

鋼製煙突の CFRP 補強

鋼構造研究室 中村 洋介
指導教官 宮下 剛

1. はじめに

構造物の耐震設計法は、地震被害をもとに発展してきた。煙突構造物でも状況は同様であり、耐震基準の見直しを受け、耐震性が不足している鋼製煙突が存在する。また、鋼製煙突では、鋼材の経年劣化は避けられず、適切な点検と補修・補強も必要となる。

鋼製煙突に対する従来の補修・補強では、鋼板をボルトや溶接により添接する当て板工法が用いられる。しかし、これらの工法は、施工が煩雑であり、母体に対してボルト孔などの断面欠損や熱影響の懸念、死荷重の増加などの問題点がある。特に鋼製煙突では、半径に対して板厚が小さい(径厚比が大きい)ため、自重も小さくなる¹⁾。基礎もそれに対応するように設計されているため、従来の当て板工法で補強すると、死荷重の大幅な増加により、基礎に影響を及ぼす場合がある。

そこで、軽量かつ高強度の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、鋼製煙突を対象とした炭素繊維シートの補修・補強方法に関する既往の研究は少ない。

そこで、本研究では、既設鋼製煙突に対する炭素繊維シート補強工法の確立に向けて、炭素繊維シート接着補強(以下、CFRP 補強と記す)を施した鋼管供試体を用いて水平荷重による正負交番荷重実験を行い、鋼管供試体の耐荷力と変形性能に与える影響について実験を中心とした検討を行う。

2. 実験概要

2.1 供試体

本研究では、同寸法の鋼製円管供試体を3体用意し、鋼材のみの無補強供試体(ケースN)、CFRP補強した供試体(ケースCN)、ポリウレアパテ材とCFRP補強した供試体(ケースCP)、の3ケースで実験を行う。

供試体の寸法および溶接位置を図-1に示す。なお、供試体の厚さと直径は、実鋼製煙突と同様の径厚比 D/t となるようにし、長さ方向は、実験場の制約から3228 mmとした。また、施工時・載荷時の応力集中を防ぐため、鋼管全長3228 mmのうち、基部から150 mmまでを板厚3.2 mm、残りの3078 mmは板厚2.3 mmとした。表-1に実験パラメータを、表-2に鋼材の機械的性質を示す。

補強に用いる炭素繊維シートは、曲げ補強用にストランドシート(弾性係数:694 GPa, 設計厚:0.429 mm)、ストランドシートの周方向拘束用にトウシート(弾性係数:252 GPa, 設計厚:0.111 mm)の計2種類を用いる。なお、炭素繊維シートの積層数は、無補強に対して基部の曲げ応力を1/2(=断面係数を2倍)とすることを目標にし、ストランドシートを鋼換算³⁾して算出した。

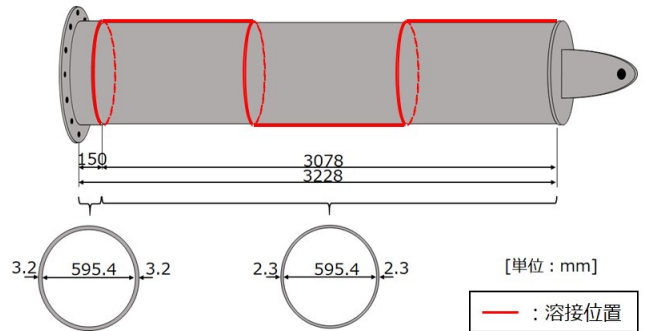


図-1 供試体形状

表-1 実験パラメータ

供試体名	ポリウレアパテ材	炭素繊維シート				
		ストランドシート		トウシート		
		積層数	1層目長さ (mm)	2層目長さ (mm)	定着長 (mm)	積層数
N	-	-	-	-	-	-
CN	-	2	1690	920	200	1
CP	○	2	1690	920	200	1

表-2 鋼材の機械的性質

鋼種	降伏荷重 (kN)	降伏変位 (mm)	座屈荷重 ²⁾ (kN)	降伏応力 (N/mm ²)
SS400	56.9	15.9	51.8	313*

*ミルシート

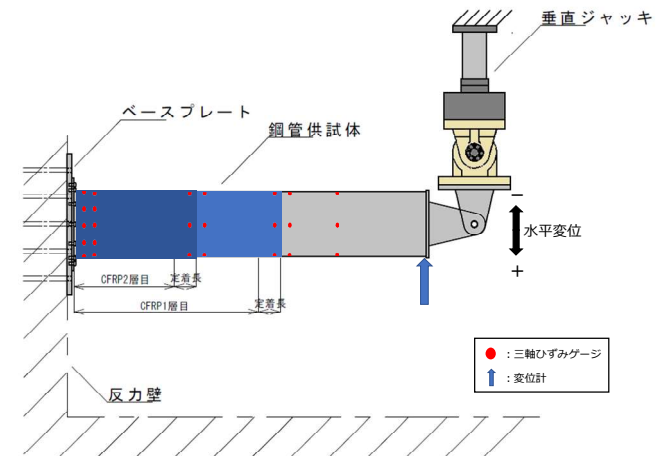


図-2 実験方法

供試体 CP では、鋼材と炭素繊維シート間にポリウレアパテ材を挿入する。ポリウレアパテ材(高伸度弾性パテ材)とは、弾性係数が約 70 MPa、伸びが 300%と柔軟性に非常に優れた樹脂であり、鋼部材の座屈変形による大変形に対して、炭素繊維シートのはく離を防止する。

2.2 実験方法

実験方法を図-2に示す。供試体の基部は、ボルトを介して反力壁に設置されたベースプレートに取り付けられている。また、供試体の先端側は、治具を介して垂直ジャッキに取り付けられている。なお、正負交番载荷の方法は、弾性は理論から求めた降伏荷重に対応する降伏変位 δ_y を基準にして、実験状況から δ_y を決定し、 $2.0 \sim 3.5\delta_y$ まで $\pm 0.5\delta_y$ ピッチで各3サイクルとする。

3. 実験結果

表-3に、各供試体の最大荷重および破壊状況を示す。ここで、最大荷重は正負载荷の各方向における絶対値の最大値を平均化したものである。供試体NとCNでは、供試体基部のダイヤモンド座屈となった。一方、供試体CPでは、最大荷重時に基部で座屈は発生せず、基部から1120 mmの鋼管下側でき裂が発生した。そして、最大荷重後、繰り返し载荷を続けていく中で基部の上側でわずかに座屈が発生した。また、最大荷重は、無補強に対して、供試体CNで1.50倍、供試体CPで1.67倍となった。

正負交番载荷における水平荷重-水平変位履歴曲線の包絡線を図-3に示す。図-3より、補強した場合、無補強に対して剛性が増加し、供試体CNで1.63倍、供試体CPで1.74倍となった。また、実験値と鋼換算から算出した理論値(図中の点線)はおおむね一致している。

図-4に、载荷荷重が+25kNのときの各断面上下側のひずみ分布を示す。同図より、無補強、補強有供試体共に理論値、FEA値とおおむね一致していることが分かる。また、CFRP補強することで、基部のひずみ(応力)は、約1/2となっており、目標とする補強効果が得られた。

図-5に、降伏荷重 P_y と降伏変位 δ_y で正規化した荷重-変位履歴曲線における各サイクルのループ内の面積から求めたエネルギー吸収量を示す。エネルギー吸収量は、無補強である供試体Nと比較して、供試体CNで2.75倍、供試体CPで1.95倍となった。ここで、供試体CPは、表-3に示すように基部から1120 mmの地点でき裂が進展したため、荷重に対して変位が大きくなりすぎたことで、エネルギー吸収量が小さくなった。この地点は、炭素繊維シートの1層目と2層目の境界かつ溶接位置の近傍である。このため、同箇所が、応力集中や溶接残留応力の影響により、構造的な弱点になったと言える。

4. まとめ

- 1) CFRP 補強した場合、その剛性は鋼換算することで評価が可能であり、本研究では、補強時の剛性は無補強時に対して 1.63~1.74 倍増加し、最大荷重は 1.50~1.67 倍増加した。
- 2) CFRP を鋼換算し、応力伝達の定着長も考慮して積層接着することで、目標通りの補強効果が得られた。また、CFRP 補強により、正負交番载荷時のエネルギー吸収量も増加する。
- 3) 鋼材と CFRP 間にポリウレアパテ材を挿入して補強した場合、シート積層数が増える断面からき裂が進展した。溶接線の影響とも思われるが、補強設計法の確立に向けては、シートの積層範囲や積層法についてさらなる検討が必要である。

表-3 最大荷重と破壊状況

試験ケース	最大荷重 (kN)	破壊状況
N 無補強	51.38 (1.00)	基部でダイヤモンド座屈
CN 補強有/ ポリウレア無	77.23 (1.50)	基部でダイヤモンド座屈
CP 補強有/ ポリウレア有	85.83 (1.67)	シートの境目で電裂が進展

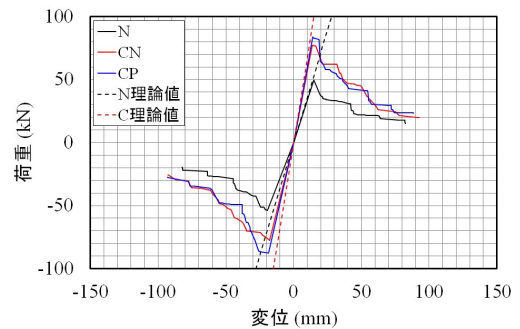


図-3 水平荷重-水平変位履歴曲線の包絡線

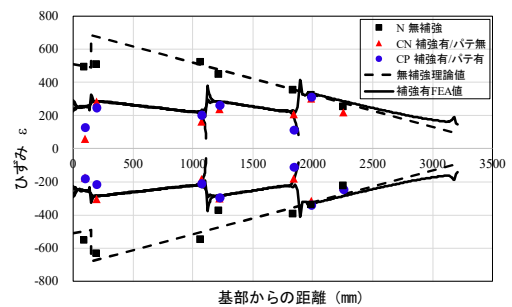


図-4 ひずみ分布 (+25kN 時)

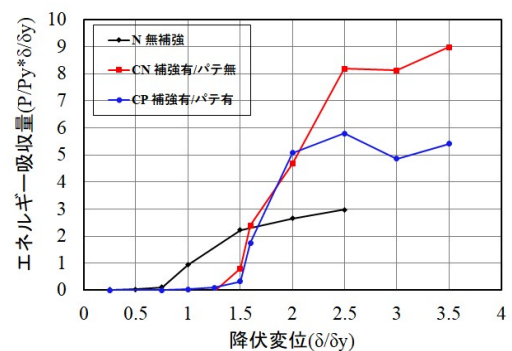


図-5 エネルギー吸収量

参考文献

- 1) 煙突構造設計指針, 日本建築学会, p13, 2007
- 2) 座屈設計ガイドライン, 土木学会, pp221-pp228, 2005
- 3) (株) 高速道路総合技術研究所, 炭素繊維シートによる鋼構造物の補修・補強工法 設計・施工マニュアル, 2013