

ポリプロピレン製の荷造りひもを用いた長柱鋼管の座屈補強への一提案

A Reinforcement Of Steel Pipes With Polypropylene Strings Against Buckling

土木工学専攻 1号 赤城 博斎

Hiroyoshi AKAGI

1. はじめに

近年、過大な風荷重、地震荷重等発生の影響で、構造物に対する設計時点での要求を超える性能が必要とされる場合が増えてきており、安価で簡便な補強方法が求められる。例えば、三上¹⁾は鋼管にメッキを施すだけで、全体座屈の強度が10%程度向上することを指摘している。一方、既往の研究²⁾において、長柱鋼管構造物への紫外線硬化型樹脂（以下GFRP）補強により、疲労試験においてき裂進展を抑える効果があることが知られている。この補強により座屈耐荷力が増すことが確かめられれば、長柱鋼管の補強対策としての効果が期待できる。よって、著者ら³⁾はGFRPに着目し、大型送電鉄塔の構成部材である長柱鋼管の座屈に対する補強効果等の検討を行ってきた。しかし、大型送電鉄塔などの構造物を補強する場合、この構造上の特徴である多くの突起物が鋼管表面上に存在するので、巻き付けの妨げとなる場合が生じる。さらに、高所の作業であること、各種の鋼管サイズが採用されていること、建設されてから年月が経過しており鋼管表面の劣化などがあり、より簡便に補強できる方法が求められている。このような背景から、低価格かつ何処でも入手可能であり、かつ軽量で扱い易い特徴を有するポリプロピレン製のひも（荷造り用のひも、以下PP）を使用することを試みる。このPPのひもの最大の特徴は、接着剤を使わずに人間の力程度で締めることで補強できる点である。

本研究では学内で行ったミニモデルでの実験と愛知工業大学で行った既存の大型送電鉄塔構成部材を使用した実験、その座屈解析結果を報告する。

2. ミニモデル実験 実験概要

2.1 実験供試体

ミニモデル実験には、表-1に示す鋼管を選択した。これは試験機の性能を考え全体座屈の現象が現れる細長比70.4とした鋼管である。供試体は無補強5本、補

表-1 試験体諸元

サイズ	材質	径厚比	長さ (mm)	細長比 (基準化細長)	数量	
					補強有	補強無
Φ27.2*2.3	STK400	11.8	885	70.4(1.06)	12	5

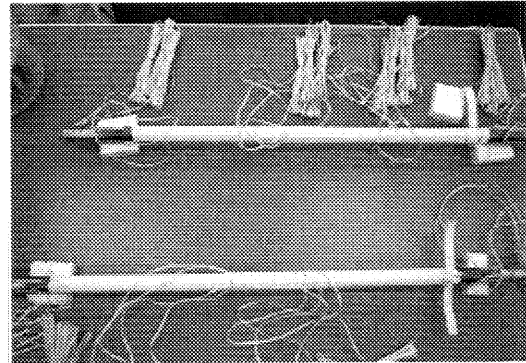


写真-1 PP 供試体

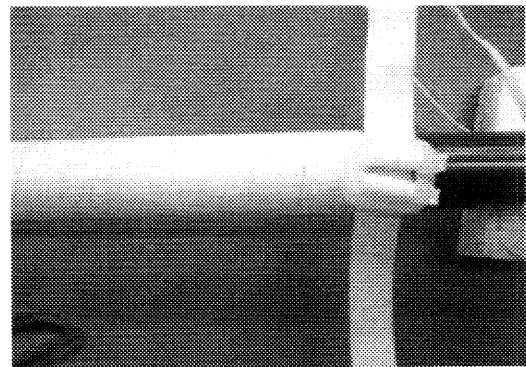


写真-2 PP 供試体止め具

強有を12本製作した。補強有の詳細は、PP-1~9までが単純にただ巻くだけで補強したもので一般にゲートル巻きと言われる巻き方である。PP-10はゲートル巻きの下に軸方向へもPPを入れたもの、PP-11がゲートル巻きをPP専用接着剤（鋼管には接着不可）で固めたもの、PP-12がゲートル巻きをエポキシ接着剤（PPには接着不可）で固めたものである。PPの巻き方は鋼管の片方から巻き始め端に着いたら折り返し、元の位置まで戻ってきたらPP専用の市販の止め具で止めるという巻き方を採用した。それを写真-1, 2に示す。

ひずみゲージは、鋼管の長さ方向中央に軸方向と周方向を1セットとし90°ピッチで4箇所計8個貼付けた。さらに鋼管の上下に圧縮力の芯を出すために使

うひずみゲージを上4箇所、下4箇所の計8箇所貼付けた。上端、下端の支持は上端をピン支持、下端を完全固定支持とした。

2.2 座屈実験

座屈実験は始めに 1 (kN) の荷重を与え上下の芯出し用ひずみゲージ 8 個をチェックし圧縮力が中心になるように調整する。圧縮力が中心になったら荷重をかけ始める。荷重のかけ方は 1 秒間に約 87.5(N)の載荷である。試験機は島津製作所製作の中央大学所有 3 軸圧縮試験機 (最大圧縮能力 200kN) を使用した。

2.3 実験結果

実験の最大耐荷力ならびに強度上昇率の具体的な数値を表-2 に示す。PP9~12 の太字の部分が中間発表後に行った実験である。無補強平均耐荷力 52.44 (kN) に対し PP 補強の平均耐荷力は 54.30 (kN) となり強度上昇率で 3.6%との結果を得た。さらに PP-2, 3 に関してはそれぞれ 14%, 13%の強度上昇を得た。PP-10, 11, 12 に関しては、接着材で固めたのでひもに張力が十分導入できず、その影響が顕著に表れた可能性が高い。

次に図-1 に鋼管の軸方向に関する荷重とひずみの関係曲線、図-2 に鋼管周方向の荷重とひずみ関係曲線をそれぞれ示す。ここで x 軸はひずみ(μ)を、y 軸は荷重(kN)を表す。なお、ここでは平均的な座屈耐荷力を示す無補強の供試体と補強有の供試体との比較を行ったものである。これらは軸方向、周方向共に剛性の向上を確認するものであり、それぞれ中央 4 枚のひずみゲージの値を平均したものである。

表-2 より PP で補強することによって強度の上昇が確認できているため、軸方向で鋼管の剛性の向上を期待した。図-1, 2 の荷重がピークに達する部分において、無補強の荷重-ひずみ関係が先に降伏点を迎えるのに対し、補強された鋼管は補強材でたわみが拘束されピークが伸びているのがわかる。このことより、補強材料がたわむ鋼管に抵抗力を加えることにより座屈耐荷力が上昇していると考えられる。「座屈設計ガイドライン」²⁾ によれば弾性挙動の限界は柱の初期たわみに依存する。この実験では周方向の補強によって初期たわみの感度を軽減している。

表-2 実験結果

サイズ	供試体名	Pmax (kN)	強度上昇率	平均 (kN)	標準偏差	平均強度上昇率
Φ27.2*2.3 全体座屈	無補強-1	53.85	-	52.44	2.51	-
	無補強-2	53.70	-			
	無補強-3	48.45	-			
	無補強-4	55.45	-			
	無補強-8	50.75	-			
	PP-1	55.25	1.05	54.30	2.75	1.036
	PP-2	59.60	1.14			
	PP-3	59.00	1.13			
	PP-4	56.00	1.07			
	PP-5	55.65	1.06			
	PP-6	53.20	1.01			
	PP-7	53.40	1.02			
PP-8	53.30	1.02				
PP-9	51.00	0.97				
PP-10	51.50	0.98				
PP-11	52.75	1.01				
PP-12	51.00	0.97				

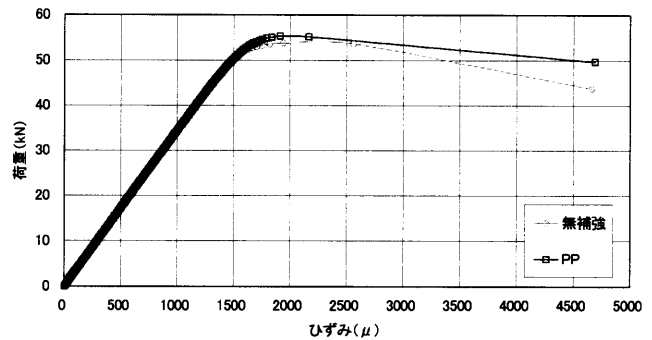


図-1 荷重-ひずみ関係(軸方向)

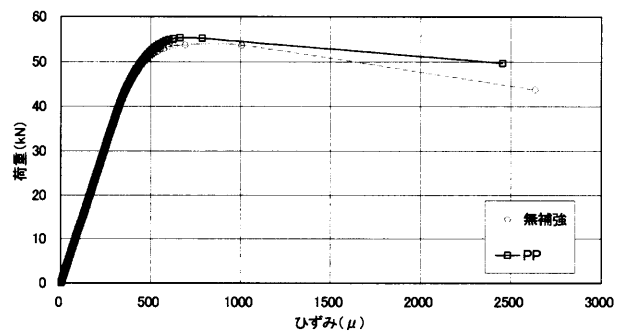


図-2 荷重-ひずみ関係(周方向)

3. 既存大型送電鉄塔構成部材実験 実験概要

3.1 実験供試体

実物大実験として既存大型送電鉄塔の構成部材を使用した実験を行った。その供試体を写真-3 に、供試体諸元を表-3 に示す。供試体の詳細は無補強 2 本 (1-1, 1-2)、ミニモデル実験と同様な巻き方の PP ゲートル巻き補強 2 本 (2-1, 2-2)、PP ゲートル巻き補強と軸方向に PP を巻いたもの 2 本 (3-1, 3-2)、PP 専用接着剤を使用したゲートル巻き補強 2 本 (4-1, 4-2) である。

ひずみゲージはミニモデル実験と同様の箇所に貼付し、今回は変位計を供試体軸方向中心に鋼管と垂直に

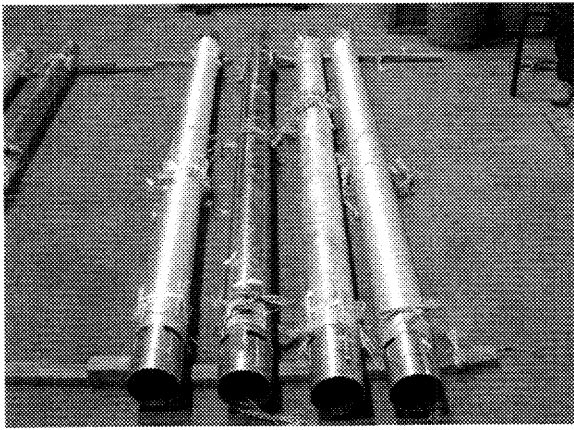


写真-3 供試体

なるように設置した。上端，下端の支持は双方ともにピン支持を採用した。

3.2 座屈実験

ミニモデル実験と同様に圧縮力が中心となるように調整を行う必要がある。今回の実験はより正確な圧縮力の中心を出すために以下の式を採用した。

$$\left(\frac{\epsilon_{\max}}{Ave} - Ave \right) / Ave \leq 0.5$$

ϵ_{\max} : 同一断面内のひずみの最大値

Ave : 同一断面内のひずみの平均

載荷速度は 1 秒間に約 0.6 (kN) である。試験機は愛知工業大学所有の大型長柱試験機(最大圧縮能力 2940kN)を使用した。

3.3 実験結果

表-4 に既存送電鉄塔構成部材での実験結果を示す。これは座屈耐荷力のみを単純比較するもので、各種供試体の平均値とその平均値の強度上昇率を表している。ミニモデル実験と同様な巻き方の PP ゲートル巻き補強 (2-1, 2-2) の平均値が無補強平均値 (1-1, 1-2) と比べ強度上昇率約 7%, PP ゲートル巻き補強と軸方向に PP を巻いたもの (3-1, 3-2) の平均値では約 9% の補強効果を得た。供試体 3-2 に関しては無補強平均値に対し約 17% の強度上昇を得ている。

周方向の荷重-変位関係を図-3 に示す。x 軸に変位 (mm) を y 軸に荷重 (kN) を表す。補強を施したものは初期段階から変位は少なく反対に無補強は初期段階から変位が発生している。座屈耐荷力の大小に関係なく補強を施した鋼管の周方向のたわみが補強なしに比べたいへん小さいことがわかる。このことから補強材料が鋼管の周方向のたわみを抑えるフープ効果がある

表-3 既存送電鉄塔構成部材実験 供試体諸元

サイズ	材質	径厚比	長さ (mm)	細長比 (基準化細長比)	数量	
					補強有	補強無
Φ139.8×3.5	STK400	40	2924	70(1.07)	6	2

表-4 既存送電鉄塔構成部材実験 結果

サイズ	供試体名	Pmax (kN)	平均 (kN)	平均強度上昇率
Φ 139.8×3.5	1-1	487	488.5	-
	1-2	490		
	2-1	503	521.5	1.068
	2-2	540		
	3-1	492	532.0	1.089
	3-2	572		
	4-1	477	490.0	1.003
	4-2	503		

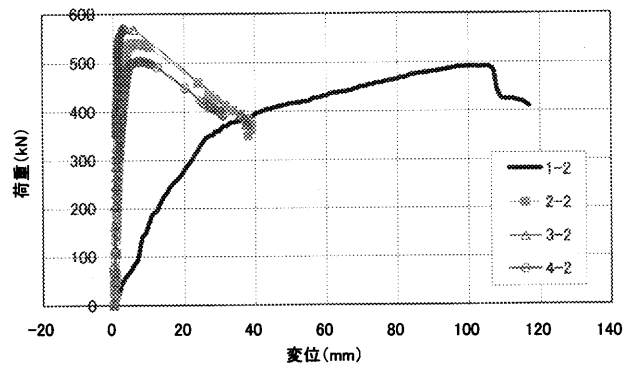


図-3 荷重-変位関係(周方向)

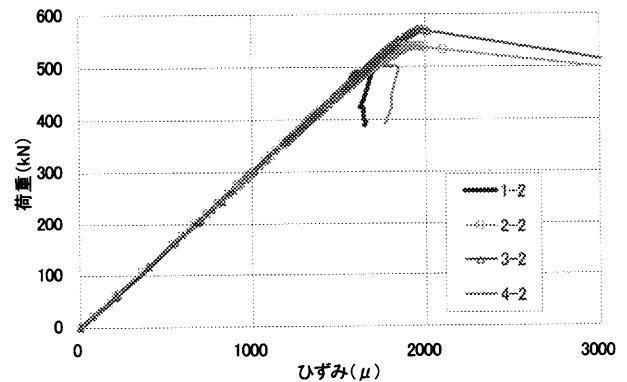


図-4 荷重-平均ひずみ(軸方向)

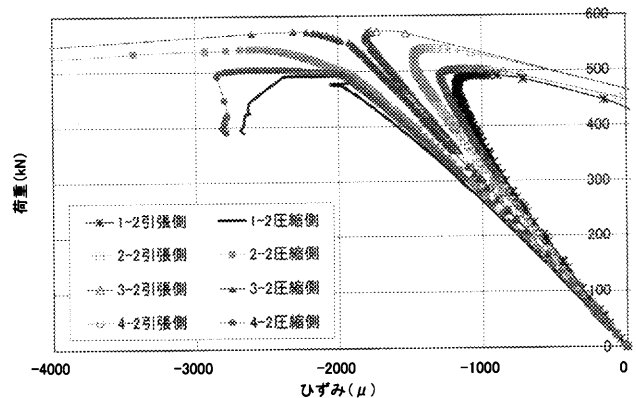


図-5 荷重-圧縮側, 引張側ひずみ

ことがわかる。

図-4 に荷重と平均ひずみの関係を示す。この図は鋼管の中央断面に貼付した2軸ゲージの軸方向、周方向それぞれについて作成したものである。なお、横軸のひずみ値は4枚のひずみゲージの平均値である。

これら図-4, 5 から確認できるのは3-2, 2-2 の試験体が他の試験対に比べ最大耐荷力到達後その場に停滞することなく一定の勾配で耐荷力低下が起きている部分である。他の鋼管はピーク到達後最大耐荷力で停滞しその後急激に減少していく挙動である。

図-5 は曲げ座屈の圧縮側、引張側のひずみに着目し作成した図である。圧縮側、引張側ともに初期段階から補強効果の大きい順序で弾性域に剛性の変化がみられた。これはポリプロピレンが鋼管を拘束しているためと考えられる。

4. 座屈解析

4.1 座屈解析

実験による補強効果が認められたので、汎用解析ソフト ADINA を用いて非線形の座屈解析を行った。

4.2 解析モデル

解析モデルは既存大型送電鉄塔構成部材のモデルを使用した。ヤング係数は 2.1×10^5 (N/mm²)、ポアソン比を 0.3 とし、3D-solid 要素を用いて要素分割を行なった。要素数は周方向 20 要素、軸方向 168 要素、厚さ方向 2 要素としている。また、境界条件は実験と同様な上端、下端ともにピン支持とした。

4.3 解析結果

得られた補強有座屈形状を図-6 に示し、図-7 に解析値と実験値の比較を示す。x 軸はひずみ (μ)、y 軸は荷重 (kN) を表し、ひずみは圧縮側と引張側のひずみの平均を出した値である。補強有の実験値は 3-2 のデータを使用した。図-7 の補強有に関しては弾性域では実験値、解析値が良い一致を見せているものの最大耐荷力到達後のひずみの挙動は追えていない。しかし、実験値の挙動と同様に解析値の最大耐荷力到達後のひずみの挙動が緩やかに低下していく傾向が見られる。

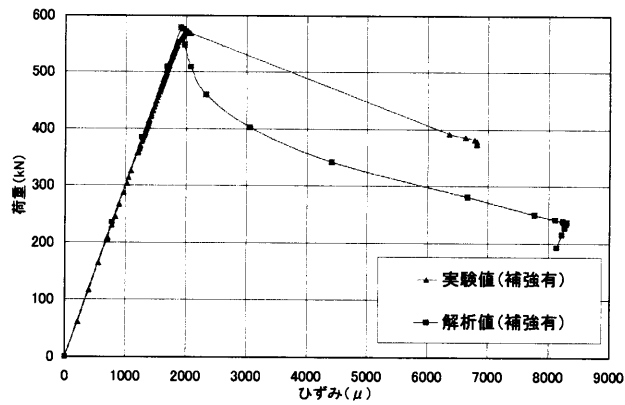


図-7 解析値, 実験値の比較(荷重-ひずみ関係)

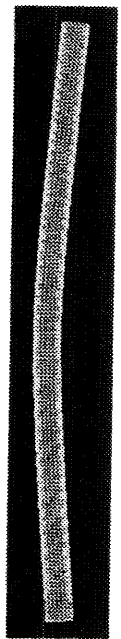


図-6
座屈形状

5. 結論

本研究では PP というひもで長柱鋼管を補強することにより以下のような結果を得た。

- ①ミニモデル実験でのポリプロピレン補強で座屈耐荷力上昇が、平均 3.5%の補強効果を確認した。
- ②既存大型送電鉄塔構成部材実験でのポリプロピレン補強で平均耐荷力上昇約 9%、3-2 に関しては 17%との結果を得た。
- ③既存大型送電鉄塔構成部材実験での荷重-変位関係より、周方向のたわみを抑えるフープ効果による座屈耐荷力上昇が確認できた。
- ④解析結果より実験値の最大耐荷力(補強有)が 572 (kN) であるのに対し、解析値の最大座屈耐荷力(補強有)が 578 (kN) となり良い一致を見せた。

<参考文献>

- 1) 三上康郎他: 送電用鉄塔に用いる鋼管の軸圧縮・曲げ座屈耐力に及ぼす溶融亜鉛めっきの影響について、構造工学論文集 Vol. 50A, 2004. 3
- 2) 連重俊他: 紫外線硬化樹脂を用いた長柱構造応力低減と実大モデル疲労試験, 土木学会論文集 No. 735/VI-59, pp185-195, 2003. 6
- 3) 赤城博斎他: 紫外線硬化型樹脂を用いた長柱鋼管補強方法の検討, 土木学会第 58 回年次学術講演会, 2004. 9
- 4) 土木学会: 座屈設計ガイドライン
- 5) 太田俊昭著: 土木学会編新体系土木工学 8 構造物の非弾性解析