鉄塔支持型鋼製煙突の風応答について

WIND RESPONSES OF A TOWER SUPPORTED STEEL STACK

本間 真 — * 1 前田潤滋 — * 2
薄 達哉 — * 3 巻幡敏秋 — * 4

Shin HOMMA — * 1 Junji MAEDA — * 2
Tatsuya SUSUKI — * 3 Toshiaki MAKIHATA — * 4

キーワード：
長期観測, 風洞実験, 渦励振, ガスト応答, 鉄塔支持型鋼製煙突

Keywords:
Field measurements, Wind tunnel tests, Cross-wind oscillation, Gust response, Tower supported steel stack

The characteristics of the structural frequency and damping as well as the vibration due to the wind forces of a tower supported steel stack are studied in long period field observations. And also the correlations of the vibration due to the vortex between the field observations and wind tunnel tests using 3-D rocking model are discussed. The results are summarized as follows; 1) the vibration due to the vortex obtains $y/d = 0.12$ for $h = 0.33\%$ and $y/d = 0.006$ for $h = 0.89\%$, respectively (y is the maximum amplitude at the tower top, d is the duct diameter of the stack, h is the damping ratio), 2) the gust responses due to strong winds are studied by the strain data at the half of the stack height, 3) the correlation of the vibration amplitude with the field observations and the wind tunnel tests based on the Scruton number is discussed.

1. 緒言

鉄塔支持型鋼製煙突の風による振動は、鉄塔と筒身による乱れの発生のために発現し難く、その事例報告も少ない。従ってこれらの風応答に関する観測および研究例は極めて乏しい現状にある。^{1) 2)}

本研究では、鉄塔支持型鋼製煙突の風による振動現象を究明するために、北九州市に立地する実機を対象に、長期にわたる風況、煙突全体振動および鉄塔柱のひずみを観測した。また、長期観測で得られたデータを考察するために鉄塔支持型煙突の三次元ロッキング模型と現地の風況を再現した気流特性を用いた風洞実験を実施し、渦励振による共振現象と渦励振に及ぼす構造減衰の影響等を検討した。^{3) 4)}

本報告では鉄塔支持型鋼製煙突の渦励振に対する実機と模型との相関と構造減衰及び高風速時におけるガスト応答についてまとめる。

2. 対象煙突の諸元

対象煙突の概要を図-1に、構造概要を表-1にそれぞれ示す。煙突周辺は、一方(NNE~WSW)が港湾水路に開け海風となり、他方は中小建物が林立する工場地帯で陸風となる地域である。

構造は1筒身4脚鉄塔支持型である。鉄塔は筒身を8段で支持しており、煙突に加わる荷重は鉄塔および筒身が受ける。筒身支持部は荷重に対して、水平力を伝達するが、筒身の熱による鉛直伸びに対しては拘束しない構造となっている。

竣工時の耐風設計について、静的風荷重に対しては(旧)建築基準法に基づいた検討を行っている。しかし動的応答に対しては、その構造特性上検討を行っていない。

図-1 煙突概要

表-1 煙突の主要諸元

形式	1筒身4脚鉄塔支持型煙突
所在地	北九州市小倉地区 (V ₀ =34m/s)
筒身高さ	GL+200m
筒身径	φ5.57m
鉄塔高さ	GL+185m
竣工	昭和57(1982)年
筒身支持方法	水平方向支持(全8段)。鉛直方向は拘束せず。
準拠	建築基準法、鋼構造設計規準 ⁵⁾ 鋼製煙突構造計算規準・同解説 ⁶⁾

*1 日立造船鉄構・建機事業本部 設計本部
(〒559-8559 大阪市住之江区南港北1-7-89)
*2 九州大学大学院人間環境学研究院 教授・工博
*3 九州電力土木本部
*4 工博

*1 Engineer, Hitachi Zosen Corporation, Steel Structure & Construction Machinery Headquarters
*2 Prof., Kyusyu University, Dr. Eng.
*3 Kyusyu Electric Power Co., Inc, Civil Engineering Department
*4 Dr. Eng.

3. 観測概要

3-1. 測定内容

長期観測の測定内容を、表-2に示す。

表-2 長期観測の測定内容

項 目	測定場所	測定内容
風 況	対象煙突から北東 235m 離れた GL+10m地点	風速・風向 (超音波式風速計) : 風速計 W3
	対象煙突から西 135m 離れた GL+185m地点	風速・風向 (プロベラ式風速計) : 風速計 W1、W2
煙突全体の振動	対象煙突の GL+185m 地点	X, Y 軸の 2 方向加速度
鉄塔柱の曲げ応力	対象煙突鉄塔 GL+90.5m 地点	4 柱 : 1 軸 4 点/柱 (曲げ応力)

観測期間および観測条件を表-3に示す。本観測では、GL+185mに設置した TMD 型制振装置によって、構造減衰を 2 回に分けて調整を行っている。この段階的な経過を Stage と名付けた。

表-3 各 Stage の観測期間および条件

	観測時期	観測条件
Stage-1	H12.8~H13.3	制振装置なし
Stage-2	H13.4~H14.3	TMD による減衰付加 (第 1 段階)
Stage-3	H14.4~観測中	TMD による減衰付加 (第 2 段階)

3-2. 制振装置の主要諸元

本煙突に設置した制振装置の概要および主要諸元を図-2 および表-4に示す。

図-2 TMD 型制振装置

表-4 制振装置主要諸元

形式	TMD(Tuned Mass Damper)		
数	1 基		
設置位置	GL+185m で筒身より 4 点から吊下げ		
方位	水平全方位		
質量比	2%		
振動数比	0.95 (Stage-3)		
減衰特性	0.9% (Stage-2)、4% (Stage-3)		

3-3. 煙突の構造特性

各 Stage で得られた本煙突の構造特性を表-5に示す。

表-5 煙突の構造特性

		Stage-1	Stage-2	Stage-3
固有振動数(Hz)	1 次	0.56	0.53	0.54
	2 次	1.53	—	—
1 次減衰定数(%)		0.33	0.89	4.00

4. データ処理・結果

4-1. 長期観測

1) 風況

Stage-1 及び Stage-2 までで取得された 10m/s 以上の 10 分間平均風速 (GL+185m) 別発生回数を表-6に、平均風向および発生率およびべき指数を表-7にそれぞれ示す。

表-6 観測期間中の平均風速別発生回数

風速(m/s)	Stage-1	Stage-2
10~12	760 回	1097 回
12~14	467 回	482 回
14~16	204 回	205 回
16~18	61 回	90 回
18~20	32 回	14 回
20~22	13 回	10 回
22~24	8 回	2 回
24~26	1 回	1 回

表-7 平均風向および発生率およびべき指数

風向	Stage-1			Stage-2		
	発生回数	発生率 (%)	べき指数 α	発生回数	発生率 (%)	べき指数 α
N	204	5.7	0.235	205	3.5	0.024
NE	61	5.2	0.244	90	4.4	0.196
E	32	15.7	0.238	14	15.8	0.344
SE	13	1.8	0.339	10	4.3	0.288
S	8	2.9	0.328	2	2.4	0.227
SW	1	6.5	0.187	1	9.0	0.216
W	3	6.3	0.248	0	11.8	0.235
NW	0	4.9	0.157	0	9.6	0.222

風向は E と W 方位に偏った風向特性にあることが分かる。なお風向と鉄塔柱を対比すると、E 方位は A 柱からの風 (四脚鉄塔に対して斜め 45° 方向)、W 方位は C 柱からの風 (四脚鉄塔に対して斜め 45° 方向) となる。(図-1 参照)

2) 振動現象

(1) Stage-1

(a) 渦励振

Stage-1 で取得された平均風速 (GL+185m) と最大振幅 (X, Y 軸方向加速度: GL+185m) の関係を図-3に示す。風速 19m/s 近傍で振幅が極めて大きくなる領域が存在している。

図-3 平均風速と最大振幅の関係 (Stage-1)

図-3において振幅が大きく発達した風速域の、風況と振動加速度との関係を図-4に示す。図から長時間 (約 2 時間) にわたって風向が安定 (W 方位) しており、かつ風速が 18m/s 以上の状態になると、渦励振による共振が発生した。同図から共振現象の持続時間は約 60 分間であった。

図-4 振幅発達時の風況と振動加速度

最大振幅が発現した時間帯（図-4参照：19.4m/s、Wの海風）の振動加速度の時系列を図-5に、リサージュを図-6にそれぞれ示す。同図から1次モード対応の振幅比として $y_{max}/d=0.12$ が得られた。また自立型煙突の渦励振の共振風速は $U_{rat(2/3H)}=D \cdot f/St$ で与えられる⁷⁾ (D : 筒身径、 f : 1次固有振動数、 St : ストローハル数=0.18) が、Stage-1の結果から1筒身鉄塔支持型煙突でも同式が成立する傾向にあることが判明した。

図-6中 W1、W2について、図1に示す通り GL+185m風速計を2台{対象煙突に対し西側(W1)、東側(W2)}設置している。W1、W2は風向と煙突の振動波形の関係を把握するためにそれぞれの風速計より得られた風向を示している。なお図-6中 W2については、その設置状況から風速計を設置した200m多脚煙突の乱れによる影響を受けていると考えられる。(図-12、W1も同様)

図-5 最大振幅発生時の時系列 (Stage-1)

図-6 最大振幅発生時のリサージュ (Stage-1)

(b)ガスト応答

ガスト応答(高風速時における風方向振動)は、鉄塔柱で計測した曲げ歪み (GL+90.498m)の最大歪みと平均歪みの比をもって検討する。平均歪みと風速 (GL+185m)との関係を図-7に示す。風速15m/s以上の風向はほぼA柱側もしくはC柱側からであり、平均歪みはA柱とC柱に発生しB柱とD柱はほぼ零である。なお、図-7には Stage-3の観測で得られた高風速時のガスト応答結果の値も併記する。

図-7 平均風速と平均歪みの相関

高風速時のA柱とC柱の歪みの最大値と平均値から、各柱の歪みのガスト係数を $GF_{\varepsilon} (= \varepsilon_{max}/\varepsilon_{mean})$ と定義し、風のガストファクター (GF_w) との比較を表-8に示す。また歪みデータは風荷重 $\{=(GF_{\varepsilon})_{mean}\}$ と相関関係にあると考えられることから、歪みデータと風荷重の比 $\{(GF_{\varepsilon})_{mean}/(GF_w)\}$ を算出し併記する。この結果、風速が大きくなると風方向の振動挙動は風のガストファクターと近い応答となると予想される。

表-8 風のガストファクターと歪みのガスト係数 (Stage-1)

風速(m/s) (GL+185m)	GF_w	GF_{ε}			$(GF_{\varepsilon})_{mean}/(GF_w)^2$
		A柱	C柱	平均	
24.3	1.26	2.11	2.16	2.14	1.35
24.9	1.20	1.47	1.50	1.49	1.03
25.3	1.20	1.56	1.59	1.58	1.10

(2)Stage-2

(a)渦励振

Stage-2 で取得された平均風速 (GL+185m) と最大振幅 (X, Y 軸方向加速度: GL+185m) の関係を図-8に示す。 Stage-1 と同様に、長時間 (約2時間) にわたって風向が安定しており、かつ風速 15m/s~18m/s の状態になると振動が大きくなる現象が見られた。

図-8 平均風速と最大振幅の関係 (Stage-2)

最大振幅が発現した時間帯 (19.4m/s, Wの海風) の振動加速度の時系列を図-9に、リサージュを図-10にそれぞれ示す。同図から1次モード対応の振幅比として $y_{max}/d=0.006$ が得られた。

図-9 最大振幅発生時の時系列 (Stage-2)

図-10 最大振幅発生時のリサージュ (Stage-2)

(b)高風速の応答

Stage-2 の高風速時データは、渦励振が発生する風速域しか取得されていない。観測された中で風速が最大時の応答結果を用いて、Stage-1 と同様、A 柱と C 柱の歪み歪みのガスト係数 (GF_ϵ) を算出し、風のカストファクター (GF_w) と比較した結果を表-9に示す。

表-9 風のカストファクターと歪みのガスト係数 (Stage-2)

風速(m/s) (GL+185m)	GF_w	GF_ϵ			$(GF_\epsilon)_{mean}/(GF_w)^2$
		A 柱	C 柱	平均	
19.0	1.50	1.80	2.08	1.94	0.86

(3)Stage-3

Stage-3 は現在観測継続中である。現在までに共振風速域での定常的な風は観測されていないが、台風 2015 号が来襲 (H14.08.31) し、共振風速を大幅に上回る 30m/s 以上の強風 (GL+185m) による風応答を取得した。これらの記録は、本煙突の制振装置設置後の共振風速 (19m/s at GL+185m) と比し、約 1.3~1.7 倍程度であり、ガスト応答の評価に適した強風と考えられる。

強風時の代表的な煙突振動の時系列を図-11に、この時の 10 分間リサージュを図-12に示す。定常的な風況ではないが、振動が大きく発達していないことが分かる。また文献 7 より本煙突の 2 次共振風速は 50m/s 程度 (GL+185m) であるが、実際には定常的にそのような強風が吹き続ける状況は考えにくく、より高風速域での渦励振現象は発生しないと考えられる。台風通過時取得された A 柱と C 柱の歪みガスト係数 (GF_ϵ) を算出し、風のカストファクター (GF_w) と比較した結果を表-10に示す。

図-11 最大振幅発生時の時系列 (Stage-3)

図-12 最大振幅発生時のリサージュ (Stage-3)

表-10 風のカストファクターと歪みのガスト係数 (Stage-3)

風速(m/s) (GL+185m)	GF_w	GF_ϵ			$(GF_\epsilon)_{mean}/(GF_w)^2$
		A 柱	C 柱	平均	
25.6	1.5	1.37	1.45	1.41	0.63
29.2	1.3	1.36	1.35	1.36	0.80
31.3	1.3	1.32	1.32	1.32	0.78
32.5	1.3	1.31	1.31	1.31	0.78

5. 風洞実験

(1) 模型および気流特性

実験で用いたモデルを図-13に、実験条件を表-11に示す。

図-13 風洞実験モデル

表-11 風洞実験の内容

模 型	気流特性	実験内容
・粗度付三次元ロッキング模型 ・筒身にトリップワイヤ	スパイヤーおよび粗度ブロックによる境界層乱流	・構造減衰をパラメータとした渦励振 ・高風速の応答

(2) 実験結果

構造減衰をパラメータとした渦励振の応答を図-14に示す。なお縦軸は振幅比 (y_{200}/d)、横軸は換算風速 $\{U/(f \cdot d)$ 、 U : 風速、 f : 振動数、 d : 筒身径}であり、パラメータは構造減衰 ($\delta=2\pi h$ 、 h : 減衰定数)およびスクレーン数 $S_c \{=4\pi h m/(\rho d^2)$ 、 m : 等価質量、 ρ : 空気密度}となる。これらの応答図については、振動が十分に発達していることをベンレコーダで確認した後、振動・風速の信号を取り込み処理したものである。

渦励振は、構造減衰の影響が大きく現れ、減衰増加に伴い振動は小さくなるのがわかる。また高風速時の振動はあまり大きくは発達していないことがわかる。

図-14 模型による渦励振応答結果

6. 渦励振に関する観測データと風洞実験との相関

風洞実験で得られた振幅比 y/d とスクレーン数 S_c の相関図を図-15に示す。同図に Stage-1 および Stage-2 で取得された渦励振時の振幅を併記し、風洞実験結果と比較する。

Stage-1 の観測データ $y_{max}/d=0.12$ に対応する風洞実験値は $y/d=0.14$ であり、両者はほぼ良い相関を示している。渦励振は減衰定数の増加、即ちスクレーン数の増加に従って渦励振は急激に小さくなる傾向にあることが分かる。また同図に、CICIND REPORT®発表の自立型鋼製煙突の実測データを併記する。この結果から渦励振とスクレーン数の相関は、1 筒身鉄塔支持型煙突と自立型煙突とは同程度の挙動となることが明らかになった。

図-15 振幅比とスクレーン数の相関

7. 結言

鉄塔支持型鋼製煙突の風応答に関する長期観測データと風洞実験から以下の知見が得られた。

- (1) 渦励振は、風洞実験のような安定した条件下では必ず発現するが、実機では、共振風速に近い一定風向の風が長時間持続した風況にのみ発生する。
- (2) 渦励振について、今回の長期観測および既往観測データ等を、スクレーン数をベースに風洞実験と比較すると、両者に強い相関が認められる。
- (3) ガスト応答について、共振風速域ではガスト成分に渦励振の影響が現れガスト応答も大きくなる傾向が認められたが、高風速域では風のカストファクターに対応する応答となる。
- (4) ガスト応答も渦励振と同様、減衰定数の増加に対し小さくなる傾向にある。

参考文献

- 1) 角本、他：下関火力鉄塔支持型煙突の振動について 構造物の耐風性に関する第1回シンポジウム 1999.6
- 2) 本間、他：鉄塔支持型鋼製煙突の風による振動特性 日本建築学会九州支部研究発表会 第41号・1 2002.3
- 3) 植田、他：鉄塔支持型鋼製煙突の渦励振に関する風洞試験 日立造船技報 第60巻4号 2000.1
- 4) 巻幡、他：鉄塔支持型鋼製煙突の風応答に関する実機観測、第17回風工学シンポジウム 2002.12
- 5) 日本建築学会 鋼構造設計規準 1970
- 6) 日本建築学会 鋼製煙突構造計算規準・同解説 1965
- 7) 日本建築センター 煙突構造設計施工指針 1982年版 1982
- 8) Svend Ole Hansen: VORTEX-INDUCED VIBRATIONS OF LINE-LIKE STRUCTURES CICIND's 50th Meeting 1998.9

[2002年10月17日原稿受理 2003年2月25日採用決定]