

鋼材とFRPのハイブリッド型枠を用いた合成床版の耐久性

Durability of FRP Composite Slab Using a Hybrid Permanent Form of Steel and FRP

久保 圭 吾^{*1} 河西 龍 彦^{*2}
Keigo KUBO Tatsuhiko KASAI

Summary

In recent years, it is increasing to be replaced instead of re-repairing for the deteriorated RC slabs. This selection is appropriate from the viewpoint of life cycle costs. Also, in the case that a slab is replaced partially, the newly installed deck should be easily connected to the existing one and weight increasing is prohibited. A steel-FRP-concrete composite deck for satisfying such demands was developed by the authors. However, the structure of this deck is complicated due to the composite structure of FRP, steel pipes, reinforcing rods and concrete. In this study, the wheel running test by the specimen of the actual size was carried out to the fatigue durability of the deck. This paper describes and discusses the result of the fatigue test.

キーワード：FRP合成床版、輪荷重走行試験、疲労耐久性

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、耐候性に優れた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、軽量で耐食性に優れたFRP材を床版下面に配置した打替え用FRP合成床版を開発^{1), 2)}した。図-1に本床版の構造概念図を示す。

本床版のFRP型枠は、コンクリート打設時の型枠・支保工としての機能を持たせるため、FRP板上に剛性の大きい角形鋼管を橋軸直角方向に配置し、この鋼管の外側を底面のFRP板と一体となるようにFRPを巻き付けた構造とした。また、角形鋼管内を中空とすることで、床版死荷重の軽減が図られるとともに、鋼管外側のFRPにより耐食性の向上も期待できる。さらに、図-2に示すように角形鋼管の側面上端部に沿って丸鋼を溶接した突起を設けることで、FRP型枠とコンクリートとの鉛直方向の一体化をしている。なお、角形鋼管を橋軸直角方向に配置したため、配力筋方向の下側には鉄筋を配置することができず、FRP底板で応

力を伝達する必要がある。このため、FRP底板には等方性となるようにガラス基材を配置し、橋軸方向に分割されたFRPパネル間には、FRPの継手を設けている。この継手に関しては、FRP単体およびはりによる試験により、耐力力、耐久性の検証を行っている³⁾ものの、実床版に適用するには床版中におけるFRP継手の耐久性を確認する必要がある。このため、実床版中でのFRP継手部の疲労耐久性を確認するとともに、床版全体の疲労耐久性を把握するため、実物大の床版モデルによる輪荷重走行試験を実施した。ここでは、この試験の結果について述べ、本床版の疲労耐久性について考察する⁴⁾。

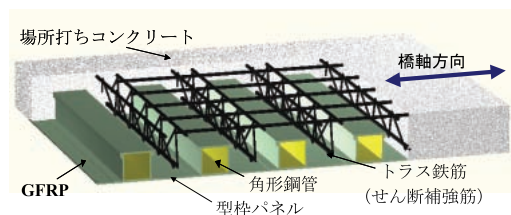


図-1 構造概念図

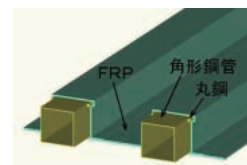


図-2 FRP型枠の断面形状

*1(株)宮地鐵工所 千葉工場技術研究所技術開発グループ課長代理

*2(株)宮地鐵工所 生産管理本部生産管理部長

2. 試験方法と床版供試体の概要

(1) 試験方法の概要

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実施した。載荷方法は、**図-3**に示すように、実際の車輪の接地面積 $200\text{mm} \times 500\text{mm}$ を辺長比で60%に縮小した $120\text{mm} \times 300\text{mm}$ の載荷面積をもつ鋼製載荷ブロックを、 125mm 間隔で敷き並べた軌道にて載荷を行い、供試体中央から橋軸方向に $\pm 1000\text{mm}$ の範囲をくり返し走行させた。また、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。

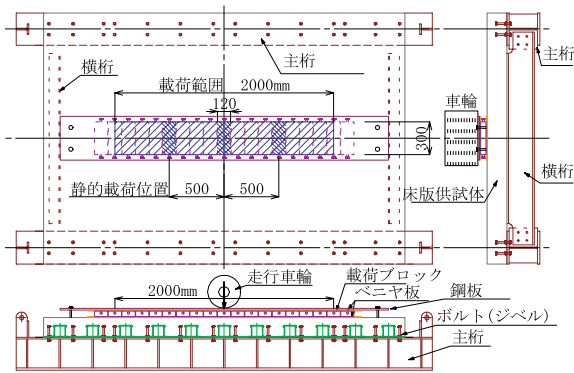


図-3 試験方法の概要

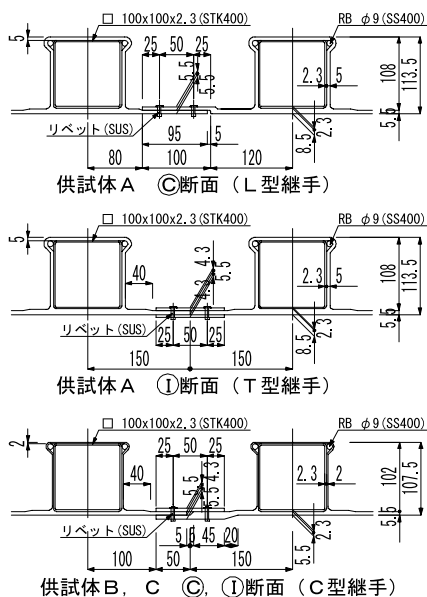


図-4 各供試体の型枠、継手形状

(2) 供試体の概要と計測項目

試験は、まず、継手形式の違いによる疲労劣化挙動の比較を行うため、FRP型枠パネルの2ヶ所(©断面・①断面)に、それぞれ形式の異なる2種類(L型、T型)の継手を設けた供試体Aにより実施した^{5), 6)}。このときの、型枠、継手形状を**図-4**に、供試体Aの供試体形状を**図-5**に示す。本供試体には、角形鋼管間のコンクリートのせん断強度を高めるため、V字型のトラス鉄筋を配置した。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、および橋軸方向の断面位置を示している。

次に、本床版構造の合理化および経済性の向上を図るため、FRP部材厚の減少、継手形状の改善、およびトラス鉄筋の省略を試みた。

FRP型枠に関しては、鋼管に巻いたFRPが厚い場合、鋼管上部の丸鋼に巻いたFRP部の成形が難しく、鋼管上部のコンクリートに発生するひび割れを助長する形状となるため、FRPの厚さを、鋼管の防錆が確保できる最小厚さとして 2mm に減少させた。また、継手構造は、偏心の影響がなく片面施工が可能で施工性に優れたC型継手を用いた。本供試体の型枠、継手形状を**図-4**の供試体B、Cに示す。さらに、トラス鉄筋については、はり試験結果⁷⁾から、トラス筋の有無による静的耐荷力に大きな差が見られなかったことから、トラス筋を省略することも試みた。

以上より、構造の合理化を図った供試体として、**図-6**に示すトラス鉄筋を省略した供試体B、および**図-7**に示すトラス鉄筋を配置した供試体Cを用意した。ただ

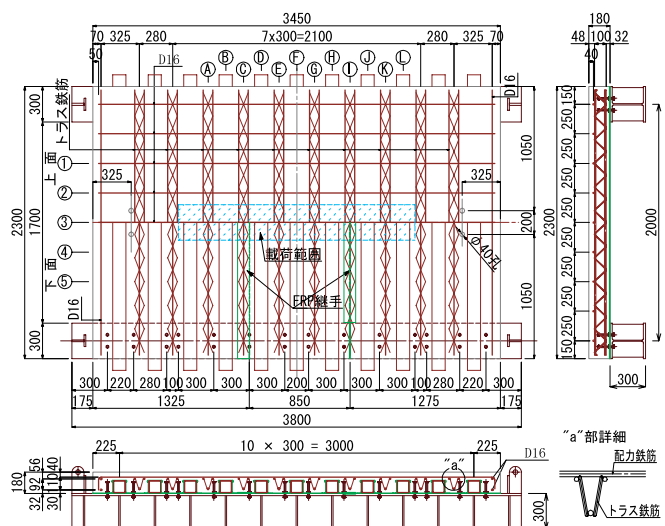


図-5 供試体A

し、トラス鉄筋の配置は、供試体Aでは、トラス鉄筋を配力鉄筋の下に配置しているのに対し、供試体Cでは、配力鉄筋をトラス鉄筋に通すようにして、トラス鉄筋の上側筋を配力鉄筋上に配置した。また、FRP継手部の橋軸直角方向のリベット間隔は、間隔の違いが継手の耐久性に及ぼす影響を調べるため、供試体B、Cともに③断面部で100mm間隔（C100-1）、①断面部で200mm間隔（C200-1）とした。各供試体の材料特性を、表-1に示す。

なお、試験時には、くり返し荷重による床版の性状変化を調べるために、所定の走行回数荷重後に床版中央（⑤と③の交点）に静的荷重し、たわみ、ひずみの計測を行った。また、試験中は、床版上面のひび割れ状況と打音検査によるFRPとコンクリートのはく離状況も調査した。

3. 試験結果

(1) 荷重回数とたわみの関係

荷重荷重プログラムと床版中央（⑤③点）における荷重回数とたわみの関係を図-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表示した。荷重は、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となる荷重プログラムで試験を実施した。

供試体Aでは、110万回程度からたわみの急激な増加が見られたため、113.4万回で試験を終了した。また、トラス鉄筋を配置していない供試体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Cでは、196kNに荷重を上げた150万回以降、たわみの増加率が大きくなったものの、たわみは直線的に増加し、200万回荷重まで破壊には至らず荷重を終了した。

表-1 材料特性

	弾性係数[GPa]	強度[MPa]
コンクリート[供試体A]	29.1	29.5 (圧縮)
コンクリート[供試体B]	30.8	39.1 (圧縮)
コンクリート[供試体C]	31.2	36.9 (圧縮)
FRP	18.8	280 (引張)
鉄筋 D16[SD295A]	192	479 (引張)
角型鋼管 100x100x2.3[STK400]	193	420 (引張)

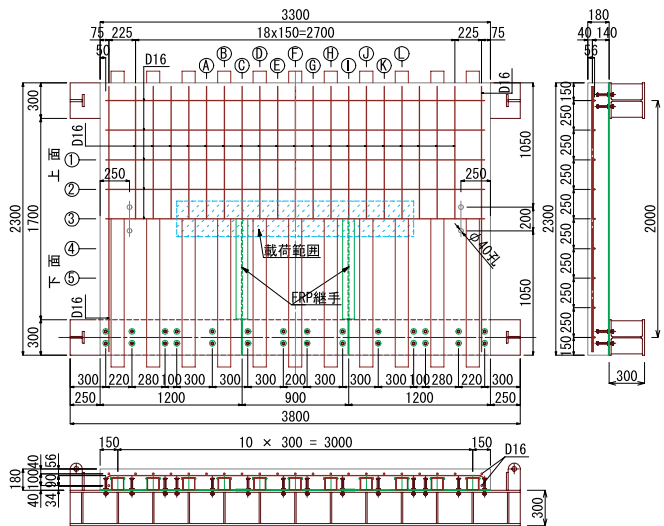


図-6 供試体B

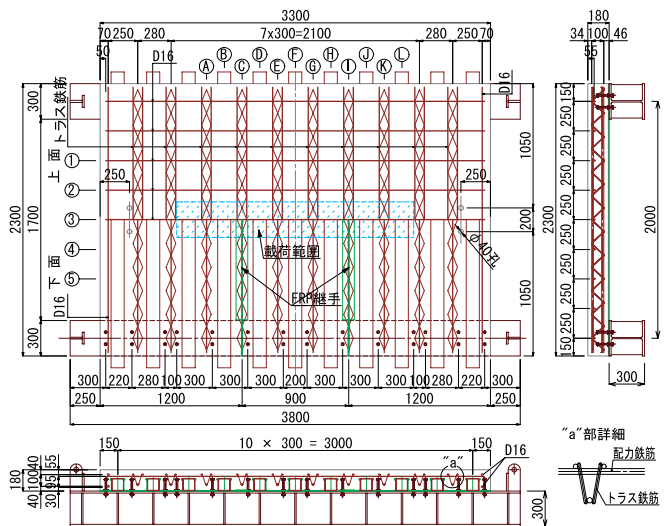


図-7 供試体C

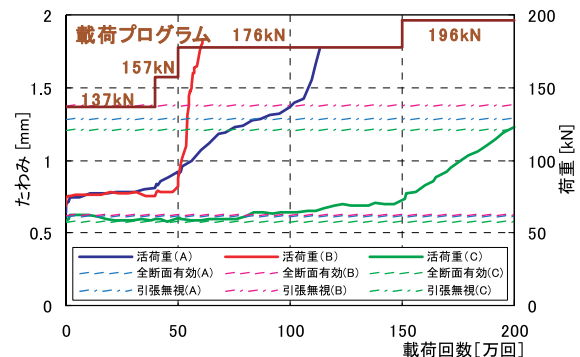


図-8 床版中央のたわみ-荷重回数曲線

(2) たわみ分布

各载荷回数における、床版中央载荷時の橋軸方向の活荷重たわみの分布と、橋軸方向の残留たわみの分布を、それぞれ、**図-9**、**図-10**に示す。なお、**図-9**には、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を併記しているが、全断面有効の計算に用いる橋軸方向の剛性は、はり試験結果⁶⁾から、中空の角形鋼管を無視しコンクリート断面として評価した。いずれの供試体も、走行開始前のたわみ値および分布形状は全断面有効の理論値とほぼ一致しており、载荷とともにたわみが増加していく傾向が読み取れる。ここで、供試体Aの実験値で、载荷回数70万回あ

たりから⑤点のたわみが大きくなった。残留たわみも同様の傾向が見られることから、**◎**断面のL型継手において継手部が損傷し、剛性が低下したためと考えられる。また、供試体B、Cの活荷重たわみの分布は、いずれも载荷回数の増加とともに中央のたわみが大きくなる傾向が見られる。これは、配力鉄筋方向の荷重分配が低下したためであり、くり返し载荷により、異方性が增大することが推察できる。しかし、供試体Cでは、トラス鉄筋の配置と、耐久性の高い継手としたため、荷重を196kNに上昇させるまではたわみの増加が緩慢であり、150万回载荷までコンクリートが全断面有効に近い状態で安定する結果となった。

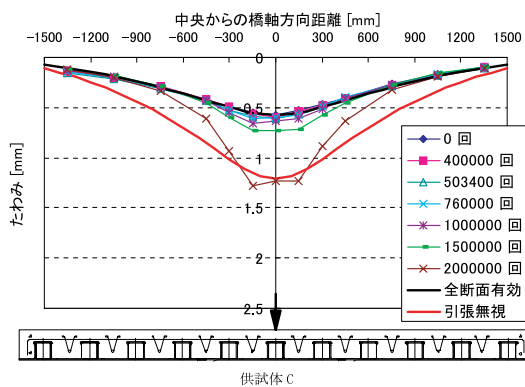
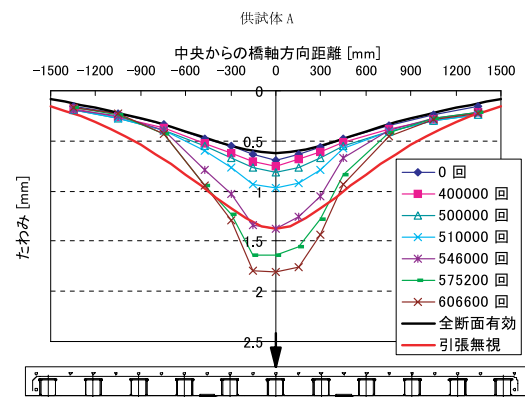
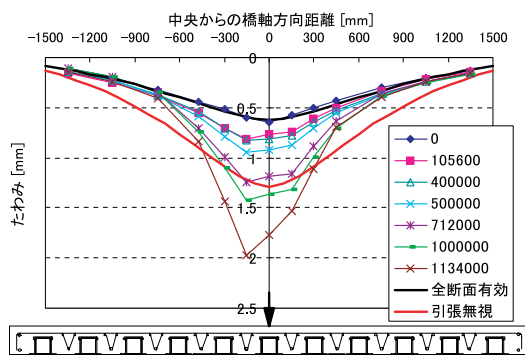


図-9 活荷重たわみの橋軸方向分布

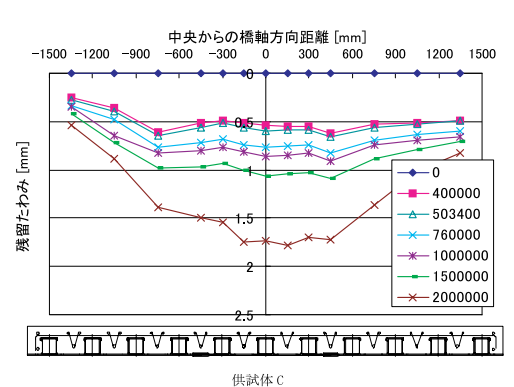
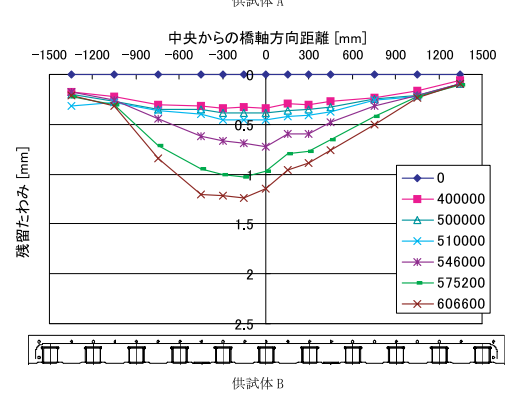
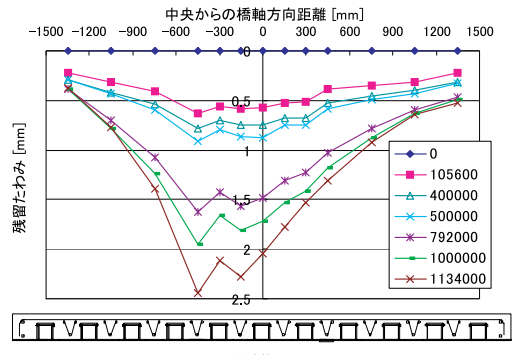


図-10 残留たわみの橋軸方向分布

(3) ひび割れとはく離状況

図-11に床版上面のひび割れ状況を示す。図中には、試験終了後の切断面のひび割れ状況も併記している。

供試体Aにおける荷重軌道下とその近傍の上面ひび割れは、100万回荷重以降に生じたもので、105万回以降にたわみが急増したことから、その時期に荷重ブロック端から斜め下に伸びる押し抜きせん断型のひび割れが床版上面まで進展したと考えられる。実験後の床版中央断面③の切断面において、全供試体で角形鋼管上部のFRP突起部から上側配力鉄筋に沿うアーチ状のひび割れが生じていた。供試体Cでは、供試体Aに比べトラス鉄筋を配力鉄筋の上側に配置したため、トラス鉄筋弦材の下側をこのひび割れが横切っており、トラス鉄筋の斜材がこ

のひび割れに抵抗し、耐久性が向上したと考えられる。

橋軸直角方向断面におけるひび割れは、供試体Bでは斜めひび割れが上面の荷重板端から進展しているのに対し、供試体A、C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、Cでは、鋼管間にせん断剛性の高いトラス鉄筋を配置しているため、せん断ひび割れが進展しないためである。ただし、供試体Aでは、トラス鉄筋上の上側鉄筋に沿うひび割れとなり、それより上のコンクリートが分離し、重ねばり化する形態となっている。供試体Cでは、この水平方向ひび割れはトラス鉄筋の上弦材より下側に形成されるので、トラス斜材が重ねばり化することを防いでいる。トラス鉄筋の中に配力鉄筋を通す構造としたことがせん断抵抗を高

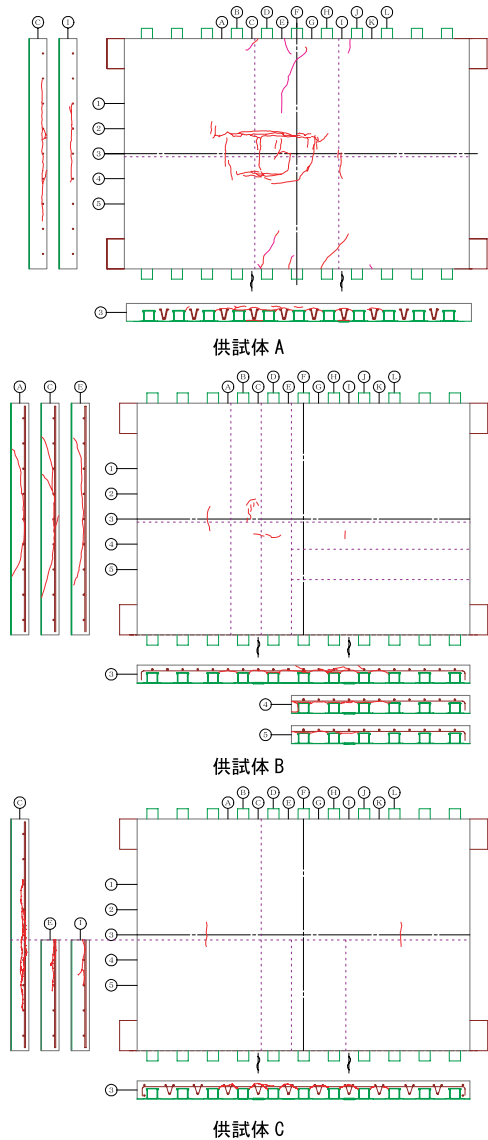


図-11 ひび割れ図

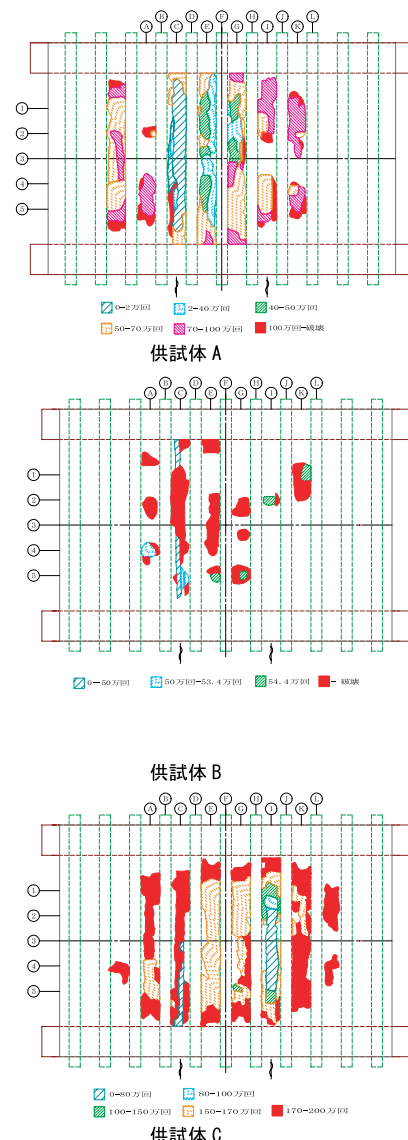


図-12 コンクリート-FRP底板間はく離図

め、疲労耐久性を大きく向上させることとなった。

図-12に、各供試体における床版下面のコンクリートとFRP底板のはく離状況を示す。

トラス鉄筋を配置した供試体A、Cでは、荷重を上げ、たわみの増加率が急変する回数から、すなわち供試体Aでは50万回後の176kN 載荷直後、供試体Cでは150万回後の196kN 載荷直後から急激にはく離範囲が広がることが確認された。これより、コンクリートとFRPのはく離により、たわみが急増したものと推察できる。ただし、このはく離は、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り、急激に進展するもので、増大した輪

荷重によって鋼管の断面変形が大きくなることに起因するはく離と推察でき、後で述べるFRP下面のひずみ分布が大きく乱れることでも説明できる。したがって、その時の荷重が、各供試体の限界荷重と考えられる。

(4) FRP 底板のひずみ分布

図-13に、床版中央F③点載荷時における橋軸方向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。

供試体Aでは、F③点に載荷しているにも関わらず、E④点のひずみが大きくなっている。これは、C③断面のL型

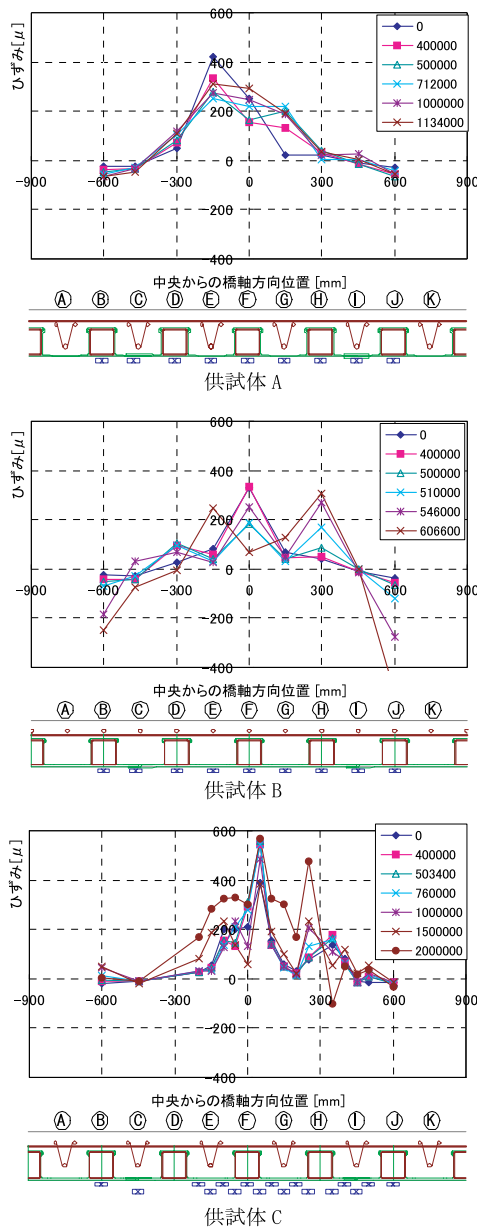


図-13 FRP 底板の橋軸方向ひずみ分布

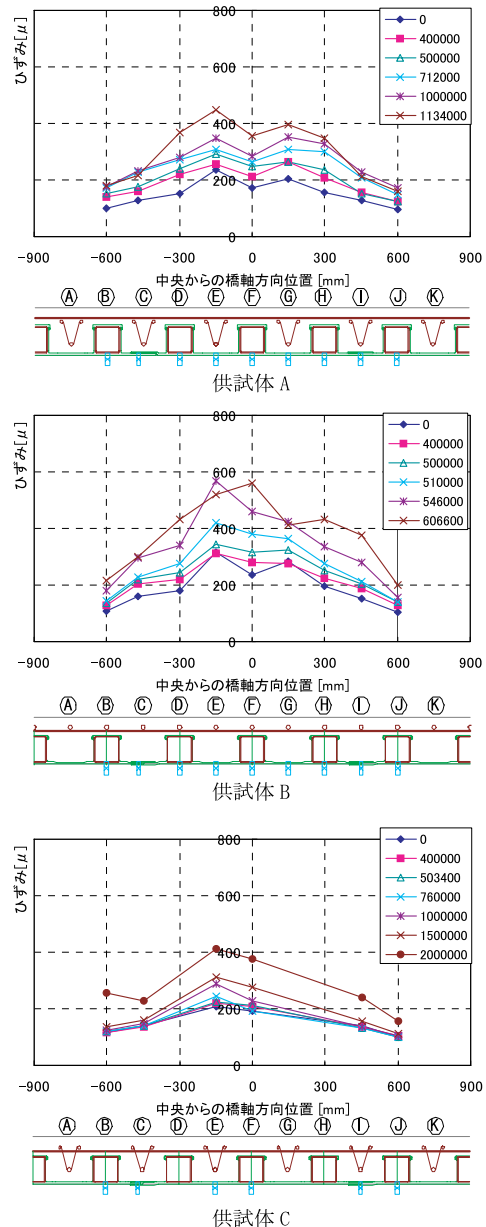


図-14 FRP 底板の橋軸直角方向ひずみ分布

継手部の剛性が低下したためと考えられる。

供試体Bのひずみ分布では、載荷とともに鋼管部のひずみが大きくなる傾向が見られる。これは、鋼管間のコンクリートの剛性が、鋼管部と比べ小さいことにより、鋼管部で荷重を負担する耐荷性状に移行していくためと考えられる。

供試体Cではひずみゲージを鋼管の腹板直下にも追加したため、ひずみ分布は前2体と違うように見える。しかし、150万回までは鋼管腹板直下で若干ひずみの乱れが見られるものの、くり返し回数の増加によるひずみ値の変化はほとんど見られず、150万回の載荷以降、荷重の増大に伴って④から⑩の間でひずみが急増する傾向が見られる。これは、この荷重以降、鋼管のせん断変形が大きくなり、コンクリートとはく離が進むとともに、FRP底板とコンクリートとはく離も急速に進展し、FRPの橋軸方向の荷重分担が増加するためと推察できる。加えて、鋼管上面に生じた水平ひび割れにより2層化し剛性が低下する。

図-14に、C点載荷時における橋軸直角方向ひずみの橋軸方向分布を示す。これより、全供試体ともに、載荷回数の増加に伴ってひずみも増加する傾向が見られる。橋軸方向ひずみは、載荷回数の増加に伴うひずみの増加がほとんど見られないことから、載荷回数の増加によってコンクリートのひび割れ、FRP底板からはく離が進展し、荷重を主に橋軸直角方向の断面で負担する異方性版へと徐々に移行していくものと推察できる。この橋軸直角方向のひずみ分布を3つの供試体と比較すると、供試体A、Cが供試体Bより、総じて少ない。これは、トラス鉄筋挿入によるコンクリートのひび割れ拘束による大きな剛性の保持によるものである。

(5) FRP継手部の耐久性

床版中のFRP継手部には、輪荷重の移動により変動応力が作用する。このため、載荷ブロック間隔(125mm)で静的荷重を移動させた時の、橋軸方向ひずみの影響線を用いて、FRP継手部に働く変動ひずみを調べた。なお、ひずみは、③と①の継手位置中央において、最も下側となる添接板の下面に、ひずみゲージを貼付することにより計測した。また、継手のない⑤と③断面においても母材のひずみを計測した。

各供試体における、FRP底面の橋軸方向ひずみの影響線を図-15に示す。なお、ひずみ値のプロットは、輪荷重走行前と損傷を受けた載荷終了時のものとしたが、

供試体Cでは、供試体A、Bの最終段階の荷重に対応する120万回載荷時のものとした。

供試体Aの0回載荷時において、③、⑤断面のひずみ値が、それぞれ200 μ 、400 μ と、他のものと比べ大きい傾向が見られる。これは、③断面のL型継手が局部的に変形するためであり、⑤断面でひずみ値が大きくなっているのも、この影響と考えられる。載荷終了時(113万回)の影響線では、断面③、⑤で、0回載荷時に比べひずみが大きくなるものの、⑤断面のひずみは0回載荷時とほとんど変化なく、床版が損傷を受けた場合でも、FRP底板に生じる最大ひずみはほとんど増加しないことがわかった。

一方、C型継手を用いた供試体B、Cにおける0回載荷時の最大ひずみは50から100 μ 程度であり、C型継手

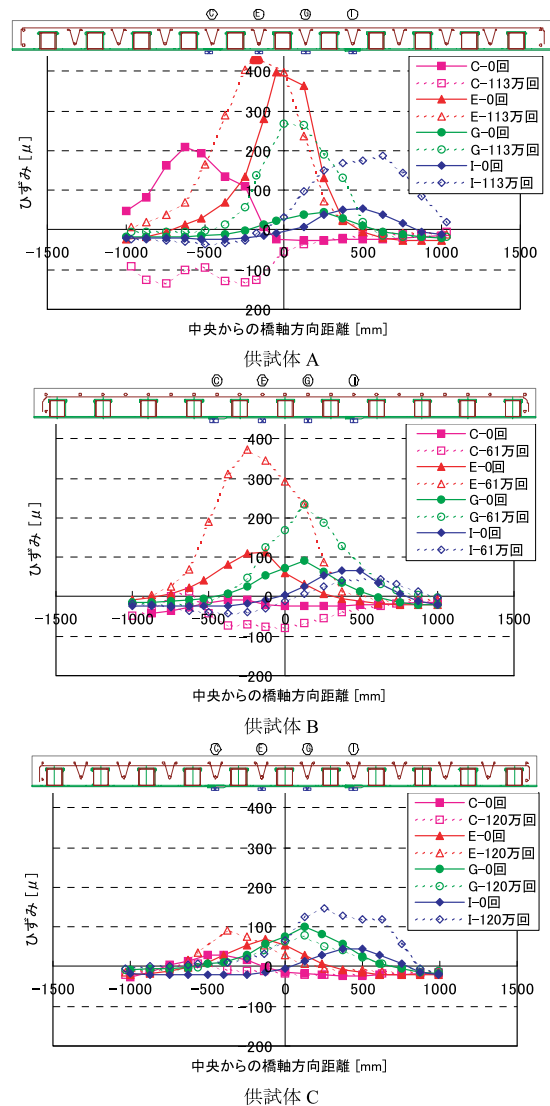


図-15 FRP底面の橋軸方向ひずみの影響線

を用いたことにより局所的な変形が生じず、継手部のひずみが小さく抑えられることがわかる。また、継手のない⑤、⑥断面と比べ、③、①断面のひずみが小さいのは、添接板により母材部より剛性が高くなっているためである。供試体Bにおける载荷終了時（61万回）の影響線では、⑤、⑥断面のひずみが0回载荷時よりも大きくなっている。これは、鋼管上端から生じたひび割れにより2層化することで、FRP部の負担が増加したためであり、床版が損傷を受けた場合でも継手に作用する最大ひずみは400 μ 程度となることがわかった。供試体Cのひずみは、150万回終了時もこの120万回時のひずみ分布とほとんど変化はなく非常に安定した構造となっていることが理解できる。ただし、最大ひずみは400 μ 程度になることを想定しておく必要がある。

そこで、このひずみ400 μ をFRP底板が負担する応力に換算すると7.5MPaとなる。この応力は、本床版の継手部の試験³⁾により求められた、C型継手の疲労限度(36.9MPa)と比べ、1/5程度となることから、床版中でFRP継手部分が疲労破壊することはないことが確認できた。

ただし、接着剤は水などの環境因子の影響による劣化も考えられることから、実際の設計にあたってはこれに対する安全率を設定するなどの配慮が必要である。

4. 耐久性評価

(1) S-N線による評価

一般に载荷荷重147kNにて80万回の走行は、実橋床版で50年の交通荷重に相当すると言われている⁸⁾。図-8より、供試体Aは137kNから176kNの载荷荷重で計100万回以上の輪荷重走行に耐えており、たわみの急増が見られた105万回を供試体Aの限界寿命と仮定する。これを、マイナーの累積被害則を用いて階段载荷の载荷回数を一定荷重147kNで载荷した場合に換算すると580万回となる。ただし、この換算に用いたS-N曲線における傾きの逆数の絶対値mは、RC床版から得られたせん断破壊に対する12.7を用いたものである。同様に、供試体Cにおける200万回の载荷を換算すると2950万回となる。したがって、トラス鉄筋を配置した供試体A、供試体Cは、それぞれ363年、1846年の交通荷重に対する疲労耐久性を有していると評価できる。

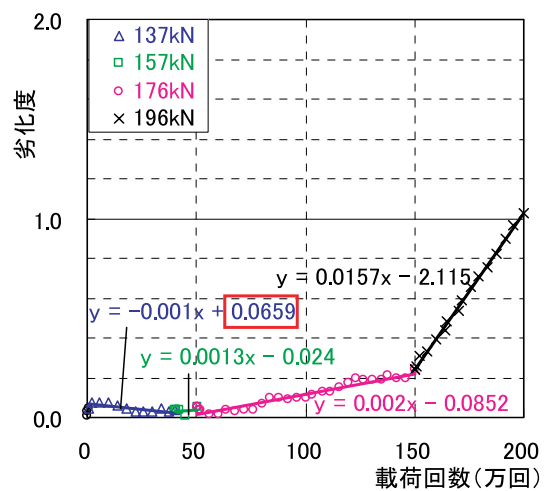
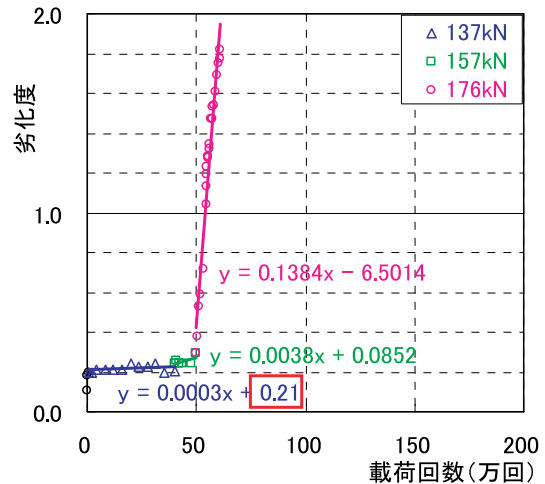
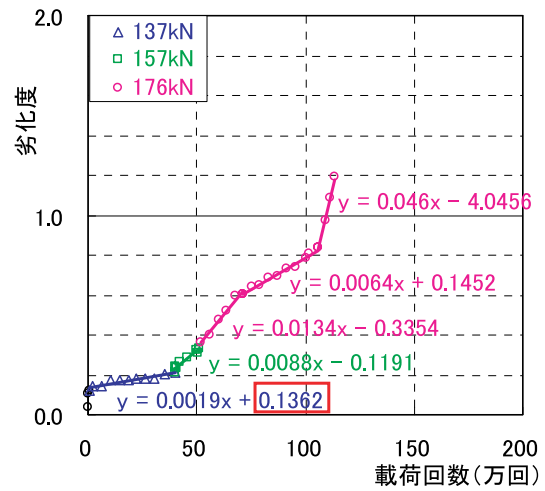


図-16 劣化度と载荷回数(万回)の関係

(2) 劣化度による評価

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し、それまでの荷重の走行回数によって評価するものがある⁹⁾。本床版においても、**図-8**の荷重回数とたわみの関係から、引張側コンクリートを無視した理論たわみは、破壊時の活荷重たわみより小さい値を示しており、これを使用限界として問題ないと言える。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式(1)により算出される値を劣化度とし、これが1.0に達するまでの走行回数を調べた。

$$D_S = (W - W_0) / (W_C - W_0) \quad (1)$$

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

輪荷重走行試験における各供試体の劣化度と荷重回数の関係を**図-16**に示す。図中には、各供試体の荷重階段毎の近似曲線も併記している。なお、初期ひび割れなどの発生により、1万回程度まで劣化度が急増することから、近似曲線算出にあたっては、1万回以降のものを用いて算出した。また、供試体Aでは、68万回と106万回で劣化度に変曲点が見られることから、この回数で分割して近似曲線を求めた。

いずれの供試体も137kNの荷重に対しては、劣化度の傾きは非常に緩やかであり、劣化の進展が遅いことがわかる。一般に一定荷重で実験した場合の劣化曲線は**図-17**に示すように、初期に急増し、その後線形的に劣化度が増大し、使用限界を超えた後、再度劣化度が急増して破壊に至る傾向を示すことがわかっている⁹⁾。しかし、本試験では、40万回以降、促進試験とするため、荷重を変化させていることから、一定荷重による回数に換算を行う必要がある。そこで、各荷重における劣化度の近似曲線の傾きを、荷重との関係としてプロットしたものが**図-18**である。これより、トラス鉄筋を配置した供試体A、Cでは176kNの荷重荷重までは、ほぼ線形的に増加しているものの、196kN荷重に対する劣化度の傾きは、それまでの傾向とは明らかに異なる結果となった。また、

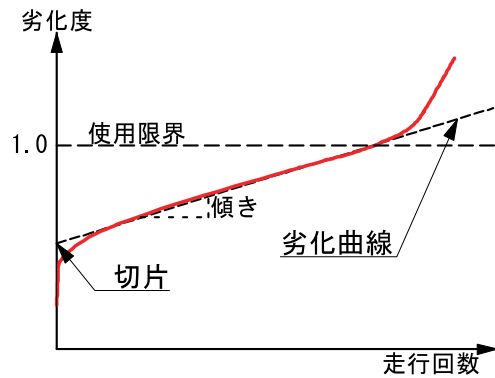


図-17 床版の劣化曲線

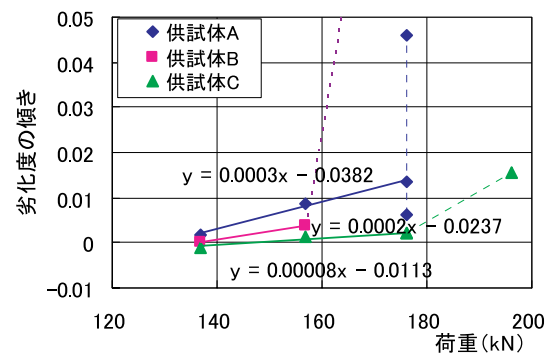


図-18 劣化度の傾きと荷重の関係

表-2 劣化曲線と使用限界

	劣化曲線[147kN]		使用限界	
	切片	傾き	回数[万回]	寿命[年]
供試体A	0.1362	0.00590	146	92
供試体B	0.2100	0.00570	139	87
供試体C	0.0659	0.00046	2031	1269

トラス鉄筋を配置していない供試体Bにおいては、176kNで同様の傾向が見られる。したがって、これらの荷重は各供試体の限界荷重を越える荷重と考えられることから、これらを除外することで、各供試体における劣化度の傾きの増加傾向を求めた。これより、各供試体の147kN荷重時における劣化曲線の傾きは**表-2**のとおりとなる。また、劣化曲線の切片の値は、荷重荷重に影響を受けないと考えられることから、初期荷重時の切片(初期の劣化度増加量)を用いるものとした。

これらの劣化曲線から、各供試体の劣化度が1となる使用限界回数、および、147kNで80万回の荷重が50年の交通荷重に相当することから求めた使用限界寿命を**表-2**に示す。これより、供試体A、Bにおいても、90年程度の耐久性を有するものの、継手構造を改良し、トラス鉄筋を配置した供試体Cでは、他の供試体と比べ大幅に疲労耐久性が向上することが確認された。

6. まとめ

打替え用の鋼・FRP複合永久型枠を用いた合成床版における輪荷重走行試験の結果から、以下の結論が得られる。

- 1) 本床版は、輪荷重の走行により、輪荷重直下部の上側配力鉄筋面で2層化する疲労劣化が進行するが、トラス鉄筋がそれを抑制するせん断補強効果をもたらす。
- 2) 輪荷重走行試験の結果より、トラス鉄筋を配置した本床版は、300年以上の交通荷重に対する疲労耐久性を有していることが確認できた。
- 3) 劣化度による使用限界に対する耐久性評価により、トラス鉄筋を省略しても90年程度の使用耐久性を有していると評価でき、トラス鉄筋を配置することで、大幅な耐久性の向上が図れることが確認された。

謝辞：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、新日石、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，能登宥愿，松井繁之，長尾千瑛，石崎茂，平山紀夫，宮永直弘，小牧秀之：鋼材とFRPのハイブリッド型枠を用いた合成床版の開発，第2回FRP橋梁に関するシンポジウム論文集，pp.81-84，2006.
- 2) 久保圭吾，河西達彦：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No.22，pp.5-14，2007.
- 3) 久保圭吾，河西達彦：鋼材とFRPのハイブリッド型枠を用いた合成床版のFRP継手の耐荷力と耐久性，宮地技報No.24，pp.7-16，2009.
- 4) 久保圭吾，長尾千瑛，石崎茂，松井繁之：鋼・FRP複合永久型枠を用いた合成床版の耐荷力と耐久性に関する実験的研究，土木学会論文集A，Vol.65，No.4，pp.932-948，2009.11.
- 5) 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，構造工学論文集，Vol.53A，pp.1032-1039，2007.
- 6) 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疲労耐久性，第五回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.303-308，2006.
- 7) 久保圭吾，長尾千瑛，石崎茂，松井繁之：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，構造工学論文集，Vol.54A，pp.902-909，2008.
- 8) 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.
- 9) 前田幸雄，松井繁之：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.

2010.3.23 受付