

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

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

日野伸一*、バセム・アブドゥーラ**、太田俊昭***、北村隆宏†、勝野壽男††、萩原 淳†††
 Shinichi HINO, Basem ABDULLAH, Toshiaki OHTA, Hisao KATSUNO, and Jun HAGIWARA

- *正会員 工博 九州大学大学院工学研究科助教授 (〒 812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)
- **学生員 工修 九州大学大学院工学研究科 (〒 812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)
- ***フェロー 工博 九州大学同上教授 (〒 812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)
- †学生員 九州大学大学院工学研究科 (〒 812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)
- ††フェロー 三菱重工工事㈱技術本部 BRE 室室長 (〒 108-0014 東京都港区芝 5-34-6)
- ††† 三菱重工工事㈱技術本部 BRE 開発部長 (〒 108-0014 東京都港区芝 5-34-6)

Strengthening of concrete or steel structures in situ with externally bonded GFRP (Glass Fiber Polymers) appears to be a promising method to enhance the capacity and the stiffness of existing structures. This paper introduces the feasibility and the efficiency of using GFRP Unit System (GFRP plate, GFRP longitudinal and transverse beams) as unique type of reinforcements for increasing the flexural capacities of steel I-girder bridge with damaged RC slab. Four specimens, each specimen composed of RC slab, two steel I-girder and GFRP unit, were prepared and examined under two kinds of loads (static and fatigue loading), only three of these specimens were reinforced by GFRP unit. Test results for both the stages viz., the pre-cracking stage and the stage after strengthening with GFRP unit and the conclusions based on the experimental and analytical results are presented.

Key Words: *strengthening, rehabilitation, glass fiber polymers, GFRP unit system, damaged RC bridge deck.*

1. まえがき

近年、交通量の増大や車両の大型化による道路橋RC床版の損傷は著しく、その補修・補強工事が盛んに行われている。また、平成5年度には道路橋の設計自動車荷重が20tから25tに引き上げられたことから¹⁾、床版だけでなく、橋梁全体の耐荷力の照査が行われ、補強の必要があると判定されたものに対しては逐次補強工事が実施されているのが現状である。

橋梁、特にRC床版の補強工法としてこれまで一般的に用いられてきたものとしては、鋼板接着工法、上面または下面増厚工法、縦桁増設工法などがある。いずれも一応の補強効果が期待できるものの、反面、死荷重を増加させ、主構造や下部工の強度に対して負担増を強いるなどの問題を抱えている。

以上の背景から、炭素繊維などのFRP(繊維強化プラスチック)補強材は、軽量、高強度、耐食性、低温環境下での耐久性などにすぐれていることから、近年コンクリート補強材として注目され始めている。特に、阪神大震災以後のRC橋脚の耐震補強に炭素繊維シートが実用化されているのは周知の通りである。しかし、炭素繊維補強材(以下、CFRP補強材という)や接着剤の材料単価が高く、経済性の面で不利といわざるを得ない。

そこで本研究では、CFRPに比べて材料単価が1/10以下と安価で比較的成形加工が容易なガラス繊維補強材(以下、GFRP補強材という)に着目し、前述のRC床版を有する既設鋼橋の補強材としての適用性について研究するものである。本論文は、その第一段階として、CFRPに比べて強度およびヤング係数などの力学的性質に劣るGFRPの構造補強材としての適用の可能性を探るために、実橋の約1/2.5断面の小型模型供試体を対象とした定常疲労荷重試験を行い、床版や主桁のたわみや応力に対する低減効果について実験的検討を行ったものである。

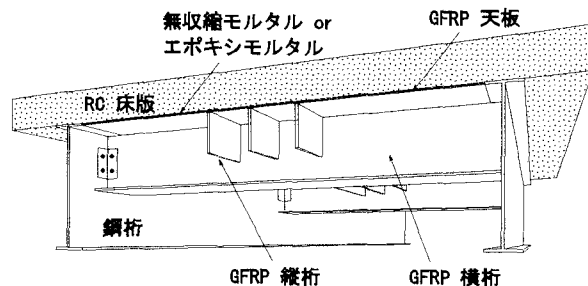


図-1 GFRP部材で補強した鋼橋概要図

2. 実験概要

2-1 供試体

GFRP 補強材で補強した RC 床版を有する鋼 I 桁橋の概要図を図-1 に示す。格子状に組んだ部材に天板を張り付けた GFRP 補強構造を床版下面に密着させ、部材の両端を主桁ウェブの上部側面にボルト接合によって取り付ける構造を考案した⁹⁾。GFRP 補強材の成形加工法、GFRP 部材と鋼桁との接合部など、種々の検討課題があるが、本研究では、考案した GFRP 構造の補強効果を、既設 RC 床版下面の接合状態をパラメータにして実験的に究明した⁹⁾。

供試体は、実橋断面を約 1/2.5 にスケールダウンしたもので、比較用の無補強供試体 (No.1) を含め、図-2, 3 に示す 4 体を製作した。主桁間隔 90.0cm、スパン長 2.0m で配置された H 鋼はり (H 鋼 : 350x175x6mm) とその上部に配置された厚さ 10.0cm、幅 1.3m の RC 床版から構成される非合成はり供試体である。RC 床版に埋め込まれた頭付きボルトを孔開けした主桁上フランジに軽く締め付けることにより、床版のアップリフトのみを拘束し、水平方向のずれを許容するように配慮した。

供試体は、表-1 に示すような GFRP 補強材の取り付け接合面の状態を変化させた 3 体と比較用の無補強供試体である。供試体 No.2 ~ 4 は、予め曲げ荷重してひび

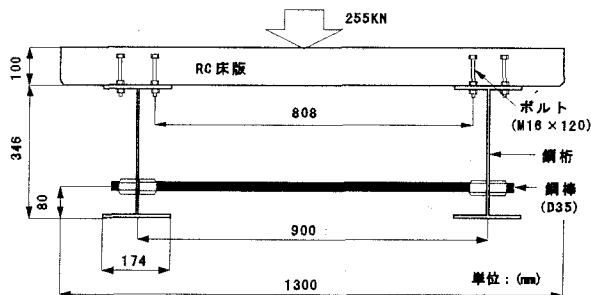


図-2 供試体 No.1

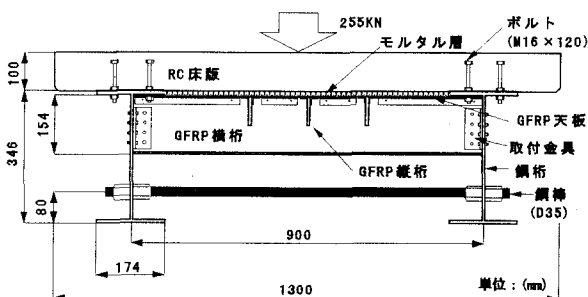


図-3 供試体 No.2, 3, 4

割れを生じさせた RC 床版下面に図-4 に示すような GFRP 補強材を取り付けたものである。供試体 No.2、3 は、GFRP 天板と床版下面の隙間に無収縮モルタルを充填した。この際、供試体 No.2 では、両者の接合面にビニールシートを介して付着を切り、No.3 では自然付着状態とした。また、供試体 No.4 は、充填材として接着強度の高いエポキシ樹脂モルタルを用いた。

使用した鋼材は SS400、各供試体のコンクリート強度およびヤング係数は表-2 に示すとおりである。また、GFRP の各部材の引張、圧縮の各方向の強度およびヤング係数を表-3 に示す⁹⁾。表より明らかなように、GFRP は FRP 特有の性質として繊維方向 (MD) および繊維直角方向 (TD) で異方性を有している (図-5 参照)。

表-1 床版下面の接合面の状態

供試体の種類	RC床版下面とGFRP天板との接合面
No. 1	無補強
No. 2	無収縮モルタル充填 (付着なし)
No. 3	無収縮モルタル充填 (自然付着)
No. 4	エポキシ樹脂モルタル充填 (接着)

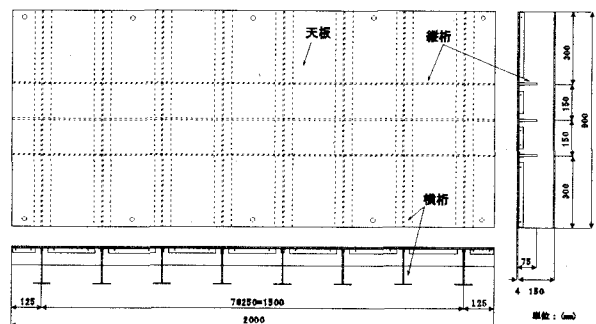


図-4 GFRP 部材詳細図

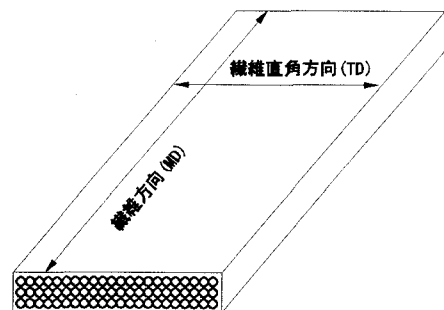


図-5 GFRP 繊維方向

表-2 コンクリートおよびモルタルの材料特性

	材令7日	材令28日	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	モルタル	エポキシ
圧縮強度 (MPa)	29.0	33.3	37.5	37.9	38.8	36.9	45.8	56.4
曲げ強度 (MPa)	-	-	3.9	5.3	4.8	5.1	-	-
ヤング係数 (GPa)	30.2	30.6	27.7	28.9	26.6	28.4	25.9	8.1

表-3 GFRP 部材の材料特性

部材	引張強度 (MPa)		引張ヤング係数 (GPa)		圧縮強度 (MPa)		圧縮ヤング係数 (GPa)	
	σ_{MD}	σ_{TD}	E_{MD}	E_{TD}	σ_{MD}	σ_{TD}	E_{MD}	E_{TD}
天板 (t=3mm)	290.1	107.0	22.0	12.0	304.9	80.9	18.9	8.4
縦桁 (t=8mm)	304.0	68.0	24.9	12.0	228.3	70.9	18.5	1.2
横桁 (t=4mm)	331.1	24.9	26.0	8.9	412.4	89.7	2.5	8.7

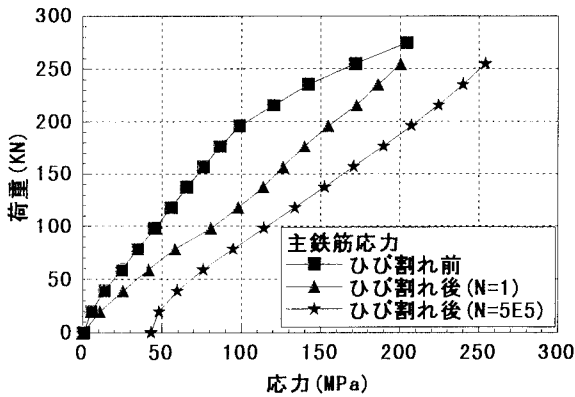


図-6 床版主鉄筋の荷重-応力度曲線 (No.1)

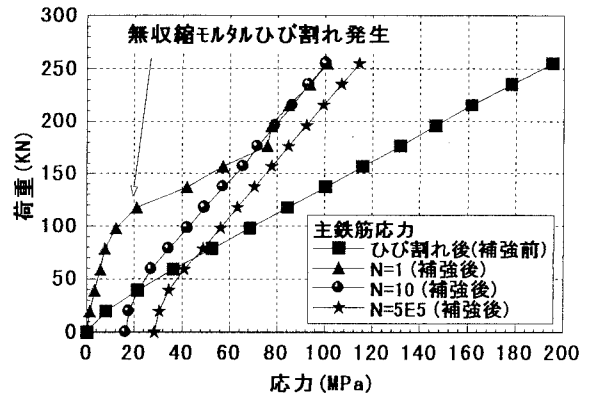


図-7 床版主鉄筋の荷重-応力度曲線 (No.2)

2-2 載荷試験方法

損傷 RC 床版を再現するために、全供試体に対して先ず最大荷重 26tf (255kN) まで静的漸増載荷を行った。この時、最大荷重時における RC 床版の主鉄筋応力度は許容応力度 1400kgf/cm^2 (137MPa) を超過する 2000kgf/cm^2 (196MPa)、最大ひび割れ幅は 0.2mm 超である。

続いて、No.1 を除く 3 供試体に対して、除荷後に 2-1 で述べたような GFRP 補強材を用いて補強した後、また、No.1 に対しては補強しないそのままの状態、それぞれ上限荷重を 26tf (255kN)、下限荷重 6tf (59kN)、繰り返し速度 2 ~ 3 Hz とする 50 万回の疲労試験を実施した。各繰り返し回数終了後ごとに、静的漸増載荷を行い、各部のひずみ、たわみ等を計測した。

3. 実験結果および考察

3-1 床版主鉄筋の応力挙動

供試体 No.1 における RC 床版主鉄筋の荷重-応力度関係を図-6 に示す。また、図-7 ~ 9 は、供試体 No.2 ~ 4 の同じく床版鉄筋について、補強前後の応力変化を示している。図中、■印は補強前、▲印は補強後の初載荷時、★印は 50 万回繰り返し後の結果を表している。

以下に、各供試体の主たる特徴を略述する。

(1) 供試体 No.1

上限荷重 255kN を処女載荷したときの発生応力度 189MPa が、50 万回繰り返し後には 254MPa に 30% 以上増加するとともに、床版下面にはひび割れ幅 0.2mm 以上の曲げひび割れが多数生じた (図-6)。

(2) 供試体 No.2

補強前の発生応力度 255MPa に対して、補強後は 50 万回繰り返し後においても 114MPa と半減した。また、補強直後の載荷時において、100kN までは充填した無収縮モルタルの引張抵抗が認められた (図-7)。

(3) 供試体 No.3

供試体 No.2 と同様の傾向が見られた。ただし、補強直後の載荷では充填モルタルのひび割れ発生が、供試体 No.2 の 100kN に対して 200kN と遅れ、床版下面における GFRP 補強材と既設 RC 床版との合成度の違いが明確に認められた。ただし、繰り返し載荷後においては、両者の差異は認められなかった (図-8)。

(4) 供試体 No.4

図より明らかなように、エポキシモルタルのすぐれた接着力と高弾性能力が発揮され、補強後の床版主鉄筋応力は補強前に比べて激減した。しかも、50 万回繰り返し後においても、その挙動はほぼ弾性的であることより、エポキシモルタル層の既設床版との一体化が期待できる (図-9)。

3-2 GFRP 補強材の補強効果

補強前後の各ケースの上限荷重 (255kN) 時における各供試体の床版および鋼桁のたわみおよび応力度の結果一覧を表-4 に示す。また、表-5 には補強前に対する補強後の各値の比を低減率としてまとめて示す。これらより、以下のことが明らかになった。

まず、床版に対する補強効果を見ると、たわみで各々 25 ~ 35%、また応力度では、無収縮モルタルを充填した供試体 No.2 および No.3 で 48%、エポキシモルタルを充填した供試体 No.4 で 62% の低減効果が認められた。これより、セメントモルタルおよびエポキシ樹脂モルタルの床版下面の接合面への充填は、RC 床版に対して大きな補強効果が期待できること、特に、高い接着力と伸び能力を有するエポキシモルタルの使用の効果は顕著であることが明らかにされた。ただし、セメントモルタルの接合面での付着の有無については顕著な影響は認められなかった。

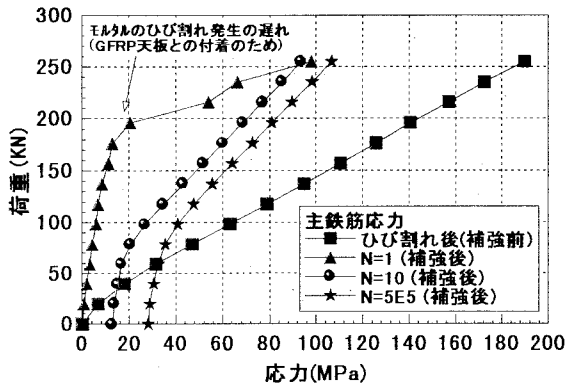


図-8 床版主鉄筋の荷重-応力度曲線(No.3)

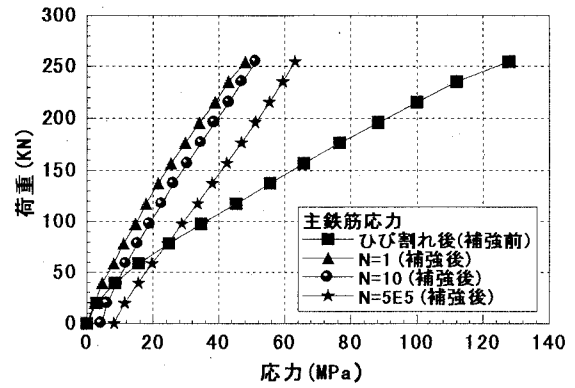


図-9 床版主鉄筋の荷重-応力度曲線(No.4)

表-4 上限荷重における各部の応力とたわみ

供試体	供試体状況	荷重状態	充填材	RC床版たわみ(mm)	主鉄筋応力(MPa)	鋼桁たわみ(mm)	鋼桁上フランジ 応力(MPa)				
							外側	内側	外側	内側	
No. 1	ひび割れ前	静的	—	3.09	188.9	1.35	外側	内側	外側	内側	
	ひび割れ後	疲労 N=1		3.22	200.4	1.32	-30.7	-49.3	55.8	70.1	
	ひび割れ後	疲労 N=5E5		3.92	254.0	—	—	—	—	—	
No. 2	ひび割れ前	静的	—	3.6	255.1	1.42	-38.4	-53.2	54.7	73.9	
	ひび割れ後	静的		2.96	195.3	1.26	-36.8	-48.0	54.1	69.8	
	補強後	疲労 N=1		無収縮モルタル (付着なし)	2.05	100.8	1.2	-26.4	-32.5	50.7	59.3
		疲労 N=5E5			2.3	114.2	—	—	—	—	—
No. 3	ひび割れ前	静的	なし	3.05	255.5	1.18	-32.3	-49.3	50.6	67.8	
	ひび割れ後	静的		2.63	189.9	1.09	-28.0	-43.4	50.6	64.6	
	補強後	疲労 N=1		無収縮モルタル (自然付着)	1.97	97.9	1.26	-32.1	-39.0	51.1	58.0
		疲労 N=5E5			2.19	106.7	—	—	—	—	—
No. 4	ひび割れ前	静的	なし	2.79	186.0	1.29	-18.7	-34.7	47.7	62.0	
	ひび割れ後	静的		2.32	127.8	1.14	-14.9	-27.5	46.9	58.6	
	補強後	疲労 N=1		ポキシル加 (接着)	1.49	48.0	1.12	-8.0	-11.4	43.1	48.5
		疲労 N=5E5			1.62	63.1	—	—	—	—	—

表-5 GFRP 補強による応力・たわみの低減率

低減率 (%)	RC床版		鋼桁				
	たわみ	鉄筋応力	たわみ	上フランジ応力		下フランジ応力	
				外側	内側	外側	内側
供試体No. 2	30.8	48.3	5.0	28.3	32.2	6.3	15.2
供試体No. 3	25.6	48.4	-15.6	-14.8	10.3	-1.0	10.3
供試体No. 4	35.7	62.4	1.75	46.0	58.5	8.2	17.3

一方、主桁に対する補強効果は、上フランジの応力度に対してはセメントモルタル充填で約 30%、エポキシモルタル充填で 50%と、ほぼ床版と同程度の効果が得られたものの、下フランジ応力度に対しては 10%程度しか補強効果が期待できないことがわかる。なお、供試体 No.3 については、載荷試験上の不備による桁の面外変形の影響から満足できるデータが得られなかった。

4. まとめ

既設の RC床版を有する鋼橋の補強材として GFRP 補強材の活用を目的として、模型供試体による定点疲労載荷試験を行い、RC床版や主桁の補強効果について検討した。得られた結果をまとめると、次のとおりである。

- (1) 本研究で取りあげた GFRP 補強構造では、床版下面の GFRP 材と既設床版との接合面の充填材として無収縮セメントモルタルを用いた場合に、RC床版に対して約 50%、主桁上フランジに対して 30%程度の補強効果が見られた。
- (2) また、エポキシ樹脂モルタル充填材を用いた場合でそれぞれ 60%、50%というきわめて大きな補強効果が認められた。

(3) しかし、鋼桁下フランジに対する補強効果は充填材の種類に関わらず 10%程度に止まり、別の補強策が必要であることを示唆する結果となった。

以上、低ヤング係数の GFRP でも既設鋼橋の補強材として適用が十分可能であることが判明した。したがって、今後は補強目標に合った GFRP 補強材の設計、既設構造と GFRP 補強材との接合法などについて、今後さらなる検討が必要である。

最後に、本研究を遂行するにあたり、旭硝子マテックス(株)、ヘンケルジャパン(株)には実験材料の提供など、多大のご協力を賜った。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、1993
- 2) 三菱重工工事機技術本部：RC床版補強への FRP 材構造の適用性研究 (ステップ 2)、平成 9 年 8 月
- 3) Basem, A.ほか：土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集 (セッション CS12) 1998.10.
- 4) 旭硝子マテックス(株)技術部：厚肉引抜き材の機械特性の強度検証、平成 9 年 3 月