

I-713

風観測結果に基づく鉄塔のガスト応答シミュレーション

(財)電力中央研究所 ○正員 石川智巳、 前野陽治
同上 正員 大友敬三、正員 赤木康之
同上 正員 清水幹夫

1. はじめに

送電容量の増大による送電鉄塔の高層化や、近年の台風により損壊例が生じたことが、送電鉄塔の動的な影響を考慮した耐風設計の必要性を高めている。本論では、動的効果を考慮した静的置換風荷重算定のためのパラメータの検討の第一段階として、実観測記録に基づいた鉄塔単体のガスト応答シミュレーションを実施した。観測された応答加速度のパワースペクトルとの比較および解析により得られた変位のパワースペクトルおよび統計値の検討により、解析手法の妥当性及び送電鉄塔単体の応答特性を確認した。

2. ガスト応答理論¹⁾

変動風荷重による応答変位 $\mathbf{x}(t)$ のクロススペクトルマトリックス $\mathbf{S}_x(n)$ は、変動風速のクロススペクトルマトリックス $\mathbf{S}_u(n)$ を用いて次式で与えられる。

$$\mathbf{S}_x(n) = \mathbf{H}^*(n) \alpha \mathbf{S}_u(n) \alpha \mathbf{H}(n) \quad (1)$$

ここに $\mathbf{H}(n)$ は周波数応答関数マトリックスで、* は複素共役を表す。周波数応答マトリックスは、剛性マトリックス $\mathbf{K}$ 、減衰係数マトリックス $\mathbf{C}$ 、質量マトリックス $\mathbf{M}$ を用いて次式で表される。

$$\mathbf{H}(n) = [\mathbf{K} + i2\pi n \mathbf{C} - (2\pi n)^2 \mathbf{M}]^{-1} \quad (2)$$

また、 α は風圧力係数マトリックスであり、 j 自由度に対して

$$\alpha_j = \rho D_j A_j \bar{U}_j \quad (3)$$

で表される対角マトリックスである。ここに ρ : 空気密度、 D_j : 風力係数、 $\bar{U}_j$: 平均風速である。また設計上重要となる最大値の期待値は、平均風速による平均値 $\bar{x}$ と標準偏差 σ_x により、

$$x_{\max} = \bar{x} + g_f \sigma_x \quad (4)$$

で表される。 g_f はピークファクターで、定常確率過程に関する理論に基づき次式で算出することができる。

$$g_f = \sqrt{2 \ln v T} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \ln v T}} \quad (5)$$

ここに、 T は評価時間、 v は期待振動数で、パワースペクトル $\mathbf{S}_x(n)$ から次式によって求められる。

$$v = \left(\int_0^\infty n^2 \mathbf{S}_x(n) dn / \int_0^\infty \mathbf{S}_x(n) dn \right)^{1/2} \quad (6)$$

従って、ガスト応答ファクターは、次式で与えられる。

$$G_f = \frac{x_{\max}}{\bar{x}} = 1 + g_f \frac{\sigma_x}{\bar{x}} \quad (7)$$

式(7)で表されるガスト応答ファクターは統計的な風荷重が構造物に及ぼす動的影響を表す1つの尺度であり、静的な置換風荷重の計算に用いることができる。

3. ガスト応答シミュレーション

3. 1 入力および解析条件

ガスト応答シミュレーションに用いた風観測データは、徳島県川成峠に建設された四国試験線の架線前の2号鉄塔単体（図1参照）において、平成6年5月6日13時19分より10分間計測されたもの（サンプリング間隔0.04秒）を採用した。各箇所の観測結果に基づき、入

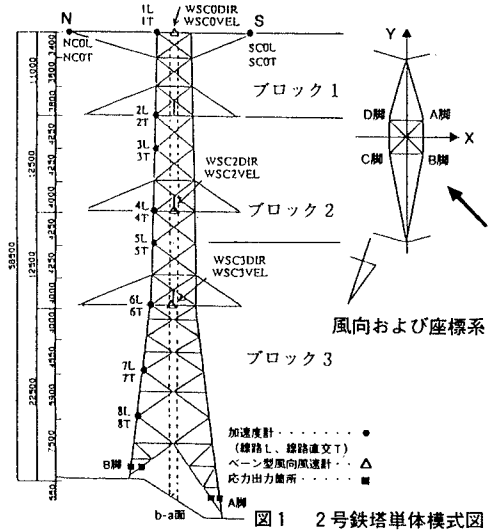


表1 微風観測結果

高さ (m)	平均風速 (m/s)	平均風向 (deg)	標準偏差 (m/s)	乱れのスケール (m)	乱れの強さ (%)	ガストファクター (1sec)
58.5	5.46	286.0	2.97	61.64	0.64	2.30
35.0	5.05	293.6	3.18	63.63	0.63	2.42
22.5	3.61	283.3	3.33	61.45	0.93	3.92

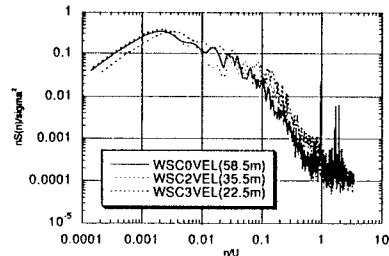


図2 変動風速のパワースペクトル

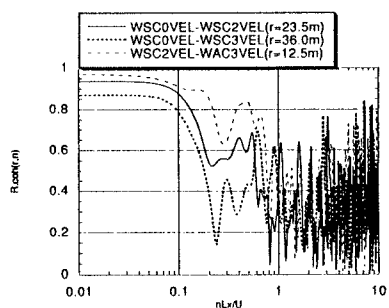


図3 ルートコヒーレンス

力に必要な風の諸統計値、変動風速のパワースペクトルおよびルートコヒーレンスを表1および図2、3に示す。シミュレーションに際し、風観測点を考慮して

図1に示す各ブロックを規定し、ブロック内同一の風を入力するものとした。また風力係数は各パネルごとに決定し、風力係数の算定には送電用支持物設計標準JEC-127²⁾に従い、充実率の関数として求めた。それより得られる風力は、対象とする部材要素の両端の節点に等分した。さらに変動風荷重のパワースペクトルの入力においては、風速のクロススペクトルの非対角項は、各ブロック間の観測値によるルートコヒーレンスを用いて高さ方向の相関のみ考慮し、横方向の相関は無視した。減衰マトリックスについては、レーリー減衰を仮定し、常時微動試験データにより得られた線路直交方向の減衰定数（1次；0.53%、2次；0.41%）を用いた。また応答解析は、6Hzまで計算するものとし、その際、周波数刻みは期待周波数が低周波数域の奇与が大きいことを考慮して、0.05Hzまでは0.001Hz刻みで、0.05Hz以降は0.05Hz刻みとした。

3. 2 応答解析結果

No.2鉄塔B脚の代表的な加速度計測点における変位のパワースペクトルを図4、図5に示す。同図における観測値の変動変位のパワースペクトル（実線）は、観測により得られた加速度波形（サンプリング間隔0.04秒）を元に、FFTを用いて計算された加速度のパワースペクトルより理論的に求めたものであり、特に低周波のトレンドの除去は行っていない。これらの図より固有振動数や固有周波数におけるスペクトルピークは、観測値とある程度対応していることがわかる。また観測値は、ノイズによる影響が大きいので、非共振周波数帯の比較には意味を持たないと思われる。表2に観測値より得られる固有振動数、ABAQUSによる固有値解析結果、ガスト応答解析結果を示す。対応する振動モードは固有値解析により得られたものである。線路2次の固有振動数に若干の差が認められるが、概ね妥当な結果となっている。

シミュレーションより得られるパワースペクトルの特性は以下のようにまとめられる。

- 1) それぞれ対応する方向のスペクトルピークが卓越している。
- 2) 高さが低くなるほど、2次のスペクトル振幅が1次のそれに比べて相対的に大きくなる。
- 3) 高さが低くなるほど、ねじれ1次のピークが顕著になる。
- 4) C0腕金の線路方向成分には、ねじれ1次のスペクトルピークが明確に表れているが、線路直交方向成分には全くみられない。

さらに表3にB脚の線路方向、線路直交方向の変位の諸統計値（平均変位、標準偏差、期待振動数、ピークファクター、最大値、ガスト応答ファクター）を示す。ここに期待振動数の計算に用いた評価時間は10分である。風のガストファクターとガスト応答ファクターより、この風速レベルでは、共振効果は小さいといえる。またガスト応答ファクターは高さが低くなるにしたがって大きくなる傾向がある。表4は、鉄塔底部（13パネルb-a面）の主柱材および腹材における軸方向応力の諸統計値である。この表より、主柱材のガスト応答ファクターに比べ、腹材のガスト応答ファクターが大きくなっていることが特徴的であり、また、主柱材についてみると、主流方向のならびにあるB、D脚に比べ主流方向と直交方向に並んでいるA、C脚の方がピークファクター、ガスト応答ファクターともに大きくなっている。今回特に示していないが、以上のことは上部のパネルについてもみられる。

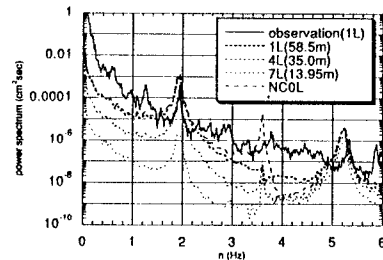


図4 線路方向の変位のパワースペクトル

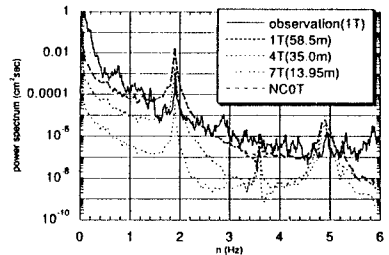


図5 線路直交方向の変位のパワースペクトル

表2 固有振動数の比較

	観測値(Hz)	計算値(Hz) (ABAQUS)	計算値(Hz) (本解析手法)
線路直交1次	1.914	1.905	1.900
線路1次	1.944	1.954	1.950
ねじれ1次	3.614	3.566	3.600
線路直交2次	4.954	4.934	4.900
線路2次	5.320	5.349	5.200

表3 変位応答の統計値

	高さ (m)	平均変位 (mm)	標準偏差 (mm)	期待振動数 (Hz)	ピーク ファクター	最大変位 (mm)	ガスト応答 ファクター
線路	58.50	-0.587	0.434	0.482	3.538	2.122	3.513
	47.50	-0.400	0.297	0.460	3.525	-1.447	3.616
	35.00	-0.216	0.164	0.462	3.526	-0.793	3.570
	30.75	-0.171	0.131	0.472	3.532	-0.635	3.709
	22.50	-0.087	0.071	0.533	3.566	-0.340	3.900
	13.95	-0.043	0.038	0.581	3.590	-0.179	4.160
線路 直交	58.50	1.188	0.916	0.682	3.635	4.519	3.801
	47.50	0.821	0.635	0.636	3.616	3.117	3.796
	35.00	0.448	0.351	0.598	3.593	1.710	3.820
	30.75	0.346	0.274	0.571	3.585	1.329	3.840
	22.50	0.176	0.145	0.537	3.568	0.693	3.941
	13.95	0.808	0.071	0.489	3.542	0.334	4.129

表4 応力の統計値

位置	平均応力 (Kg/cm²)	標準偏差 (Kg/cm²)	期待振動数 (Hz)	ピーク ファクター	最大応力 (Kg/cm²)	ガスト応答 ファクター
A	-2.798	2.348	0.794	3.676	-11.43	4.085
B	7.536	5.895	0.493	3.544	26.43	3.773
C	2.386	2.060	0.907	3.712	10.03	4.204
D	-6.931	5.423	0.501	3.549	-26.18	3.777
AB A	-1.752	2.120	0.437	3.511	-9.195	5.248
AB B	2.744	3.140	0.412	3.493	13.71	4.997
BC-B	2.023	2.048	0.535	3.587	9.332	4.804
BC C	-0.975	1.371	0.749	3.660	-9.992	6.143
CD C	2.044	2.461	0.508	3.553	10.86	5.312
CD D	-2.182	0.052	0.215	3.303	-0.216	5.064
DA D	-1.805	1.934	0.498	3.547	-8.665	4.801
DA A	0.402	1.173	0.823	3.666	4.727	11.75

5. まとめ

本報告では、風観測結果に基づくガスト応答シミュレーションを実施し、観測値との比較および鉄塔の応答特性を示した。今後は、連成系モデルによる台風時の風応答シミュレーションを実施し、手法の妥当性および鉄塔の応答特性を、解析と観測値の両面から詳細に検討していく予定である。

6. 謝辞

本報告をまとめるにあたり、ご指導、ご助言を賜りました局地風対策推進委員会（大熊武司委員長）の特別委員の方をはじめ、ご協力いただきました電力会社の委員の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会:建築物荷重指針・同解説
- 2) 電気学会:送電用支持物設計標準JEC-127, 1979、電気書院