

15. GFRP 材を用いた橋梁点検検査路および橋梁伸縮装置の開発

李 宏斌

1. 目的

GFRP（ガラス繊維強化ポリマー）は、軽量性や高耐久性等から、自重の軽減、施工性の向上等の利点を有し、土木構造部材への適用が期待されている。橋梁点検検査路は、橋台や橋脚に設置される点検設備で、交通規制等の制限を設けずに、目視および直接触れての劣化・損傷状況の調査が可能である。GFRP製の点検検査路は耐久性と軽量性の面で利点があり適用が検討されているが、その設計基準等は未整備なのが現状である。また、伸縮装置とは橋梁の路面上の桁端部に設置され、気温変化による橋梁の伸縮、地震時および車両通行に伴う橋梁の変形を吸収し、自動車や人が支障なく通行できるためのものである。伸縮装置は構成材料であるゴムや鋼材の劣化による漏水などにより、装置自身はもとより、橋桁端部の著しい損傷劣化を誘発し、補修サイクルは15年内程度と橋梁の寿命に比べて非常に短い。また、伸縮装置の補修は、交通規制渋滞を招くため迅速な施工が求められている。

そこで本研究では、実橋点検検査路のブラケット部及び歩廊部にGFRPを用いた試験体の載荷試験を行い、破壊性状や接合部の耐荷特性を把握し、FEM解析による解析値と比較・検討を行った。また、伸縮装置としてGFRPの適用を検討した。GFRP製の伸縮装置の性能を確認するため、伸縮装置の破壊メカニズムや構造詳細を明らかにした。

2. 内容

2.1 GFRP 部材接合部の静的強度特性

2.1.1 試験概要

供試体概略図を図-1に示す。供試体の母材に用いた引抜き成形されたGF板は、7層構成(CSM/クロス/RH600/ロービング/RH600/クロス/CSM)である。供試体の寸法を表-1に示す。GF-GFの接合方法はF10T M12 高力ボルト摩擦接合とし、設計ボルト軸力55.8kNを導入した。接合部のGF板の表面処理は未処理およびブラスト処理の2種類あり、その影響についても検討した。GF板には、アルミナサンドを用いて、

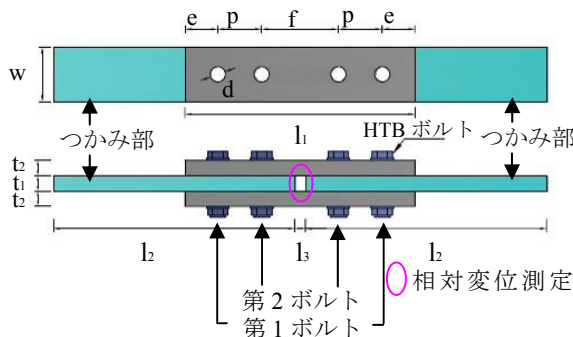


図-1 供試体概略図

表-1 供試体の寸法 単位:mm

	d	t1	t2	w	e	p	f	l1	l2	l3
GF-GF	14	14	14	50	30	40	70	210	220	10
GF-SUS	23	18	12	100	50	70	110	350	300	10
GF-鋼	14	14	9	50	30	40	70	210	330	10

表-2 材料特性値

GFRP				SUS板	添接鋼板	
	引抜き方向	引抜き直角方向	45° 方向			
弾性率 (GPa)	引張	24.0	11.0	4.00	196	210
	圧縮	30.0	20.0	-		
	せん断	4.60		-		
強度 (MPa)	引張	250	90.0	45.0	260	400
	圧縮	430	95.0	-	-	-
ポアソン比		0.28	0.14	0.14	0.30	0.30

算術平均粗さ (Ra) 5μm, 十点平均粗さ (Rz) 30μm になるようにブラスト処理を行った。GF-GFの供試体はそれぞれ5体とした。GF-SUSの接合方法はF10T M20 高力ボルト摩擦接合とし、設計ボルト軸力165kNを導入した。接合部のSUS板の表面はスチールグリッドを用いてブラスト処理を行い、Ra=10μm, Rz=45μmの表面粗さとした。GF-SUSの供試体は5体である。GF板, SUS板, 添接鋼板の材料特性値を表-2示す。全供試体とも、室温20℃, 湿度60%の条件で1週間養生した。試験は母材GF板のつかみ部を万能試験機のチャックで挟み漸増引張試験を行い、荷重とGFRP板の相対変位を計測した。

2.1.2 試験結果

試験結果を表-3に示す。まず、GF-GF未処理のすべり荷重はGF-鋼の50%程度、ブラスト処理

のすべり荷重はGF-鋼の80%程度となった。GF-GF未処理を除いた全ての供試体ですべり係数が0.4以上を確保することができ、道路橋示方書の基準を満足した。最大荷重に、GF-GFの最大荷重は未処理およびブラスト処理と同様にGF-鋼の90%程度となった。これは、材料誤差の範囲内だと考えられる。GF-SUSのすべり荷重と最大荷重は同様であった。また、GF板のブラスト処理により表面を粗くした場合、すべり係数の増加が確認できた。

図-2に荷重-相対変位関係を示す。また、GF-鋼のFEM解析結果も示す。未処理の場合は脆性的に破壊したため、0.16mmまで計測した。荷重100kNまでGF-SUSとGF-鋼の相対変位の変化および初期剛性は概ね一致した。GF-GFの剛性が最小、GF-SUSの剛性が最大となった。この理由として、GF-SUSの寸法がGF-GF、GF-鋼と比較して大きいことやGF、鋼およびSUS板の弾性係数の違いによるものと考えられる。また、GF-GFおよびGF-鋼接合部についてはブラスト処理、未処理による相違はないことが確認された。なお、GF-鋼の試験値と解析値は概ね一致しており、GF-鋼の解析結果は妥当であると考えられる。

2.2 GFRP製橋梁点検検査路の耐荷挙動

2.2.1 試験概要

TYPE1~3では検査路の支持構造であるブラケット部の荷重試験を行い、TYPE4~6では検査路の歩廊部の荷重試験を行った。

図-3にTYPE1~3試験体概略図を示す。H-300×150×10×14のGFRPブラケットを用い、接合部はSUSアングル材をF10T高力ボルト(HTB)により摩擦接合した。接合部をアングル材とHTB6本により接合した試験体をTYPE1、リブで補強されたリブ付アングル材とHTB6本で接合した試験体をTYPE2、リブ付アングル材とHTB4本で接合した試験体をTYPE3とした。TYPE1,2によりリブによる補強の影響を、TYPE2,3によりボルト本数による影響を比較した。

図-4にTYPE4~6試験体概略図を示す。試験体はGFRP製チャンネル材3本の上部にGFRP製板材を配置している。TYPE4では一般鋼製点検検査路と同程度の寸法の歩廊部を、TYPE1と同様のブラケット2

表-3 試験結果

	No.	GF-GF		GF-SUS	GF-鋼	
		未処理	ブラスト	ブラスト	未処理	ブラスト
すべり荷重 (kN)	1	56.9	97.5	279	124	131
	2	67.6	110	284	127	133
	3	52.3	100	280	126	134
	4	68.1	112	280	123	132
	5	54.5	107	266	120	132
	平均	59.9	105	278	124	132
すべり係数	平均	0.27	0.47	0.42	0.55	0.59
	1	121	122	279	139	139
	2	127	131	284	138	142
	3	118	123	280	132	134
	4	132	141	280	138	142
	5	124	126	266	132	141
平均	125	129	278	136	139	

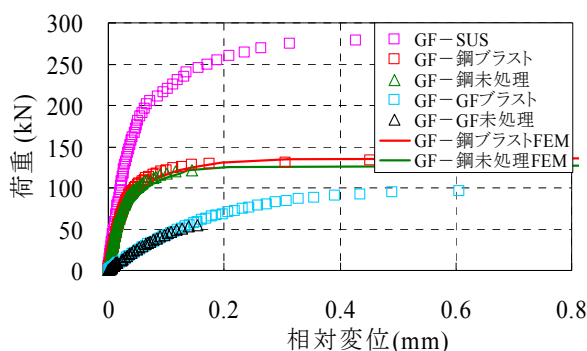


図-2 荷重 - 相対変位関係

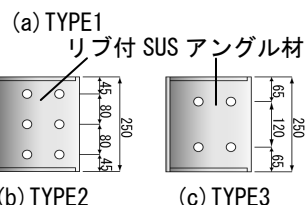
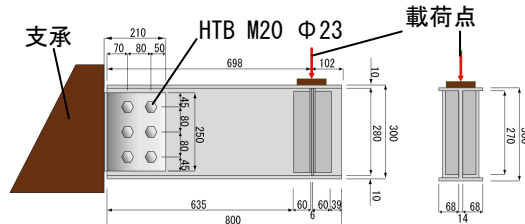


図-3 TYPE1~3 試験体概略図

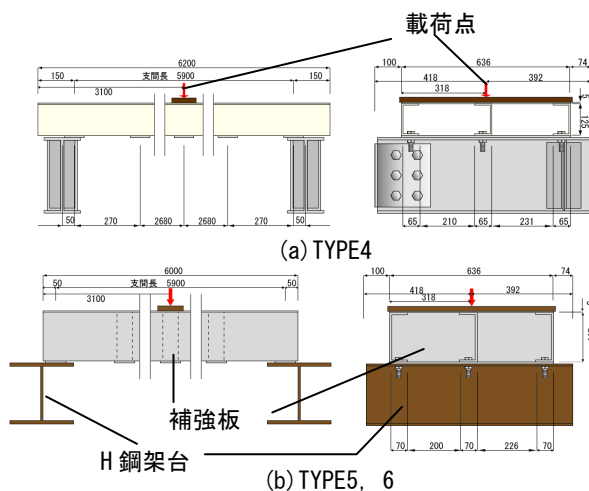


図-4 TYPE4~6 試験体概略図

基により支持し, SUS ボルトにより接合した. TYPE5 はTYPE4の歩廊部をH鋼架台2基により支持し, SUS ボルトで接合した.

### 2.2.2 解析概要

TYPE1~3では, 8 節点ソリッド要素を用いてモデル化し, SUS アングル材, HTB には Von-Mises の降伏条件を, GFRP ブラケットには Hill の降伏条件を用いた. 接触条件は SUS-GFRP 間, SUS-HTB 間に実験から求めた摩擦係数 0.42 を設定し, ブラケット固定端の変位と回転を拘束し, 載荷位置に鉛直方向の強制変位を与え, 変位増分で解析を行った.

TYPE4~6では, 4 節点シェル要素を用いてモデル化し Hill の降伏条件を用いた. 接触要素は全て剛結とし, TYPE4 ではブラケット固定端の変位と回転を拘束し, TYPE5, 6 では接合部の変位と回転を拘束した. 歩廊中央に荷重を与え, 荷重増分で解析を行った.

### 2.2.3 結果および考察

(1) TYPE1~3 図-5 に荷重-たわみ関係, 図-6 にTYPE2, 3の破壊状況を示す. TYPE1は荷重 25.6kN時にアングル材が降伏し, 最大荷重は 55.8kN(設計荷重の 6.5 倍)となった. TYPE2は 83.4kN(設計荷重の 9.8 倍)時に音を発してボルト孔間, 試験体端に亀裂が生じた. 同様にTYPE3は 74.9kN(設計荷重の 8.8 倍)時に裂が生じた. TYPE1~3の実験ではすべりの確認は出来なかったが, FEM 解析ではTYPE2で 80.4kN, TYPE3で 49.5 kN 時にボルトがボルト孔に接触し, すべりの発生が確認できた. 図-7 に接合部の最大荷重時応力分布を示す. 実験で亀裂が生じた箇所に応力集中が見られ, 破壊状況が FEM 解析により再現できた.

(2) TYPE4~6 TYPE4は設計荷重 7.7kN 時に歩廊中央たわみ 48.1mm となり, 一般鋼製検査路のたわみ照査基準である L/400(15mm)を上回った. 荷重 27.5kN, 歩廊部鉛直たわみ 293mm 時にジャッキの長さが不足したため, 破壊に至らなかった. また, TYPE5 も同様に破壊に至らなかった. TYPE6 は設計荷重 7.7kN 時にたわみ 12.6mm となり, L/400 を満たした. 荷重 57.6kN(設計荷重の 7.5 倍)たわみ 135mm 時に音を発して破壊に至った. 中央部でチャンネル材上部の板材が変形し, 繊維の剥離が見られ, 側面, 背面にも亀裂

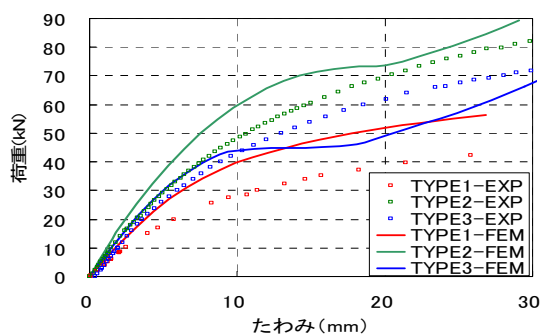


図-5 TYPE1~3 荷重-たわみ関係

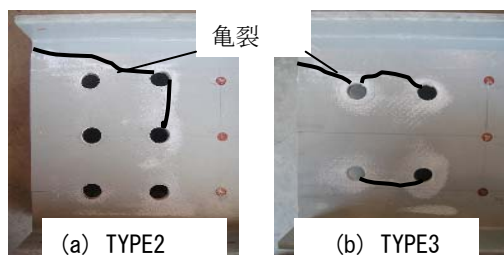


図-6 試験体破壊状況

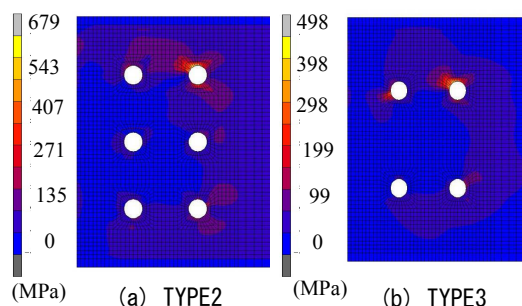


図-7 最大荷重時応力分布

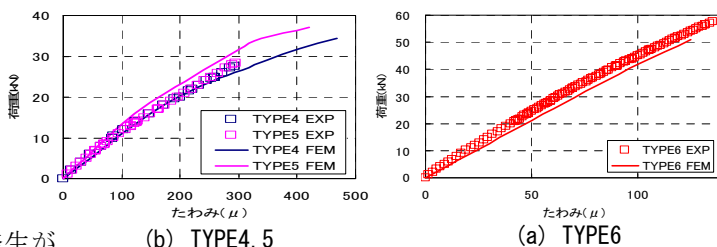


図-8 TYPE4~6 荷重-たわみ関係

が生じた. 図-8 に歩廊部の荷重-たわみ関係を示す. 試験値と解析値の破壊荷重が概ね一致した.

## 2.3 GFRP 材の引張および支圧挙動の検討

### 2.3.1 試験概要

図-9 に供試体概略図を示す. 供試体は, ハンドレイアップ成形法で成形した GFRP を用い, 長さ 500mm, 幅 90mm, 板厚 20mm/16mm/12mm, 孔径 46mm/ 20mm /10mm/孔なしとして, 各タイプ 5 体ずつとした. 引張供試体を A, 支圧供試体を B とした. 試験は, 万能試験機を用いて供試体のつかみ部を試験機のチャックでつかみ, 荷重漸増引張試験を行い, 荷重とひずみを計測した.

### 2.3.2 解析概要

解析モデルは、8 節点ソリッド要素を用い、引張モデルは下端を XYZ 方向拘束し、上端に Y 方向の強制変位を導入した。支圧モデルは上端を XYZ 方向拘束し、丸鋼部に Y 方向の強制変位を導入した。図-10 に GFRP の材料構成則を示すが、引張強度  $f_t$  に達した後は、 $E_1 = -0.2E_0$  としてひずみ軟化を考慮した。支圧解析についてはさらに圧縮方向について弾性体とした。

### 2.3.3 結果および考察

表-4 に各タイプの最大荷重を示す。引張については、孔が無い場合、実験値と計算値を比較すると、いずれのタイプも若干  $P_{EXP} > P_{CAL}$  となっているが、これは実際の供試体の板厚が少し厚かったことによると考えられる。孔がある場合、実験値と計算値を比較すると、 $P_{EXP} < P_{CAL}$  となっており、これは GFRP が全断面降伏状態にならずに引張破壊することを示唆している。また、実験値と解析値を比較すると、ほぼ一致していた。支圧供試体についても同様である。これらの結果より、解析により GFRP の最大荷重を再現できたと言える。図-11 に破壊形式を示す。破壊形式は全ての供試体で引張破壊であった。

図-12 にひずみ分布を示す。左が引張解析、右が支圧解析である。実験でのひずみ分布をみると、図には示していないが孔がない場合はほぼフラットであったのに対して、孔近傍で応力集中をしている。また解析の場合でも孔近傍で応力集中をしていることが分かる。孔近傍では解析のひずみがかなり大きくなっているが、それ以外では実験値と解析値はほぼ一致していた。

### 3 結論

(1) GF-GF はブラスト処理した場合、すべり係数は 0.47 程度を確保することができた。GF-鋼, GF-SUS および GF-GF のすべり係数は 0.4 以上であり、道路橋示方書の基準を満足した。

(2) TYPE4,5 では設計荷重時に一般的な鋼製検査路のたわみ照査基準  $L/400$  を満たさないため、TYPE6 がより実構造物に適しており、GFRP 製の検査路を設計するには既存の設計基準と異なった新たな設計基準が必要であると考えられる。

(3) 円孔を有する GFRP 板の破壊形式は引張破壊であった。

(4) GFRP は鋼のような全断面降伏を示さないので、最大荷重は全降伏を基準とした計算値より小さくなった。

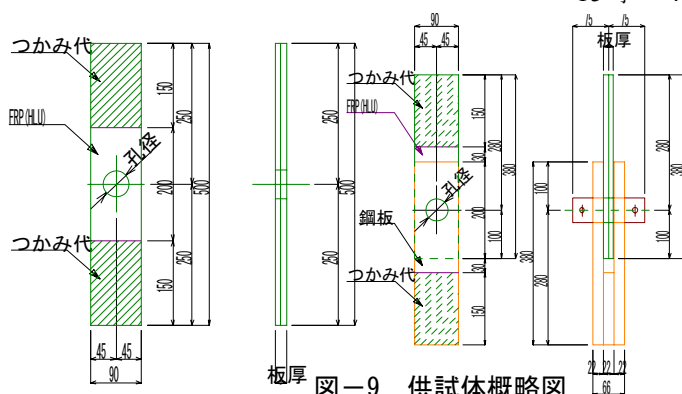


図-9 供試体概略図

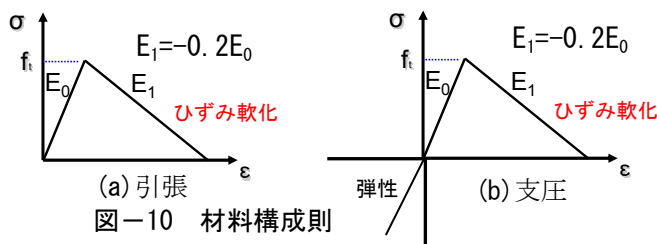


図-10 材料構成則

表-4 最大荷重

タイプ	計算値 $P_{CAL}$ (kN)	実験値 $P_{EXP}$ (kN)	解析値 $P_{FEM}$ (kN)
A-12-0	97.7	111	97.6
A-12-20	76.0	66.9	57.6
A-16-0	112	126	112
A-16-10	99.7	90.8	87.9
A-16-20	87.2	72.0	69.6
A-16-46	54.8	54.1	43.2
A-20-0	169	185	169
A-20-20	132	109	101
B-12-20	76.0	45.8	46.7
B-16-20	87.2	50.3	42.4
B-16-46	54.8	49.7	47.2
B-20-20	132	64.8	73.5

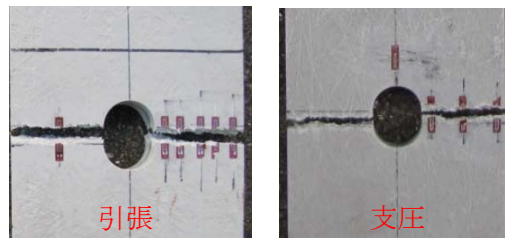


図-11 破壊状況

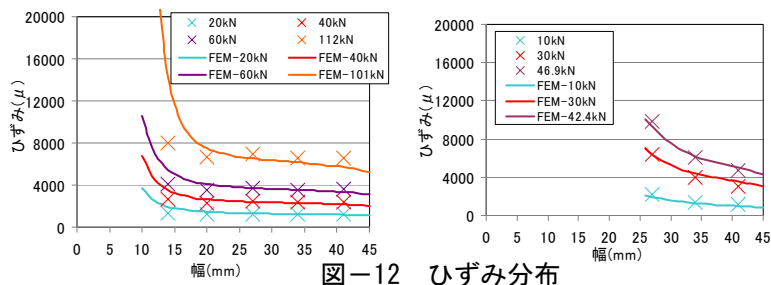


図-12 ひずみ分布