

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

Durability of Replacing FRP Composite Deck Using a 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 大阪大学大学院教授 工学研究科地球総合工学専攻 (〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

*** 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 FRP-RC composite deck using FRP-permanent form consisting of steel square pipe core wrapped with GFRP was developed for replacement with the intention of both the reduction of self-weight and the strengthening of flexural rigidity. In the deck, the lower distribution reinforcement is also omitted to facilitate the field construction. However, the continuity of the direction perpendicular to the deck span should be maintained appropriately at the joint of bottom FRP plate. Therefore, a series of static and fatigue loading tests of the joints were carried out to obtain the tensile strengths of various types of joint. Moreover, wheel running test for the full-size model deck with two types of joint was carried out. From the results obtained by the static and fatigue tests, the strength of FRP joint and the load carrying mechanism of the deck are clarified, and it was confirmed that the new deck has a sufficient durability as an actual bridge deck.

Key Words: FRP-RC composite decks, durability, running wheel test

1. はじめに

近年の交通量の増加と交通荷重の増大により既設橋梁の RC 床版は劣化・損傷を受け、補強や打替えを余儀なくされる事例が増加している。また、海岸部や融雪材を散布する積雪部の道路橋床版では、塩害による劣化が問題となっている。

このような床版の打替えでは、既設桁の補強を最小限とするため、既設床版より軽量で、耐久性が高い床版が求められる。このような要求に応えられる床版の一つとして、単位重量あたりの耐荷力が高く耐食性の高い FRP 引抜材を用いた合成床版が開発され、既に実用化されている¹⁾。

しかし、この FRP 合成床版を既設床版の部分的な打替え床版として使用する場合、既設床版との取り合いが問題となってくる。このため、従来の FRP 合成床版より断面形状にある程度の自由度があり、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 に本床版の概念図を示す。型枠パネルは中空角形鋼管を GFRP で覆い、GFRP 底板の底面に CFRP を配置することで、高強度の実現と軽量化を図っている。角形鋼管を橋軸直角方向に配置するため主桁直角方向の剛性が卓越した直交異方性版となる。この角形鋼管方向で主に荷重を分担することが期待できるため、引張側配力筋が省略できる。

FRP 底板にわずかに引張力を負担させるための応力伝達能力があればよいと考えるものである。

本床版は鋼と GFRP, CFRP, 及び鉄筋コンクリートから成り、それぞれの材料特性が異なるため、応力伝達機構も複雑となる。このため、現在までに床版支間方向の梁供試体による静的載荷試験を実施し、曲げ・せん断に対する構造特性と静的基本強度を確認している²⁾。

版作用に対しては、角形鋼管の剛性が大きく、異方性が強くなるため、橋軸方向の荷重分担は少なくなると考えられるが、FRP パネルは連続させているため、橋軸方向もある程度の荷重を分担する。したがって、FRP 型枠パネルの継手部に作用する力に対して、耐荷力、耐久性を検証しておく必要がある。

そこで、本研究では、このパネル継手の耐荷力、疲労

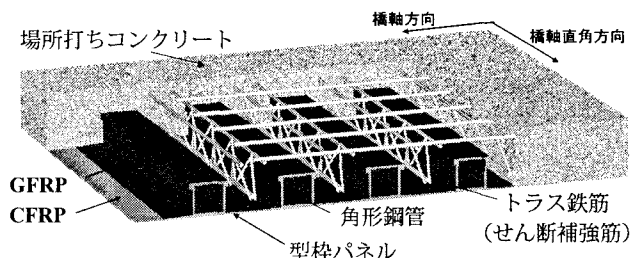


図-1 FRP 打替え床版

耐久性を確認するため、FRP 継手部の静的載荷試験及び疲労試験を実施した。さらに継手試験に加え、実床版としての疲労耐久性を確認するため、輪荷重走行試験を実施した。以下にこれらの実験結果について報告する。

2. 継手部の耐荷力と耐久性

(1) 静的引張試験

本試験における継手構造の試験体形状を図-2 に、仕様と破壊荷重を表-1 に示す。なお、比較のため継手を有しない母材のみの供試体 (M) の試験も行った。なお、供試体 (L1) は従来の FRP 合成床版の継手構造である。従来構造では、FRP パネルに異方性の大きい引抜成形材を用いており、継手方向が弱軸方向となるため、設計上、FRP 継手に強度を期待していない。静的引張試験の結果、この継手は接着面が母材と偏心しており、ハトメ (リベット) が中央に一本の構造であるため、載荷時に偏心曲げの影響を受け、低い破壊荷重で接着面が剥がれる結果となった。また、カーボン繊維への樹脂の未含浸の影響も見られたため、床版構造は、床版底面に CFRP を配置しない構造とし、継手構造は偏心曲げの影響を受けにくい構造に改善した。従って、L1 以外の試験体は全て GFRP のみで形成されている。

この結果、重ね継手長を長くした L4 は、L1 と比べ破壊荷重が大きく向上している。一方、母材の偏心がない添接板形式の継手では、いずれも L1 より破壊荷重が向上し、T42 が最も高い破壊荷重であった。なお、t34 は添接板が薄く、強度が母材強度より低かったため、添接板が先行破壊する結果となった。

(2) 引張疲労試験

FRP パネル継手部の疲労強度を調べるため、母材の

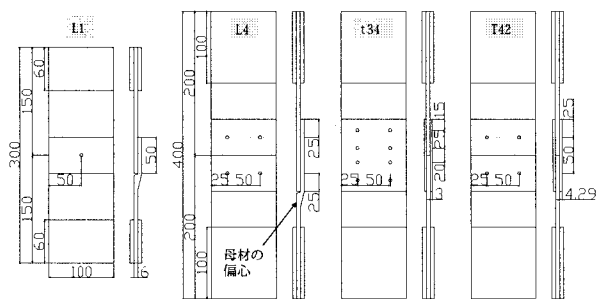


図-2 継手試験体形状

表-1 試験体名と静的破壊荷重

試験体名	リベット数	添接板厚 [mm]	添接板強度 [MPa]	静的破壊荷重 [kN]	破壊形式
L1	1	---	---	19.89	ピーリング
L4	4	---	---	70.95	滑り・母材破壊
t34	4	3	98	59.91	添接板破壊
T42	2	4.29	248	88.59	層間剥離
M	---	---	---	134.66	

偏心のない添接板形式の試験体 t34 と T42 について、引張疲労試験を行った。このときの最大荷重と破壊回数の S-N 関係を図-3 に示す。なお、載荷は下限 2kN のサイン波として与えた。

この結果、t34 に比べて T42 は低応力域での疲労耐力が小さい傾向にある。これは、T42 は長手方向のリベット数が少ないため、荷重の偏心による接着接合面のピーリング作用により接着面近傍の母材に層間剥離が発生したためと考えられる。一方、t34 では添接板が破断しており、添接板の強度が不足していることが分かった。ただし、作用応力が小さく繰返し数が 100 万回を越えた供試体では、t34、T42 共に、母材の断面欠損部となるリベット孔位置で破壊した。

また、母材 (M) の疲労試験結果と比較すると T42 はリベット部の応力集中の影響で疲労耐力が小さくなる傾向がある。しかし、低応力域では T42 も母材と同程度の耐力を有しており、応力集中度が低い場合には断面積が増加した分の疲労耐力増加が見込まれる。

以上より、いずれの継手構造も継手部の設計引張力に対応する 35kN 以下の引張荷重下では、継手強度は、母材に近い疲労耐久性を有しており、両継手とも、十分な疲労耐久性を有することが分かった。

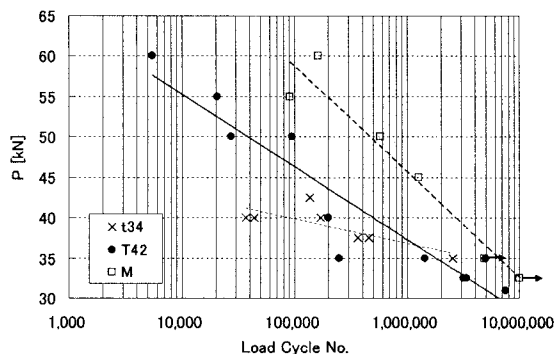


図-3 継手部の S-N 曲線

3. 輪荷重走行試験

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

図-4 に輪荷重走行試験に用いた供試体の形状寸法を示す。また、供試体構成材料の材料特性を表-2 に示す。なお、供試体内には継手形状による耐久性の比較を行うため、型枠パネルの 2ヶ所に継手を設け、それぞれ、静的試験で比較的耐荷力の高かった L4 と T42 の継手形式を適用した。主桁と床版との接合は、ハンチを省略し、主桁上に直接床版を置き、桁に設置したスタッドジベルにより固定した。また、桁端部には横桁を設置し弾性支持した。載荷方法は、実際の車輪の設置面積 20cm ×

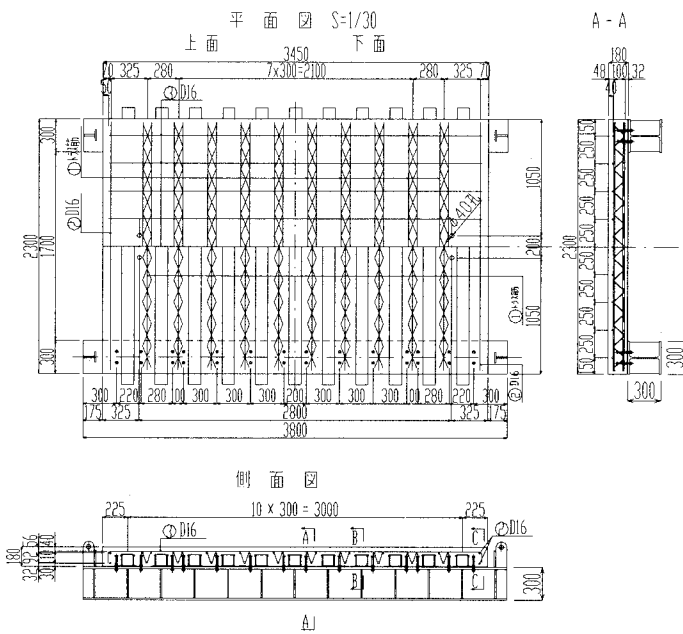


図-4 輪荷重走行試験試験体

表-2 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

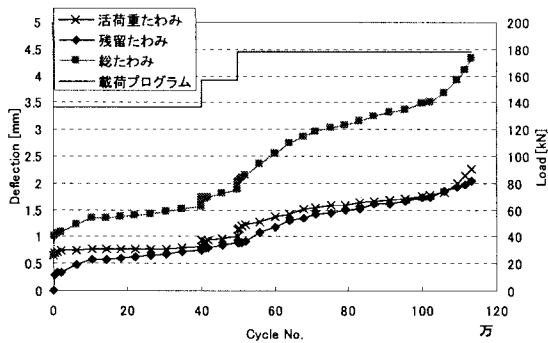


図-5 C点における载荷回数-たわみ曲線

50cmを60%に縮小した12cm×30cmの載荷面積にて載荷し、橋軸方向に、試験体中央から±1000mmの範囲を繰返し走行させた。各走行回数毎の計測項目は、たわみ、ひずみ、ひび割れ、FRPパネルの剥離等であり、計測時の載荷位置は床版中央(C点)と各継手上部(重ね継手L4-S点、添接板継手T42-N点)とした。

(2) 試験結果

a) たわみ

床版中央点における載荷回数-たわみ曲線を荷重載荷プログラムと共に図-5に示す。

荷重は道路橋示方書の輪荷重100kNに衝撃を考慮し、137kNにて40万回を走行後、促進試験とするため157kNで10万回、それ以降は178kNで試験を行った。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。本床版は137kNから178kNの載荷荷重で100万回以上の輪荷重走行に耐えており、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。

また、各載荷点載荷時の荷重直下の活荷重たわみを比較すると、S点に載荷した際のS点直下におけるたわみがC点載荷時のC点直下におけるたわみに比べて若干大きい結果となった。これは、重ね継手部で、FRPとコンクリートとの剥離やコンクリートのひび割れ等により剛性が低下していることに起因するものと考えられる。一方、N点載荷時のN点直下のたわみは通常のRC床版と同様、C点載荷時のC点直下のたわみより小さかった。

b) ひび割れ・剥離状況

図-6に、床版上面のひび割れ状況及び床版下面剥離状況を示す。

この図より、S点側重ね継手部には早期から継手間の剥離が観察されていることがわかる。これは、FRP重ね継手部で、一方の底板が曲げ上げられていることから、荷重載荷による床版の曲げ変形に伴い、その曲げ上げ部が延ばされる変形をすることによるピーリング作用が加わるためと思われる。一方、N点側添接板継手部の剥離はFRP継手の剥離ではなく、コンクリートと型枠パネルの剥離であり、継手部以外の一般部での剥離発生時期と比べても遜色のない結果となった。また、最後まで継手部に添接板間のゆるみは見られなかった。

コンクリートと型枠パネルの剥離は50万回までは主に床版中央部で発生していたが、その後、徐々に広がった。橋軸直角方向の分布では、支間中央の載荷版直下の剥離は少なく、載荷板端部付近から剥離する傾向が見られた。なお、本試験では、型枠パネルとコンクリートのずれも計測していたが、最終状態でも0.05～0.17mm程度であり、剥離によるずれは殆ど生じないことが分かった。また、剥離に伴うたわみの増加は少ないことから、GFRP型枠とコンクリートの剥離による床版の剛性低下は少なく、合成床版としての機能を保持することが分かった。

床版上面のひび割れは、50万回走行を超えてから、中央部に若干のひび割れが発生したが、100万回走行時に、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、載荷範囲にはひび割れは観察されなかった。しかし、試験終了時、載荷ブロック端に沿ったひび割れが観察されていることから、このひび割れは、100万回以降に生じたものと推察でき、たわみの増加は、このひび割れに起因するものと思われる。

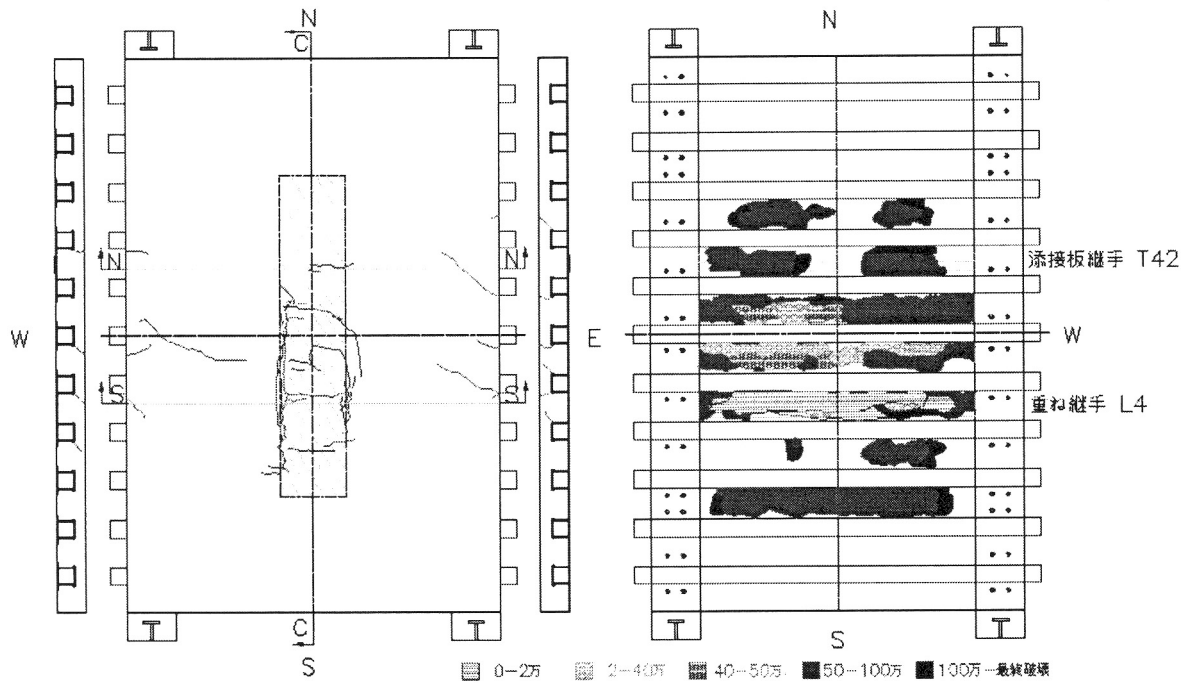


図-6 ひび割れ・剥離状況

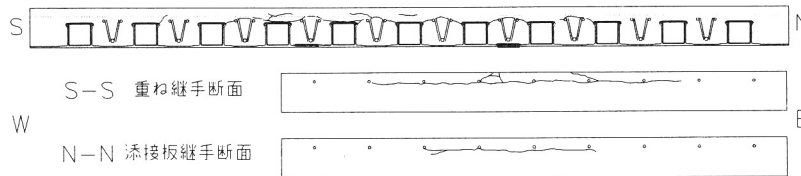


図-7 床版断面ひび割れ状況

c) 破壊状況

試験終了後、床版をカットし断面内のひび割れ状況を確認した結果を図-7 に示す。なお、各断面図の供試体切断位置は、図-6 左図における C-C 断面、S-S 断面、N-N 断面である。

これらの図より、橋軸方向断面のひび割れは、角形鋼管パイプ上部の FRP 突起部から上側配力筋を結ぶアーチ状に生じており、橋軸直角方向断面では、上側主鉄筋に沿ったひび割れが生じていることから、最終の破壊形態は、配力筋より上のコンクリート部分が分離し、重ね梁化するものと考えられる。なお、S-S 断面には、載荷版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、鉄筋に沿ったひび割れとなっている。これは、本床版が、上側鉄筋下面に、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と考えられ、RC 床版のような押抜きせん断破壊は生じないものと推察できる。以上より、本床版は十分なせん断耐力を有しており、重ね梁化しても、下側の断面で荷重を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。

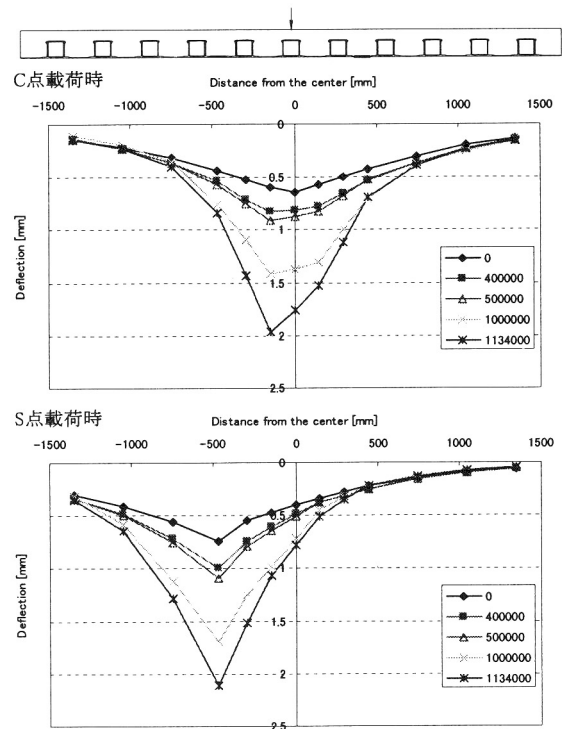


図-8 たわみの橋軸方向分布

d) たわみ分布

各载荷回数における床版中央载荷時及び、S点载荷時のたわみの橋軸方向分布を図-8に示す。

C点载荷時のたわみ分布は、初期载荷では、ほぼ対象の分布形状となっているが、载荷回数の増加と共に、若干S側のたわみが大きくなる傾向がある。これは、S側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。

また、S点载荷時では、たわみの分布形状が载荷と共に载荷点直下で尖った形状となってくる。これは、継手部でのコンクリートのひび割れの影響と考えられる。しかし、たわみ分布は連続性を保持しており、重ね継手形式でも十分に実橋床版適用可能であると考えられる。

e) ひずみ分布

C点载荷時、S点载荷時の床版下面 GFRP における橋軸方向ひずみの橋軸方向分布を図-9に示す。

C点载荷時には、たわみ分布と同様、载荷点近傍の、重ね継手側の角形鋼管間でひずみが大きくなっている。また、100万回载荷程度までは、鋼管下のひずみが小さく、鋼管間のひずみが大きい傾向がある。これは、鋼管とコンクリートの弾性係数の差によるもので、载荷初期は橋軸方向の伸びひずみは、主として鋼管間のパネルの伸びで吸収するが、载荷が100万回を超え、上側鉄筋面

のひび割れにより重ね梁化すれば、輪荷重用により鋼管にも直接荷重が作用するため鋼管下のひずみが増加する傾向となる。一方、S点载荷時は、载荷直後から重ね継手部のひずみが低下しているが、これは、継手接着部の剥離、コンクリートのひび割れ等により、軸力によるひずみしか発生していないと考えられる。よって絶対ひずみは小さく、破壊直前の100万回程度まで継手部の応力伝達が確保されていることがわかった。

次に床版下面の橋軸直角方向ひずみの橋軸方向分布を図-10に示す。これより、荷重直下にある鋼管の GFRP 底板のひずみが、载荷点近傍の鋼管間のひずみに比べて小さいことがわかる。これは、角形鋼管の剛性により、鋼管下面の FRP 部のひずみが抑制されるためと考えられる。また、型枠鋼管間の FRP は剥離が生じていても、ひずみが大きいことから、破壊状態まで荷重を負担していることが分かった。

図-11に、载荷各段階における床版断面内の床版支間方向のひずみ分布を示す。なお、計測位置は支間中央のセンターから橋軸直角方向へ500mmの位置とした。この図より、鋼管上側 FRP のひずみが载荷繰返し数の増加に従って増加する傾向が見られる。これは上面鉄筋に沿ったひび割れの進展の影響と考えられ、ひび割れの進展に伴い床版断面内の平面保持が崩れ、ひび割れより上

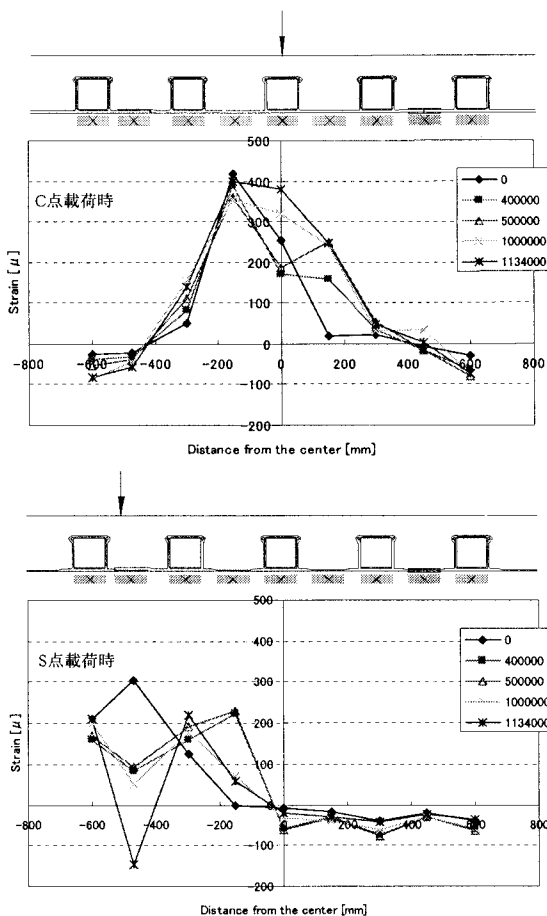


図-9 床版下面橋軸方向ひずみの橋軸方向分布

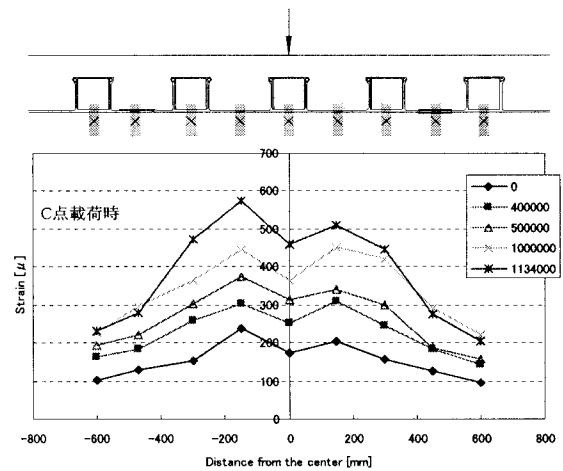


図-10 床版下面橋軸直角方向ひずみの橋軸方向分布

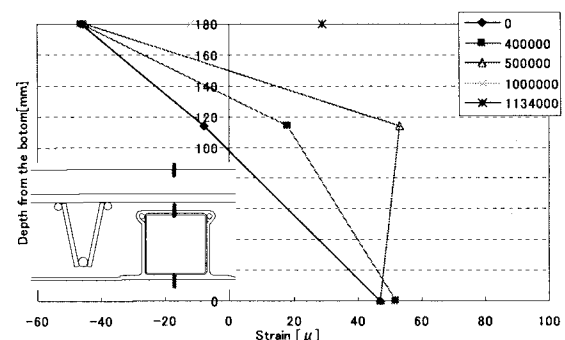


図-11 床版断面内橋軸直角方向のひずみ分布

面のコンクリートが圧縮力を負担し、下面の鋼管及び鉄筋が引張力を負担する新たな耐荷機構へと移行するものと推定できる。そして、上面鉄筋に沿ったひび割れが版全面に進展すれば、版は重ね梁状態となり、剛性が低下し、たわみが増大する劣化機構となることが分かった。

f) 鋼管の内空高さの変化

図-12 に、角形鋼管の内空高さの変化を測定した結果を示す。なお、変形量は鋼管端部を基準とした相対変形量とし、各載荷回数毎の測定値から荷重載荷前の初期変形を減じた値とした。ここで、断面 F は床版中央部の角形鋼管を示している。

これにより、64 万回時点までは荷重載荷時の鋼管の変形が若干見られるが、除荷時は殆ど変形していないことから、鋼管は弾性範囲内であったことがわかる。しかし、試験終了時の 113 万回時点では荷重載荷時の変形も大きく、除荷後も 0.3mm 程度の残留変形があることから、試験終了時には鋼材が部分的に変形していたものと考えられる。また、パイプ測定位置の 300mm 付近で鋼管の変形が見られる。これは、本供試体が主桁とジベルにて結合されていることによるもので、反力によってこの部分に大きな負曲げが生じているためと考えられる。

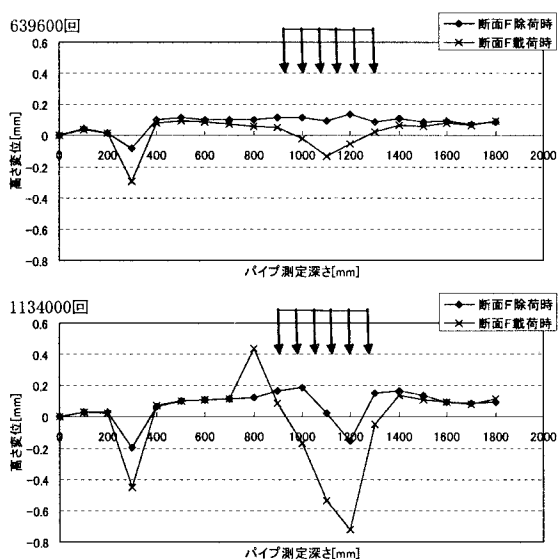


図-12 鋼管の内空高さの分布

4. 継手部の評価

本床版を床版支間 2m の連続版に適用するものとして、道路橋示方書の設計曲げモーメント式により計算したパネル継手に作用する橋軸方向応力度を、継手部試験供試体 (100mm × 5.5mm) に作用する引張力に換算すると、25kN 程度となる。

一方、床版試験中に FRP 継手部の動的ひずみを測定したところ、載荷開始当初で -112~291 $\mu\epsilon$ 、試験終了時で 64~573 $\mu\epsilon$ であった。このため、継手部の発生ひずみを大きく見積もって 700 μ 程度と仮定すると、引張試験用供試体 (100 × 5.5) での換算荷重は 7kN 程度とな

る。したがって、今回行った継手部の引張疲労試験 (図-3) により、添接板形式の継手では、その 4 倍以上の荷重下で 100 万回以上の疲労耐久性を有していることが確認できたと言える。また、重ね継手形式においても静的引張試験 (表-1) より、実際の作用荷重の 10 倍程度の継手耐力を有することが確認されたと言える。以上より、両継手共実際の床版の継手として十分な性能を有していると言える。

5. まとめ

本研究から以下の点が明らかになった。

- ① FRP パネルの継手構造は、添接板形成、重ね継手形式ともに十分な耐荷力、疲労耐久性を有していることがわかった。
- ② 本床版が、実橋床版として十分な疲労耐久性を有していることを輪荷重走行試験により確認した。
- ③ FRP 継手部は、輪荷重の移動繰返し載荷により、橋軸方向の応力伝達機能は若干低下するものの、破壊時まで版としての連続性を確保している。
- ④ 本床版の疲労破壊は、上側鉄筋面に沿ったコンクリートのひび割れが生じ、重ね梁化することで耐荷力が低下する形態をとることがわかった。

今後は、継手部の曲げ疲労試験を行い、最適な継手構造を検討するとともに、床版の設計手法の確立を行っていく予定である。

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，p.65-72
- 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，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