分布しており、断面内でFRPと鉄筋コンクリートが合成して挙動していることがわかる。また、中立軸の位置は、載荷初期では、全断面有効の中立軸位置とほぼ一致するが、載荷とともに上方へ移動していく状況が読みとれる。しかし、52万回載荷後では、FRP上面で圧縮ひずみが大きくなり平面保持が崩れている。これは、この時点でFRPリブ上面で、コンクリートとFRP間に剥離が生じたものと推定できる。

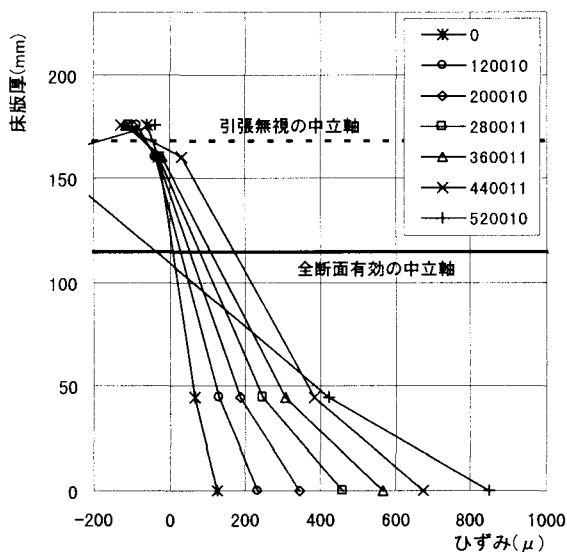


図-12 試験終了後の切断面

4. 疲労損傷機構

図-13は、疲労試験における階段状載荷の各載荷ステップ毎の床版支間中央たわみを、最大たわみとの比で表した橋軸方向のたわみ分布曲線である。ただし、載荷直下のたわみ値が不安定なため、床版中央から30cm離れた箇所のたわみを最大たわみとした。なお、図中には、コンクリートの全断面を有効とした場合と、引張側を無視した場合の異方性版の理論曲線を併記している。なお、FRP合成床版の異方性度は橋軸直角方向のFRPリブ剛性の寄与により、引張側コンクリートを無視した場合67%の異方性を有するものとした。この図より、載荷くり返し回数の増加と共に分布曲線が鋭く尖った形状となっており、載荷回数の増加とともに等方性から異方性へと移行している様子が分かる。

以上のことおよび、継手部の開口量の変化、FRP底板とコンクリートとの剥離状況、ひび割れ性状などより、FRP合成床版の輪荷重の繰り返し載荷による剛性低下のメカニズムを推定すると、載荷初期の全断面有効の等

方性版システムから、ひび割れの進展により異方性化し、載荷回数の増加と共に異方性度が増し直交異方性版システムに移行するものの、FRPパネルの拘束効果によりひび割れの進展が抑制されるため、剛性の低下速度は緩慢となる。その結果、392kN、52万回載荷後の活荷重たわみも全断面有効の理論値と引張側コンクリート無視の理論値の中間程度となり、高い剛性が維持される。しかしながら、載荷荷重が最終の392kN程度に大きくなると、FRPリブ上面でFRPとコンクリートが剥離すると共にこれが上面鉄筋面のひび割れに進展し、FRPパネル継手部の下面からの引張ひび割れと連結する。このことより、最終段階における破壊機構は、FRPパネル幅の梁状化したシステムの押し抜きせん断破壊となるものと推定できる。

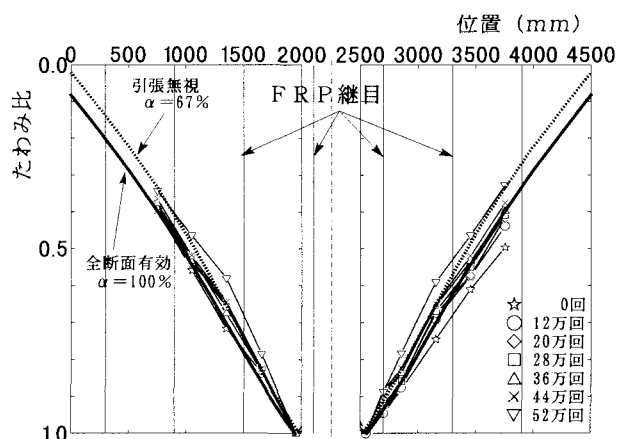


図-13 橋軸方向のたわみ比分布

5. 耐久性評価

床版の耐久性評価の一手法として、活荷重たわみが引張側コンクリートを無視した理論たわみに到達した時を使用限界とする考えがある⁴⁾。そこで、輪荷重のくり返し走行後の活荷重たわみと全断面有効の理論値との差を、引張側コンクリート無視の理論値と全断面有効の理論値との差で除した(1)式により算出される値を劣化度とし、これと走行回数との関係を調べることにした。なお、PRC50の引張側コンクリート無視の理論値は、プレストレスの影響を無視したRC断面として算出したものである。

$$D_s = (W - W_0) / (W_c - W_0) \quad \dots (1)$$

ここで、 D_s : 劣化度

W : 測定値

W_0 : 全断面有効の理論値

W_c : 引張側コンクリート無視の理論値

しかし、今回の試験では階段状載荷試験としたため、このままでは、走行荷重のくり返しによるたわみの増加速度が評価できない。このため、荷重の違いを(2)式によ

り基本荷重（157kN）での载荷回数に換算する方法を提案する。

$$n_{eq} = \sum (P_i / P_0)^m \times n_i \quad \cdots (2)$$

ここで、 n_{eq} ：等価くり返し回数

P_i ：载荷荷重

P_0 ：基本荷重

n_i ：载荷回数

m ：床版形式に依存する係数

すなわち、これまで実施された輪荷重走行試験の結果より、活荷重たわみ、および残留たわみは一定荷重下では線形的に増加することが確認されているため、ここでも、活荷重たわみ、および残留たわみが共に線形的に増加するものと仮定し、 m の値を決定するものとした。その結果、 $m=2$ の場合が最も良い相関関係を示すことがわかった。図-14に劣化度と換算走行回数との関係を、図-15に残留たわみと換算走行回数との関係を示す。これより、FRP合成床版の疲労劣化はRC床版と比べ非常に緩やかとなることが分かる。また、PRC50と比較すると、劣化の進展速度はほぼ同じであるが、初期剛性が高く初期劣化も少ないことから、劣化度の進展が遅くなることがわかった。

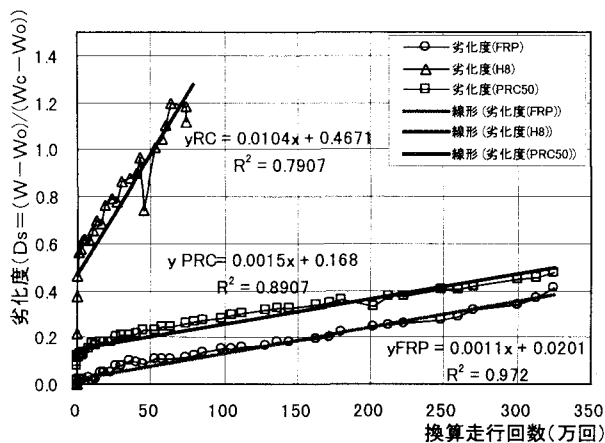


図-14 劣化度と換算走行回数の関係

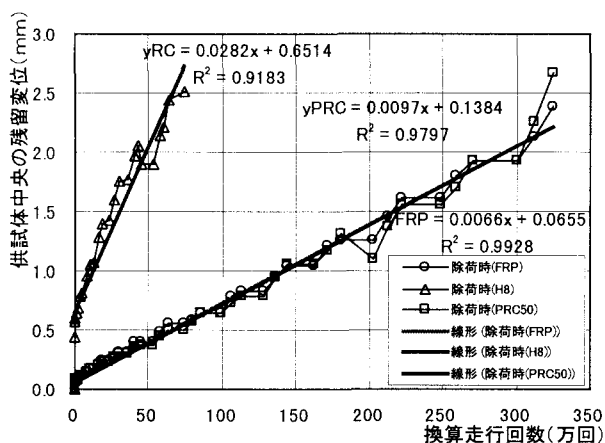


図-15 除荷時たわみと換算走行回数の関係

5. まとめ

FRP合成床版の輪荷重走行試験機による157kN～392kNまでの階段状载荷試験により以下に示す事項が明らかになった。

- FRP合成床版は、392kN、52万回载荷後も破壊せず、RC床版に比べ優れた疲労耐久性を有していることが確認された。
- FRP合成床版のくり返し载荷後のたわみは、392kN、52万回载荷後も引張コンクリートを無視した理論値に達しておらず、FRPパネルがひび割れの進展を抑制することが確認された。
- FRP合成床版の劣化機構は、引張側コンクリートのひび割れにより、FRPパネルを含む断面で異方性化し、荷重のくり返しと共に異方性が増し、剛性が低下していくものと推定できた。また、FRPパネルの継目部に剥離が生じた後はこの部分の下面コンクリートに引張りひび割れが集中し、FRPパネルの幅で主鉄筋方向に梁状化し、それが、主鉄筋断面においてせん断破壊するという最終の破壊機構へ移行することが推定できた。
- 階段状载荷の劣化度評価法として、活荷重たわみと残留たわみの線形性から換算することを提案した。この方法による評価では、RC床版、PRC床版およびFRP合成床版に関して良い相関関係が得られた。
- FRP合成床版の疲労劣化の進展は、RC床版に比して非常に緩やかであり、PRC床版に対しても、初期载荷による剛性の低下が少ないことから、劣化度の進展が遅くなることがわかった。

参考文献

- 松井・石崎・久保：FRP永久型枠を用いたRC床版の静的強度・疲労耐久性に関する研究、土木学会、構造工学論文集、Vol.40A、1994
- 石崎・久保・興地・松井：FRP合成床版の構造簡素化と長支間床版への適用性について、土木学会、第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集、1998
- 花田・望月・渡辺・石崎・久保：FRP合成床版の現場施工性について、土木学会、第53回年次学術講演会、1998
- 前田・松井：道路橋RC床版の劣化度判定法に関する研究、土木学会関西支部、既設橋梁構造物およびその構成部材の健全度、耐久性の判定に関するシンポジウム論文集、1983