

CFRP 補強した薄肉鋼管の圧縮補強効果について

東レ (株) 正会員 ○松井 孝洋 豊橋技術科学大学 正会員 松本 幸大
 首都大学東京 正会員 中村 一史 (一財) 電力中央研究所 正会員 松浦 真一
 電源開発 (株) 遠藤 良裕

1. はじめに

近年発生した新潟県中越沖地震や東北地方太平洋沖地震等の大規模地震時において、屋外で液体を貯蔵する既設鋼製タンクの座屈損傷が報告¹⁾されており、鋼製タンクの局部塑性座屈に対する補強が必要となっている。鋼製タンクの局部塑性座屈補強として、側板の取替えや補強材の追加等の方法があるが、いずれも溶接等を伴う方法であり、溶接の熱による側板変形や、樹脂ライニング破損など鋼製タンク本体への影響が懸念され、有効な方法とは言い難い。これを受けて鋼製タンクの耐震補強方法として炭素繊維強化プラスチック (CFRP) による適用研究²⁾が進められ、局部座屈抑制によって耐震補強の有効性が示唆されている。本研究では、追加基礎実験として直径 D /肉厚 t が異なる鋼製薄肉円筒構造物を用い、それらの周方向に CF シートを巻き立てた鋼管に対して圧縮載荷実験を実施し、軸圧縮によって生じる軸対象座屈モードに対する補強効果を検証するとともに、補強後の軸剛性や降伏応力などの力学的性能への効果について確認する。

2. 試験の概要

鋼管はシームレス鋼管 STKM13A を機械加工し、 $\phi 267.4 \times 8t$ から $\phi 262 \times 1.5t (D/t=175)$ と $\phi 262 \times 2.6t (D/t=100)$ に、 $\phi 298.5 \times 8$ から $\phi 296 \times 1.7t (D/t=175)$ に削り出したものを使用した。使用した鋼管の材料試験結果を表 1 に、CF シートの材料試験結果を表 2 に示す。なお、表 1 に示す弾性率、降伏強度は 0.2% オフセット法から算定した値である。試験体には無補強鋼管 (BL) と、エポキシ系含浸接着樹脂 AUR80S を使って中弾性型 CF シート 1 枚で補強した鋼管 (UM) と高強度型 CF シート 1 枚で補強した鋼管 (UT) とし、表 3 に試験水準を示す。鋼管試験体は鋼管全周で高さ 190mm を補強範囲とし、鋼管両端部は載荷治具内の溝との噛み合わせ部として 5mm の無補強部を設けた。試験方法は図 1 に示すように、端部に鋼管をはめ込む溝を設けた載荷治具で試験体の上下端を挟み、1000kN 級万能試験機を用いて圧縮荷重を載荷した。載荷治具には各々変位計を設置し、また鋼管内部と CFRP 表面 (無補強は鋼管外面) にひずみゲージを用いて、変形時のひずみ値を計測した。

3. 試験結果及び考察

表 4 に圧縮試験結果一覧を示す。図 2 に平均応力-ひずみ関係の一例を、図 3 に平均応力-軸変位関係の一例を示す。降伏時応力 p_y は鋼管中央部で測定したひずみが表 1 に示す降伏ひずみに達した時の荷重を鋼管断面積で除した値とした。剛性低下時応力 $p_{0.5E}$ は荷重-変位関係から試験体の剛性が半分まで失われた時点での応力とした。

応力-ひずみ関係について、図 2(a) に示す通り無補強に対し、CFRP 補強では降伏ひずみ後も軸ひずみが増加し、

表 1 鋼管の材料特性

鋼管 (mm)		降伏応力度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性率 (GPa)	降伏ひずみ ($\times 10^{-6}$)
直径	肉厚				
$\phi 262$	1.5, 2.6	288	487	204	1412
$\phi 296$	1.7	298	490	207	1441

表 2 CF シートの材料特性

CF シートの種類	中弾性型	高強度型
品番	UM46-30G	UT70-30G
目付量 (g/m^2)	300	300
シート厚 (mm)	0.163	0.167
引張強度 (MPa)	3572	5057
弾性率 (GPa)	464	264

表 3 試験水準

試験体名	鋼管	n数	補強形態
BL-1.5t	$\phi 262 \times 1.5t$	3	無補強
UM-1.5t		3	周方向: UM46-30G \times 1枚
UT-1.5t		3	周方向: UT70-30G \times 1枚
BL-2.6t	$\phi 262 \times 2.6t$	3	無補強
UM-2.6t		3	周方向: UM46-30G \times 1枚
BL-1.7t	$\phi 296 \times 1.7t$	3	無補強
UM-1.7t		3	周方向: UM46-30G \times 1枚
UT-1.7t		3	周方向: UT70-30G \times 1枚

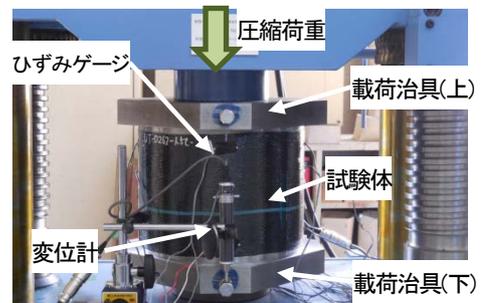


図 1 圧縮試験状況

Key Words: 炭素繊維強化プラスチック, 薄肉鋼管, 圧縮強度, 局部座屈

連絡先 〒455-8502 名古屋市港区大江町 9-1 東レ株式会社コンポジット技術第 1 部 TEL 052-613-5954

また、図 2(b)に示す通り、周ひずみが低減されている。すなわち、CFRP 補強によって拘束効果が得られていると考えられる。次に最大応力 p_{max} について、表 4 に示す通り無補強に比べて 1.07~1.21 倍の上昇を確認できた。特に、弾性率の高い UM は、1.1~1.21

倍の補強効果を示した。管厚 $t=1.5, 1.7$ ともに UM が UT を上回る結果を示した。また、剛性低下時応力 $p_{0.5E}$ についても UM 補強の場合、無補強に比べて $t=1.5$ では 1.04 倍、 $t=2.6$ で 1.01 倍であり、特に

$t=1.7$ の場合には 1.11 倍もの効果が示され、周方向のみに巻かれた CFRP により補強効果が確認できた。さらに $p_{0.5E}$ から p_{max} への応力の上昇を見ると、UT の場合、無補強に比べて応力は上がったが、UM を下回る結果となった。応力は、UM>UT>BL の順番で大きくなる結果となり、これは弾性率が高い CF シートの方が周方向に対する変形の拘束が大きいいため、CFRP が破断するまで応力が上がり、最大応力を増加させたと考えられる。

次に剛性低下後の応力と軸変位に関する挙動を評価するために、 $p_{0.5E}$ に達してからの変形に着目する。図 3 に $p_{0.5E}$ と p_{max} の位置を記し、また、表 4 に $p_{0.5E}$ から p_{max} までの軸変位差を示す。無補強では、剛性低下後に 0.06~0.11mm の変位が生じ、最大応力に達している。しかしながら UM 及び UT の場合は、無補強時に比べ変位量は大きくなっている。さらに、 $p_{0.5E}$ と p_{max} を超え、再び $p_{0.5E}$ まで応力が低下するまでの軸変位差について、UM の場合よりも UT の場合のほうが大きな変位量を示した。これは UT のほうが、破断ひずみが大きい CF シートであるので、変形への追従性に優れており、より大きな変形まで耐力を維持する傾向となった。また、表 2 より、UM の引張強度は 3572MPa、UT の引張強度は 5057MPa であり、UT の引張強度を UM の引張強度で除すと、引張強度比は約 1.42 である。管厚 $t=1.5$ の UT と UM の $p_{0.5E}$ から再び $p_{0.5E}$ までの軸変位差の比は約 1.32 であり、 $t=1.7$ では約 1.58 であることから、CF の強度の比と対応する結果となることが明らかとなった。

4. まとめ

(1) CFRP 補強によって、軸方向に作用する応力に対して周ひずみを拘束することで耐荷力を上昇できる。

(2) CF シートの種類の影響について、CF シートの弾性率、引張強度の違いが明確に現れた。すなわち、耐力上昇について中弾性型が優位であり、変形性能を確保する場合は高強度型が優位である。何れの場合も無補強を上回る耐力・変形性能を示すことから補強による悪影響は示されていない。

参考文献

- 野本敏治：中越沖地震後の原子炉機器の健全性評価委員会の検討状況，原子力発電所の耐震安全性・信頼性に関する国際シンポジウム講演資料，日本原子力技術協会ホームページ，2008.2（掲載確認 2014.3）
- 松井孝洋，松本幸大，中村一史，松浦真一，遠藤良裕：薄肉鋼管の圧縮特性に対する CFRP 補強効果について，土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集，pp.205-206，2014.9

表 4 圧縮試験結果

数値は平均値

試験体名	降伏時応力 p_y (MPa)	剛性低下時応力 $p_{0.5E}$ (MPa)	最大応力 p_{max} (MPa)	p_{max} と $p_{0.5E}$ の差 (MPa)	$p_{0.5E}$ ~ p_{max} の軸変位差(mm)	$p_{0.5E}$ ~ p_{max} の軸変位差(mm)
BL-1.5t	267.2	247.5	260.6	13.1	0.11	0.25
UM-1.5t	276.5	256.3	289.0	32.7	0.78	1.02
UT-1.5t	278.3	261.0	279.7	18.7	0.62	1.35
BL-2.6t	271.6	263.5	271.8	8.3	0.06	0.25
UM-2.6t	274.1	267.1	328.8	61.7	2.88	3.18
BL-1.7t	-	251.8	263.4	11.6	0.10	0.24
UM-1.7t	295.2	280.4	305.1	24.7	0.63	0.78
UT-1.7t	296.5	280.1	302.8	22.7	0.68	1.23

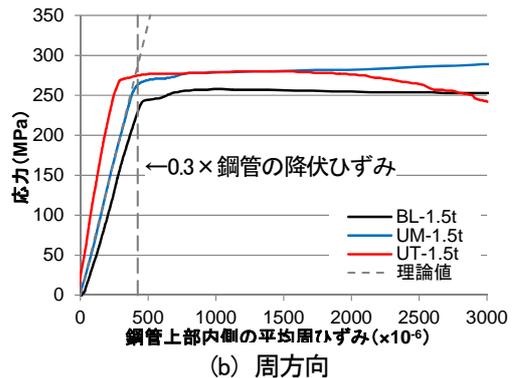
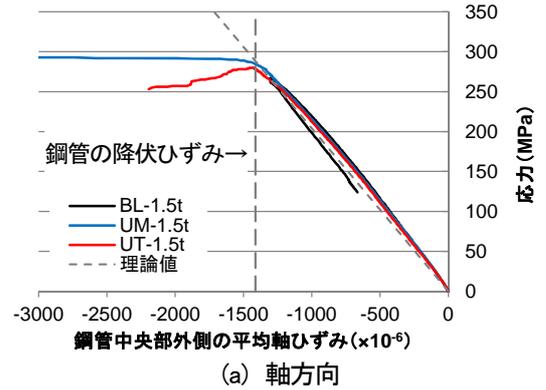


図 2 平均応力-ひずみの関係

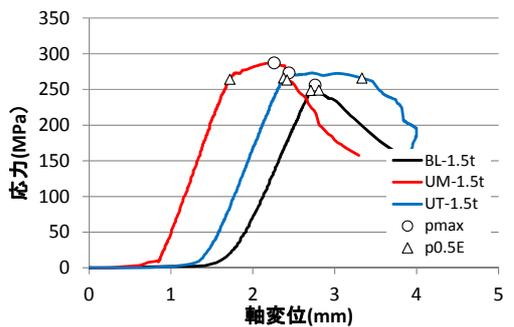


図 3 平均応力-軸変位の関係