

## (44) 圧縮を受ける部材に対するスリット入りパイプ状FRPによる補強法の基礎検討

伊沢 温<sup>1</sup>・山本 梨乃<sup>1</sup>・樋口 彰悟<sup>1</sup>・中島 浩二<sup>2</sup>・松本 幸大<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 豊橋技術科学大学大学院 建築・都市システム学専攻  
(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

E-mail: {izawa.madoka.ie, yamamoto.rino.ya, higuchi.shogo.rr}@tut.jp

<sup>2</sup>福井ファイバーテック  
(〒441-3106 愛知県豊橋市中原町岩西5-1)

E-mail: k-nakajima@fukui-fibertech.co.jp

<sup>3</sup>正会員 豊橋技術科学大学 次世代半導体・センサ科学研究所  
(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

E-mail: matsumoto.yukihiko.lp@tut.jp

軽量・高強度なFRPを用いた構造部材の補修補強法に関する研究が盛んに行われている。本研究では、軸圧縮を受ける円形断面部材に対するFRPによる補強法として、被補強部材の形状に適合するよう事前成形した薄肉FRP材を現場で設置するだけの極めて簡便な手法を提案する。本手法は、FRPの高い弾性変形性能を活かしプラスチックバンドの様に補強材を設置するものであり、積層数も所望の性能に応じて任意に設定することができる。さらに、既往の補修補強法では被補強部材に下地処理を施し接着接合により応力伝達を行うことで効果を発揮するものが多いが、圧縮を受ける部材の場合は接着接合を用いなくとも耐力向上が可能である。本報では、以上の手法を用いて座屈試験を行い、座屈荷重が向上することを確認できた。

**Key Words:** HFRP, unbonded, pipe, compression, reinforcement, VaRTM, buckling

### 1. はじめに

近年、軽量・高強度なFRP材を用いた建設構造部材の補修・補強法に関する研究が盛んに行われている<sup>1)5)</sup>。FRP材を用いた既存構造物の補修・補強法は、既存構造部材の表面に接着剤を用いてFRP材を接着接合したり表面上に直接成形したりして、既存部材の負担応力を軽減することで、部材耐力の回復や向上を図る手法が一般的である。数多くの補修・補強実績があるが、接着接合部の剥離により応力伝達が不可能となることで性能が発揮できなくなるため、その施工管理や剥離強度の把握、長期の性能評価が肝要となる。特に、鋼構造部材への接着による補修・補強の場合、鋼材の降伏や局部座屈に伴う局所的な変形に対する追従性は課題である。こうした背景から、筆者らは、FRP材を既存構造物の補修・補強に用いる場合において、力学条件が満たされれば接着を用いなくとも効果が得られる非接着補剛法に関する検討を

進めている<sup>6)10)</sup>。この手法は、既存部材である被補強部材とFRP補強材とは接着接合されないため、接着面の表面処理が必要なくなり施工性の向上が見込まれること、また接着層の剥離による急激な耐力低下が生じないことが利点であるが、接着による補強に比べFRP材の使用量が増加することが欠点となる。これまでに、軸圧縮力を受ける細長い鋼部材の部材座屈変形を非接着CFRP材で拘束することで圧縮耐力や最大耐力到達後の耐力低下性状を改善できること<sup>6)7)</sup>、鋼板に対して溝形FRP材を嵌め込むことで同様の効果を発揮できること<sup>8)9)</sup>を示してきた。

また、スリット入りパイプ状FRPをプラスチックバンドのように補剛材として取り付ける補強方法が実現可能であること、曲げを受ける円筒部材に対してFRP補剛材を装着することで部材の曲げ変形を拘束し、曲げ耐力を向上できること<sup>10)</sup>を明らかにしてきており、その設計法についても提案し、実験結果との対応を示してきた。

本研究では、補剛対象材に GFRP 管部材を、補強材に一方炭素繊維シートとガラス繊維クロスを使用したハイブリッド FRP 材(以下、HFRP)を用い、非接着により座屈荷重を向上させる手法について補強材の成形法と施工法、ならびに基礎的な実験検討と設計方法の検討を行った結果について報告する。なお、本試験では文献 10) で用いた試験体の補剛対象材及び補剛材に損傷が見られなかったことから本研究における軸圧縮試験体として使用している。

## 2. 補強方法<sup>10)</sup>

本手法は母材の曲げ変形を拘束することで部材としての座屈荷重を向上させるものである。

補剛対象材には GFRP 管、補剛材には CFRP と GFRP の積層板を使用し、その断面形状は、既存円形断面部材への応用を想定し、スリット入りパイプ断面とした。これにより、薄肉 FRP 材の高い弾性変形性能を活かし、プラスチックバンドの様に開いて嵌め込むことで設置することができる。また、スリット入りパイプ断面 FRP 材の積層数は所望の性能に応じて増やすことができる。

成形は、一方高強度炭素繊維シート(UT70-30, 300gsm)1ply を用いた CFRP と、ガラス繊維クロス(ERW580-544A/T, 580gsm)1ply を用いた GFRP の積層を 1 層として FRP 管に巻き付け、取り外し用のスリットを約 10mm 設けた上で行う。補剛材に必要なとされる機械的性質は主として曲げ剛性のため炭素繊維シートは軸方向繊維のみとするが、補剛材両端部と中央部には既存部材との接触により局所的な周方向応力も作用すると考えられるため、ガラス繊維クロスは 2 方向繊維を用いている。樹脂硬化後、すべてを取り外して脱型し、バリ等を除去した後、1 層ごとに 180 度回転させて FRP 管に装着させる。なお、補剛対象材と補剛材とは接着しないが、補剛材同士はエポキシ系接着剤で一体化させる。その概要図を 図-1 に示す。

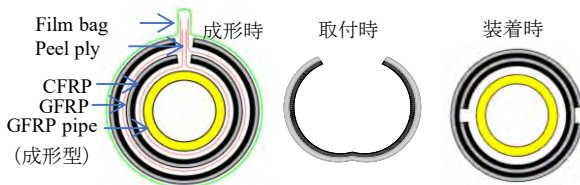


図-1 FRP 補剛概要

## 3. 座屈荷重の算定法

非接着補剛のため、GFRP 管と HFRP で構成された重ね梁部材として座屈固有値解析を行うことで線形座屈荷重の下限値を求める。線形座屈荷重は式(1)で示される一般固有値問題より算出される。求められた固有値のうち最小のものが線形座屈荷重の最小値  $P_{Euler}$  となる。

本研究では補剛対象材を補剛位置で 2 要素に分割し、補剛材は 1 要素でモデル化している。力学モデルを 図-2 に示す。補剛対象材の弾性剛性マトリクス  $[K_L]$  と幾何剛性マトリクス  $[K_G]$  はそれぞれ式(2), (3)で表される。無補剛の場合はこの式を式(1)に代入して座屈荷重を求める。補剛材の弾性剛性マトリクス  $[K_L]_E$  は式(4)で表される。なお、非接着による補剛のため、補剛材に座屈前に軸力はかかっていないとみなし、補剛材の幾何剛性マトリクスは考慮しない。式(2)-(4)をまとめた全体剛性マトリクスを式(5), (6)に示す。この式を式(1)に代入し、補剛後の座屈荷重を計算する。

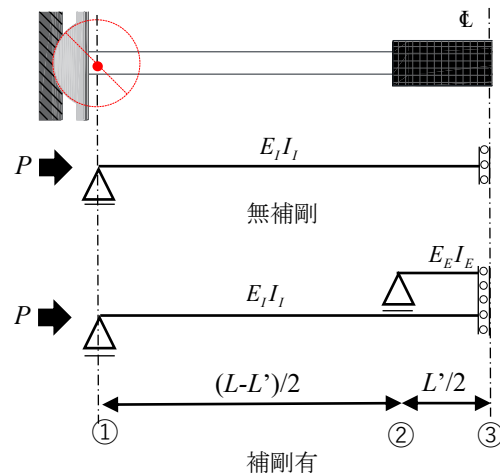
$$\begin{aligned} [K_L]\{U_L\} - \lambda[K_G]\{U_L\} &= 0 \\ \|[K_L] - \lambda[K_G]\| &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$\{U_L\}$  : 変位ベクトル

$\lambda$  : 固有値(線形座屈荷重)

$[K_L]$  : 弾性剛性マトリクス

$[K_G]$  : 幾何剛性マトリクス



$P$ : 荷重,  $L$ : 補剛対象材長さ,  $L'$ : 補剛材長さ,  $E_L I_L$ : 補剛対象材の曲げ剛性,  $E_E I_E$ : 補剛材の曲げ剛性, ①, ②, ③: 節点番号

図-2 力学モデル

$$\begin{Bmatrix} M_{1I} \\ Q_{2I} \\ M_{2I} \\ Q_{3I} \end{Bmatrix} = [K]_I \begin{Bmatrix} \theta_{1I} \\ v_{2I} \\ \theta_{2I} \\ v_{3I} \end{Bmatrix}$$

$$[K_L]_I = \frac{E_I I_I}{L^3 L_1^3} \begin{bmatrix} 8L^3 L_1^2 & -24L^3 L_1 & 4L^3 L_1^2 & 0 \\ & 96(L^3 - 3LL'L_1) & -24LL'L_1(L-2L') & -96L_1^3 \\ & & 8LL'^2 L_1^2 & -24L'L_1^3 \\ sym & & & 96L_1^3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[K_G]_I = \frac{1}{60L'L_1} \begin{bmatrix} 4L'L_1^2 & -6L'L_1 & -L'L_1^2 & 0 \\ & 144LL'L_1 & 0 & -144L_1 \\ & & 4LL'L_1 & -6L'L_1 \\ sym & & & 144L_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$L_1=L-L'$ ,  $M_{iI}$ : 補剛対象材の節点  $i$  の曲げモーメント,  $Q_{iI}$ : 補剛対象材の節点  $i$  の荷重,  $v_{iI}$ : 補剛対象材の節点  $i$  の変位,  $\theta_{iI}$ : 補剛対象材の節点  $i$  の回転角,  $[K_L]_I$ : 補剛対象材の弾性剛性マトリクス,  $[K_G]_I$ : 補剛対象材の幾何剛性マトリクス

$$\begin{Bmatrix} Q_{2E} \\ M_{2E} \\ Q_{3E} \end{Bmatrix} = [K]_E \begin{Bmatrix} v_{2E} \\ \theta_{2E} \\ v_{3E} \end{Bmatrix}$$

$$[K_L]_E = \frac{8E_E I_E}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 3L' & -12 \\ & L'^2 & -3L' \\ sym & & 12 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$M_{iE}$ : 補剛材の節点  $i$  の曲げモーメント,  $Q_{iE}$ : 補剛材の節点  $i$  の荷重,  $v_{iE}$ : 補剛材の節点  $i$  の変位,  $\theta_{iE}$ : 補剛材の節点  $i$  の回転角,  $[K_L]_E$ : 補剛材の弾性剛性マトリクス

$$\begin{Bmatrix} M_{1I} \\ Q_{2I} + Q_{2E} \\ M_{2I} \\ M_{2E} \\ Q_{3I} + Q_{3E} \end{Bmatrix} = [K] \begin{Bmatrix} \theta_{1I} \\ v_{2I} = v_{2E} \\ \theta_{2I} \\ \theta_{2E} \\ v_{3I} = v_{3E} \end{Bmatrix}$$

$$[K_L] = 96 \begin{bmatrix} \frac{E_I I_I}{12L_1} & -\frac{E_I I_I}{4L_1^2} & \frac{E_I I_I}{24L_1} & 0 & 0 \\ & \frac{(L^3 - 3LL'L_1)E_I I_I}{L^3 L_1^3} + \frac{E_E I_E}{L^3} & \frac{(L^2 - 2LL')E_I I_I}{4L'^2 L_1^2} & \frac{E_E I_E}{4L'^2} & \frac{E_I I_I + E_E I_E}{L^3} \\ & & \frac{LE_I I_I}{12L'L_1} & 0 & -\frac{E_I I_I}{4L'^2} \\ & & & \frac{E_E I_E}{12L'} & -\frac{E_E I_E}{4L'^2} \\ sym & & & & \frac{E_I I_I + E_E I_E}{L^3} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[K_G] = \frac{1}{60L'L_1} \begin{bmatrix} 4L'L_1^2 & -6L'L_1 & -L'L_1^2 & 0 & 0 \\ & 144L & 0 & 0 & -144L_1 \\ & & 4LL'L_1 & 0 & -6L'L_1 \\ & & & 0 & 0 \\ sym & & & & 144L_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

#### 4. 座屈試験

##### (1) 対象部材

本試験では、GFRP 管に対する軸圧縮試験とし、部材中央周辺をFRPによって補剛する。引張試験で得られたGFRP 管とHFRPの物性値<sup>10)</sup>を表-1に示す。補剛材長は500mm、800mmの2種類とし、積層数は8層としている。

GFRP 管を直径60.5mmの鋼管が中心に溶接された厚さ9mmのプレートにはめ込んだ。鋼管とGFRP 管の接着にはエポキシ系接着剤(E258R)を用いている。試験体の座屈方向が不明であったため、プレートと直径200mmの球座を8か所ボルト接合することで、材料端部の支持条件を両端2方向ピン支持としている。これにより、最も低い座屈荷重が評価できる。座屈長さ $L$ は、球座の直径の中心からの距離である。寸法図を図-3に、球座の写真を図-4に示す。

##### (2) 実験方法

本試験では、大掛かりな設備が不要であり、多積層のFRPを成形することに適した真空樹脂含浸成形法(Vacuum assisted Resin Transfer Molding, 以下VaRTM法)を用い、成形用の型として補剛対象材であるGFRP 管を用いて、成形を行った。VaRTM法は、技術者の技量に左右されにくく、ハンドレイアップ法に比べ、繊維含有率が高く均質で高品質なFRPの成形が可能である。成形後、所定の寸法に切断加工を行い、1層ずつ脱型し、1層ごとに180度回転させながらGFRP 管に装着した。その様子を図-5に示す。

装着後は、補剛材の層間をエポキシ系樹脂で接着することから、1層当たりの厚さに層数を乗じた値が補剛材の厚さではなくなるため、改めて外径の計測を行い、そこから繊維体積含有率と弾性係数、断面二次モーメントの評価を行っている。この実測による部材寸法とそこから算出される各試験体の情報を表-2に示す。



図-3 寸法図



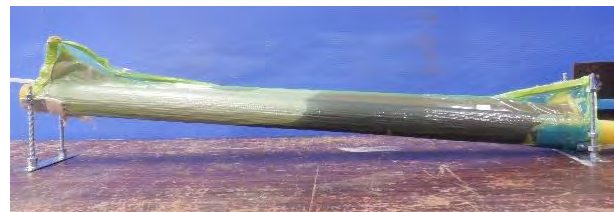
図-4 球座

表-1 材料物性値

		GFRP 管	HFRP
引張弾性率	[N/mm <sup>2</sup> ]	26043.9	69299.7
ポアソン比		0.256	0.063



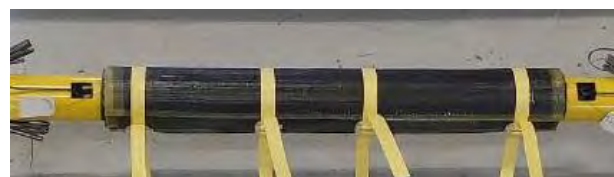
(a)材料準備



(b)含浸時



(c)脱型時

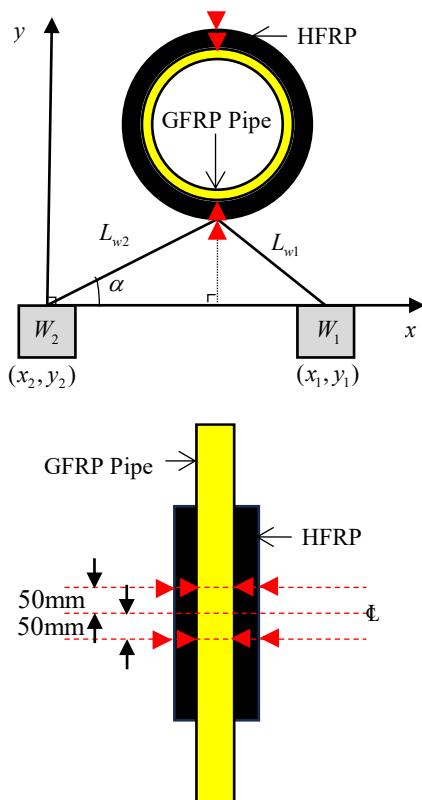


(d)装着時<sup>10)</sup>

図-5 成形時の様子

表-2 部材情報

補剛対象材(GFRP管)	
座屈長さ[mm]	1800
外径[mm]	49.3
肉厚[mm]	5.6
弾性係数[kN/mm <sup>2</sup> ]	26.0
断面二次モーメント[mm <sup>4</sup> ]	1.9×10 <sup>5</sup>
補剛材(HFRP)	
補剛材長[mm]	500      800
1層当たりの厚さ[mm]	0.702      0.681
積層数	8      8
外径[mm]	66.5      65.0
肉厚[mm]	8.1      7.9
弾性係数[kN/mm <sup>2</sup> ]	45.2      48.1
断面二次モーメント[mm <sup>4</sup> ]	6.7×10 <sup>5</sup> 5.9×10 <sup>5</sup>



$W_i$ :巻き込み型変位計,  $L_{wi}$ :巻き込み型変位計計測値,  
 $x_i, y_i$ :巻き込み型変位計設置位置座標, ▲:歪ゲージ位置

図-6 巻き込み型変位計と歪ゲージ設置概要図

本実験は、無補剛試験体、及び補剛材長  $L'=500\text{mm}$ 、 $800\text{mm}$  の補剛試験体の合計3体の試験体で実施した。歪ゲージは部材中央から $\pm 50\text{mm}$ の個所に、GFRP管に4か所、HFRPに4か所、部材中央に巻き込み型変位計を2本設置した。巻き込み型変位計と歪ゲージの設置概要を図-6に示す。巻き込み型変位計は、任意の座屈変形を計測できるよう2本をV字に配置している。なお、本実験では $y_1=y_2$ として設置している。

### (3) 試験結果

本実験では、各試験体を2回ずつ载荷している。1回目が座屈した後除荷した上で2回目を载荷している。

試験の様子を図-7示す。荷重-クロスヘッド変位関係を図-8に、荷重-中央水平変位関係を図-9に示す。荷重-歪関係を図-10に示す。中央水平変位は、巻き込み型変位計の計測値を、図-6に示される巻き込み型変位計の設置位置から三角関数、及び余弦定理を用いて算出した式(7)、(8)に代入することにより平面上での最大変位 $\delta_{xy}$ を示している。また、初期座標 $(x,y)$ を $(0,0)$ とした各試験体の部材中央の位置座標を図-11に示す。

座屈荷重は、荷重-クロスヘッド変位関係から式(1)より求めた各試験体の座屈荷重の20~50%の際の値を用いて傾き $k_0$ を求める。その一覧を表-3に示す。以降のステップ $[i, i+1]$ 間で $k_i$ を求め、 $k_i < 0.01 k_0$ となった時の荷重を座屈荷重としている。式(9)に $k_i$ の算出式を示す。また、変形方向並びに変形挙動に一貫性がないことから、座屈後、等しい座屈変形時における荷重を比較するために、補剛対象材の歪が $-2000\mu$ の時の荷重を比較している。それらをまとめたものを表-4に示す。

$$\delta_{xy} = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (7)$$

$$x = x_2 + L_{w2} \cos \alpha$$

$$y = y_2 + L_{w2} \sin \alpha$$

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{(x_1 - x_2)^2 + L_{w2}^2 - L_{w1}^2}{2(x_1 - x_2)L_{w2}} \quad (8)$$

$$k_i = \frac{P_{i+1} - P_i}{\delta_{z(i+1)} - \delta_{zi}} \quad (9)$$

表-3  $k_0$ の値[kN/mm]

	無補剛	$L'=500\text{mm}$	$L'=800\text{mm}$
1	11.11	11.31	9.09
2	11.10	11.11	8.70

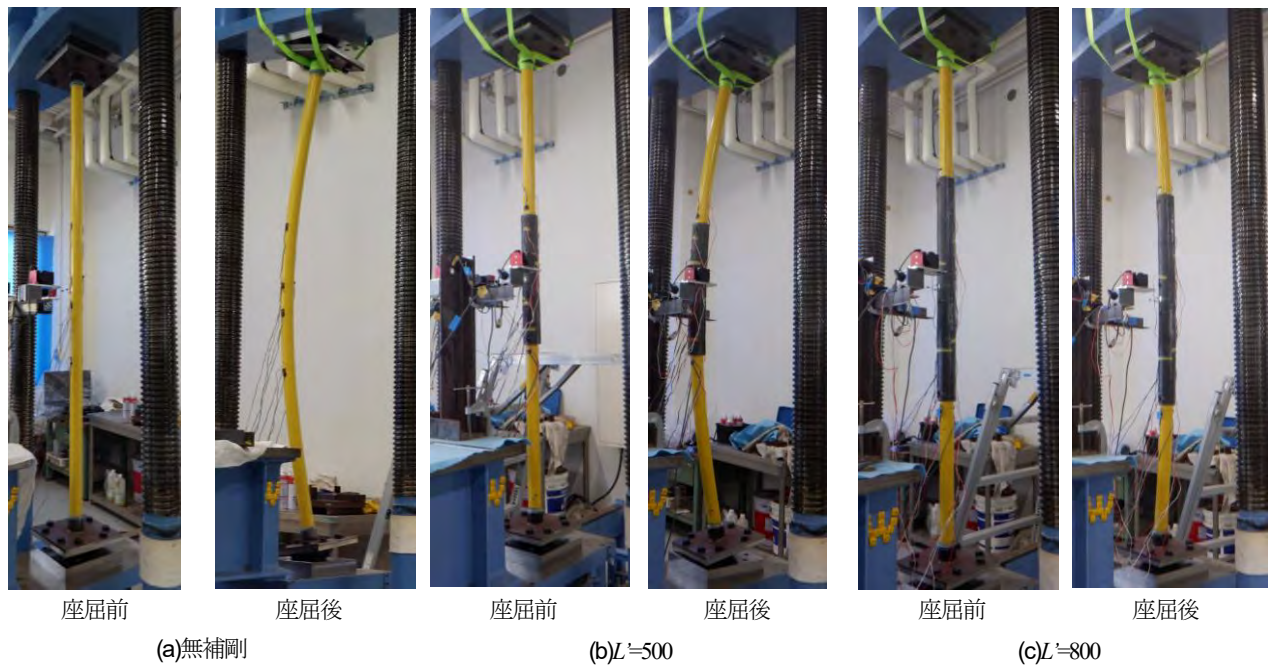


図-7 試験体の様子

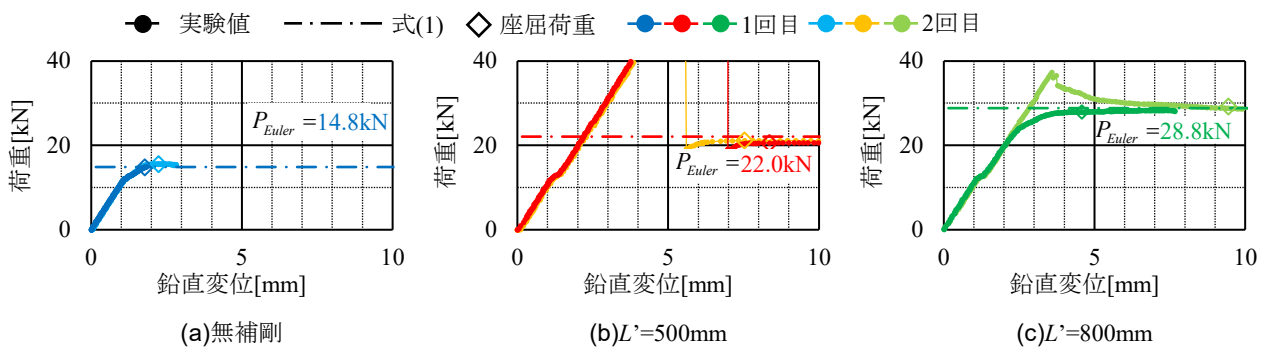


図-8 荷重-クロスヘッド変位関係

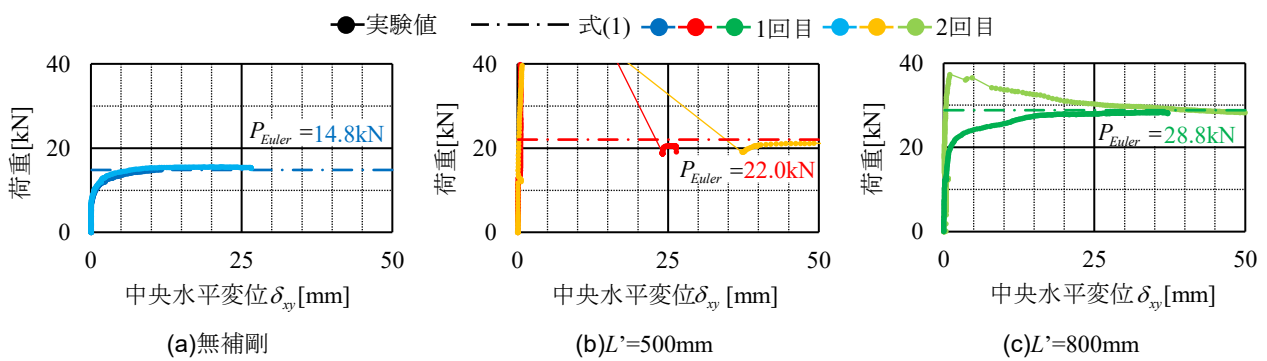


図-9 荷重-中央水平変位  $\delta_y$  関係

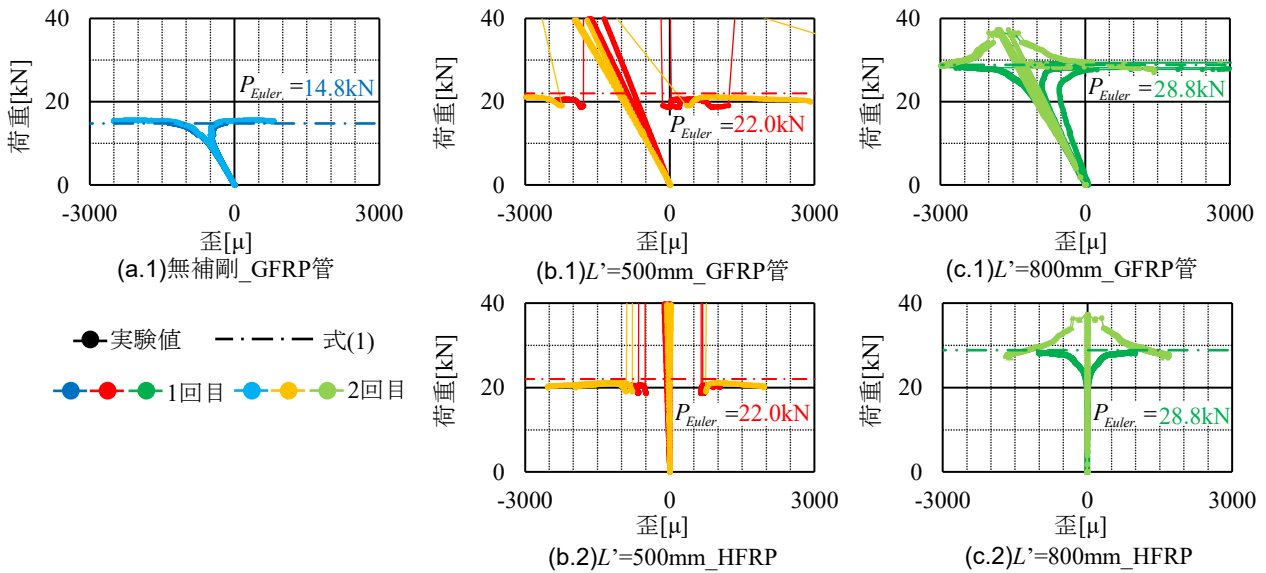


図-10 荷重-歪関係

表-4 座屈試験結果

試験体	座屈荷重		平均	補剛効果	計算値	計算値との比較	歪-2000μ時の荷重	補剛効果	
	1	2							[kN]
無補剛	1	14.77	15.15	—	14.81	2.24	—	—	
	2	15.54							15.55
L'=500mm	1	20.57	20.86	27.35	22.05	-5.71	20.50	26.09	
	2	21.14							—
L'=800mm	1	27.90	28.53	46.90	28.84	-1.08	27.94	45.77	
	2	29.17							—

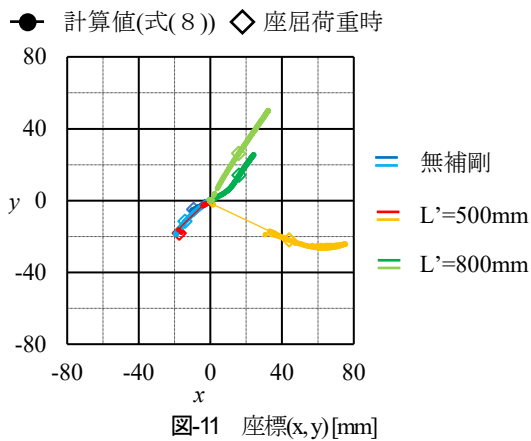


図-11 座標(x,y) [mm]

図-8~10より、本実験では、無補剛と  $L'=800\text{mm}$  の1回目では荷重に対応して変形していく挙動を示した。 $L'=500\text{mm}$  の試験体は荷重が式(1)より求めた線形座屈荷重を超えた後、荷重が大きくなって下がった後に座屈変形し、徐々に式(1)より求めた線形座屈荷重に収束していきながら変形していく挙動を示した。 $L'=800\text{mm}$  の2回目では、荷重が式(1)より求めた線形座屈荷重を超えた後、徐々に荷重が低下しながら式(1)より求めた線形座屈荷重に収束していきながら変形していく挙動を示した。こ

のことから初期不整が小さく初期の曲げ変形が生じず、座屈荷重を超えた後で曲げによる釣り合い状態に移行したと考えられる。

図-11より、無補剛と  $L'=800\text{mm}$  の際には2回とも概ね同じ方向に座屈したが、 $L'=500\text{mm}$  の際には1回目と2回目で異なる方向に座屈した。補剛材のスリットは  $L'=500\text{mm}$  と  $L'=800\text{mm}$  の試験体で同じ方向に設置していたが弱軸曲げ方向と座屈変形方向は一致せず、試験によって様々な方向に座屈するということが分かった。このことから、球座を両端2方向ピン支持に使用したことにより最小座屈荷重が評価できたと考える。

表-4より、荷重-クロスヘッド変位関係から算出した座屈荷重を比較すると、概ね1回目と2回目の差は5%以内に収まっており、座屈後も補剛材に損傷は残らなかったといえる。また補剛することにより無補剛と比較して  $L'=500\text{mm}$  の際は27.35%、 $L'=800\text{mm}$  の際は46.90%、座屈荷重が向上することが確認できた。

また、式(1)より求めた線形座屈荷重との差が6%以下となりおおむね一致していることがわかった。このことから図-2の力学モデルのような重ね梁にした座屈荷重の計算は、非接着の補強の設計に使用できると考える。

図-10, 表-4 より, 座屈後の歪 - 2000 $\mu$  時点での荷重を比較すると,  $L=500\text{mm}$  の際は 26.09%,  $L=800\text{mm}$  の際は 45.77%, 座屈荷重が向上することが確認できた. このことから補剛された部分の歪は減少するものと考えられる.

## 5. 結論

本研究では, GFRP 管を対象に, FRP による非接着の補強法の提案として, 実験を行い補剛効果の分析を行った. その結果, 得られた知見を以下に示す.

- 1) GFRP 管が補剛材によって変形を拘束され, 補剛された部分の歪も減少することが確認でき, 結果として座屈荷重が向上することがわかった.
- 2) 重ね梁モデルにより計算した線形座屈荷重と実験により得られた座屈荷重は概ね一致することがわかった.

### 参考文献

- 1) 土木学会: 複合構造シリーズ09 FRP接着による構造物の補修・補強指針(案), 2018.
- 2) 石川敏之, 中村一史, 大垣賀津雄: 特集 異材接合技術の最新動向 鋼構造物の CFRP 接着補修・補強, 日本機械学会誌 Vol.122, 2019.
- 3) Ngoc Vinh Pham, Takeshi Miyashita, Kazuo Ohgaki, Yusuke Okuyama, Akira Kobayashi, Yuya Hidekuma, Takeshi Hirose, Takuya Harada: Repair Method using CFRP Sheet for Corroded Gusset Plate Connection in Truss Bridges, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Vol.6, No.1, 2018.

- 4) Kim Oliver U. Magtagñob, Visal Thay, Hitoshi Nakamura and Takahiro Matsui: Elasto-Plastic Behavior on Seismic Retrofitting for Circular Steel Bridge Pier by Externally Bonded Carbon Fiber Sheets, 10th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering. CICE 2021. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 198, 2022.
- 5) 三枝玄希, 松本幸大, 松井孝洋, 中村一史: プリフォーム基材を応用した CFRP による補強法とその曲げ挙動, 日本建築学会 技術報告集, 第25巻 第60号, pp.703-708, 2019.
- 6) Fengky Satria Yoresta, Ryotaro Maruta, Genki Mieda, Yukihiro Matsumoto: Unbonded CFRP strengthening method for buckling control of steel members, Construction and Building Materials, Volume 241, 118050, 2020.
- 7) Fengky Satria Yoresta, Phan Viet Nhut, Daiki Nakamoto, Yukihiro Matsumoto: Enhancing buckling capacity of angle steel using unbonded CFRP laminates processed by Vacuum-assisted Resin Transfer Molding (VaRTM), Structures, Volume 41, pp.173-189, 2022.
- 8) 中本大暉, 三枝玄希, 松本幸大: 非接着 FRP 材による鋼板の座屈補剛法, 日本建築学会 技術報告集, 第28巻 第69号, pp.691-696, 2022.
- 9) 山本梨乃, 松本幸大: FRP材の非接着補剛による鋼板の圧縮挙動改善の検討, 第9回 FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム講演概要集(CD・ROM), 2022.
- 10) 伊沢温, 山本梨乃, 中島浩二, 松本幸大: 曲げを受ける部材に対するスリット入りパイプ状FRPによる補強法の基礎検討, 第9回 FRP複合構造・橋梁に関するシンポジウム講演概要集(CD・ROM), 2022.

(Received August 25, 2023)

## FUNDAMENTAL STUDY ON THE STRENGTHENING METHOD USING THE ROTATIONALLY LAMINATED FRP SLIT PIPE UNDER COMPRESSION

Madoka IZAWA, Rino YAMAMOTO, Koji NAKAJIMA and Yukihiro MATSUMOTO

FRP materials that have superior material properties, e.g., high elastic modulus, high weight-strength ratio and corrosion resistance, have been widely applied to industrial, aerospace, and construction use in recent. In the construction field, the repair and strengthening method using FRPs has been strongly researched and developed. Almost methods adopt the adhesive bonding method to apply FRPs to the existing structure surface. This paper shows a new strengthening method and mechanism using thin FRP restrainers. We propose the use of slitted thin FRP pipes. And the FRP pipes are rotationally laminated around the existing pipe member to increase the compressive capacity and stiffness. Because of the high elastic deformation performance of FRP, the plastic band-like application method can be used for the setup. As the result, the proposed strengthening method is demonstrated successfully, and it is clearly shown that the buckling load is increased by the present method.