

厚肉鋼管部材の偏心軸圧縮座屈解析と座屈評価式の検討

広島大学大学院 学生会員 ○佐竹 亮一
 広島大学大学院 フェロー会員 中村 秀治
 広島大学大学院 正会員 藤井 堅

東京電力株式会社 正会員 三上 康朗
 広島大学大学院 学生会員 小澤 武範
 (株)計測リサーチ 正会員 藤井 真人

1. はじめに

従来、円筒殻の座屈については薄肉弾性領域のものを中心に検討されてきたが、半径対板厚比が 50 以下の塑性座屈あるいは圧壊に近い領域における軸圧縮・曲げ座屈に関する検討例は少ない。この 15 年間だけでも鋼管部材を用いた送電用鉄塔が台風および地震で倒壊あるいは大きな損傷を受けていることは、実鉄塔部材を用いた詳細な研究の必要性を強く示唆している¹⁾。

そこで本研究では半径対板厚比が 50 以下の厚肉鋼管部材について静的座屈解析を実施し、軸圧縮座屈および偏心軸圧縮座屈を良好に再現するための解析方法を明らかにする。さらに解析に基づいて現行の座屈設計式を検討し、シェル座屈および偏心の影響も考慮した座屈設計式の必要性について明らかにすることを目的とする。

2. 静的座屈解析

静的座屈試験に対応した静的座屈解析を行った。形状パラメータは鋼管部材の形状(半径対板厚比、細長比)の違いによる座屈荷重と座屈後の耐力低下特性および座屈モードの違いを把握することができるよう設定した。シリーズ 1 は明らかにオイラー座屈領域、シリーズ 3 はシェル座屈領域、シリーズ 2 はその中間的な領域とした。

要素は 8 節点シェル要素を用い、座屈後までを含めた解析精度の重要性から変位増分により弾塑性・大変形解析を行った。

要素分割は高さ方向には座屈波長 $3\sqrt{Rt}$ の間に 5 要素以上必要であり、今回は 5mm 間隔、周方向は 5° 間隔に 72 分割とした²⁾。

材料物性値の設定は材料試験結果を用いた。ヤング係数は STK400 が $E=1.72 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、STKT590 が $E=2.13 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ であった。応力-ひずみ関係は可能な限り実際に近い多直線近似とした。解析に用いた応力-塑性ひずみ関係を表 2 に示す。降伏条

表 1 形状パラメータ

シリーズ	1	2	3
材質	STK400	STK400	STKT590
外径φ	76.3	76.3	139.8
板厚t	2.8	2.8	3.5
長さL	2000	743	1377
有効細長比λ	54	20	20
半径対板厚比R/t	13	13	20
節点数	57672	21528	39816
要素数	14400	5364	9936

表 2 応力-塑性ひずみ関係

a) STK400		b) STKT590	
応力 (N/mm ²)	塑性ひずみ (%)	応力 (N/mm ²)	塑性ひずみ (%)
374.1	0.00	639.7	0.00
372.8	0.13	640.4	0.17
374.1	0.32	640.1	0.29
374.0	0.57	640.4	0.43
373.1	0.83	640.8	0.80
373.4	1.07	640.8	1.01
386.1	2.00	640.4	2.09
408.2	3.02	639.4	2.59
420.8	4.02	638.7	3.01

件としてはミーゼスの条件を用いた。

境界条件は静的座屈試験に対応して上端回転自由、下端完全固定とした。荷重条件は上端部分にかなり剛性の高い円板を設けて円板の一点に軸方向変位を作用させ、増分計算で座屈解析を行った。変位増分で解析し、最大荷重点を越えて座屈後の耐荷力の低下と変形の間係を得た。座屈解析には一般に適切な初期不整を与えることで精度よく解析することができる。今回は明らかにオイラー座屈の領域については最大で板厚の 10%の不整をランダムに導入した。シェル座屈の領域では不整を導入しない方が精度のよいシミュレーションを行うことができた。

シリーズ 1 における偏心量 $\delta/R=0.26$ の場合の解析結果と試験結果の変位-荷重関係を図 1 に示す。解析結果の初期剛性、座屈までの荷重変一位関係は

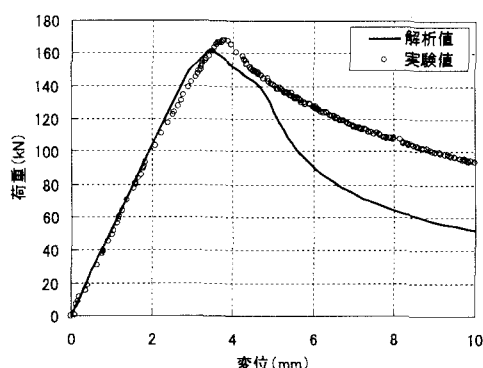


図1 荷重－変位関係(シリーズ1, $\delta/R=0.26$)

表3 座屈荷重の比較(シリーズ1)

偏心量(mm)	試験値(kN)	解析値(kN)
0	217.0	237.9
10	167.9	162.0
20	132.3	131.4
30	115.0	111.8

試験結果とよく一致した。シリーズ1における、解析と実験の座屈荷重を比較して表3に示した。解析結果と試験結果の座屈荷重の差は最大10%程度であり、解析結果は試験結果とよく一致した。

偏心軸圧縮座屈は軸圧縮座屈に比べ、偏心量の増加にともない座屈荷重が低下する。偏心量 $\delta=20\text{mm}$ ($\delta/R=0.52$) の場合において座屈荷重は6割程度まで低下している。

3. 評価式との比較検討

許容座屈応力度の評価式は、鉄塔部材として古くから使用されている山形鋼を対象とした耐荷力試験をベースに導かれたものであり、対称断面を有する十字断面部材や鋼管に対しては偏心の極めて少ない場合を想定して適用しており、その妥当性に関する検討は必要である。

図2は表4におけるSTK400の式に対して解析結果と比較検討したものである。偏心なしの場合において、評価式は2.4程度の裕度を有することがわかる。偏心($\delta/R=0.79$)がある場合は座屈耐力が低下し1.3程度まで裕度が低下することが明らかになった。偏心量は座屈評価において考慮すべき因子といえる。

シリーズ3、シェル座屈の領域では評価式と比較すると解析結果において偏心($\delta/R=0.72$)がある場合

表4 現行の許容座屈応力度評価式

材質	有効細長比 λ_k	許容座屈応力度 σ_k (N/mm ²)
STK400	$0 < \lambda_k < 100$	$\sigma_k = 156 - 63(\lambda_k/100)^2$
	$100 \leq \lambda_k$	$\sigma_k = 93/(\lambda_k/100)^2$
STKT59	$0 < \lambda_k < 70$	$\sigma_k = 293 - 211(\lambda_k/100)^2$
	$75 \leq \lambda_k$	$\sigma_k = 93/(\lambda_k/100)^2$

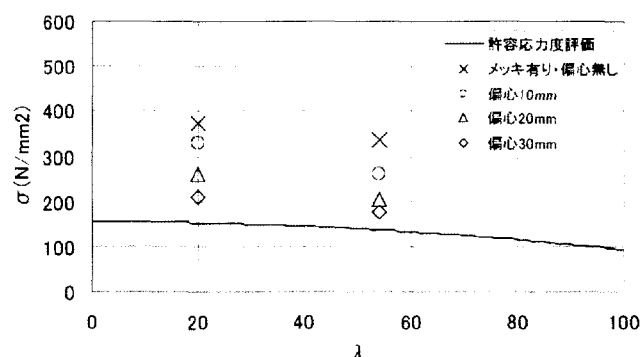


図2 解析結果と評価式の比較

は表3の評価式以下になることはなかったが、1.2程度まで裕度は低下する。シェル座屈領域に対しては長さ L 、半径 R 、板厚 t による無次元量 $L/\sqrt{Rt}$ を用いて評価する方が適切と考えられる。

4. 結論

厚肉鋼管部材の静的座屈解析を行った結果、座屈荷重、座屈後の耐力低下特性および座屈変形状が明らかになり、静的座屈試験と概ね一致する解を得ることができた。解析で得られた座屈荷重は現行の評価式に対して十分な裕度のあることが確認されたが、偏心を考慮した場合、裕度が大幅に低下することも明らかになった。

参考文献

- 1)中村秀治他：送電用鉄塔に用いる鋼管の偏心を考慮した軸圧縮座屈耐力に関する基礎的検討，構造工学論文集，vol.51A,pp219-218,2005
- 2)松浦真一他：高速増殖炉容器の耐震座屈設計法に関する研究(第5報，座屈解析法の適用性評価)，日本機械学会論文集，61巻585号，1995
- 3)資源エネルギー庁公益事業部：電気設備の技術基準の解釈及び解説，pp315-316，1997