

送電鉄塔の立体骨組解析における不安定回避方法と解析精度に関する考察

東電設計(株) フェロー会員 ○中村 秀治

東電設計(株) 正会員 本郷榮次郎

東電設計(株) 太田 浩

東電設計(株) 川久保敦雄

1. はじめに

日本国内における送電鉄塔の設計は、手計算による平面解析の時代を経て、応力分担を平面解析と同じように仮定したコンピュータプログラムを作成して実施しているのが実情である¹⁾。今後、立体解析に移行する趨勢にあるが²⁾、海外では古くから立体解析による鉄塔設計プログラムが開発され実用化されている。代表的プログラムとして「TOWER」があるが、国内で適用する場合、荷重や許容応力などの違いに対応する必要がある、不安定メカニズムを避ける対策が求められることもある³⁾。ここでは鉄塔設計の実務的視点から、数値的不安定を回避し解析精度と使い易さの確保を目指した検討を行う。

2. 「TOWER」プログラムにおける不安定回避方法

「TOWER」は鉄塔設計用コードとして世界的に用いられている。鉄塔設計に特化しており、各国の基準値を利用可能にしている。基本的にトラス部材で構成された立体トラス構造を対象としており、節点の接合条件が剛結合—剛結合(はり要素)、ピン結合—ピン結合(トラス要素)のみで、数値的不安定現象が生じた場合、次の対策が推奨されている。

- ダミー部材の使用：トラス材が1平面内で交わる節点は不安定メカニズムを生じるので、隣接節点間に低剛性・無質量のダミー部材を挿入する(図-1)。
- 余剰な自由度の削除：全ての部材が1つの平面内にある交点で、面外方向が全体座標系のX,Y,Z軸の何れかと一致する場合、その方向の節点自由度を単純に削除することで、不安定を回避できる。
- 架空バネの追加：非常に小さい剛性を持つ架空バネを、各節点のX、Y、Z方向に系統的に追加する。
- 両端剛結合のはり要素への置換：トラス部材が平面で交わる節点では、いくつかを両端剛結合のはり要素で置き換える(図-2)。

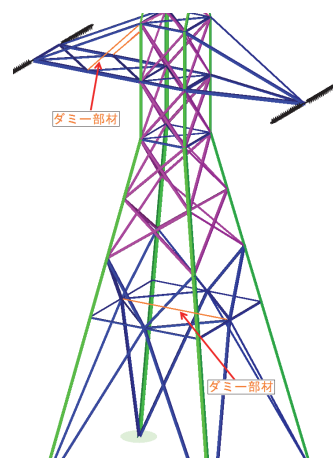


図-1 ダミー部材挿入例

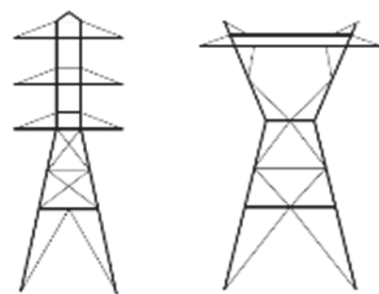


図-2 はり要素(太線)の推奨される配置

3. 数値的不安定を回避する対策案

不安定回避の方策として、変断面はり要素(剛結合—剛結合)を用いる一案を示す(図-3)。ピン結合端側の半要素長の曲げ剛性を低減させる。実鉄塔の接合は全て「剛結合とピン結合の中間」と認識し、変断面はり要素の剛性マトリクスの使用で、全て「剛結合」とする。要素中央に変断面部を有するはり要素ACの剛性マトリクスは、等断面の要素AB, BCの式(1), (2)を用いて、式(3)のようになる。但し、点Bに外力は作用しないものとする。

$$\begin{Bmatrix} F_A \\ F_B \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{AA} & K_{AB} \\ K_{BA} & K_{BB} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_A \\ \delta_B \end{Bmatrix} \quad (1) \quad \begin{Bmatrix} F_{B'} \\ F_C \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{B'B'} & K_{B'C} \\ K_{CB'} & K_{CC} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_{B'} \\ \delta_C \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{Bmatrix} F_A \\ F_C \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{AA} - K_{AB}[K_{BB} + K_{BB}]^{-1}K_{BA} & -K_{AB}[K_{BB} + K_{BB}]^{-1}K_{BC} \\ -K_{CB}[K_{BB} + K_{BB}]^{-1}K_{BA} & K_{CC} - K_{CB}[K_{BB} + K_{BB}]^{-1}K_{BC} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_A \\ \delta_C \end{Bmatrix} \quad (3)$$

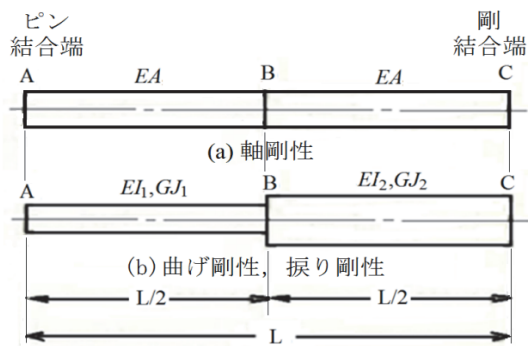


図-3 変断面はり要素

キーワード 送電鉄塔, 立体骨組解析, 不安定メカニズム

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

4. 数値解析による確認

図-4 の山形鋼鉄塔(塔高 28m)を検討対象として、(a) 実設計で採用する
 接合条件で立体解析した結果と、(b) 2. a),d)に示す安定化方策を講じた
 ”TOWER”の結果、及び、(c) 変断面はり要素による結果を表-1 に示す。
 パネル 12, 13(図-5)を代表的箇所として、発生軸力と設計解析に対する差
 違(=((a)-(b))×100/(a))について比較している。確認された事項は次の通り。

- (1) “TOWER”においてダミー部材を使用せず、ピン結合を剛結合に変更
 した場合、設計上曲げモーメントの生じない腹材にモーメントが生じ、
 軸方向力にも影響するが、支柱材への影響はわずかである。
- (2) “TOWER”でダミー部材を用いる場合、
 軸剛性の最適選択(腹材の 1/1000 程度)
 は重要である。小さ過ぎれば不安定に
 逆戻りし、大きくなれば安定性は増す
 が、形状が変わることになり、軸力の
 差違が大きな部材も生じる。
- (3) 提案法は全て剛結合にして安定化を
 図る点で上記(1)と共通している。ピン
 結合端に近い箇所は曲げ剛性を下げる
 ことで材端モーメントを抑えているが、
 設計解析との差違に改善が見られる。

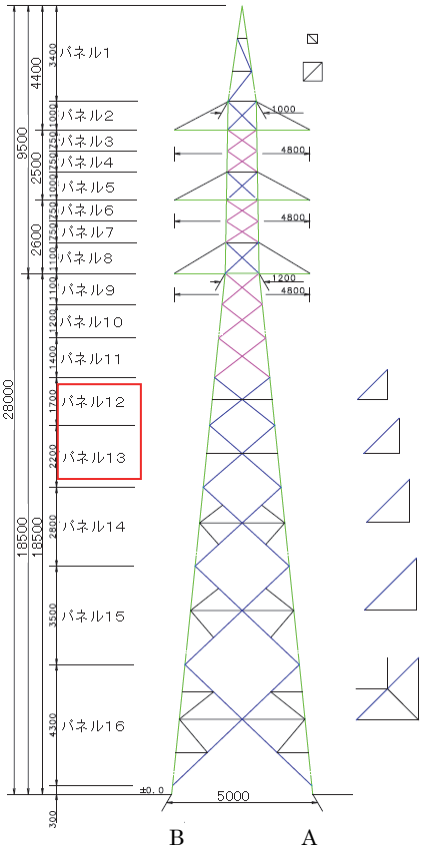
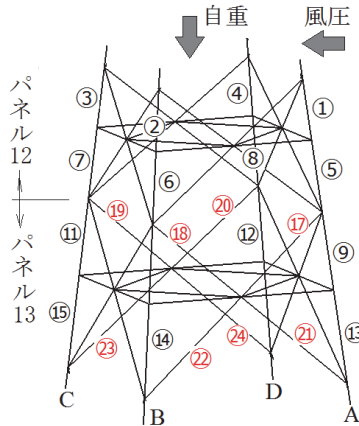


表-1 パネル 12, 13 の構成部材(図-5)における発生軸力(設計荷重:自重+風圧) の比較

部材名	ADINA	“TOWER”コード						変断面はり要素による提案法			
	設計解析	腹材,対辺材をはり要素置換で安定化		腹材に比べて低軸剛性ダミー材の挿入で安定化				ピン結合部材端の曲げ剛性比			
		軸力[N]	軸力[N]	差違(%)	ダミー材の軸剛性比 1/10 程度以上	1/1000 程度 軸力[N]	差違(%)	1/1000000 程度以下	1/1 軸力[N]	差違(%)	1/1000 軸力[N]
①12P 主柱材 A 上	622361	624736	-0.38	ダミー材の腹材に対する軸剛性比=1/10 程度以上であっても、安定的に解析は実行されるが、本来の鉄塔形状と異なる構造解析を行うことになる。従って、解析結果は実態と大きく異なり、誤差が大きくなる。	620758	0.26	ダミー材の腹材に対する軸剛性比=1/1000000 程度であれば、解析は実行されるが、変形状態が不自然で、数値的に不安定な状態になる。 更に軸剛性比が小さくなると形状が不自然になり警告メッセージが出る。更に小さくなれば、数値的不安定により解析が行われなくなる。	622315	0.01	622560	-0.03
②12P 主柱材 B 上	-686830	-686570	0.04		-685504	0.19		-687399	-0.08	-687333	-0.07
③12P 主柱材 C 上	-686817	-686559	0.04		-685494	0.19		-687386	-0.08	-687321	-0.07
④12P 主柱材 D 上	622355	624732	-0.38		620755	0.26		622308	0.01	622555	-0.03
⑤12P 主柱材 A 下	620743	622057	-0.21		618186	0.41		620696	0.01	620938	-0.03
⑥12P 主柱材 B 下	-686109	-684905	0.18		-683692	0.35		-686666	-0.08	-686601	-0.07
⑦12P 主柱材 C 下	-686097	-684895	0.18		-683683	0.35		-686653	-0.08	-686590	-0.07
⑧12P 主柱材 D 下	620738	622052	-0.21		618183	0.41		620690	0.01	620932	-0.03
⑨13P 主柱材 A 上	663773	662974	0.12		660308	0.52		662964	0.12	663419	0.05
⑩13P 主柱材 B 上	-735435	-732797	0.36		-730343	0.69		-733684	0.24	-734668	0.10
⑪13P 主柱材 C 上	-735433	-732794	0.36		-730341	0.69		-733680	0.24	-734666	0.10
⑫13P 主柱材 D 上	663765	662969	0.12		660304	0.52		662956	0.12	663411	0.05
⑬13P 主柱材 A 下	661737	659756	0.30		657238	0.68		660962	0.12	661392	0.05
⑭13P 主柱材 B 下	-734619	-730984	0.49		-728343	0.85		-732917	0.23	-733869	0.10
⑮13P 主柱材 C 下	-734617	-730982	0.49		-728341	0.85		-732913	0.23	-733866	0.10
⑯13P 主柱材 D 下	661730	659751	0.30		657234	0.68		660955	0.12	661385	0.05
⑰13P 腹材 AB 面上	-28846	-23343	19.08		-23536	18.41		-27135	5.93	-27364	5.14
⑱13P 腹材 AB 面上	26774	23811	11.07		24091	10.02		28342	-5.86	28387	-6.02
⑲13P 腹材 CD 面上	26779	23813	11.08		24094	10.03		28346	-5.85	28392	-6.02
⑳13P 腹材 CD 面上	-28845	-23341	19.08		-23534	18.41		-27134	5.93	-27363	5.14
㉑13P 腹材 AB 面下	28358	35363	-24.70		35255	-24.32		30432	-7.31	30038	-5.92
㉒13P 腹材 AB 面下	-31686	-36226	-14.33		-36136	-14.04		-30494	3.76	-30277	4.45
㉓13P 腹材 CD 面下	-31684	-36225	-14.33		-36134	-14.04		-30493	3.76	-30275	4.45
㉔13P 腹材 CD 面下	28362	35364	-24.69		35257	-24.31		30436	-7.31	30042	-5.92

5. むすび

以上、送電鉄塔の立体骨組解析における不安定回避方法と解析精度について、”TOWER”コードの推奨手法と変断面要素による手法を比較し考察した。安定化を施すにあたり、極端な条件設定を避ければ、主要部材において精度的に問題を生じるようなことはなく、使い勝手の良さの意味で、提案法の実用性は高いと言える。

参考文献 1)土田陽一,山崎智之,本郷榮次郎:送電用鉄塔設計における立体応力解析の適用に関する検討, 鉄塔, No.126, 2017. 2)電気学会:送電用鉄塔設計標準, JEC-TR-00007-2015. 3) Tower manual ver. 10.4, Power Line Systems, Inc.2010