

炭素繊維補強鋼管の補強効果に対する影響因子に影響

建設構造研究室 山岸 義之

指導教官 宮下 剛

1. はじめに

鋼製煙突のような半径に対して板厚が小さい（径厚比が大きい）薄肉鋼管では、腐食減肉が発生すると、軸方向圧縮力による局部座屈の発生が懸念され、補修・補強が必要となる。通常、薄肉鋼管の補修・補強では、当て板工法が採られているものの、施工性が優れないという問題がある。そこで、施工性の効率化に向けて、炭素繊維シートを用いた補修・補強工法の適用が検討されている。しかし、鋼管に対する炭素繊維シートを用いた補強の検討では、繊維方向を円周方向とする¹⁾²⁾ことが多い。一方、円周方向以外の繊維配向角と補強効果の関係などは検討されていない。

鋼管に積層する炭素繊維シートの繊維配向角を変化させることで、強度や剛性、靱性の増加が期待される。ただし、炭素繊維シートの繊維配向角を変化させることで繊維配向角が熱応力に与える影響についても考慮する必要がある。

そこで、本研究では、薄肉鋼管への炭素繊維シート補強工法の確立に向けて、炭素繊維シートの繊維配向角と強度、剛性、靱性、熱応力の関係を把握するために、繊維配向角をパラメータとして炭素繊維シートを接着貼付した鋼管に対して、熱応力測定ならびに一軸圧縮試験を実施する。

2. 試験概要

2.1 供試体

供試体の寸法は、無補強の状態で一軸圧縮試験を実施した際に局部座屈が発生するような円管鋼柱（内径：200mm，板厚：1.6mm）とした。そして、その表面に炭素繊維シート（弾性係数：640GPa，設計厚：0.143mm）を4層貼り付ける。繊維配向角は、鋼管軸方向を 0° として、 0° ， 30° ， 45° ， 60° ， 90° とする。 0° と 90° 以外にシートを接着する場合

は、角度の+方向，-方向それぞれ交互に合計4層となるようにする。炭素繊維シートの接着ならびに養生は 20°C 雰囲気温度で行う。さらに、繊維配向角を 0° ， 90° として、それぞれ交互に合計8層とした供試体も作製した。

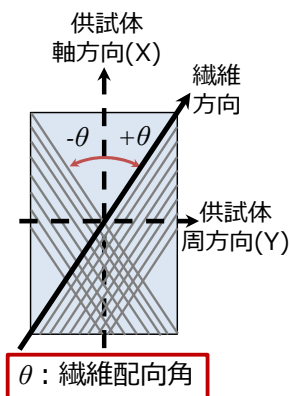


図1 炭素繊維シート
の繊維配向角

3. 熱応力測定

3.1 試験方法と計測位置

熱応力の測定では、炭素繊維シート接着鋼管を 20°C から 80°C ($\Delta T=60^\circ\text{C}$)まで加熱する熱サイクル試験を各供試体で3サイクルずつ行う。無補強の鋼管から得られたひずみと各供試体から得られたひずみの差を取ることで、炭素繊維シートの影響により発生したひずみとする。各供試体および無補強の鋼管に発生するひずみは、供試体内側中央部の鋼材面に2枚の鋼材用の三軸ひずみゲージを貼付した。

3.2 試験結果

ひずみ値のロゼット解析によって鋼管に発生した最大熱主応力の大きさを鋼管に発生する熱応力として、その方向とともに評価した。熱応力と温度変化の関係を図2に示す。熱応力方向は、繊維配向角 0° ， 30° ， 45° の場合、供試体軸方向となり、 60° ， 90° は供試体周方向となった。各繊維配向角の炭素繊維シートを接着した鋼材に発生する熱応力の理論値は、文献3)に示される既往の式にロゼット解析から得られた熱応力方向と繊維配向角とのなす角を γ として、 $\cos\gamma$ を乗じた値とする。なお、繊維配向角が 0° ， 90° の場合は $\gamma=0^\circ$ ，繊維配向角

が30°、60°の場合は $\gamma=30^\circ$ 、繊維配向角が45°の場合は $\gamma=45^\circ$ となった。図2から、すべての繊維配向角において発生する熱応力は温度変化と線形関係が見られ、各試験ケースの理論値とも概ね一致していることから、鋼管に繊維配向角を変化させて炭素繊維シートを接着する場合にも、熱応力の大きさを評価することが可能である。また、炭素繊維シートの繊維配向角を0°と90°として交互に接着した鋼管に発生した熱応力は、繊維配向角を0°と90°とした場合のそれぞれの理論値の合計値と一致した。

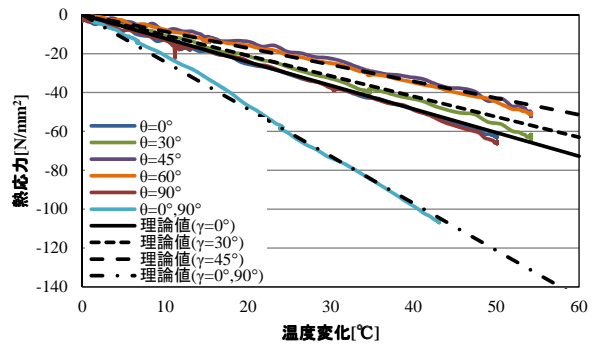


図2 各繊維配向角における熱応力と温度変化の

4. 一軸圧縮試験

4.1 試験方法及びひずみゲージ計測位置

圧縮試験は、アムスラー万能試験機（載荷容量2000kN）を用いて実施し、荷重と鋼材に発生するひずみ、鉛直変位を測定する。また、供試体中央部で局部座屈が発生するように、鋼管上下端部の外面・内面に、100mm幅とした炭素繊維シートを、それぞれ周方向に3層、軸方向に5層接着した。ひずみゲージは、供試体内側中央部の鋼材面に4枚の鋼材用の二軸ひずみゲージを貼付する。

4.2 試験結果

表3に各供試体の最大荷重および破壊形状の写真を示す。補強前後に破壊形状の変化が確認される。特に繊維配向角が45°の場合は、他の試験ケースと形状と異なり、大きく外側に孕み出す形状となる。繊維配向角と補強効果を補強鋼管の最大荷重の向上率とした関係を図3に示す。4層の炭素繊維シートを積層した場合、補強効果は22~43%となった。また、剛性の評価に向けて荷重-軸方向ひずみ関係の傾きを剛性とし、靱性の評価に向けては、荷重-鉛直変位関係で鋼管の局部座屈が進展する最大荷重が95%に低下した点までのエネルギー量を靱性とし、その結果を図4に示す。剛性は、繊維配向角が0°となる場合に最大となり、繊維配向角が大きくなるにつれて剛性は小さくなる。また、靱性は繊維配向角が90°となる場合に最大となり、繊維配向角が小さくなるにつれて靱性も小さ

表1 最大荷重と破壊形状写真

繊維配向角 θ °	補強なし	0	30
最大荷重 P_{max} kN	238	349	328
補強前後の最大荷重の向上率 %	-	47	38
試験後の供試体写真			
破壊形状	象の脚型座屈	ダイヤモンド型座屈	ダイヤモンド型座屈
繊維配向角 θ °	45	60	90
最大荷重 P_{max} kN	291	313	324
補強前後の最大荷重の向上率 %	22	32	36
試験後の供試体写真			
破壊形状	外側に大きく孕み出す	ダイヤモンド型座屈	ダイヤモンド型座屈

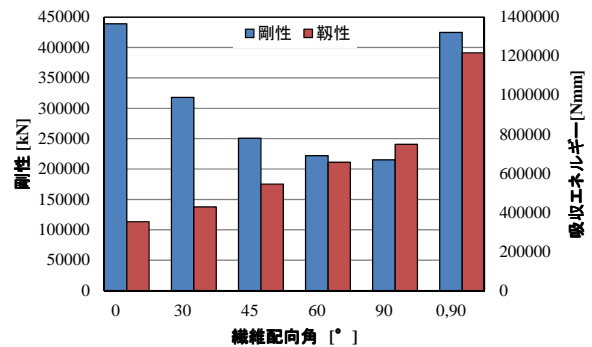


図4 各繊維配向角と軸方向剛性および靱性の関

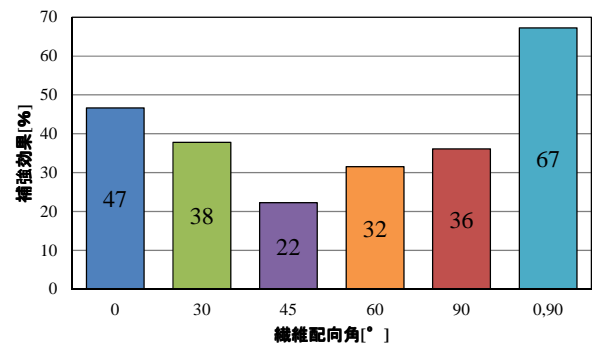


図3 各繊維配向角における補強効果の関係

くなる。さらに、炭素繊維シートの繊維配向角を 0° 、 90° として、それぞれ交互に接着した鋼管の剛性は、繊維配向角が 0° の場合と同等となり、靱性は、繊維配向角が 90° の場合よりも向上した。

5. まとめ

本研究では、薄肉鋼管への炭素繊維シート補強工法の確立に向けて、熱応力測定ならびに一軸圧縮試験を実施した。以下に、得られた知見を述べる。

- ・炭素繊維シートを鋼管に接着する場合、発生する熱応力は繊維配向角が変化した場合も評価できる。
- ・剛性は、繊維配向角が 0° の場合に最大となり、靱性は、繊維配向角が 90° の場合に最大となる。
- ・剛性および靱性を同時に向上させる場合、繊維配向角を 0° と 90° として交互に積層する。

参考文献

- 1) 西野孝仁，古川哲也：円形鋼管柱材の局部座屈形成に対する炭素繊維シートによる補剛効果，構造工学論文集，Vol.49B，pp489-496，2003
- 2) 古川哲也，西野孝仁，三谷勲：CFRPによって局部座屈形成を抑制した円形鋼管柱材の変形能力，日本建築学会近畿支部研究報告集，pp169-172，2001
- 3) 末益博志：入門複合材料の力学，日本複合材料学会，2009