

ごみ焼却プラント建屋一体型鋼製煙突の風応答特性

Wind-induced Response Characteristics of a Steel Chimney Mounted on an Incineration Plant Building

吉田 勝利 YOSHIDA Katsutoshi JFE エンジニアリング シビルエンジニアリングセンター 設計部構造・設計グループ 課長
木村 基民 KIMURA Motomi 東洋テクノ(株) 建築本部設計部 部長
須田 健一 SUDA Kenichi (有) 都市未来建築コンサルタントネットワーク 取締役
吉田 昭仁 YOSHIDA Akihito 東京工芸大学 工学部 准教授
田村 幸雄 TAMURA Yukio 東京工芸大学 工学部 教授

要旨

ごみ焼却プラントの煙突は、地震や台風といった自然現象に対して十分な構造安全性をもって施設の安定した操業に寄与しなければならない。本論では、建屋一体型鋼製煙突の風洞実験をおこないその風応答特性について概説する。さらに、煙突の平面形状や高さ等により風応答特性は異なり、建屋一体型鋼製煙突の設計用等価風力係数が日本建築学会の煙突構造設計指針に示されている独立型 RC 煙突の値を上回るケースがあることを報告する。

Abstract:

In order to keep stable operation of incineration plants, chimneys need to be structurally safe from earthquakes and typhoons. To investigate the wind-induced response characteristics of steel chimneys with typical sectional shape and height, a series of wind tunnel tests are carried out. In some cases, the equivalent crosswind force coefficient of a steel chimney mounted on an incineration plant building is larger than that of an isolated concrete chimney.

1. はじめに

新潟県中越沖地震では、鉄筋コンクリート造の独立型煙突（以下、独立型 RC 煙突）の破損がごみ焼却プラント全体の機能停止に波及し、長期間にわたり被災地のごみ処理を周辺自治体の応援に頼らざるをえなかったことが報告されている¹⁾。さらに、2007年の建築基準法改正により高さ60mを超える煙突の設計は大臣認定の取得が義務づけられるようになったこともあり、これまで以上に煙突設計は構造安全性への配慮が求められるようになってきている。同年発行された「煙突構造設計指針」²⁾では主に独立型 RC 煙突の地震荷重と風荷重に対する最新の調査研究がまとめられ、煙突の構造設計法として実設計に活用されはじめています。

合理的な煙突形式として約10年前から採用されている建屋屋上から突出した鋼製煙突（写真1、以下、建屋一体型鋼製煙突）の設計においては、建屋と一体化している影響に配慮した設計が必要である。地震荷重については建屋との連成振動に配慮した設計手法が「煙突構造設計指針」²⁾にまとめられている一方で、風荷重についての調査研究は



At construction stage



When completed

写真1 建屋一体型鋼製煙突

Photo 1 A steel chimney mounted on an incineration plant building

十分に行われていない。特に、独立型 RC 煙突に比べて軽量であるため、突出長さが大きくスレンダーな形状になるほど風直交方向の渦励振および空力不安定振動が発生する可能性があり、風荷重が構造設計上の支配的な荷重になる。これらの性状は、煙突の質量、剛性、減衰といった振動特性、平面形状および建屋との位置関係等に応じて複雑に変化するため風洞実験^{3,4)}などでの予測を必要とする。

本論は、建屋一体型鋼製煙突について風力および風応答の風洞実験を行い、動的風力特性と風応答特性について概説し、今後の設計に生かすために設計用等価風力係数を検討したものである。

2. 建屋一体型煙突の諸元と風洞実験の目的

2.1 実験対象煙突

実験対象の建屋一体型鋼製煙突の諸元を表1と図1に表した。全10ケースで、煙突高さ、建屋高さ、煙突の平面形状、煙突の位置をパラメータとした。煙突高さは、これまで実績のある60mの他に80mを選択している。建屋の高さは、地下階レベルの設定や格納されるプラント機器の仕様によって決定されるが、30mを標準として20m、40mの3種類とした。煙突形状は、実績ある正方形の他に円形、正三角形の3種類とした。煙突の位置は、建屋短辺側壁面の中央を標準としてそれより建屋内側に入った位置、および建屋コーナー位置の3種類とした。

2.2 実験目的と実験装置

風洞実験は、風力実験と風応答実験からなる。

前者は煙突全体に作用する風力を評価する目的で、変動風力を正確に測定するため、軽量でかつ剛な模型を用いる。この実験によって、風向や建屋との位置関係および煙突平面形状の違いによる風力の特性を把握する。

表1 実験モデルの諸元

Table1 Sectional shapes and dimensions of wind tunnel models

No.	Shape	Chimney height, H(m)	Building height, h(m)	Chimney length (m)	Chimney breadth, B(m)	Aspect ratio
A0	Square	60	30	30	5.0	6.0
A1	Square	60	20	40	5.0	8.0
A2	Square	60	40	20	5.0	4.0
B1	Square	80	30	50	5.0	10.0
B2	Square	80	20	60	5.0	12.0
B3	Square	80	40	40	5.0	8.0
C1	Circle	60	30	30	7.0	4.3
C2	Triangle	60	30	30	8.0	3.8
D1	Square	Same as A0 except the position (Corner of building)				
D2	Square	Same as A0 except the position (Center of building)				

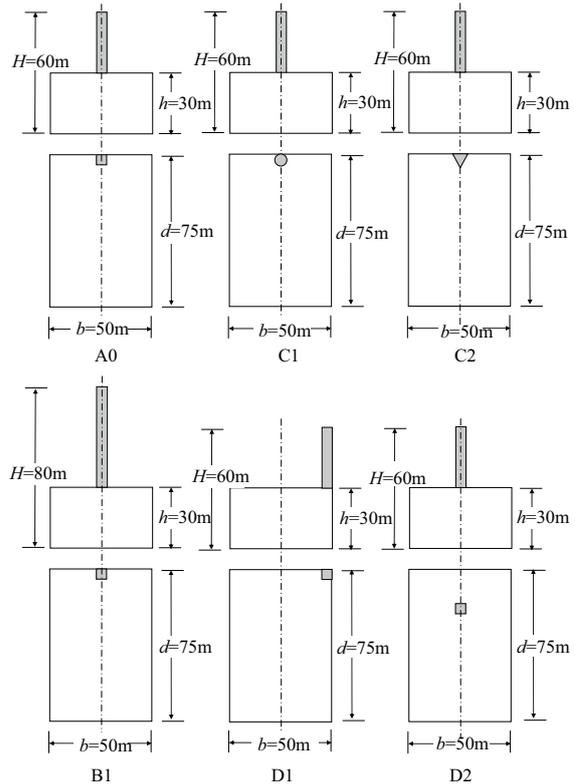


図1 実験モデルの例

Fig.1 Examples of experimental models

後者は煙突が振動する際の付加的な空気力も作用した状態での応答を測定でき、煙突の質量、剛性、減衰などの振動特性を模擬した弾性模型を使用する。この実験によって、渦励振や空力不安定振動を評価することができる。代表的な建屋一体型鋼製煙突の固有モードを図2に示す。風応答では1次モードが卓越し、建屋頂部を中心に煙突のみがほぼ直線状に変形する。弾性模型は煙突部分がロッキング振動するモデルとした。

実験は、東京工芸大学所有のエッフェル型境界層風洞において行った。実験模型の縮尺は1/100とした。実験気流は地表面粗度区分Ⅱ⁵⁾の風速鉛直分布を模擬した気流とすることを目標として、三角バリヤー・ラフネスブロックおよ

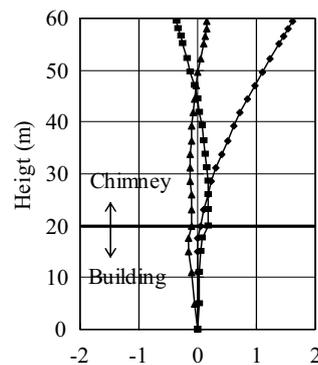


図2 固有モード

Fig.2 Mode shapes

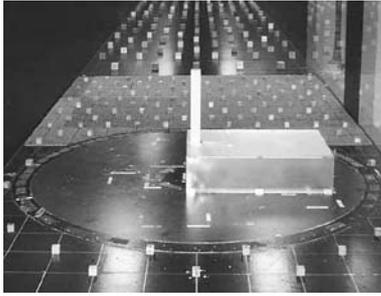


写真 2 風洞内の実験モデル
Photo2 Model in the wind tunnel

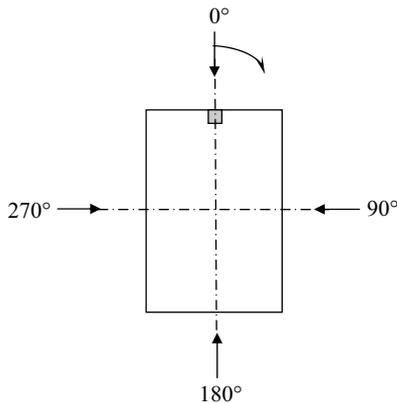


図 3 実験風向
Fig.3 Wind direction

び人工芝を用いて作成した(写真2)。実験風速の上限は、実風速で 40 m/s ~ 80 m/s に相当する。実験風向は図3に示すように定義した。

3. 風力実験

3.1 実験概要

A シリーズと B シリーズおよび D シリーズの正方形タイプは、A0 において風向き 0° ~ 180° 間を 5° ないし 10° ピッチで実験し、その他の正方形タイプについては A0 の風力実験結果を参考に、変動風力が大きくなると予想された風向とその前後の風向で実験した。円形タイプと三角形タイプの C1 と C2 は、風向 0° ~ 180° 間を 10° ピッチで実験し、かつ風力が大きくなった風向の前後でピッチを細かくした。計測する風力の定義を図4と図5に示す。

3.2 風力係数の定義

平均風力成分の各風力係数は(1)式で、変動風力成分の各風力係数は(2)式で表すことができる。円形タイプと三角形タイプの測定結果は、風軸で評価することとし、添え字の X を D, Y を L によみかえる。

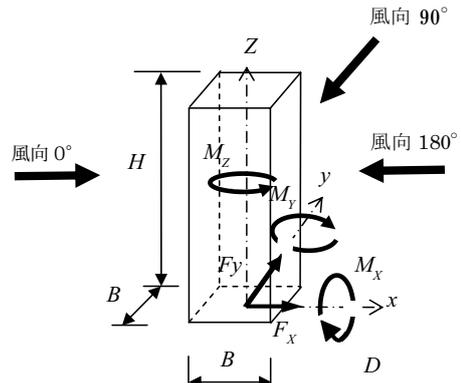


図 4 風力の定義(構造軸)

Fig.4 Definition of wind forces based on structural axes

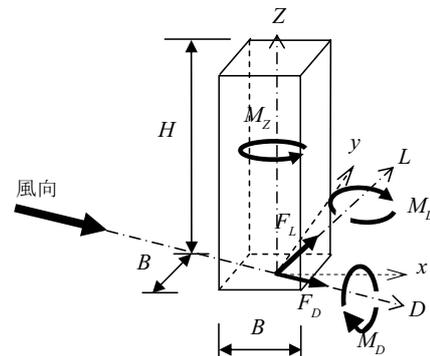


図 5 風力の定義(風軸)

Fig.5 Definition of wind forces based on wind axes direction

$$C_{F_x} = \frac{\bar{F}_x}{q_H B(H-h)} \quad C_{F_y} = \frac{\bar{F}_y}{q_H B(H-h)}$$

$$C_{M_x} = \frac{\bar{M}_x}{q_H B(H-h)^2} \quad C_{M_y} = \frac{\bar{M}_y}{q_H B(H-h)^2}$$

$$C_{M_z} = \frac{\bar{M}_z}{q_H B^2(H-h)} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$C_{F_{x,rms}} = \frac{\sigma_{F_x}}{q_H B(H-h)} \quad C_{F_{y,rms}} = \frac{\sigma_{F_y}}{q_H B(H-h)}$$

$$C_{M_{x,rms}} = \frac{\sigma_{M_x}}{q_H B(H-h)^2} \quad C_{M_{y,rms}} = \frac{\sigma_{M_y}}{q_H B(H-h)^2}$$

$$C_{M_{z,rms}} = \frac{\sigma_{M_z}}{q_H B^2(H-h)} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに、

- C_F : 平均風力係数
- C_M : 平均転倒モーメント係数, 平均振りモーメント係数
- $C_{F,rms}$: 変動風力係数
- $C_{M,rms}$: 変動転倒モーメント係数, 変動振りモーメント係数
- \bar{F} : 平均風力
- \bar{M} : 平均転倒モーメントまたは平均振りモーメント

σ_F : 変動風力
 σ_M : 変動転倒モーメントまたは変動振りモーメント
 B : 煙突の代表幅
 q_H : 煙突頂部高さにおける平均速度圧 (N/m^2)
 $q_H = \frac{1}{2}\rho_a V_H^2$
 ρ_a : 空気密度
 V_H : 煙突頂部高さにおける基準風速 (m/s)

3.3 測定結果

煙突高さと平面形状の違いによる平均風力係数と変動風力係数に着目する。正方形タイプの代表として A0 と B1, 円形タイプ C1, 正三角形タイプ C2 の平均風力係数と変動風力係数を図 6 に表す。また, 風力のパワースペクトル密度を図 7 に表す。なお, 建屋位置関係が異なる D1, D2 の測定結果については A0 とほぼ同様の結果だったため省略する。

(1) 正方形タイプ 60 m (A0) は, 風方向の平均風力, 風直交方向の変動風力ともに風向 90° 付近で最大になる。また, 変動風力係数は風直交方向の方が大きい。この傾向は正方形タイプ 80 m (B1) も同様であるが, 風力係数の値は 80 m の煙突が 60 m の煙突を上回り, 特に風直交方向の変動風力で顕著である。

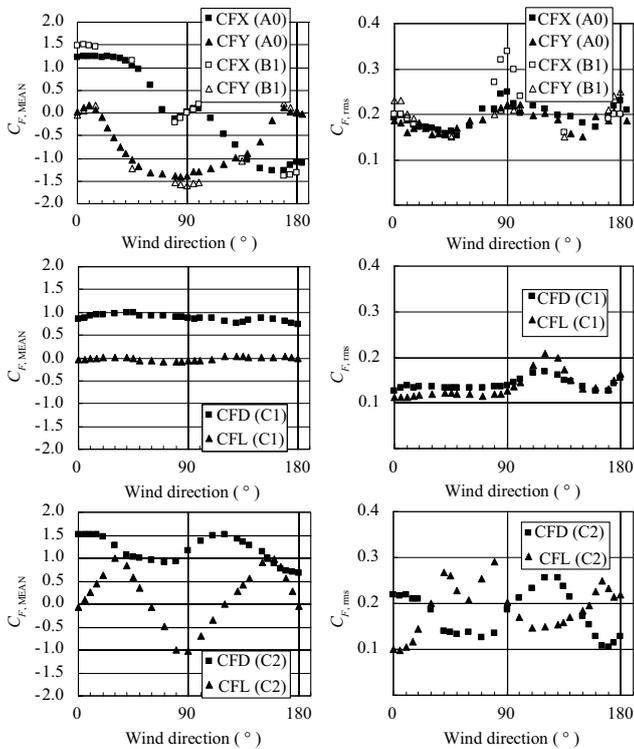


図 6 平均風力係数と変動風力係数

Fig.6 Mean and fluctuating (rms) wind force coefficients

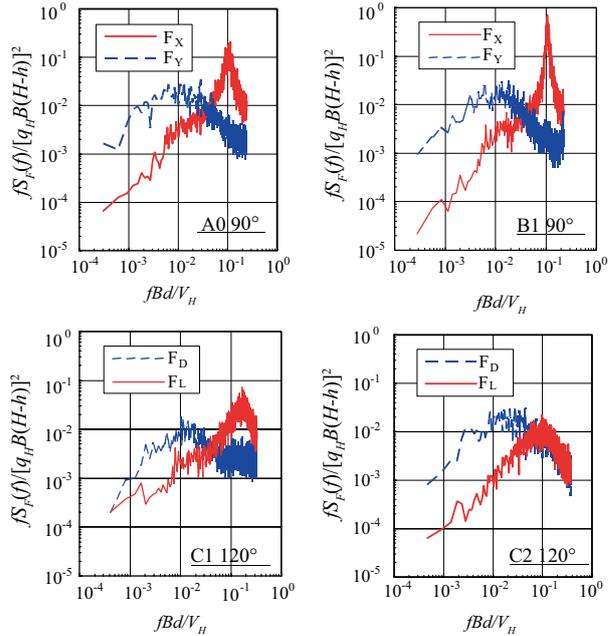


図 7 風力のパワースペクトル密度

Fig.7 Spectral density function of wind force

- (2) 円形タイプ 60 m (C1) は, 風方向の平均風力は風向 45° 付近で, 風直交方向の変動風力は風向 120° 付近で最大になる。
- (3) 正三角形タイプ 60 m (C2) では, 風軸に対する風力係数はほぼ 120° ごとに变化するが, 風方向の平均風力は一辺に直交する風向付近で, 変動風力は風向 120° 付近で最大になる。風直交方向の変動風力は 80° 付近で最大になる。
- (4) 風直交方向の変動風力は, カルマン渦成分と見られる周波数域でピークを有するスペクトル形状を示す。そのピークの値の大小が, 周期的変動風力の大小に対応している。
- (5) 正方形タイプ (A0, B1) のスペクトル形状を比較すると, 煙突の突出長さが長くなるにつれて, 風力パワースペクトル密度のカルマン渦成分のピーク値が大きくなる傾向がある。円形タイプ (C1) は, カルマン渦成分が卓越する風向は 120° および 180° である。正三角形タイプ (C2) は, 辺に直交する風向でのみカルマン渦成分が顕著に現れた。
- (6) ストローハル数は, 正方形タイプではいずれも $0.10 \sim 0.12$ 程度, 円形タイプ (C1) では $0.15 \sim 0.18$ 程度であり, 風向によってスペクトル形状は大きな影響を受ける。正三角形タイプ (C2) では辺に直交する風向でのみストローハル数が確認でき, 0.1 程度であった。
- (7) 煙突が風方向からみて建屋の前面近くに位置する場合よりも後方に位置する方が, カルマン渦成分が顕著であり, 建屋からの剥離流の影響で変動風力の性状が異なる。

4. 風応答実験

4.1 実験概要

風応答実験では、バネ支持した模型を用い、レーザー変位計により風直交方向の頂部応答変位を測定する。模型の剛性は板バネで、減衰はシリコンオイルによって調整する。実験装置の概念図を図8に示す。弾性模型に関する相似パラメータのうち、質量比あるいは回転慣性モーメントを一致させることは難しく、スクルトン数を一致させることを相似の目標とした。スクルトン数 S_c は(3)式によった。減衰定数は、0.5%, 1%, 2%の3とおりとした。本実験の回転慣性モーメント、減衰定数およびスクルトン数の実構造との比較を表2に示す。実験風向は風力実験の結果より、応答が卓越すると予測される風向を選定した。

$$S_c = 2\pi\zeta \times \frac{2I_b}{I_a} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 ζ : 減衰定数

I_b : 回転慣性モーメント ($=\rho_b A(H-h)^3/3$)
 I_a : 空気質量回転慣性モーメント ($=\rho_a B^3(H-h)^2/2$)
 ρ_b : 建物密度

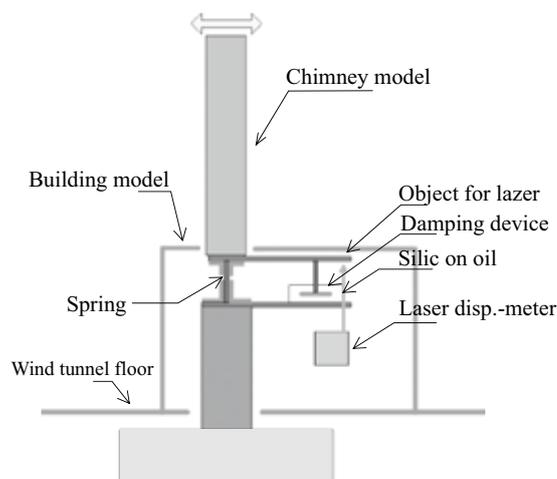


図8 振動実験装置

Fig.8 Set-up for wind-induced response tests

表2 実験モデルの振動特性実現値

Table 2 Comparison of dynamic characteristics of full-scale chimneys and wind tunnel models

Type	Full-scale Values				Model			
	Natural frequency, f_0 (Hz)	Roll moment of inertia, I_b ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	Damping ratio, ζ (%)	Scruton number, S_c	Roll moment of inertia, (I_b) _m ($\text{g} \cdot \text{cm}^2$)	Damping ratio, ζ (%)	Scruton number, S_c	Equivalent Damping ratio (%)
A0	1.56	3.099×10^7	0.5	28.4	—	—	—	—
			1.0	56.7	2.44×10^4	1.7	57.0	1.0
			2.0	113.4	2.55×10^4	3.2	112.0	2.0
A1	1.27	7.424×10^7	0.5	38.2	5.41×10^4	1.3	56.4	0.7
			1.0	76.5	5.52×10^4	1.7	77.0	1.0
			2.0	153.0	5.52×10^4	3.2	147.5	1.9
A2	2.21	0.868×10^7	0.5	17.9	1.44×10^4	0.5	18.3	0.5
			1.0	35.8	1.56×10^4	0.8	35.4	1.0
			2.0	71.6	1.56×10^4	1.6	69.5	1.9
B1	1.03	17.933×10^7	0.5	59.1	7.17×10^4	1.4	55.6	0.5
			1.0	118.2	7.28×10^4	2.9	115.4	1.0
			2.0	236.4	7.28×10^4	5.9	236.8	2.0
B2	0.95	33.888×10^7	0.5	77.7	20.80×10^4	1.3	107.1	0.7
			1.0	155.4	20.91×10^4	1.9	152.9	1.0
			2.0	310.9	20.91×10^4	3.8	311.7	2.0
B3	1.27	7.242×10^7	0.5	38.2	5.41×10^4	1.0	37.9	0.5
			1.0	76.5	5.52×10^4	1.3	72.3	1.0
			2.0	152.9	5.52×10^4	2.6	148.8	2.0
C1	1.64	4.122×10^7	0.5	13.8	3.09×10^4	1.1	17.4	0.6
			1.0	27.5	3.21×10^4	1.7	28.0	1.0
			2.0	55.0	3.21×10^4	3.3	53.4	2.0
C2	2.04	2.403×10^7	0.5	5.4	2.47×10^4	0.7	6.3	0.6
			1.0	10.7	2.59×10^4	1.3	10.9	1.0
			2.0	21.5	2.59×10^4	2.4	20.5	1.9
D1	1.56	3.099×10^7	0.5	28.4	—	—	—	—
			1.0	56.7	2.44×10^4	1.7	57.0	1.0
			2.0	113.4	2.55×10^4	3.2	112.0	2.0
D2	1.56	3.099×10^7	0.5	28.4	—	—	—	—
			1.0	56.7	2.44×10^4	1.8	59.5	1.0
			2.0	113.4	2.55×10^4	3.1	108.5	1.9

ρ_a : 空気密度 (= 1.22 kg/m³)

h : 建屋の高さ (= 30 m または 20 m, 40 m)

A : 煙突の断面積

B : 煙突の代表幅 (= 5 m(正方形), 7 m(円形)

または 8 m(正三角形))

H : 煙突の高さ (= 60 m または 80 m)

4.2 測定結果

正方形タイプの代表として A0, A1, A2 と B1, B2, B3 と円形タイプ C1, 三角形タイプ C2 の風直交方向無次元最

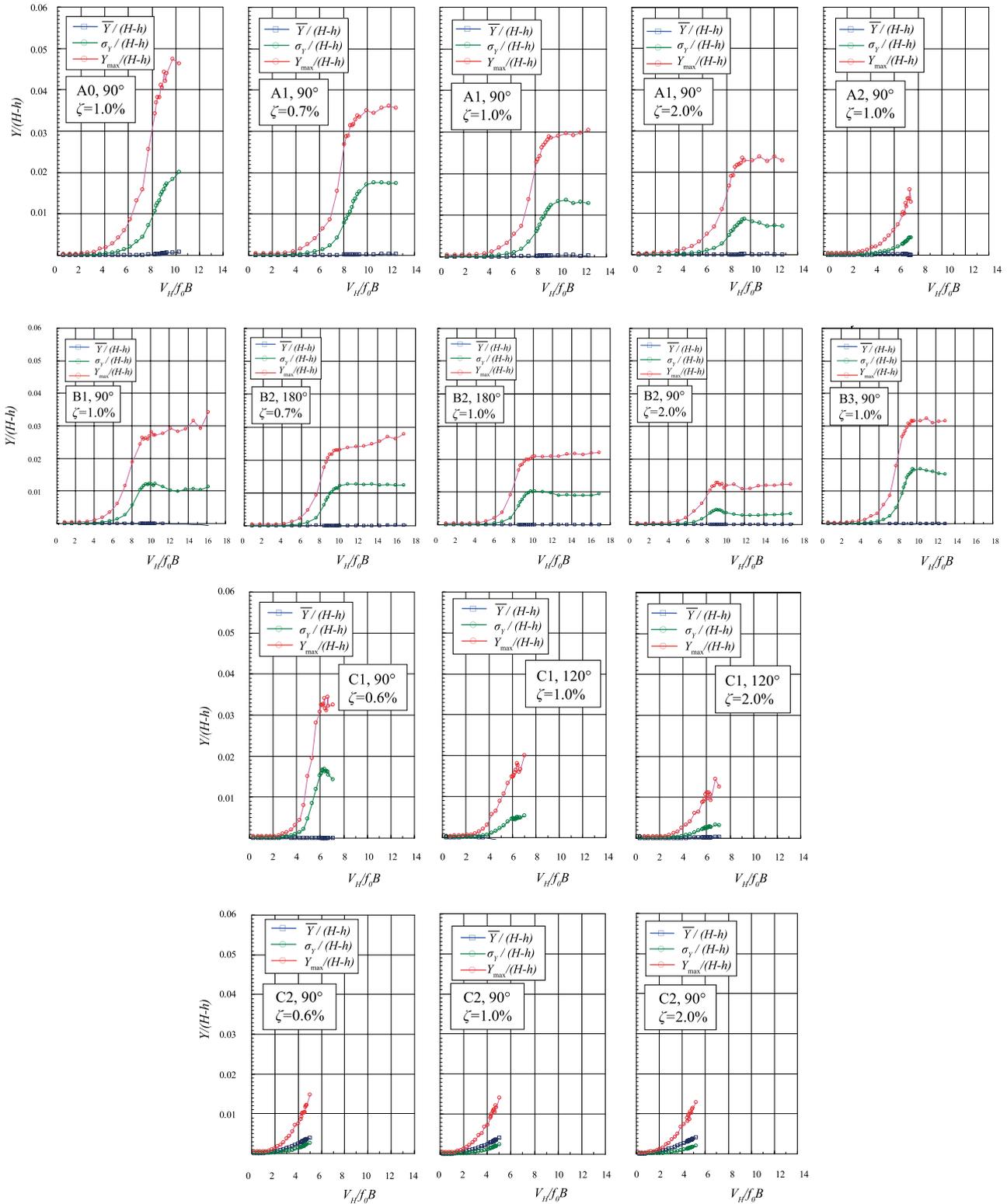


図9 無次元変位の風速変化

Fig. 9 Changes of non-dimensional displacement by wind velocity

大変位の測定データを図9にまとめた。ここでは、無次元風速(=V_H/f₀B)と無次元変位(=Y/(H-h))の関係、スクルーション数の影響について考察する。なお、建屋との位置関係が異なるD1, D2の測定結果についてはA0とほぼ同様の結果だったため省略する。

- (1) スクルーション数が小さくなるにつれて、変位が増加する。
- (2) 正方形平面を有するタイプ(A0, B1)では、煙突位置や突出長さ・煙突高さに関わらず、変位は無次元風速V_H/f₀B=4付近から急に大きくなり始める。
- (3) 正方形タイプ60m(A0)はスクルーション数に関わらず、実験の上限風速(実風でV_H=80m/s)まで、無次元最大応答はほぼ単調に増加する。なお、この上限風速はほぼ共振風速(ストローハル数の逆数から算出)に相当する。突出長さが40mと長いタイプ(A1)では、共振風速が上限風速以下になるが、無次元最大応答は共振風速付近で頭打ちとなる。
- (4) 正方形タイプ80m(B1)では、無次元最大応答は共振風速付近でわずかな極大になった後、実験上限風速まで再び緩やかに増加する。
- (5) 円形タイプ60m(C1)では、共振風速は実験の上限風速よりわずかに小さい程度である。スクルーション数が小さい場合は共振風速付近で明確な極大値をとるが、スクルーション数が大きくなると極大値は明確でなくなり単調増加になる。
- (6) 正三角形タイプ60m(C2)では、共振風速は実験の上限風速をかなり上回り、風応答はスクルーション数に依らず、風速とともに単調増加している。
- (7) いずれのケースでも、共振風速を超えてから無次元変位が急激に大きくなる空力不安定振動の現象はみられない。

5 設計用等価風力係数

風力実験および風応答実験の結果から、文献5)の等価風力係数算定法にならって設計用風力係数を定める。

5.1 風方向の設計用風力係数

風方向の設計用風荷重は(4)式で与えられる。

$$W_f(Z) = q_H C_f(Z) G_f A(Z) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここでは、地上高さZにおける設計用風力係数C_f(Z)が(5)式で表されるように分布するものと仮定して、同式中の係数C₀およびβを求めることとした。

$$C_f(Z) = C_0 (Z/H)^\beta \quad \dots\dots\dots (5)$$

建屋一体型鋼製煙突に上式を適用すると、風力実験で求

表3 風方向の設計用風力係数
Table3 Along-wind force coefficient

Type	A0	A1	A2	B1	B2	B3	C1	C2	D1	D2
Wind direction	85	90	85	90	90	85	45	30	95	90
β	0.11	0.23	1.82	0.33	0.29	0.23	1.08	0.32	0.10	0.20
C ₀	1.36	1.49	0.98	1.82	1.81	1.72	1.34	1.73	1.39	1.37

められた風力係数C_Fおよび転倒モーメント係数C_MはC_f(Z)によって、(6)式と(7)式のように表される。

$$C_F = \frac{1}{H-h} \int_h^H C_f(Z) dZ$$

$$= \frac{C_0}{1-\beta} \frac{H}{H-h} \left[1 - \left(\frac{h}{H} \right)^{1+\beta} \right] \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$C_M = \frac{1}{H-h} \int_h^H C_f(Z) \times (Z-h) dZ$$

$$= C_0 \left(\frac{H}{H-h} \right)^2 \left[\frac{1}{2+\beta} \left\{ 1 - \left(\frac{h}{H} \right)^{2+\beta} \right\} - \frac{1}{1+\beta} \frac{h}{H} \left\{ 1 - \left(\frac{h}{H} \right)^{1+\beta} \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (7)$$

(6)式と(7)式を解くことによって、係数C₀およびβを求めることができる。結果を表3に示す。

5.2 風直交方向の設計用等価風力係数

煙突基部に作用する転倒モーメントM_Bと煙突の回転角θの関係は(8)式で表される。

$$M_B = \theta \cdot K_\theta \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、K_θ：回転ばね剛性(=2πf_θ)²・I_θ)

f_θ：固有振動数

I_θ：回転慣性モーメント

実験で得られた無次元最大変位と等価な回転角θを生じる等価転倒モーメントM_Bは、(9)式で与えられる。

$$M_B = \frac{Y_{\max}}{H-h} \cdot K_\theta \quad \dots\dots\dots (9)$$

Y_{max}：煙突頂部の最大変位

H：煙突高さ(=60mまたは80m)

h：建屋部分の高さ(=30mまたは20m, 40m)

ここで、転倒モーメントM_Bを(10)式で表される設計用風荷重分布⁵⁾から求められるものと仮定して、それが(9)式と等価になるような、設計用等価風力係数C_rを求める。

$$W_r(Z) = 0.8\rho V_r^2 C_r \left(\frac{Z-h}{H-h} \right) B \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに、

- $W_r(Z)$: 地上高さ Z における風荷重
- C_r : 設計用等価風力係数
- ρ : 空気密度
- V_r : 煙突の 2/3 高さにおける風速
- B : 模型における煙突の代表幅 (= 5 cm (正方形), 7 cm (円形) または 8 cm (正三角形))

$$= 0.8\rho V_r^2 C_r B \times \int_h^H \left(\frac{Z-h}{H-h} \right) (Z-h) dZ$$

$$= 0.8\rho V_r^2 C_r B \times \frac{(H-h)^2}{3}$$

これを (9) 式と等値すると、設計用等価風力係数 C_r は (11) 式のように求めることができる。

(10) 式から転倒モーメントを求めると、下式となる。

$$M_B = \int_h^H W_r(Z) \times (Z-h) dZ$$

$$C_r = \frac{M_B}{0.8\rho V_r^2 B \times \frac{(H-h)^2}{3}} \dots\dots\dots (11)$$

ここでは代表として、正方形タイプ 60 m (A0) と正方形タイプ 80 m (B1)、円形タイプ 60 m (C1) の無次元風速と風直交方向の設計用等価風力係数 C_r の関係を **図 10** に示す。ここでは、参考のためすべての風速時での C_r の値を求めた。また、比較のために同じ減衰定数をもつ独立型 RC 煙突の風力係数²⁾を点線で表すとともに、建築基準法で規定されている設計基準風速の範囲 (30 m/s ~ 46 m/s) を表した。なお、正三角形タイプ 60 m (C2) では顕著な渦励振が発生しなかったため省略した。

- (1) 等価風力係数 C_r は、無次元風速が小さい範囲では小さいが、無次元風速とともに徐々に増大する。共振風速が実験の上限風速以下になるケースでは、共振風速に近づくにつれて等価風力係数が増大し、共振風速付近で極大値をとり、無次元風速がさらに大きくなると等価風力係数は逡減する。
- (2) 正方形タイプ 60 m (A0) は、独立型 RC 煙突の風力係数とほぼ同じである。一方、正方形タイプ 80 m (B1)、円形 60 m タイプ (C1) は独立型 RC 煙突の風力係数を上回る。
- (3) 正方形タイプ 60 m (A0) と円形タイプ 60 m (C1) は、共振風速が設計風速を超えるが、正方形タイプ 80 m (B1) の場合は、共振風速が設計風速の範囲内に現れる。

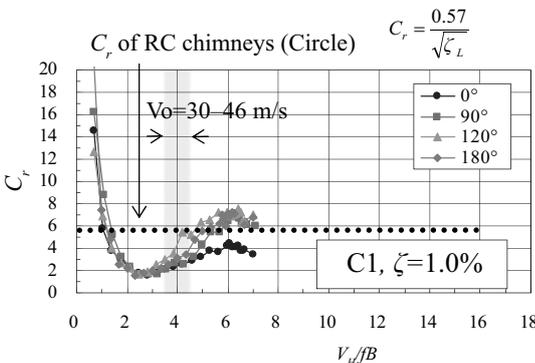
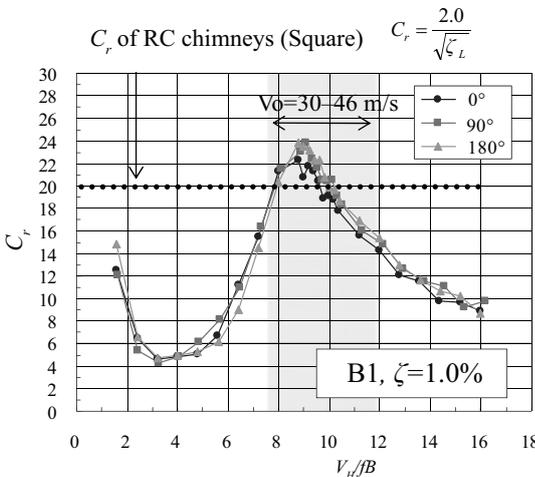
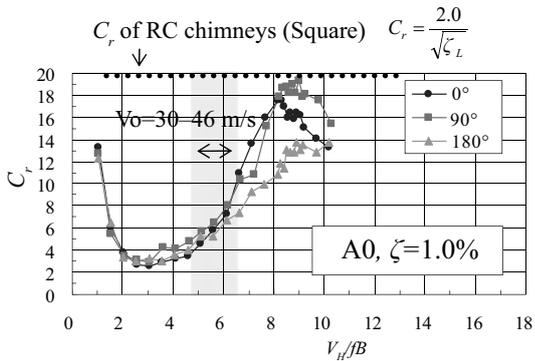


図 10 風直交方向の設計用等価風力係数
Fig.10 Equivalent crosswind force coefficient

6. おわりに

本論では建屋一体型鋼製煙突の風洞実験を行い、風応答特性について検討するとともに、設計で使用できる設計用等価風力係数について報告した。煙突の平面形状および高さによっては、独立型 RC 煙突に比較して設計用等価風力係数が大きくなる場合もあるが、空力不安定振動といった構造安全性をそこの現象は確認されなかった。

ごみ焼却施設の煙突は、排ガス処理設備として重要なプラント機能を担うとともに、施設全体の意匠上のシンボルである。これまで蓄積されている独立型 RC 煙突の風洞実験データをあわせて活用し、建設地の風況特性、施設規模や敷地の有効利用などといった地域のニーズに対応した最適

な煙突構造形式を提案していきたい。

参考文献

- 1) 新潟県中越沖地震記録誌. 新潟県. 2009-07-16
- 2) 煙突構造設計指針. 日本建築学会. 2007-11.
- 3) たとえば, 飯田泰彦, 吉田勝利, 岡本紀明, 木村基民, 福本努, 趙康杓. ごみ焼却施設の RC 煙突における風応答特性. 日本建築学会技術報告集. 2001, no. 12, p. 35-40.
- 4) 飯田泰彦, 吉田勝利, 岡本紀明, 木村基民, 福本努, 趙康杓. ごみ焼却施設の RC 煙突における風応答特性 正方形断面の隅角部形状に着目して. 日本建築学会技術報告集. 2002, no. 15, p.71-76.
- 5) 建築物荷重指針・同解説 (2004). 日本建築学会. 2004-09-15.



吉田 勝利



木村 基民



須田 健一



吉田 昭仁



田村 幸雄