

## IV-7 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 14～平 16

担当チーム：橋梁構造チーム

研究担当者：村越 潤、田中 良樹、  
長屋 優子

### 【要旨】

繊維強化プラスチック(FRP)の道路橋床版への適用性を検討するため、引抜成形 GFRP 材(ガラス繊維/ビニルエステル)を用いた全 FRP 床版の輪荷重走行試験を実施した。また、床版に限らず建設現場で生じ得る表面疵が同材料の静的挙動、疲労挙動に及ぼす影響について検討を行った。これらの結果と施工性、経済性の観点を踏まえて、現時点における引抜成形 GFRP 材の床版への適用性をとりまとめた。

試験結果によれば、全 FRP 床版供試体は 100 kN の輪荷重を 70 万回走行させても特段の変状は見られず、使用する引抜成形 GFRP 材の強度特性を明らかにした上で適切な設計を行えば、力学的特性としては全 FRP 床版の適用の可能性は考えられる。しかし、全 FRP 床版を実構造物に適用するには、設計法、施工法を検討するための基礎的な材料データが未だ相当に不足していること、また、FRP の軽量の利点を活かしてもコンクリート系床版の方が経済性の面で優位となることが確認された。

キーワード：引抜成形 GFRP、押込み損傷、表面疵、全 FRP 床版、疲労

### 1. はじめに

繊維強化プラスチック(FRP)は、沿岸部の飛来塩分や凍結防止剤などに対する耐腐食性に優れた材料であることからライフサイクルコストの軽減が期待されるとともに、従来の材料に比べて軽量であることから床版取替えなどにおける施工時間の短縮が期待される。本研究では、道路橋床版に FRP を適用する場合の力学的特性を検討するとともに、施工性、経済性も考慮に入れてその適用性について検討を行う<sup>1)3)</sup>。

道路橋の床版に FRP を適用した場合、大型車の輪荷重が版上に直接載荷されることとなるので、輪荷重の繰返し載荷による疲労に対する十分な耐久性があることを確認する必要がある。また、床版に限らず、土木工事の現場では、材料表面にへこみやひっかき傷などの損傷が生じることが想定されることから、どの程度の外力により表面に損傷が生じるかを把握するとともに、表面疵が GFRP の機械的性質に及ぼす影響を把握しておく必要がある。床版の場合には、供用後においても表面に損傷が生じる可能性があると考えられる。

平成 16 年度は、現場で生じ得る表面疵が同材料の静的挙動、疲労挙動に及ぼす影響、および床版に適用した場合の輪荷重走行による疲労挙動についての検討を行うとともに、これらの結果と施工性、経済性の検討結果を踏まえ、現時点における FRP 材料の床版への適

用性をとりまとめた。

### 2. 表面疵を有する GFRP 材の静的引張試験

#### 2.1 材料

試験に用いた材料の諸元と材料試験結果を表-1 に示

表-1 試験に用いた GFRP の材料諸元

名称		SP250		F1000		
形状寸法	mm	250H×250W×12t		1000W × 4.2t		
繊維含有率 Vf	%	57		50		
層構成	%	CSM/RH/ROV = 7.2*2/6.6*2/72.5		CSM/ROV = 16.9*2/66.2		
繊維方向		0	90	0	90	
強度	引張	MPa	495	54	474	39
	圧縮	MPa	478	(60)	524	141
	曲げ	MPa	559	168	398	133
	面内せん断	MPa	(30-50)		28-30	
	層間せん断	MPa	(30)		(30)	
	横せん断	MPa	(150)	(30)	(150)	(30)
弾性係数	引張	GPa	38.3	13.8	26.3	12.3
	圧縮	GPa	40.8	-	29.8	10.2
	曲げ	GPa	25.1	12.9	14.4	9.4

(注 1) CSM: マット層、RH: クロス層(0/90)、ROV: ロービング層

(注 2) SP250、F1000 はさまざまな材料構成があるので注意する

(注 3) ( ) 内数値は既往のデータに基づく参考値

(参考) ビニルエステル樹脂単体の引張強度 70-90 MPa

す。SP250、F1000 いずれも、ガラス繊維、ビニルエステル樹脂で構成された引抜成形 GFRP である。SP250 は厚さ 12 mm と比較的厚板であるとともに、主要部分の一方向ロービング層の両面の表層に 0/90 のクロス材とマット層(ガラス繊維がランダムに入った表面保護層)が配置されている。表面疵を有する FRP の疲労強度に関する研究は数例確認されているが<sup>4)</sup>、厚さ 1 ~ 3 mm 程度の GFRP 板(ロービング層に相当する層のみ)を対象としたもので、表層を有する厚板を対象とした試験事例は見られない。

## 2.2 試験方法

静的引張試験では、箱断面で成形された SP250 から、ロービングの繊維方向に平行に 50 mm×12 mm×600 mm の試験片を切り出し、試験片の片面に人工的に表面疵を入れた後、繊維方向に引張荷重を行った。表面疵作成はマット層表面に直角に幅 20 mm、先端角度 90° の鋼製刃を当てて、外見で確認できる範囲で所要の深さ 0.5~3 mm(残存深さの目標値、以下、\*を付して表す)の疵が残存するまで圧縮荷重することによって行った。表面疵の深さはレーザー変位計により測定した。また、疵の状態を把握するため、断面観察用に別途試験片を用意して、疵の断面観察を行った。

FRP を水中に浸漬した場合、樹脂には水が浸透し、繊維の周囲の水分は繊維との付着やガラス繊維自体に影響を及ぼす場合がある。表面疵が生じた場合に水分は容易に繊維周囲に到達する。建設現場において FRP の表面疵は雨水等に曝されることが十分に想定されることから、試験片の半分は 1 週間水中に浸漬し約 3 週間乾燥させた後に引張荷重を行った。

引張荷重の際、つかみ部に厚さ 1 mm のアルミタブをエポキシ樹脂接着剤により貼り付けた(疵の深いものは一部省略した)。静的荷重は変位制御で行った。

なお、比較のため、疵のない試験片とエンドミルによる機械加工で 20 mm×2 mm×深さ 5 mm、端部半径 1 mm の孔を空けた試験片も用意して、同様の試験を行った。

## 2.3 表面疵と内部損傷

図-1 に押込み荷重と表面疵深さの関係を示す。深さ約 2 mm までは押込み荷重と概ね比例関係が見られるが、ロービング層に至る約 2 mm を超える場合に、2 mm までの相関から推定される深さよりも小さくなる傾向が見られた。表面付近のマット層、クロス層が周囲に押し出されて盛り上がっていた。図-2 に深さ 3\*mm の表面疵の断面写真を示す。疵の先端からさらにロービング層内部に約 45° のひび割れが生じていた。また、

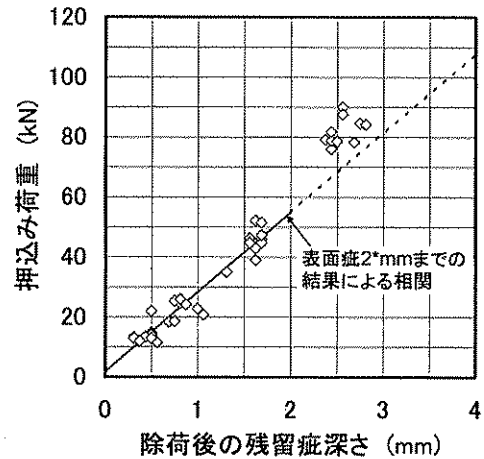


図-1 押込み荷重と表面疵深さの関係

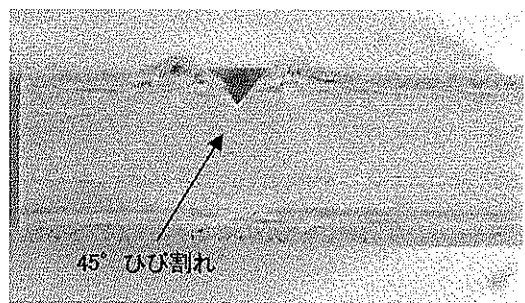


図-2 深さ 3\*mm の表面疵の断面

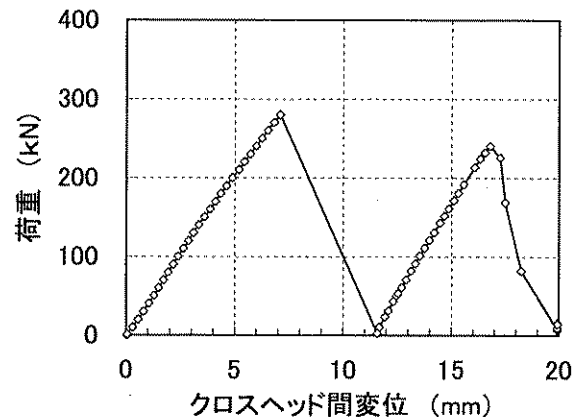


図-3 疵のない試験片 SP250 の静的挙動

その周囲の樹脂に微細なひび割れが多数発生していた。吉野らの研究における厚さ 3 mm の GFRP 材の押込み疵の場合、疵先端周囲の樹脂に微細なひび割れが発生していたが<sup>4)</sup>、45° のひび割れはこれまで見られなかった。SP250 のように比較的厚い材料を用いた場合、押込み荷重によっては局所的なせん断変形により繊維の破断を伴うひび割れが発生することがわかった。

なお、表面疵が 2\*mm ではロービング層にわずかに到達する程度であり、内部のひび割れや樹脂の微細ひ

び割れは見られなかった。そのときの押込み荷重は 50 kN 程度であった。

## 2.4 引張試験結果

図-3に疵のない試験片の荷重とクロスヘッド間の変位の関係を示す。一旦、表層のマット層、クロス層と一部のロービング層の破断、あるいはそれにロービング層の一部の層間ずれなどが生じて、変位は3~5 mm程度急激に増加し荷重が0付近まで低下するが、一部の試験片では、その後さらに変位制御のまま荷重を続けると再び荷重は上昇した。試験片によっては一度目の載荷荷重とほとんど同じ程度まで荷重が増加するものが見られた。二度目の荷重上昇が見られる場合の傾きは、いずれも一度目よりも大きくなる傾向があった。この現象は、表層とロービング層の伸び性能の差により生じたものと考えられる。ただし、表面疵が深くなるほど二度目の上昇の事例が減少した。また、水中に浸漬した試験片では、二度目の上昇は疵の深さに関係なく、全く見られなかった。

## 2.5 表面疵の影響

図-4に表面疵深さ(外見上の深さ)と引張破断荷重(一回目の破断、以下同じ)の関係を示す。疵深さが3\*mmの場合に破断荷重が顕著に低下する傾向が認められる。このことは、疵深さ2\*mmまではロービング層の疵が軽微であるとともに、ロービング層のひび割れが生じていなかったことと関係しているようである。

同図には、エンドミルで加工した表面疵の試験結果を合わせて示した。エンドミルで加工した疵深さは5 mmであったが、破断荷重は疵深さ3\*mmの結果と同程度か多少大きい値であった。疵深さ3\*mmの結果は、前掲の内部ひび割れのために、みかけの疵深さよりも破断荷重の低下が見られたものと考えられる。図-5に疵深さ3\*mmの破断後の状況を示す。前掲図-2で確認されたと同様に、表面疵の先端のロービング層に約45°の鋭利な破断面が認められた。板幅方向にもひび割れ深さにばらつきが見られ、試験片によっても深さが異なっていた。

なお、参考として、同じロットの試験片で3種類の貫通孔を設けた場合の結果を図-4の疵深さ12 mmとして示した。

## 3. 表面疵を有する GFRP 材の引張疲労試験

### 3.1 試験方法

ここでは、静的載荷試験と同様に作成した押込みによる深さ3\*mmの表面疵を有する試験片、エンドミル加工による深さ5 mmの表面疵を有する試験片および

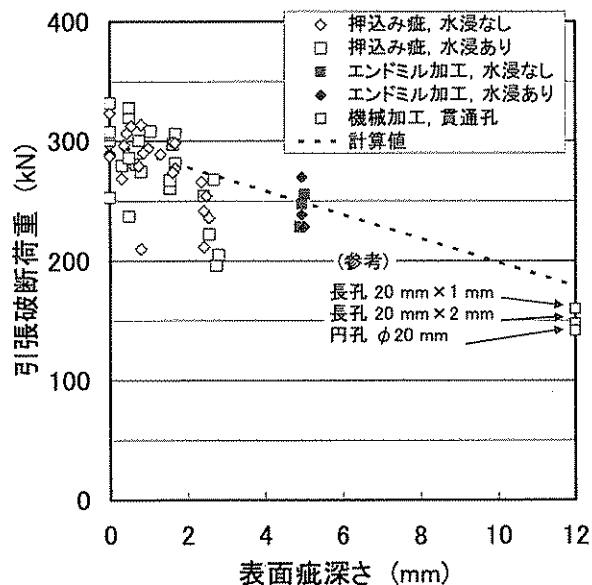


図-4 表面疵深さと引張破断荷重の関係

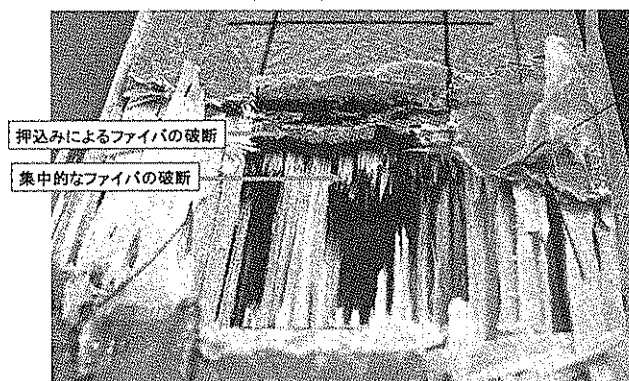


図-5 疵深さ3\*mmの破断後の状況

疵のない無垢材の試験片(JIS 準拠)を用意した。応力比0.1、周波数5 Hzのサイン波で疲労試験を実施した。

### 3.2 試験結果

図-6に疲労試験結果(S-N)を示す。縦軸は、各試験片の破断時荷重を健全部の断面積で除した値と欠陥のない健全な試験片の引張強度(495 MPa)との比である。GFRP材は比較的低い応力比でも疲労破壊することが知られており、これらの試験結果でも認められた。表面疵3\*mmの試験片の疲労強度は無垢材よりも明らかに低くなっており、応力比で0.05程度低下していた。疲労試験の場合も、表面疵の先端付近にロービング層のひび割れが確認された。また、その周辺のロービング層の破断はほうき状ではなく局部に集中して発生していた。

エンドミルによる表面疵の試験片の静的破断強度は表面疵3\*mmの結果と同程度かやや大きい傾向が見ら

れたが、疲労強度は表面疵 3\*mm の結果よりもさらに低いことがわかった。

なお、表面疵がない場合の  $10^7$  回疲労強度を外挿すると概ね 0.2~0.25 の範囲で、そのときの平均ひずみは  $3000\mu$  前後であった。

#### 4. 道路橋用全 FRP 床版の輪荷重走行試験

##### 4.1 既往の調査研究

車両が通行する道路橋の床版に全 FRP 床版を採用した事例は海外で既に数例見られる<sup>5)</sup>。しかし、ある程度の検討を経て考案された FRP 床版の車両走行下における疲労耐久性は、実際の道路へ適用しても直ちに把握することが容易でない。既往の研究では、実物大の FRP 版供試体を用いた定点疲労試験や小型の FRP 版試験体による輪荷重走行試験などの事例があるが、現実的な荷重レベルで走行載荷した事例はこれまでに見られない。本検討では、従来よく使用されている鉄筋コンクリート床版の疲労耐久性評価のために開発された輪荷重走行試験機を用いて、実物大の全 FRP 床版供試体で実際に生じ得る輪荷重を走行載荷することとした。

##### 4.2 試験方法

###### (1) 全 FRP 床版供試体

図-7 に床版供試体の外観と載荷状況を示す。供試体寸法は 2.8 m(B)×0.3 m(H)×3.5 m(L)である。前掲表-1 に示した SP250 と F1000 を、エポキシ樹脂接着剤を用いた接着接合により組み立てた。SP250 は、製造工場で 4 個 1 組を 1 パネルとして予め組立てた後、試験施設に搬入して床版供試体を組み立てた。断面構成を図-8 に示す。事前に行った FEM 解析および接着に関する予備試験の結果より<sup>2), 3)</sup>、輪荷重直下付近で局部応力が大きく、ウェブ間の接着のはがれも懸念されたことから、床版供試体は SP250 の上下に F1000 を貼り付けた。結果的に床版高さが約 300 mm となり、版全体としての剛性も大きく改善された。

###### (2) 載荷方法

床版供試体は、2 辺単純支持、2 辺鋼桁で受けた弾性支持とした。床版支間は 2.5 m とした。床版供試体の上面の輪荷重走行位置に 200 mm×500 mm の鋼製ブロックを並べ、厚さ 16 mm の鋼板を設置し、その上に輪荷重 100 kN 一定で走行載荷した。載荷速度は載荷荷重に応じた試験機の能力から 10 rpm とした。所定の載荷回数ごとに中央で静的載荷を行い、ひずみや変位の変化を監視した。

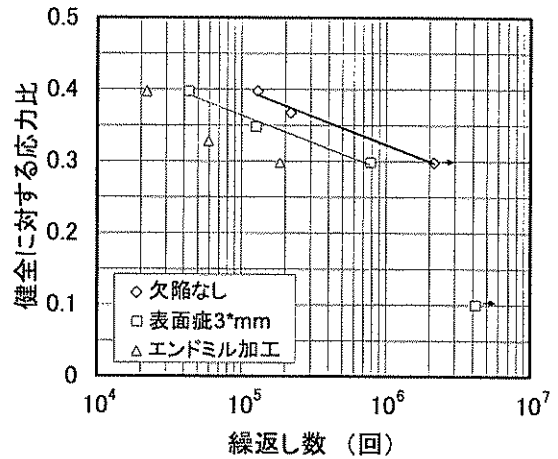


図-6 疲労試験結果

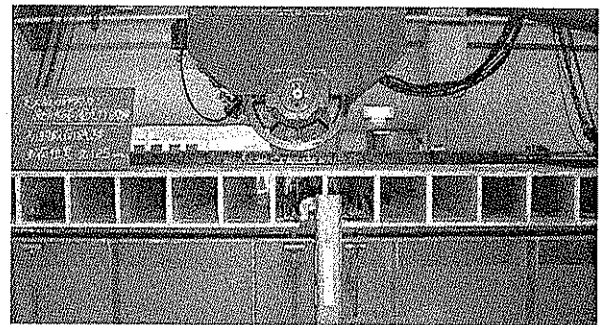


図-7 床版供試体の外観と載荷状況

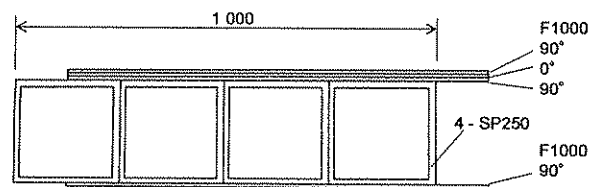


図-8 パネルの断面構成

##### 4.3 静的載荷試験結果

###### (1) 版としての挙動

中央載荷の場合について、図-9 に床版支間中央断面におけるたわみ分布を示す。各ウェブ間の荷重分配は概ね 2 つ隣のウェブまで見られ、荷重のほとんどは両隣のウェブを含む約 1.5 m (箱で言えば 6 個分ぐらい) までの範囲で負担されていたことがわかる。箱断面 1 本の単純梁における計算たわみは 6.1 mm であるが、版の試験結果では 2.2~2.4 mm、床版支間の 1/1000 以下であったことから荷重分配効果が認められた。なお、版中央に載荷したときの載荷点直下の下フランジ下面 (ウェブ直下) の x 方向ひずみは  $500\mu$  程度であ

った。

#### (2) 輪荷重直下の局所的な挙動

荷重 100 kN のときのウェブ間の上フランジ下面の局部たわみは最大約 0.4 mm であった (cf. 上フランジを両端固定梁として試算すると最大たわみで 0.24 mm、単純支持とした場合に 1.2 mm)。測定した範囲では、荷重 100 kN で最大圧縮ひずみが約  $900\mu$  (上フランジ上面)、最大引張ひずみが約  $1500\mu$  (上フランジ下面)、走行時の最大振幅が約  $1650\mu$  (最大引張ひずみと同じ位置) であった。

#### 4.4 動的載荷試験結果

輪荷重 100 kN の走行載荷を約 70 万回まで実施したが、目視では顕著な変状が見られなかった。前掲図-9 には、走行載荷前の結果とともに、5 万回走行後、53 万回走行後それぞれにおける版中央載荷時のたわみ分布を示した。5 万回走行後では走行載荷前に比べて 0.2 mm 程度の増加が見られたが、53 万回後では 5 万回走行時の結果と明確な差は見られなかった。なお、パネル間の接合部のうちの一箇所で下面の F1000 と SP250 のはがれが比較的早い段階より目視により認められたが、特段にその付近のたわみが増加するといった急激な変状は見られなかった。

### 5. GFRP 材の床版としての利用性の評価

#### 5.1 力学的特性

SP250 のようにロービング層の両面にマット層、クロス層といった表層が存在する引抜成形 GFRP 材は、静的試験、疲労試験ともに表層とロービング層で 2 段階の破断挙動を示す場合があり、床版のような載荷状況の下では脆性的な破壊を起こし難い素材であるかもしれない。

一般に FRP は、作用力の方向と繊維の方向の関係によって、引張、圧縮、曲げの強度や弾性係数などの強度特性が顕著に異なる。繊維が通っている断面の強度特性は、繊維の含有率により異なる。一方、繊維の通っていない断面の引張強度、せん断強度はビニルエステル樹脂単体の引張強度特性にほとんど依存しており、かつ繊維の存在による不均一性、ボイドの増加、繊維との付着力のばらつきなどから一般に樹脂単体よりも低い傾向にある。

版部材は二方向の曲げ、せん断が加わり、かつ輪荷重が直接載荷されることにより板厚方向にも大きな力が加わることから、GFRP 材のガラス繊維の高強度特性を有効に使える範囲が限定され、母材の樹脂の強度特性を十分に意識した設計法を確立する必要がある。

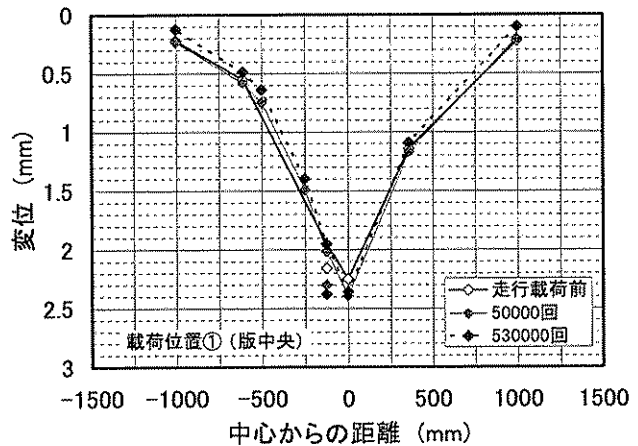


図-9 床版支間中央断面におけるたわみ分布

この素材の持つ異方性は鋼部材と大きく異なる点であるので、部材設計において剛性の違いとともに特に注意する必要がある。

#### 5.2 施工性

(1) プレストレストコンクリートのための FRP 緊張材の場合、高い応力下で使用されるために施工時に疵が入らないよう鋼材よりも慎重な施工が要求される。しかし、前掲の表面疵の試験結果より、床版に用いる引抜成形 GFRP 材 (SP250 のように表層を有するもの) は、鋼材と同程度の取り扱いでよいと考えられる。ただし、表面疵が表層の厚さを超えている場合には、強度特性の低下を招くので適切な処置が必要である。

(2) ハンドレイアップや接着などの手作業は断面形状や強度特性のばらつきを大きくする傾向にある。接合部の寸法精度は、組み立ての効率に大きな影響を及ぼす。床版供試体の製作においては、接着剤の量の影響によって上面に 1 mm 程度の段差が生じた。また、GFRP 材を数ヶ月にわたって保管する場合に、クリープ変形によるそりが発生しないように保管方法に配慮する必要がある。

(3) 路面保護も含めた FRP 表面保護、路面からの漏水防止などの水に対する配慮、組み立て時の温度変化に対する配慮、ハンチの施工などによる主桁の不陸調整、防護柵、照明柱、伸縮装置などの付属物の固定方法などについて検討を要する<sup>9)</sup>。

(4) 切断面の繊維の扱いや切断時の繊維飛散防止などについて、歩行者や作業員の安全管理に関する配慮が必要である。

(5) 施工現場では、仮受けなどの架設用部材として FRP 材を用いた場合、鋼材との材料特性の相違を十分に把握していないと施工時の安全性に影響を与える可能性があるため、定められた用途以外に利用しない等

の注意が必要である。

### 5.3 経済性

FRPを道路橋床版に適用した場合の経済性について試設計により検討した結果、例えば、橋長 180 m、6 径間連続非合成鉄桁橋の場合に床版工の費用は従来の鉄筋コンクリート床版よりも約 5.8 倍となる。この影響により FRP 床版の死荷重軽減効果を考慮しても、上下部構造を含めた全体工事費としても約 1.5 倍程度と高くなることが確認された<sup>2)</sup>。なお、この試算では、FRP 床版の 1 m<sup>2</sup> 当り質量は約 150 kg であった。また、床版供試体は 1 m<sup>2</sup> 当り質量が約 120 kg で、コンクリート床版の 1/4 以下であった。

材料コストの軽減や、材料設計の簡素化、品質保証の確立などの視点から、土木資材用としての FRP 材の強度規格や型材規格、FRP 材を組合せた構造体での品質管理法が必要である。設計には少なくとも強度特性の情報が必要であり、それを保証する規格が不可欠である。当然ではあるが、ニーズにあった規格設定の検討が必要である。現場施工の期間短縮のためにプレキャスト部材単位の規格制定もコスト軽減の可能性があると考えられる。なお、引抜成形 FRP 材はその製造方法から少量生産には適さない。このため、ある程度の規模の道路橋でないか材料単価が高くなるか供給が困難となることがある。

## 6. まとめ

以下に主な結果を記す。

- 1) 静的引張試験、引張疲労試験ともに、引抜成形 GFRP 材が表層とロービング層で 2 段階の破断挙動を示す場合があり、床版のような載荷状況の下では脆性的な破壊を起こし難い可能性があることがわかった。ただし、表面疵がないかその深さが小さい場合、かつ雨水などに浸水していない場合に限定される。
- 2) 表面疵を有する GFRP 材の引張試験結果より、疵深さが表層の厚さ範囲内であった場合には、破断強度に及ぼす影響が小さかった。これより引抜成形 GFRP 材は建設現場において鋼材よりも慎重に施工する必要は必ずしもないことがわかった。しかし、ロービング層に達する深い押込み傷がある場合は、外見では確認できない樹脂の微細ひび割れや繊維の破断が生じている可能性が高いので、適切な処置が必要である。
- 3) 全 FRP 床版供試体は 100 kN の輪荷重を 70 万回走行させても特段の変状は見られなかった。FEM や予備試験の結果に基づき、箱断面 GFRP 材の上下に GFRP 板を貼り付けたことにより、荷重直下の局部ひずみを

抑制するとともに、版全体の剛性を大きくしてたわみを 2.2~2.4 mm 程度に小さくしたことが疲労耐久性を確保するのに有効であったと考えられる。

4) 本調査では FRP の適用可能性を探ることを目的としたので強度特性に関する系統立てた試験は行っていないが、今回の試験結果によれば、疲労耐久性も含めて、使用する引抜成形 GFRP 材の強度特性を踏まえた適切な設計を行えば、全 FRP 床版の適用が可能であることを示唆するものである。しかし、全 FRP 床版を実構造物に適用するには、設計法、施工法を検討するための基礎的な材料データが未だ相当に不足していると考えられる。また、経済性については、道路橋床版に適用した場合の試設計により、FRP の軽量の利点を活かしてもコンクリート系床版の方が工事費の面で優位となることが確認された。

### 付記

本研究は、引抜成形 FRP を製造している旭硝子マテックス(株)、橋梁の設計施工に携わっている石川島播磨重工業(株)との共同研究により実施した。

### 参考文献

- 1) 新井恵一、村越潤、大石哲也：FRP を主材料とした床版が橋梁全体の工費に与える影響について、土木学会第 58 回年講概要集、2003.9
- 2) 村越潤ほか：新材料の土木構造物への適用に関する研究—アルミニウム合金と繊維強化プラスチックの道路橋への適用に関する調査・分析—、土木研究所資料第 3888 号、2004.2
- 3) 村越潤、新井恵一、長屋優子：FRP 部材の接合部の強度特性に関する基礎検討、土木学会第 59 回年講概要集、2004.9
- 4) 例えば、吉野利男、安田健：表面に押込み損傷を受けた GFRP 積層板の曲げ疲れ強さに関する研究、日本機械学会論文集 A、No. 476、pp. 972-980、1986.4
- 5) 例えば、Reising, R.M.W. et al.: "Close look at construction issues and performance of four fiber-reinforced polymer composite bridge decks." J. Compos. Constr., 8(1), pp. 33-42, 2004