

論文

接着接合により構成された道路橋 GFRP 床版の断面に関する基礎的検討

中川原颯*, 大西弘志**, 盛合将和***

*岩手大学大学院生 総合科学研究科地域創生専攻コース (〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5)

**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)

***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)

近年, 国内の各種社会基盤構造物において鋼材の腐食に起因する損傷が数多く認められている. 腐食損傷に対する抜本的対策の一つとして腐食しない素材である GFRP を活用した構造の適用が考えられている. GFRP で複雑な形状の断面を有する部材を成型する場合, 手法によっては著しく大きな経費が発生する. 本研究では経費の節減と製作断面に対する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. 本研究では対象部材として橋梁床版を考え, 鈹桁橋に使用する際に考えられる断面の可能性について 3 次元 FEM 解析により検討を加えることとした.

キーワード: 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¹⁾. 国土交通省及び内閣府沖縄総合事務局が管理する全国の道路橋を対象に行われた, 平成 30 年度までの定期点検に基づく損傷種類別の健全性診断結果を図-1.1 に示す²⁾. 主要部材である主桁と床版の双方において, コンクリート部材に生じたひび割れの約 20~40%, 鋼部材に生じた腐食の約 60%において何らかの対策が必要と診断されており, 鋼部材の腐食に関しては緊急性を要する損傷が占める割合が 20%程度に達していることから, 道路橋の老朽化に対する対応は喫緊の課題である.

自治体等の各管理団体では道路橋に対して長寿命化修繕計画を策定, 実施することで, 維持管理の効率化を図っている. 現状で発生している道路橋における劣化現象の根本的な解決には, 道路橋に用いられるコンクリートや鋼部材といった材料自体を見直す必要があるものと考えられる. このような方針に対応できる耐久性に優れた新材料として本研究ではガラス繊維強化樹脂(Glass Fiber Reinforced Plastics, 以下, GFRP)に着目した.

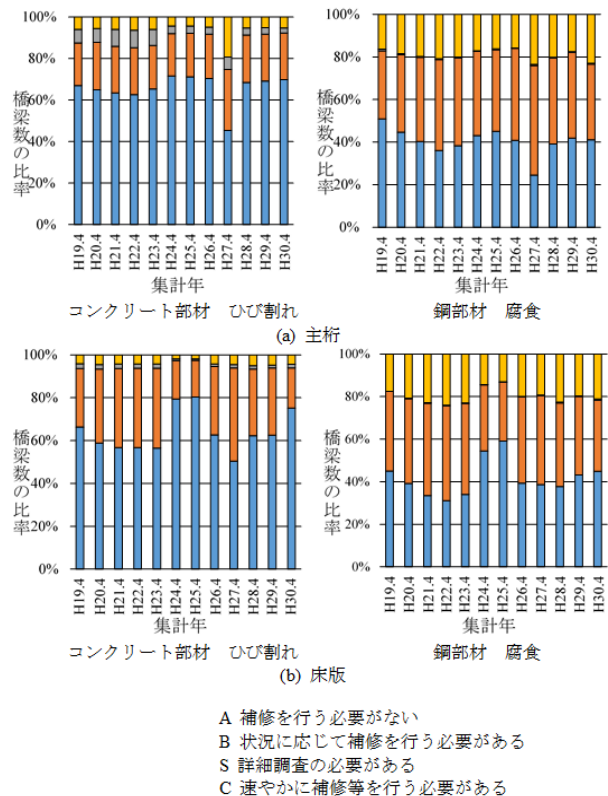


図-1.1 定期点検に基づく損傷種類別の健全性診断結果

出典: 国総研資料 第 1075 号

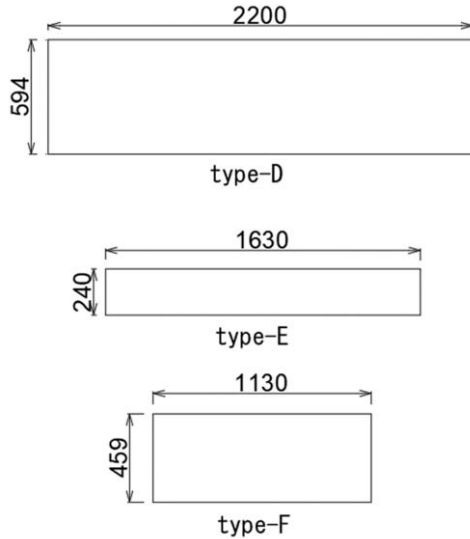


図-2.1 試験体寸法 (平面図, 単位: mm)

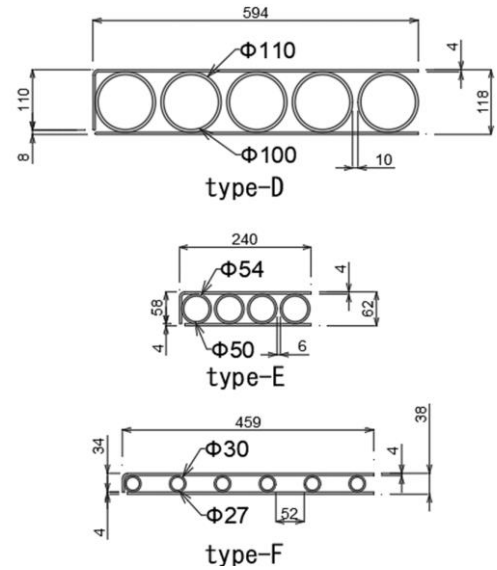


図-2.2 試験体寸法 (断面図, 単位: mm)

2. GFRP 板材の曲げ試験³⁾⁻⁴⁾

2. 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 $27,287,018\text{mm}^4, 2,125,632\text{mm}^4, 1,161,792\text{mm}^4$ となっている.

2. 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. 基本的な構造性能を把握するため, 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.

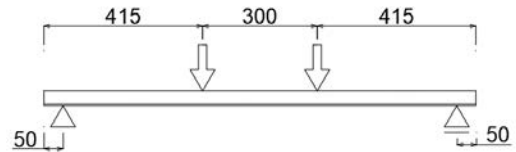


図-2.3 載荷位置 (typeF, 単位: mm)

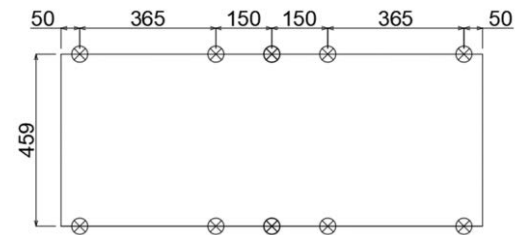


図-2.4 変位計設置位置 (typeF, 単位: mm)

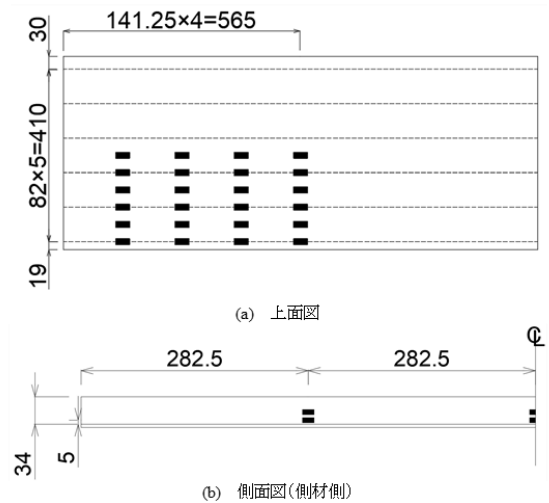


図-2.5 ひずみゲージ位置 (typeF, 単位: mm)

3. 試験結果

3. 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、荷重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荷重点の亀裂付近まで、(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。

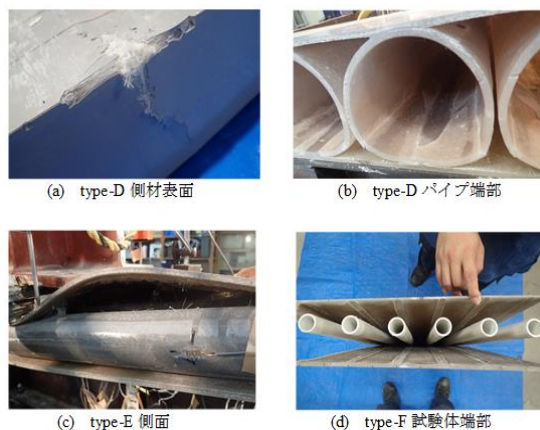


写真-3.1 破壊状況

3. 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る。最大変位は type-E が最も大きな値を示している。また type-F は漸増荷重に伴い、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 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。これは試験体が荷重に応じて、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。

表-3.1 静的荷重試験結果

試験体	最大荷重 (kN)	最大変位 (mm)	ヤング係数 ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)
type-D	94.5	72.2	1.80
type-E	37.3	77.0	3.22
type-F	15.0	69.1	1.46

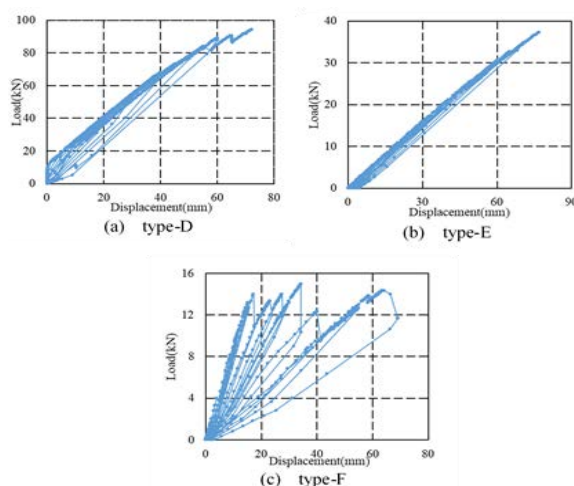


図-3.1 荷重-変位関係

3. 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剥がれたことの影響だと考える。

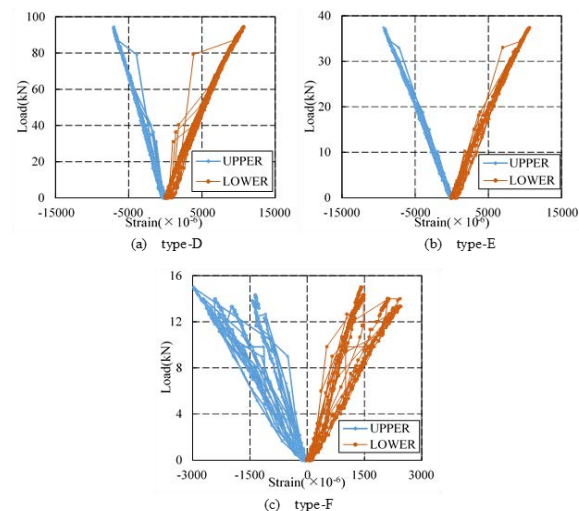


図-3.2 荷重-ひずみ関係

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

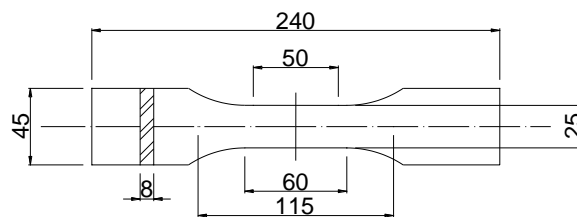


図-4.1 引張試験片寸法

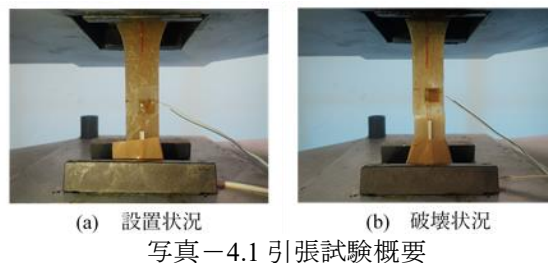
4. 曲げ試験に用いた GFRP の材料特性

4. 1 試験体概要

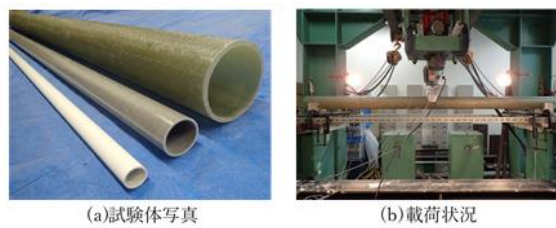
前述の曲げ試験に使用した試験体の上下に配置された GFRP 板材やパイプの物性を確認するための引張試験や曲げ試験を実施した。これらの試験の結果に基づいて 5.以降の計算や有限要素法による数値解析を実施している。

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荷重方法は JIS K 7164 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。

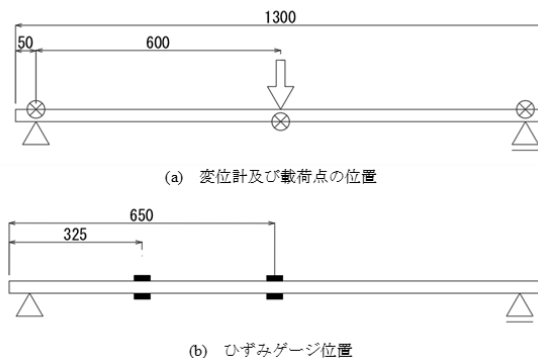
写真-4.2 に曲げ試験に用いた試験体と荷重状況の一例を、表-4.1 に各パイプの成形法、図-4.2 に荷重試験の概要を示す。各試験体で用いたパイプは typeD-F で直径が異なるため、各々 3 体の曲げ試験を行った。今回の曲げ試験では 3 点曲げによる荷重を行い、単調荷重により破壊させている。



(a) 設置状況 (b) 破壊状況
写真-4.1 引張試験概要



(a)試験体写真 (b)荷重状況
写真-4.2 曲げ試験概要



(a) 変位計及び荷重点の位置 (b) ひずみゲージ位置
図-4.2 type-D 試験体概要

4. 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。JIS K 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 $\mu\epsilon$) 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。

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

4. 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-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。

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)	弾性係数 (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

5. 有限要素解析

5. 1 解析モデル概要

今回提案する GFRP 板構造材を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次元有限要素プログラム SOFISTIK 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。

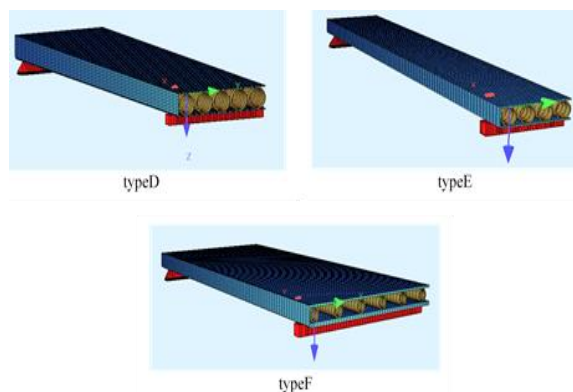


図-5.1 解析モデル概要

5. 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、板材試験体の曲げ荷重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 は荷重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、typeE~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。

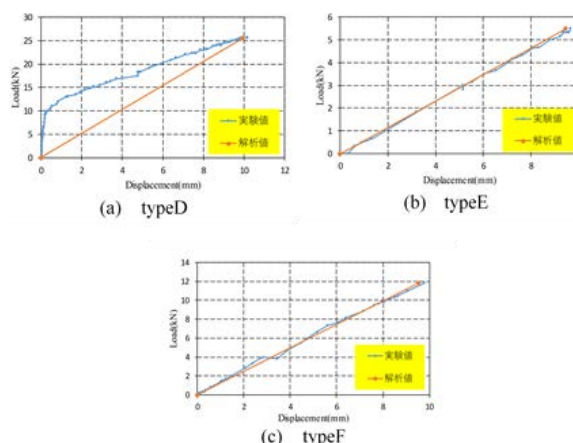


図-5.2 荷重-変位関係 比較

6. 橋梁床版利用に向けた解析

6. 1 解析条件

(1) 解析モデル寸法

図-6.1 に解析モデルの断面寸法を示す。パイプの厚さは 10mm で固定し、最大たわみの値を確認しながらパイプ直径と平板厚(10~20mm)の調整を行った。ヤング率は typeE と同様にした。

(2) 載荷荷重及び各種条件

載荷荷重は、『道路橋示方書・同解説』(日本道路協会)⁹⁾の T 荷重を参考に 200×200mm の分布荷重 25kN を、板材の上面中央に載荷した。図-6.2 に解析モデルの上面図及び載荷位置を示す。

境界条件として 4 辺単純支持を適用し、パイプは橋梁床版における橋軸直角方向に向くように配置した。まず、この構造体のおおよその挙動を確認するために Huber の直交異方性板に対する板理論

(式(a)) による計算を実施した。

$$Dx \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2H \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + Dy \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} = q(x, y) \quad (a)$$

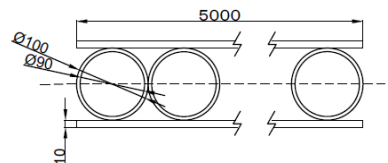


図-6.1 断面寸法 (単位: mm)

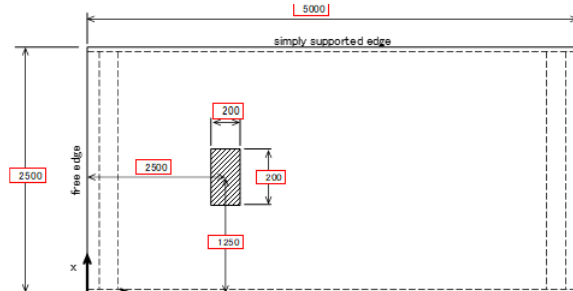


図-6.2 上面図及び載荷位置 (単位: mm)

表-6.1 断面ごと最大たわみ(理論値)

パイプ直径 (mm)	平板厚さ (mm)	最大たわみ (<4.16mm)
100	10	2.26
80	10	3.42
70	10	4.34
60	10	5.74
70	20	1.86
60	20	2.36

計算によってもとめられた値を表-6.1に示す。
 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いう傾向があるため、今回はたわみ制限値のみを考慮した。計算されたたわみが適切であるかどうかについての判断は『FRP歩道橋設計・施工指針(案)』(土木学会)⁶⁾や『FRP水門設計・施工指針(案)』(土木学会)⁷⁾を参考として、L/600以下を目標とした。

6.2 解析結果

Huberの板理論による計算でモデル中央の最大たわみが許容値以内に収まっている断面の組み合わせに対して有限要素モデルを構築し、数値解析を行った。表-6.2にHuberの板理論による値と数値解析値の比較を示す。FEMにより与えられる最大たわみがHuberの板理論による計算値より大きな値をしめしている。このような計算結果の差異が生じた原因としては、有限要素モデルにおける要素の大きさの影響が考えられる。ただし、Huberに代表される板理論では板の内部に空洞があるなどの形状を考慮できるようなはなっておらず、中実の板として対象をモデル化しているのに対して、FEMでは今回のモデルのように空洞部まで再現して解析を進めることが出来ていることにも大きな原因があるものと考えられる。

6.3 橋梁床版利用に向け

橋梁床版としての利用に向け、今回の作成した板材に輪荷重を想定した荷重100kNを板材の上面中央に200×500の分布で載荷し、挙動を確認した。解析モデルの載荷位置(a)、全体図(b)、載荷状況(c)を図-6.3に、解析値を表-6.3に示す。解析結果より、最大たわみが許容値以内に収まっているモデルはなく最も小さなたわみでも許容値の2倍ほどの値となった。

7. まとめ

本研究では、接着接合を用いて作成された板材をFEMで再現し橋梁床版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。

- 1) 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。
- 2) 断面の構造の影響などから、たわみの理論値(Huber)と解析値の値には差が生まれ、解析値の方が大きい値を示す。
- 3) 最大たわみの比較から、パイプの直径が小さく、本数が多い断面ほど理論値と解析値の差が小さくなった。

表-6.2 最大たわみ比較

パイプ直径 (mm)	平板厚 (mm)	最大たわみ(mm)	
		Huber	FEM
100	10	2.26	4.10
80	10	3.46	4.56
70	20	1.86	2.67
60	20	2.36	3.00

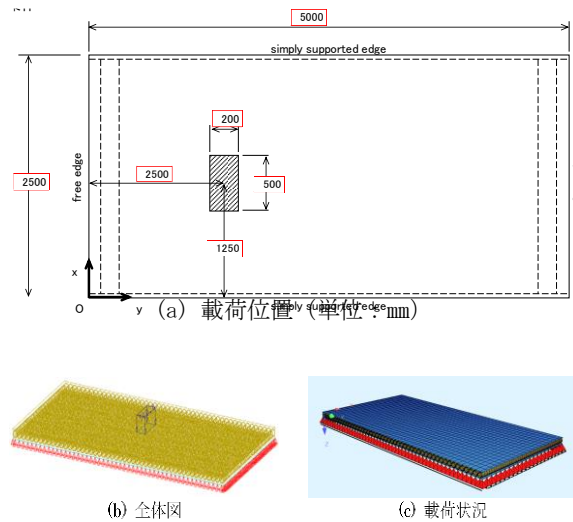


図-6.3 解析概要

表-6.3 最大たわみ比較(100kN)

パイプ直径 (mm)	平板厚 (mm)	最大たわみ(mm)	
		Huber	FEM
100	10	8.86	16.0
100	20	4.07	8.56
70	20	7.28	10.4
60	20	9.24	12.0

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) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：平成30年度道路橋に関する基本データ集，国土技術政策総合研究所資料，第1075号，2019.5
- 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.
土木学会：複合構造シリーズ06，FRP水門設計・施工指針(案)，丸善出版，2014.

(2020年7月17日受付)