

既設鋼製煙突の炭素繊維シートを用いた補強

長岡技術科学大学
長岡技術科学大学
株式会社福田組
日鉄ケミカル&マテリアル
ツカサテック
ものづくり大学

正会員
正会員
正会員
正会員
正会員

○眞保憲靖
宮下 剛
中村洋介
秀熊祐哉
浦添元気

大垣賀津雄, Pham Ngoc Vinh

1. はじめに

構造物の耐震設計法が地震被害によって発展する中、耐震性が不足している鋼製煙突が存在している。さらに、鋼製煙突では、経年劣化により適切な点検、補修・補強が必要とされる。

従来、鋼製煙突の補修・補強に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。この工法では、ボルト孔等の断面欠損や熱影響、死荷重の増大等の問題点がある。特に鋼製煙突は、半径に対し板厚が小さい(径厚比が大きい)ため、自重が小さい。基礎もそれに対応した設計がされているため、従来工法での補強・補修では死荷重増大によって、基礎に影響が出る場合がある。

そのため、軽量かつ高強度の炭素繊維シートを用いた補修・補強工法が検討される。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存の研究は少ない。

そこで、本研究では、既設鋼製煙突に対し炭素繊維シートによる補強工法の確立に向け、炭素繊維シート接着工法(以降、CFRP工法と記す)を施工した鋼管供試体を用いて水平荷重による正負交番載荷実験より、鋼管供試体の耐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(供試体N)、CFRP補強の供試体(供試体CN)、ポリウレアパテ材とCFRP補強の供試体(供試体CP)の3パターンで実験を行う。

供試体の寸法および溶接箇所を図-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より3228mm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3228mmのうち、基部から150mmまでを板厚3.2mm、残りを板厚2.3mmとした。表-1に実験パラメータ、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:694GPa, 設計厚:0.429 mm)、ストランドシートの周方向拘束にトウシート(弾性係数:252GPa, 設計厚:0.111mm)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、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。

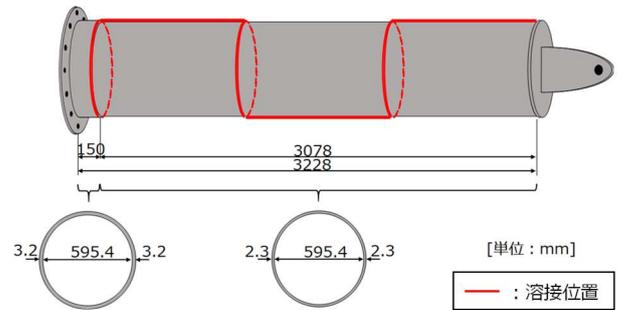


図-1 供試体形状

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	

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

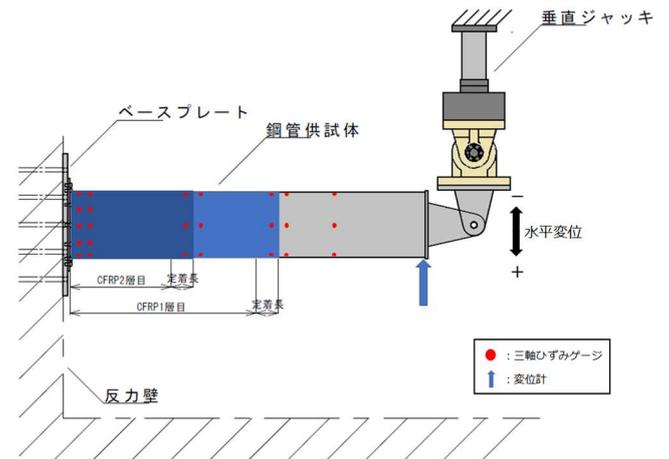


図-2 実験方法

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70MPa、伸びが300%と柔軟性に富んだ樹脂であり、鋼部材の座屈変形による大変形に対し、炭素繊維シートの剥離を防止する。

2. 実験方法

載荷方法を図-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、正負交番載荷の方法は、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

各供試体の最大荷重および破壊状況を表-3に示す。ここで、最大荷重は正負交番載荷の各方向における絶対値の最大値を平均したものである。供試体のNとCNでは、供試体基部の破壊状況はダイヤモンド座屈となった。しかし、供試体CPでは、最大荷重時に基部での座屈は発生せず、基部より1120mmの鋼管下側でき裂が発生した。最大荷重後、繰り返し載荷を続けることで基部上側にわずかな座屈が発生した。また、最大荷重は、無補強に対し供試体CNで1.50倍、供試体CPで1.67倍となった。

正負交番載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、補強することで無補強より剛性が増加し、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。

載荷荷重が+25kNの時の各断面上下側のひずみ分布を図-4に示す。同図より、無補強と補強済供試体は理論値、FEA値とおおむね一致している。

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図-5に示す。エネルギー吸収量は、無補強供試体Nと比較して、補強供試体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1120mmの地点でき裂が進展したことで、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層目と層目の境界かつ溶接位置の近傍のため、応力集中や溶接残留応力の影響により、構造的な弱点であると言える。

4. まとめ

- CFRP補強を行うことで、その剛性は鋼換算することで評価が可能になり、本研究では、補強時の剛性は無補強に対し1.63~1.74倍増加し、最大荷重は1.50~1.67倍増加した。
- 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を得た。また、CFRP補強により、正負交番載荷時のエネルギー吸収量も増加する。
- 鋼材とCFRP間のポリウレアパテ材を挿入した補強の場合、シート積層数が増える断面からき裂が進展した。溶接線の影響とも考えられるが、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さらなる検討が必要とされる。

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)	シートの境目で亀裂が進展

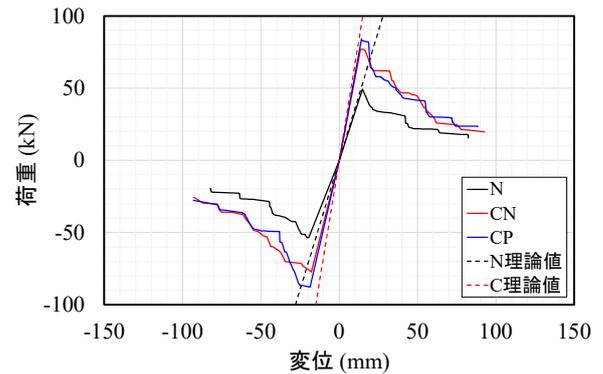


図-3 水平荷重-水平変位履歴曲線の包絡線

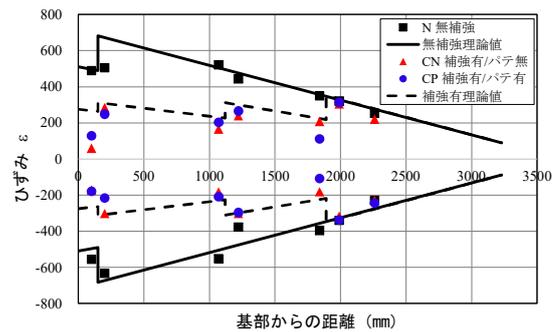


図-4 ひずみ分布 (+25kN時)

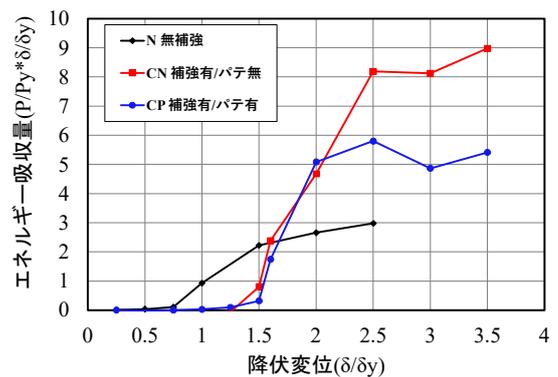


図-5 エネルギー吸収量

参考文献

- 煙突構造設計指針, 日本建築学会, p13, 2007
- 座屈設計ガイドライン, 土木学会, pp221-pp228, 2005
- (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