

鋼管鉄塔支柱材に生じた特異な局部座屈の再現解析

東電設計(株) フェロー会員 ○中村 秀治
 東電設計(株) 太田 浩
 東電設計(株) 本郷榮次郎

1. はじめに

増加する経年鉄塔を効率的に補修、補強、交換する改修技術の重要性が増している。特に超高圧送電線は系統全体に与える影響が大きいため、線路の運転を継続したまま安全に鉄塔改修することが求められ、工事用地確保の長期化に対する解決策の一つとして、狭根開き鉄塔の開発が進められている。狭根開き鉄塔は標準鉄塔に比較して塔体幅が狭く、たわみやすいため、設計の妥当性確認を目的とする実規模耐力試験(図-1)が実施された。耐力については所定以上の安全率を確保できることが確認されたが、終局状態として支柱材の鍛造フランジとリングスチフナー間の短い領域で特異な局部座屈モードが発生した。ここでは、この局部座屈を”螺旋型座屈“(図-2)と呼ぶが、軸圧縮力による提灯型、曲げモーメントによる象脚型とは明らかに異なる変形モードである^{1),2)}。軸圧縮力、曲げモーメント及びせん断力、更に振りモーメントが連成したものと考えられるが、この座屈モードが鉄塔全体の耐力を支配したことは明らかである。本報告では、螺旋型座屈を解明するために実施した再現解析の条件と結果について報告する。



図-1 実規模耐力試験に用いた鉄塔

2. 鋼管鉄塔の局部座屈防止規定、実規模耐力試験および再現解析の概要

鋼管を対象にした規定としては、管の圧縮応力度がほぼ降伏点に達するまで管壁が局部座屈しない条件として、JEC-127-1979に次式が示されている³⁾。送電用鋼管鉄塔に用いる市販の鋼管サイズであれば、局部座屈の考慮無しに設計可としている。

$$D/t \leq 23500/\sigma_y \quad (1)$$

ここで、 D ：鋼管の公称外径(mm)、 t ：管厚(mm)、 σ_y ：降伏応力(N/mm²)

実規模試験に用いた鋼管鉄塔の高さは $H=74.4$ (m)、根開き $B=6.94$ (m)、 $B/H=1/10.7$ 、重量は617.9(kN)である。支柱材は高張力鋼STKT590($\sigma_y=550$)、支柱材以外は等辺山形鋼が使われている。標準的な鉄塔に比べて狭塔体であり、耐力試験で螺旋型局部座屈を生じた13パネルの支柱材bは、図-1中に赤丸で示した箇所にある。座屈発生箇所の形状比は $D/t=38$ であり、本鉄塔は電気設備技術基準、JEC127(1979)、JEC-TR-00007の基準を満足している。

次に、実規模耐力試験で支柱材に生じた特異な局部座屈現象を解明するため、座屈発生箇所を8節点ソリッド要素で細分割し、弾塑性大変形を考慮して弧長増分解析することにより、支柱材鋼管の局部座屈発生と変形過程の再現を試みた。

解析モデルはフランジ継手から腹材の取付くガセットプレートの上端250(mm)までを範囲としている。ガセットプレートには4節点シェル要素を用いている(図-3)。座屈発生箇所の上下端の溶接線の影響は考慮するものとし、過去の試験データに基づいて初期ひずみを設定している⁴⁾。

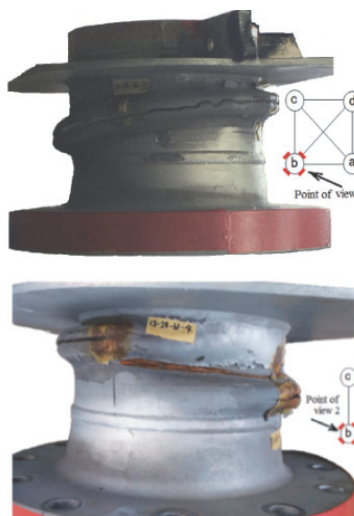


図-2 特異な螺旋型座屈変形

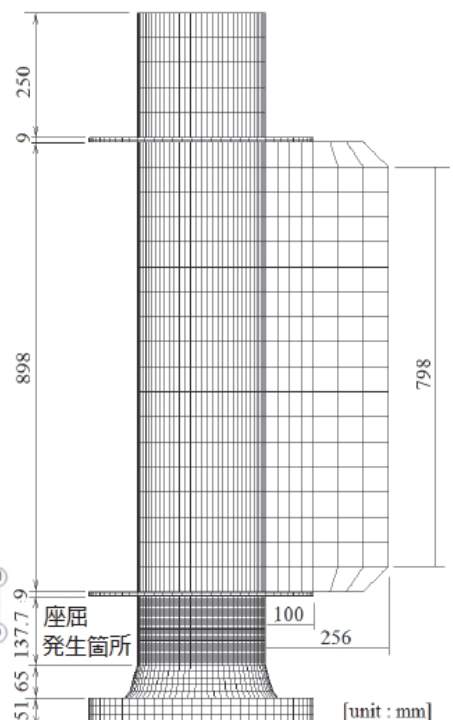


図-3 解析モデル

キーワード 送電用鉄塔、鋼管、局部座屈、連成座屈、非線形FEM解析

連絡先 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-7-12 東電設計株式会社電気本部 Tel. 03-6372-5720

E-mail: h.nakamura@tepsc.co.jp

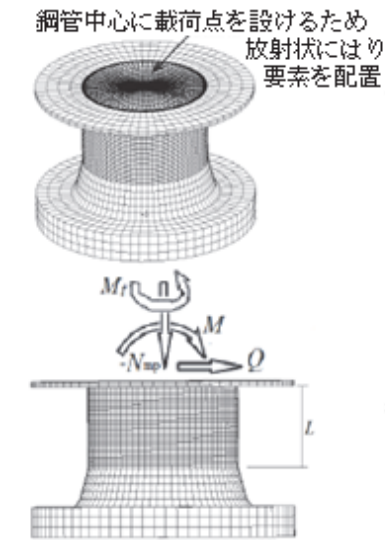


図-4 荷重位置と荷重の種類

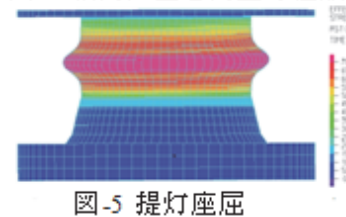
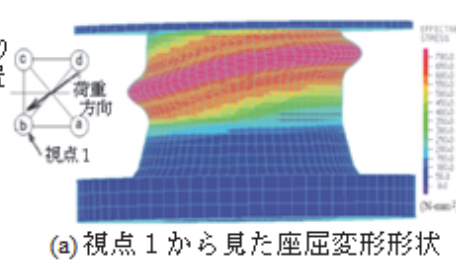
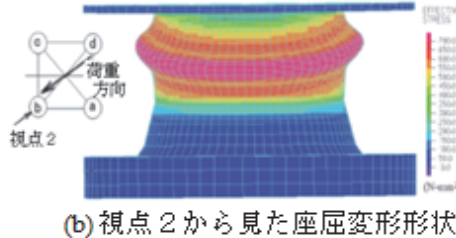


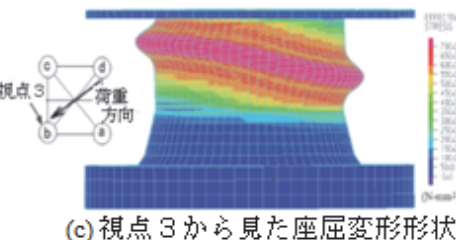
図-5 提灯座屈



(a) 視点1から見た座屈変形状

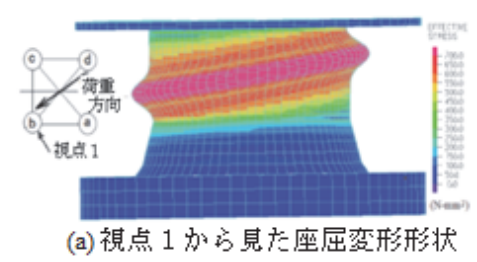


(b) 視点2から見た座屈変形状

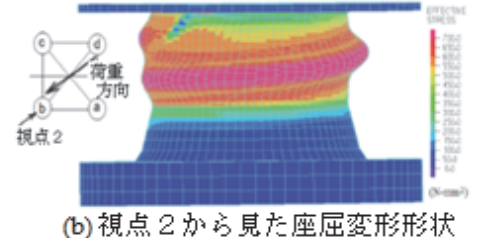


(c) 視点3から見た座屈変形状

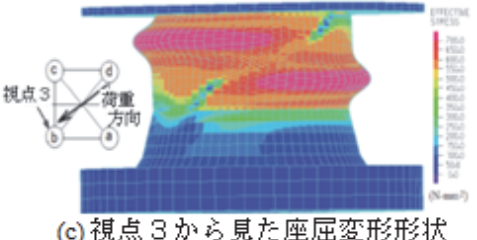
図-6 傾斜型座屈形状



(a) 視点1から見た座屈変形状



(b) 視点2から見た座屈変形状



(c) 視点3から見た座屈変形状

図-7 螺旋型座屈形状

3. 再現解析結果

主柱材の局部座屈に関わる影響因子は、①軸圧縮力、②曲げモーメント、③せん断力、④振りモーメント、⑤溶接残留応力である。これらの影響を定量的に把握するためパラメータ解析(使用コード:ADINA ver.8.9⁵⁾)を行った。

- (1) 荷重ケース1: 軸圧縮力(N_{mp}) + 溶接熱影響(初期ひずみ $\epsilon_0=0.007$) $\Rightarrow$ 提灯座屈(図-5)
- (2) 荷重ケース2: 軸圧縮力(N_{mp}) + 曲げモーメント($6(\text{mm}) \times N_{mp}$) + 溶接熱影響($\epsilon_0=0.007$) $\Rightarrow$ 提灯座屈(図-5)
- (3) 荷重ケース3: 軸圧縮力(N_{mp}) + 曲げモーメント($6(\text{mm}) \times N_{mp}$) + 溶接熱影響($\epsilon_0=0.007$) + せん断力($(\sim 0.03) \times N_{mp}$) $\Rightarrow$ 傾斜型座屈(図-6), 軸圧縮力, 曲げモーメント, 溶接熱影響にせん断力を付加しただけでは, 螺旋型の変形状を呈する特異な座屈現象を再現できないことが確認された。
- (4) 荷重ケース4: 軸圧縮力(N_{mp}) + 曲げモーメント($6(\text{mm}) \times N_{mp}$) + 溶接熱影響($\epsilon_0=0.007$) + せん断力($(\sim 0.03) \times N_{mp}$) + 振りモーメント($(5.0 \sim 30.0) (\text{mm}) \times N_{mp}$) $\Rightarrow$ 螺旋型座屈(図-7). 図-7において, せん断力は軸圧縮力の1%($0.01 N_{mp}$), 振りモーメントは $17(\text{mm}) \times N_{mp}$ を与えており, 変形状と応力分布(Mises応力)を示している。螺旋型座屈変形が再現されており, 全断面降伏荷重に対する荷重低下率は3%程度である。

4. 結 び

特異な螺旋型局部座屈現象の再現を目指して解析的検討を行った結果を要約すると次の通りである。

- (1) 形状, 物性値, 荷重条件等を試験条件に合せて再現解析を試みた結果, 軸圧縮力に比べて僅かであっても, 振りモーメント, 溶接熱影響などを考慮することで, 螺旋型の座屈変形が再現できることを確認した。
- (2) 軸圧縮荷重単独で降伏に近い状態であれば, 僅かな曲げモーメント, せん断力, 振りモーメントが螺旋型座屈の影響因子となる。特に, 振りモーメントの付加は螺旋型座屈に必須の因子である。せん断力も振りモーメントに相乗効果を生じさせ, 溶接線の熱影響も螺旋型座屈発生を促進する要因であることが明らかになった。
- (3) 座屈荷重低下率の視点で見れば, 元々, 単独の軸圧縮力による局部座屈荷重が降伏荷重程度の厚肉円筒殻である。従って, 軸圧縮力より遥かに小さな他の力の組合せ荷重の付加で局部座屈を生じても, 荷重低下率は僅かである。試験で生じたのと類似の座屈変形状が再現できた解析条件では, 全断面降伏荷重に対して3%程度の荷重低下率に留まることが明らかになった。

参考文献 1) 土木学会: 座屈設計ガイドライン, 改訂第2版 [2005年版], 鋼構造シリーズ12, 2005. 2) 三上康朗, 本郷栄次郎, 中村秀治, 藤井 堅, 上野谷実, 佐竹亮一: 送電用鋼管鉄塔主柱材の軸圧縮座屈強度評価法に関する研究, 土木学会論文集A, Vol.64, No.1, pp.142-155, 2008. 3) 電気学会: 送電用支持物設計標準, JEC-127-1979, pp.83-94, 1980. 4) (社)電気協同研究会: 電気協同研究, 第39巻, 第3号, 送電用鋼管の細部構造, 第6章溶接施工, pp.89-108, 1983.9. 5) ADINA R & D, Inc.: ADINA User Interface Command Reference Manual Volume I: ADINA Solids & Structures Model Definition, 2011.