九州大学学術情報リポジトリ Kyushu University Institutional Repository

鉄塔-電線連成系の応答性状に及ぼす吹上風の影響

劉, 暢達 九州大学大学院人間環境学府都市共生デザイン専攻博士課程

|首藤, 康之 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

竹内, 真弓 九州大学大学院人間環境学研究院都市·建築学部門

前田, 潤滋 九州大学大学院人間環境学研究院都市·建築学部門

https://doi.org/10.15017/26742

出版情報:都市・建築学研究. 20, pp.27-32, 2011-07-15. Faculty of Human-Environment Studies, Kyushu University バージョン: 権利関係:

鉄塔-電線連成系の応答性状に及ぼす吹上風の影響

Effects of Uplift Wind on Response Behavior of Tower-and-cable Coupled Systems

劉 暢達*, 首藤康之**, 竹内真弓**, 前田潤滋**

Changda LIU, Yasuyuki SYUTO, Mayumi TAKEUCHI and Junji MAEDA

Earlier reports and design guidelines of power transmission facilities are based on the assumption that a wind load acts in a horizontal direction. In case a transmission line is constructed on a slope in mountainous areas, its wind forces have an upward component which acts to a transmission line as an uplift wind load. This paper studied the effects of the uplift wind on the response behaviors of a transmission tower which composes a tower and cables with equal spans. As a result, we could confirm quantitatively that the uplift wind decreased the tension of cable and increased the incline of a suspension insulator connecting with the cables.

Keywords: Tower-and-cable coupled system, Uplift wind, Tension of conductor, Incline of insulator 送電線連成系, 吹上風, 電線張力, 碍子傾斜角度

1. はじめに

送電用鉄塔は、電線、碍子および鉄塔を主要な構成要 素とする連成構造物である.この鉄塔が負担する風荷重 は、鉄塔自身への風圧荷重と送電線に作用する風圧荷重 に分けられ、懸垂型と耐張型の二つのタイプの支持碍子 によってその特性は異なるが、送電線は風荷重の変動に 対する影響を強く受け、容易に大変形する.送電線連成 系に風圧荷重が作用すると、風速分布や鉄塔両側の径間 長差などによって、耐張鉄塔には両径間の送電線張力の 差、すなわち不平均張力荷重が発生する.一方、懸垂鉄 塔には両側径間の張力差はほとんど発生しないが、懸垂 碍子と電力線の接合部は風速増加とともに大きく変位し、 鉄塔腕金部材に接近して短絡事故を誘発する場合がある ¹⁾.

強風時における送電鉄塔と送電線及び送電線連成系 の風応答及び空力減衰等について検証したこれまでの報 告²⁻¹⁰⁾や設計指針¹¹⁾の多くは,風は水平面に平行に吹く, すなわち吹き上げ角ゼロの仮定に基づいている.送電線 が傾斜地や尾根などの地形上に建設される場合,風は水

- * 都市共生デザイン専攻 博士課程
- ** 都市·建築学部門

平面に対して吹き上げ角を持つため、吹上風は送電線に 対し上向きにも作用する風荷重を形成し、送電線の変形 に伴う碍子との接合部の変位性状や鉄塔と電線の連成系 そのものの動特性に影響を及ぼすと考えられる.

本論では,懸垂鉄塔および耐張鉄塔で支持された送電 線連成系の吹上風に対する動的応答に着目して,0°~30° までの吹上角を持つ吹上風が碍子と電線との接合部変位 や鉄塔-電線連成系の動特性に与える影響を検討する.

2. 鉄塔-電線連成系モデルの概要

検討する鉄塔-電線連成系モデルを図1に示すように, 1 基 2 径間の鉄塔-電線連成系モデルとし,鉄塔部を懸垂 型鉄塔(電圧 500kV,塔高 80.6m)または耐張型鉄塔(電 圧 500kV,塔高 80m)とした 2 つの連成系モデルを用意 した.ただし,本稿では,特に吹き上げ角の影響に着目 するものとして,両径間のスパンをともに 400m とし, 両側の送電線の水平角度と高低差はないものとした.電 線部モデルの両端部はピン支持とした.鉄塔部を梁要素 フレームで,また電力線と地線および碍子をリンク要素 でモデル化した.また,固有振動数の収束状況を確認し て,地線を40分割,懸垂碍子と耐張碍子を4分割,懸垂 鉄塔モデルの電力線を34分割,耐張鉄塔モデルの電力線 を30分割している.送電線の各諸元を表1に示す.

表1送電線の諸元

	ヤング係数	断面積	質量密度	風力	外径	長さ	弛度	張力
	[N/m ²]	$[m^2]$	[kg/m ³]	係数	[m]	[m]	[m]	[N]
地線	1.09×10 ¹¹	2.48×10 ⁻⁴	5004	1.05	0.021		14.6	1.7×10^{4}
電力線(4導体)	0.71×10 ¹¹	3.48×10 ⁻³	3101	0.95	0.153		18.2	1.1×10^{4}
懸垂碍子	2.1×10 ¹¹	0.01	15094	1.4	0.54	6.625		
耐張碍子	2.1×10 ¹¹	0.01	34283	1.4	0.92	9.13		



図2鉄塔頂部水平方向風速の時刻歴波形例(懸垂型)



図3水平風向角と吹上角の定義

表2鉄塔卓越曲げ1次モードの固有周波数(Hz)

振動方向		懸垂型鉄塔	耐張型鉄塔	
線路直角方向	連成系モデル	0.96	1.08	
	鉄塔単独モデル	0.95	1.02	
線路方向	連成系モデル	1.14	1.60	
	鉄塔単独モデル	0.96	1.03	

3. 風荷重の概要

3.1 変動風速場の生成方法

本論では、自己回帰法によって変動風速を生成し¹²、 それに平均風速を加算して、連成系に作用する風速場の 時刻歴波形を作成した.高度10mにおける水平方向の平 均風速を40m/sとし、平均風速の鉛直分布べき指数と風 速変動の乱れの強さおよび乱れのスケールを建築物荷重 指針・同解説(2004)¹³に基づいて地表面粗度区分IIに準 じた.また、変動風速の自己相関と相互相関関数をカル マン型とした.図2に、懸垂型鉄塔のモデルに使用した 鉄塔頂部の水平方向風速の時刻歴波形例を示す.



図4線路直角方向鉄塔卓越1次モード (連成系モデルー懸垂型鉄塔)



図5線路方向鉄塔卓越1次モード (連成系モデルー懸垂型鉄塔)



図6線路直角方向鉄塔卓越1次モード (連成系モデルー耐張型鉄塔)



図7線路方向鉄塔卓越1次モード (連成系モデルー耐張型鉄塔)

3.2 吹上風の設定

水平方向の風速 U_xを各吹上角に対して一定とし,水平 風向角は線路直角方向に一致させた(図3). 吹上角 θ のときの吹き上げ風の鉛直成分 U₂を式(1)で定義し,水 平風 U_xと鉛直方向の風速 U_z で風荷重を算定した(図3).

$$U_z = U_x \cdot \tan\theta \tag{1}$$

3.3 風荷重の作用点と作用方向

鉄塔部では、各パネルの主柱材の隅点と腹材の交点お よび腕金先端部に水平方向の風荷重のみを作用させた. また、送電線部では、電線の各分割点に水平成分と鉛直 方向成分より成る吹上風荷重を作用させた.

4. 連成系の固有振動特性

図1の連成系モデルと鉄塔単独モデルの鉄塔部曲げ1 次モードの固有周波数を表2に示す.ただし、連成系の 場合は平均風力を考慮せず送電線自重に対する静的釣り 合い位置での値を示している.表2の固有周波数に対応 する連成系の振動モードを図4~図7に示す.

鉄塔部が曲げ1次モードを示す連成系振動モードは複 数個存在するが,表2ではそれらの振動モードのうち, 以下の基準で選定した振動モードの固有周波数を示して いる.まず,固有周波数が鉄塔単独モデルの曲げ1次モ ードの固有周波数に近い複数の振動モードに着目し,選 定した振動モードの固有周波数と同じ周波数の調和外力 を同じ外力振幅で鉄塔頂部の線路方向または線路直角方 向に作用させて時刻歴応答解析を行い,定常状態におけ る鉄塔頂部の変位振幅が最も大きいモードを鉄塔卓越曲 げ1次モードとした.表2より,連成系モデルの線路直 角方向の固有周波数は鉄塔単独モデルとほぼ同じである が,線路方向は連成系モデルの方が固有周波数が大きく なることが分かる.

5. 時刻歴応答解析

5.1 計算手順

時刻歴強風応答計算は Newmarkβ法(β=1/4)により行い, 時間刻み 0.01 秒とした.構造減衰は剛性比例型として, 鉄塔部の減衰は,鉄塔単独モデルの線路直角方向曲げ 1 次モード(懸垂型では0.95Hz,耐張型では1.02Hz)に対 して 1%を,また送電線部の減衰は,電力線と碍子で構 成されるモデルの面外方向1次モード(懸垂型は0.18Hz, 耐張型は 0.19Hz)に対して 0.4%とし,さらに作用風速 に対応する空力減衰を付加して,4節で生成した風速場 から算定される風荷重を作用させた.なお,以下の検討 では応答値の評価時間を 600 秒とした.

5.2 鉄塔頂部の応答変位

各吹上角に対する鉄塔頂部の線路直角方向および線路方向変位の最大値と標準偏差を図 8~図 11 に示す.ただし,懸垂型鉄塔の線路方向変位の平均値はほぼ0であ

ったため、図10には平均値を載せていない.図8と図9 の吹上角0°の場合に着目すると、線路直角方向では懸 垂型鉄塔の方が耐張型鉄塔に比べて平均変位がわずかに 大きく、逆に標準偏差では耐張型の方がわずかに大きい. 耐張型鉄塔の平均変位がわずかに小さいのは、設計上の 静的強度を上げて連鎖倒壊時の引き留めの役割を持たせ ているためであるが、一方で電線振動が伝わりやすい耐 張碍子の影響で標準偏差が大きくなると考えられる.

線路方向で,懸垂型鉄塔の平均変位はほぼ0で変動も 小さいが(図10),耐張型鉄塔では平均変位は0ではなく, 最大値が0.82m(図11)と大きいのは,送電線張力が直接 鉄塔部に伝わる耐張型鉄塔では,送電線部の軸力変動に よって鉄塔部が線路方向の付加荷重を受けるためである.



吹上角の増加に対する変位挙動に着目すると, 懸垂型 および耐張型どちらにおいても, 鉄塔頂部線路直角方向 変位の平均値, 最大値及び標準偏差は, 吹上角の増加に 対してほとんど変化しないことが分かる.これは, 今回 の検討ではすべての吹上角において水平方向の風速を一 定(高度10mで平均風速40m/s)に設定しているため, 鉄塔部に作用する水平方向の風力が吹上角によって変化 しないためである.また,鉄塔頂部線路方向でも同様に 吹上角の増加に対して変位の最大値および標準偏差はほ とんど変化しない.

5.3 鉄塔頂部の応答加速度

各吹上角に対する鉄塔頂部の線路直角方向および線 路方向加速度の最大値と標準偏差を図 12~図 15 に示す. 線路直角方向の加速度は線路方向に比べて大きい.線路 直角方向の標準偏差では,送電線支持方式による差はほ とんど見られないが,線路方向では,耐張型鉄塔の方が 最大値と標準偏差ともに懸垂型鉄塔より大きい.これは, 懸垂型鉄塔より耐張型鉄塔の方が送電線振動が鉄塔に伝 わりやすいことに起因する.

また,線路直角方向の加速度の最大値と標準偏差(図 11~12)は吹上角の増加に伴い減少し,特に懸垂型鉄塔の 線路直角方向加速度の減少が極めて大きいことが分かる (図 12).一方,線路方向では,吹上角が大きい場合,加 速度の最大値と標準偏差が吹上角の増大に対してほとん ど変化しないことが分かる.





各吹上角に対する鉄塔頂部の線路直角方向および線路方向加速度のパワースペクトルを図 16~図 19 に示す. いずれのパワースペクトルにおいても、送電線部の振動に起因する 0.4~0.6Hz の周波数成分と鉄塔部の曲げ 1 次 モードに対応する 1~2Hzの周波数成分が卓越していることがわかる.特に、耐張型鉄塔の線路直角方向における 送電線部の周波数成分のパワーが極めて大きい.

表3 吹上角0°の接合部の変位(m) (懸垂型鉄塔)

	風下側	接合部	風上側接合部		
	線路直角方向	鉛直方向	線路直角方向	鉛直方向	
平均値	5.67	3.24	5.66	3.22	
最大値	5.82	3.48	5.81	3.45	
標準偏差	0.18	0.28	0.18	0.27	



5.4 懸垂碍子と腕金部の接合部に対する電線接合部の相 対変位の特徴

懸垂型鉄塔モデルでの, 吹上角 0°の場合の C1 腕金 (図 1(a)) と懸垂碍子の接続部に対する電線の接合部の 相対変位の平均値,最大値および標準偏差を表3に示す. 風上側と風下側の接合部変位の差はほとんど見られない. 平均値と最大値ともに線路直角方向の変位が大きいが, 振動振幅に対応する標準偏差は鉛直方向成分が大きい. 鉛直方向変位成分の大きさは,電線の腕金部への接近状 態を直接示すものである.

このような電線接合部の相対変位に及ぼす吹き上げ 角の影響を以下のように整理した.ただし吹上角 0°の 時の電線接合部の相対変位を基準にして,各吹上角での 相対変位の比で検討した.



相対変位の平均値,最大値および標準偏差の比を図 20~図23に示す.いずれの方向の変位においても,吹上 角の増加に伴い,平均値と最大値および標準偏差が増大 し,特に鉛直方向変位の変化が顕著であることが分かる. これは,吹上角の増加に伴う鉛直方向の風力の増大が, 図24に示すように電力線の平均張力の減少による電力 線の剛性低下をもたらすからである.このことは図25 に示す電力線端部の張力のパワースペクトルにおいて, 吹上角の増大がピーク周波数の低下,すなわち電力線の 剛性の低下(周波数と剛性は比例関係にあるため)を起こ していることからも確認できる.

吹上角の増加に伴う, 腕金主材と懸垂碍子連との「挟角」(図 1a)の平均値と最小値に着目したのが図 26 と図 27 である. 挟角の平均値と最小値が減少, すなわち腕 金底部水平材により近づいていることが分かる.

6. まとめ

懸垂鉄塔および耐張鉄塔で支持された送電線連成系 の吹上風に対する変形挙動に着目して、0°~30。までの 吹上角を持つ吹上風が電線張力と碍子の接合部変位に与 える影響を検討した結果、以下の所見が得られた.

- (1) 懸垂型および耐張型どちらにおいても,鉄塔頂部線 路直角方向変位の平均値,最大値及び標準偏差は, 吹上角の増加に対してほとんど変化しない.また, 鉄塔頂部線路方向でも同様に吹上角の増加に対し て変位の最大値および標準偏差はほとんど変化し ない.
- (2) 鉄塔頂部の線路直角方向の加速度の最大値と標準 偏差は吹上角の増加に伴い減少し、特に耐張型鉄塔 の線路直角方向加速度の減少が顕著である.一方、 線路方向では、吹上角が大きい場合、加速度の最大 値と標準偏差が吹上角の増大に対してほとんど変 化しない.
- (3) 吹上角の増大に伴い, 懸垂型および耐張型の電力線 端部の張力が減少し, 電線部の剛性が低下する.
- (4) 線路方向と線路直角方向のどちらの方向において も、吹上角の増加に伴い、懸垂碍子と電力線の接合 部変位の平均値と最大値および標準偏差は増大し、 特に鉛直方向変位の変化が顕著である. また、 吹 上角の増加に対して腕金主材と懸垂碍子連との「挟 角」が減少し、碍子が腕金底部部材により接近する.

参考文献

- Zhang Yufang: The wind yaw flashover analysis of Chinese 500kV transmission line, power system technology, 29, pp. 65-67, 2005.
- 小園茂平,前田潤滋,牧野稔:多スパン鉄塔-送電線 連成系の動的応答特性に関する研究,日本建築学会

構造系論文集, 第 353 号, pp. 48-61. 1985.7.

- 小園茂平,前田潤滋,牧野稔:多スパン鉄塔-送電線 連成系の動的応答特性に関する検討-特に低周波数 域における面内挙動,日本建築学会構造系論文集, 第 386 号, pp. 78-85. 1988.4.
- 4) Momomura, Y., Marukawa, H., Okamura, T., Hongo E. and Ohkuma T.: Full-scale measurements of wind-induced vibration of a transmission line system in a mountainous area. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 72, pp. 241-252, 1997.11.
- 5) 石田伸幸,森本康幸,鶴則生,本田誠,岡延夫,前 田潤滋:静的風荷重における送電線不平均張力の基 本特性に関する研究(その2)-混合法による不平均 張力解析,日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp. 223-224, 2001.7.
- 6) 本村禎浩, 鶴則生, 石田伸幸, 森本康幸, 前田潤滋:
 送電線不平均張力の変動特性に関する研究, 都市・ 建築学研究 九州大学大学院人間環境学研究院紀 要 第7号, pp. 55-62, 2005.1.
- 本村禎浩,石田伸幸,海老原修二,荊尾治邦,鶴則
 生,前田潤滋:強風時における送電線・鉄塔連成系の振動特性について その(2),2005 年度大会(近 畿)学術講演梗概集,pp.237-238,2005.9.
- 石田伸幸,森智治,藤村真弓,本村禎浩,森本康幸, 前田潤滋:強風時における送電線・鉄塔連成系の振 動特性について-その(4),2005 年度大会(近畿)学 術講演梗概集,pp.241-242,2005.9.
- 9) Maeda, H., Ebihara, S., Fujimura, M., Maeda, J., Imamura, Y. and Honda, M.: Vibration Tests of a Transmission Tower Focusing on the Tensile Forces of its Transmission Line Cables, Proceedings of 16th Conference on Electric Power Supply Industry, pp. 1579-1588, 2006. 11.
- 10) Takeuchi, M., Maeda, J., Ishida, N.: Aerodynamic Damping Properties of Two Transmission Towers Estimated by Combining Several Identification Methods, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 98, 12, pp. 872-880, 2007. 7.
- 11) 電気学会:送電用支持物設計標準 JEC-127-1979, 1979.
- 12) 竹内真弓,前田潤滋,近藤潤一:変動風速の縦方向 成分と鉛直方向成分の相互相関を考慮した多次元 変動風速場シミュレーション,第 21 回風工学シン ポジウム論文集,pp. 25-30, 2010. 12.
- 13) 日本建築学会:建築物荷重指針·同解説(2004), 2004.

(受理:平成23年6月2日)