

F R P 合成床版の実橋への適用例と疲労耐久性評価

An Application Example and Durability Evaluations of FRP-RC Composite Slab

望月 秀次* 花田 克彦** 石崎 茂*** 久保 圭吾**** 松井 繁之*****

Hidetsugu MOCHIZUKI Katsuhiko HANADA Shigeru ISHIZAKI Keigo KUBO Shigeyuki MATSUI

ABSTRACT A FRP-RC composite slab consisting of permanent forms of pultruded glass fiber reinforced plastics (FRP) and reinforced concrete was developed for a highway bridge deck to intend elongation of life span and shortening of construction period. Then the slab was adopted in the Matsukubo Bridge on the Kochi Highway, for the reason of material advantages, such as high-strength, lightweight and anti-corrosive. The paper describes the erection method and the performance as a form at the practical construction field, and a verification of composite action between FRP and reinforced concrete by field loading tests. Moreover, the paper also describes the fatigue test of full size specimen by using a wheel-running machine, and discusses the evaluation method for deterioration of the slab.

Keywords: 合成床版, 実橋載荷試験, 疲労耐久性
composite slab, field loading test, durability

1. はじめに

近年になって、道路橋の施工現場において熟練技能労働者の減少と高齢化が進み、現場工事の省力化、脱技能化が重要な課題としてクローズアップされてきた。また、コスト縮減の観点から、少數主柵化が進み、床版支間が長大化してきている。このため、現場作業が省力化でき、長支間に対応できると共に、高い耐久性を有した床版が求められている。これらを解決できる床版の1つとして、強度が高く軽量で耐食性に優れたF R P材を永久型枠として使用したF R P合成床版が考えられる。図-1に本床版の概念図を示す。

ここでは、本床版を試験的に採用した高知自動車道の松久保橋における現場施工状況および、型枠・支保工としての性能を確認するために実施した、コンクリート打設時の現場計測の結果について報告すると共に、本床版の剛性を確認するため、建設当初に行った試験車による実橋載荷試験の結果、および、供用後約2年半を経過した時点の夜間通行止めの際に、再度実施した載荷試験の結果についても報告する。

さらに、本床版の疲労耐久性を確認するために実施した、輪荷重走行試験機による階段状漸増載荷試験の結果、および本床版の疲労耐久性評価法について考察する。

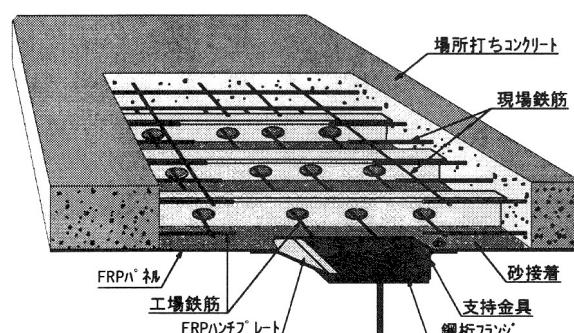


図-1 F R P 合成床版の概念図

* 日本道路公団四国支社 構造技術課 課長
(〒760-0065 香川県高松市朝日町 4-1-3)

**工修 日本道路公団四国支社 構造技術課
(〒760-0065 香川県高松市朝日町 4-1-3)

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

**** (株)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
(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

2. 松久保橋における現場施工

2. 1 橋梁の諸元

本橋の主構造は、3径間連続非合成鋼桁形式であり、橋長 124.5m 総幅員 9.9m で路面の平面線形は、曲線($R=700\text{m} \sim 400\text{m}$)である。主桁の配置は、支点折れ構造であり、主桁間隔が 2.5m 一定で、床版張出長が 894mm～1504mm と変化する構造である。

2. 2 F R P合成床版の設計方法

本床版は、疲労耐久性が高いことから、当初設計のRC床版に比べ床版厚を薄くすることが可能だが、工程等の制約により当初設計通り、F R P底板を含め 23cm とした。床版の断面設計については、F R P型枠が支保工を兼用するため、床版コンクリート硬化までの荷重に対しては、F R P型枠のみで荷重を受け持ち、コンクリート硬化後は鉄筋コンクリートとF R P型枠が合成した断面で外力に抵抗するものとした。このとき、引張側コンクリートの強度は無視するものとした。

2. 3 F R P材料

F R P型枠に用いる材料は図-2に示すような断面形状を有する引抜成形材を使用した。なお、

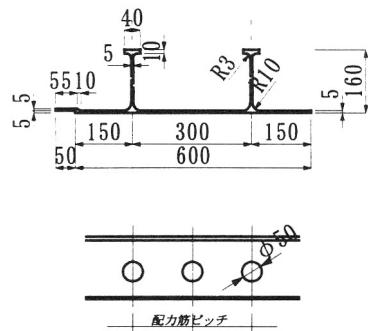


図-2 F R P型枠の断面形状

表-1 F R Pの材料特性

F R P	単位 (N/mm ²)	
	強度	弾性係数
リブ方向	250	24000
リブ直角方向	40	6000

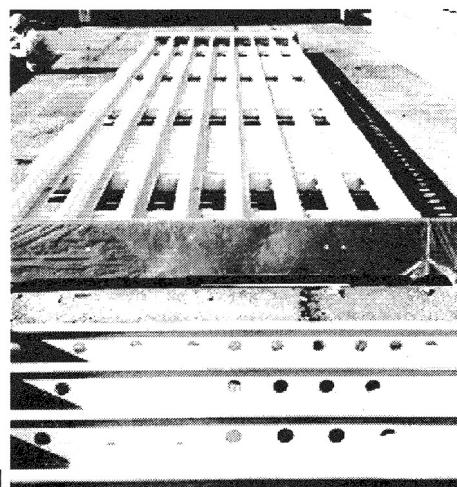


写真-1 工場組立てパネル

最大張り出し部

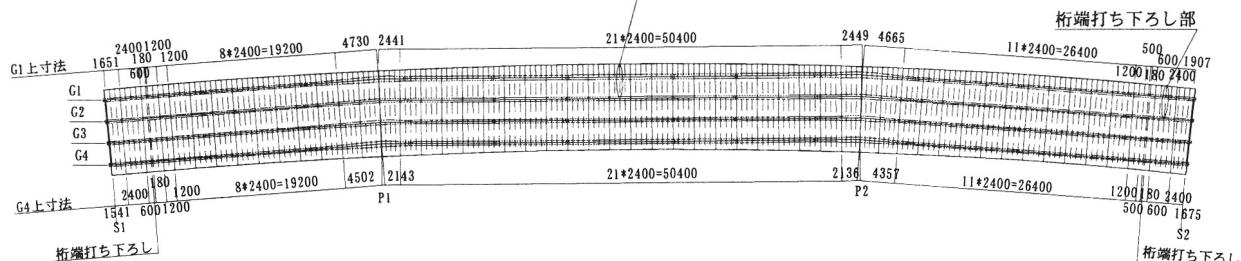


図-3 F R Pパネルの配置

F R Pの強化繊維としてはガラス繊維を使用し、樹脂はコンクリートに接触することから、耐アルカリ性の高いビニルエステル樹脂を使用している。設計で考慮しているF R Pの材料特性を表-1に示す。なお、本床版は、F R Pがコンクリートと一体となるため、熱容量が大きくなり、橋梁下での火災等に対しても延焼等の問題は生じないと想われたが、F R P材料に防炎3級以上の難燃性を持たせている。

2. 4 構造および施工方法

工場組立ての標準パネルは、輸送上の制約から、600mm 幅の成形品を4枚組み合わせた、2.4m×9.9m の大きさとし、F R Pの重ね部分は、構造用ウレタン系接着剤で接着した。なお、施工時の密着性を確保するため、ステンレス製ブラインドリベットを併用した。実橋での、F R Pパネル配置は、図-3のように、一般部を主桁に直角とし、中間支点付近の主桁折部の、3パネルは異形パネルとした。また、F R Pパネルには、ハンチ部へのコンクリートの充填性を確保するため、主桁上に橋軸方向に150mm、橋軸直角方向に約1000mm の開口を 300mm ピッチで設けた。F R Pパネル

の工場組み立て状況を写真-1に示す。

F R P底板のコンクリート接触面には、コンクリートとの付着性を良くするために珪砂をビニルエステル樹脂で接着した。さらに、現場作業を省力化するため、下側鉄筋は工場組立てとし、パネル間の配力鉄筋の継ぎ手は重ね継ぎ手とした。

現地への搬入は、搬入路の条件から 10t トラックを使用し、これに、FRPパネルを6枚（約9t）積載した。FRPパネルの架設は、軽量という利点を生かし、仮桟橋から、トラッククレーンにより架設した。パネル架設は、1日最大でトラック2車分の12パネルの架設が可能であった。パネルの架設状況を写真-2に示す。FRPパネル架設後、下側配力筋のパネル間継ぎ手筋を配筋し、FRPリブをスペーサーとし、この上に上側鉄筋を配置した。

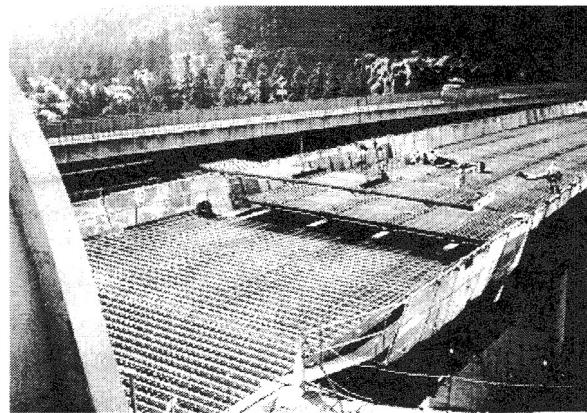


写真-2 FRPパネルの架設状況

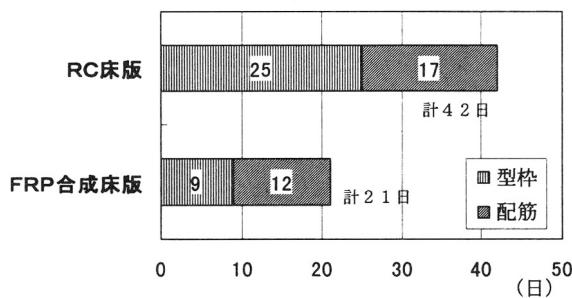


図-4 床版の現場工期

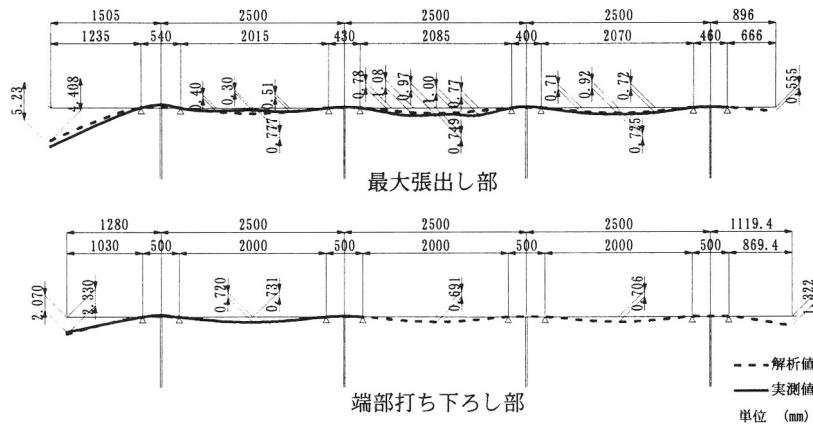


図-5 コンクリート打設時のFRP型枠のたわみ

2.5 現場施工性

FRPパネルの架設は、パネルを鋼桁上に載せ、パネル間を工場接着時と同様の方法で接着し、主桁上のスタッドボルトで固定する構造として、パネル上面での作業のみとなるようにして、安全性を図った。その上、FRPのリブ頂部が上側鉄筋のスペーサーとなるため、配筋が容易となるばかりでなく、品質管理も容易となり、型枠設置から配筋までの現場工期は、図-4に示すように、RC床版と比べて約半分に短縮できた。

コンクリートの打設は、型枠全面にコンクリートが行きわるように、入念にバイプレーターを施した。さらに、コンクリートの充填性を確認するため、コンクリート硬化後、FRP型枠下面よりハンマーによるたたき点検を実施し、ハンチ部にも均一にコンクリートが充填されていることを確認した。

3. コンクリート打設時の計測

FRPパネルはコンクリート打設時の型枠、支保工を兼用することから、コンクリート打設時の変形が設計上の仮定通りとなっているかを確認するため、実際のコンクリート打設時のたわみを計測し、支保工としての性能を確認した。

3.1 計測位置および荷重

計測位置は、図-3に示すように、たわみが最も大きいと考えられる、床版張出し長が最大となる中央径間中央部と、床版厚が厚い桁端打ち下ろし部とした。このときの計算荷重は、パネルおよび鉄筋の自重と、フレッシュコンクリート重量である。

3.2 計測方法

たわみの計測は、主桁に取り付けた支持金具により、主桁間に梁を取り付け、この梁上に、変位計を設置することにより、主桁との相対たわみを計測した。このとき、主桁の変形の影響を除去するため、支持梁の両端がヒンジとなるように支持した。

3.3 計測結果

図-5に、コンクリート打設時のFRPパネルのたわみを示す。図にはFRPパネルを連続梁とした計算値も併記した。この図では、FRPのたわみは、片持ち部で計算値より若干大きくなっている。これは、G1桁

ハンチ部より片持ち部のコンクリートを先に打設したため、G 1 柄上で回転変形が生じ、この回転変形が、支間部コンクリート打設後にも残留したものと思われる。しかし、支間部でのたわみは最大でも1mm程度であり、ほぼ計算どおりのたわみ曲線となった。これより、FRPパネルが支保工として十分な機能を有していることが確認できた。また、コンクリート打設時、パネルの継目部や鋼柾への取付部からのコンクリートの漏れは、ほとんど観察されなかった。これより、パネル継目の接着部や、鋼柾とFRPハンチプレート間のスポンジシール部においても十分な密着性が確保され、型枠としての性能も十分満足していることが確認できた。

4. 現場載荷試験

FRP合成床版では、コンクリート硬化後は、FRPと鉄筋コンクリートが合成した断面で抵抗するものとして設計している。この方法の妥当性を確認するため、実橋の床版に試験車を載荷し、このときの床版のたわみ、および、FRP・鉄筋に生じるひずみを計測した。

また、橋梁が供用されると車輌の通行による床版のひび割れにより剛性が低下し、たわみが増加することがこれまでの実験等により確認されてい

る。このため、建設当初および、供用後約2年半経過した時点での載荷試験結果を比較することで、交通荷重の走行による剛性の変化を調査した。このとき、松久保橋と同一路線で床版支間、床版厚の等しいRC床版を有する柿ノ下橋についても同様の条件で載荷試験を行い、FRP合成床版とRC床版の比較も行うこととした。

4. 1 計測位置

計測は、柾作用により床版に引張力が発生せず、主柾間の相対変位が少ないと考えられる、支間中央のパネルで行った。また、壁高欄の剛性も床版の挙動に影響を及ぼすと考えられることから、この影響が比較的少ないG 2-G 3間にて計測を行った。

4. 2 計測方法

たわみの計測は、松久保橋については、初期計測、供用後計測とともに、支保工としての性能確認試験で使用した装置をそのまま使用し、主柾との相対たわみを計測した。一方、柿ノ下橋については、建設初期の計測を行っていないため、供用後計測時に松久保橋と同様の変位計支持金具を取り付けた。このときの、変位計の取り付け位置は図-6のとおりである。松久保橋の初期載荷試験時では、FRP・鉄筋・コンクリートにそれぞれ、ひずみゲージを貼付し、計測した。

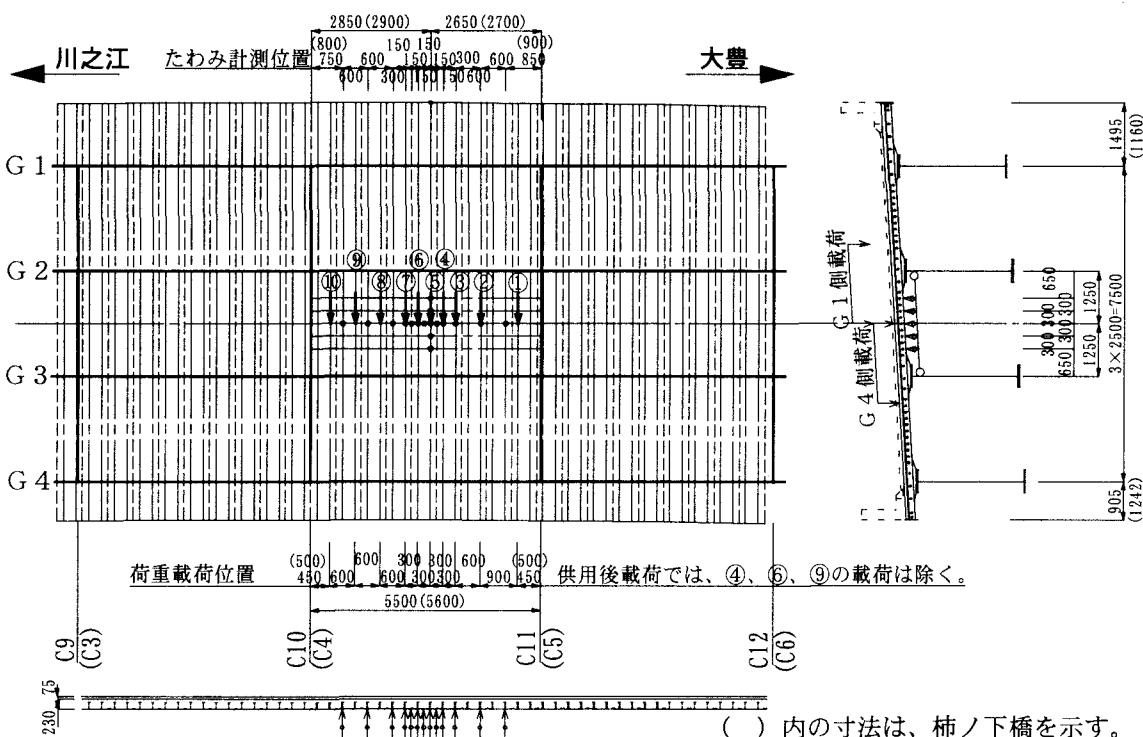
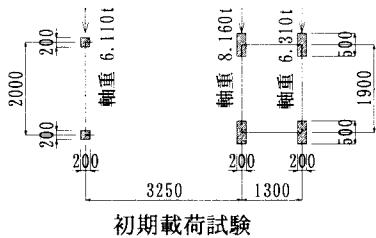


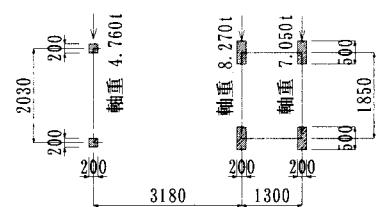
図-6 荷重載荷位置およびたわみ計測位置

4. 3 載荷荷重

載荷は、車輪の軸重を予め計測した図-7に示す軸重分布を有する総重量約20tのダンプトラックを用いて、静的に行った。また、載荷位置は、図-6に示すように、橋軸方向には、タンデム軸前輪を基準にして、初期載荷時10ヶ所、供用後載荷時7ヶ所を移動させ、橋軸直角方向には、G2-G3主桁の中心線上に1輪を載荷し、残り1輪をG1側とG4側の2通りに載荷した。



初期載荷試験



供用後載荷試験

図-7 試験車の重量

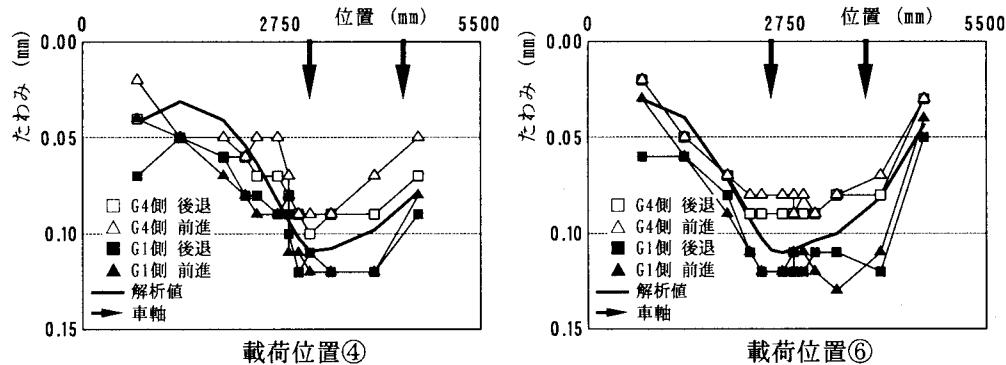


図-8 初期載荷試験によるたわみ

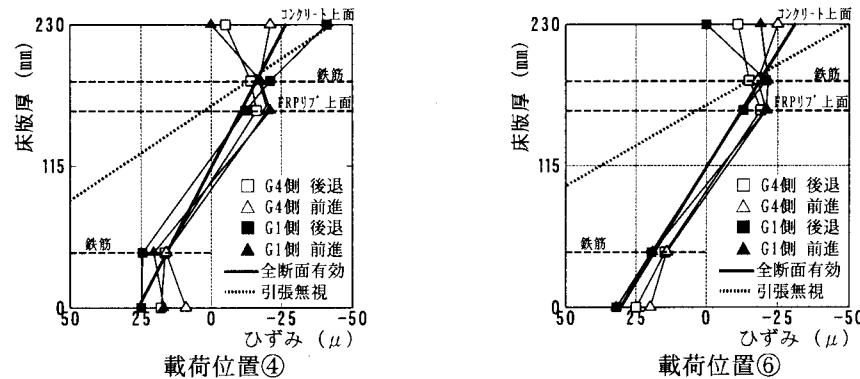


図-9 断面内のひずみ分布

4. 4 初期載荷結果

図-8に初期載荷試験における、主な載荷位置のたわみを示す。図中には、FRPの断面を考慮し、コンクリートの全断面を有効とした解析値も併記した。この結果、各載荷位置のたわみは、概ね解析値と一致していることがわかる。このとき、たわみは、G1側に載荷したときより、G4側に載荷したときの方が小さくなっているが、この理由としては、横断勾配の影響や、壁高欄の剛性の影響などが考えられる。

図-9に、主な載荷位置のパネル中央における、断面内のひずみ分布を、全断面有効とした場合と、引張側コンクリートを無視した場合の計算値とともに示す。この図より、断面内のひずみは、ほぼ直線分布しており、全断面有効とした場合の計算値に近いことがわかる。以上より、初期状態における、FRP合成床版の剛性は、ほぼ全断面有効の挙動を示していると考えられる。

4. 5 供用後載荷試験結果

供用後の載荷試験における主な載荷位置のたわみを、各載荷時のFRP断面を考慮しコンクリートの全断面を有効とした解析値と共に、図-10に示す。なお、各載荷時のたわみは、横断勾配の

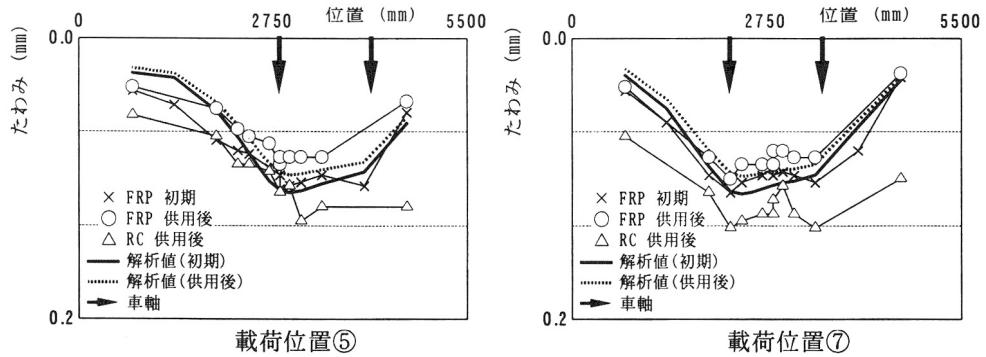


図-10 載荷試験によるたわみ

影響や壁高欄の剛性の影響を除去するため、G 1 側載荷と G 4 側載荷の平均値にて表示した。

これより、FRP合成床版の活荷重たわみは、2年半供用後の載荷においても、ほぼ全断面を有効とした計算値と等しく、ほとんど剛性の低下が見られないことがわかる。一方、RC床版では、若干全断面を有効とした計算値より大きい値を示している。これは、引張側のコンクリートにひびわれが生じ剛性が若干低下したためと考えられる。これらより、実橋においても、これまでに実施された輪荷重走行試験の結果¹⁾と同様に、FRP合成床版の実際の車輌走行による剛性の低下は、RC床版と比べて小さいことがわかった。

5. 輪荷重走行試験

F R P 合成床版の疲労耐久性を確認するために、実物大の試験体を用いた輪荷重走行試験を実施した。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。

5. 1 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 F R P 底板を含む全厚で 23cm とした。この供試体の概要を図-1.1 に示す。

なお、本供試体には、現場

表-2 材料特性

	強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
コンクリート	$\sigma_{ck} = 41.5$	31000
F R P	$\sigma_f = 465$	33000
鉄筋	$\sigma_{sy} = 382$	187000

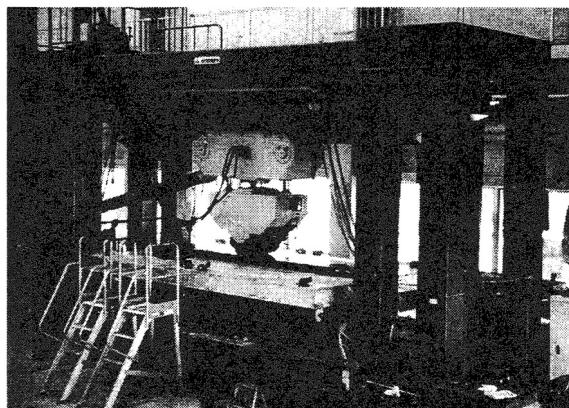


写真-3 試験状況

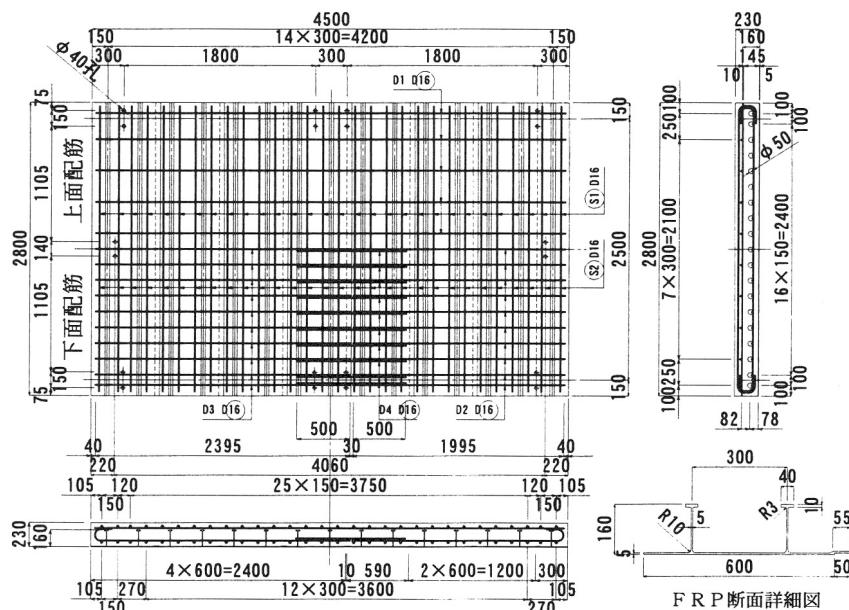


図-1-1 供試体詳細図

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-2に示すとおりであった。

疲労試験は、建設省土木研究所の輪荷重走行試験機を用いて行い、設計における床版支間3.0mの連続版と曲げモーメントが同等になるように支間2.5mで相対する2辺を単純支持し、残りの2辺を版の連続性を考慮して弾性支持とした。輪荷重は、床版の支間中央部に20cm×50cmの載荷ブロックを橋軸方向に並べ、その上に供試体中央部から±1.5mの範囲で輪荷重を移動載荷した。載荷荷重は、図-12に示すとおり157kNから4万回ごとに19.6kN増加させ、392kNで52万回まで載荷する階段状荷重漸増載荷とした。載荷装置および供試体のセット状況を写真-1に示す。

5. 2 実験結果

図-12に示すとおり、FRP合成床版は、50%のパーシャルプレストレスで設計された床版厚23cmのPC床版（PRC50）²⁾と同様に392kN、52万回載荷後も破壊せずに終了し、274kN、25.6万回で破壊した平成8年の道路橋示方書により設計された床版厚25cmのRC床版（RC8）²⁾に比べ、疲労耐久性が高いことが確認できた。

各載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-13である。ここに、残留たわみとは、くり返し載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52万回の載荷終了まで、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、F

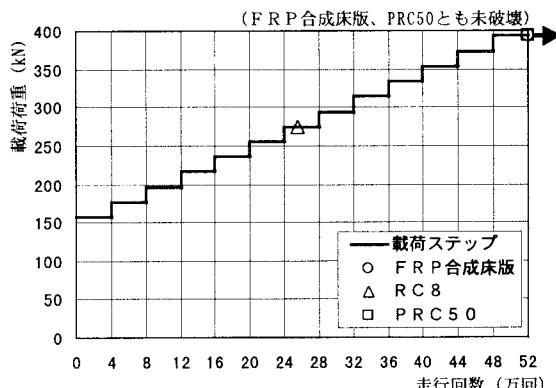


図-12 走行回数と載荷荷重の関係

RP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、初期の載荷時から最終の載荷後まで終始PRC50の70%程度であり、FRP合成床版はPRC50と比べ剛性が高く、荷重のくり返し載荷による剛性低下も少ないことがわかった。

5. 3 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³⁾。そこで、輪荷重のくり返し走行後の活荷重たわみとコンクリートの全断面を有効とした理論たわみとの差を、引張側コンクリートを無視した理論たわみと全断面有効の理論たわみとの差で除した(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とした。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。

$$D_{\delta} = (W - W_0) / (W_c - W_0) \quad \cdots \quad (1)$$

ここで、 D_{δ} ：劣化度

W ：測定値

W_0 ：コンクリートの全断面を有効とした理論たわみ

W_c ：引張側のコンクリートを無視した理論たわみ

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)での載荷回数に換算する方法を提案する。

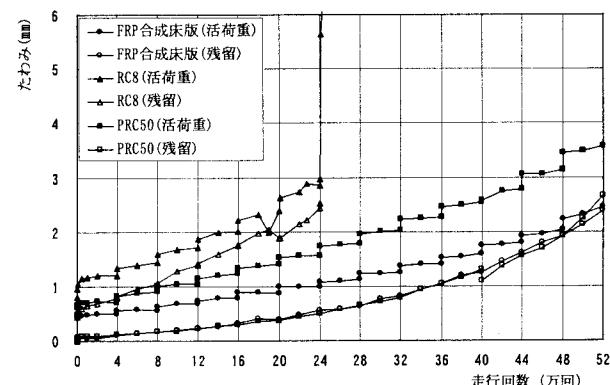


図-13 荷重-たわみ曲線

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

ここで、 n_{eq} ：等価くり返し回数

P_i ：載荷荷重

P_0 ：基本荷重

n_i ：載荷回数

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分かった。

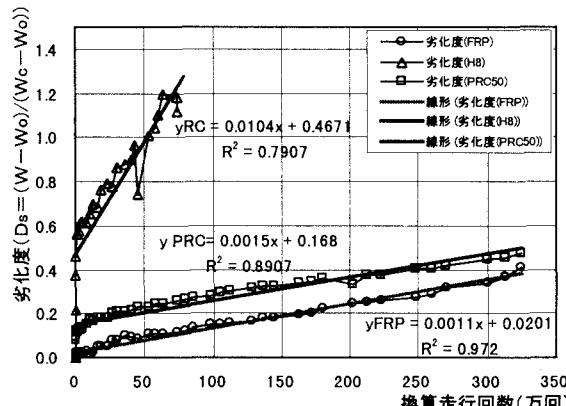


図-14 劣化度と換算走行回数の関係

6. 実橋における劣化度

実橋での載荷試験結果を用いて(1)式にて劣化度を算出すると、FRP合成床版では、ほぼ $D_s = 0$ 、RC床版の場合、 $D_s = 0.2$ 程度となる。これを、図-14の劣化度に当てはめると、今回の高知自動車道における約2年半の車輌走行は、輪荷重走行試験における初期の段階であることが推定できる。これは、高知自動車道の交通量が比較的の少ないと、車輌走行位置が実橋では広くばらついていて安全側になること等が影響していると考えられる。

今後、更に供用年数を重ねた後にも、同様な載荷試験を行って、実橋での剛性の低下や劣化の有無について追跡したいと考えている。

7.まとめ

FRP合成床版の実橋での施工、現場載荷試験、および、輪荷重走行試験機による階段状載荷試験により以下に示す事項が明らかになった。

- 1) 実橋での施工により、FRPパネルが型枠、支保工として十分に機能し、現場工期が大幅に短縮できることが確認された。
- 2) 実橋載荷試験の結果、FRP合成床版の2年半供用された実橋における剛性低下は、輪荷重走行試験結果と同様、RC床版と比較して少ないことがわかった。
- 3) 階段載荷による輪荷重走行試験の結果、FRP合成床版は、392kN、52万回載荷後も破壊しておらず、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。
- 4) 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、初期載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]

- [1] 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, pp. 1413-1424, 1994
- [2] 土木研究所・他：道路橋床版の輪荷重走行試験における疲労耐久性評価手法の開発に関する共同研究報告書（その1）、第221号、pp. 10-14, 1999
- [3] 前田・松井：道路橋RC床版の劣化度判定法に関する研究、既設橋梁構造物およびその構成部材の健全度、耐久性的判定に関するシンポジウム論文集、pp. 107-116, 1983