

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

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、 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 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。

* 都市共生デザイン専攻 博士課程

** 都市・建築学部門

表 1 送電線の諸元

	ヤング係数 [N/m ²]	断面積 [m ²]	質量密度 [kg/m ³]	風力 係数	外径 [m]	長さ [m]	弛度 [m]	張力 [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
懸垂罫子	2.1×10^{11}	0.01	15094	1.4	0.54	6.625		
耐張罫子	2.1×10^{11}	0.01	34283	1.4	0.92	9.13		

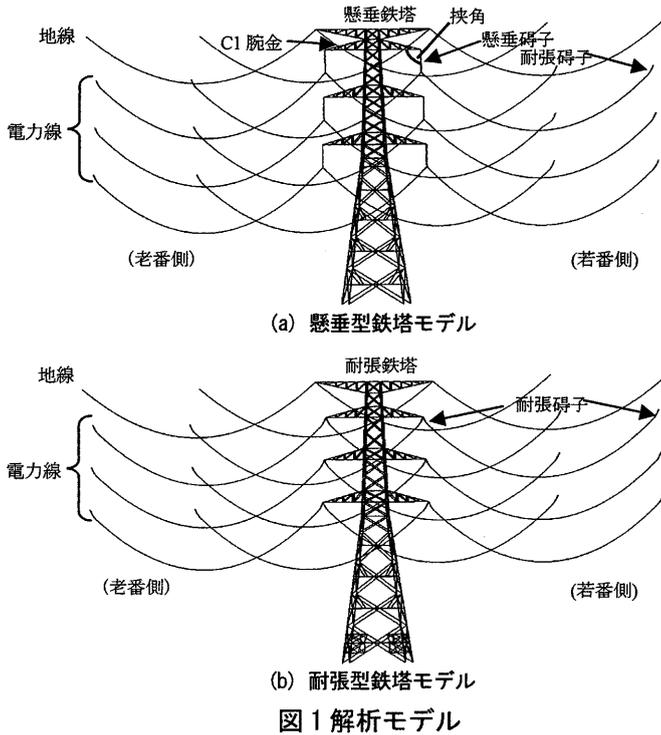


図 1 解析モデル

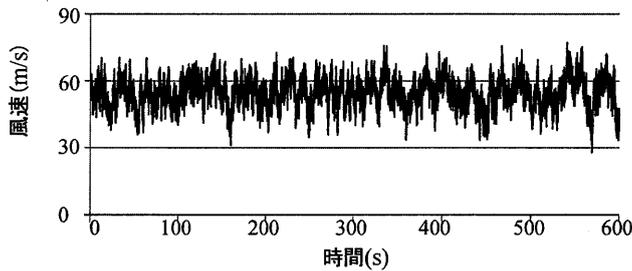


図 2 鉄塔頂部水平方向風速の時刻歴波形例(懸垂型)

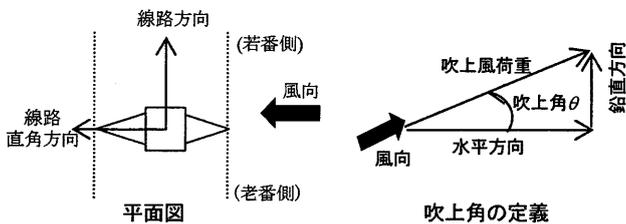


図 3 水平風向角と吹上角の定義

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。

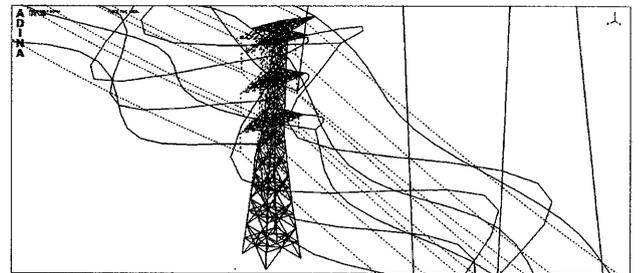


図 4 線路直角方向鉄塔卓越 1 次モード (連成系モデル-懸垂型鉄塔)

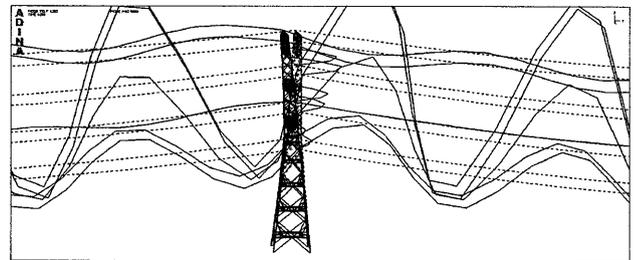


図 5 線路方向鉄塔卓越 1 次モード (連成系モデル-懸垂型鉄塔)

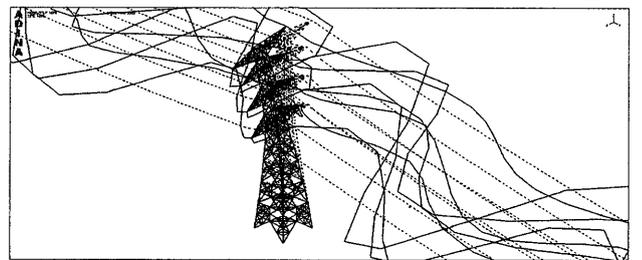


図 6 線路直角方向鉄塔卓越 1 次モード (連成系モデル-耐張型鉄塔)

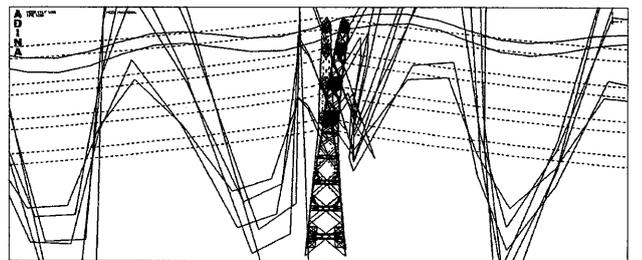


図 7 線路方向鉄塔卓越 1 次モード (連成系モデル-耐張型鉄塔)

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 U_z 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)。

$$U_z = U_x \cdot \tan \theta \quad (1)$$

3.3 風荷重の作用点と作用方向

鉄塔部では、各パネルの支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 Newmark β 法 ($\beta=1/4$) 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° の場合に注目すると、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。

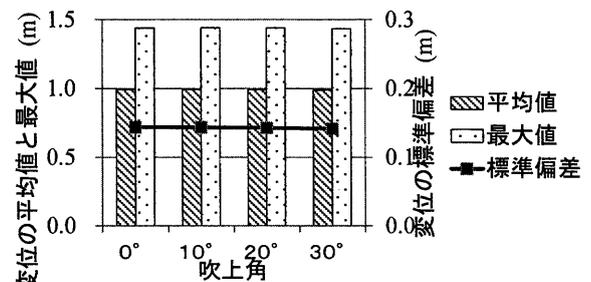


図8 鉄塔頂部線路直角方向変位 (懸垂型)

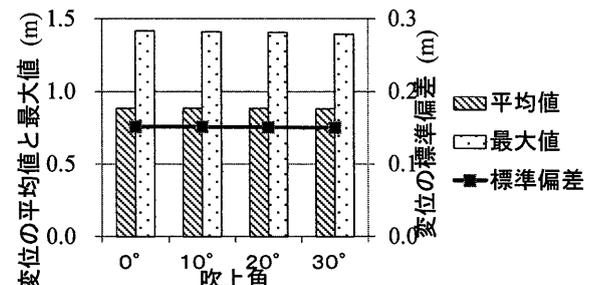


図9 鉄塔頂部線路直角方向変位 (耐張型)

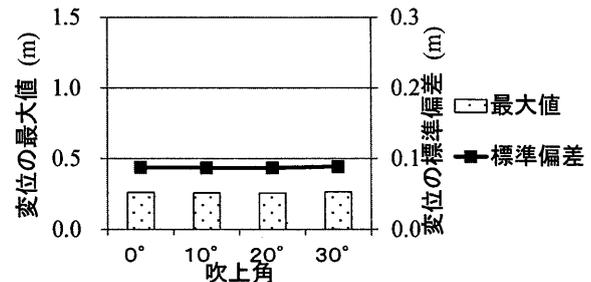


図10 鉄塔頂部線路方向変位 (懸垂型)

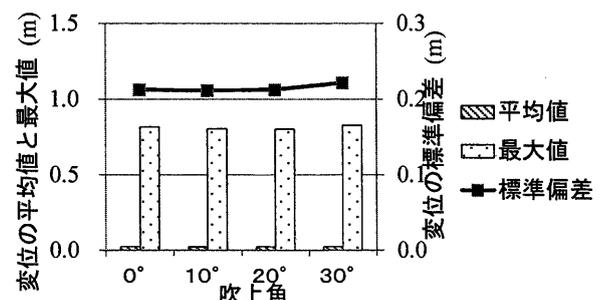


図11 鉄塔頂部線路方向変位 (耐張型)

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。

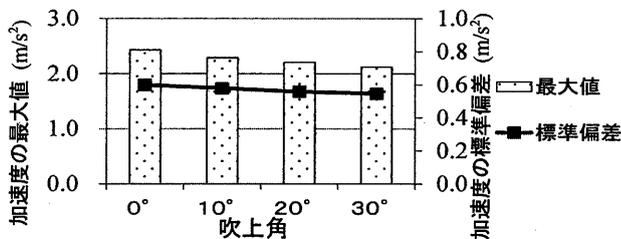


図12 鉄塔頂部線路直角方向加速度（懸垂型）

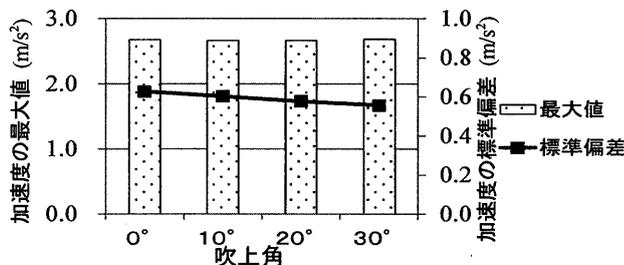


図13 鉄塔頂部線路直角方向加速度（耐張型）

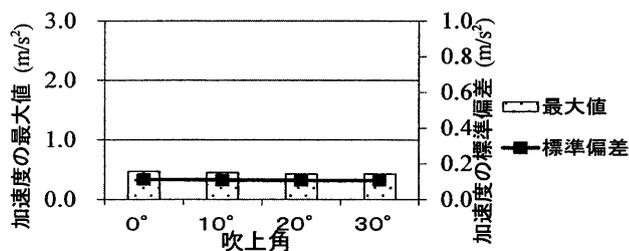


図14 鉄塔頂部線路方向加速度（懸垂型）

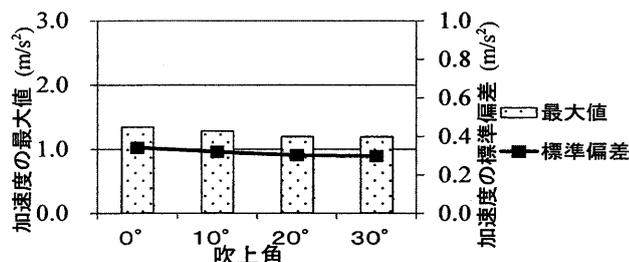


図15 鉄塔頂部線路方向加速度（耐張型）

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。

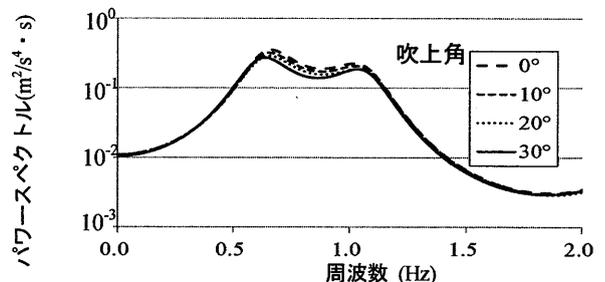


図16 鉄塔頂部線路直角方向加速度の
パワースペクトル（懸垂型）

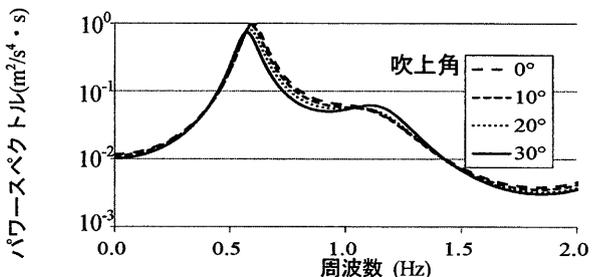


図17 鉄塔頂部線路直角方向加速度の
パワースペクトル（耐張型）

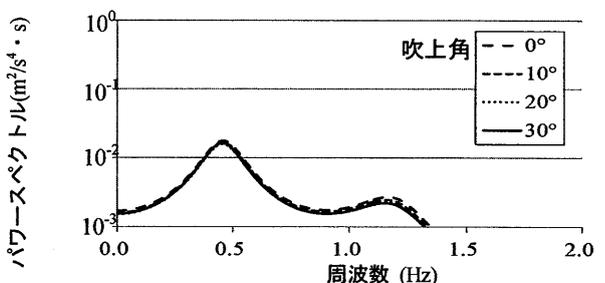


図18 鉄塔頂部線路方向加速度の
パワースペクトル（懸垂型）

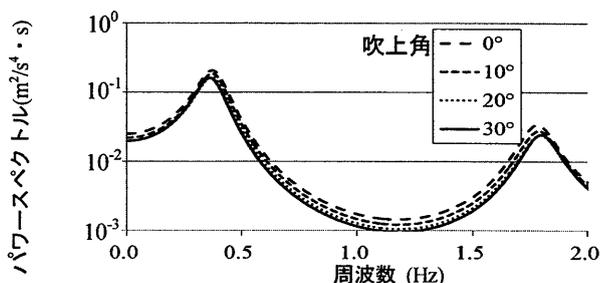


図19 鉄塔頂部線路方向加速度の
パワースペクトル（耐張型）

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

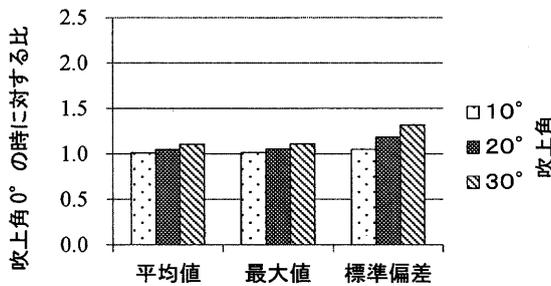


図 20 風下側の接合部の線路直角方向変位

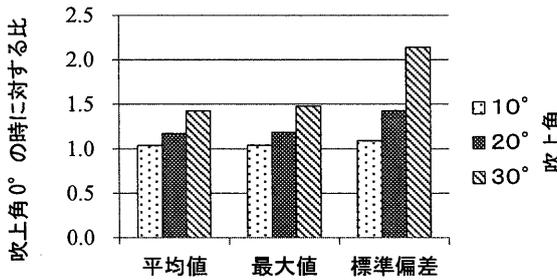


図 21 風下側の接合部の鉛直方向変位

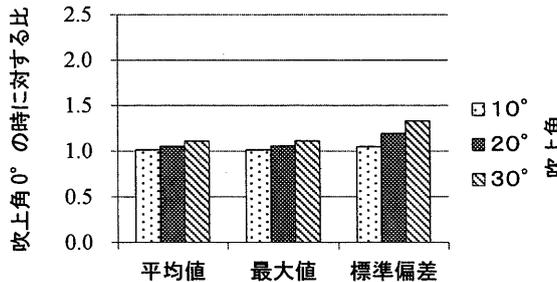


図 22 風上側の接合部の線路直角方向変位

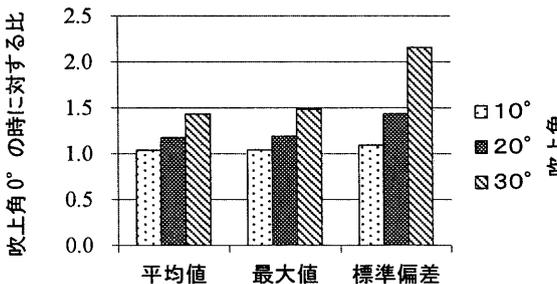


図 23 風上側の接合部の鉛直方向変位

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。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。

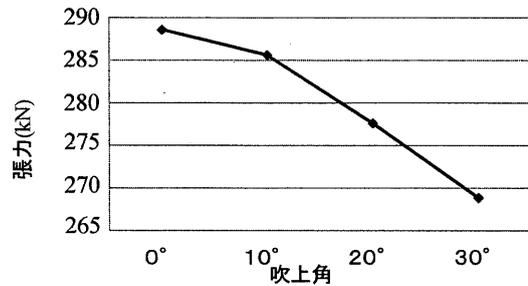


図 24 電力線端部の平均張力

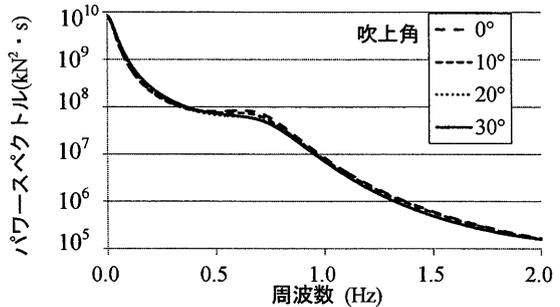


図 25 電力線端部の張力パワースペクトル

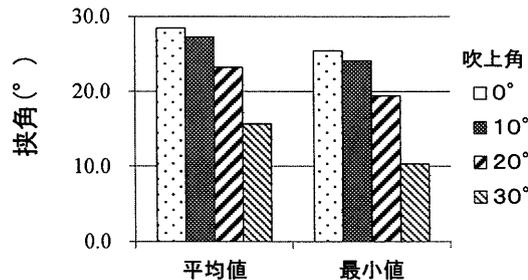


図 26 風下側の懸垂碍子連の挟角

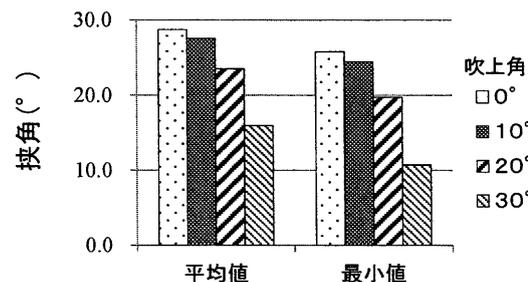


図 27 風上側の懸垂碍子連の挟角

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， $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 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

- 1) Zhang Yufang: The wind yaw flashover analysis of Chinese 500kV transmission line, power system technology, 29, pp. 65-67, 2005.
- 2) 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.

- 3) 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.
- 7) 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.
- 8) 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)