

台風時の強風域内で発生する竜巻に対する送電鉄塔の応答に及ぼす架渉線の影響

石崎, 翔

九州大学大学院人間環境学府都市共生デザイン専攻 : 修士課程

田村, 直哉

大鉄工業株式会社

竹村, 明人

九州電力株式会社

石田, 伸幸

日本鉄塔工業株式会社

他

<https://doi.org/10.15017/1785463>

出版情報 : 都市・建築学研究. 28, pp.35-40, 2015-07-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

バージョン :

権利関係 :

台風時の強風域内で発生する竜巻に対する 送電鉄塔の応答に及ぼす架渉線の影響

Effects of Conductors on the Response Behaviors of a Transmission Tower Against Tornadic Gusts in a Wind Field due to Typhoon

石崎 翔*, 田村直哉**, 竹村明人***, 石田伸幸****, 森本康幸*****, 前田潤滋*****
Sho ISHIZAKI, Naoya TAMURA, Akito TAKEMURA,
Nobuyuki ISHIDA, Yasuyuki MORIMOTO, Junji MAEDA

Wind load design for a transmission tower targets mainly strong winds caused by a typhoon. The probability that a tornado hits a tower body directly is very small in Japan, but it is known that some traces of a tornado are occasionally recognized in fallen trees in a typhoon's strong wind area. This paper reports the response characteristics of a suspension transmission tower against a gust based on a Wen's tornadic model under a typhoon-induced wind, focusing on the effects of conductors. It was found that the conductors affected the response of a transmission tower strongly.

Keywords: Transmission tower, Tornado, Dynamic analysis
送電鉄塔, 竜巻, 動的解析

1. 序

送電鉄塔に関する「送電用支持物設計標準JEC-127-1979」¹⁾での耐風設計は台風などの強風を想定したもので、竜巻による突風は考慮していない。日本では送電鉄塔が竜巻に遭遇する確率は非常に小さいと考えられるが、熊本県にて甚大な災害をもたらした1999年台風18号(以下、台風9918号と呼ぶ)通過時の同県の山間部などでは台風の強風域内に竜巻等の発生によると見られる痕跡が指摘されている。そのため、送電鉄塔に作用する想定外の外力として、竜巻による非定常性の強い突風が台風時に同時に作用したときの応答性状を検討しておくことは重要であると考えられる。

竜巻と台風による強風での相違点として、竜巻はその面積範囲が小さいが、旋回性の猛烈な強風を伴うという特性を挙げることができる。この特性のために、竜巻進路と対象構造物の距離によって、その構造物に作用する風速分布や風向風速変化は大きく異なる。本報告では、台風9918号通過時の熊本県の送電線が通過する山間部を対象エリア

とし、Wen²⁾によって提案された竜巻モデルを用いて、竜巻移動中心位置と鉄塔との最短距離をパラメータとした、竜巻の風速分布と風向風速変化に対する鉄塔の応答変位量の検討を行う。その際、架渉線の有無の影響に着目し、架渉線を考慮しない鉄塔モデル(以下、鉄塔単体モデル)と、架渉線を考慮したモデル(以下、鉄塔連成系モデル)の2パターンについて検討を行う。さらに、鉄塔の変位量が最大となるパラメータの組み合わせにおける鉄塔構成部材の発生軸力分布と部材安全率との比較を行う。

2. 対象鉄塔の概要および風力のモデル化

2.1 鉄塔モデルの概要

本報告では鉄塔モデルを、対象エリアを通過する送電線を参考に、塔高39.4mの110kV懸垂型等辺山形鋼鉄塔としている。この鉄塔は「電気設備技術基準」³⁾に基づき、設計風速条件「地上高15mにおいて平均風速40m/s、ベキ指数1/7」で設計される鉄塔⁴⁾である。その概略図を図1に、鉄塔連成系モデルの概略図を図2に示す。径間長についても対象エリアを通過する送電線を参考にモデル化した。図1中のP1~P19はパネル番号を表している。なお、それぞれの鉄塔間の架渉線を分割数30のリンクモデルとしている。

2.2 竜巻通過時の作用風力の算定

本報告ではJEC-127-1979¹⁾を参考に、竜巻通過時の鉄塔部材の風力算定式を次式のように定義する。

* 都市共生デザイン専攻 修士課程
** 大鉄工業株式会社
*** 九州電力株式会社
**** 日本鉄塔工業株式会社
***** 都市・建築学部門

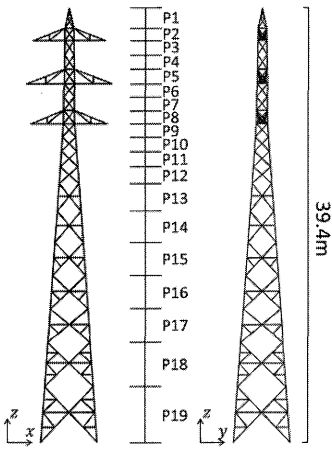


図1 対象鉄塔

$$\begin{aligned} F_x(z, t) &= 0.5\rho C n_x A U^2(z, t) \\ F_y(z, t) &= 0.5\rho C n_y A U^2(z, t) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 ρ は空気密度 $1.2(\text{kg}/\text{m}^3)$ 、 C は風力係数、 A は各パネルの y 軸方向の受風面積(m^2)、 n_x と n_y はJEC-127-1979において風向によって変化する x 軸(線路直角方向)、 y 軸方向(線路方向)の応力分担率、 U は後述する x 軸方向の風速成分 u と y 軸方向の風速成分 v との風速ベクトルの絶対値である。鉄塔連成系モデルにおける碍子および架渉線の風力算定もJEC-127-1979に従った。

3. 竜巻通過時の風速場

3.1 竜巻の風速場モデル

Wen の報告²⁾では、竜巻の風速分布は境界層の内外で異なり、境界層高さ δ を竜巻中心からの距離 r' を用いて次式で定義されている。

$$\delta(r') = \delta_0 [1 - \exp(-0.5r'^2)] \quad (2)$$

ここで $r = r'/r_{max}$ 、 r_{max} は境界層上空で接線風速が最大となる中心からの半径距離、 δ_0 は $r \gg 1$ のときの境界層高さである。

図3に示す竜巻本体の接線方向、法線方向および鉛直方向の風速 T 、 R 、 W は次式のように求められる。

① 境界層より上空 ($\eta = z/\delta > 1$) の場合

$$\begin{aligned} T(\eta, r) &= f(r) \\ &= 1.4 \frac{V_{max}}{r} [1.0 - \exp(-1.256r^2)] \end{aligned} \quad (3)$$

$$R(\eta, r) = 0$$

$$W(\eta, r) = g(r) = 93.0r^3 \exp(-5r) V_{max}$$

② 境界層内部 ($\eta = z/\delta \leq 1$) の場合

$$\begin{aligned} T(\eta, r) &= f(r) [1 - \exp(-\pi\eta) \cos(2b\pi\eta)] \\ R(\eta, r) &= f(r) \{ [0.672 \exp(-\pi\eta) \sin[(b+1)\pi\eta]] \} \end{aligned} \quad (4)$$

$$W(\eta, r) = g(r) [1 - \exp(-\pi\eta) \cos(2b\pi\eta)]$$

ここで、 z は地上高さ、 V_{max} は境界層より上空の最大接線風速、 $b(r) = 1.2 \exp(-0.8r^4)$ である。

さらに、図4のような場合に、式(3)あるいは式(4)より求めた竜巻各成分の風速から、 x 軸と y 軸各成分の風速への変

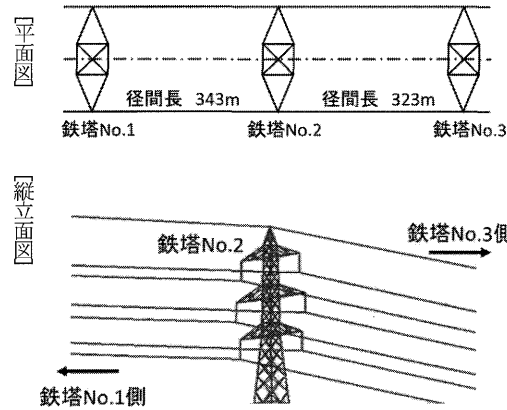


図2 連成系モデルの概略図

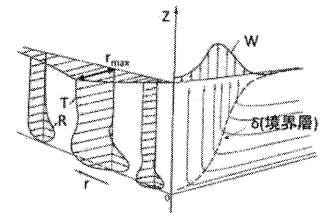


図3 竜巻本体の風速分布²⁾

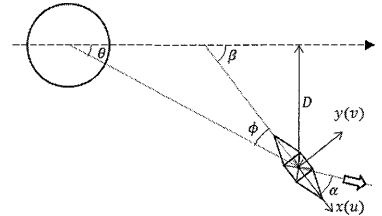


図4 竜巻進路と送電鉄塔の位置関係

換に次式を用いた。

$$\begin{aligned} u(z, t) &= -T(z, r) \sin\phi - R \cos\phi + U_g(z) \cos\beta \end{aligned} \quad (5)$$

$$v(z, t) = T(z, r) \cos\phi - R \sin\phi + U_g(z) \sin\beta$$

ここで、 $U_g(z)$ は高さ z における一般風の風速、 $\phi = \beta - \theta$ 、 β は竜巻進路と x 軸とのなす角度、 $\theta = \tan^{-1}[D/(-Vt)]$ 、 D は竜巻進路と鉄塔中心位置との距離、 V は竜巻の移動速度である。なお、風速 u 、 v はそれぞれ x 軸、 y 軸方向の風速成分である。

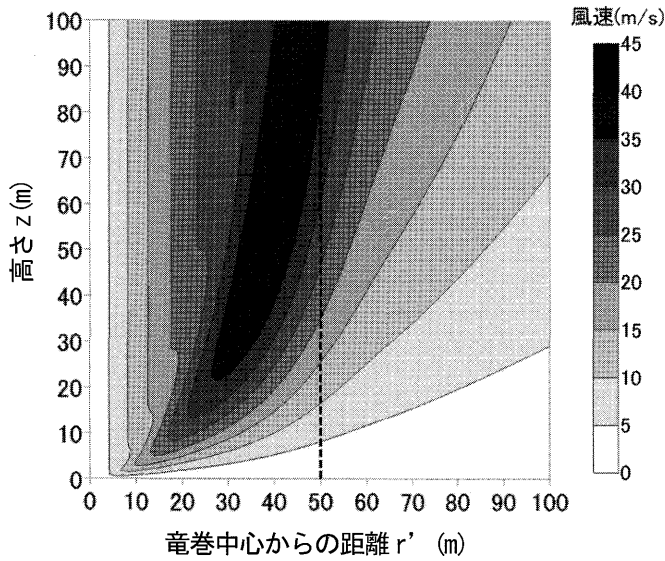
3.2 竜巻風速場の各設定

本報告では、フジタスケール⁹⁾でF2の竜巻を想定しており、丸山らの報告⁹⁾を参考に $V_{max} = 35\text{m/s}$ 、 $r_{max} = 50\text{m}$ 、 $V = 12\text{m/s}$ とした。また、対象鉄塔の建設地周辺の粗度区分は2と3が混在しているが、「送電用鉄塔の風荷重指針・同解説(2005)」⁷⁾によれば、粗度区分は粗度の分布の状況等により中間値をとることができる。そこで、今回は粗度区分を2.5とし、そのときの上空風高さから $\delta_0 = 400\text{m}$ を用いた。

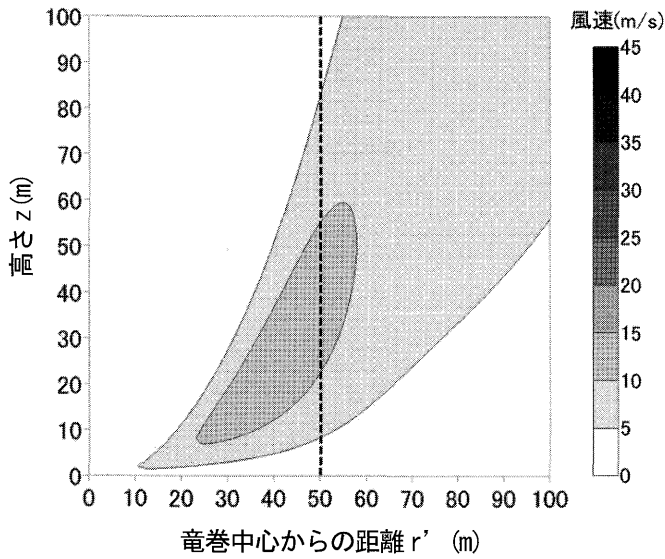
また、式(5)を用いて鉄塔位置での風速を求めるには竜巻進路と x 軸とのなす角度 β と、高さ z における一般風の風速 $U_g(z)$ が必要である。本報告では、 $\beta = 41$ 度、 $U_g(10) = 27.7\text{m/s}$ 、べき指数を0.19としている。これは、領域気象モデルWRFによる台風9918通過時の対象エリアの風速推定の値を用いたものである⁸⁾。なお β に関して、WRFにより得られた風向(東南東)と竜巻の進路が一致すると仮定し、風向と東西軸との角度(22.5度)と参考にした対象エリアの鉄塔 x 軸と東西軸とのなす角度(63.5度)との差から $\beta = 41$ 度とした。

3.3 竜巻の各成分の風速分布

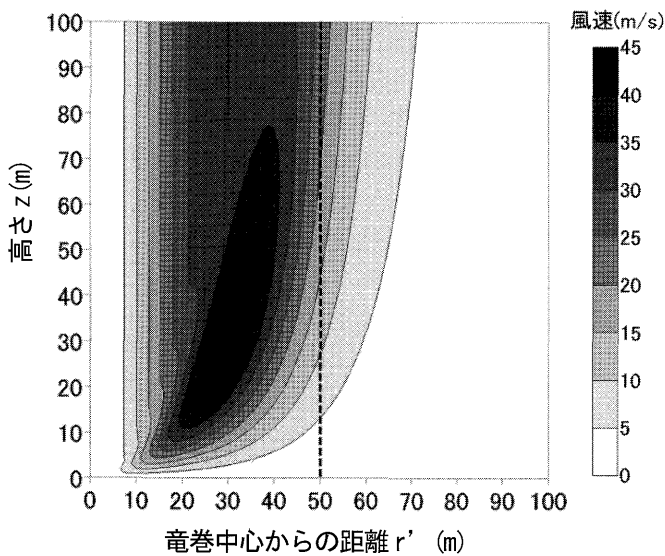
図5に前述の式(3)と(4)を用いて算出した竜巻中心からの距離 r' および地上高さ z に対する T 、 R 、 W の風速分布を示す。なお、図中の点線は r_{max} (=竜巻中心から半径50m)の位置を示している。 T 、 R 、 W の風速の最大値はそれぞれ40m/s、11m/s、44m/sとなった。 R の風速は T と W に比べて小さな値



(a) T (接線方向)



(b) R (法線方向)



(c) W (鉛直方向)

図5 竜巻の各成分(T, R, W)の風速分布

となっている。また、それぞれの方向でその風速分布が異なることが分かる。

3.4 竜巻の平面方向の風速分布

図6に高さ30mにおける竜巻周辺の平面方向の竜巻の風速分布を示す。なお、ここでの風速は式(5)で算出される風速 u および v の合成風速である。竜巻進路に対して右側の風速は70m/s以上に達するのに対し、竜巻進路に対して左側の風速は30m/s程度で、進路方向の左右でその風速の値が大きく異なることが分かる。これは式(5)で示すように、一般風は竜巻進路と平行方向に吹くと仮定しており、竜巻の旋回流は反時計回りであるため、竜巻進路に対して右側では一般風の風向と竜巻旋回流の風向がおよそ一致し、両者の風速が合成されることにより、相対的に風速が大きくなるのに対し、竜巻進路に対して左側では一般風の風向と竜巻旋回流の風向が反対になり、両者の風速が打ち消しあうことにより、相対的に風速が小さくなるためである。風速が最も大きくなるのは r_{max} (=竜巻中心から半径50m)よりも内側で、竜巻進路に対して右側の領域である。なお、竜巻の移動速度を竜巻の風速に加算することも考えられるが、ここではこれを考慮していない。

3.5 竜巻通過時の風速と風向の時刻歴変化

本報告では、竜巻進路と鉄塔中心位置との距離 D をパラメータとしており、 $D=-100\sim 100$ m(鉄塔塔体中心位置が竜巻進路に対して右側にある場合が正、左側にある場合が負)の計7ケースの鉄塔の応答の検討を行っている。表1にパラメータをまとめる。

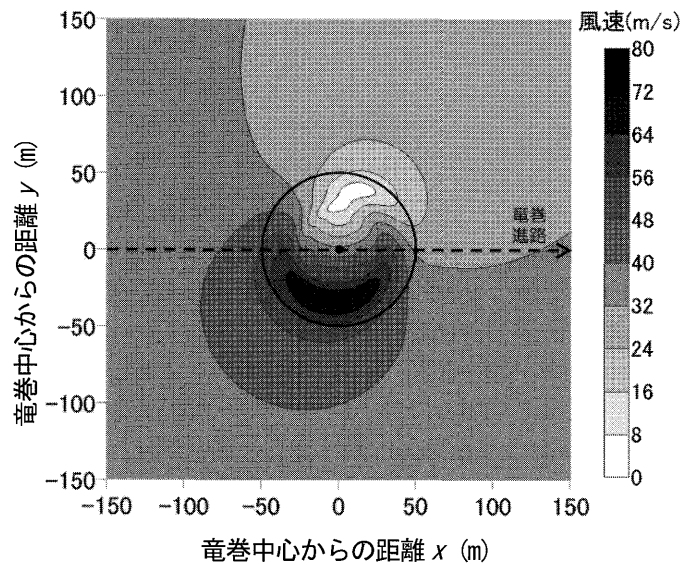
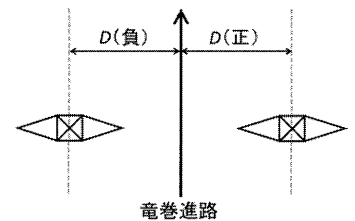


図6 竜巻の平面方向の風速分布(高さ30m)

表1 パラメータ

竜巻進路と鉄塔中心位置との距離 $D^*(m)$
-100, -50, -25,
0, 25, 50, 100



*正の場合鉄塔塔体中心位置が竜巻進路の右側
負の場合鉄塔塔体中心位置が竜巻進路の左側となる

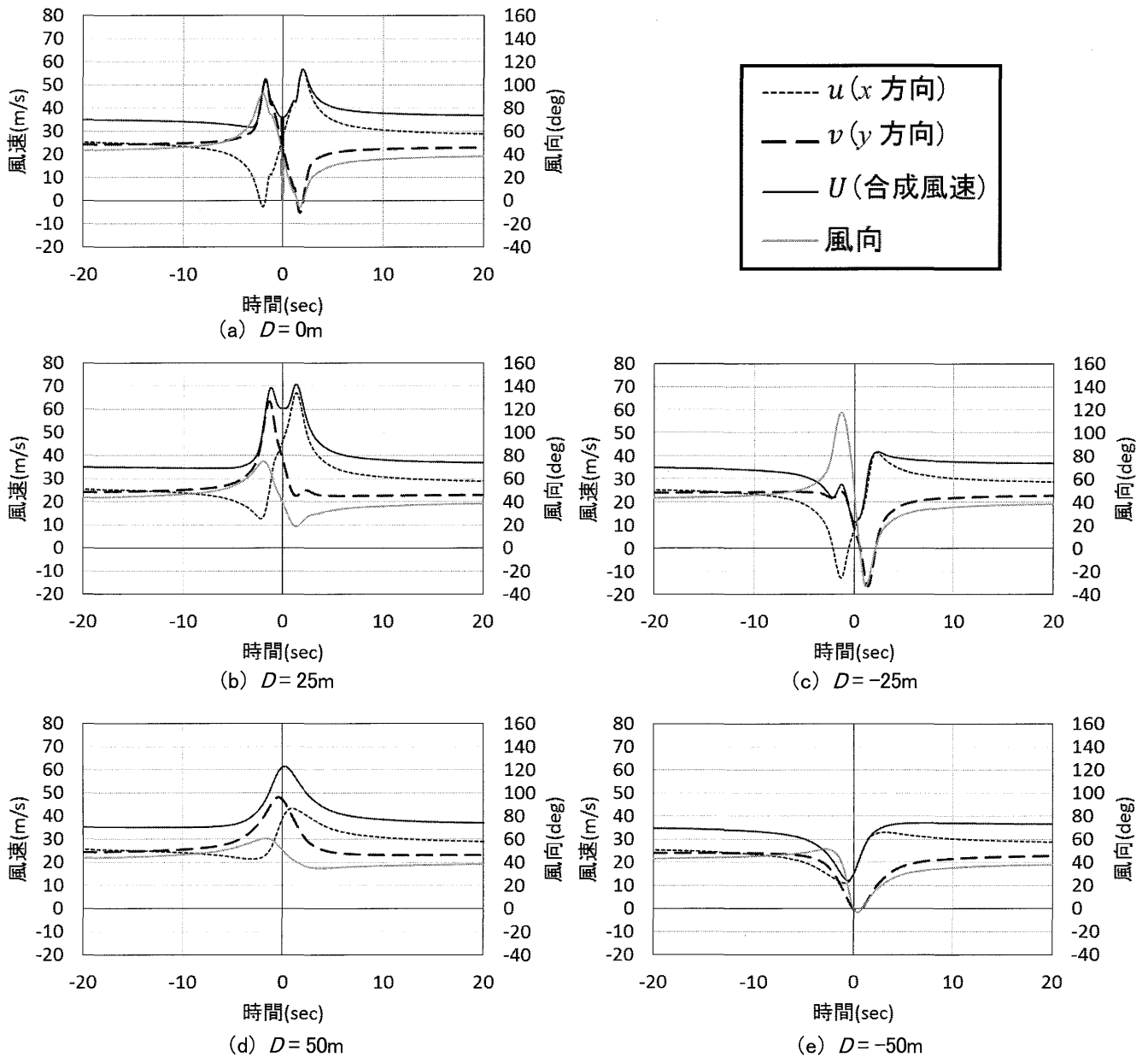


図7 塔頂部（地上高 39.4m）風速と風向の時刻歴波形

前述の式(5)により算定した $D = -50, -25, 0, 25, 50$ mのときの鉄塔塔頂 ($z = 39.4$ m)における風速と風向の時刻歴変化を図7に示す。なお、竜巻が最接近する時刻が0秒である。いずれの場合においても、風速が最大になるのは竜巻の最接近よりも後となる。各パラメータでの風速の最大値は $D = -50$ mで 37.1 m/s (14.8秒時), $D = -25$ mで 41.7 m/s (2.3秒時), $D = 0$ mで 56.8 m/s (3.3秒時), $D = 25$ mで 70.8 m/s (1.3秒時), $D = 50$ mで 61.5 m/s (0.3秒時)となり、 D によって鉄塔に作用する風速は大きく異なる。 $D = 25$ mのときに風速は最大となり、鉄塔が竜巻進路の右側で、鉄塔が $r_{max} (= 50$ m)よりも内側にある場合に鉄塔に作用する風速が大きくなること分かる。

4. 送電鉄塔の竜巻応答解析

4.1 動的応答解析の概要

有限要素解析ソフト ADINA を用いて動的応答解析を行

った。すべての部材を梁要素とし、主柱材間は剛接合、それ以外はすべてピン接合としてモデルを構築した。なお、架渉線は幾何学的非線形性を考慮した。時間刻みは 0.01 sec、構造減衰は剛性比例型として、鉄塔は減衰定数 2% 、架渉線は減衰定数 0.4% を用いてそれぞれ1次固有周期に対して設定した。なお、式(5)から得られるパネル毎の台風時の竜巻風速を用いて式(1)より風力を求め、得られた風力を各パネルの主柱材接合部接点に等分した。

4.2 塔頂の最大変位量

$D = -100 \sim 100$ mのときのそれぞれの鉄塔モデルでの塔頂の最大変位量を図8に示す。鉄塔連成系モデルの最大変位量は鉄塔単体モデルに比べて $2 \sim 4$ 倍程度大きく、塔頂変位量に対する架渉線の影響が大きいこと分かる。いずれのモデルでも $D = 25$ mのときに塔頂の最大変位量は最も大きくなり、鉄塔位置が竜巻進路の右側にある場合に大きな

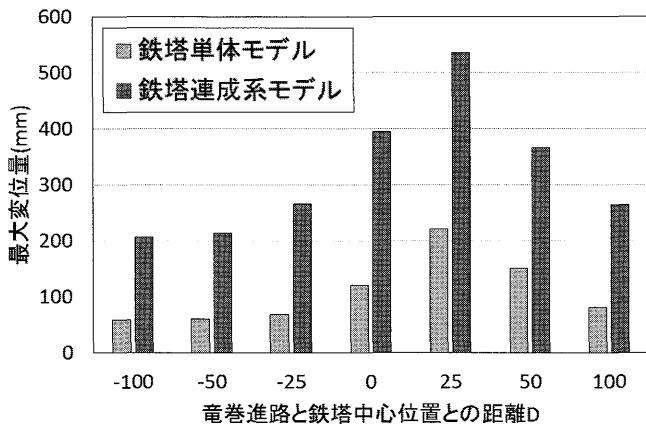


図8 竜巻進路と鉄塔中心位置との距離Dと塔頂の最大変位量

風力が作用することが分かる。

4.3 塔頂の時刻歴応答変位量

塔頂の最大変位量が最も大きくなる $D=25m$ のときの、それぞれの鉄塔モデルの塔頂変位量の時刻歴変化を図9と図10に示す。いずれのモデルにおいてもx軸とy軸の各軸方向の最大変位を示す時刻は、図7(b)のそれぞれの軸方向の風速成分が最大値を示す時刻にほぼ対応しているが、鉄塔単体モデルに対して、鉄塔連成系モデルのx軸方向の変位量はかなり大きな値となっている。これは、JEC-127-1979による架渉線の風力算定ではx軸方向の風力のみを考慮しており、架渉線に作用する風力が鉄塔連成系モデルの塔体のx軸方向の変位に大きく影響しているためだと考えられる。なお、図7(b)の合成風速には2回のピークがみられ、2

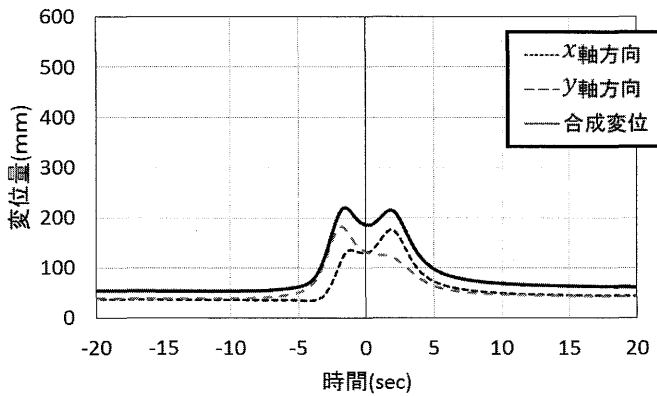


図9 鉄塔単体モデル塔頂変位の時刻歴波形(D=25m)

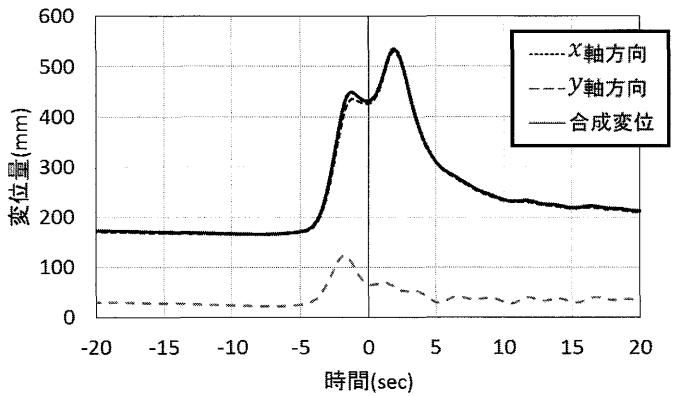


図10 鉄塔連成系モデル塔頂変位の時刻歴波形(D=25m)

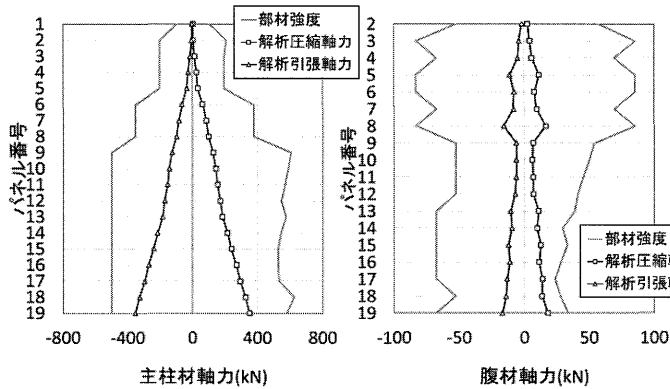


図11 鉄塔単体モデルの主柱材および腹材の軸力分布(D=25m)

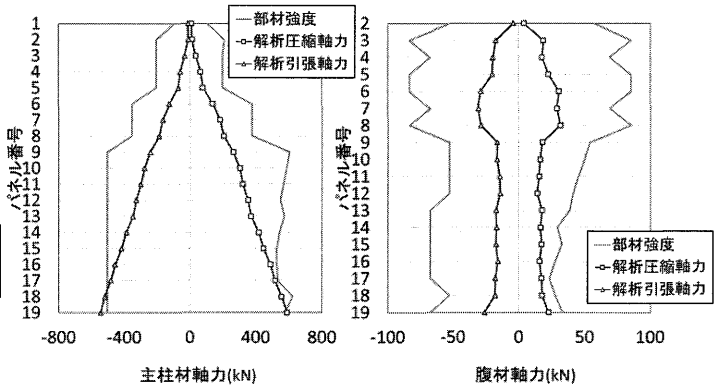


図12 鉄塔連成系モデルの主柱材および腹材の軸力分布(D=25m)

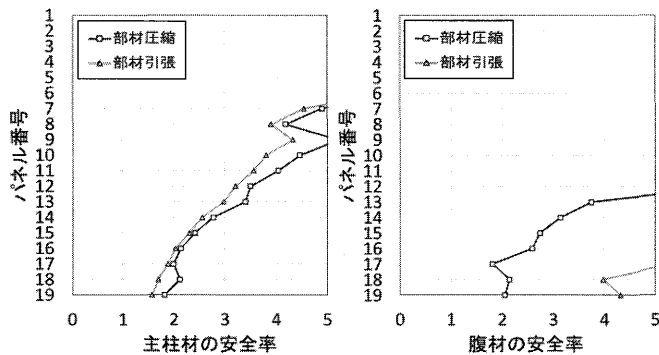


図13 鉄塔単体モデルの主柱材および腹材の安全率(D=25m)

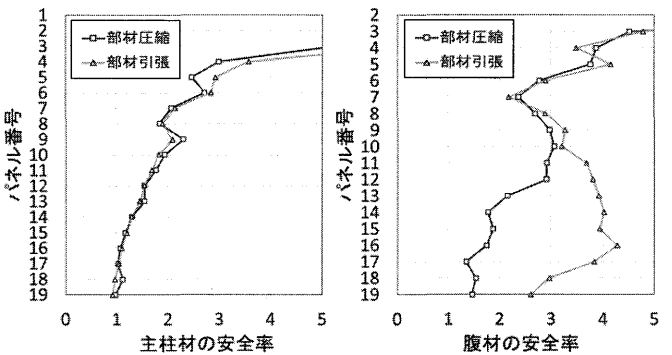


図14 鉄塔連成系モデルの主柱材および腹材の安全率(D=25m)

つ風速の値はほぼ同じであるものの、図 10 を見ると 2 度目のピークが作用した場合の方が塔頂の変位が明らかに大きくなる事が分かる。ここで風向に着目すると、1 度目のピークの風向は約 65 度、2 度目のピークの風向は約 19 度であり、x 軸方向の風速は 2 度目のピークの方が大きいことが分かる。前述の通り、架渉線に作用する風力が鉄塔連成系モデルの塔体の変位に与える影響は大きいので、架渉線が風力を受ける x 軸方向の風速がより大きい 2 度目のピークが作用した場合に塔頂の変位が大きくなったと考察される。

4.4 解析軸力分布および安全率分布

塔頂の最大変位時 ($D=25m$) における解析最大軸力と部材強度 (降伏点) を比較するために、それぞれのモデルの各パネルの支柱材および腹材の圧縮および引張の部材強度と解析軸力の分布を図 11 と図 12 に示す。いずれのモデルでも下部パネルの支柱材ほど大きな軸力を生じるが、腹材ではそのような傾向は必ずしもみられない。また、架渉線が鉄塔本体に接続する 5 番パネルおよび 8 番パネル付近で腹材の軸力が大きくなる傾向がみられる。部材強度と解析軸力を比較すると、鉄塔連成系モデルの支柱材の下部パネルで解析軸力が部材強度を上回る部材がみられる。

それぞれのモデルの各パネルの発生最大軸力と部材強度との比を比較するため、最大発生圧縮軸力および最大発生引張軸力に対する部材圧縮強度および部材引張強度により求められる、各パネルの支柱材および腹材の安全率の分布を図 13 と図 14 に示す。鉄塔連成系モデルの支柱材と腹材の各パネルにおける圧縮および引張のうち安全率の低い方を見ると、最下の 19 番パネルから架渉線が接続する 8 番パネルまではおよそ 1 から 3 までの間を推移している。一方、鉄塔単体モデルでは、架渉線を考慮していないことから、支柱材と腹材の両者とも安全率が大きい。さらに、上部パネルに行くほど急激に過大になっており、鉄塔連成系モデルの結果とかけ離れていることが分かる。以上のことから、送電鉄塔の強度評価をする際、架渉線を考慮しない鉄塔単体モデルでは適切な評価することは困難と言える。

5. まとめ

塔高 39.4m の懸垂型等辺山形鋼鉄塔の竜巻通過位置をパラメータとした、台風 9918 号襲来時にフジタスケールで F2 クラスの竜巻が通過する場合を想定した時の応答を、架渉線を考慮したモデルと考慮しないモデルで試算したところ、以下の所見を得た。

- (1) 竜巻進路と鉄塔位置との距離によって、鉄塔に作用する風速分布は大きく異なり、鉄塔位置が竜巻進路の右側かつ、鉄塔が竜巻の最大接線風速半径の内側にあるときに風速は大きくなる。これは、今回用いた竜巻モデルでは竜巻進路と一般風の風向が一致するため、竜巻進路に対して右側では一般風の風向と竜巻旋回流の風向がおおよそ一致し、相対的に風速が大き

くなるのに対し、竜巻進路に対して左側では一般風の風向と竜巻旋回流の風向が反対になり、両者の風速が打ち消しあうためである。

- (2) いずれのモデルでも鉄塔位置が竜巻進路の右側で、鉄塔と竜巻進路との距離が 25m のときに変位量は最大となる。また、架渉線を考慮したモデルの最大変位量は、考慮しないモデルに比べて 2~4 倍程度大きくなる可能性がある。
- (3) 塔頂の最大変位時におけるそれぞれのモデルの安全率を比較したところ、架渉線を考慮しない鉄塔単体モデルの値は、架渉線を考慮する鉄塔連成系モデルの値と大きく異なることから、送電鉄塔の強度評価をする際、鉄塔単体モデルでは適切な評価することは困難と言える。

今後は Wen の竜巻モデル以外に提案されている竜巻モデル(ランキン渦モデル、フジタモデル)で、送電鉄塔の応答を耐張型鉄塔も含めて検討し、竜巻に対する鉄塔強度の総合的な評価を行う必要がある。

謝辞

本研究は日本学術振興会科学研究費補助金「竜巻通過時に急変する風速と気圧降下との相乗効果による建物の破損プロセス (基盤(B)26282112 代表: 前田潤滋)」と九州電力株式会社との H26 年度共同研究「台風による局所的気象現象が鉄塔強度に及ぼす影響に関する研究」の助成を受けました。

参考文献

- 1) 電気学会: 送電用支持物設計標準 JEC-127-1979, 1979.
- 2) Wen, Y.K.: Dynamic tornadic wind loads on tall buildings, *Journal of the Structural Division*, 169-185, 1975.
- 3) 経済産業省原子力安全・保安院: 解説電気設備に関する技術基準, 第 15 版, 2013.10.
- 4) 田村直哉: 台風通過時と竜巻通過時における送電鉄塔の風応答解析, 九州大学大学院人間環境学府都市共生デザイン専攻修士論文, 2015.2
- 5) 気象庁ホームページ:
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/toppuu/tornado1-2.html>
- 6) 丸山敬, 河井宏允, 奥田泰雄, 中村修: 数値計算による竜巻中の飛散物の速度推定, 第 23 回風工学シンポジウム, 2014.2
- 7) 送電用鉄塔の耐風設計実用化に関する研究(付録: 送電用鉄塔の風荷重指針・同解説(2005)), 電力中央研究所, 2006.
- 8) 田村直哉他: WRF による台風 9918 号通過時の九州域での強風再現性-その 1 台風進路と中心気圧の再現に関する検討-, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp.141-142, 2014.
- 9) 竹村明人他: WRF による台風 9918 号通過時の九州域での強風再現性-その 2 九州上陸後の強風再現の検証-, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp.143-144, 2014.

(受理: 平成 27 年 6 月 11 日)