様式第11 別紙2

建設技術研究開発費補助金 総合研究報告書

 (1)課題名:低ライフサイクルコストを実現するインフラ向けCFRP引抜部 材の設計・成形・施工法の開発および光ファイバを用いたモニタ リング技術の開発

- (2)研究期間:平成29~30年度
- (3) 交付申請者名: 舘石 和雄(名古屋大学大学院·教授)
- (4) 研究代表者名: 舘石 和雄(名古屋大学大学院·教授)
- (5) 共同研究者名:北根 安雄(名古屋大学大学院・准教授)
 鈴木 森晶(愛知工業大学・教授)
 松井 孝洋(東レ(株)・主任部員)
 兼岩 秀和(フクビ化学工業(株)・技術主幹)
 成沢 良輔(フクビ化学工業(株))
 森野 真之((株)長大・部長代理)
 丸山 武士((株)長大・課長)
 増永 知明(日光産業(株)・次長)
 朝日 利宏(日光産業(株)・課長)
 町島 祐一((株)レーザック・代表取締役社長)
 村山 英晶(東京大学大学院・教授)
- (6) 補助金交付総額: 18, 221,000円
- (7) 技術研究開発の目的

自治体等が管理する小規模橋梁等インフラの補修・補強・更新技術の確立およびメンテ ナンスの省力化を実現するため、インフラ構造物に適したCFRP引抜部材の開発およ び光ファイバセンサを用いた革新的複合材料部材(i-Composite)を開発する。これによ り、自治体等が管理する小規模橋梁等のインフラの補修・補強・更新技術について、軽く て強いCFRPの特長を活かし、従来比50%の工期短縮と、製造から廃棄・処分までの ライフサイクルコストの低減を目指す。

~研究方法~

- インフラ構造物に適した厚物CFRP引抜部材の開発【成形WG】
 - CFRP引抜部材の開発
- ② CFRP引抜部材の設計指針の確立【設計WG】
 - CFRP引抜部材の強度等の整理
 - CFRP引抜部材の標準化
 - 設計手法の確立
 - ・ コスト把握

- ③ CFRP引抜部材の設計用特性値の把握【部材解析WG】
 - CFRP引抜部材の耐候性検討
 - CFRP引抜部材の支圧ボルト接合部耐力評価
 - ・ CFRP引抜部材の支圧ボルト接合部疲労特性の把握
 - CFRP引抜部材の圧縮耐荷力評価
- ④ CFRP引抜部材の施工に関する課題抽出及び検証【施工WG】
 - ・ モデル構造物の試験施工
 - ・ 試験施工・モデル施工により施工管理基準の提案
- ⑤ 埋込型光ファイバセンサを用いたMRO最適化手法の検討【センシングWG】
 - i Composite化されたCFRP引抜部材の作製と検証実験
 - ・ MRO 最適化による信頼性・経済性向上に資する方法論の提案
 - 実環境下における光ファイバセンサの耐久性に関する検証
- (8) 技術研究開発の内容と成果

5つのWG毎に研究内容と成果を述べる。

I) 成形WG(名古屋大学、フクビ化学工業(株))

インフラ構造物に適した厚物 CFRP 引抜部材の開発

(i) CFRP 引抜部材の開発

インフラに適した部材物性を有し、軸力と支圧強度のバランスが取れた厚物 CFRP 引抜 部材を開発した。

H27、H28 年度の福井県橋梁 PJ の既往研究成果より、課題とされた CFRP の圧縮強度お よび圧縮弾性率の向上を目的として、積層構成と炭素繊維の種類を変えて、VaRTM 成形で 厚み 5mm の CFRP 板を作製して、圧縮試験(ASTM:D6641)と支圧試験(Mottram 法)で物性デ ータを取得してスクリーニングを実施した。支圧強度については、実使用時に引抜成形部材 に孔を明けてボルト接合するため、強度の確認が必要と判断して実施した。

スクリーニングは、積層構成と炭素繊維種類を選定対象として、炭素繊維は T700S(東レ 製 引張強度:4900MPa、引張弾性率:230GPa)と M46J(東レ製 引張強度:4020MPa、引張弾 性率:436GPa)で比較検討した。

検討結果(表-1)より、4軸方向の積層構成のうち、0°方向に炭素繊維 M46J、その他方向にガラス繊維を配置した構成が、最も圧縮弾性率と支圧強度のバランスが取れていたことから、最適な繊維構成に決定した。

次いで、決定した繊維構成により、L アングル 100×100mm×14mmt 形状(図-1)で引 抜成形を行い、成形条件の最適化を図って繊維シートの原反 50m すべてを連続成形出来る ようにした。この引抜成形部材の Vf 計算値は 56.6%となり、それを基に理論計算すると軸 方向弾性率は 178GPa。

この CFRP 引抜成形 L100 (図-2) を部材解析 WG に供試体として提供した。

0° 方向	Vf	圧縮強度	圧縮弾性率	支圧強度	支圧弾性率	比重
炭素繊維	(%)	(MPa)	(GPa)	(MPa)	(GPa)	
T700S	46.5%	466 MPa	79.9 GPa	267.6 MPa	25.7 GPa	1.59
M46J	47%	457 MPa	130.2 GPa	229 MPa	28.3 GPa	1.58

表-1 VaRTM 成形物のスクリーニング結果



(ii) 開発部材の機械的材料特性の把握

(a)

平均 (MPa)

324.3

262.4

229.5

22mm

23mm 23.5mm

CFRP 引抜成形部材の部材軸方向の材料特性を、各種材料試験を実施することにより、把握した。実施した試験は、引張試験、圧縮試験、曲げ試験、面内せん断試験、層間せん断試験、支圧試験であり、それぞれ土木学会規準 JSCE-E 531-2007、JIS K 7018、JIS K 7017、ASTM D 7078、JIS K 7057、Mottram 法に従い試験を実施した。各試験につき、試験体数は5体とした。支圧試験の Mottoram 法では、孔径を 22mm、23mm、23.5mm の3種類準備したが、用いた支圧ピンの直径はすべて 22mm とした。表-2 に得られた材料試験結果を示す。

試験方向	弾性	生率	強度			
	平均 (GPa)	変動係数 (%)	平均 (MPa)	変動係数 (%)		
引張	181.9	3.6	1,326	3.9		
圧縮	160.0	4.5	467.0	1.9 2.0 7.2		
曲げ	180.2	0.69	740.2			
面内せん断	6.30	1.8	112.7			
層間せん断	4.44	5.5	33.86	2.6		
(b) 支圧						
孔径	支圧	強度	支圧耐力			

変動係数 (%)

5.0

4.0

表-2 材料試験結果 引張、圧縮、曲げ、面内せん断、層間せん断

 5.5
 54.4
 5.2

 ※支圧試験のピンの直径はすべて 22mm

変動係数 (%)

4.6

4.0

平均 (kN)

91.7

73.8

引張試験から得られた弾性率は、181.9GPa であり、鋼材と比較して約 90%の弾性率を有 していることがわかる。また、積層構成をもとに理論計算から得られた弾性率 178GPa と比 較して、わずかな誤差であり、成形が設計通り行われていることが検証できた。さらに、 CFRP の特徴でもあるが、引張強度と圧縮強度の差が大きく、本研究で開発した部材の場合、 圧縮強度は引張強度の 35%であったが、圧縮強度 467MPa は、鋼材の SM400 材の引張強度 よりも高い値である。

支圧試験からは、孔径が大きくなりピンの直径と差が生じると、支圧耐力が減少することが明らかとなった。これは、クリアランスが大きい場合は、接触面積が減少することが原因であると考えられる。また、孔径 22mmの際の支圧強度は、圧縮強度の約70%であった。

Ⅱ)設計WG((株)長大、フクビ化学工業(株)、日光産業(株)) CFRP部材で構成された小型橋梁の設計と設計手法の確立

(i) CFRP部材で構成された小型橋梁の設計

同厚(t = 14mm)のCFRP部材で構成した。

様々な用途にCFRP引抜部材を適用できるよう要求項目を確認するとともに、製作・施 工性確認のために小型CFRP部材で構成可能な小型橋梁を設計した。

CFRP部材の断面は汎用性のある小型のL形材(L-100×100×14)とした。既往研究 においてCFRP部材の必要断面は剛性の照査や圧縮応力度の照査が決定要因であり、支 圧強度がボルト本数増加の要因となっていること等の知見が得られている。それらを踏ま え、要求性能の改善点として圧縮弾性係数、圧縮強度、支圧強度の向上を図って成形したC FRP部材を設計に用いた。

実際に人が乗れることが可能で、展示可能な大きさ・重量であることや人力で運搬可能な 程度であることを目指して、橋長4m、幅員約1mの下路式トラス橋(歩道橋)を設計した (図-3)。この小型橋梁は、L型材(CFRP)を弦材や床材に用い、歩廊には既製品のF RPグレーチングを用い、接合部には支圧接合用高力ボルトを用いて、ガセットはL型材と



図-3 小型CFRP引抜部材で構成された小型橋梁の設計(概念図)

(ii)鋼製形鋼に代替可能なCFRP部材の標準化と設計手法の確立に向けた研究

a)物性値

各種試験・実験結果をもとに、CFRP引抜部材を構造物に適用する際の強度等と整理した。なお、本研究では、L型材を軸力部材として使用する場合を想定している。

CFRP引抜部材は引張強度よりも圧縮強度が小さいため、圧縮強度、圧縮弾性率、支圧 強度を極力鋼材に近づけられるように積層構成を工夫した結果、表-3に示す物性値を得た。 引張側は弾性率が鋼材よりも若干小さいものの強度は鋼材よりも十分に高く、圧縮側は弾 性率が鋼材の約 80%程度であるが強度は鋼材とほぼ同等である。一方、せん断強度、せん 断弾性率は鋼材よりも小さい。CFRPを軸力部材として設計する際の諸量としてこれら を利用した。

表-3 CFRP引抜部材の物性値(材料試験結果より)

	弓	張	圧	縮	曲	げ	面内も	せん断
	弾性率	強度	弾性率	強度	弾性率	強度	弾性率	強度
	(GPa)	(MPa)	(GPa)	(MPa)	(GPa)	(MPa)	(GPa)	(MPa)
CFRP	182	1326	160	467	180	740	6.30	112.7
SS400(参考)	200	400	200	400	200	400	77	230

b) CFRP引抜部材の圧縮耐荷力

圧縮耐荷力実験結果(弱軸方向を抽出)と、オイラ ー座屈応力度・局部座屈応力度を併記したものを図 -4 に示す。オイラー座屈応力度は、鋼材はE = 200GPa、 σ y=235N/mm2 として求め、CFRPの場合 はE=160GPa、 σ cr=467N/mm²として算出した。また、 CFRP部材の局部座屈応力度は、表-4に示した諸 元を用いて算出した。

図-4 に示すように、L/r が大きな領域ではオイラ ー座屈応力度と概ね同等であり、L/r が小さな領域で は局部座屈の影響を受けていると考えられ、実験値 にバラツキがあるものの、計算においても局部座屈 の影響が生じる領域となっている。この結果から、現 時点では弱軸の諸元を用いた全体座屈応力度及び局



部座屈応力度を圧縮側の制限値とすることが一つの目安と考えられるが、データ数が少な いことや、初期曲がりの影響等も含めてさらなるデータの蓄積や解析を含めたより詳細な 研究が今後の課題である。

表-4 CFRP部材の局部座屈応力度の算出に用いた諸量(単位:mm、N)

Ex	Ey	G _{xy}	$ u_{\text{xy}}$	$ u_{yx}$	t	b	А	Ι	r
160,000	22,000	7,800	0.34	0.09	14	84	2604	991, 500	19.513
()) (

注) CFRPの断面諸量はRのないL-100×100×14 として算出した。

c) 支圧接合部の耐力

CFRP部材の接合には支圧ボルトを想定した。L形材をボルト接合する場合には、1面 接合で2本以上のボルトが使用される。本研究の実験結果から概ね140kN/本程度の耐力が 期待できると考えられる。なお、本研究でのリラクセーション実験において10日経過後の 軸力低下は比較的少ない結果が得られており、今後の課題として、施工性・経済性の向上の ために摩擦接合の適用性に関するさらなる研究が考えられる。

d) CFRP引抜部材の標準化

CFRP引抜部材を既存の鋼製形鋼に代替する場合の一つの指標として、ここでは、圧縮 全体座屈応力度を指標として、実験に用いたCFRP引抜部材が代替可能な鋼形鋼のサイ ズを検討した。鋼製形鋼の有効座屈長とオイラー座屈応力度に初期曲がり等の不完全性を 考慮した圧縮応力度の制限値との関係を図-5 に示す。これらの図に、実験値(CFRP) をプロットした。 比較的長い部材の場合には L-100×100×14(CFRP)は L-130×130×12(SS400)と概ね同等程度であり L-100× 100×10(SS400)よりも大きな耐力を有する。ただし、鋼 製形鋼は局部座屈が支配的とならない断面構成である が、CFRP部材(L-100×100×14)では図-4に示す ように L/r が小さい領域で局部座屈が支配的となるこ とに注意が必要である。また、支圧ボルト耐力は 140kN/ 本程度であり、圧縮応力が 200N/mm²程度であればその 75%とした場合で必要ボルト本数は 3 本となり実用可 能な程度である。一方、引張部材では耐力が非常に大き いことから取付ボルト本数に配慮した部材設定が必要 である。



図-5 鋼製形鋼の圧縮応力 度の制限値と実験値の対比

本研究により、既存の鋼製形鋼よりも板厚を増厚す

ることで CFRP 部材に代替できる可能性を見出した。しかし、データ数が少ないことなどから、実用化に向けてはさらなる実験・解析・検討を行い、例えば、局部座屈と全体座屈の兼ね合いからより合理的な板厚と断面寸法を設定する等の工夫が必要である。

e) CFRP引抜部材の設計手法

現時点ではデータ数が少ないため、実用化に向けてはさらなる研究が必要であるものの、 既存の鋼製形鋼を小型CFRP引抜部材に代替する場合で、軸力部材に使用する場合には、 ①軸方向の応力照査、②軸方向剛性の照査、③細長比の照査、④接合部の照査、等が考えら れる。ここで、軸方向の応力照査では本研究で得られた物性値が一つの目安値として考えら れ、軸方向剛性の照査では例えば部材交換であれば鋼材と同程度の軸方向剛性を確保する ことが考えられる。細長比の照査では、例えば「FRP歩道橋設計・施工指針(案)」では最大 細長比は 100 以下とされており、それを参考とすることが考えられる。接合部の照査では、 本研究での成果を参考にボルト軸力導入を前提として制限値の設定を行うことが可能と考 える。

Ⅲ)部材解析WG(名古屋大学、愛知工業大学、東レ(株)) CFRP引抜部材の設計用特性値の把握

(i) CFRP 引抜部材の耐候性検討

開発された CFRP 引抜部材の大気暴露実験 を実施し、CFRP 引抜部材の実用化までの期 間における材料特性の変化を評価する。大気 暴露実験は、2018 年 9 月より名古屋大学の屋 上で実施しており、1 年ごとに、部材からク ーポンを切り出し、引張、圧縮、曲げ材料試 験を実施することにより、材料特性の経時変 化を明らかにすることを目的としている。現 時点では、暴露実験開始から、まだ1年が経 過しておらず、材料試験は実施していない。 暴露実験の様子を図-6に示す。



図-6 CFRP 部材の大気暴露実験の様子

(ii)CFRP 引抜部材の支圧ボルト接合部耐力評価

a) せん断力を受ける支圧ボルト接合部の耐力評価

本研究で開発した CFRP 部材は、鋼材または CFRP とボルトにより接合することを想定しており、構造設計を行ための、ボルト接合部耐力の特性値を把握する必要がある.本研究で

は、次に示す接合部パラメータを変化させた接合部供試体を用いて、実験的に接合部耐力の 特性値を把握した。考慮した接合部パラメータは、ボルトの種類(摩擦接合用高力六角ボル ト、支圧接合用高力ボルト)、せん断面数(1面、2面)、ボルト導入軸力(無、有)、座金(普 通、角座金)、ボルト列数(1列、2列、3列)である。軸力有のケースは、締付トルク40N・ m(通常の高力ボルトの締付トルクの約5%)でボルトの締付けを行った。1面せん断実験お よび2面せん断実験の模式図を図-7に示す。供試体の種類と名称を表-5にまとめる。各 供試体の種類につき、3体ずつ実験を行った。また、1列、2列、3列接合供試体のCFRP板 の寸法を図-8に示す。 表-5に実験で得られた接合部耐力(最大耐力)を示し、図-9に 各供試体の接合部耐力の比較を示す。図-9では、各供試体の種類につき、3体の供試体の 接合部耐力の平均値±標準偏差を示している。

J1HD1 とJ1HD0 の比較から、ボルト軸力を導入することにより、接合部耐力は2倍程度 になることがわかる。これは、ボルト孔付近の支圧破壊に起因する層間剝離および面外への はらみだしを抑制することで、支圧強度が上昇することが原因であると考えられる。また、 1面せん断と2面せん断の比較では、1面せん断の接合部耐力が2面せん断より平均で約 10%低くなることを確認した。1列接合の場合は、この差が大きくなり、最大で17%の差が 生じている。1面せん断の場合は、偏心曲げにより、ボルトがボルト孔に対して均一に支圧 状態にならないことと、片面は鋼板に抑えられていないことで上記のはらみだしに対する 抑制がきかないことが要因であると考えられる。そのため、1面せん断の場合に、支圧によ るはらみだしを抑制する効果を期待して、60mm×60mm 厚の角座金を実験パラメー タとして加えたが、図-10に示すように、今回用いた角座金では、角座金が面外変形して しまい CFRP のはらみだしを十分抑制できず、角座金が接合部耐力に与える影響は小さか った。

次に、支圧接合用ボルトと高力六角ボルトの比較では、平均すると、支圧接合用ボルトの 接合部耐力が約3%小さくなったが、明確な差は確認できなかった。最後に、ボルト列数の 増加により接合部耐力は増加するが、2列の場合は、1列と比較すると平均1.9倍、3列の場 合は、1列比較して平均2.8倍の耐力となり、列数倍までは増加しないことがわかった。

実橋の適用では、1面せん断接合が多くなることを考えると、支圧ボルト1本あたり、約140kNの接合部耐力を期待できることが明らかとなった。

	-		· •>< 🖬 F		11 201		Ŷ	
		サノ版	道ス		供封休	ł	妾合部耐力	J
列数	ボルト	せんめ	面数 軸力 座金	开码中	平均	変動係	J1HD1	
		田奴			1	(kN)	数(%)	比
		1	去	普通	J1HS1	146.7	10.38	0.833
	一十年	1	伯	角	J1HS2	160.0	4.73	0.909
1	八円	2	無		J1HD0	86.0	9.09	0.489
1		Z	有	普週	J1HD1	176.1	0.91	1.000
	支圧	1	右	普通	J1BS1	147.0	5.07	0.835
		2	伯		J1BD1	171.1	4.53	0.972
		1	右	普通	J2HS1	310.2	1.59	1.76
	六角	1	行	角	J2HS2	305.5	0.26	1.73
2		2	有	普通	J2HD1	317.8	1.05	1.80
	本正	1	有	來 涅	J2BS1	284.3	4.71	1.61
	又江	2	有	百世	J2BD1	306.3	2.46	1.74
	一十年	1	有	並 活	J3HS1	439.2	4.09	2.49
2	八円	2	有	百进	J3HD1	466.2	0.71	2.65
3	まに	1	有	並 语	J3BS1	430.4	1.61	2.44
	又圧	2	有	百迅	J3BD1	464.8	2.25	2.64

表-5 ボルト接合部実験供試体一覧と接合部耐力



b) リラクセーション試験

接合部実験で明らかになったように、接合部の支圧強度は、ボルト軸力が導入されていることにより、ボルト軸力が全く導入されていない場合に比べて、約2倍程度になる。しかし、このボルト軸力は、高いレベルで維持されている必要はなく、通常の高力ボルトの導入軸力の5%でも残っていれば、支圧強度を向上させる効果がある。また、今後、摩擦接合を実現することも視野に入れれば、ボルト締付け時に導入された軸力が長期的にどの程度残存するのかを明らかにすることは、今後、本研究で開発したCFRP部材を用いて補修設計を行う上で非常に重要である。

図-11 に示す3種類の供試体を用いて、標準ボルト導入軸力である226kNを目標にして、 軸部に貼付したひずみゲージの値を読みながら、初期軸力を導入し、その後のボルト軸力の 変動を軸部のひずみを計測することで観察している。報告書を書いている現時点までに35 日間の計測が終了しており、これまでの結果を図-12 に示す。

最初の1週間は、軸ひずみの減少が見られたが、その後の減少は大きくない。35日経過時の軸ひずみの減少量は、ケース1で8.3%、ケース2で12.7%、ケース3で18.4%となっている。1面せん断の接合部形式であるケース2とケース3の減少量が大きくなっている。しかし、ケース3の角座金を使用した供試体の減少量が格段に大きな減少量となっている。その後、供試体を確認したところ、図-13に示すように、ケース3の供試体の積層が平たんではなく、波打っていることが明らかとなった。したがって、ケース3の軸ひずみの減少量が大きくなったのは、座金の違いではなく、供試体に使用した積層体の積層状況が不良であったことが原因であると推測できる。

今後も長期的な計測を継続し、特に Case 1 と Case 2 の軸力変動特性について明らかにしていく予定である。



図-11 リラクセーション試験の供試体



図-12 ボルト軸ひずみの変動



図-13 リラクセーション試験 供試体断面

(iii)CFRP 引抜部材の支圧ボルト接合部疲労特性の把握

a) CFRP 引抜部材支圧接合部の疲労試験

平成 29 年度に選定した繊維基材と積層構成を基に CFRP 引抜部材を製造し、CFRP 引抜 部材のボルト接合部の疲労強度の評価を行った。CFRP 引抜部材は上述の繊維基材や積層構 成によって材料特性が異なることから、まず有孔平板(図-14(a))の疲労試験により部材単体 での疲労特性の把握を行った。また、CFRP 引抜部材のボルト継手では板厚方向のクリープ によってボルト軸力が低減するため摩擦接合ができないことから支圧接合が用いられる。 本研究では CFRP 引抜部材の支圧接合部の試験体(図-14(b))も製作し、疲労試験を実施し た。



有孔平板試験体では公称応力範囲(=荷重/原断面積)を約 250N/mm² として 3 体の疲労試験 を実施した。その結果、全ての試験体で破断はしなかったが、ボルト孔の縁から軸方向に沿 ったき裂が発生し、繰返し回数が増えるにつれて軸方向へと徐々に進展した(図-15(a)、表 -6(a))。このき裂により、20万回毎に実施した静的載荷試験において、伸び剛性に変化が 見られた。荷重変位関係から求めた伸び剛性の変化率を図-16 に示す。この図から、繰返 し回数が増加するにつれて伸び剛性は徐々に低下していることがわかる。そのため、CFRP 引抜部材では、伸び剛性の観点からも疲労強度を評価する必要がある。一方、支圧接合試験 体では有孔平板試験体よりも小さい 140N/mm² 程度の公称応力を静的に載荷した際に CFRP 引抜部材がボルト接合部でせん断破壊した(図-15(b)、表-6(b))。そこで、荷重変位関係の 線形域の上限値である約 60N/mm²で疲労試験を行った。その結果、1000 万回載荷後も部材 の破断は生じなかったが、疲労試験中、突合せ部のコバ面に設置したひずみゲージが徐々に 変動しており、損傷が徐々に拡がっていたと考えられる。試験後に試験体を解体したところ、 ボルト孔の縁から軸方向に沿ったき裂と支圧破壊が発生しており、同条件で疲労試験を継 続した場合破断に至った可能性もある。また、約 45N/mm² で疲労試験を行ったところこれ らの損傷は見られなかった。このことから、支圧接合部の損傷が発生しない上限値は約 45N/mm²から約 60N/mm²の間にあると考えられる。



図-15 試験後の試験体の状況(単位:mm)

図-16 伸び剛性の変化率

表-6 疲労試験結果

試験体	応力範囲	応力比	繰返し回数	備考
	$[N/mm^2]$		$[imes 10^4 \text{ cycles}]$	
PP-1	244	0.02	660	円孔から軸方向に沿ったき裂発生
PP-2	254	0.02	1,200	円孔から軸方向に沿ったき裂発生
PP-3	244	0.02	1,000	円孔にボルト挿入
				円孔から軸方向に沿ったき裂発生

(a) 有孔平板試験体

(b) 支圧接合試験体

試験体	応力範囲	応力比	繰返し回数	備考
	$[N/mm^2]$		$[imes 10^4 ext{ cycles}]$	
В-0	—	—	—	静的に138.5 N/mm ² 載荷時にCFRP引
				抜部材がせん断破壊
B-1	43	0.11	600	損傷なし
B-2	60	0.08	1,000	ボルト孔支圧面の支圧破壊および
				円孔から軸方向に沿ったき裂発生

b) 有限要素解析

有孔平板および支圧接合試験体に対して、異方性を考慮した有限要素解析を行い、ボルト 孔周辺の応力、ひずみ状態を検討した。同解析より、軸方向に高い剛性を有する CFRP 引抜 部材では、ボルト孔の縁から軸方向に沿って最大主ひずみが大きい領域が形成されること がわかった(図-17(a))。このため、有孔平板試験体では微小なき裂がボルト孔縁から発生し た後、き裂が軸方向へと進展したと考えられる。また、支圧接合試験体ではボルトの支圧面 を介して CFRP 引抜部材に荷重が伝達される。そのため、公称応力が有孔平板試験体の 0.24 倍である 60 N/mm² の場合でも、ボルト孔縁の最大主ひずみは有孔平板試験体の 0.75 倍であ る 1.1%となっている(図-17(b))。本解析の結果より、ボルト孔縁の最大主ひずみから軸方 向に進展するき裂の発生を推定できる可能性を示した。



(a) 有孔平板試験体(b) 支圧接合試験体(図-17 最大主ひずみのコンター図 (変形倍率:50倍)

以上のように、CFRP 引抜部材の有孔平板および支圧接合試験体では疲労による破断は生じなかった。しかし、き裂が軸方向に進展することによる伸び剛性の低下が見られたため、 今後の課題として、伸び剛性の観点から疲労に対する特性値を検討する必要がある。

(iv) CFRP 引抜部材の圧縮耐荷力評価

CFRP の母材(ポリプロピレン(PP)やポリアミド(PA))は他の樹脂と比べてそれ自体の弾 性率が低く,比較的低い応力で塑性挙動を示すため,炭素繊維との界面接着強度を向上させ て含浸性を高めたとしても,繊維方向の圧縮耐荷力の大幅な改善にはつながらないことが 懸念されている。

この実験を行う理由、CFRPという新部材が橋梁を支える補講材として使用できるかを検 討するために行う。そしてどれくらいの圧縮力に耐えることが出来るかを調べるためであ る。CFRPの圧縮に対するデータが現状不足しているのでデータを集めるために圧縮実験を 行う。



図-18 長柱試験機



図-19 CFRP試験体

研究背景は,CFRPは引張強度が高く,圧縮耐荷力が低いことを示せば,構造材の予想外の破壊の起点となり得るので,圧縮耐荷力を具体的に知る必要がある。

愛知工業大学の 300t 長柱試験機(図-18)を用いて今回のCFRPの圧縮実験を行った。 試験体を冶具と冶具の間に入れ写真-2 のようにセットし,試験体を中立軸に合わせる。開 発部材の試験体は,山形鋼材で厚さ14mm,1辺100mm,高さ1m,2m,3m,4mの試験体 を使う(図-19)。

本研究は,開発部材の柱の圧縮実験を行い,短柱領域から長柱領域までの細長比を調べる。 弱軸:1m,2m,4m,強軸:2m,3m,4mの試験体各2体ずつ使い12本の実験を行う。 本研究では,ひずみ,水平変位,圧縮変位,最大荷重などを測る。

試験体の座屈の塑性域が大きいと考えられる長さそれぞれ 1/2,1/4 の表裏の計 8 枚貼る.

(ひずみゲージの 1/4 は下になるように貼る). 1mの試験体のみ長さ 1/2 のところにだけひ ずみゲージを貼る. 試験体に番号が書かれているところにひずみゲージを貼り, 0,1,2,3 が 1/2 のところで 4,5,6,7 が 1/4 の長さを表している。

この長さの試験体を使う理由は、オイラー曲線上でプロットするときに同じ耐荷力と長 さで大きな変位の差が出ると予想できるためこの長さで実験を行う。

	長さ(m)	名前	最大荷重(kN)	細長比	座屈した箇所	最大応力(MPa)	最大水平変位(mm)	最大圧縮変位(mm)	最大ひずみ ε
	1	A−1	695	65	なし	267	9	-42	-2030
	L '	A-2	386	65	なし	148	3	-5	-1032
ᇐᇔ	2	B-1	425	116	3/4	163	46	-30	-1104
羽翈	2	B-2	324	116	1/2	125	77	-14	-1560
		C-1	142	218	1/2	54	318	-23	-1043
	*	C-2	137	218	1/2	52	142	-14	-2031
	2	D-1	331	60	1/4	127	52	-24	-2025
	2	D-2	396	60	1/3	152	654	-8	-2232
没劫	2	E-1	232	86	なし	89	63	-9	-1447
饵翈	3	E-2	253	86	1/2	97	458	-12	-580
		F-1	207	112	1/2	80	114	-25	-1524
	4	F-2	200	112	1/2	77	136	-20	-1322
鋼材弱軸	2	G-1	187	120	1/2	147			
銅材強軸	2	G-2	405	55	1/2	555			

表-7 試験結果

同じ長さで最大荷重に大きな差が出た理由として、試験体を固定するために中立軸に試 験体をセットするときに中立軸からずれてしまったため最大荷重に大きな差が出たと考え られる。1/2の箇所で座屈した試験体は中立軸が合っており、それ以外の試験体は中立軸が ずれたと考えられる。

中立軸がずれたときの試験体は 1/4 のところで座屈、弱軸方向にセットしたのに強軸方向 に座屈したなどの挙動を示し、最大荷重に1本目と2本目で大きな差が出てしまいました。 1mの試験体は長さが短いので中立軸がずれてなくても座屈しなかった。

図-20 の結果より、強軸の試験体は比較的にオイラー曲線の傾きにプロットすることが でき、弱軸は多少ばらつきが出てしまったが弱軸オイラー曲線の近くにプロットする結果 になった。全体的に理論値のオイラー曲線より応力と細長比が小さいところに実験値がプ ロットされた。

研究開発目標は、CFRP 引抜部材の圧縮耐荷力特性に関するデータを実験的に取得し、等 辺山形鋼材を有する CFRP 引抜部材の橋梁補剛材に適用するのか検討する。

実験を実施していない細長比は開発部材からオイラー曲線を描き実験値と比較して検討 する。以上より、CFRP 引抜部材の圧縮耐荷力を把握、橋梁の補剛材として使用できるのか 検討する。





図-21 弱軸 4m1本目 (C-1)

図-22 強軸 4m 2 本目 (F-2)

今回の試験結果より、強軸より弱軸のほうが大きな応力がプロットされた(表-7、図-20)。 CFRPの同じ長さで強軸、弱軸を比較してみた(図-21、図-22)。応力-圧縮変位、応力 -水平変位、応力-ひずみのグラフから同じ長さでも弱軸と強軸が変わるだけで大きな差が出 ることが読み取れた。

試験体が座屈するとき弱軸は膨らむように座屈し、強軸は凹むように座屈した(図-23)。 CFRP圧縮実験のデータは現状不足しているので今後橋梁の補剛材として使用できる のか検討するためにはデータを引き続き集める必要がある。

今回の実験により中立軸がずれるとピーク値に大きな差が出てしまうことが実験からよ くわかったので中立軸のずれの許容範囲についても調べる必要があると思われる。

中立軸のずれ具合によって CFRP が橋梁の補強部材と使用できるのか検討する必要がある。





(a) 弱軸 4m (C-1)(b) 弦
図-23 座屈した試験体

実験値で強軸はオイラー曲線の形をプロットすることができた。弱軸は少しばらつきが 出てしまい 1m と 2m の 1本目と 2本目に大きな差が出てしまった。

CFRPは橋梁の補強部材として使用できるのか現状データが不足しているのでこれからもデータを引き続き集める必要がある。

長さ 1/2 で座屈した試験体以外は同じ長さでも最大荷重にばらつきが見られた。1/2 で座 屈した試験体は同じ長さで最大荷重が近い値になった。

実験値とオイラー曲線を比較すると弱軸の実験値は弱軸オイラー曲線の近くにプロット され、強軸の実験値は強軸オイラー曲線より応力が小さいところにプロットされた。

橋梁として山形鋼材CFRPを補講材として利用するとき強軸より弱軸の方がより強い 最大荷重が本研究よりでたので弱軸として実際には使用した方が適当である。

本研究での試験結果より CFRP は鋼材の代替品として使用することができることが分かった。

Ⅳ)施工WG(日光産業(株))

<u>CFRP部材補修と鋼材補修における積算比較</u>

(i) 小型橋梁の施工試験

小型橋梁の部材加工試験の結果、以下のことが判明した。

a) 切断加工 (図-24)

ディスクサンダーを用いた切断加工は、鋼材より容易に可能。切断時の粉塵対策が必要と なる。



図-25 切断加工の写真

b) 孔明加工 (図-26)

電動工具を用いての孔明加工。支圧接合の為、接合部材間の孔位置精度が必要となる為、 当て打施工が必要



(a) 写真1

図-27 孔明加工

- 3) 組み立て (図-28)
- トラス橋の組み立ては、部材が軽いため鋼材より容易に可能。また、試作橋の重量も約3 00kgであり、人手での移設ができる。



(a) 試作橋の移設



(b)試作橋完成

図-29 組み立て

(ii) CFRP補修部材の施工積算

a) 積算条件

図-31のような補修を行う場合、CFRP部材と鋼材の場合の工程をフローチャートに 基づき積算を行った。なお、CFRP部材の各工程(図-30)における作業性等は、実際の 加工試験に基づいて積算している。



図-31 積算に使用したCFRP補修の概略図



図-32 CFRP 部材と鋼部材による補修工程の比較

b) 加工試験結果

図-33 に示すCFRP部材の孔明試験を行い、表-8 に示すように CFRP 部材と鋼材と の加工時間の比較を行った。この様に、各加工工程での加工時間の比較、諸経費や材料部材 の比較を行った。



図-33 CFRP 部材孔明試験

		CFRP	鋼材
		t=14mm	t=12mm
	XI	17.4	29.9
孔明時間	X2	15.4	27.3
	X3	16.2	26.4
平均時間	X	16.3	27.86
1mm当り時	撊	1.167s/mm	2.322s/m
時間比3	葬	1.9	989

表-8 鋼材とCFRPの加工時間比較表

すべての工程の加工を積算した結果、表-9に示すようにCFRPの施工費用は鋼材の場合と比較して約16%低減できることが分かった。

この試算はあくまでモデル試算に基づいている。実際の施工現場により、人手による運搬 等が必要となる現場では、CFRPのさらなる優位性が得られる。

次年度以降は、実際の補修現場にける実証試験を行い、CFRPに適した施工現場や施工 方法について研究を行う予定である。



表-9 CFRPと鋼材の加工費比較表 (※比較表の積算費用に、CFRPおよび鋼材の材料費は含まない)

V) センシングWG(東京大学、(株)レーザック、フクビ化学工業(株)) 埋込型光ファイバセンサを用いた MRO 最適化手法の検討

(i) i-Composite 化された CFRP 引抜部材の作製と検証実験

昨年度、CFRP 引抜材に折損なく光ファイバを埋め込むことに成功した。今年度は、さら に埋め込み方法、ファイバ引き入れ、引き出し方法を検討し、VaRTM 成形においてフェル ールを取付けした光ファイバ素線を埋め込んだ成形体を作製して、切り出し後フェルール が露出した端面より光の出し入れを可能とする埋め込みの手法を確立した。具体的には、図 -34 に示す光ファイバひずみセンサである Fiber Bragg Grating (FBG)を4つもつ光ファイバ を埋め込み(図-35)、光の導通(図-36)、反射波長スペクトルの観測(図-37)、ひずみ の計測に成功した(図-38、図-39)。以下、その内容について述べる。

まずガラス繊維の NCF シートを積層した引抜成形体において 4 つの FBG をもつ光ファ

イバ素線を成形時に埋め込んだ。なお、今年度 GFRP で試作した理由は、実験コストを下げ ることと、剛性を下げて埋め込み後のひずみ計測試験を実施しやすくするためである。図ー 35 に成形後の引抜材を示す。成形後に、赤色レーザを入射し、導通を確認した。これによ り光ファイバの折損がないことが示された。さらに、埋め込み FBG インタロゲーターを接 続し、埋め込まれた光ファイバにある4つのFBGからの反射波長スペクトルを観測した。 図4のように成形前と成形後で奥側(光源から離れている側)にある FBG からの反射光の 強度が落ちているが、ひずみ計測に必要な波長シフトの観測には十分な量の反射光が観測 され、スペクトルの形状もほとんど変わっていない。つぎに、FBG がひずみ計測用のセン サとして動作するかを、簡易的な方法で確認した。まず、図-35の引抜材を約30cmの試験 片に切り出した。切り出し位置は、図-34 にある各フェルールの中央部であるため、試験 片には1つの FBG が含まれることになる。切り出したのち、フェルール端面を研磨し、光 ファイバコネクタと篏合させた(新手法)。図-38 のように嵌合させた光ファイバコネクタ から光ファイバケーブルを通して、FBG インタロゲーターに接続し、試験片端部を押し引 きして FBG の反応を観測した。試験片は曲げを受けていることになるが、板厚中央の FBG では中立軸に近いためひずみの出力が小さいことが予測されたが、図-39のように小さな ひずみを明確に捉えていることを確認した。

今後の課題は、光ファイバセンサが一体化された CFRP 引抜部材(i-Composite)によるひ ずみ計測の定量的な評価(静的試験、繰り返し荷重試験)、異常検知、剛性評価、実働荷重 評価手法の実証、モデル構造物あるいは実橋での検証、FBG センサ埋込一体化成形体の製 品仕様の確立、量産技術の確立である。



4連FBGアレイ素線+5個のフェルール装着後



図-35 GFRP 引抜材



図-36 光ファイバ素線埋め込み成形体の赤色レーザ導通確認(上:入射側、下:出射 側)



図-37 引抜成形前後の反射波長



図-38 引抜部材切り出し後のひずみ計測試験の様子



図-39 ひずみ計測結果

(ii) MRO 最適化による信頼性・経済性向上に資する方法論の検討

簡単な接着構造モデルにおけるき裂検知、変位同定、荷重同定し(図-40)、統計的な手 法を用いて不確実性を低減することによる、信頼性工学、損傷許容設計に基づいた MRO (Maintenance, Repair, and Operation)の最適化手法について検討した。準静的荷重の条件で はあるが、ひずみ情報をもとに、実構造の状態量を同定し、精度を上げた推定によってメン テナンスの最適化を図る方法を考案した。



図-40 接着構造モデルを用いた MRO 最適化の検討

(iii) 実環境下における光ファイバセンサの耐久性に関する検討

図-41 に示す福井県あわら市にある鋼製橋梁、清間橋(せいまばし)に 2017 年 3 月 15 日に光ファイバひずみセンサを実施工し、以来半年に 1 回の頻度でセンサの健全性を現地 確認した。図-42 にセンサが施工されている様子を示す。温度補正用センサも含めて全 7 個の光ファイバセンサを一筆書きに配置している(図-43)。2017 年 3 月以来の無荷重時の ひずみ計測結果の推移を図-44 に示す。全センサが劣化無く機能しており、季節的な温度 変化による構造材料の膨張収縮が見えている程度の歪み値を示している。このように定期 的にモニタリングデータを積み上げていけば、構造劣化等の検知に繋げられる可能性があ る。



図-41 清間橋



図-42 清間橋に設置された光ファイバひずみセンサ



フレハオル県	MX IX LUUUI	爬上位值
1	1532	上流主桁下
2	1572	上流下弦材
3	1556	上流斜材
4	1548	中央斜材
5	1580	温度用
6	1564	中央下弦材
7	1540	中央主桁下

図-43 計測システムの概要



(3) 成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍 又は 雑誌名(巻号数、論文 名)	刊行年月日	刊行・発行元	原著者
土木学会論文集 A1 (vol.75 No.5 II_27-II_35, 腐食した鋼桁端部に対する引抜成形 FRP アングル部材による補修方法の検討)	R01. 05. 31	土木学会	北根安雄, 上山裕太, 寺口大輝, 松井孝洋, 舘石和雄, 後藤基浩

(4) 成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の 種類・番号	出願年月日	取得年月日	権利者
FRP 引抜成形体、及びその 製造方法	特願 2018-241700	H30. 12. 25	(出願中)	フクビ
成形体	特願 2019-040047	H31.03.05	(出願中)	フクビ

(5) 成果の実用化※の見通し ※論文発表や現場試行ではなく実業務での社会実装

部材解析WGでは、CFRP引抜部材の耐久性に関する特性値の把握のため、次の研究を継続実施する。

- CFRP引抜部材の耐候性検討
- ・CFRP引抜部材の支圧ボルト接合部疲労特性の把握

施工WGでは、CFRP引抜部材の施工に関する課題抽出及び検証のため、次の研究 を継続実施する。

- ・モデル構造物の試験施工
- ・試験施工・モデル施工により施工管理基準の提案

センシングWGでは、埋込型光ファイバセンサを用いたMRO最適化手法の検討の ため、次の研究を継続実施する。

- i Composite化されたCFRP引抜部材の作製と検証実験
- ・MRO最適化による信頼性・経済性向上に資する方法論の検討
- ・実環境下における光ファイバセンサの耐久性に関する検討

また、成形WGおよび設計WGでは、平成29~30年度の研究成果を基に、次の研究を継続実施する。

- ・異なる断面をもつCFRP引抜部材の開発
- CFRP引抜部材の強度等の整理
- ・CFRP引抜部材の標準化
- ・設計手法の確立
- ・コスト把握
- (12) その他

特になし。