

FRP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、少数主桁化が進み、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FRP材を永久型枠として使用したFRP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。

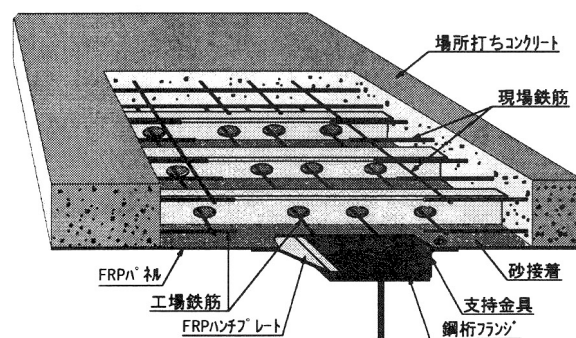


図-1 FRP合成床版の概念図

* 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)

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、仮栈橋から、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 1 2 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。

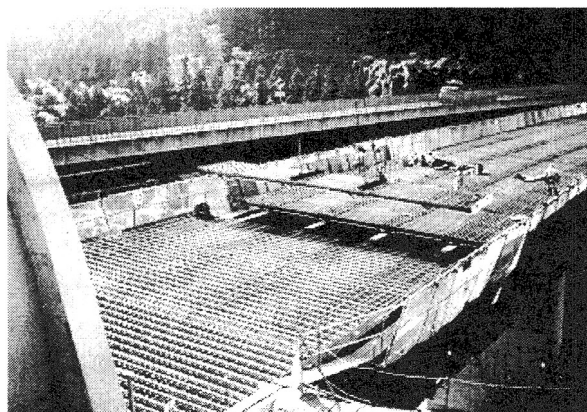


写真-2 FRP パネルの架設状況

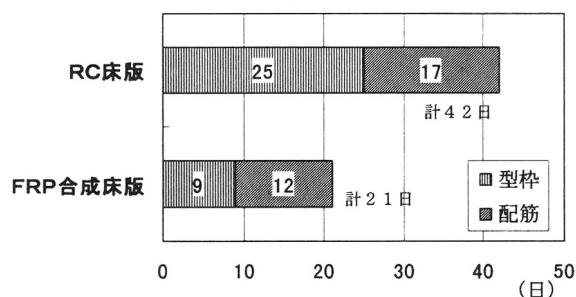


図-4 床版の現場工期

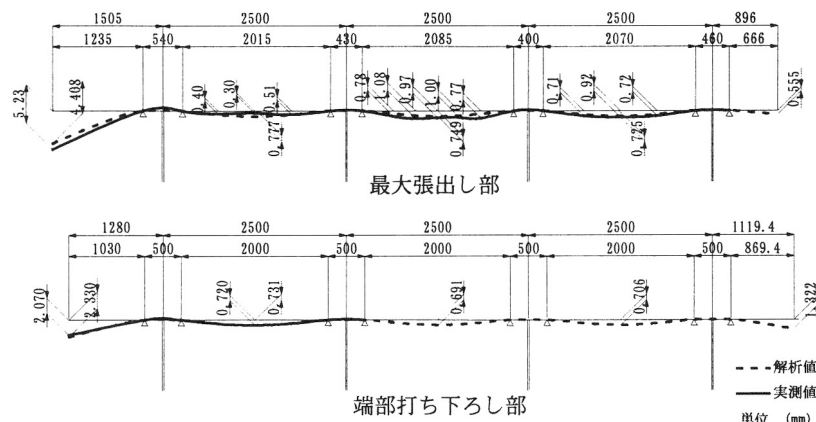


図-5 コンクリート打設時のFRP型枠のたわみ

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たるように、入念にバイブレーターを施した。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小さくなっている。これは、G 1 桁

4. 3 載荷荷重

載荷は、車輛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カ所を移動させ、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。

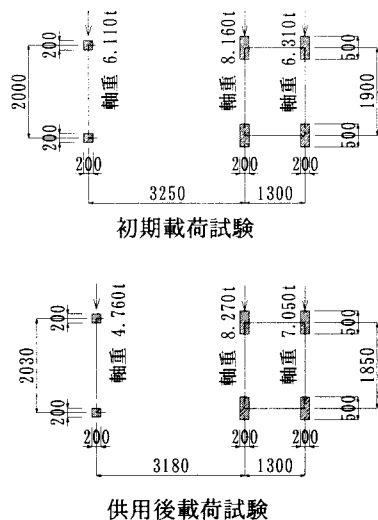
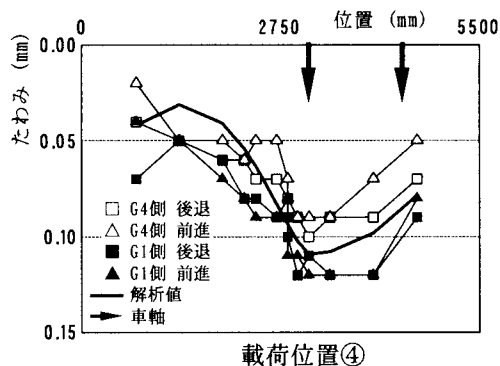
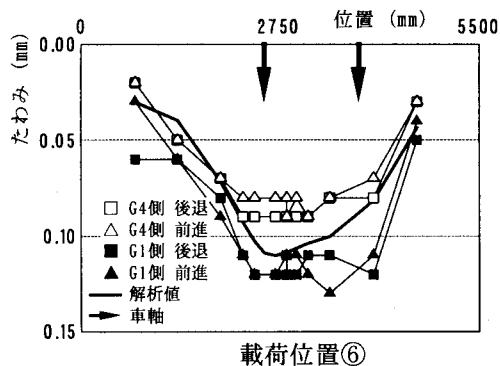


図-7 試験車の重量

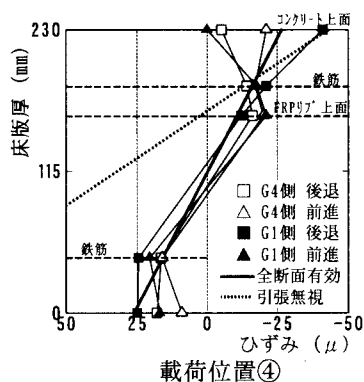


載荷位置④

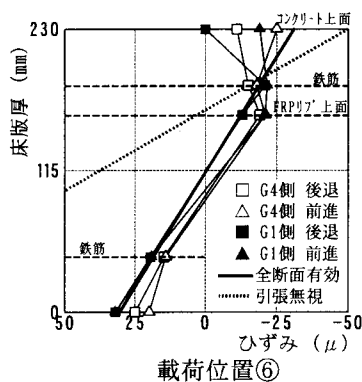


載荷位置⑥

図-8 初期載荷試験によるたわみ



載荷位置④



載荷位置⑥

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

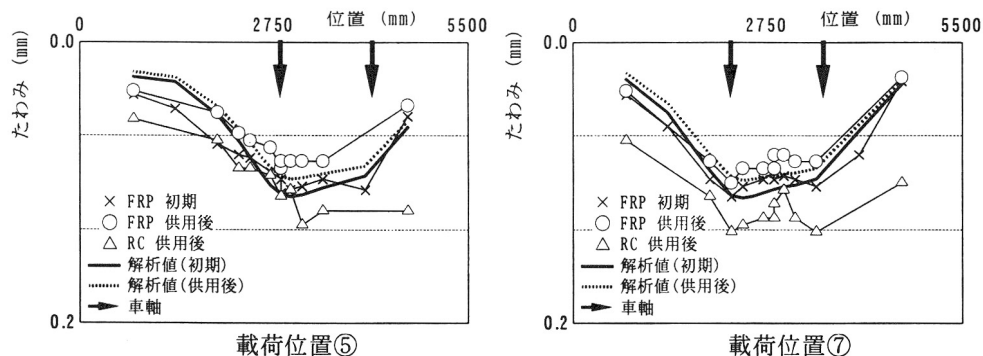


図-10 載荷試験によるたわみ

影響や壁高欄の剛性の影響を除去するため、G1側載荷とG4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⁹⁾と同様に、FRP合成床版の実際の車輦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。

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
FRP	$\sigma_f = 465$	33000
鉄筋	$\sigma_{sy} = 382$	187000

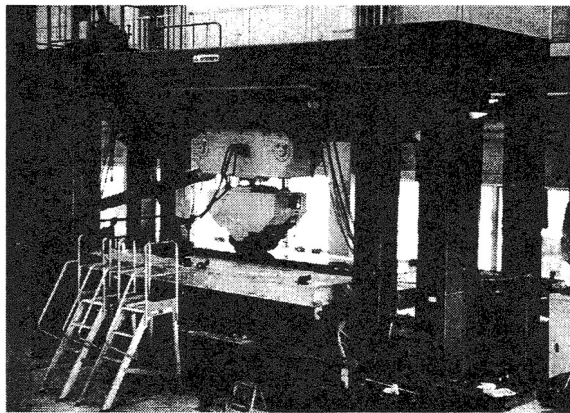


写真-3 試験状況

5. 輪荷重走行試験

FRP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FRP底板を含む全厚で 23cm とした。この供試体の概要を図-11に示す。なお、本供試体には、現場

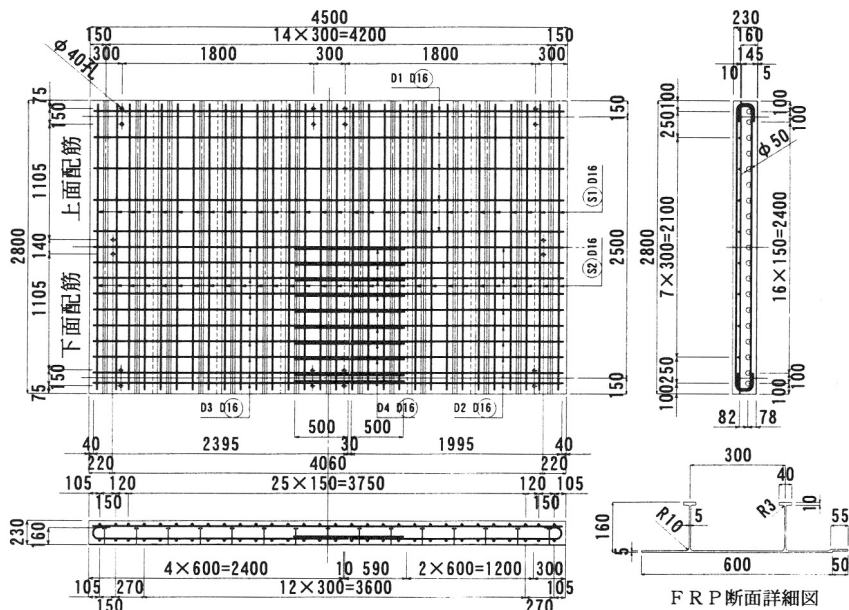


図-11 供試体詳細図

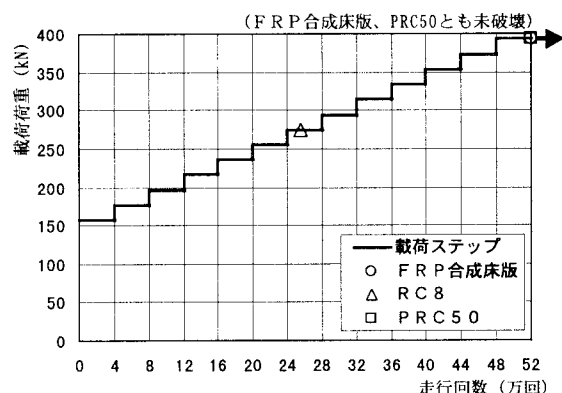
継手部の疲労耐久性を確認するため、中央付近に1カ所の継手を設けた。また、供試体構成材料の力学特性は、表－2に示すとおりであった。

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が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が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。

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

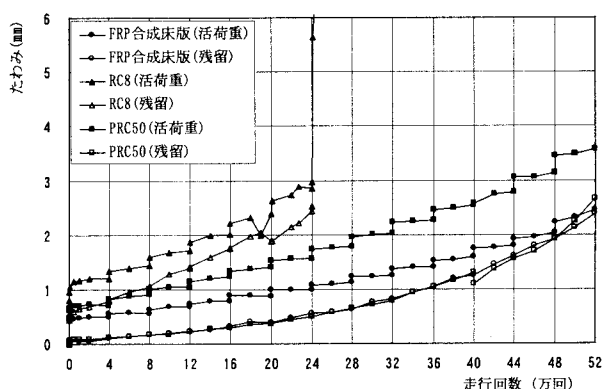
ここで、 D_{δ} ：劣化度

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が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

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

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。

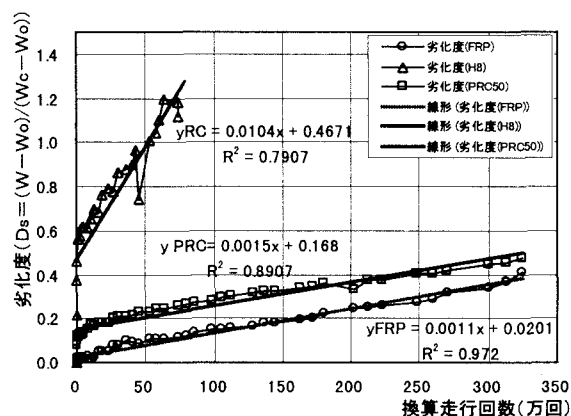


図-14 劣化度と換算走行回数の関係

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 $D_0 = 0$ 、RC床版の場合、 $D_0 = 0.2$ 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年半の車輛走行は、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こと、車輛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、耐久性の判定に関するシンポジウム論文集，pp.107-116，1983