2017年台風21号における鉄塔支持型鋼製煙突の実測結果および振動特性評価

AMBIENT MEASUREMENT RESULTS AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF TRUSS TOWER SUPPORTED STEEL CHIMNEYS BY TYPHOON 1721

三浦景祐 — * 1 真下 貢 — * 2
真栄城玄一 — * 3 荻原 実 — * 1
廣谷直也 — * 1 阿部貴秀 — * 4
杉本良介 — * 5

Keisuke MIURA — * 1 Mitsugu MASHIMO — * 2
Genichi MAESHIRO — * 3 Minoru OGIHARA — * 1
Naoya HIROTANI — * 1 Takahide ABE — * 4
Ryosuke SUGIMOTO — * 5

キーワード：
煙突, 振動特性, 常時微動計測, 台風, RD 法

Keywords:
Chimney, Dynamic characteristics, Ambient measurement, Typhoon, Random decrement method

Typhoon 1721 occurred on October 16th, going south of Japan from October 21st to 22nd, and around 3 o'clock on 23rd, landed around Shizuoka Omaezaki city. The central pressure of typhoon 1721 at landed was 950 hPa, then the maximum wind speed near the center was 41.2 m/s. In this report, wind speed and direction observation records obtained from an anemometer installed in a truss tower supported steel chimneys are summarized, the dynamic characteristics of the chimneys are evaluated based on the record of the accelerometer, and the results are reported.

1. はじめに

2017年の台風21号(以下, 台風1721号と称す。)は, 10月16日に発生し, 10月21日から22日にかけて日本の南を北上し, 23日3時頃に静岡県御前崎市付近に上陸した。上陸した台風1721号は, 首都圏を通過し, 23日15時頃に温帯低気圧となった。台風1721号の中心気圧は915hPaまで発達し, 上陸時の中心気圧は950hPaで, 中心付近の最大風速41.2m/sを観測した¹⁾²⁾。

上杉ら³⁾, 中田ら⁴⁾は, 塔状構造物の振動特性を把握することを目的に, 東京湾内にある某火力発電所において高さ200mの鉄塔支持型鋼製煙突の常時微動計測を実施している。同発電所には同型の煙突が計3基建設され, 2基に加速度計が設置されている。その内の1基から, 台風1721号が当該発電所を通過した際の振動記録を観測することが出来た。また, 当該煙突には風向風速計も設置されており, 台風1721号が通過する前後の気象記録も得られている。

本報では, 既設の鉄塔支持型鋼製煙突に設置されている風向風速計から得られた気象観測記録を整理するとともに加速度計の記録を基に煙突の振動特性を評価し, その結果を報告する。

2. 対象構造物および計測概要

対象構造物は火力発電所構内に建つ図1に示すような鉄塔支持型鋼製煙突で, 高さ200m, 内径4.2mの鋼製の筒身(煙突本体の排気筒部分)を4本有している。筒身は, 高さ190mの四脚トラス鉄塔で支持されており, 鉄塔基部の根開きは50mである。対象煙突には, 発電所構内の風速を測ることを目的とした風向風速計が, 図1に示

すようにGL+192mとGL+110mの高さにそれぞれ2基ずつ設置されている。なお, 計測の目的は発電所構内の安全監視であり, 気象学的な用途ではないため, 最大瞬間風速(3秒間平均)や10分間平均風速ではなく1分間平均風速のみが出力される仕様であった。煙突の振動計測は, 鉄塔部に加速度計を設置して行っている。計測点は, 図1に示すように煙突上には高さ177m, 83m, 29mの3箇所, 煙突基礎上に1箇所の合計4箇所である。加速度の計測は, 水平方向2成分(X,Y)と上下方向(Z)の計3成分について行い, 各計測点は相互に独立しているため計測時刻の同期はGPSによった。加速度計のサンプリング周波数は100Hz(0.01sec)である。

図1 煙突概要図および各計測装置設置位置

¹⁾ 東電設計(株)建築本部建築技術部火力耐震グループ
(〒135-0062 東京都江東区東雲 1-7-12 KDX 豊洲グランスクエア 9F)

²⁾ 東電設計(株)建築本部 本部長代理

³⁾ 東電設計(株)建築本部建築技術部火力耐震グループ マネージャー

⁴⁾ 東京電力ホールディングス(株)経営戦略研究所/土木・建築エンジニアリングセンター建築構造技術グループ マネージャー

⁵⁾ 東京電力ホールディングス(株)経営戦略研究所/土木・建築エンジニアリングセンター建築構造技術グループ

¹⁾ Architectural & Structural Engineering Div., Architectural & Structural Dept., Tokyo Electric Power Services Co., Ltd.

²⁾ Co-General Manager, Architectural & Structural Dept., Tokyo Electric Power Services Co., Ltd.

³⁾ Group Manager, Architectural & Structural Engineering Div., Architectural & Structural Dept., Tokyo Electric Power Services Co., Ltd.

⁴⁾ Group Manager, Civil & Architectural Engineering Center, TEPCO Research Institute, Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.

⁵⁾ Civil & Architectural Engineering Center, TEPCO Research Institute, Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.

3. 台風 1721 号による観測記録

3.1 台風 1721 号の気象観測記録

図 2 に対象煙突の建設地点と台風経路の関係を示す。台風経路は台風ベストトラックデータ²⁾を参考にした。23 日 3 時頃に上陸した台風は、対象煙突の西から北東方向へ進み、台風中心と対象煙突の最接近距離は約 50km と推定される。

図 3 に台風ベストトラックデータ（台風の一定時間ごとの中心位置、中心気圧、最大風速などを専門家が後日に解析し、整理したデータ）²⁾から得られた中心気圧と台風中心の最大風速の時刻歴を示す。台風 1721 号は 21 日 3 時頃に中心気圧は 915hPa まで発達し、その時の台風中心付近の最大風速は 51.4m/s であった。日本列島に上陸した 23 日 3 時頃の中心気圧は 950hPa、中心付近の最大風速は 41.2m/s であった。

3.2 対象煙突で観測された風向風速記録

図 4 に対象煙突に設置された風向風速計から得られた風速および風向の記録を示す。ここでは、台風が接近し始めた 22 日 21 時から 24 日 0 時までの記録を示す。風速および風向の観測記録は 1 分間毎の平均値である。風速は、22 日 21 時頃は 10m/s 程度だったが、23 日 0 時頃に 20m/s 程度まで増加し、台風が最接近した 23 日 3 時から 6 時頃に風速 25m/s 前後まで増加し、最大 30m/s 程度に達した。その後、風速は 5m/s 程度まで減少するが、23 日 12 時頃に再び 25m/s 程度まで増加し、徐々に減少していった。風向は、台風が上陸するまでは NE 方向だったが、台風が上陸する直前の 23 日 2 時頃から SE 方向に変化し、台風が通過した 23 日 6 時以降は W から NW 方向に変化した。

3.3 対象煙突の加速度記録

台風 1721 号による煙突の加速度記録は 23 日 1 時 30 分から同日の 23 時まで取得することが出来た。なお、台風接近時の 23 日 1 時 30 分より前の記録は、データが書きこまれたために記録出来なかった。図 5 に G.L.+177.0m で観測された加速度時刻歴波形および加速度のリサージュを示す。加速度記録のリサージュは図 4 に示した風向風

図 2 対象煙突と台風経路²⁾の関係

図 3 台風 1721 号の中心気圧と最大風速の時刻歴²⁾

(a) 風速記録

(b) 風向記録

図 4 G.L.+192m に設置された風向風速計の観測記録

(a) 加速度の時刻歴波形

(b) 加速度のリサージュ

図 5 加速度時刻歴波形の一例 (G.L.+177.0m)

速記録を基に(a)1時30分から7時00分、(b)7時00分から10時00分、(c)10時00分から23時までの3ケースで比較を行った。図中には、その時間帯の主要風向と煙突の関係を示している。X方向の最大加速度は 111.8cm/s^2 、6時頃に記録した。Y方向の最大加速度は 69.2cm/s^2 、5時50分頃に記録した。最大加速度を記録した5時50分から6時までの10分間平均風速は 23.9m/s で風向はSE方向だった。台風が通過し、風速が弱まった7時から10時の最大加速度は、X方向で 19.9cm/s^2 、Y方向で 15.9cm/s^2 、10分間平均風速は 4.9m/s まで減少し、風向はSE方向からW方向に変化した。その後、12時頃に10分間平均風速は 25.3m/s まで増加するが、その時間帯の最大加速度はX方向で 28.9cm/s^2 、Y方向で 19.3cm/s^2 で、観測時間内で最大加速度を記録した6時頃と10分間平均風速は同程度であるにも関わらず、加速度応答は小さくなった。

図6に加速度の標準偏差の時間変化を示す。加速度の標準偏差は1時30分から23時00分までの時刻歴波形から10分毎の加速度波形を抽出して算定した。1時30分から7時頃まではY方向よりX方向の方が振幅が大きくなるが、7時以降は両方向ともほぼ同程度の振幅となっている。図7に風速と加速度の標準偏差を示す。7時から23時までの加速度の標準偏差は風速の2乗に概ね比例しているが、1時30分から7時までのX方向については異なる傾向を示しており、その理由については詳細な分析が必要である。図8に加速度のパワースペクトル密度を示す。パワースペクトル密度は図5のリサージュと同様に3ケースで算定した。パワースペクトル密度のピーク値から固有振動数は両方向とも約 0.39Hz 、約 1.29Hz 、約 1.88Hz 付近にあると推察される。

4. 煙突の振動特性評価

4.1 RD法による評価結果

煙突の振動特性は、加速度波形にRD法⁵⁾を適用し、得られたRD減衰波形を自由振動波形に最小二乗近似して評価した。RD減衰波形は、加速度の標準偏差を初期値とし、図8で得られた加速度のパワースペクトル密度を参考に1次固有振動数に対応するピークのエネルギーが十分小さくなった幅($0.35\text{Hz}\sim 0.45\text{Hz}$)でバンドパスフィルターを掛けて算定した。なお、ここでは振動特性の振幅依存性を評価するために、加速度の標準偏差の大きさを考慮して4つの時間帯(1時30分から3時、3時から7時、7時から10時、10時から23時)の加速度記録からRD減衰波形を求めた。図9に観測記録のRD減衰波形と自由振動波形に近似した結果の一例、図10に煙突の振動特性と加速度の標準偏差の関係を示す。図10において、X,Y両方向とも加速度の標準偏差が大きい順に3時から7時、1時30分

図6 加速度の標準偏差の時間変化 (G. L. +177.0m)

図7 風速と加速度の標準偏差の関係 (G. L. +177.0m)

図8 加速度のパワースペクトル密度

図9 X方向加速度のRD減衰波形(3時~7時)

ら 3 時, 10 時から 23 時, 7 時から 10 時の各時間帯における結果を示している。同図より, 両方向とも 1 次固有振動数は平均的に 0.39Hz 程度となり, 減衰定数の平均は X 方向では 0.45%, Y 方向では 0.76% となったが, 加速度振幅が小さい場合については波形サンプルを 58 波しか重ね合わせられていないため, 減衰定数が大きめに評価されている可能性がある。この数値を除けば Y 方向の減衰定数の平均は 0.51% であった。

表 1 に各方向の 1 次から 3 次までの固有振動数と減衰定数を示す。図 8 のパワースペクトル密度から得られた固有振動数と比較すると, 1 次モードから 3 次モードまで固有振動数はほぼ一致している。異なるモード間の減衰定数を比較すると, X 方向では 2 次モードの減衰定数が 1 次モードよりわずかに大きくなり, Y 方向では 1 次モードと 2 次モードが同程度であった。3 次モードは X,Y 両方向とも 1 次モードより小さくなった

4.2 三次元立体モデルの固有値解析結果との比較

当該煙突を三次元立体モデルでモデル化し, 固有値解析を実施した。図 11 に立体モデルの固有モード図を示す。全体 1 次モードは 45 度方向の並進 1 次モード, 全体 2 次モードは 45 度方向の並進 2 次モード, 全体 3 次モードはねじれ方向のモード形状となった。

表 2 に立体モデルの固有値解析結果と観測記録から同定した固有振動数の比較を示す。固有振動数は, 全体 1 次モードから全体 3 次モードまで, 概ね一致することを確認した。

図 10 加速度の標準偏差と煙突 1 次モードの振動特性の関係

表 1 各モード次数の固有振動数と減衰定数				
モード	X 方向		Y 方向	
	固有振動数 [Hz]	減衰定数 [%]	固有振動数 [Hz]	減衰定数 [%]
1 次	0.39	0.45	0.39	0.76
2 次	1.30	0.84	1.30	0.67
3 次	1.89	0.38	1.89	0.40

図 11 三次元立体モデルの固有モード

表 2 観測結果と三次元立体モデルの固有振動数の比較

モード	固有振動数 [Hz]		比率
	三次元立体モデル	観測記録の同定結果	
1 次	0.40	0.39	0.98
2 次	1.28	1.30	1.02
3 次	1.89	1.89	1.00

5. まとめ

2017 年 10 月 23 日に上陸した台風 1721 号の気象観測記録および加速度記録を用いた固有振動数および減衰定数の評価結果を示した。その結果, 1 次モードの固有振動数は 0.39Hz となり, 三次元立体解析モデルの固有値解析結果とも概ね整合する結果となった。1 次モードの減衰定数は X 方向で 0.45%, Y 方向で 0.76% となり, 煙突構造設計指針⁶⁾で推奨されている風応答に対する減衰定数 0.5% とほぼ同程度になることを確認した。

参考文献

- 1) 気象庁 HP, 2017.10
- 2) RSMC Tokyo Typhoon Center : 台風ベストトラックデータ, 2017.12
- 3) 上杉義則, 土田剛, 今村晃, 真下貢, 柏崎琢也, 中田達也, 荻原実: 高さ 200m の鉄塔支持型鋼製煙突を対象とした常時微動測定 (その 1. 鉄塔支持型煙突の振動特性), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.885-886, 2014
- 4) 中田達也, 土田剛, 今村晃, 上杉義則, 真下貢, 柏崎琢也, 荻原実: 高さ 200m の鉄塔支持型鋼製煙突を対象とした常時微動測定 (その 2. 鉄塔支持型煙突のデータ分析), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.887-888, 2014
- 5) 田村幸雄, 佐々木淳, 塚越治夫: RD 法による構造物のランダム振動時の減衰評価, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 454 号, 1993.12
- 6) 日本建築学会: 煙突構造設計指針, 2007

[2018 年 2 月 7 日原稿受理 2018 年 4 月 13 日採用決定]