

溶接チタン管の圧縮強度

環境・エネルギー研究領域 * 佐久間正明、安藤 孝弘、田中 義照

1. まえがき

軽量かつ高強度で耐食性に優れたチタン材料は、船舶に適した材料であると考えられる。しかしながら、これまで船用品の一部には使用されているものの、構造材料として使用された例は極めて少ない。そのため、チタン材料を用いた船体構造部材の強度に関する研究例も少なく、今後、船体材料としてチタン材料を広く普及させるためには、材料強度、構造強度特性などを十分に把握しておく必要がある。

本報は、中・小型船の強度部材として使用されることが多い薄肉管として、溶接チタン管を用いる場合を想定し、管の長さおよび径を変えた圧縮試験を行い、チタン管の圧縮強度特性について検討した。また、チタン管の残留応力も計測した。

2. 試験片

圧縮試験には公称板厚 3.0mm で、外径が 48.6 mm(記号 A)、76.3mm(記号 B)、および 114.3mm(記号 C)の JIS 2 種純チタン材による溶接チタン管 (H4630) を使用した。材料の化学成分を表 - 1

表 - 1 化学成分

(mass%)					
Mark	H×10 ³	O×10 ²	N×10 ²	Fe×10 ³	Ti
A	2	10	1	5	Bal.
B	3	10	1	5	Bal.
C	1	7	1	5	Bal.

表 - 2 機械的性質

Mark	Young's Modulus GPa	0.2% Offset Strength MPa	Tensile Strength MPa	Elongation %
A	102	265	451	32
B	103	266	440	36
C	102	224	382	44

に示す。また、製品検査証明書および圧縮試験から得た材料の機械的性質を表 - 2 に示す。一般に、チタン材料の強度には異方性があることが知られているが、供試材では不明である。3 種の溶接チタン管から長さ 500、1000、1500 および 2000 mm の試験片を各 2 本切り出し、両端を平滑面に仕上げた。

3. 残留応力

3.1 計測方法

溶接チタン管の残留応力をひずみゲージを用いた切り出し法により計測した。すなわち、計測箇所にはひずみゲージを貼付し、その周辺を機械的に切断 (15×15mm 程度) することにより、残留応力によるひずみゲージ周辺の拘束を解放する。切断前後におけるひずみを計測し、その差から残留応力を推定する方法である。残留応力は 3 種の試験片すべてについて、端部影響の小さい管中央付近の断面において、軸方向および周方向について計測した。

3.2 計測結果

計測結果を図 - 1 および図 - 2 に示す。図 - 1 は軸方向、図 - 2 は周方向の残留応力である。両図からわかるように、軸方向、周方向ともに管外面に引張残留応力、管内面に圧縮残留応力が存在し、溶接ビード部分を除いてほぼ軸対称の分布となっている。このような残留応力分布が生成される理由は、溶接チタン管が冷延コイルをもとに 2 方向のローラーにより円筒状に機械加工された後、軸方向に溶接されるためである。

4. 圧縮試験

4.1 試験方法

圧縮試験には島津製作所製固定式 1500kN 疲労

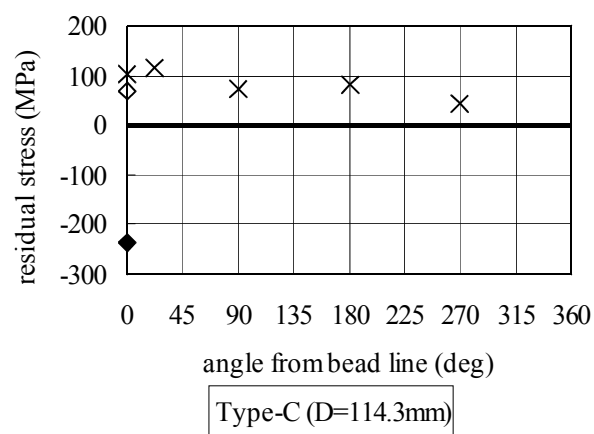
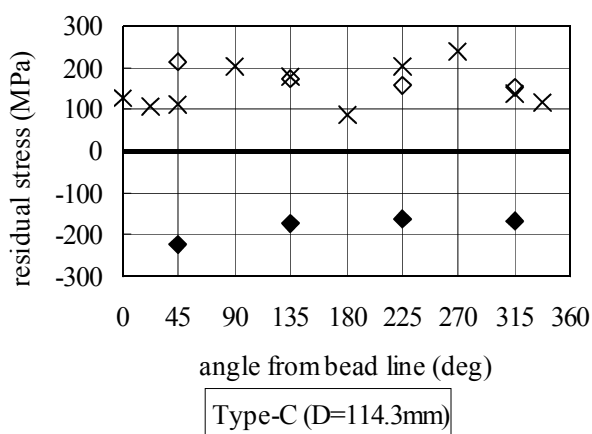
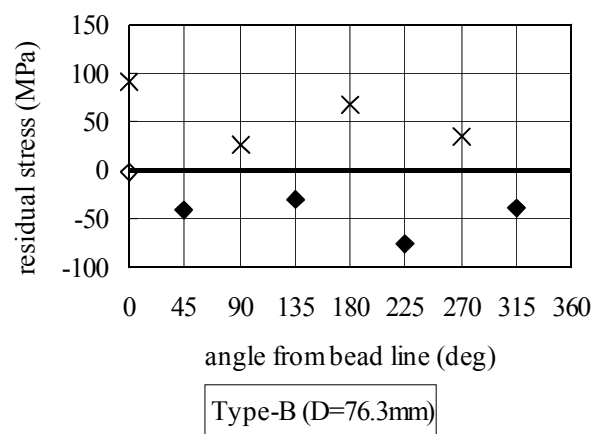
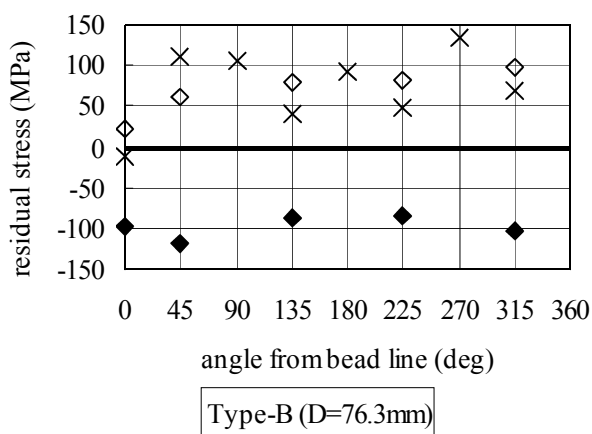
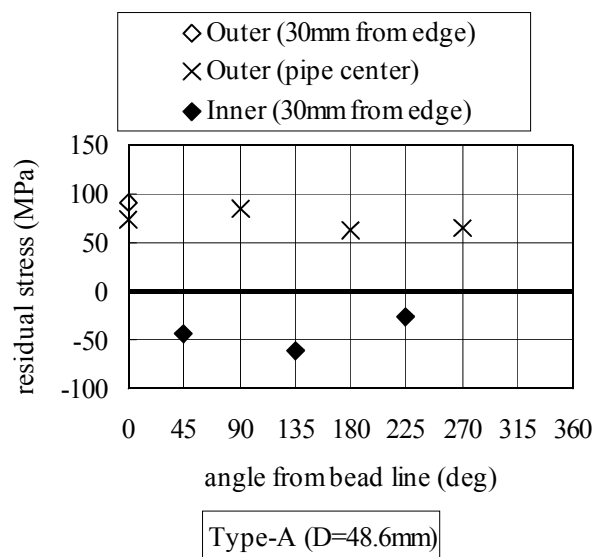
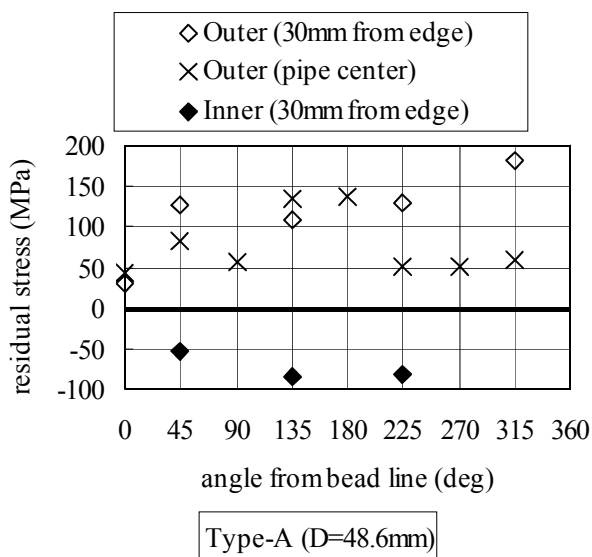


図 - 1 残留応力分布（軸方向）

図 - 2 残留応力分布（周方向）

試験機を使用した。図 - 3 に示すような鋼製の支持治具を製作し、試験機上下端の油圧チャックに取り付けた。管内に挿入される突起部はチタン管

の内径に合わせて 3 種を用意した。

試験片は図 - 3 に示すように、両端を治具に差し込み、変位制御（0.7mm/min）により圧縮荷重

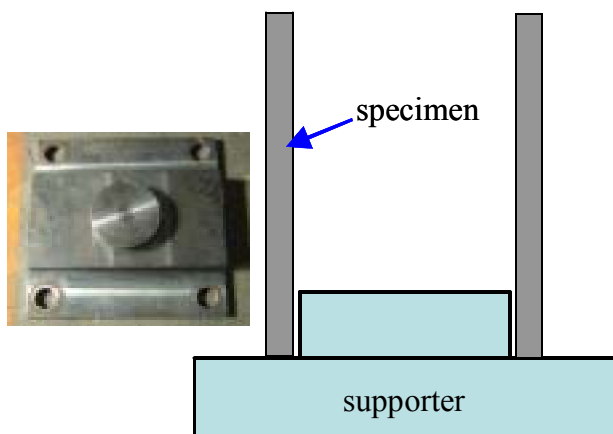


図 - 3 支持治具

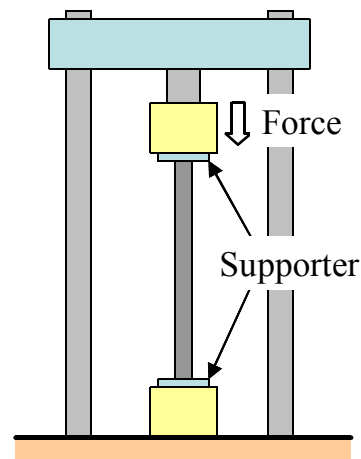


図 - 4 試験片設置状況

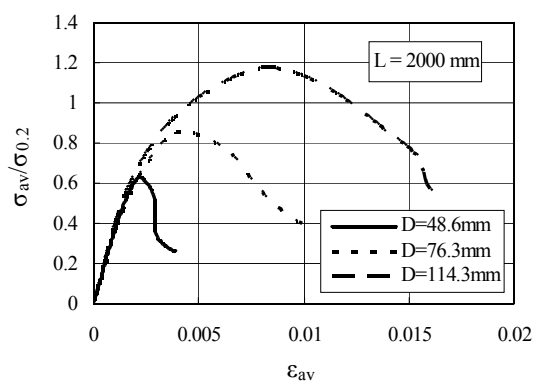
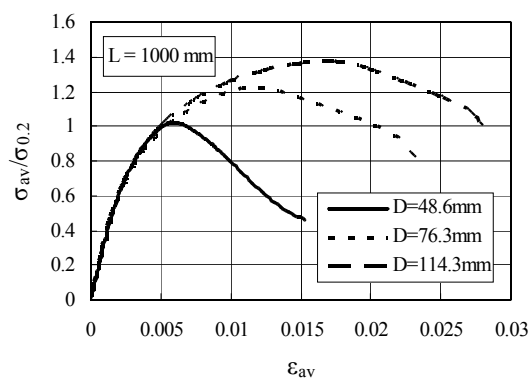
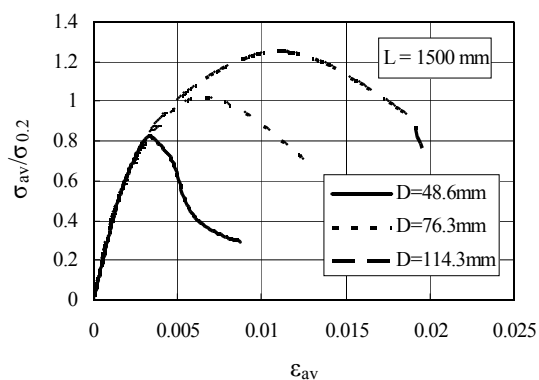
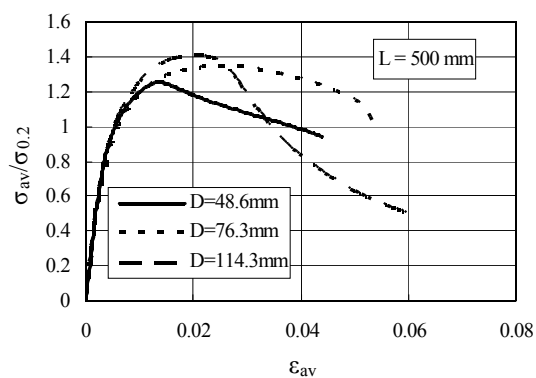


図 - 5 圧縮試験における応力 - ひずみ関係

を加えた。試験片の設置状況を図 - 4 に示す。試験片両端は治具との摩擦により変位を拘束されることから、支持条件は両端固定に近い。

圧縮試験においては、圧縮荷重、圧縮変位、並びに、試験片中央断面におけるチタン管外面の軸方向ひずみ（90 度ごとに各 4 点）を計測した。

4.2 試験結果

圧縮試験によって得られた各試験片の平均圧縮応力 σ_{av} （圧縮荷重 / 断面積）と平均圧縮ひずみ ε_{av} （圧縮変位 / 長さ）の関係を図 - 5 に示す。圧縮強度は管径が大きいほど、長さが短いほど大



図 - 6 圧縮試験後の試験片

きい。試験終了後の試験片を図 - 6 に示す。ほとんどの試験片において、図 - 6 に見られるような全体座屈モードと試験片端部の局部座屈（提灯座屈）モードが同時進行し、最大荷重に達した。

なお、ビードラインがチタン管の全体座屈の方向に影響を及ぼすことはなく、これは溶接残留応力分布が軸対称で、初期撓みが小さいことを示している。

5 . 考察

5 . 1 FEM 計算

溶接チタン管を厚肉 shell 要素を用いてモデル化し、微小の初期撓みおよび両端固定条件を仮定して、FEM 弾塑性大撓み計算を実施した。残留応力は板の内外面で平衡状態にあるとして、考慮していない。計算結果を試験結果と比較して図 - 7 に示す。試験結果と計算結果はほとんど一致しており、溶接チタン管の座屈および圧縮強度を FEM 計算により精度良く推定できることを示している。

5 . 2 溶接チタン管の強度推定式

溶接チタン管の圧縮試験により得られた最大応力 $\sigma_{\max} / \sigma_{0.2}$ （0.2%耐力で無次元化）を各試験片の細長比 L/k （長さ $\times$ 横断面の慣性半径の比）に対して示すと、図 - 8 となる。最大応力は管の寸法に関わらずほぼ 1 本の曲線上に乗り、この曲線を 3 次式で近似すると次式となる。

$$\sigma_{\max} / \sigma_{0.2} = 1.47 - 4.06 \times 10^{-3} \cdot (L/k) - 7.75 \times 10^{-5} \cdot (L/k)^2 + 4.50 \times 10^{-7} \cdot (L/k)^3$$

ここに、 L = 管の長さ、 $k = (I/A)^{0.5}$ 、 I = 断面 2 次モーメント、 A = 断面積

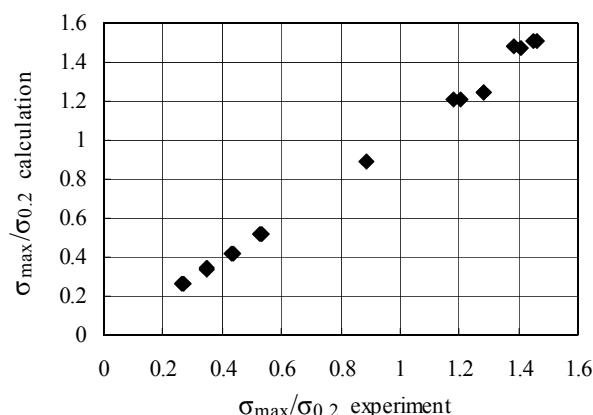


図 - 7 試験結果と計算結果の比較

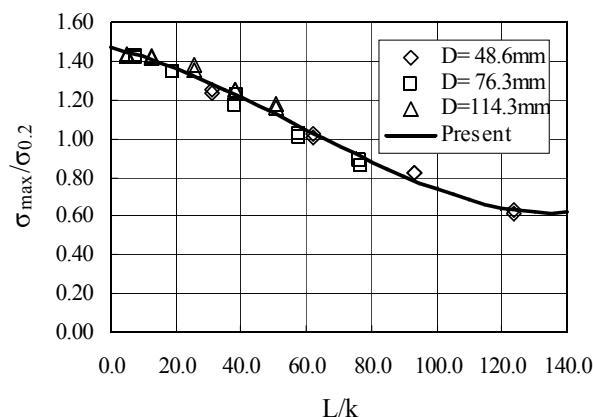


図 - 8 圧縮最大応力と細長比の関係

6 . 結言

溶接チタン管の圧縮試験を行い、圧縮強度について以下の知見が得られた。

- (1) 溶接チタン管の残留応力は、軸方向および周方向とも管外面に引張、管内面に圧縮応力が分布し、ほぼ軸対称となっている。
- (2) 溶接チタン管に軸方向の圧縮荷重を負荷すると、全体座屈および両端部の局部座屈（提灯座屈）がほぼ同時に進行し、最大応力に達する。
- (3) 溶接チタン管の圧縮強度は、FEM 弾塑性計算により精度良く推定できる。また、管の細長比を用いて圧縮強度推定式が得られた。

なお、本研究は社団法人日本チタン協会と当所との共同研究として実施されたものであり、船舶・建設・海洋部会船舶 WG 主査木下和宏氏をはじめとする関係各位に厚く御礼申し上げます。