

鋼・FRP 複合永久型枠を用いた打替え用合成床版の耐荷力と疲労耐久性

Strength and durability of replacing FRP composite deck using permanent FRP forms with steel pipes

久保圭吾*, 長尾千瑛**, 石崎茂***, 松井繁之****

Keigo Kubo, Chiaki Nagao, Shigeru Ishizaki, Shigeyuki Matsui

* (株) 宮地鐵工所, 設計部技術開発グループ (〒290-8580 千葉県市原市八幡海岸通 3)

** 工修, 中日本高速道路(株), 富士保全・サービスセンター (〒417-0061 静岡県富士市伝法 272-8)

*** 工博, (株) 富士技建, 技術開発部 (〒532-0002 大阪市淀川区東三国 4-13-3)

**** 工博, 大阪工業大学教授, 八幡工学実験場 (〒614-8289 京都府八幡市美濃山一ノ谷 4)

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. The FRP form is created by infusion method wrapping steel pipes with glass fiber mat. 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.

Key Words: FRP Composite deck, static strength, durability, wheel load running test

キーワード: FRP 合成床版, 静的耐荷力, 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。しかし,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打替え用FRP合成床版を開発した。図-1に本床版の構造概念図を示す。本床版の型枠パネルは,底面にガラス繊維強化プラスチック(GFRP:以下FRPと称する)を配置し,心材である角形鋼管をFRPで覆った構造であり,インフュージョン成形法(閉塞型成形法)により一体成形される。また,角形鋼管内を中空とすることで,軽量化を図っている。なお,配力筋方向の断面力に対しては,FRPの強化繊維を方向性なく配置することで等方性材料とし,この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。

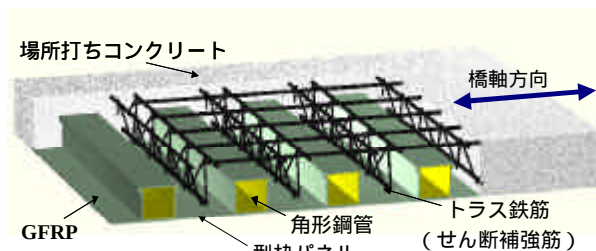


図-1 構造概念図

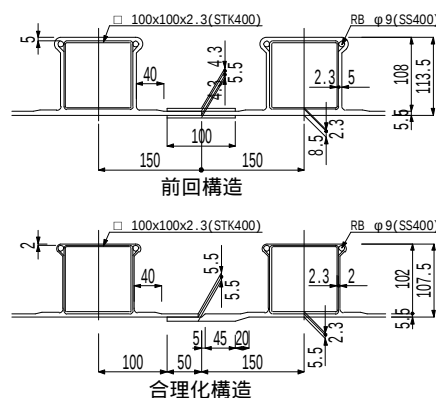


図-2 合理化構造の概要

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¹⁾。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。

2. FRP継手の疲労試験

2.1 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用いている。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。なお、本継手の静的引張強度は123MPaであることから、 10^7 回における疲れ限度比は約0.4である。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倍程度の载荷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。

2.2 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の中央に線载荷する方法で行い、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-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。

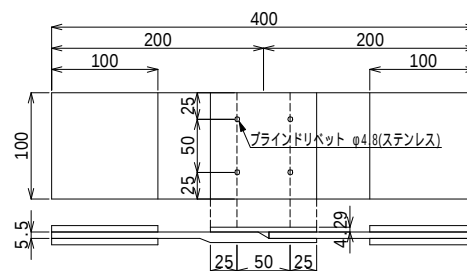


図-3 継手部供試体

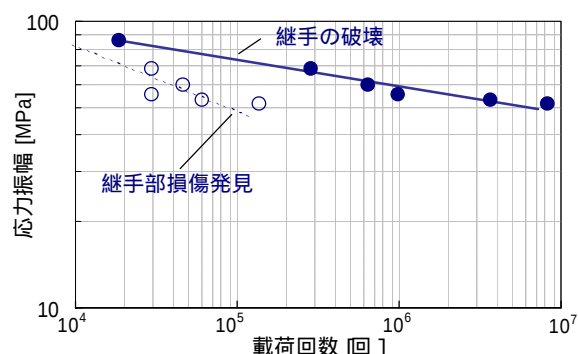


図-4 継手強度 (FRP板の引張試験)

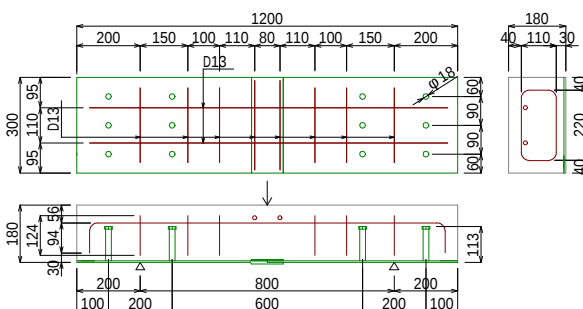


図-5 FRP-コンクリート合成はり供試体

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

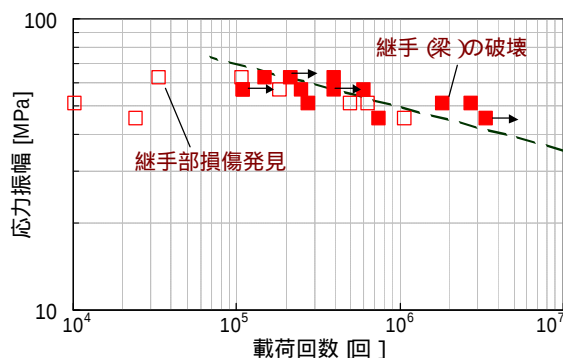


図-6 継手強度 (合成はりの曲げ試験)

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。

一般に鋼構造の継手では 2×10^6 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を推定できる可能性がある。

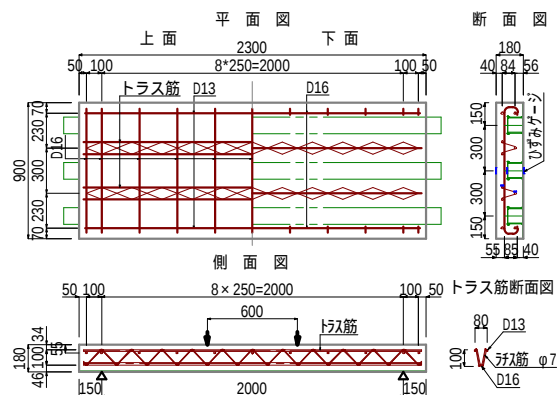


図 - 7 橋軸直角方向供試体（トラス鉄筋有り）

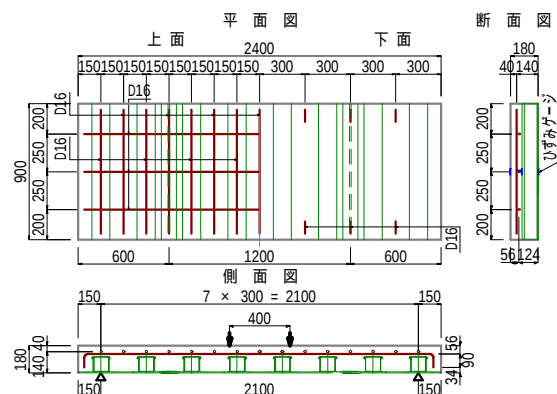


図 - 8 橋軸方向供試体

3. はりの静的曲げ試験

3.1 試験概要

鋼材とFRPのハイブリッド構造を用いたFRP合成床版の橋軸および橋軸直角方向の曲げ特性を調べるため、幅900mmの供試体を製作し、曲げ耐力試験を実施した。なお、橋軸直角方向供試体は、図 - 7 に示すトラス鉄筋を配置したものと、トラス鉄筋を省略したもの2種類とし、橋軸方向供試体は、トラス鉄筋の有無による影響は少ないものと考えられるため、図 - 8 に示すトラス鉄筋を配置しないもののみとした。供試体の種類と名称を表 - 2 に示す。なお、載荷は、供試体の図中に示す支間、載荷位置とした4点曲げ試験とした。なお、過去の橋軸直角方向はり試験において、角形鋼管外側のコンクリートが拘束されていないことにより、角形鋼管ウェブ外縁に沿ったひび割れが生じ、この部分のコンクリートがはく離する破壊形態となった²⁾が、実際の床版では、配力筋方向に連続した版であることから、このような破壊は生じないものと考えられるため、拘束治具によりはり側面に1MPaの圧縮力を与えた。載荷時の測定項目は、はりのたわみ、コンクリート・鉄筋・FRPのひずみとした。なお、供試体構成材料の力学特性は表 - 3 のとおりであった。

3.2 試験結果と考察

(1) 梁部材としての耐力

表 - 2 に、各供試体のひび割れ荷重、鋼材降伏荷重、および破壊荷重の計算値と実験値を示す。ここで、各荷重値は、表 - 3 の材料特性を用い、計算ひずみ、実測ひずみが、それぞれの状態に達した時の値とした。なお、本表には、比較のため、床版支間3mで設計されたRC床版により、断面計算された計算値も併記した。

表 - 2 供試体名と破壊荷重

供試体名		ひび割れ発生荷重 (kN)	角形鋼管下縁降伏荷重 (kN)	破壊荷重 (kN)
橋軸直角方向	トラス筋 有 (18cm)	計算値 85	349	581
		実験値 73	505	713
	トラス筋 無 (18cm)	計算値 87	367	555
		実験値 71	486	586
橋軸方向	RC床版 (24cm)	計算値 131	438 (鉄筋降伏)	461
	トラス筋 無 (18cm)	計算値 24	---	155
		実験値 33	---	91
	RC床版 (24cm)	計算値 116	269 (鉄筋降伏)	313

表 - 3 材料特性

	強度(MPa)	弾性係数(Gpa)
コンクリート(トラス鉄筋なし)	36.8	31.0
コンクリート(トラス鉄筋あり)	34.8	29.7
GFRP	280	18.8
鉄筋 D16(SD295A)	479	192
角形鋼管 100x100x2.3(STK400)	420	193

これより、橋軸直角方向においては、トラス鉄筋の無い供試体では実験値と計算値でほぼ一致しているが、トラス鉄筋を配置した供試体では、実験値の方が若干大きくなった。これは、計算値がトラス鉄筋の上下鉄筋のみ有効としていることによるものと考えられ、トラス鉄筋の効果により、耐荷力が向上することがわかった。また、橋軸直角方向供試体の破壊荷重は、RC床版の計算値と比べ、床版厚がうすいにも関わらず、破壊荷重は大きく、十分な耐荷力があることがわかった。

一方、橋軸方向供試体の破壊荷重が計算値より小さいのは、破壊が曲げ破壊ではなく、図 - 9 に示すように、載荷板と角形鋼管角部を結ぶせん断破壊が生じたためである。



図 - 9 橋軸方向供試体の破壊状況

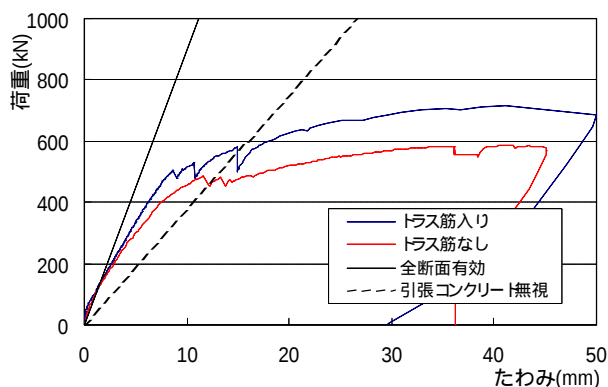


図 - 10 橋軸直角方向はりの荷重 - たわみ曲線

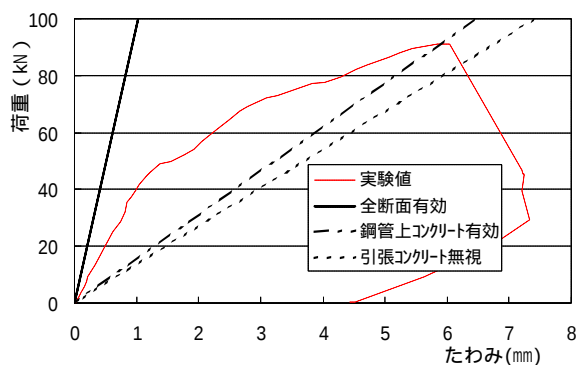
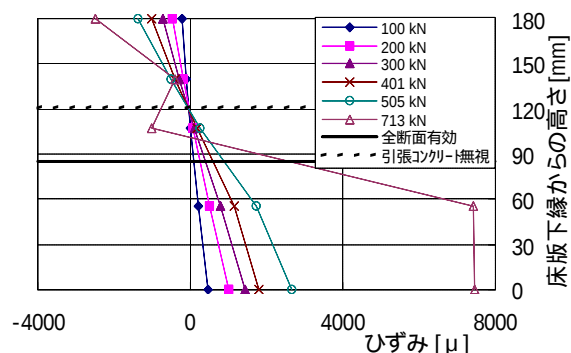


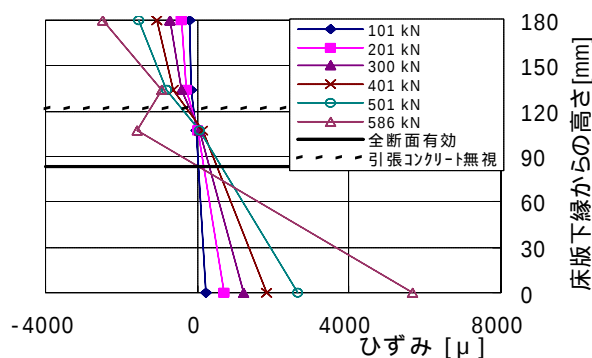
図 - 11 橋軸方向はりの荷重 - たわみ曲線

(2) 荷重とたわみの関係

図 - 10 に、橋軸直角方向供試体の支間中央における荷重 - たわみの包絡線を、床版の全断面を有効とした場合と、引張側コンクリートを無視した場合のたわみの理論値とともに示す。この図より、いずれの供試体とも、100kN程度までほぼ全断面有効の理論値に近い剛性を示し、その後、荷重の増加とともに引張り側コンクリートを無視した理論値に近づいてくる。また、500kN程度で変曲点が見られるが、これは角形鋼管が降伏したためと考えられ、その後もたわみが大きくなるものの荷重の増加が見られる。これは、角形鋼管降伏後もFRPは降伏しないため、FRPが荷重負担するためであり、角形鋼



(トラス鉄筋 有)



(トラス鉄筋 無)

図 - 12 橋軸直角方向はりのひずみ分布

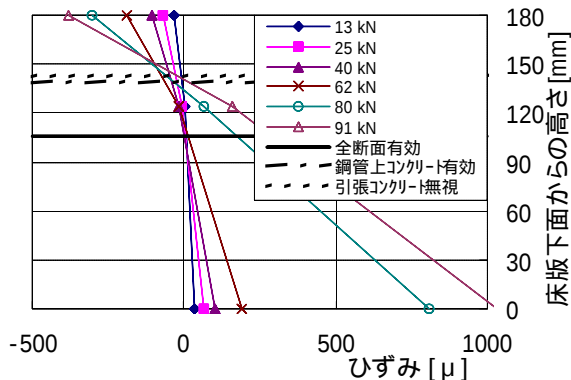


図 - 13 橋軸方向はりのひずみ分布

管降伏後の残存耐力が大きいことがわかる。なお、トラス鉄筋有の供試体では、角形鋼管降伏時のたわみがトラス鉄筋のないもののより小さく、角形鋼管降伏後の荷重の増加も大きい傾向が見られる。これより、トラス筋により剛性、および耐力が向上することがわかった。

図 - 1 1 に、橋軸方向供試体の支間中央における荷重 - たわみの包絡線を、床版の全断面（角形鋼管間のコンクリートも含む）を有効とした場合、角形鋼管上のコンクリートを有効とした場合、および引張側コンクリートを無視した場合のたわみの理論値とともに示す。これより、橋軸方向はりのたわみは、角形鋼管間のコンクリートも有効としたものと角形鋼管上のみのコンクリートを有効としたものの中間に位置している。これは、角形鋼管上の突起が角形鋼管間のコンクリートを拘束することによる効果により、この部分のコンクリートがある程度有効に作用するためと考えられる。

(3) 床版内の維ひずみ分布

図 - 1 2 に橋軸直角方向供試体の供試体中央位置における、維ひずみ分布を示す。これらのひずみは、コンクリート上面、鉄筋、角形鋼管上 GFRP 上面、GFRP 下面における測定値である。なお、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の位置も併記している。

これより、トラス鉄筋有りの供試体は、各荷重段階において概ね直線となっており、断面内で各構成材料が合成した挙動を示していることがわかる。しかし、トラス鉄筋の無い供試体では、鉄筋位置で若干ずれが見られる。これは、FRP とコンクリートのずれによる影響と考えられる。また、いずれの供試体も載荷初期では、ほぼ全断面有効の中立軸の位置と一致するが、載荷とともに引張無視の中立軸位置に近づくことがわかる。

また、図 - 1 3 に示す、橋軸方向はり供試体でも、各段階で概ね直線となっており、せん断破壊後も FRP とコンクリートにずれは無く合成して挙動していることがわかる。これは、せん断破壊が載荷点付近で生じており、支間中央では角形鋼管の突起によりコンクリートが拘束され合成挙動が維持されているものと考えられる。

4. 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。

4.1 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 - 1 4 に、

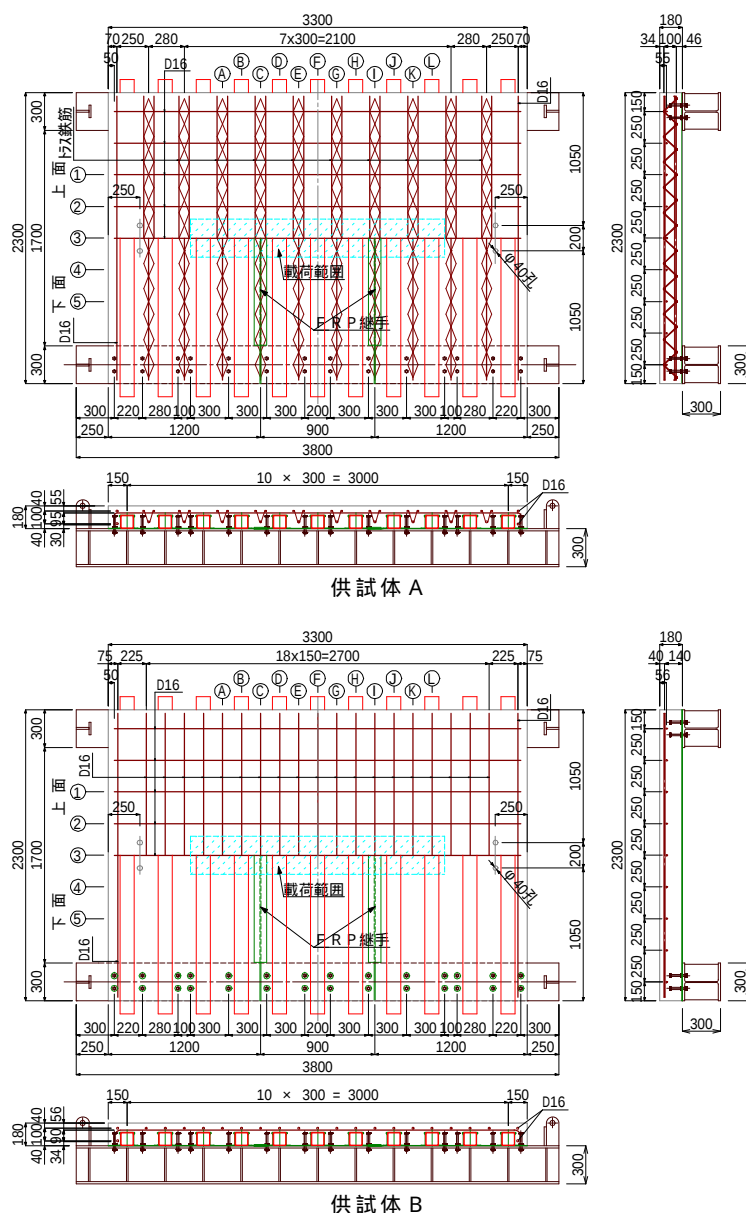


図 - 1 4 供試体詳細図

供試体の材料特性を表 - 4 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、主桁に直接固定した。また、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 $20\text{cm} \times 50\text{cm}$ を辺長比で 60% に縮小した $12\text{cm} \times 30\text{cm}$ 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 $\pm 1000\text{mm}$ の範囲を繰返し走行させた。床版の性状変化を定量化するために、所定の走行回数毎に床版中央の E 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。

4.2 試験結果と考察

(1) 載荷回数とたわみの関係

荷重載荷プログラムと床版中央 E 点における載荷回数 - たわみ曲線を図 - 15 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³⁾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。

(2) ひび割れとはく離状況

図 - 16 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

表 - 4 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

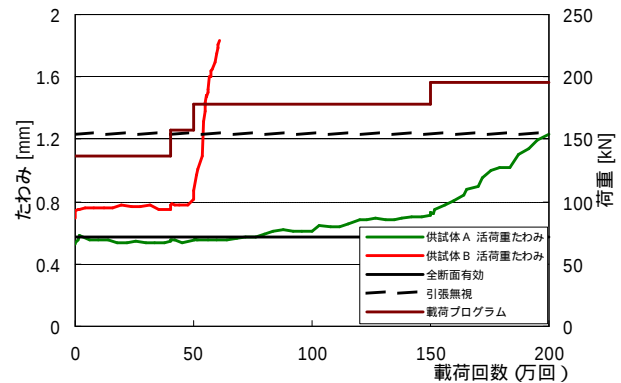


図 - 15 載荷回数 - たわみ曲線

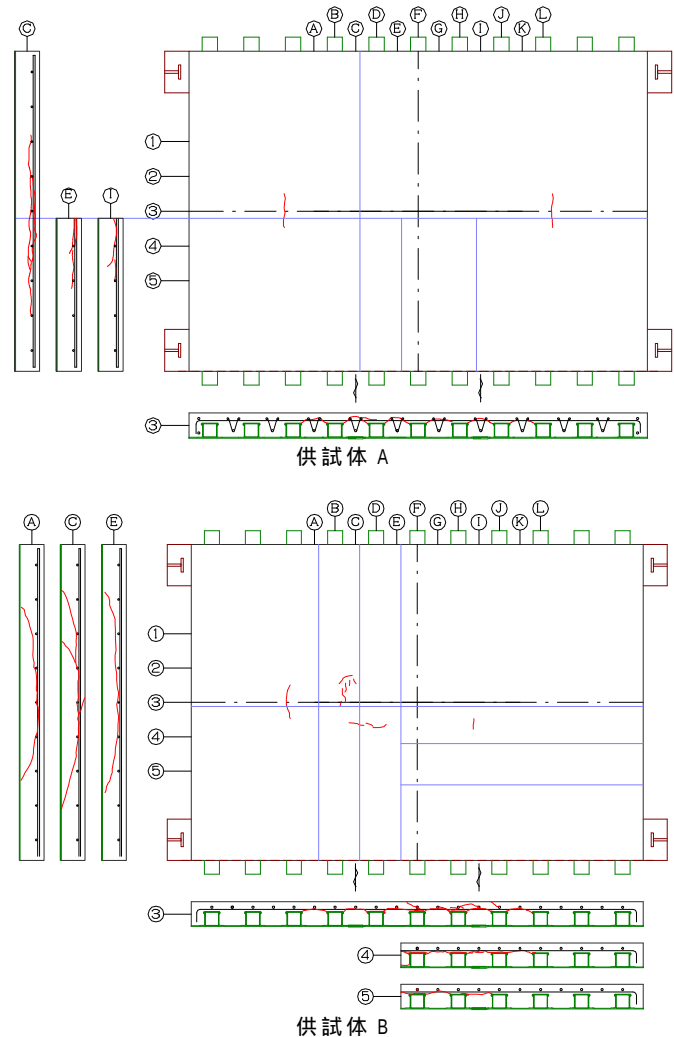
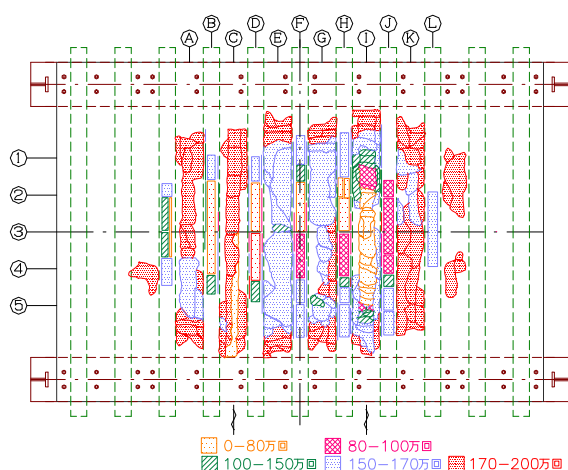


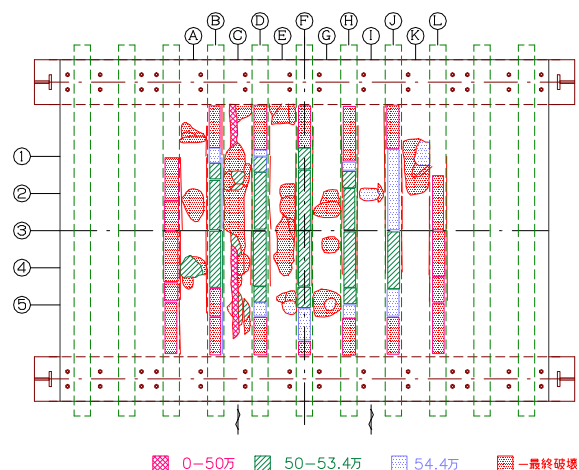
図 - 16 ひび割れ状況

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 - 17 に F R P 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 - F R P 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荷重回数と一致しており、コンクリートと F R P 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。

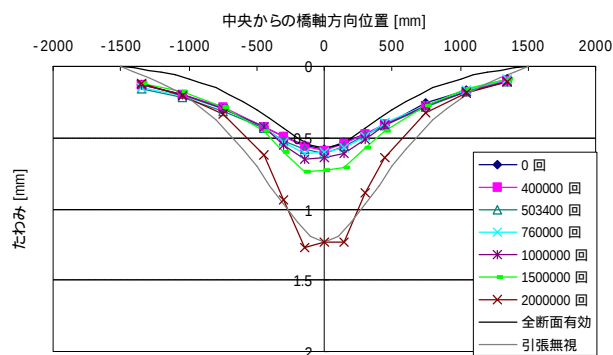


供試体 A

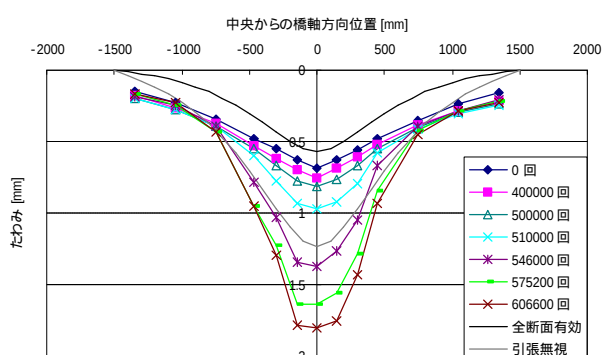


供試体 B

図 - 17 F R P とコンクリートのはく離状況



供試体 A



供試体 B

図 - 18 たわみの橋軸方向分布

(3) たわみ分布

図 - 18 に、各荷重回数における床版中央荷重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。なお、供試体 A の中央部のたわ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。

たわみ分布は、両供試体とも荷重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、荷重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。

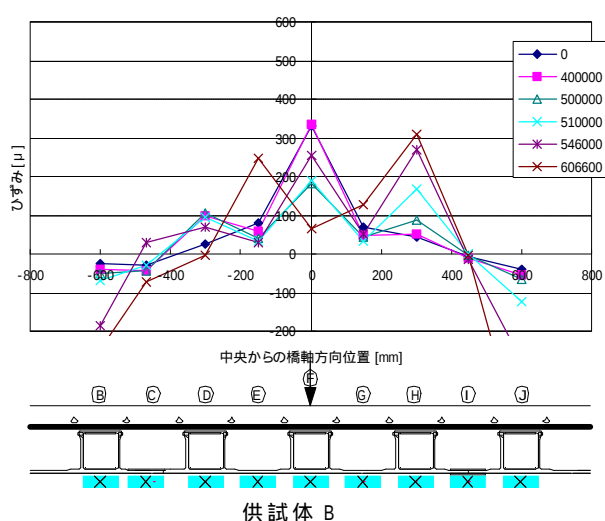
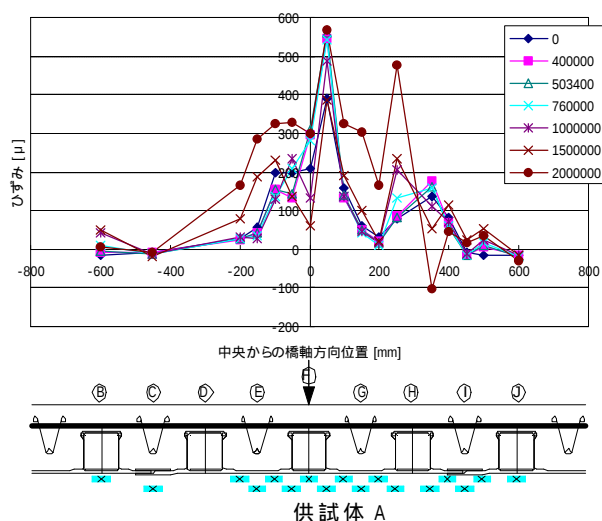


図 - 19 橋軸方向FRP下面ひずみの橋軸方向分布

(3) ひずみ分布

図 - 19 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で十分荷重伝達が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600μ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 2×10^6 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、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大きくなる傾向が見られる。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力性状に移行していくためである。

5. まとめ

構造を合理化した鋼・FRP複合永久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。

FRP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。

鋼・FRP複合剛性床版は、RC床版と比べ床版厚がうすいにもかかわらず、静的耐荷力の向上が図れる。

トラス鉄筋を角形鋼管間に配置することで、剛性および静的耐荷力が向上する。

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。

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。

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底板で十分伝達できる。

最後に、本研究は、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)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.
- 2)長尾千瑛，久保圭吾，小牧秀之，石崎茂，平山紀夫，松井繁之：打替え用FRP合成床版の構造開発に関する研究，土木学会第60回年次学術講演会,CS,pp.379-380,2005.
- 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.

(2007年9月18日受付)