接着接合GFRP板材を用いた 床版橋の断面に関する検討

中川原颯1・大西弘志2・盛合将和3

¹岩手大学大学院 総合科学研究科地域創生専攻(〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5) E-mail: g0119044@ iwate-u.ac.jp

²岩手大学教授 理工学部 システム創成工学科(〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5) E-mail: onishi@iwate-u.ac.jp

3東日本高速道路株式会社谷和原事務所改良課 (〒300-2435 茨城県つくばみらい市筒戸 1606)

本研究では GFRP 橋梁の開発経費節減と製作断面の自由度を確保する目的で接着接合による断面形成を考えた. GFRP 円筒と GFRP 平板を接着剤により接合することで異なる断面の板材を形成し、この板材に対して曲げ試験を行い力学的挙動を確認した. この曲げ試験を再現するための 3 次元有限要素解析を実施すると同時に、断面寸法の変化に伴う影響について検討を行った. また、この板材を小規模床版橋に適用する際の断面の詳細についての検討も行った.

Key Words: GFRP, slab, adhesive, cross section

1. はじめに

我が国の道路橋は 1950 年代後半以降の高度経済成長期を境に急激に増加しており、現在建設後 50 年を超えた道路橋(いわゆる老朽化橋梁)は約 40%存在する. りまた老朽化の原因の中でも鉄の腐食が問題視されている. 鉄の腐食のほとんどは、「湿食」による腐食である.

鉄の腐食のほとんどは、「湿食」による腐食である. 湿食を防止する基本的な対策は、水または酸素の供給を 断つことであり、塗装等の被膜による防食や耐食性材料 の使用による防食が現在行われている. しかし、これら の防食は塗膜や材料の劣化等があり、定期的に点検・補 修が必要とされコストがかかる上に、それでもなおエッ ジ部分やボルト部分に腐食が出てしまっているのが現状 である. 日本各地の41の地域において、一定期間内にお ける鋼材の腐食量を暴露試験によって調べ、大気環境の 分類区分ごとに整理した結果を図-1に示す. 沿岸地域は 過度の飛来塩分により腐食反応が促進されるため、これ らの地域は厳しい腐食問題にあるといえる.

そこで、腐食してしまう鋼材や鉄筋コンクリートの代替素材としてFRPを用いることに着目した。FRPは腐食劣化をしないため、飛来塩分が多い地域に適している。現在新設の土木構造物において、FRPが使用される場合は比較的安価なGFRPを用いるのが一般的である。GFRP

製品の成形方法は用途や形状によって決定しており,成 形する手段は多様である.

本研究では、GFRP 製の平板とパイプを接着接合を用いて作成した3種類の断面寸法の違うGFRP 板材に対し、静的載荷試験を行い力学的性能を確認した。その結果をもとに3次元FEMを用いて、GFRP 板材が断面寸法の変化に伴ってどのような影響を受けるか確認し、小規模床版橋への適用に向けた検討を行った。

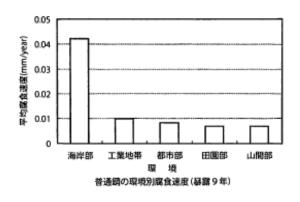


図-1.1 環境毎の鋼材腐食量2)

2. GFRP 板材の曲げ試験 ^{3)~4)}

(1) 試験体概要

この試験で用いた試験体の寸法を図-2.1、図-2.2に示す。これらの試験体は、GFRP製の各構造要素を接着接合により接合して製作した。本試験ではこの板構造の適用範囲を探るために構造諸元に変化をもたせた3種類の試験体に対して載荷を実施した。平板とパイプは接着接合を施し、パイプ同士の間には間隙を設けている。この試験体では軸方向の断面において、階段踏板等の用途を想定した側面の板(以下、側材とする)を片側に設けている。部材寸法の大きい順にtype-D、type-E、type-Fと名付けた。これらに使用したパイプの本数は5本、4本、6本であり、断面二次モーメントは27.287.018mm⁴.2,125.632mm⁴.1,161.792mm⁴となっている。

(2) 試験状況概要

本試験における載荷位置を図-2.3に示す. 今回は試験体に対して4点曲げ載荷試験を実施した. 小規模床版橋としての利用を見据え,4点曲げ試験を採用し曲げ耐力に着目した. 載荷方法には繰り返し漸増載荷を適用した. 載荷位置は全ての試験体において支間中央に長さ300mmの等曲げ区間を設定できるように配置した. 変位計とひずみゲージの設置位置を図-2.4,図-2.5に示す.図-2.5(a)内の点線はパイプと板材の接点を示し、ひずみゲージはパイプの直上とその中間に設置した.

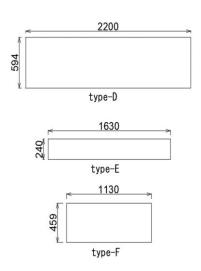


図-2.1 試験体寸法 (平面図, 単位:mm)

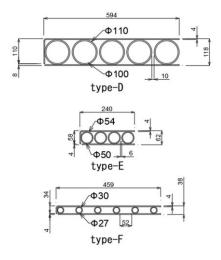


図-2.2試験体寸法 (断面図, 単位:mm)

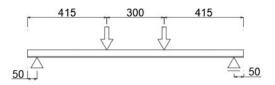


図-2.3 載荷位置 (typeF, 単位:mm)

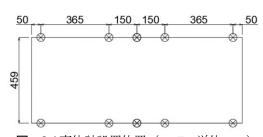


図-2.4変位計設置位置(typeF, 単位:mm)

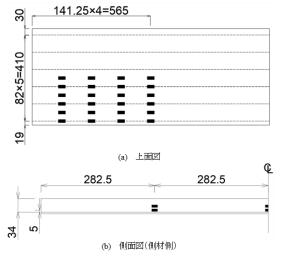


図-2.5 ひずみゲージ位置 (typeF, 単位:mm)

3. 試験結果

(1) 破壊状況

各試験体の破壊状況を写真-3.1に示す. 全ての試験体 において、載荷点付近の側材の表面上に(a)のような亀 裂が発生し繊維がむき出しとなって破壊した. type-Dと type-E においてパイプに亀裂が入り、それぞれ側材が付 いていない側面においてパイプと平板が剥がれ、板材 が湾曲するように破壊している((b), (c)). type-F は試験 体内部で側材側のパイプが屈曲していることを目視で 確認し破壊したと判断した. また, 一方の試験体端部 片側から載荷点の亀裂付近まで、(d)のようにパイプと 平板が完全に剥がれていた. 各試験体の破壊時の様子 は接着剤が剥がれる音と並行し、最大荷重を迎え破壊 に至った.

(2) 変位-荷重関係

各試験体の最大荷重と最大変位、荷重-変位関係から 得られるヤング係数を表-3.1 に示す. また, 各試験体の 荷重 - 変位関係を図-3.1 に示す. 本試験においても最大 荷重に至るまでに塑性変形は確認できなかった. 断面寸 法の大きい順に最大荷重が大きな値を示していて、最大 変位は type-E が最も大きな値を示している. また type-F は漸増載荷に伴い、14kN付近における変位量が増加し ており、試験体破壊時には最大変位時のヤング係数から



(a) type-D 側材表面



(b) type-D パイプ端部





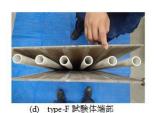


写真-3.1 破壊状況

表-3.1 静的載荷試験結果

試験体	最大荷重 (kN)	最大変位 (mm)	ヤング係数 (×10 ⁴ N/mm²)	
type-D	94.5	72.2	1.80	
type-E	37.3	77.0	3.22	
type-F	15.0	69.1	1.46	

51%ほど低下しているため、剛性が低下していることが わかる. これは試験体が載荷に応じて、端部の板材とパ イプが徐々に剥がれた影響によるものと考えられる.

(3) 変位-ひずみ関係

type-D-type-Fの試験体中央の圧縮側、引張側における 荷重とひずみの関係を図-3.2 に示す. type-D と type-E は、引張側の方が大きなひずみを示している. type-Fが 例外であり圧縮側の方が大きなひずみを示し、かつ圧 縮側と引張側のひずみの値が小さくなっている. これ は前述にある、荷重の増加とともに試験体の板材とパ イプの接着が徐々にはがれたことの影響だと考える.

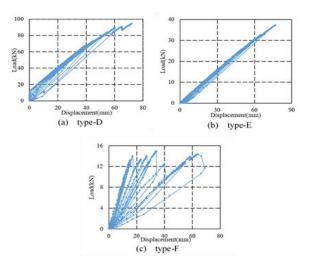


図-3.1 荷重-変位関係

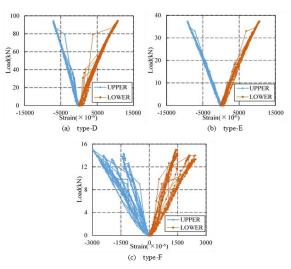


図-3.2 荷重-ひずみ関係

4. 曲げ試験に用いた GFRP の材料特性

(1) 試験体概

前述の曲げ試験に使用した試験体の上下に配置された GFRP 板材やパイプの物性を確認するための引張試験や 曲げ試験を実施した.これらの試験の結果に基づいて 5. 以降の計算や有限要素法による数値解析を実施している.

図-4.1 に引張試験に用いた試験体の寸法を示す.写真-4.1 に試験体設置状況と引張試験時の破壊状況の例を示す.使用した引張試験片は前述の曲げ試験に使用した試験体から切り出して作成した.この試験片の寸法や載荷方法はJISK7164に準拠している.試験片は1B号試験片を5つ用意し,試験結果として利用する物性値にはデータの平均値を利用することを考え,各測定値から最大値と最小値を除いた3つのデータを採用した.

写真-4.2 に曲げ試験に用いた試験体と載荷状況の一例を、表-4.1 に各パイプの成形法、図-4.2 に載荷試験の概要を示す。各試験体で用いたパイプは typeD-F で直径が異なるため、各々3 体の曲げ試験を行った。今回の曲げ試験では3点曲げによる載荷を行い、単調載荷により破壊させている。

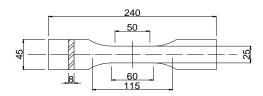


図-4.1 引張試験片寸法

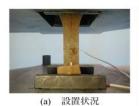




写真-4.1 引張試験概要



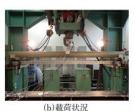


写真-4.2 曲げ試験概要

表-4.1 各パイプ成形法

	typeD	typeE	typeF
樹脂	ビニルエス テル	イソ系ポリ エステル	イソ系ポリ エステル
成形法	ハンドレイ アップ	引抜	引抜

(2) 引張試験結果

引張試験で得られた、各試験体における材料物性測定値を表-4.2 に示す。JISK 7164 に基づき弾性係数の算出には応力-ひずみ曲線のうち比較的直線的傾向を示した範囲(4000-6000 με)を用いた。試験片 2 のみ他の試験片と比べ強度、弾性係数ともに小さな値となった。これは試験片 2 を切り出した平板材部分に繊維のムラがあったためだと考えられる。

(3) 曲げ試験結果

各寸法のパイプに対する曲げ試験結果の平均値を表-4.3 に示す。この試験では破壊荷重に到達するまで応力ーひずみ関係は直線的であった。断面寸法が最大であるtype-Dの最大曲げ応力と曲げ弾性係数がtype-E, type-Fに比べて極端に小さい値となった。これは、type-Dのみ試験体に使用されている樹脂ならびに成形方法が他の試験体と異なっていることが原因だと考えられる。type-Eとtype-Fを比較すると、type-Fの最大曲げ応力はtype-Eより大きくなった。

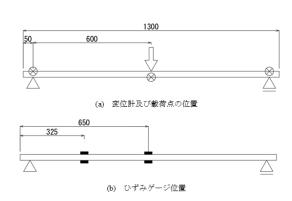


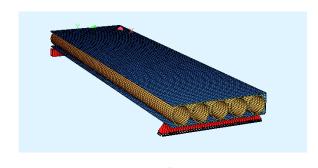
図-4.2 type-D試験体概要

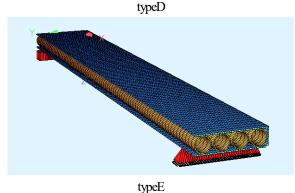
表-4.1 引張試験結果

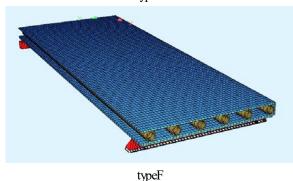
試験体	最大引張荷 重(kN)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
1	16.0	80.1	6.02
2	11.3	56.5	5.55
3	16.0	80.0	6.14

表-4.2 曲げ試験結果

試験体	最大荷 重(kN)	最大変 位(mm)	最大曲 げ応力 (MPa)	弹性係数 (GPa)
type-D	11.5	86.5	105.2	7.4
type-E	6.2	107.2	537.8	42.9
type-F	2.1	88.0	592.8	47.9







図−5.1 解析モデル概要

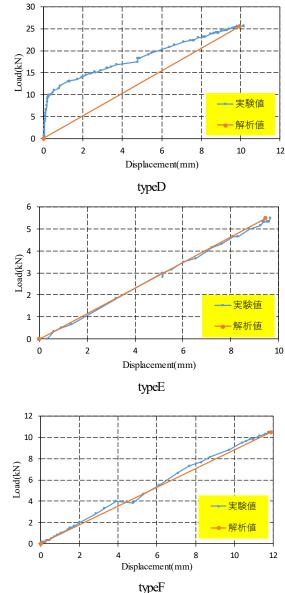


図-5.2荷重-変位関係 比較

5. 有限要素解析

(1) 解析モデル概要

今回提案する GFRP 板構造材を小規模橋梁床版として 利用するための課題を明らかにするため、3 次元 FEMに よる数値解析を行った. この解析で使用した材料物性値 には前述の材料試験から求められた値を用いた. 本研究 で作成した typeD-F の再現解析用有限要素モデルを図-5.1 に示す.

(2) 解析モデルの妥当性

本研究で使用する解析モデルや境界条件等の解析条件について妥当性を確認することを目的とした、板材試験体の曲げ載荷試験の再現解析を実施した。モデルtypeD-Fにおける実験値と再現解析で得られた荷重-変位

関係を図-5.2 に示す. 前述のように typeF は載荷途中で板とパイプ間の接着が徐々に剥離したことでたわみが増加している. 今回の解析では、板材とパイプの間の接合は完全結合を仮定し、実験における接着剤の剥離をモデル化できていないことから、実験と数値解析を比較する範囲は剥離の影響が少ない試験開始直後の部分を比較することとした. 他の試験体でも同様の範囲で比較した. 各モデルの最大荷重における変位を比較すると、typeD-Fにおいては 1 パーセント未満の差であったため妥当であると判断した. typeDのみ、荷重が 10kN あたりまで変位がうまく出ていないことが試験開始直後のデータからわかる. これは実験時の支点拘束が不正確であり、荷重が試験体にうまく伝わっていなかったからだと考える.

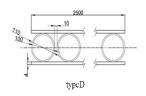
6. 小規模床版橋開発にむけ

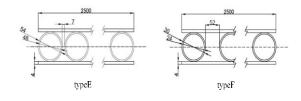
(1) 解析条件

本試験によって得られた結果をもとに各 type のパイプ の直径をそのまま利用し、小型床版橋を設計をすること 考えた. 今回設計する床版の規格は『道路橋示方書・同解説』(日本道路協会)》を参考にし、横幅は車椅子 2 台が すれ違うことができる 2000mm とした. 縦幅は 5000mm とし、床版厚は各 type の平板厚を変化させることで調整した. 図-6.1 に各 type の解析モデルの断面寸法と上面寸法を、図-6.2 に各 type の解析モデル全景を示す.

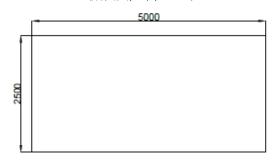
GFRP の場合他の材料と比べ、たわみが制限値より大きくなってしまう傾向があるため、今回はたわみ制限値のみ考慮して設計を行った。

『FRP 歩道橋設計・施工指針(案)』(土木学会) 6 を設計基準の参考とし,活荷重 5.0kN/ 2 に対してたわみ L/400以下を目標とした.また L/600以下も代表的であることからそれぞれの制限に適した厚さを type ごとに解析から求めた.





(断面図, 単位:mm)



(上面図,単位:mm) 図-6.1解析モデル寸法

表-6.1 実験値(平板厚 4mm)

	typeD	typeE	typeF	
パイプ直径	110mm	54mm	30mm	
最大たわみ	4.98mm	27.2mm	85.9mm	

(2) 解析結果

(a) 実験値

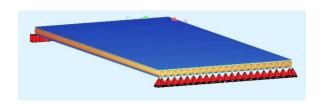
平板厚をtypeD-Fの実験値と同様に4mmとした際の,解析結果を $\mathbf{\bar{z}}$ -6.1 に示す. typeD のみ,たわみ制限値以内となった.

(b) 断面2次モーメント統一

typeE-Fの平板厚を変化させ typeD と断面 2 次モーメントが近しい値となるようにした. この際の解析結果を表-6.2 に示す. 断面 2 次モーメントはほぼ近しい値としたが最大たわみに 1mm 程度の差が出た. これは解析モデルのメッシュの細かさに差があることが要因と考えられる. またモデル中央断面における各 type の応力集中を図-6.3 に、接着点の応力を表-6.3 示す. 図より typeFにおいて平板とパイプの接着点における応力集中が大きいことがわかる. これは他の type に比べ、パイプの直径小さく平板が厚いことが要因と考えられる.

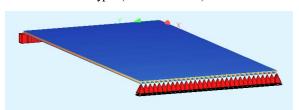
(c) たわみ制限値

各 type の最大たわみが、たわみ制限値以内に近づくように設計したものを表-6.4,6.5に示す. typeD はパイプの直径が大きいことから、平板厚はかなり小さくすることができるが床版厚が最も大きい. typeF は床版厚が最も小さいが、平板厚が 22mm とかなり厚くなっている. typeE は上記 2 つと比べパイプ直径、平板厚ともに平均的な値をとっているがパイプの本数が最も多くなる.

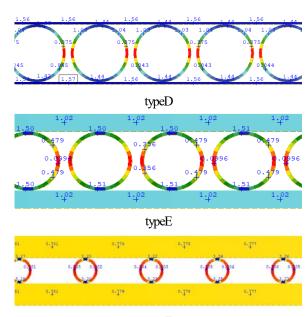


typeD(パイプ本数 20)

typeE(パイプ本数 40)



typeF(パイプ本数 30) 図-6.2 解析モデル全景



typeF **図-6.3** 応力分布図

表-6.3 接着点におけるミーゼス応力(Pa)

	typeD	typeE	typeF
平板厚	4mm	16mm	26mm
パイプ直径	110mm	54mm	30mm
ミーゼス 応力	1.44	1.51	326

7. 結論

本研究では、接着接合を用いて作成された板材の静 的再試験を行い力学的挙動を確認した。また FEM で板 材の再現を行い小型床版橋としての利用に向けて検討 を行った。得られた結果を以下に示す。

- ・接着接合を用いた GFRP 板材は荷重の増加とともに接着剤の剥離が徐々に起こり、たわみが増加する.
- ・typeDのパイプ直径 110mm は、平板厚を最低の 1mm と設定してもたわみ制限値を満たす.
- ・typeFの断面二次モーメントを typeD と近い値をとるように平板厚を設定すると、平板厚が大きくなり他のtype より平板とパイプの接着点におけるミーゼス応力が 2倍ほどになる.

表-6.2 断面 2 次モーメント統一

	typeD	typeE	typeF
パイプ直径	110mm	54mm	30mm
平板厚	4mm	16mm	26mm
床版厚	118mm	86mm	82mm
断面2次 モーメント	1.10E8 mm ⁴	1.06E8 mm ⁴	1.10E8 mm ⁴
最大たわみ (<12.5mm)	4.98mm	5.74mm	6.227mm

表-6.4 たわみ制限 L/400 以下

X 01. 724-57 [13] X 2. 100 5(1)				
	typeD	typeE	typeF	
パイプ直径	110mm	54mm	30mm	
平板厚	1mm	8mm	18mm	
床版厚	112mm	70mm	66mm	
断面2次 モーメント	6.1E7mm ⁴	4.47E7mm ⁴	5.5E7mm ⁴	
最大たわみ (<12.5mm)	8.76mm	12.7mm	11.7mm	

表-6.5 たわみ制限 L/600 以下

	typeD	typeE	typeF
パイプ直径	110mm	54mm	30mm
平板厚	2mm	12mm	22mm
床版厚	114mm	78mm	74mm
断面2次 モーメント	7.64E7mm ⁴	7.16E7mm ⁴	7.95E7mm ⁴
最大たわみ (<8.3mm)	7.01mm	8.16mm	8.35mm

参考文献

- 1) 土木学会 関西支部:コンクリート構造の設計・施工・ 維持管理の基本、社団法人 土木学会関西支部、 pp335, 2009.10
- 2) 建設省土木研究所, (社) 鋼材倶楽部, (社) 日本 橋梁建設協会:耐候性鋼材の橋梁への適用に関する 共同研究報告書(XV) - 耐候性鋼材の暴露試験の まとめー全国暴露試験の第5回腐食量測定結果(9 年目), 1992.
- 3) 土木学会:複合構造レポート09, FRP部材の接合および 鋼と FRPの接着接合に関する先端技術,丸善出版, 2013.
- 4) 盛合将和,大西弘志 FRPを用いた構造用部材の構造性 能評価に関する研究,2020.
- 5) 社団法人 日本道路協会:道路橋示方書・同解説,第1 編,丸善出版,2017
- 6) 土木学会:複合構造シリーズ 04, FRP 歩道橋設計・施工指針(案),丸善出版,2011.

(Received August 28, 2020)

A STUDY ON CROSS SECTION OF SLAB BRIDGE USING GFRP MEMBER BUILT WITH ADHESIVE BONDING

Hayato NAKAGAWARA, Hiroshi ONISHI and Masakazu MORIAI

In this study, the author considered the cross-section formation by adhesive bonding for the purpose of reducing the development cost of GFRP bridge and ensuring the flexibility of the production cross section. Plates with different cross-sections were formed by joining the GFRP cylinder and GFRP flat plate with an adhesive. A bending test was performed on this plate material to confirm its mechanical behavior. 3D finite element analysis was carried out to reproduce this bending test, and the effects of changes in cross-sectional dimensions were investigated. Moreover, the detail of the cross section when this board was applied to a small-scale slab bridge was also examined.