

# 鋼材とFRPのハイブリッド型枠を用いた 合成床版の構造簡素化について

## A Study on Structural Simplification of FRP Composite Slab Using a Hybrid Permanent Form of Steel and FRP

久保 圭 吾<sup>\*1</sup> 河西 龍 彦<sup>\*2</sup>  
Keigo KUBO Tatsuhiko KASAI

### Summary

A steel-FRP-concrete composite deck was developed for replacement of deteriorated slab. The composite deck is consisting of a FRP form holding steel rectangular pipe to stiffen the form when concrete is casted. In this study the structure of this composite deck was rationalized. To evaluate fatigue durability of the composite deck is the most important structural problem for highway bridges. Here, wheel running fatigue test on full-size specimens are carried out, to find out the influence of the truss reinforcing bars arranged between the steel tubes. The results and evaluation of these trusses are described in the paper. Also, the bottom plate and connection plate improved to do fieldwork easily into reasonable one are confined to have sufficient durability.

キーワード：FRP合成床版，FRP継手，疲労強度，輪荷重走行試験

### 1. はじめに

既設橋梁のRC床版は、交通量の増加と交通荷重の増大により、劣化・損傷を受け、補修・補強が行われてきたが、近年、補修・補強後の床版において、損傷が顕在化してきており、打替えを余儀なくされる事例が増加している。また、海岸地域や融雪剤を散布する積雪地域の橋梁床版では、塩害による劣化が深刻であり、高耐候性を有する床版が求められている。このような要求に応えられる床版の一つとして、軽量で断面形状にある程度自由を持たせた合成床版を開発<sup>1)</sup>した。図-1に本床版の構造概念図を示す。本床版は、型枠パネルの角形鋼管内を中空とすることで軽量化を図っており、配力筋方向の断面力に対しては、FRPで応力伝達する構造とすることにより、引張側配力鉄筋を省略し、現場施工性の向上が図られている。

本床版に関しては、すでに実床版中でのFRP底板継手部の疲労耐久性の検証を行い、実橋床版として十分な疲労耐久性を有していることが確認されている<sup>2)</sup>。このため、本床版のFRP成形、施工の合理化を目的とし、図-2に示す、FRP厚の減少、継手形状の改善、およびトラス鉄筋の省略を試みた。本論文では、これらの合理化構造による耐荷力、耐久性を調べるために実施した各種試験結果について報告する。

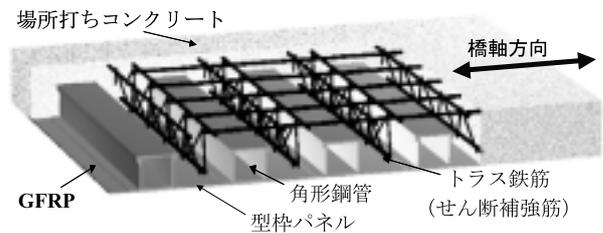


図-1 構造概念図

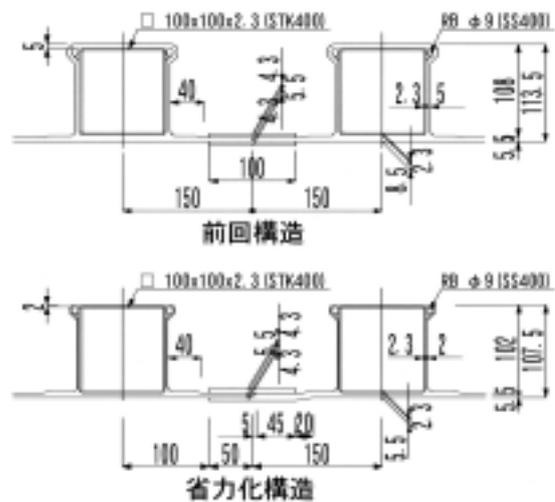


図-2 省力化構造の概要

\*1(株)宮地鐵工所 技術本部設計部技術開発グループ課長代理

\*2(株)宮地鐵工所 生産本部工場管理部長

## 2. FRP継手の疲労試験

### (1) FRP板の疲労試験

FRP継手部の疲労強度を調べるため、図-3に示す供試体により引張疲労試験を行った。このとき、FRP継手は、偏心の影響がない両面添接板方式とし、現場作業の簡略化のため片側の添接板を母材と一体成形した構造としている。なお、FRP継手部は、接着剤により接合されるが、施工時の密着性を確保するため、ブラインドリベットを併用している。図-4にFRP継手のS-N関係を示す。これより、FRP継手のS-N線の傾きは $m=6$ 程度であり、鋼部材の $m=3$ と比べ緩やかであることがわかる。FRPは、一般的に繰り返し応力を受けると、内部に微細なひび割れが生じて光の透過性が失われるため、白化現象が生じる。このため、各供試体で白化現象が見られた回数を継手部損傷として図中に追記した。これより、白化現象が生じてから破壊に至るまでに10倍程度の荷重回数に耐えられることから、損傷を受けた後もかなり残存耐力を有することがわかる。

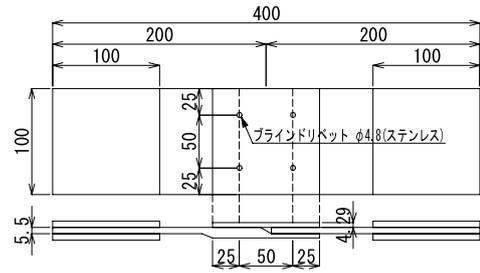


図-3 継手部供試体

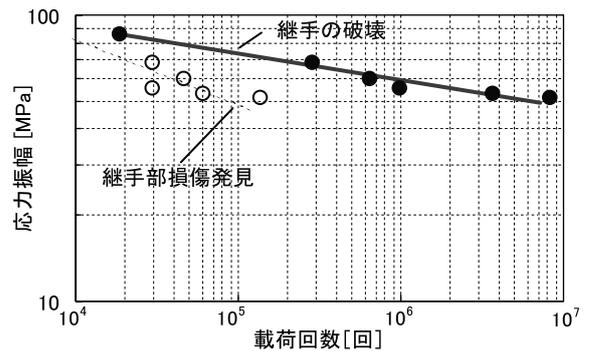


図-4 継手強度 (FRP板の引張試験)

### (2) FRP板-コンクリート合成はりの疲労試験

実床版中におけるFRP継手部は、上面にコンクリートを有しており、床版の曲げ作用をFRPとコンクリートの合成断面にて受け持つ構造となる。このため、実床版中でのFRP継手部の挙動を再現するため、FRP板-コンクリート合成はりの供試体(図-5)を用いた、曲げ疲労試験を実施した。試験は、支間800mmの中央に線荷重する方法で行い、荷重は最大荷重の10%を下限值としたサイン波で与えた。表-1に、各構成材料の特性を示す。

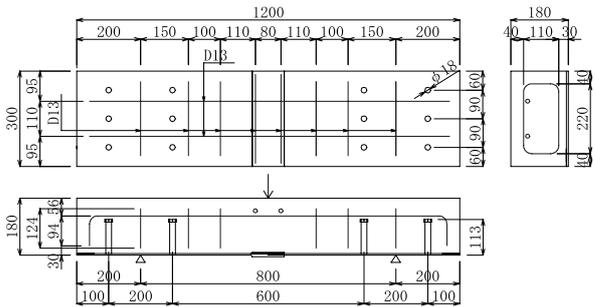


図-5 FRP-コンクリート合成はり供試体

表-1 材料特性

材料	弾性係数[GPa]	静的強度[MPa]
FRP	18.8	283
コンクリート	32.3	30.1
鉄筋	200	534

図-6に、合成はりの疲労試験によるS-N関係を示す。なお、図中の矢印は、継手部以外で破壊した供試体を示している。これより、曲げ疲労試験では引張疲労試験と比べて、損傷までの寿命、破壊寿命ともにばらつきが大きい傾向が見られる。これは、曲げ試験では、コンクリートのひび割れやコンクリートとFRPの付着による誤差を含みやすいことによると考えられる。また、応力振幅の低い領域では、合成はりの疲労試験結果は、引張疲労試験結果と比べて破壊回数が小さい傾向がある。これは、破壊がコンクリート部や支点部など、継手部以外で破壊したためである。

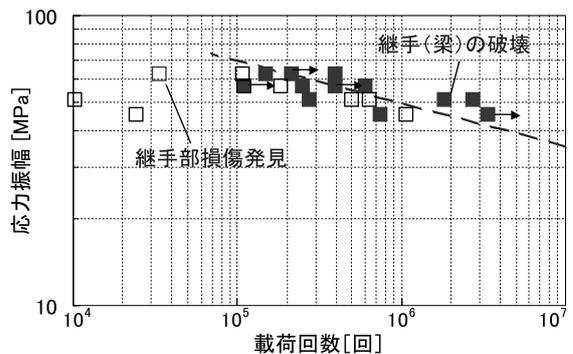


図-6 継手強度 (合成はりの曲げ試験)

一般に鋼構造の継手では $2 \times 10^6$ 回にて疲労評価を行っており、これを本FRP継手に適用すると45MPa程度

となる。また、本床版を支間3mの道路橋示方書の曲げモーメント式（等方性版）により、引張側コンクリートを無視した断面計算を行うとFRP底板に作用する応力は33MPaとなる。さらに、実床版中での発生応力は、異方性の影響や角形鋼管間コンクリートの剛性への寄与により、かなり小さくなるものと推察される。これらより、FRP継手部は十分な耐久性を有しているものと考えられる。

また、継手部損傷発生から破壊に至るまでの関係では、合成はり中におけるFRP継手は、損傷発生後に2倍以上の繰返し載荷に耐えられることが分かる。したがって、FRP継手の破壊寿命は、白化現象を床版下面から観察することにより推定できると考えられる。

### 3. 床版の疲労試験

床版の版としての疲労耐久性を検証するには、実橋の荷重状態により試験を実施する必要がある。このため、実橋の移動輪荷重を再現できる輪荷重走行試験機により、実物大床版の疲労試験を実施した。

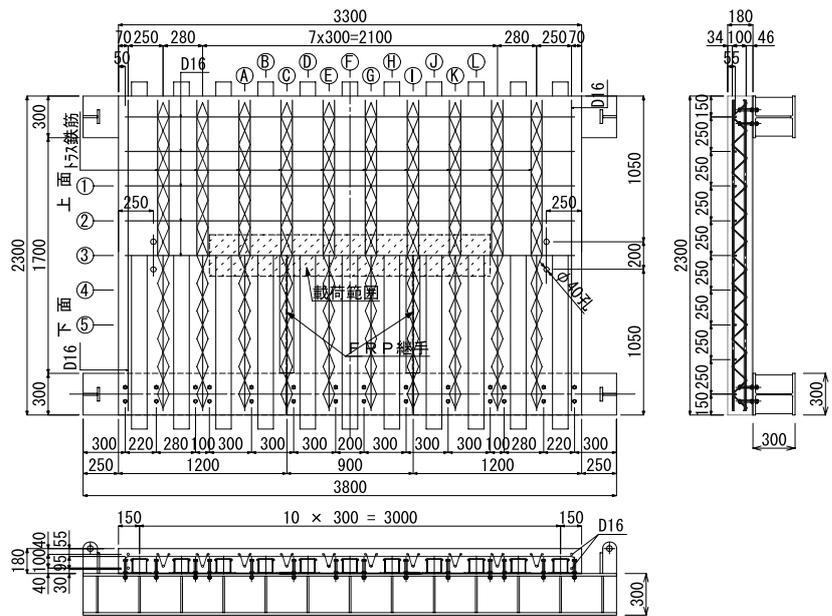
#### (1) 試験概要

試験は、大阪大学のクランク式輪荷重走行試験機を用いて行った。供試体は、トラス鉄筋の有無による劣化挙動の比較を行うため、トラス鉄筋を設置した供試体A、およびトラス鉄筋を省略した供試体Bの2体とした。供試体の形状寸法を、図-7に、供試体の材料特性を表-2に示す。なお、図中の丸囲みアルファベットA~Lおよび丸数字①~⑤は、それぞれ、橋軸直角方向、橋軸方向の断面位置を示している。供試体は、ハンチを省略し、スタッドジベルを模したボルトにより、主桁に直接固定し、桁端部は、横桁により弾性支持した。載荷方法は、実際の車輪の接地面積20cm×50cmを辺長比で60%に縮小した12cm×30cmの載荷面積をもつ鋼ブロックを敷き並べた

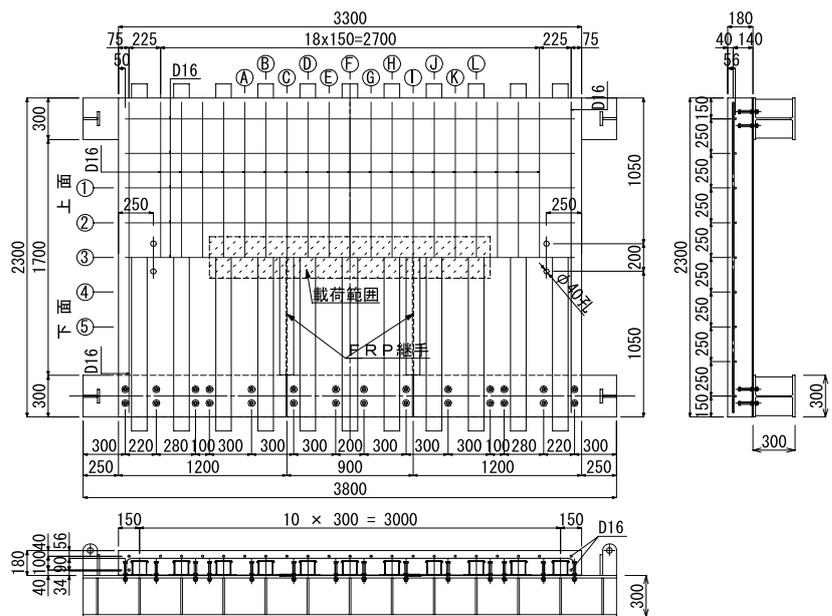
軌道にて載荷を行い、試験体中央から橋軸方向に±1000mmの範囲を繰返し走行させた。床版の性状変化を

表-2 材料特性

	強度(MPa)	弾性係数(Gpa)
コンクリート(供試体A)	36.9	31.2
コンクリート(供試体B)	39.1	30.8
GFRP	280	18.8
鉄筋 D16(SD295A)	479	192
角型鋼管 100x100x2.3(STK400)	420	193



供試体A



供試体B

図-7 供試体詳細図

定量化するために、所定の走行回数毎に床版中央の⑤③点に静的載荷することで、たわみ、ひずみの計測を行い、ひび割れと打音検査によるFRPとコンクリートのはく離状況も調査した。

## (2) 試験結果と考察

荷重載荷プログラムと床版中央⑤③点における載荷回数-たわみ曲線を図-8に示す。なお、たわみは137kNに換算した活荷重たわみとしている。載荷は、道路橋示方書の輪荷重100kNに衝撃を考慮した、137kNにて40万回走行させた。その後、促進試験とするため157kNで10万回、176kNで100万回、それ以降は196kNで試験を行った。その結果、供試体Bでは、荷重を176kNに上げた

直後からたわみが急増し破壊に至った。一方、供試体Aでは、196kNに荷重を上げた150万回以降、たわみが若

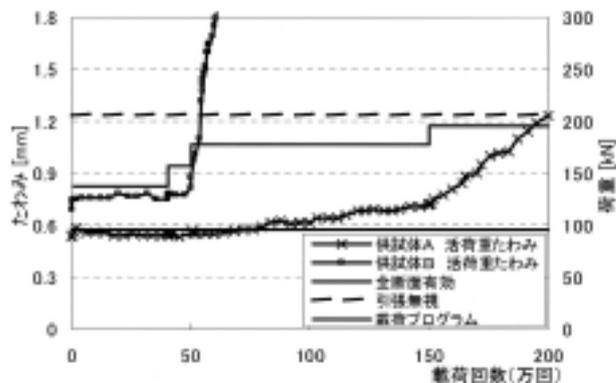


図-8 載荷回数-たわみ曲線

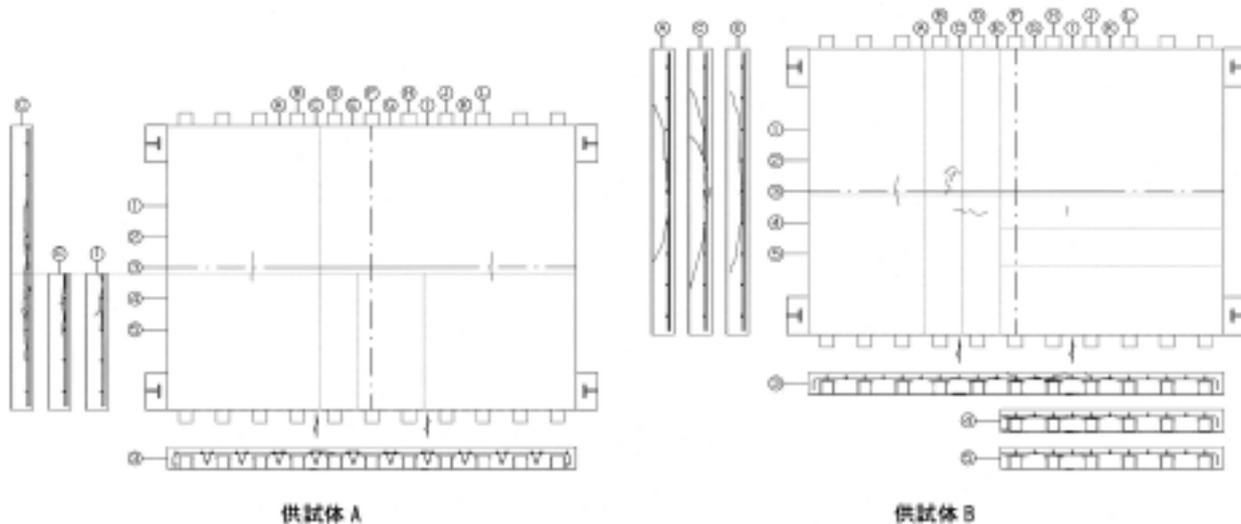


図-9 ひび割れ状況

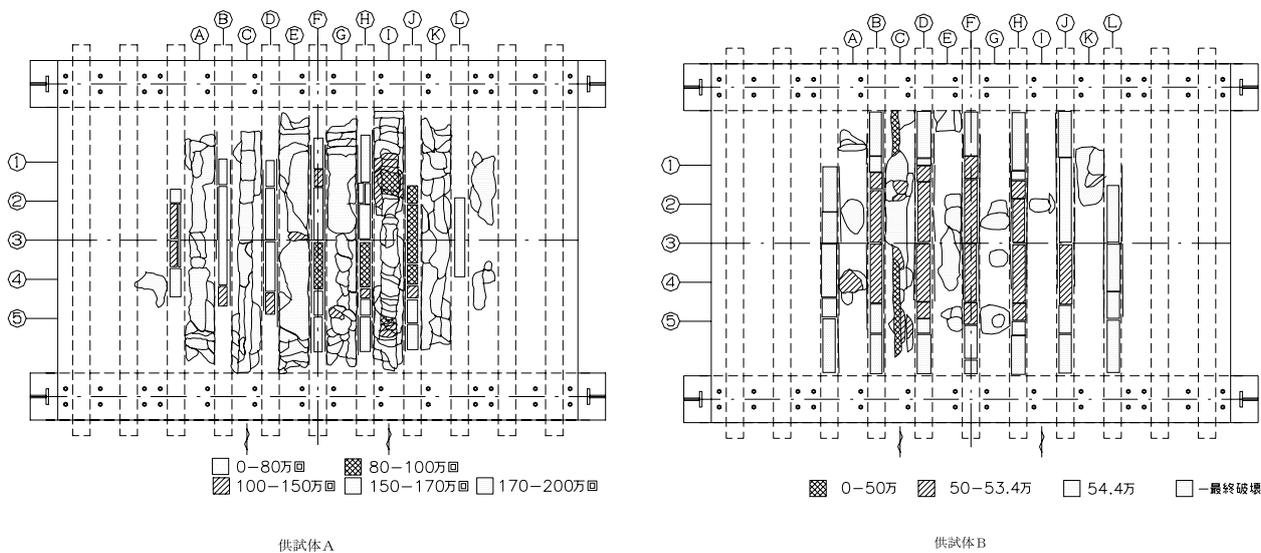


図-10 FRPとコンクリートのはく離状況

干増加傾向にあるものの、200万回載荷後も破壊しておらず、一般に載荷荷重147kNにて80万回の走行が、実橋RC床版に対する50年の交通荷重載荷分に相当すると言われている<sup>3)</sup>ことから、供試体A床版は実橋床版として十分な疲労耐久性を有していることが確認された。

図-9に床版上面のひび割れ状況を示す。ひび割れ図には、試験終了後の切断面のひび割れ状況も併記している。

両供試体とも、床版中央断面③の切断面において、角形鋼管上部のFRP突起部から上側鉄筋を結ぶ水平ひび割れが生じている。このひび割れは、供試体Bでは配力筋に沿ったひび割れであるのに対し、供試体Aでは、トラス鉄筋上弦材へとつながるアーチ状のひび割れとなっている。これは、トラス鉄筋の斜材がこのひび割れに抵抗するためと考えられる。橋軸直角方向断面におけるひび割れは、供試体Bではひび割れが斜め下に進展しているが、供試体Aでは、上側鉄筋に沿った水平なひび割れ

となっている。これは、供試体Aでは、角形鋼管間にせん断剛性の高いトラス鉄筋を配置しており、この部分にせん断ひび割れが進展しなくなったためである。したがって、この破壊形態の違いにより耐久性に大幅な違いが出たものと推察できる。

図-10にFRPとコンクリートのはく離状況を示す。なお、角形鋼管鋼管部のはく離は、角形鋼管上部とコンクリートのはく離を示している。これより、コンクリート-FRP底板間のはく離は、両供試体とも、荷重を上げた回数（供試体A 150万回、供試体B 50万回）の直後から急激にはく離範囲が広がっている。また、この回数は、たわみの急増が見られた載荷回数と一致しており、コンクリートとFRPのはく離により、たわみが急増したことがわかる。これは、それまでのはく離の進展やたわみの増加と明らかに異なっており、限界を超えた荷重となったと考えられる。

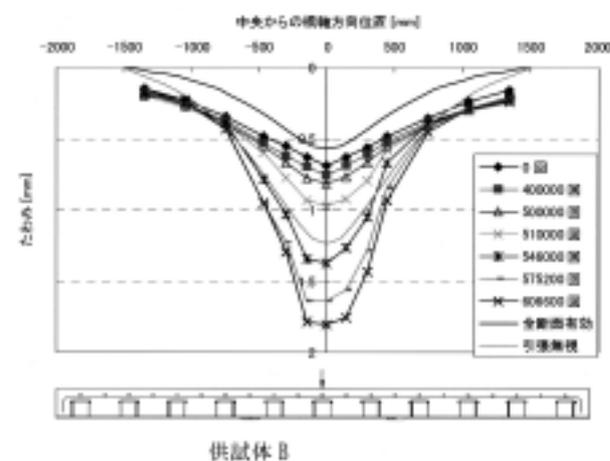
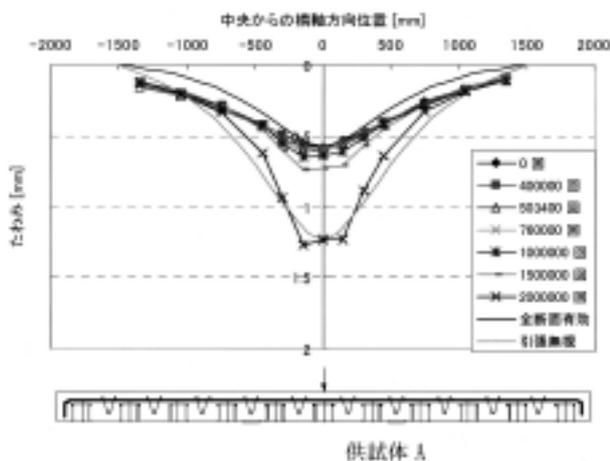


図-11 たわみの橋軸方向分布

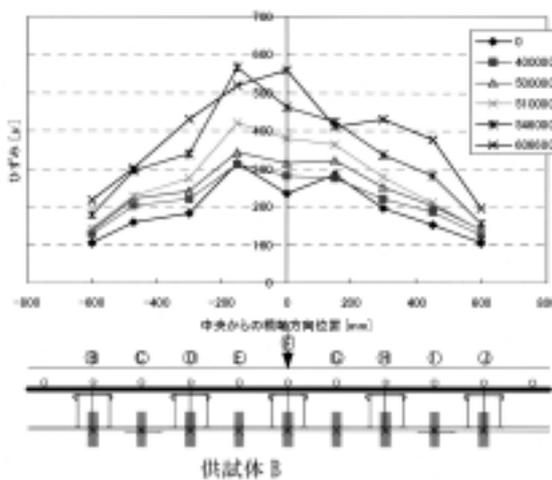
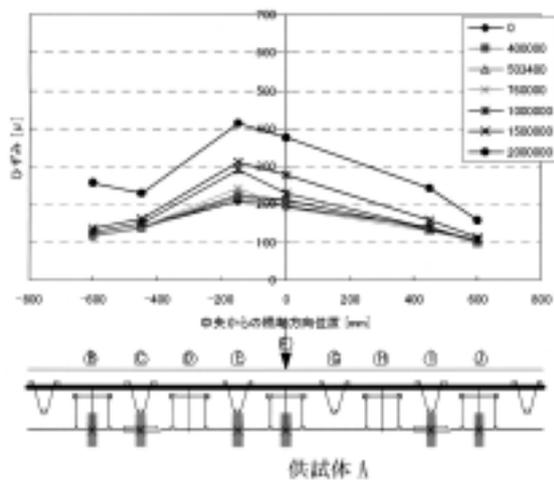
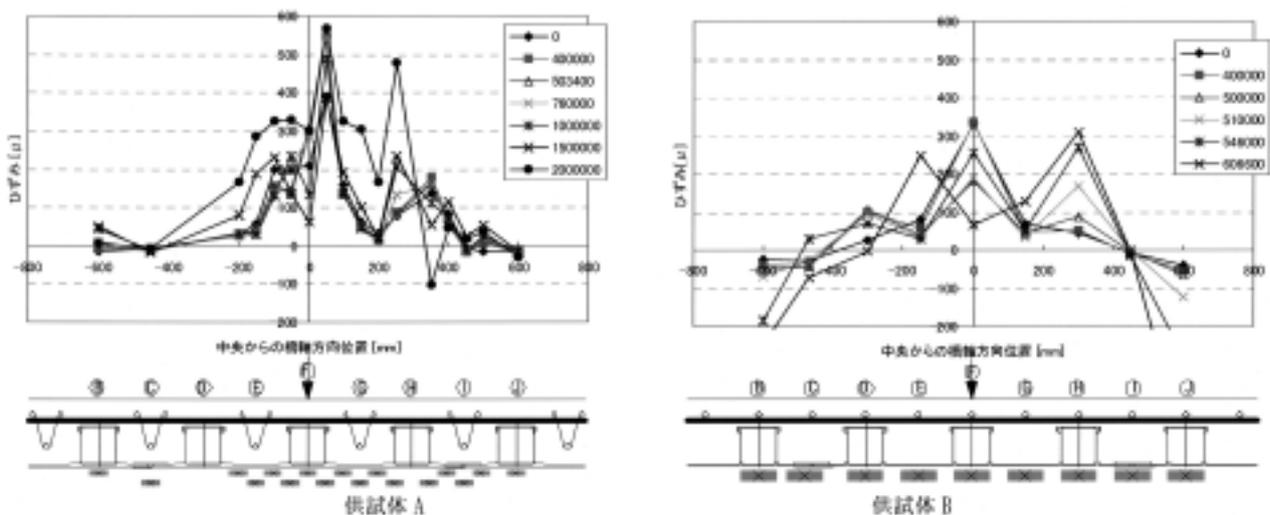


図-12 橋軸直角方向FRP下面ひずみの橋軸方向分布



図一13 橋軸方向FRP下面ひずみの橋軸方向分布

図一11に、各載荷回数における床版中央載荷時の橋軸方向たわみ分布を、コンクリート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共に示す。床版端部におけるたわみが、計算値と比べ実験値が大きくなる傾向が見られるのは、横桁と型枠パネルの間に隙間が生じていた影響である。この端部におけるたわみを除外すると、全断面有効の理論値は、走行開始前のたわみ値および分布形状と概ね一致している。

たわみ分布は、両供試体とも載荷回数の増加とともに中央で尖った分布となってくる。これは、主鉄筋方向にひび割れが生じ、配力鉄筋方向の荷重分配が減少するためであり、載荷繰返し数の増加に伴って、異方性度が大きくなっていくことが推察できる。

図一12に各載荷回数における橋軸直角方向のFRP下面ひずみの橋軸方向分布を示す。各回数のひずみは、載荷荷重を137kNに換算したひずみ値を示している。この図より、供試体Aの中央部のひずみが小さい傾向を示すのは、トラス鉄筋による剛性増加の影響と考えられる。また、供試体Aでは76万回以降、供試体Bでは50万回以降から、ひずみが増加する傾向がある。これは、鋼管上部のFRPとコンクリートがはく離している時期と一致しており、はく離によりFRPの荷重分担が増加しているものと考えられる。

図一13に各載荷回数における橋軸方向FRP下面ひずみの橋軸方向分布を示す。各回数のひずみは、載荷荷重を137kNに換算したひずみ値を示している。この図より、両供試体とも、荷重載荷に伴うFRP継手部のひずみ分布に大きな変化はなく、FRPで十分荷重伝達可

能であることがわかる。また、床版中におけるFRP底板に生じる橋軸方向ひずみは、最大でも600 $\mu$ 程度であり、これを応力換算すると11.3MPaとなり、断面計算時の応力33MPaと比べかなり小さい値となる。また、この値は、FRP継手の $2 \times 10^6$ 回疲労強度の45MPaと比べ、十分小さくFRP継手は十分な疲労耐久性を有していることがわかった。

ただし、供試体Aのひずみ分布では、㉑断面の角形鋼管腹板直下のひずみが76万回以降急変している。これは、荷重走行時の変形状況から判断して、角形鋼管のせん断変形の影響と考えられ、この頃、角形鋼管頂部からのアーチ状ひび割れが生じたものと思われる。一方、供試体Bのひずみ分布では、載荷とともに角形鋼管部のひずみが増加する傾向が見られる。これは、角形鋼管間のコンクリート部に角形鋼管隅角部より水平ひび割れが発生し、荷重点直下を含む3本の角形鋼管部で荷重を負担する耐荷性状に移行していくためである。

## 5. まとめ

構造を簡素化した鋼材とFRPのハイブリッド型枠を用いた合成床版の一連の試験結果から、以下に示す事項が明らかになった。

- ①FRP継手に関するS-N関係を求めることができ、白化現象により、継手の疲労寿命が推定できる可能性があることがわかった。
- ②輪荷重走行試験の結果より、トラス鉄筋を有する本床版は、実橋床版として使用できる十分な疲労耐久性を

有していることが確認できた。

- ③トラス鉄筋を省略しても、ある程度の疲労耐久性を有するが、トラス鉄筋を配置することにより、大幅な耐久性向上が図れる。
- ④本床版は、疲労損傷に伴い異方性度が大きくなる傾向が見られるが、橋軸方向の荷重はFRP底板の継手で十分伝達できる。

最後に、本研究は、松井繁之教授（大阪工業大学）のご指導のもと、宮地鐵工所、日東紡、新日本石油、富士技建、大阪大学の共同研究として行われたものであり、ご指導頂いた共同研究の関係各位に、感謝の意を表します。

### <参考文献>

- 1) 久保圭吾，河西龍彦：鋼材とFRPのハイブリッド型枠を用いた合成床版の開発，宮地技報No22，pp.5-14，2007
- 2) 長尾千瑛，松井繁之，石崎茂，久保圭吾，小牧秀之，平山紀夫：鋼・FRP複合永久型枠を用いた打替え用合成床版の耐荷特性，土木学会構造工学論文集Vol.53A，pp.1032-1039,2007
- 3) 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

2008.2.21 受付

## グラビア写真説明

### 牛根大橋

本橋の架かる国道220号線垂水市牛根麓地区3.6kmは昭和49年から異常気象時の走行規制区間に指定されており、「牛根大橋」は連続雨量150mm以上の異常時通行規制解除を目的とした早崎防災事業の一環として計画された橋梁です。タイプ選定に当っては桜島の御岳の噴煙をバックに雄大で壮麗な姿で架かる景観性，施工性，経済性を考慮に入れてバランスドアーチが採用され、中央支間長260mは九州で一番、全国的にも三番目の規模の橋梁となります。又架設は国内最大級のフローティングクレーン“海翔”で鹿児島市内のIHI工場跡地の地組ヤードから吊ったままの状態で見地に運び、平成19年の真夏に起点，終点，中央ブロックの順で行い無事完了しました。本橋が架かったお陰で雨天時での通行止めが無くなり、地元住民の方は安心して日常生活を送ることが出来又大隅半島の農・水産物それに地元特産品の焼酎などを安心して鹿児島市内及び九州一円に運ぶ事が出来るようになり、経済効果の大きい橋梁として県内外の多くの方に期待されています。 (田中 輝)

### 戸賀4号橋

戸賀4号橋は、なまはげの里である男鹿半島の観光用道路の一部として、計画された橋梁です。床組を省いた合理化上路トラス構造をしており、また、架橋場所が海に面した男鹿半島の海岸線に程近い為、亜鉛溶射塗装が採用されています。更に、床版にはFRP合成床版が採用されており、ライフサイクルコストを特に意識した設計となっています。橋梁脇には亜鉛溶射の暴露試験体が設置され、様々な意味で長く興味を引く橋となりそうです。(加藤 太郎)