

V-5 FRPの道路構造物への適用に関する調査

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）

研究期間：平 13～平 17

担当チーム：新材料チーム

研究担当者：西崎 到、木嶋 健

【要旨】

沿岸地域の道路構造物は海塩の影響による厳しい腐食環境におかれており、防食対策にかかる費用は膨大なものとなっている。このため、耐塩害性能に優れた構造材料を土木構造物に導入することが求められている。本研究では、耐塩害性能に優れた構造材料として FRP（繊維強化プラスチック）を取り上げ、汎用性の高い鈹桁形式歩道橋への適用可能性について検討を行った。設計法については、活荷重たわみ制限を緩和した道路橋示方書の設計法に準拠した方法が適用できることを示した。また、個別要素技術については、経済性を考慮して小断面部材を組み合わせたビルトアップ主桁部材が適用できることや、ボルト接合においては鋼材以上に軸力が重要であることを示した。

キーワード：FRP、鈹桁形式歩道橋、主桁部材設計法、ビルトアップ主桁部材、ボルト接合

1. はじめに

FRP を構造部材として橋梁へ適用する場合には、橋梁種別、橋梁形式、スパン長、コスト等を考慮する必要がある。FRP 橋梁の実現可能性を考えた場合、現時点では歩道橋への適用を検討するのが適当である。FRP 歩道橋の適用例として、既設道路橋に添架する側道橋や沿岸地域の歩道橋等が考えられるが、この様な箇所では橋梁形式を鈹桁形式とするのが一般的である。FRP を構造部材として鈹桁形式歩道橋へ適用する場合には、技術的課題と経済的課題の両方を検討することが必要である。技術的課題としては、FRP 主桁部材や接合部の強度特性を把握することがあげられる。土木構造材料としての利用が期待される GFRP や CFRP は、鋼材に比べて弾性率が低いため、特に主桁部材として使用する場合にはたわみが問題となる。また、FRP は脆性的な強度特性を有しており、延性的な強度特性を有する鋼材のように降伏点が存在しないため、設計強度の取り扱いが鋼材とは異なる。さらに、FRP の引張強度は鋼材とほぼ同等であるが、圧縮強度やせん断強度は鋼材よりも低いため、鋼材で得られた種々の知見をそのまま利用することは困難と考えられる。一方、FRP のボルト接合強度は、圧縮強度やせん断強度に支配されるため、鋼材のボルト接合強度に比べて低くなると考えられる。一方、経済的課題としては、歩道橋の全体価格を抑制することがあげられる。そのためには主桁部材のコストをできるだけ抑制することが重要であるが、コストは成形法により異なるため、成形法と対応させた検討が必要となる。

本研究では、歩道橋の構築にあたって生じる上記の技

術的および経済的課題について検討を行った。技術的課題については、FRP 主桁部材およびボルト接合の強度特性を実験および FEM 解析等により整理した。また、経済的課題については、鈹桁形式 FRP 歩道橋およびトラス形式 FRP 歩道橋を対象として、経済性をスパン長と関連づけて整理した。

2. 研究方法

本研究では、①鈹桁形式 FRP 歩道橋の主桁部材設計法、②経済性に配慮して小断面部材を組み合わせた主桁部材（ビルトアップ主桁部材）の曲げ試験および FEM 解析による検証、③ボルト接合の強度特性、④主桁部材および FRP 歩道橋の経済性、の 4 点について検討を行った。本研究で対象とした鈹桁形式 FRP 歩道橋は、幅員 3.5m の 2 主構断面である。図-1 にイメージ図を示す。構造材料として用いる FRP は、価格が安く一般的に用いられている GFRP を基本とした。FRP 歩道橋の設計は、鋼橋の設計で一般に用いられている「道路橋示方書・同解説

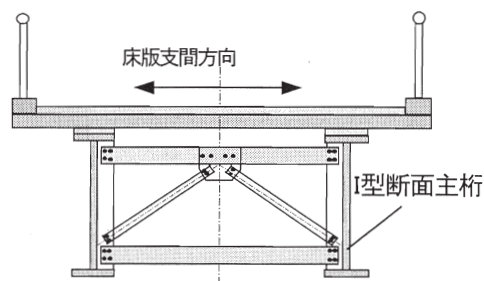


図-1 鈹桁形式 FRP 歩道橋のイメージ図

（鋼橋編）」に示す許容応力度設計法に基づいた。FRP 構造部材の実験は、基本的な特性を把握する観点から条件を単純化し、ビルトアップ主桁部材については4点曲げ試験、ボルト接合についてはダブルラップ試験を対象とした。また、FEM 解析には、汎用ソフトウェアの ANSYS を用いた。

3. 研究結果

3.1 主桁部材設計法

FRP 主桁部材の設計法構築にあたっては、「道路橋示方書・同解説（鋼橋編）」に準拠するものとした。図-2 に設計手順や照査内容の考え方を示すが、道路橋示方書の設計方法とは、たわみ照査の方法や座屈照査の方法が異なっている。たわみ照査については、鋼橋での基本たわみ許容値（支間長の 1/600）を FRP 橋にそのまま適用すると、GFRP の剛性が低いため強度設計ではなくたわみ設計となり、本来の材料特性を活かした設計とはならない。また、座屈照査については、鋼橋における座屈照査方法（降伏点まで応力が作用すると仮定し、フランジ幅厚比はオイラー座屈強度により規定される）を FRP にそのまま適用すると、FRP には降伏点がないため過大設計となり、合理的な設計方法とはならない。

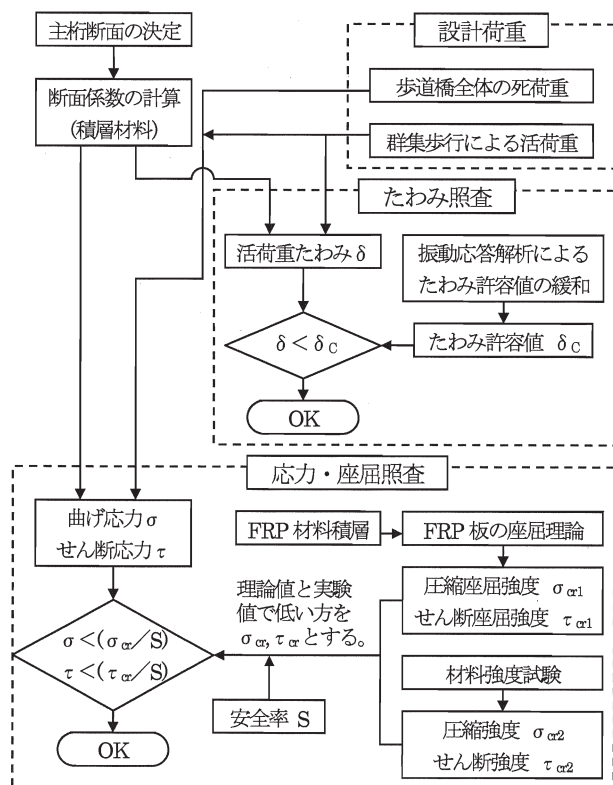


図-2 FRP 主桁部材の設計フロー

3.1.1 たわみ許容値の緩和

「道路橋示方書・同解説（鋼橋編）」では、たわみ許容値は「主桁支間長 L の 1/600」とされているが、「立体横断施設技術基準・同解説」では、「利用者への影響に配慮を加えた場合は支間長の 1/400 で良い」とされている。本研究では、活荷重たわみ制限の $L/400$ への緩和を目的として、歩行者通行時の振動応答解析を実施して利用性の評価を行った。

(1) 検討モデル

検討した主桁断面は、桁高を 1m および 1.2m として、応力により決定される断面 (Case1-1 および 2-1)、活荷重たわみ ($\leq L/600$) により決定される断面 (Case1-2 および 2-2)、活荷重たわみ制限を $L/400$ または $L/300$ に緩和して決定される断面 (Case3 および 4: 断面 2 次モーメントのみ設定) の 6 ケースを対象とした。なお、断面設計は、橋長 20m モデル、曲げ強度 300MPa、せん断強度 100MPa、弾性係数 20GPa、安全率 3.2 として行った。試算結果を表-1 に示す。

表-1 振動計算の主桁断面ケース (単位: mm)

Case	1-1	1-2	2-1	2-2	3	4
桁高 [m]	1	1	1.2	1.2	—	—
断面決定	応力	たわみ $L/600$	応力	たわみ $L/600$	たわみ $L/400$	たわみ $L/300$
主桁本数	2	5	2	3	—	—
Web	桁高 H	H960	H1000	H1200	—	—
	板厚 t	t12	t15	t9	t15	—
Flg	幅 B	B320	B350	B260	B350	—
	板厚 t	t12	t35	t11	t40	—
合計 I [$\times 10^{10} \text{mm}^4$]	0.54	3.91	0.679	3.88	2.55	1.91

(2) 歩行条件による活荷重の設定

活荷重は、幅員 3.5m 内に 5 人が平行して同調で歩く条件とした。条件設定は、「立体横断施設技術基準・同解説」に従い、「体重: 70 kg、占有幅: 0.75m、同時歩行人数 = $3.5 / 0.75 = 4.67 \rightarrow 5$ 人と設定、歩調: 約 2Hz で 5 人が同調、歩行速度: 1.3m/s」と設定した。なお、振動照査は、歩行者の歩行周波数 1.5~2.3Hz 範囲内での最大応答値とした。

(3) 振動計算条件

減衰は、1.5% (沖縄 FRP 歩道橋実測値) 及び 0.75% とした。死荷重は、8.127[kN/m] (全ケース共通固定) とした。加振力は、歩行時における片足の載荷重 $F_0 = 0.4F$ (F : 静荷重 $5 \times 70 = 350 \text{kg}$) とした。

(4) 振動解析結果

加速度応答解析結果を図-3に示す。図-3には各基準の振動許容値 (0.1G以下*, 0.5f^{0.5}以下**) も併記している。応力制限ケース (1・1, 2・1) は固有振動数が 1.5~2.3Hz 範囲にあり許容値以上となったが、たわみ制限 L/300, L/400 では許容値以下であった。また使用性 (歩行者の振動感覚) に関するじょ限度 (許容値) を実効値 1.7[cm/s] とすると、たわみ制限 L/400 (ケース 3) では 1.5[cm/s] であり許容値以下であった (歩行者数や負荷状態は安全側評価)。以上からたわみ制限は L/400 を基準とするのが妥当と判断される。

(*立体横断施設技術基準・同解説, **BS5400)

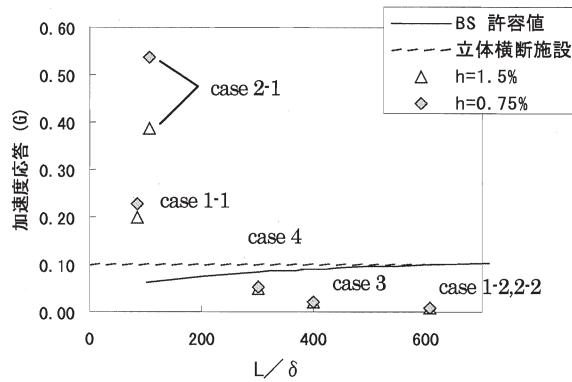


図-3 たわみ許容値と振動許容値との関係

3.1.2 座屈強度の照査

応力照査では、FRP 板の座屈理論から求まる座屈強度 (圧縮、せん断)、あるいは材料実験から求まる強度により照査を行う手法とした

(1) 座屈強度の考え方

FRP 板の座屈強度は、直交異方性材料の積層理論に基づく曲げ剛性 ($D_{11}, D_{12}, D_{22}, D_{66}$) を用いて、圧縮・せん断の座屈理論式(1),(2)を適用した。

$$\sigma_{cr} = 2\pi^2 / (t \cdot b^2) \cdot \{ \sqrt{D_{11} \cdot D_{22} + D_{12} + 2D_{66}} \} \dots (1)$$

$$\tau_{cr} = C_a \cdot \{ \sqrt{D_{11} \cdot D_{22}^3} \} / \{ (b/2)^2 \cdot t \} \dots (2)$$

$b = bo/f$, bo : 部材幅 (ウェブ高, フランジ突出幅)

f : 応力勾配補正係数, C_a : 係数***

(***: 「複合材料工学 (日科技連)」による)

(2) 主桁部材の設計照査法

図-4 に示す I 型主桁部材のウェブとフランジの強度照査は、(3)式および(4)式に従った。

$$\text{ウェブ照査: } \{ (\sigma / \sigma_{cr}) + (\tau / \tau_{cr})^2 \} \cdot S < 1 \dots (3)$$

$$\text{フランジ照査: } (\tau / \tau_{cr}) \cdot S < 1 \dots (4)$$

(S: 安全率)

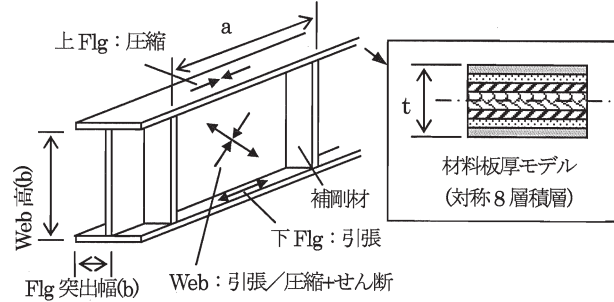


図-4 主桁部材の構造モデル

3.2 ビルトアップ主桁部材の構築

鋳桁形式 FRP 歩道橋の主桁部材は、自動車・航空等の分野で一般に使用されている FRP 部材よりも大断面になる。大型断面形状の成形材には、ハンドレイアップ成形材を用いるのが一般的であるが、品質や強度の安定性に課題が残る。一方、引抜成形法は、優れた寸法精度、強度の均一性、高い生産性等の特徴を有する優れた成形法であるが、少量の成形材や大断面の成形材には不経済となるため、上記主桁部材の成形法として実用化されていない。大断面を有する主桁部材への引抜成形材の経済的な適用方法として、小断面の引抜成形材を要求される強度・剛性に応じてビルトアップする方法が有効と考えられる。

3.2.1 主桁部材の試設計

3.1.1 および 3.1.2 の結果に基づいて、実験用 3m、実

表-2 FRP 主桁部材の試設計例

スパン [m]	3(実験用)	3(実験用)	10
幅員[m]	1	1	3.5
補剛材間隔 [m]	1	1	3
主桁部材の構成および寸法			
活荷重たわみ/許容値 (L/400)	0.38/7.5	5.28/7.5	21.52/25
設計応力 [N/mm ²]	曲げ応力	9.8	51.3
	せん断応力	3.5	10.4
座屈照査*	ウェブ	1.30(NG)	0.51
	フランジ	0.075	0.39

*安全率(3.2)を考慮した照査値であり、1以下でOKと判定する。

橋想定 10m スパンの試設計を行うと、表-2 に示す結果となった。ビルトアップ法では、線膨張係数の異なるガラス繊維と炭素繊維のハイブリッド成形材を得ることが可能であるため、主桁部材の剛性増加を目的として、I 型 GFRP 主桁部材のフランジは CFRP を重ね合わせる構造とした。なお、試算に当たって安全率を 3.2 と仮定した。

3.2.2 ビルトアップ主桁部材の曲げ試験

表-2 の試設計例に従って、実験用 3m スパン（全長：4m）でウェブ高 450mm の主桁部材をビルトアップ法により作成した。ビルトアップは、GFRP 平板をフランジおよびウェブに用い、これを L 字型アングルで固定する方法とした。また、剛性を増加させるため、フランジの上下に CFRP 平板を貼り合せている。主桁断面の概要を図-5 に示す。

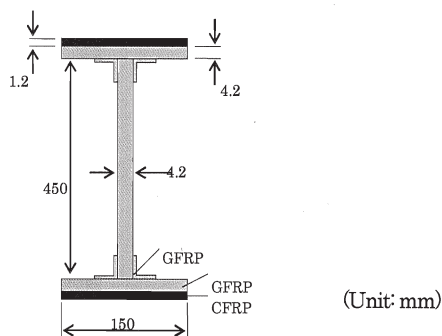


図-5 ビルトアップ主桁断面の概要

主桁部材は、10t 油圧サーボ式曲げ試験機により 4 点曲げ試験を行った。試験に当たっては、フランジやウェブ等に合計 28 箇所のひずみゲージを貼り付け、載荷荷重、ひずみおよびたわみ量の測定を行った。写真-2 に 4 点曲げ試験の概要を示す。

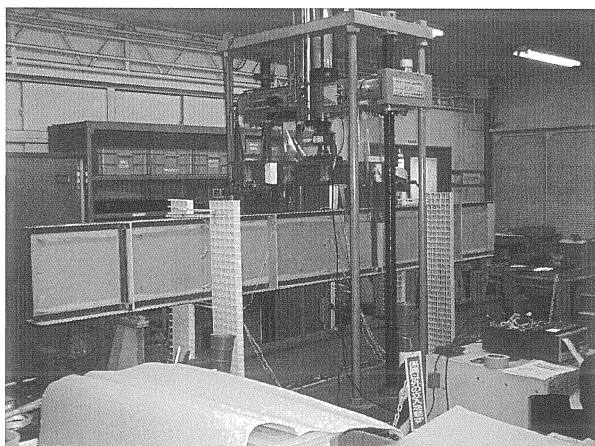


写真-2 主桁部材の 4 点曲げ試験

3.2.3 FEM解析による検証

(1) 線形 FEM 解析

試験の対象とした主桁部材の詳細な応力状態や変形挙動を把握することを目的として、積層シェル要素を使用した線形 FEM 解析を行った。表-3 は、試設計の値と線形 FEM 解析結果および実験値とを比較したものである。ここで、たわみ量は載荷荷重が 10kN 時の中央部下面のたわみ量を示している。試設計の値は、たわみ量、座屈荷重ともに線形 FEM 解析結果および実験値と良く一致している。

表-3 たわみ量および座屈荷重の比較結果

	試設計	線形 FEM	実験値
たわみ(mm)	1.10	1.29	1.33
座屈荷重(kN)	25.8	35.0	31.3

また、表-3 に示す実験の座屈点は、図-6 に示すようにウェブ中央部に貼り付けたひずみゲージから算出した曲げひずみ変曲する点を座屈点とした。

写真-3 および図-7 は、実験時に観察されたウェブ中央部の座屈モードと線形 FEM 解析による座屈モードと

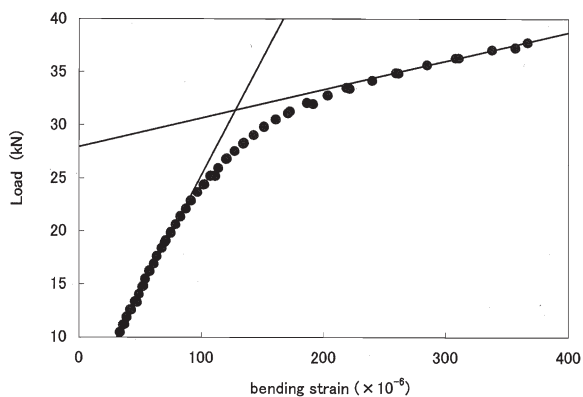


図-6 4 点曲げ試験における荷重-曲げひずみ曲線

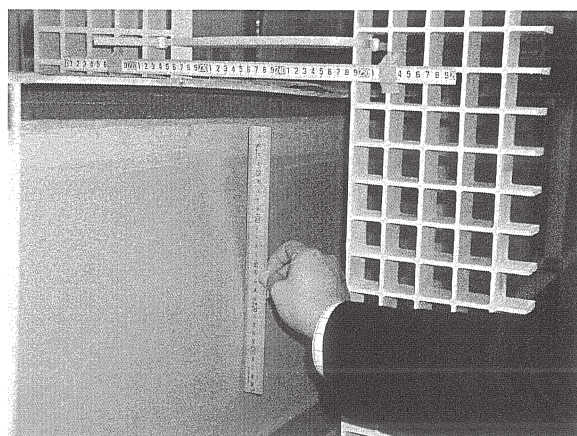
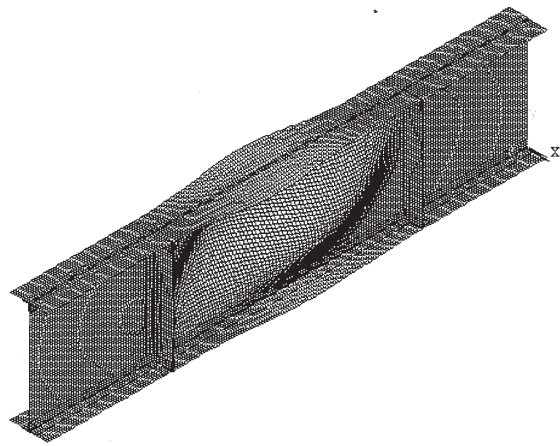


写真-3 主桁部材座屈モードの実験結果

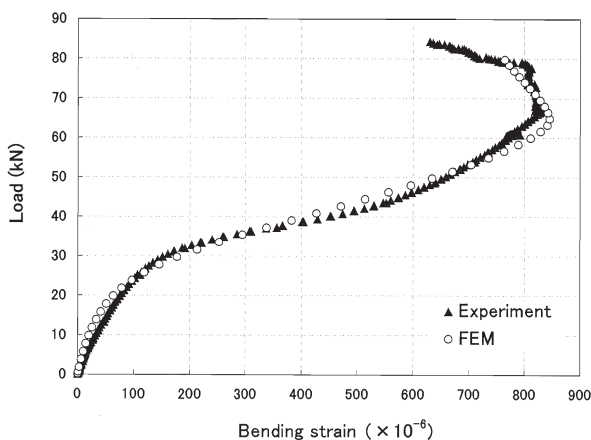


図一七 主桁部材座屈モードのFEM解析結果

を比較したものである。2つの座屈モードは良く一致しており、ウェブ積層部の座屈現象も積層シェル要素を用いた線形FEM解析により評価できることが分かった。

(2) 非線形FEM解析

ビルトアップ主桁部材の場合には、座屈後の大変形領域でCFRPとGFRPの接着部が剥離亀裂進展する可能性がある。このため、幾何学的非線形性を考慮したFEM解析により座屈後の挙動を追従した解析を行い、接着部で特異な応力やひずみが発生していないか検討を行った。図一八は、幾何学的非線形性を考慮したFEM解析によるウェブ中央部の曲げひずみを実験値と比較したものである。図一八から明らかなように、幾何学的非線形性を考慮した積層シェル要素によるFEM解析は、座屈後に非線形挙動を示した実験結果と良く一致している。また、非線形FEM解析結果からは、最初の座屈が発生した直後には局所的な応力やひずみの増大は見られなかった。こ



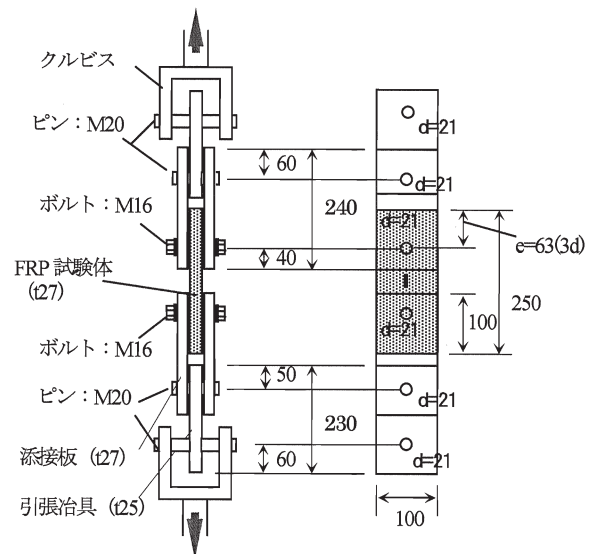
図一八 ウェブ中央部における荷重—曲げひずみ曲線

れは、実験においても最初の座屈が発生した直後に剥離や亀裂進展等の現象が観察されなかった事実と一致している。

3.3 ボルト接合の強度特性

3.3.1 試験概要

本試験で用いたGFRP試験体(厚さ27mm)は、コンティニアスストランドマット(CSM)、±45°、クロス、ロービングの4種類の基材で構成されており、樹脂にはビニルエステル樹脂が用いられている。積層構成は、CSM/±45°/クロス/±45°/クロス/ロービング/クロス/±45°/クロス/±45°/CSMの11層構成である。試験体の静的引張試験は図一九に示す方法により実施した。添接板(厚さ27mm)はSS400、ボルトは高力ボルトM16(F10T)である。ボルト軸力を加える場合には、ボルトナットと添接板の間に鋼製ワッシャーを挟んだ。試験体設置後、引張荷重を与え、荷重および破壊形態を調査した。



図一九 GFRP試験体の静的引張試験

3.3.2 摩擦形式ボルト接合

(1) 試験結果

試験にあたっては、試験体の表面状態を、①試験体表面に処理を行わないケース、②試験体表面に摩擦塗料を塗ったケース、の2ケースとした。図一十は、ボルト軸力と最大荷重との関係を示したものである。表面処理の種類によらず、ボルト軸力の増大に伴って最大荷重も増大している。摩擦塗料を塗って添接板と試験体との摩擦力を向上させた場合には、接合強度が更に高くなること

が分かる。また、ボルト軸力を加えた場合には、ボルト軸力-最大荷重曲線は線形関係を示すが、ボルト軸力 0 を考慮した場合には全体的に非線形関係を示している。特に、軸力が 0 から増加した場合には最大荷重が著しく増大している。

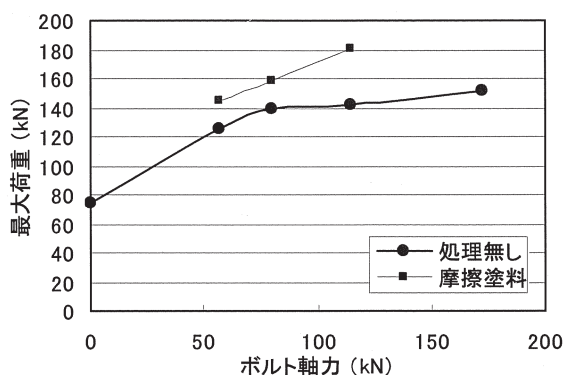


図-10 ボルト軸力と最大荷重との関係

(2) ボルト軸力の効果

ボルト軸力 0 の場合には、破壊状況の観察から試験体の圧壊破壊により終局に至ったと考えられる。一方、ボルト軸力を加えた場合には、試験体の面外変形が添接板により拘束されるため、試験体の圧縮強度は増大する。その結果、試験体は圧壊破壊ではなくせん断破壊により終局に至ったと考えられる。軸力が 0 から増大した場合に最大荷重が著しく増大した理由は、圧壊破壊からせん断破壊へと破壊モードが変化したことによると判断される。

一方、試験体がせん断破壊すると仮定した場合には、最大荷重の差異は試験体と添接板との摩擦力にそのまま反映される。試験体と添接板との摩擦係数は、クーロン摩擦則を仮定することにより容易に算出され、①は 0.114、②は 0.315 となる。②の摩擦係数は①の約 3 倍となっており、鋼材の場合と同様に、試験体の表面状態が最大荷重に大きく寄与することが確認された。ボルト軸力を加えたケースについて軸力と最大荷重との関係を外挿すると、軸力 0 に相当する最大荷重は、①と②の両ケースに対してほぼ一定の値 (110kN) となる。破壊モードがせん断破壊の場合には、軸力 0 に相当する最大荷重に摩擦力を加えた数値で接合強度が評価される。

3.3.3 ボルト-接着併用接合

(1) 試験結果

ボルト-接着併用接合は、試験体と添接板とをボルトならびに接着により接合したものである。接着剤には、強度の異なる 2 種類のエポキシ樹脂接着剤 (EP-007: 強

度小、HYSOL: 強度大) を用いた。

図-11 は、ボルト軸力と最大荷重との関係を示したものである。これによると、接着剤の種類によらず、ボルト軸力の増大に伴って最大荷重も増大することが分かる。

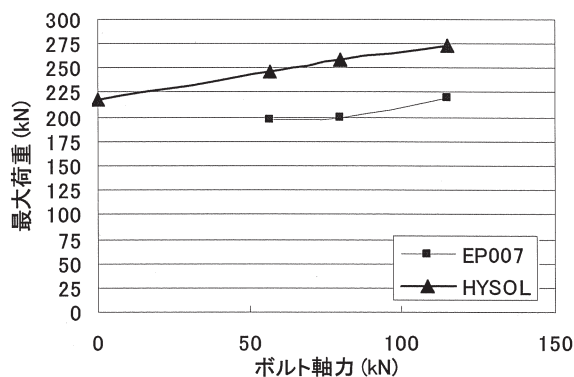


図-11 ボルト軸力と最大荷重との関係

(2) ボルト軸力の効果

接着接合強度により最大荷重が決定されると仮定した場合には、摩擦接合の場合とは異なり、軸力の大小によらず最大荷重が一定になると考えられる。しかし、最大荷重はボルト軸力と共に増大しているため、接着接合強度により最大荷重が決定されたのではないと判断される。

一方、試験体の圧縮強度は、面外拘束を伴った場合に増大する。摩擦接合はせん断破壊により終局に至っており、接合強度は試験体の 2 面せん断強度とボルト軸力に伴って生じる摩擦力の和で評価される。そのため、摩擦接合においてはボルト軸力と圧壊強度との関係が明瞭に得られなかった。一般的には、ボルト軸力の増大に伴い面外拘束効果も増大すると考えられるため、試験体がせん断破壊しない場合には、ボルト軸力の増大に伴って圧壊強度も増大すると判断される。本接合形式のせん断強度は、試験体と添接板との接着力により摩擦接合よりも高くなっている。最大荷重が圧壊強度により決定される場合には、ボルト軸力の増大に伴って最大荷重も増大する。以上より、本接合形式の破壊モードは圧壊破壊と判断されるが、これは FRP 試験体の圧縮強度が鋼材等に比べて低いために生じた現象と考えられる。

3.4 主桁部材および歩道橋の経済性

3.4.1 主桁部材の経済性

主桁部材のコストは成形法により異なる。しかし、コストだけでなく材料特性も異なるため、これらの事項を成形法別に整理しておくことが必要である。FRP の成形法としては、①引抜成形法、②ハンドレイアップ成形法、

③ビルトアップ成形法、の 3 種類が提案されており、ウェブ高 1000mm、フランジ幅 350mm 程度の主桁部材に適用することを想定して特徴をまとめると下記の通りになる。

①引抜成形法

長所：

- ・機械成形のため断面が均一で部材強度や信頼性がある。
- ・大量生産時には単価が安くなる。

短所：

- ・国内設備による引抜成形が困難であるため、仮に 1000mmH×350mmW を作成する場合は型費とともに、設備費等の大掛かりな初期投資が必要である。
- ・技術的、設備的に成形できる業者が限られてくる。
- ・型断面形状の変更が難しい。
- ・少量生産には向いておらず、少量時は単価が高くなる。

②ハンドレイアップ成形法 (HLU)

長所：

- ・断面サイズに制約がなく大型部材にも向いている。
- ・補剛材等の一体成形も可能。
- ・生産量による材料費の変動があまりない。
- ・沖縄の歩道橋にて実績がある。

短所：

- ・高弾性率品の成形が難しい。
- ・手作業による成形のため作業員によるバラツキがでる場合がある。
- ・一般的に手作業の一品ものであるため材料費は割高である。
- ・成形には主桁と同じ長さの専用型が必要となる。
- ・型断面形状、型長さの変更が難しい。
- ・技術的、設備的に成形できる業者が限られてくる。
- ・I型断面は難しく、通常はコの字型断面となる。

③ビルトアップ成形法

長所：

- ・各部材の物性が安定しているものを選択できる。
- ・CFRP+GFRP 等を後加工で組み合わせることができる。
- ・断面サイズの微調整により、さまざまなスパンに対応できる。
- ・各々の部材は他の用途にも使用されている場合が多く、成形業者が複数ある。
- ・専用型の初期投資が不要。

短所：

- ・接着、組立て等の加工がある。
- ・接着、接合方法が未確定である。
- ・設計に関しては、主桁自体の設計に関する難しさが検討の必要がある。

上記のように各々の成形方法で長所、短所があるが、大型断面部材の引抜成形設備が整備されていない現状においては、ビルトアップ成形法が最も経済的と考えられる。

3.4.2 歩道橋の経済性

FRP を歩道橋の構造部材へ適用する場合、コストは橋梁形式やスパン長と密接に関係する。上記で検討したウェブ高 1000mm×フランジ幅 350mm のビルトアップ主桁部材のコスト内訳は、材料費 70%、加工費 30%となり、材料費の割合が大きい。コストダウンを図るためには、材料費を削減することが必要と考えられる。また、3.2 の実験で使用した主桁部材については、材料費の約半分が CFRP であるため、コストダウンの 1 つとして、CFRP を有効に配置する等、材料の選択を含めた構築方法の検討が必要である。さらに、上部フランジでは CFRP の剥離等も考えられるため、床版等も含めた実際の設計では、上側のフランジは GFRP のみにする等の方法でコストおよび構造面から将来的には改善ができるものと推測される。

FRP 主桁部材については、鋼材とは異なり、成形方法や構築方法によって主桁断面およびスパンに制約が出てくる。表-4 は、鉸桁形式 FRP 歩道橋およびトラス形式 FRP 歩道橋を対象として、各成形方法別にスパンとコストの関係を示したものである。表-4 に示すように、スパンによっては可能な成形方法が限られているため、スパンにより有利な成形方法も異なってくる。また、引抜成形やハンドレイアップなど型の修正に大幅なコストがかかるものにおいては、スパンの微調整（微小の長スパン化）も難しい。

しかしながら、ビルトアップによる構築方法を応用することによって、引抜成形およびハンドレイアップの既存の断面サイズを効率的に大きくすることが可能となるため、大幅な型投資をせずに、スパンの調整に対応できるようになると考えられる。

今後はこれら複数の成形方法による部材を組合せ、各々のスパンによる最適なコスト算出ができるよう、部材の接合方法、組立て方法等の詳細を詰めることが実用性のある歩道橋への課題となる。

表-4 FRP 歩道橋の経済性

成形方法	内訳	スパン (m)				
		~5	5~10	10~15	15~20	20~
大断面 引抜成形	材料	△	△	△	—	—
	後加工	○	○	○	—	—
	型	(◎)	(◎)	(◎)	×	×
ハンドレ イアップ	材料	△	△	△	△	△
	後加工	◎	◎	◎	◎	◎
	型	△	△	△	△	△
ビルト アップ	材料	◎	○	○/△	○/△	△
	後加工	○	△/○	△/○	△	△
	型	(◎)	(◎)	(◎)	(◎)	(◎)/△
引抜材の トラス	材料	◎	◎	◎	◎	◎
	後加工	△	△	△/○	○	○
	型	(◎)	(◎)	(◎)	(◎)	(◎)

(経済的◎→○→△→×不経済)

4. まとめ

本研究では、鉸桁形式 FRP 歩道橋の設計法を構築すると共に、FRP 主桁部材の経済的な構築方法としてビルトアップ法を提案した。また、FRP 構造物の主要な要素技術であるボルト接合の強度特性に関する検討を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- FRP 歩道橋の設計法として、「道路橋示方書・同解説 (鋼橋編)」に示される許容応力度法に準拠した方法が十分適用可能であると考えられた。本設計法の特徴は、材料特性を直交異方性材料の積層理論に基づいて算出すること、主桁部材のたわみ制限を支間長の 1/600 から 1/400 に緩和すること、FRP 主桁部材の座屈強度照査法として弾性理論に基づく方法を適用すること、の 3 点である。
- FRP 主桁部材の経済的な構築方法として、ビルトアップ法を提案し、実験および FEM 解析により適用性に関する検討を行った。その結果、主桁部材の力学的挙動は、座屈が生じるまでの領域では線形 FEM 解析、座屈後の領域では幾何学的非線形 FEM 解析により精度良く推定できることが分かった。接着面での接合が十分であれば、ビルトアップ主桁部材は一体成形主桁部材と同等に扱うことが可能であると判断された。
- 摩擦形式ボルト接合では、ボルト軸力の増大に伴って最大荷重も増大する。最大荷重が増大した要因は、破壊モードの変化と摩擦力の増大の 2 点である。また、ボルト軸力を加えた試験体の破壊モードはせん断破壊となるが、この領域ではクーロン摩擦則に従う摩擦力と試験体の 2 面せん断強度の和で最大荷重

が評価される。

- ボルト軸力を加えたボルト-接着併用接合では、ボルト軸力の増大に伴って最大荷重も増大する。最大荷重が増大した要因は、ボルト軸力の増大に伴う圧縮強度の増大である。ボルト-接着併用接合のせん断強度は、試験体と添接板との接着力により摩擦形式ボルト接合のせん断強度よりも高くなるため、ボルト軸力を加えた場合についても、圧縮強度が最大荷重を決定する要素となる。これは FRP の圧縮強度が鋼材等に比べて低いために生じた現象である。今後は、接着剤の強度を含めた長期耐久性に関する検討が重要と考えられる。
- ビルトアップ主桁部材の経済性はスパン長 20m 程度が限界であるため、スパン長 20m 以上の橋梁に対応した主桁部材の構築方法が課題である。また、FRP 橋梁の一層のコスト低減を目的として、橋梁形式やスパン長を考慮した総合的な評価方法を確立することが重要と考えられる。

参考文献

- 独立行政法人土木研究所他, FRPを用いた橋梁の設計技術に関する共同研究報告書 (I) -ビルトアップ法によるFRP歩道橋設計に関する検討, 2005.12
- 上林他, FRP歩道橋の主桁部材設計法に関する実験的検討, 第60回土木学会年次学術講演会, 2005.9
- 宮永他, ビルトアップFRP橋梁主桁の構造設計と解析, 第50回FRP CON-EX 2005講演要旨集, pp.67-69, 2005.9
- 平山他, ビルトアップFRP橋梁主桁の構造設計とFEM解析, FRPの橋梁への適用に関する国際コロキウム/第2回FRP橋梁に関するシンポジウム, pp.139-142, 2006.1
- 木嶋他, FRPボルト接合における軸力の効果に関する実験的検討, 第59回土木学会年次学術講演会, 2004.9
- 木嶋, FRPボルト-接着併用接合における軸力の効果に関する実験的検討, 第60回土木学会年次学術講演会, 2005.9
- 上林他, GFRPの橋梁主桁設計に関する研究, 土木学会論文集 (投稿中)