

## 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

### Structural Performances of Replacing FRP Composite Deck Using Permanent Form with Steel and FRP

長尾千瑛\*, 松井繁之\*\*, 石崎茂\*\*\*, 久保圭吾†, 小牧秀之††, 平山紀夫†††

Chiaki NAGAO, Shigeyuki MATSUI, Shigeru ISHIZAKI, Keigo KUBO, Hideyuki KOMAKI, Norio HIRAYAMA

\*大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 博士前期課程 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

\*\* 工博 大阪工業大学教授 (〒614-8289 京都府八幡市美濃山一ノ谷4)

\*\*\* 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)

† (株)宮地鐵工所 設計部設計グループ (〒290-8580 千葉県市原市八幡海岸通3)

†† 新日本石油(株) FC・新商品事業本部 (〒105-8412 東京都港区西新橋1-3-12)

††† 工博 日東紡績(株) 生産本部FRP開発グループ (〒963-8061 福島県郡山市富久山町福原字塩島1)

A steel-FRP-concrete composite deck was developed for replacement of deteriorated slab. The slab is composed of a FRP permanent form installed with steel pipes which can strengthen and lighten the RC deck subjected to fatigue loading or corrosion. Durability of a model deck containing two types of joint was tested with the wheel running machine. In the paper, the load bearing characteristics of each section was observed by monitoring strain distributions. It can be concluded to have enough fatigue durability that the deck must be reinforced for shearing strength the slab is not divided into two layers of the upper RC part above steel tubes and the lower part. Also joints of the bottom plate were examined not to be critical to the deck failure due to omission of the lower distribution reinforcements. It was confirmed the double splice joint has enough function as a FRP panel joint structure.

*Key Words: FRP Composite deck, durability, wheel load running test, FRP joint*

キーワード: FRP合成床版, 疲労強度, 輪荷重走行試験, FRP継手

### 1. はじめに

これまでの約30年間、日本では、高度経済成長期に建設された橋梁の多くで、交通量や交通荷重の増大に伴い、RC床版の損傷が多数発生し、補修や補強対策が施されてきた。しかし、近年、補修・補強を行った床版においても損傷が顕在化してきており、床版の打替えを余儀なくされる事例が増加しつつある。また、平成5年に設計活荷重が25tに改訂され、これ以前に建設された橋梁におけるこの活荷重への対応も要求されており、床版の打替えが増加する傾向にある。なお、床版の打替えに際しては、既設桁の補強を最小限とするため、既設床版より軽量で、耐荷力・耐久性の優れた床版が求められる。また、海岸部や融雪剤を散布する積雪地域の道路橋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望まれている。

このような要求に応えられる床版の一つとして、床版

死荷重を軽減でき、高耐荷力・高耐久性を有し、さらに、耐候性の高いGFRP引抜材を用いたFRP合成床版が開発され、既に実用化されている<sup>1)</sup>。

しかし、このFRP合成床版を既設床版の打替えに使用した場合、引抜成形材の製作上、断面形状に自由度が少なく、既設床版や桁のずれ止めとの取り合いが問題となってくる。このため、従来のFRP合成床版より自由度をもった断面形状を決定・成形でき、更なる軽量化が可能な打替え用FRP合成床版を開発した。図-1に本床版の概

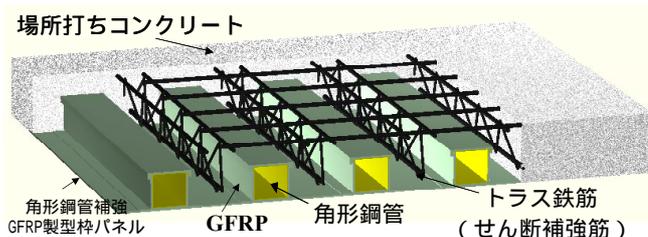


図-1 打替え用FRP合成床版

念図を示す。

型枠パネルは、GFRP底板内に角形鋼管を組み込んだ構造としており、GFRPの耐食性、角形鋼管の高剛性を同時に利用したものである。また、角形鋼管上部に突起を設け、型枠パネルのコンクリート拘束効果により、RCとの一体化を図っている。成形には鋼とGFRPを一体化できるインフュージョン成形法を用いた。インフュージョン成形法は、上型の代わりにフィルムを用いて型を密閉し、真空圧にて樹脂を基材に充填・含浸させる閉塞型成形法であり、主に大型構造物を製作する手段として用いられているものである。

本床版では、構成材料の特性がそれぞれ異なり、応力伝達機構が複雑となるため、現在までに、FRPのコンクリート接着面の表面処理の効果、床版支間方向の梁とし

ての静的基本強度について研究されてきた<sup>2)</sup>。

ただし、本床版は、剛性の高い角形鋼管を橋軸直角方向に配置し、橋軸方向には、下側配力鉄筋を省略し、FRP底板で荷重伝達する構造としたため、橋軸方向と橋軸直角方向で剛性が異なる直交異方性版として挙動するものと考えられる。また、橋軸方向にはFRPパネルの製作・施工上の制約から継手を有しており、この部分の強度が床版全体の耐力や耐久性に与える影響が大きいと考えられる。

そこで、本研究では、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、床版全体の耐荷性状を把握するため、実橋の輪荷重走行を模した載荷が可能であ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。以下にこの実験結果について報告する。

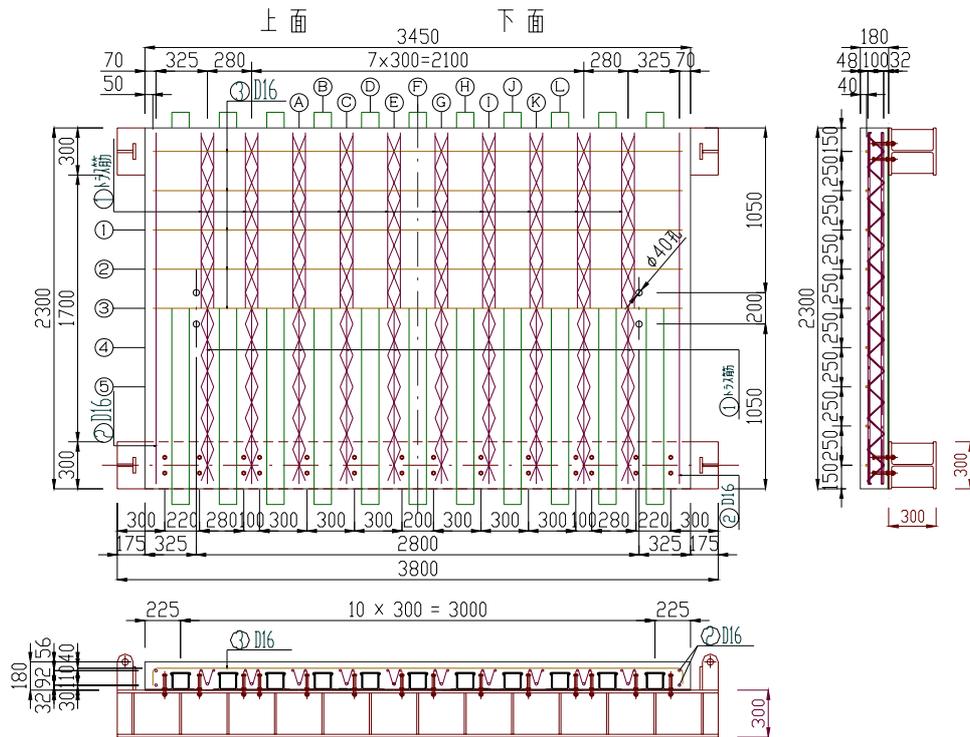


図-2 輪荷重走行試験試験体

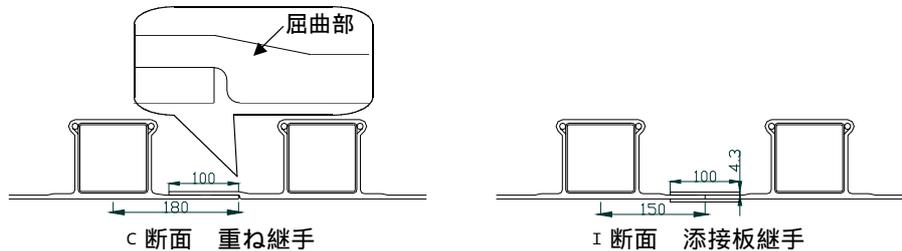


図-3 継手形状

表-1 試験体構成材料の特性値

コンクリート圧縮強度 [MPa]	30.2
GFRP引張強度 [MPa]	248
鋼管引張強度 [MPa]	420
異形鉄筋SD295 D16 引張強度 [MPa]	502
重ね継手引張強度 [MPa]	131
添接板継手引張強度 [MPa]	164

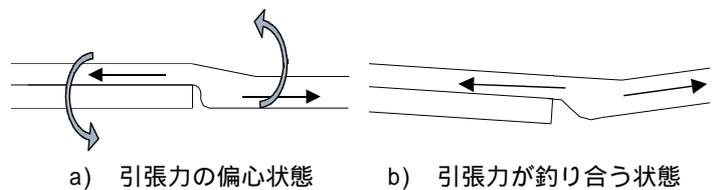


図-4 重ね継手の屈曲部変形模式図

## 2. 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。図-2に本試験に用いた供試体の形状寸法を示す。なお、図中の丸囲みアルファベット A ~ L 及び丸数字 ~ 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。なお、供試体内には、継手形状の違いによる劣化挙動の比較を行うため、型枠パネルの2ヶ所（C断面・I断面）に形状の異なる2種類の継手を設けた。図-3に適用した継手形状と重ね継手の屈曲部位置を示す。図-4には後述の重ね継手屈曲部を変形させる力の模式図を示している。本試験での供試体構成材料の特性値及び継手部の基本強度は表-1のとおりである。添接板継手の添接板には母材と同強度のものをを用いている。

荷重方法は、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の荷重面積をもつ鋼ブロックを敷き並べた軌道にて荷重し、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。床版の性状変化を定量化するために、所定の走行回数毎に床版中央のF点に静的荷重することで、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パネルの剥離状況も調査した。また、特定の荷重回数では、荷重履歴による構造系の変化（異方性化）を調べるために、L点側からA点側に、125mmピッチで荷重を移動させ、静的荷重することによって影響線を求めた。

## 3. 試験結果

### 3.1 たわみ

荷重荷重プログラムと床版中央F点における荷重回数 - たわみ曲線を図-5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。

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。その後、促進試験とするため157kNで10万回、それ以降は176kNで試験を行っ

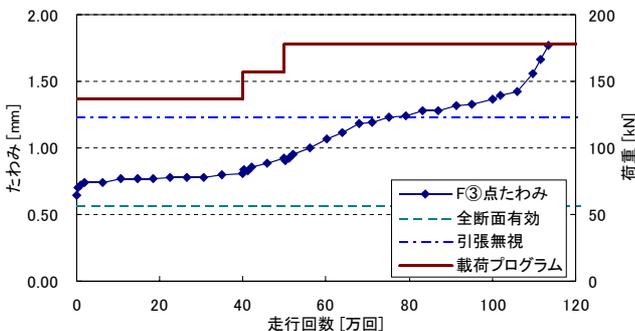


図-5 F点における荷重回数 - たわみ曲線

た。その結果、110万回程度からたわみの増加が見られたため、113.4万回で試験を終了した。一般に荷重荷重147kNにて80万回の走行に耐えうるRC床版は実橋で50年以上使用可能な疲労耐久性を有していると言われている<sup>3)</sup>。本床版は137kNから176kNの荷重荷重で計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る前の105万回までを使用限界と仮定し、マイナーの累積被害則を用いて荷重荷重の違いによる繰返し回数を換算すると、これは147kNにおける611万回の走行に耐えているのと同様である。これより、本床版は実橋床版として使用できる疲労耐久性を有していることが確認された。

### 3.2 ひび割れ・剥離状況

図-6に床版上面のひび割れ状況、図-7に床版下面剥離状況を示す。同時に、試験終了後の切断面C、I、断面のひび割れ状況も併記している。

図-6の床版側面のひび割れは、50万回走行を超えてから、橋軸方向中央部の角形鋼管突起部付近よりひび割れが発生し、これが100万回までに床版上面まで徐々に伸展した。荷重軌道下及びその近傍上面のひび割れは、100万回走行直後に軌道ブロックをはずし、コンクリート上面を観察した際は観察されなかったことから、100万回以降に生じたものと推察できる。これはたわみの急増が見られた荷重回数と一致しており、荷重ブロック端に沿った押し抜きせん断破壊を呈したことを示している。

図-7のコンクリート - FRP底板間の剥離状況より、C断面の重ね継手部には、早期からコンクリート - FRP継手間の剥離が観察されていることがわかる。これは、重ね継手は、一方のGFRP底板が曲げ上げられており、図-4に示すような力が働くことによって屈曲部が伸ばされ、早期剥離の原因になったと思われる。ただし、継手間接着面の剥離発生時期については下面からの打音検査では判定が困難であった。一方、I断面の添接板継手部では、継手部以外の一般部とほぼ同じ時期に剥離した。また、試験終了後に床版をカットし断面を観察したが、I断面の添接板継手における添接板と母材間の接着切れはなかった。

コンクリートと型枠パネルの剥離はC断面を除いて50万回までは主に橋軸方向中央E、G断面付近で発生していたが、荷重を176kNに上げた後の50万回以降徐々に、橋軸方向外側へと広がっている。一方、橋軸直角方向の分布では、支間中央の荷重板直下の剥離は少なく、荷重板端部付近から剥離する傾向が伺える。なお、図-5に示す床版中央での活荷重たわみが、50~70万回で増加率が大きくなる傾向となるのは、この間でコンクリートとFRP底板の剥離がC、E、G断面のほぼ全面に進展したことから、角形鋼管の突起部から以下に示す水平ひび割れが形成されたことによると考えられる。ただし、本試験では、床版端部において型枠パネルとコンクリートのずれも計測していたが、最終状態においても0.05~0.17mm程度の

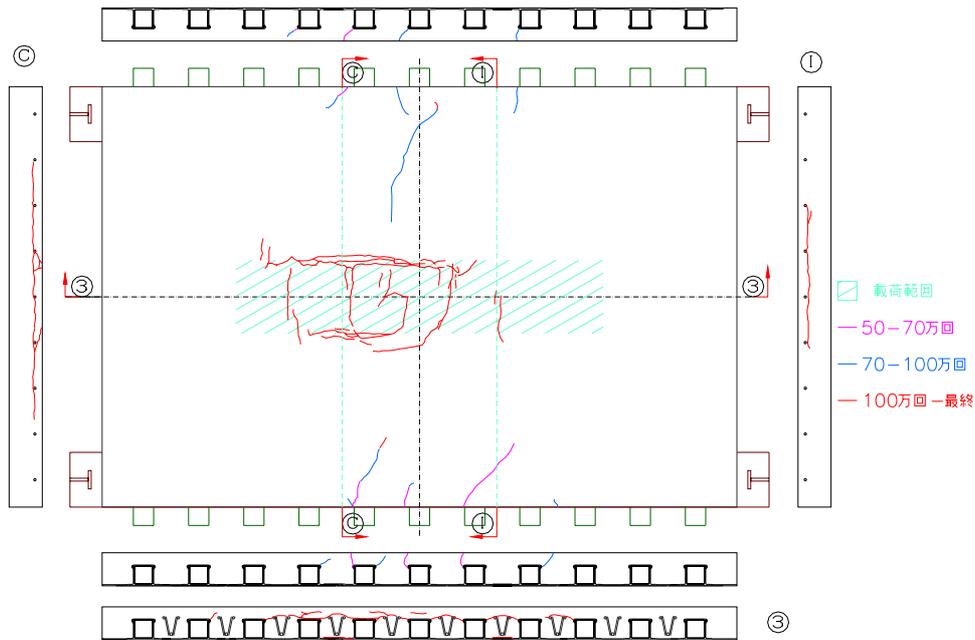


図-6 ひび割れ図

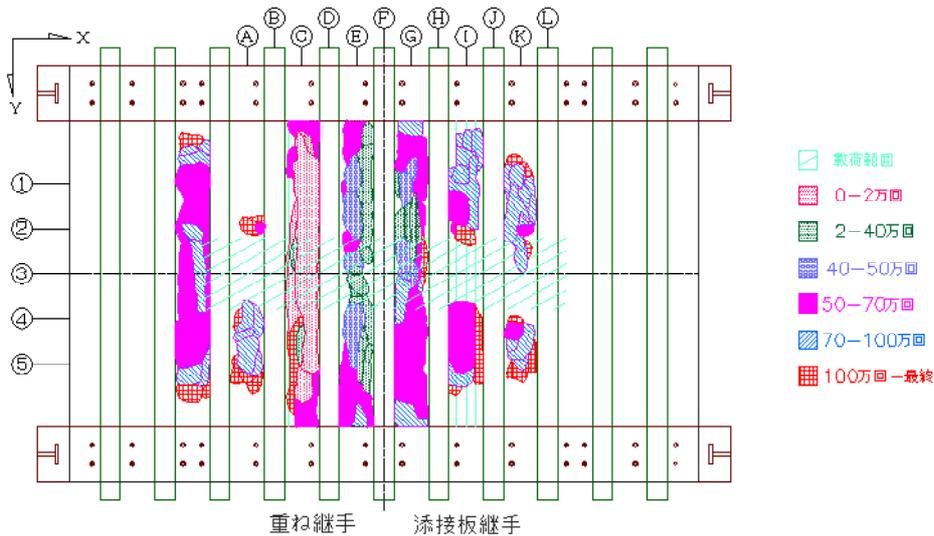


図-7 コンクリート - FRP底板間剥離図

測定値であったことから、水平ひび割れ面の形成は軌道直下のみであり、このひび割れと剥離によるずれは殆ど生じないことが分かった。

試験終了後の切断面である床版中央断面を見ると、角形鋼管上部のFRP突起部から上側配力筋を結ぶアーチ状のひび割れが生じており、橋軸直角方向断面c、Iでは、上側主鉄筋に沿った水平ひび割れが生じている。このことから、このひび割れにより上側鉄筋より上のコンクリート部分が分離し、重ね梁化したものと推定できる。また、c断面では、載荷板の端部からせん断力による斜めひび割れが見られるが、このひび割れは上側主鉄筋に到達するとそれより下方には進展せず、上側鉄筋に沿ったひび割れとなっている。これは、本床版の下側部分にせん断剛性の高い角形鋼管やトラス鉄筋を有しているた

め、この部分にせん断ひび割れが進展しなくなったと説明できる。ただし、上側鉄筋に沿ったひび割れにより重ね梁化しても、ひび割れ面より下側の断面で荷重をある程度支持できることから、RC床版のような急激な破壊は生じず、余剰耐力が期待できることがわかった。

### 3.3 たわみ分布

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と、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図-8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が、これは、横桁と型枠パネルの間に隙間が生じていたためと考えられる。

この端部におけるたわみを除外すると、全断面有効の

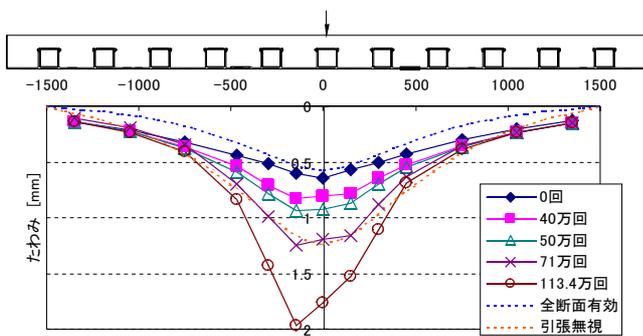


図-8 たわみの橋軸方向分布

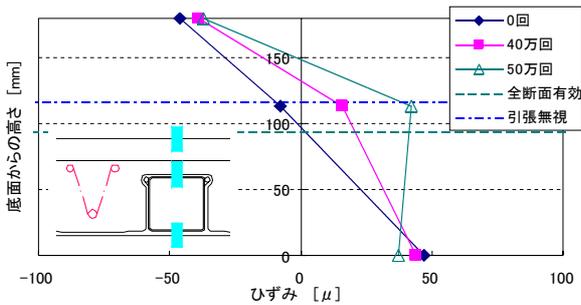


図-9 床版断面内橋軸直角方向のひずみ分布

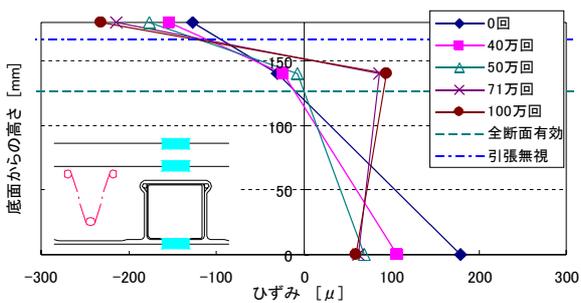


図-10 床版断面内橋軸方向のひずみ分布

理論値は、走行開始前のたわみ値及び分布形状とほぼ一致する。また、70万回載荷後のたわみは、引張側コンクリートを無視した計算値と同程度に増大している。これらより、本床版のたわみ性状は、輪荷重の繰返し載荷後によりコンクリートの全断面を有効とした剛性から、床版の使用限界と考えられる引張側コンクリートを無視した剛性へと移行していくが、設計荷重の1.3倍の荷重による促進試験でも、その移行速度は緩慢であり、実用上問題のない耐久性を有していると言える。

なお、実験値では載荷回数の増加とともにE点のたわみが大きくなっているが、これは、C断面の継手部の剛性が低下したことに起因するものと考えられる。

### 3.4 ひずみ分布

図-9に、床版中央F位置載荷時の、F位置における橋軸直角方向の断面内ひずみ分布を、図-10に、F位置における橋軸方向の断面内ひずみ分布を示す。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計算値も併記している。

図-9より、載荷初期段階においては、平面保持が成り

立っており、中立軸の位置もほぼ全断面有効の計算値と一致しているが、載荷繰返し回数が増加するにしたがって、鋼管上側のコンクリートが圧縮力を負担し、鋼管が引張力を負担する不完全合成の耐荷機構へ移行していくものと考えられる。

図-10において、載荷初期段階の中立軸は、全断面有効と仮定した中立軸の位置に比べて、若干低い位置にある。これは、計算に用いた中立軸が、後述5.に示す梁による曲げ試験より求めた値であり、このときの試験体幅が小さかったため、床版内の実際の曲げ挙動と異なることに起因するものと思われる。一方、引張側コンクリート無視の中立軸は断面計算により求めているが、実際には、突起付きの鋼管が、鋼管間のコンクリートを拘束する効果により、鋼管間コンクリートの剛性が寄与しているため計算値より低い位置にあるものと考えられる。なお、橋軸方向のGFRP底板のひずみが、載荷と共に小さくなっているのは、FRPとコンクリート間の剥離とコンクリートの曲げひび割れ発生に伴う直交異方性度が大きくなったためである。70万回以降、上側鉄筋のひずみが引張となっているのは、重ね梁化の影響と考えられる。

実際の耐荷断面の移り変わりについて、以下で推測することとした。

## 4. 耐荷断面と耐荷性状

図-11に各載荷回数の床版中央F位置におけるひずみの影響線を示す。ひずみ測定部位は、配力鉄筋(RX)、GFRP底板の橋軸方向(GX)、GFRP底板の橋軸直角方向(GY)、鋼管上面GFRP(PY)であり、載荷荷重を137kNに換算した場合のひずみを示している。

角形鋼管を含む断面Fでは、載荷回数の増加と共に、橋軸方向ひずみ(GX)が減少し、橋軸直角方向ひずみ(GY, PY)が増加する傾向がある。これは、橋軸方向断面の荷重負担が減少し、その分を橋軸直角方向断面で補う構造系に変化していることを意味しており、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と推察できる。

鋼管周りのFRP鉛直面において曲げモーメントによってコンクリートとの付着が切れることで、角形鋼管の剛性が大きい主鉄筋方向と橋軸方向のそれぞれの有効断面の剛性比が大きくなる直交異方性版になる。さらに、せん断力と引張主応力を組み合わせた繰返し載荷によって鋼管上側突起部よりアーチ状ひび割れが発生する。その後、鋼管上側のコンクリート-型枠パネル間付着が切れることで、局所的(輪荷重走行範囲)な上側コンクリート部と型枠パネルを含む下側部分の重ね梁となり、上部のコンクリート部分の中立軸回りで分担モーメントが作用し、このために上側配力鉄筋に引張ひずみが生じる結果となる。図-11(RX)から、50万回程度にてF位置の上側鉄筋に引張ひずみが出ており、このとき、図-7にお

いて F 断面両隣のコンクリート部分 E G に剥離がみられることから、F 断面角形鋼管上においてコンクリート - 型枠パネル間剥離が生じたのではないかと考えられる。大きな付着切れではないため、少々のたわみ増加にとどまっている。F 点以外に、ひずみゲージを貼付した B, D, H, J 点についても、40~60万回程度にてよく似た荷重分担機構の変化が見られた。40~60万回では載荷荷重の増加により、上記のひび割れ伸展に伴い重ね梁化しつつある。しかし、図-5を見ると、70万回程度でたわみの増加が緩慢になることから、70万回で一旦コンクリート -

型枠パネル間の重ね梁化の進行が停滞したと考えられる。

その後、100万回に達すると上側コンクリート部分と角形鋼管を含む下側コンクリート部のひび割れによって合成效果が低下し、角形鋼管の分担せん断力が増加したため、局所的にせん断変形を生じることが確認された。コンクリート部分に載荷した際に配力鉄筋の負担が大きくなると考えられる。

一方、鋼管間コンクリート断面である G 位置でも同様に、鋼管間コンクリート部に載荷した際のGFRP底板橋軸直角方向 (GY), 下側主鉄筋 (TDY) の引張りひずみは漸増していた。ここで、GFRP底板橋軸方向ひずみ (GX) は、その直上、鋼管間コンクリート部に載荷したときに、鋼管上部に載荷したときと比べて引張りひずみが小さくなる傾向があった。これは、角形鋼管のウェブ上に荷重が流れ、中間部のFRPの曲げモーメントが減少したと考えられる。60万回を超えた頃より、コンクリート部分と角形鋼管の合成效果がさらに低下したため、このような傾向は薄れた。

以上のことから、載荷回数の増加に伴い、鋼管側面とコンクリート間剥離に伴い、橋軸方向断面の剛性が低下し、橋軸直角方向断面の負担が増加する。また、40~60万回程度で水平ひび割れによる重ね梁化が進行し、たわみが増加していった。70万回程度でたわみの増加が一旦緩慢となるが、角形鋼管間コンクリート部分の耐力による剛性の回復と思われる。しかし、すぐに上側コンクリート部のせん断破壊が進みたわみは急増し、使用限界を超えたと考え試験を終了した。よって、105万回時で疲労破壊したと考えるのがよい。

## 5. FRP継手形状の比較

前節3.2に述べたように、床版実験では重ね継手部におけるFRP板の局部曲げによる局所剥離が発生し、上部コンクリートの押し抜きせん断破壊的な局所破壊が生じた。一方、添接板方式の継手部は実験終了時まで損傷はなく、コンクリートとの合成效果を持続していた。

また、図-11において、GFRP底板の橋軸方向ひずみ (GX) の分布形状は、載荷回数の増加と共に I 側に偏った分布となっている。これは、I 継手部は健全であり、I 側に載荷した際に中央部 F 点のGFRP底板も荷重を分担しているが、C 継手部ではひび割れが生じ、荷重伝達が不完全となっているためと考えられる。また、GFRP底板の橋軸直角方向ひずみ (GY) は、C 継手部の中央側が大きくなる傾向が伺える。これは、橋軸方向の荷重伝達が不完全となった分を、橋軸直角方向で負担しているためと考えられる。

そこで、FRPの継手形状の違いが床版耐力力に与える影響をより詳細に比較するため、本床版の橋軸方向に取り出した梁要素試験体を作成し、静的4点曲げ試験を行

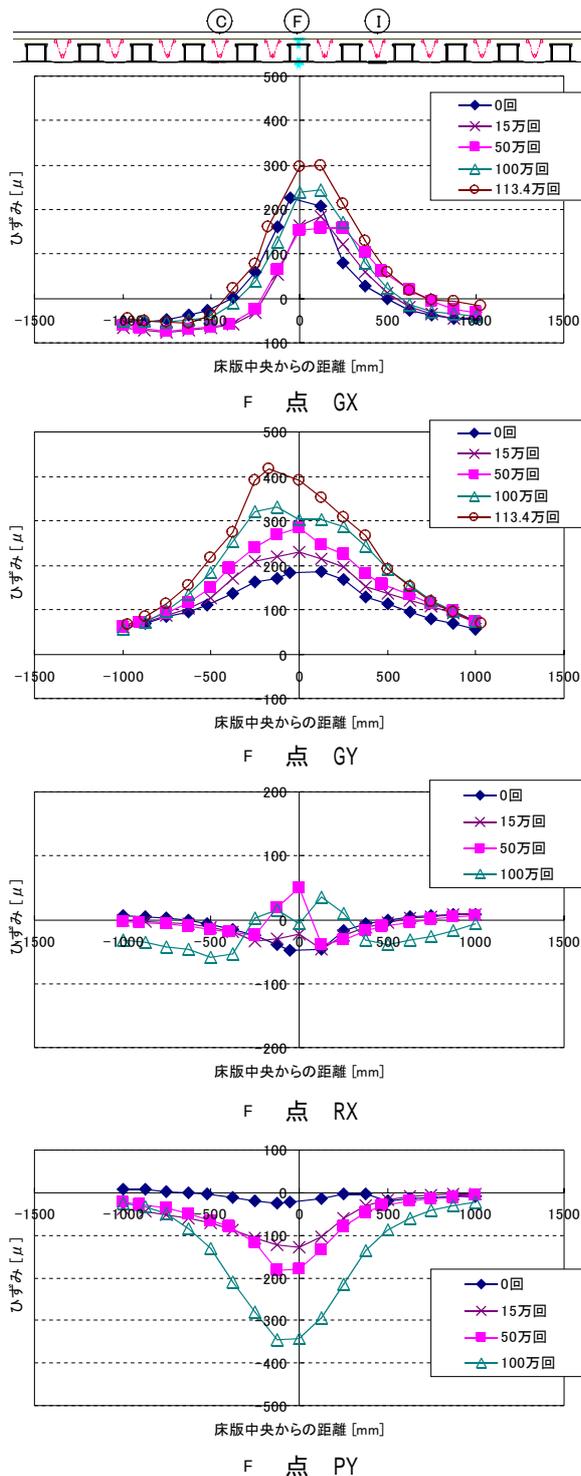


図-11 ひずみの影響線

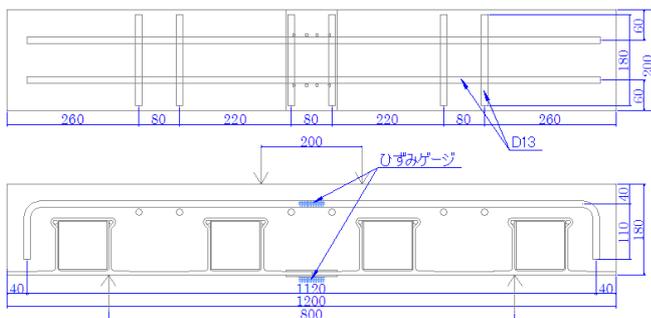


図-12 試験体図（添接板継手供試体）

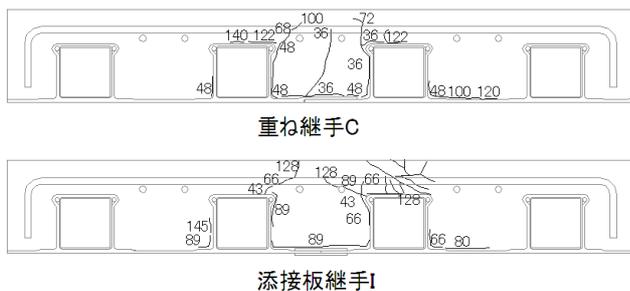


図-13 ひび割れ状況

った。

試験体は幅200mm、支間800mmとし、支間中央から両側100mmの位置に線載荷した。図-12に試験体の寸法を示す。ただし、本試験では、供試体幅が狭い梁を単純支持として載荷した。

本試験による、供試体側面のひび割れ状況を図-13に、試験結果の荷重 - たわみ関係、荷重 - ひずみ関係を図-14、図-15に示す。なお、たわみは、試験体中央部のコンクリート上側での値であり、ひずみは試験体中央部GFRP底板（GX）、及び配力鉄筋（RX）での値である。

図-14より、重ね継手（継手C）供試体では、床版中央でのたわみ値が、載荷荷重40kN程度まで、弾性域にあったと考えられ、この荷重 - たわみ関係を用いて、前節3.におけるたわみの計算を行うための全断面有効の場合の橋軸方向剛性を算出した。しかし、荷重40kN付近でたわみが急増し、線形性が失われている。これは、36kNにて継手部及び鋼管外側FRP側面で鉛直方向のひび割れが発生したことに起因するものと考えられる。供試体長手方向の引張側ではFRPのみが抵抗するため、大きな引張力によって、重ね継手のFRP屈曲部が引き伸ばされ、コンクリートとの付着切れが発生した。このときのGFRP底板のひずみ（GX）は、大幅に増加して応力伝達していることからFRP継手の接着は切れておらず、コンクリートとFRP底板間で剥離した。その後、60kN付近から、GFRP底板のひずみは徐々に小さくなっていく。この現象は、重ね継手のFRP接着面における剥離ではなく、FRP屈曲部の伸びによって局部曲げモーメント（図-4）が作用し、継手直線側には圧縮力が追加されたことによると考えられる。載荷荷重が上がるにつれてひずみが減少している

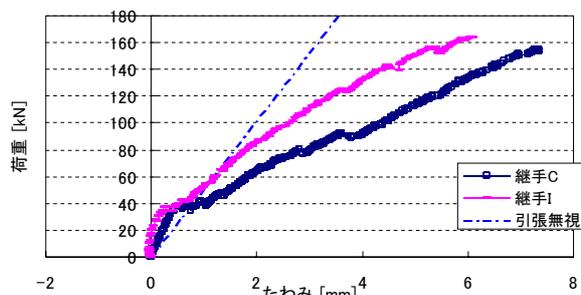


図-14 荷重 - たわみ関係

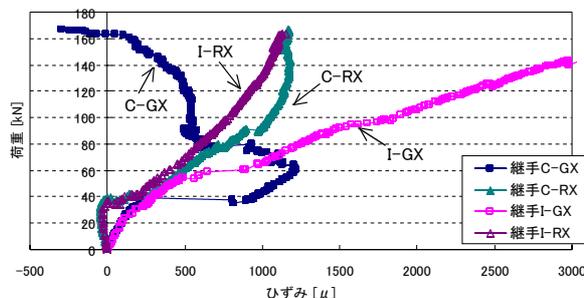


図-15 荷重 - ひずみ関係



図-16 継手C破壊図

にもかかわらず、荷重は順調に載荷できているのは、FRP継手部が接着剤界面で滑るような破壊をしていないためである。なお、鉄筋ひずみからは、荷重40kN以降、上側鉄筋が急激に引張力を負担するようになっていくことが分かる。これは、この時点で継手部剛性が低下し、ひび割れが圧縮側の配力筋にまで到達していることから、耐荷断面が配力筋とその上側コンクリートのみとなる。ただし、未剥離部のFRP底板はまだ引張力の一部を分担している。梁の曲げ破壊時の重ね継手の様子を図-16に示す。重ね継手の屈曲部が直線上に伸びることによって、たわみ変形が大きくなり、曲げ破壊に至った。

添接板継手（継手I）試験体においても、継手C試験体と同様の40kNで傾きが変化し、図-15に見られるように圧縮鉄筋（RX）が引張力を負担する機構へと耐荷機構が変化する。これは、角形鋼管突起部からの、ひび割れ発生によるものと推定できる。また、GFRP底板ひずみ（GX）は、60kNと90kN付近で急増しているが、これは、ひび割れ図から判断して、それぞれ、鋼管外側面のFRPとコンクリートの剥離によると考えられる。その後、鋼管突起部から発生したアーチ状のひび割れは主鉄筋位置で止まる。重ね継手に比較して剥離の開口量はかなり少なかった。そして、継手部の破壊は全く発生しなかった。

重ね継手 c 及び添接板継手 E を比較すると、通常、床版に作用する荷重程度の低い応力下での耐荷性状ではほぼ同等の性能を示す。しかし、本試験結果から類推すると重ね継手 c は継手剛性が局所的に低いため、通常、床版に作用する荷重下でもコンクリートのひび割れの発生・進展を助長することが懸念される。一方、添接板継手を採用した E は継手部の耐久性が高く、床版全体の疲労耐久性に悪影響を及ぼすこともなく良好な継手性状を示した。

この継手試験体に関して、疲労試験も計画・実施している。成果を得て、別の機会に報告したい。

## 6. まとめ

本研究の実験結果から以下の点が明らかになった。輪荷重走行試験の結果より、本床版が、実橋床版として使用できる疲労耐久性を有していることが確認できた。

本床版は、疲労損傷に伴い、異方性度が大きくなる。このため、橋軸方向の曲げによる引張力はFRP底板で十分抵抗できる。

重ね継手は、輪荷重の繰返し载荷により、FRPパネルとコンクリート間の剥離を誘発し、橋軸方向の応力伝達機能が低下するが、添接板継手は破壊時まで版としての連続性を確保できることが確認された。

継手試験からも添接板方式継手の有効性が検証できた。

## 参考文献

- 1) 望月秀次, 花田克彦, 石崎茂, 久保圭吾, 松井繁之: FRP合成床版の実橋への適用例と疲労耐久性評価, 土木学会第1回FRP橋梁に関するシンポジウム, p65-72
- 2) 久保圭吾, 松井繁之, 石崎茂: 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, p81-84
- 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 1991年, p432-440
- 4) 松井繁之, 石崎茂, 久保圭吾: 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, 構造工学論文集 Vol.40A 1994年3月, p1413-1424

(2006年9月11日受付)