

GFRP 部材を用いた既設鋼桁橋 RC 床版の補強工法に関する実験的研究

A Study on Strengthening Method of Steel Girder Bridge with RC Slab by Using GFRP Members

太田俊昭*, 日野伸一**, バセム・アブドゥーラ***, 池村尚哉****, 勝野壽男*****, 林耕四郎*****
 Toshiaki OHTA, Shinichi HINO, Basem ABDULLAH, Naoya IKEMURA,
 Hisao KATSUNO and Koshiro HAYASHI

ABSTRACT This paper introduces a new strengthening system for the deteriorated steel girder bridge with RC slab. The strengthening system consists of pultruded longitudinal and transverse GFRP H-shaped beams. Two test specimens composed of two steel girders and RC slab were prepared, and the cracked specimens due to overloading were reinforced by pultruded GFRP H-shaped beams. The retrofitted specimens were examined under two kinds of loads, static and fatigue loadings. The results for both stages viz., the pre-cracking stage and the post-strengthening stage and the conclusions based on the experimental and the analytical studies are presented.

Keywords: GFRP, 補強, RC 床版鋼桁橋

Glass Fiber Reinforced Plastics, Strengthening, Steel Girder Bridge with RC Slab

1. まえがき

かつての古い基準で設計・施工されている道路橋 RC 床版は、近年の車両の大型化および交通量の増大等の過酷な条件の中で、床版厚や鉄筋量の不足などによる損傷のため補修・補強を必要とするものが少なくない。RC 床版の補強工法¹⁾としてこれまで一般的に採用されてきたものには、鋼板接着工法、上面または下面増厚工法、縦桁増設工法、最近では炭素繊維シート接着工法などがある。しかし、これらの補強工法には、死荷重の増加、補強後の維持管理、交通規制の必要性、材料価格などの点でそれぞれ課題が残る。

著者らは、これらの問題点をできるだけ回避し、より合理的な補強工法の開発をめざす一環として、近年構造用新材料として研究・開発の進む繊維強化プラスチック (FRP)、中でもより安価なガラス繊維強化プラスチック (Glass Fiber Reinforced Plastic、以下 GFRP とする) に注目し、これを用

いた既設鋼桁橋の補強工法を提案し、その基礎実験によって有効性を検証した²⁾。

そこで本研究では、架設竣工後 40 年を経過した A 橋 (適用示方書昭和 31 年、1 等橋、TL - 20) を検討対象として選定し、実橋を想定したより実用性の高い補強構造の検討とその補強効果について実験および解析的検討を行うものである。すなわち、A 橋に現行道路橋示方書³⁾を適用し応力照査を行ったところ、許容応力度に対して主鉄筋、配力鉄筋ともかなりの応力超過となった。特に配力鉄筋応力は許容応力度の約 2 倍となった。そこで A 橋に対して実用性の高い補強構造として図-1 に示すように、主桁間に H 形 GFRP 部材を交差状に配置する構造を提案し⁴⁾ FEM 解析を用いて現行示方書を満足するように補強構造の断面設計を行った。これを踏まえ、本報では A 橋の部分模型供試体を製作して静的載荷試験および疲労試験を行い、その補強工法の施工性および補強効果を実験的に

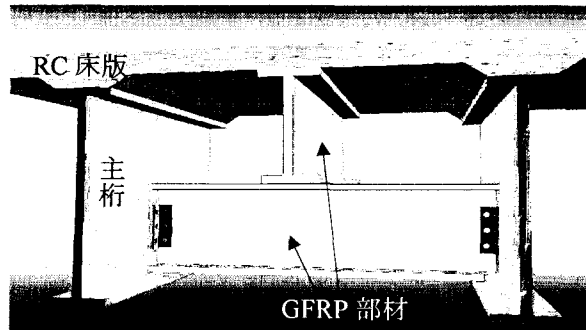


図-1 補強イメージ

* 工博 九州大学大学院工学研究院教授

** 工博 九州大学大学院工学研究院助教授

***工修 九州大学大学院工学研究科

**** 九州大学大学院工学研究科

(〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

***** 三菱重工工事(株)維持補修技術センター

(〒108-0014 東京都港区芝 5-34-6)

***** 旭硝子マテックス(株)技術・開発グループ

(〒229-1112 神奈川県相模原市宮下 1-2-27)

検証し、施工時に予想される課題を集約してより実用性の高い補強工法の確立を図るものである。

2. 実験および解析概要

2. 1 供試体

実験供試体として、対象橋梁の一部を約 1/3 にスケールダウンした RC 床版鋼 2 主桁模型供試体を 2 体製作した。供試体概要図を図-2 に、諸元を表-1 に示す。RC 床版と鋼主桁はスタッドジベルにより合成し、実橋における対傾構およびガセットプレート の代用としてチャンネル型の鋼製横桁を支間部と供試体端部に計 4 本取付けた。RC 床版の床版厚は 12cm、鉄筋 (SD295D13) は主鉄筋を 10cm 間隔、配力鉄筋を 20cm 間隔で配置した。RC 床版の設計は、対象橋梁に対応して設計当時の道路橋示方書 (昭和 31 年) に基づき、また現行示方書を適用した場合における超過応力度がほぼ等しくなるように設計をした。

補強区間は支間中央の鋼製横桁間 1.85m 区間とした。補強部材には、高さ 20cm、フランジ幅 14cm、フランジ厚 1.0cm、ウェブ厚 1.4cm の H 形 GFRP はり (引抜き成形材) を用いた。橋軸方向に配置する GFRP 縦桁は端部で鋼製横桁に、橋軸直角方向に配置する GFRP 横桁は端部で主桁ウェブにそれぞれ L 形アングル添接板を介したボルト・接着

剤併用接合によって取付けた。また、RC 床版下面と GFRP 縦桁上フランジ間の接合面には、エポキシモルタルを厚さ約 1cm 塗布し、5 日間養生した。GFRP 縦桁下フランジと GFRP 横桁上フランジ間の接合面には上部からの圧縮力のみが下部に伝達するようにゴム板を挟み、またウェブの局部座屈を防ぐ補剛材として角型 GFRP 管を取付けた。

なお、本補強構造は狭い桁下空間での比較的小型の軽量資材の取扱いで済むので施工性の向上と補強後も床版下面の変状を目視で確認できるという点で特に他工法に比べ特長的な構造である。

2. 2 材料特性

H 形 GFRP 部材は図-3 に示すように、内部は長手方向に引き揃えたガラス繊維ロービング、表層部はガラス繊維のコンティニュアスストランドマット (CSM) およびヤーンクロス の積層構造 〃となっており、不飽和ポリエステル樹脂に含浸して引抜き成形したものである。ガラス繊維の体積含有率は 45~60% であり、ロービングが大部分を占めている。また、比重はおよそ 1.75t/m³ であり、鋼材に比べおよそ 1/5~1/4 倍である。表-2 に GFRP 部材の材料物性値を示す。

RC 床版に用いたコンクリートの配合表を、表-3 に、材料物性値を表-4 に示す。セメントには早強ポルトランドセメントを使用し工場にて打設した。

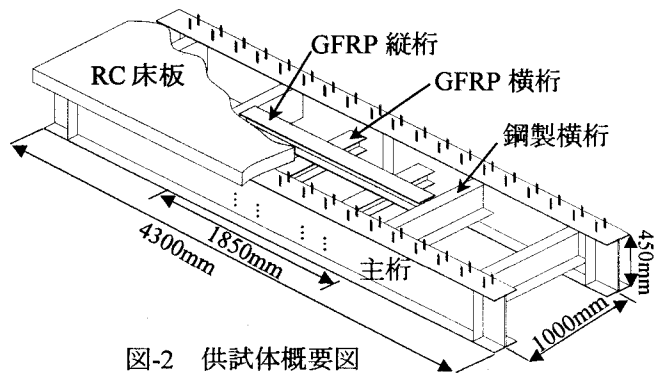


図-2 供試体概要図

表-1 供試体諸元 単位 (mm)

スパン	4000
床版	4300×1400×120
主鉄筋間隔	100 (D13)
配力鉄筋間隔	200 (D13)
主桁高さ	450
主桁フランジ幅	200
主桁間隔	1000
スタッド間隔	200 (D16)
GFRP高さ	200
GFRPフランジ幅	140
GFRP縦桁長	1850
GFRP横桁長	992
総重量	約2.5t

表-2 GFRP 材料物性値

引張強度	424(MPa)
ヤング係数	37(Gpa)
ポアソン比	0.255
終局ひずみ (長手方向)	1.15(%)
終局ひずみ (幅方向)	-0.28(%)
比重	1.75(t/m ³)

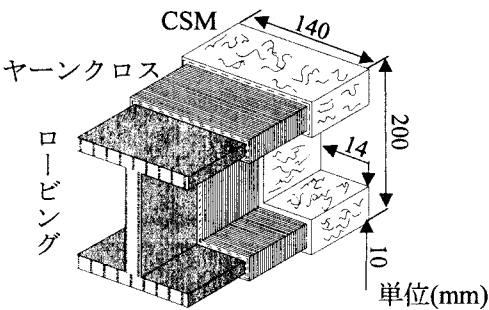


図-3 H 形 GFRP 部材の構造

表-3 床版コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スラブの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/A (%)
20	8±2.5	2±1.0	45	45

単位量 (kg/m ³)				
セメント C	水 W	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 M ₁
378	170	784.7	1110.6	4.54

表-4 コンクリート材料物性値

材料	圧縮強度	ヤング係数	ポアソン比
コンクリート (材齢28日)	41.9(MPa)	33.1(Gpa)	0.197

RC 床版下面-GFRP 縦桁上フランジ間の接合面に用いたエポキシモルタルの材料物性値を表-5に、混合後の様子を写真-1に示す。なお、エポキシ樹脂と珪砂は、1：4の割合で混合した。

2. 3 GFRP 部材-主桁接合部

GFRP 横桁と主桁ウェブの接合には、鋼製のL 形アングル添接板を介して、高力ボルトおよび接着剤併用接合を用いた。前述したように、補強に用いる H 形 GFRP 部材は、ロービング層のガラス繊維が長手方向のみに配置してあるため、主桁ウェブとの継手部において繊維直角方向の強度を向上させる必要がある。そこで、母材 GFRP に対して直角方向の繊維配向を持つ GFRP 補強板（幅 10cm、高さ 17cm、厚さ 1cm）を GFRP 横桁端部のウェブ両面に接着補強した（写真-2）。

また、ボルトの導入軸力については、設計軸力の 35～70%を導入することが望ましいというこれまでの基礎実験の結果⁶⁾を用いて、設計軸力の 70%に相当するトルク 55.6(N・m)を導入した。

なお、GFRP 縦桁と鋼製横桁の接合部についても、同様の接合方法を用いた。

2. 4 補強工程

2. 4. 1 GFRP 縦桁補強

GFRP 縦桁の補強手順は、以下のように行った。
①RC 床版下面の内、GFRP 縦桁と接合する接合面（185×14cm）をグラインダーで平滑にする。
②GFRP 縦桁上フランジ上面縁に沿って、厚さ約 1cm、幅約 0.7cm のゴム製スポンジを接着する。
③GFRP 縦桁上フランジ上面にエポキシモルタルを塗付する。

表-5 エポキシ物性値

エポキシモルタル	
圧縮強度 (MPa)	57.3
曲げ強度 (MPa)	2.06
ヤング係数 (Gpa)	11.9
ポアソン比	0.27



写真-1 エポキシモルタル

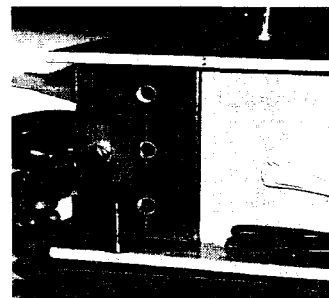


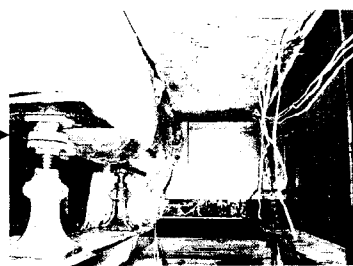
写真-2 GFRP 補強板接着



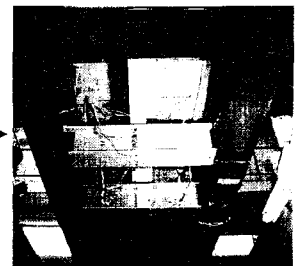
ゴム製スポンジ接着



エポキシモルタル塗布



GFRP 縦桁補強状況



補強後の状況

写真-3 GFRP 部材補強の流れ

④GFRP 縦桁を水平に保ち、下から等間隔の 3 点を手動ジャッキを用いて、およそ 2kN の力でジャッキアップする。

⑤5 日間そのまま養生する。

⑥ジャッキを取り外した後、L 形アングル添接板および GFRP 縦桁端部（補強板）に接着剤を塗付し、ボルトを締め付ける。

2. 4. 2 GFRP 横桁補強

GFRP 横桁の補強手順は、以下のように行った。

①GFRP 縦桁下面と GFRP 横桁上面の接合面(14×14cm)に圧縮力のみを伝えるようにゴム板を挟む。

②GFRP 横桁の 3 点を下からジャッキアップする。

③GFRP 縦桁の時と同様に、GFRP 横桁端部と主桁ウェブを接合する。

④数日間安置した後、ジャッキを取り外す。

補強工程を写真-3に示す。

2. 5 載荷方法

2. 5. 1 補強前

疲労損傷した RC 床版を再現するために、まずはじめに補強前供試体に繰り返し荷重を載荷した。実際の RC 床版に近似したひび割れ状態を再現させるには、輪荷重走行試験を行うのが望ましいが、試験機の制約上、定点載荷試験装置の載荷点を移動するという方法を用いた。載荷板は道示の輪荷重の接地幅の約 60%スケールの 300×120(mm)とした。手順は以下のとおりである。

はじめに床版中央点に 49-206(kN)の荷重で 10 万回繰り返し載荷を行った(Load1)。最大荷重の決定には、床版主鉄筋応力が許容応力度の約 50%増

その結果、補強区間内の床版下面ほぼ全域にひび割れが発生し、ひび割れ幅は最大で0.3mmに達した。図-4に床版下面ひび割れ図を示す。

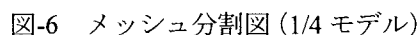
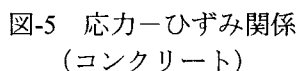
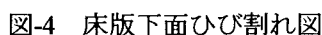
補強後の疲労試験は、補強前の載荷パターン (Load1~Load4)と同様の方法で行った。ただし、各点における繰返し載荷数は、50 万回とし、合計で 200 万回の繰返し載荷試験を行った。

疲労試験後、実験供試体の終局状態を把握するために、中央1点載荷による破壊までの静的載荷試験を行った。

計測には、変位計を用いて RC 床版、主桁、支

2.6 解析概要

実験挙動を解析的に追跡するため、有限要素法を用いた FEM 非線形解析を行った。解析に用いた鉄筋、コンクリートおよびエポキシモルタルの材料物性値は材料実験で得られた値を用い、GFRP については、メーカーの技術資料⁷⁾の値を用いた。コンクリートのモデル化には、図-5 に示す Biaxial Nonlinear Concrete Model 用いた。解析は 1/4 対称モデルで計算し、コンクリート床版、主桁、鋼製横桁および H 形 GFRP 部材には 3 次元シェル要素を用いた。また、完全合成桁を再現するために、主桁と RC 床版との連結は、高弾性バネを用いた 3 次元ジョイント要素を用いた。メッシュ分割図を図-6 に示す。要素数は、主桁および鋼製横桁は約 520、RC 床版は約 320、GFRP は約 150 である。なお、解析には汎用ソフト Lusas version13.2⁸⁾を用いた。



3. 結果と考察

3. 1 床版主鉄筋応力

床版主鉄筋の荷重－応力関係を図-7に示す。図中「ひび割れ前」とは RC 床版にひび割れが発生する前の供試体に対する処女載荷時の挙動を指している。図より、GFRP 補強をすることにより、主鉄筋応力は 184(MPa)から 109(MPa)に減少し、約 40%の低減効果が得られた。有限要素法による解析値は、補強前後ともに実験値を概ね追跡できていることがわかる。また、橋軸直角方向断面に中央主鉄筋に沿って応力をプロットした応力分布図を図-8に示す。この図から、主鉄筋中央部が GFRP 縦桁に支持されたことによって、大きな補強効果が得られたことがわかる。

また、繰り返し載荷 (50 万回ずつ計 200 万回)

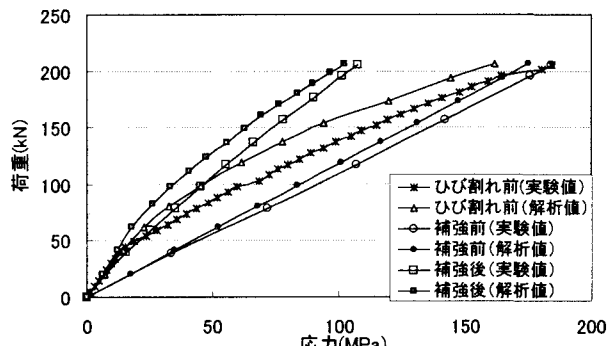


図-7 荷重－応力図 (主鉄筋)

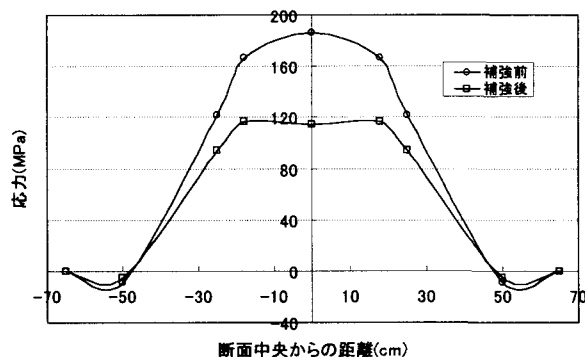


図-8 主鉄筋応力分布図

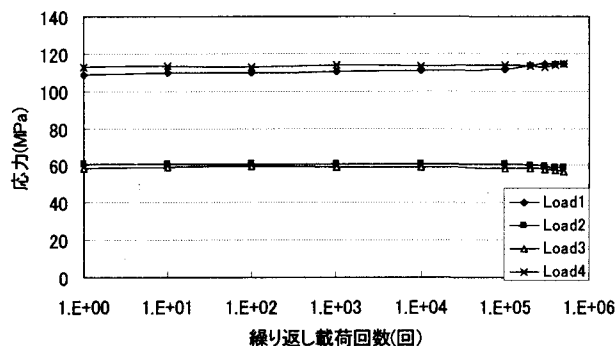


図-9 S-N 曲線 (主鉄筋)

による応力増加は見られなかった (図-9)。なお、この図で Load1,4 と Load2,3 とで大きく値が異なるのは、前述したように載荷点が移動しているためである。

3. 2 床版配力鉄筋応力

床版配力鉄筋応力は、図-10に示すように補強前と補強後とは異なる挙動を示した。特に補強後の応力は、載荷直後から荷重 78(kN)時までは圧縮応力として漸増し、その後反転して引張応力へと増加傾向をたどる挙動を示した。この理由はスパン中央の橋軸直角方向断面に着目して、以下のとおりに考えられる。橋軸直角方向断面のひずみ分布図 (図-11) に見られるように、荷重が 78(kN)時は中立軸が GFRP 縦桁上フランジ付近に存在し、それより上部は圧縮域となり、しかも断面内の平面保持則が成立していない。荷重を 118(kN)、157(kN)と増やすにつれて中立軸の位置は上昇し、やがて 206(kN)時には中立軸は RC 床版内の配力鉄筋よりやや上に位置する。このとき、配力鉄筋は引張域となる。図-10 および図-11 からわかるように、荷重が 118(kN)より大きいときは、ひずみの平面保持則がほぼ成立しているといえる。

また FEM による解析ではひび割れ前の挙動は精度よく追跡できたものの、補強後の挙動を把えることはできなかった。さらに検討が必要である。

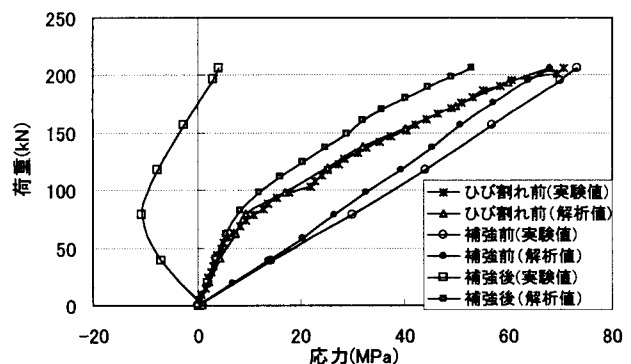


図-10 荷重－応力図 (配力鉄筋)

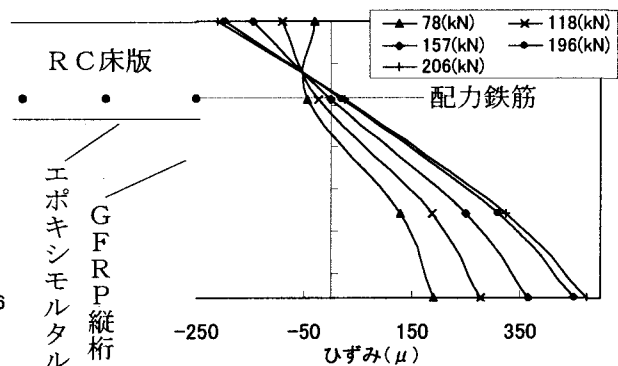


図-11 支間中央断面ひずみ分布図

橋軸方向断面に、中央配力鉄筋に沿って応力をプロットした応力分布図を図-12 に示す。補強によって、スパン中央の配力鉄筋応力が 73(MPa)から 4(MPa)まで大きく低減しているのがわかる。

図-13 に示すように、主鉄筋と同様に配力鉄筋応力に関しても繰り返し载荷による増加はみられなかった。

3. 3 床版および主桁のたわみ

床版中央の荷重－たわみ関係を図-14 に示す。補強前の 2.69(mm)が補強後 2.11(mm)へと減少し、

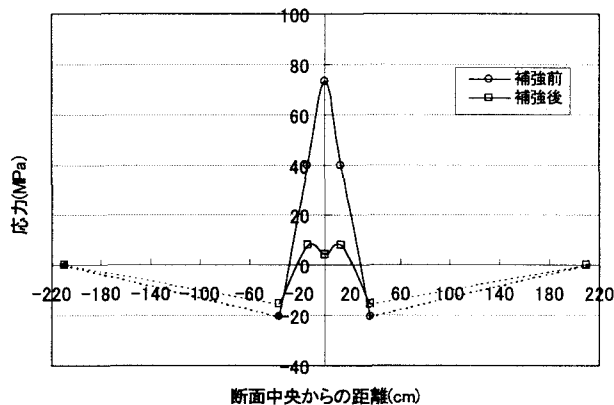


図-12 配力鉄筋応力分布図

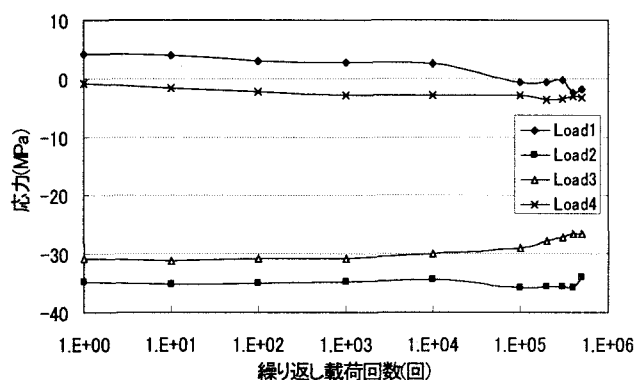


図-13 S-N 曲線 (配力鉄筋)

約 22%の低減効果があった。

主桁中央の荷重－たわみ関係を図-15 に示す。補強前の 1.33(mm)が補強後は 1.28(mm)となり補強効果は約 4%である。また、主桁下フランジの応力は、補強前後とも 58(MPa)であった。以上のことから、この補強構造は主桁に関して補強効果はほとんど期待できないといえる。また FEM による解析でも、本構造は主桁に対して大きな補強効果が得られないことを示している。

3. 4 GFRP 応力

補強部材である GFRP 縦桁および GFRP 横桁の下フランジに生じる応力と荷重の関係を図-16 に示す。縦桁で 17.6(MPa)、横桁で 9.6(MPa)の引張応力が生じているが、これは GFRP 部材の繊維方向引張強度である 424(MPa)に比べきわめて小さい値であり、疲労を考慮しても全く問題のないレベルであるといえる。これは、他の箇所における曲げ、せん断の両応力度についても同様である。以上のことより、GFRP 部材に関しては、その曲げ剛性によって断面決定されるため、応力度については照査の必要がないといえる。

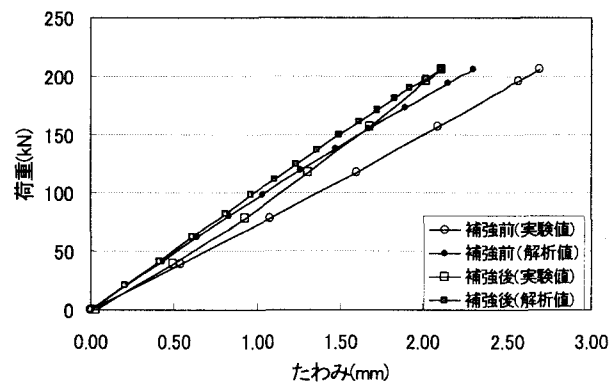


図-14 荷重－たわみ図
(床版中央)

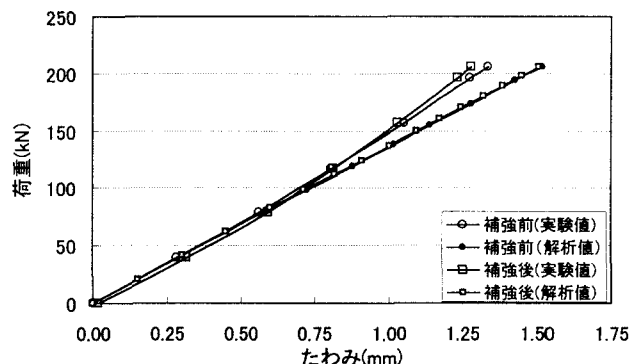


図-15 荷重－たわみ図
(主桁中央)

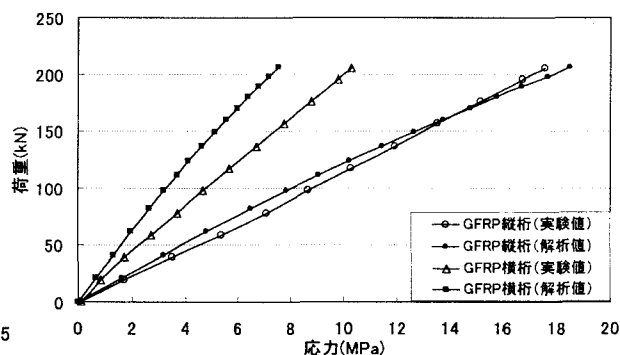


図-16 荷重－応力図
(GFRP 下フランジ)

3. 5 静的破壊試験

疲労試験終了後、実験供試体の終局状態把握のために、中央1点荷重による静的荷重試験を行い、破壊荷重および破壊形式などを検証した。図-17に床版中央の荷重－たわみ関係を示す。

最大荷重は 665(kN)、破壊形式は写真-4 に示すようにコンクリート床版の押抜きせん断破壊であった。最大荷重到達後、一旦除荷し、再載荷後 538(kN)で最終的に破壊した。これは、RC 床版の押抜きせん断耐力の評価式⁹⁾で求めた値 334(kN)に比べ約 1.61 倍の強度であり、本補強構造が曲げ耐力のみならず押抜きせん断耐力向上にも寄与するということがいえる。

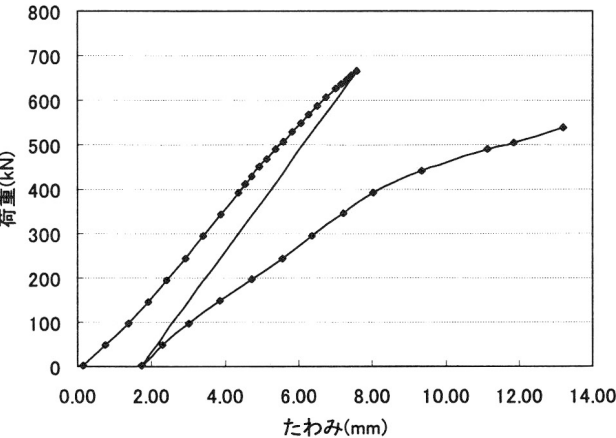


図-17 荷重－たわみ図（床版中央）

最大荷重のときに、大きな亀裂音とともに主桁上フランジの内側縁に沿った RC 床版下面に亀裂が生じた（写真-5）。なお、床版が破壊に至っても、GFRP 補強部材にはなんら大きな損傷はみられなかったことを付記しておく。

3. 6 GFRP 部材による補強効果

補強前の値を 100 としたときの補強後の各数値を図-18 に、補強によって得られた応力およびたわみの低減率を表-6 に示す。主鉄筋応力に約 30～40%、配力鉄筋応力にも大きな補強効果が得られた。また、床版たわみに約 20%の補強効果があったが、主桁については、たわみおよび応力ともに顕著な補強効果は得られなかった。

これらの結果から、RC 床版補強に対して GFRP 部材を用いることの有効性を実証するとともに、対象とする橋梁に対して、本補強工法適用の有用性が明らかにされたといえる。

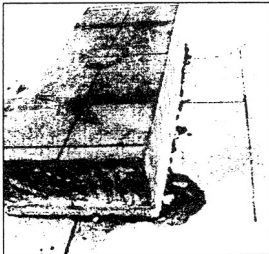


写真-4 押抜きせん断破壊状況



写真-5 主桁フランジ－RC 床版下面

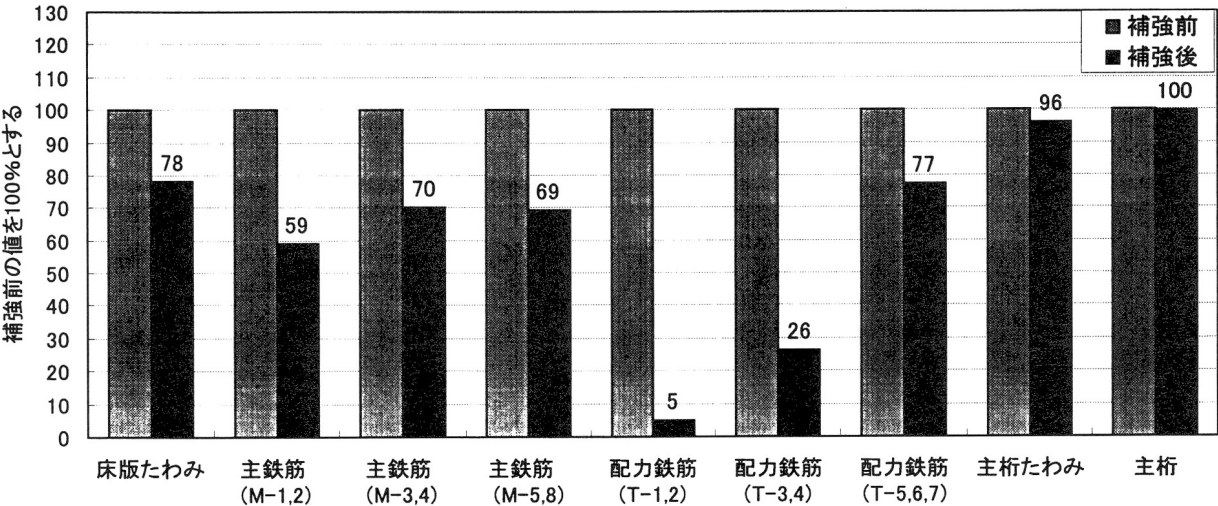


図-18 補強効果比較図

表-6 応力（たわみ）低減率一覧表

	床版たわみ (mm)	主鉄筋 (MPa)			配力鉄筋 (MPa)			主桁	
		M-1,2	M-3,4	M-5,8	T-1,2	T-3,4	T-5,6,7	たわみ(mm)	下フランジ
補強前	2.69	184	166	180	73	47	-24	1.33	58
補強後	2.11	109	117	125	4	12	-18	1.28	58
低減率(%)	22	41	30	31	95	74	23	4	0

4. まとめ

既設の RC 床版鋼桁橋の補強材として GFRP 補強材の適用を目的として、対象橋梁のおよそ 1/3 スケールの模型供試体を製作し、静的載荷試験、疲労試験および静的破壊試験を実施して、補強効果の検証を行った。得られた成果をまとめると、次のとおりである。

- ① H 形 GFRP 縦桁および横桁から成る本補強構造によって、既設 RC 床版に対する顕著な補強効果が認められた。
- ② 繰り返し載荷試験による疲労低下の影響はいずれもみられなかった。
- ③ 本補強構造は、主桁に対する補強効果はほとんど期待できず、主桁補強を目的とする場合は、別の補強法の適用が必要である。
- ④ GFRP 桁に生じる応力レベルは材料強度に比べて過小であり、疲労を考慮しても十分安全である。
- ⑤ 疲労試験後の静的載荷試験では、RC 床版の押抜きせん断破壊となったが、破壊荷重は補強前せん断耐力評価式の値の約 1.6 倍であり、本補強構造は曲げ耐力だけでなく、押抜きせん断耐力向上にも寄与することが示された。
- ⑥ 本論文で用いた FEM 解析モデルは、本構造の補強効果を定性的に追証したものの、実験挙動に対しては満足しうる精度で把握できず、さらなる検討の必要性を示唆した。

以上の結果より、対象橋梁の床版補強に対する本補強工法の有効性が示されたといえる。

また、経済性を示す指標として A 橋に対する本工法と炭素繊維シート接着工法の概算工事費（直接工事費）を比較したところ、経済性は両工法とも同程度であるという結果が得られた。本工法は施工実績がないものの、構造的な補強後の維持管理面などにおいて優れており、新工法としての適

用が期待される。

[謝辞]

本研究を遂行するにあたり、建設省九州地方建設局福岡国道工事事務所、中央コンサルタンツ(株)福岡支店、コグニス・ジャパン(株)他関係各位には多大なご協力を賜りました。ここに感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 佐藤栄作：鋼道路橋の補修・補強の概要、橋梁と基礎，vol.28.No.8，1994.8
- 2) 日野伸一, B.Abdullah, 太田俊昭, 北村隆宏, 勝野壽男, 萩原淳：ガラス繊維補強材を用いた既設鋼橋の補強に関する基礎的研究，第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集，pp.289-292，1998.11
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編 II 鋼橋編，1996.12
- 4) B.Abdullah, 日野伸一, 太田俊昭, 勝野壽男：A Fundamental Study on Strengthening of Steel Girder Bridge with RC Slab by Using GFRP Members，構造工学論文集，Vol.45A，pp.1137-1144，1999.3
- 5) 旭硝子マテックス(株)：H 形 FRP 材の曲げ性状解析結果報告書（技術資料），1999.8
- 6) B.Abdullah, 日野伸一, 太田俊昭, 勝野壽男, 北村隆宏：Ultimate Capacity of Bonded-Bolted GFRP Connection in GFRP Members，土木学会第 55 回年次学術講演会，I -A59，2000.9
- 7) 旭硝子マテックス(株)：プロアロイ H200 の技術資料，1986.3
- 8) LUSAS finite element system：LUSAS theory manual 1,2，1999
- 9) 松井繁之：鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐荷力の評価式，土木学会論文集，Vol.348, V-1，pp.133-141，1984.8