

鉄塔支持型煙突の空力特性に及ぼす煙突附設物と風向角の影響

高瀬, 賢佑
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

大坪, 和弘
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

鶴, 則生
九州大学大学院人間環境学府

竹内, 崇
神戸大学大学院工学研究科建築学専攻

他

<https://doi.org/10.15017/1485048>

出版情報 : 都市・建築学研究. 25, pp.49-54, 2014-01-15. 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 :

鉄塔支持型煙突の空力特性に及ぼす煙突附設物と風向角の影響

Wind Force Acting on Tower-supported Steel Stack Affected by its Accompanied Structures and Attack Angle

高瀬賢佑*, 大坪和広*, 鶴 則生**, 竹内 崇***, 友清衣利子****, 前田潤滋****

Kensuke TAKASE, Kazuhiro OTSUBO, Norio TSURU,
Takashi TAKEUCHI, Eriko TOMOKIYO and Junji MAEDA

Wind forces acting on a tower-supported steel stack affected by its ancillary equipment, such as a steel tower and stairway, were investigated by a wind tunnel test. A one-hundredth-scale rigid model of upper half of a tower-supported steel stack of 200m in height was used and the wind pressure on the surface of stack model was measured under a uniform flow. As a result, it was found that the drag coefficient and fluctuating lift coefficient of the model stack with the ancillary equipment were smaller than those on a pure stack model, especially near the top of the stack. Fluctuating lift coefficient was dependent to wind direction, and the coefficient at attack angle of 45 degrees was smaller than those at the angle of 0 degrees.

Keywords: *Wind Tunnel Experiment, Tower-supported Steel Stack, Accompanied Structure, Attack Angle, Wind Force*

風洞実験, 鉄塔支持型煙突, 附設物, 風向角, 風力

1. 序

火力発電所の鋼製煙突はその筒身の高さから強風の影響を受けやすく、筒身下流へのカルマン渦の放出により風直角方向に周期的な外力が作用する。この渦の放出周波数と煙突の1次固有周波数が一致するとき、一般に減衰が小さい高煙突は風直角方向に大きな振動いわゆる渦励振が発生するため、実大煙突を対象とした観測^{1,2)}や風洞実験^{3,4)}による研究が行われ、その空力特性が調べられてきた。筒身を鉄塔型架構で支える鉄塔支持型煙突においても渦励振現象が観測^{5,6,7,8)}されているが、煙突とそのまわりに附設する支持鉄塔や維持管理用の階段などから構成される鉄塔支持型煙突は形状が非常に複雑であるため、その空力特性はほとんど検討されていない。著者らは鉄塔支持型煙突に対する風洞実験を行い、支持鉄塔の正面に風を受ける場合に、附設物が煙突の空力特性に及ぼす影響を報告している^{9,10,11)}が、実際の観測^{5,6,7,8)}では支持鉄塔正面に対して一定の風向角がある場合に煙突に大きな渦励振が発生している。本報告は鉄塔支持型煙突の空力特性に及ぼす風向角の影響を風洞実験で検討

するとともに、その空力特性の変化に寄与する煙突附設物の影響を個々に整理する。

2. 実験概要及び試験体概要

実験は九州大学大学院人間環境学研究院のエッフェル型吸込式風洞を用いて行った。風洞断面内での各計測器の配置状況を図1に示す。実験で用いた鉄塔支持型煙突模型は煙突、支持鉄塔、鉄塔裏打ち材、および階段から構成されている。図2(a)に示すように模型は塔高200mの鉄塔支持型煙突の上半分を実物の1/100スケールで作成した。図2(b)に示すように、煙突部の高さは980mm、φ56mmで、鉄塔部の高さは830mm、上部開きは85mm、下部開きは210mmで、階段幅は8.6mmである。また、煙突に附設する支持鉄塔と階段が空力特性に及ぼす影響を確認するため、煙突単体の場合、支持鉄塔のみを取り付けた場合および支持鉄塔と階段を取り付けた場合の3ケースで実験を行った。鉄塔モデル、鉄塔+階段モデルの写真をそれぞれ図2(c)、(d)に示す。

図3に示すように階段は真鍮棒と網板で模擬され、煙突にらせん状に取り付けられているため、各断面は風向方向に非対称となる。煙突部模型には図2(b)に示すように鉛直方向に断面Aから断面Sまで15箇所、図4に示すように各断面で円周方向に8点、計120点の圧力計測孔を設けた。また、実観測に対応した高いレイノルズ数

* 都市共生デザイン専攻修士課程

** 人間環境学府

*** 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻

**** 都市・建築学部門

の流れ場を風洞実験で再現するため、図3に示すように、煙突部周りにφ1mmの丸鋼を2.75mm間隔で貼付し、粗度をつけた。煙突模型の円周方向の計測点は8点のみであるため、煙突を5度間隔で回転させながら10回の計測を行うことで、円周方向72点でデータを取得する。圧力計測には3台の多点圧力スキャナを用い、サンプリング周波数は250Hz、計測時間は20秒である。

実験風向は図4に示すように支持鉄塔正面に風が当たる風向角0°と45°の2通りとし、実験風速は12m/sである。風洞内の風速は試験体上部に設置した超音波風速計で確認した。風速計のサンプリング周波数は1000Hzで、計測時間は圧力計測と同じ20秒とした。

3. 煙突に作用する風力

3.1 風力および風力係数の算出

風洞実験で取得した風圧力をもとに下式により、単位長さあたりの抗力と横力を求めた。図4に示すように抗力は風流れ方向の風力、横力は流れ直交方向の風力とする。風力の算出には45度間隔で8点(0度、45度、…、315度)での風圧力を用いた。

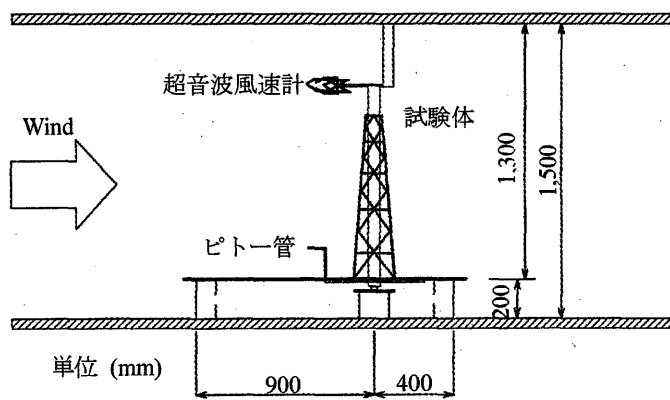


図1 風洞実験概要

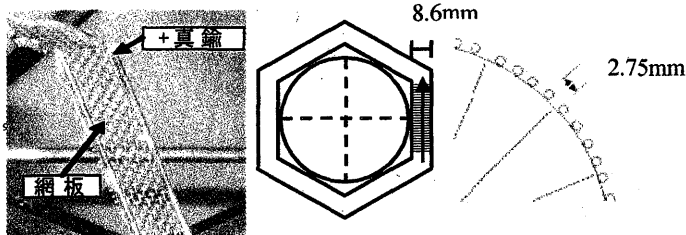


図3 階段とリブの設置状態

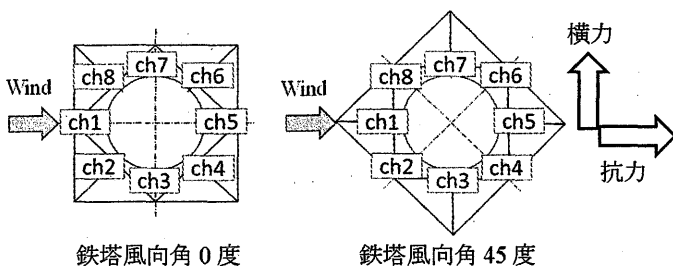


図4 モデルの風向角と風力の方向

$$(\text{単位長さ当たりの抗力}) \frac{Drag(t)}{dz} = \sum_{i=1}^n \int_{\theta_i - 0.5\Delta\theta}^{\theta_i + 0.5\Delta\theta} p_i(t) \cos \phi \cdot rd\phi$$

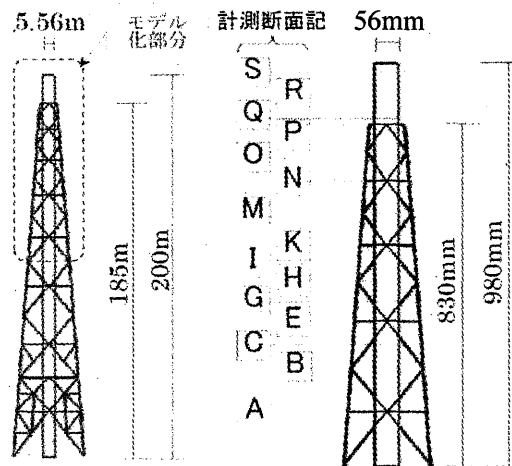
$$(\text{単位長さ当たりの横力}) \frac{Side(t)}{dz} = \sum_{i=1}^n \int_{\theta_i - 0.5\Delta\theta}^{\theta_i + 0.5\Delta\theta} p_i(t) \sin \phi \cdot rd\phi$$

ここで、 dz :単位長さ、 i :チャンネル番号(1~8)、 n :チャンネル数、 p_i : i 番目の計測点の t 秒時の圧力(Pa)、 θ_i : i 番目の計測点の角度(rad.)、 $\Delta\theta$:計測点の間隔(rad.= $\pi/4$)である。求めた単位長さあたりの抗力と横力を煙突の直径および平均風速での速度圧で除した値をそれぞれ抗力係数、横力係数とし、単位長さあたりの横力の標準偏差を煙突の直径および速度圧で除した値を変動横力係数とした。

3.2 煙突に支持鉄塔のみを取り付けた場合

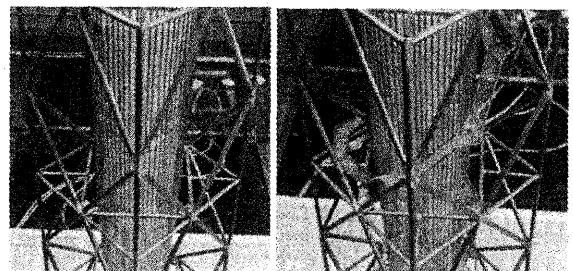
煙突単体モデルと鉄塔の風向角が0度と45度の場合の支持鉄塔のみを取り付けたモデルの各断面での抗力係数、横力係数、変動横力係数をそれぞれ図5(a), (b), (c)に示す。

図5(a)の抗力係数の比較では、鉄塔上部の位置において支持鉄塔を取り付けたモデルの抗力係数は煙突単体モデルよりも小さい値を示した。また、支持鉄塔付きモデルの抗力係数を鉄塔の風向角で比較すると、多くの断面で鉄塔風向角0度時の抗力係数の方が45度の場合よりも大きいことがわかる。抗力係数の高さによる違いに着



(a) 実機サイズ

(b) 試験体



(c) 鉄塔モデル

(d) 鉄塔+階段モデル

図2 試験体概要

目すると、支持鉄塔の有無や風向角の違いにかかわらず、煙突頂部の断面 S での抗力係数が最大となる。

図 5(b)の横力係数では多少のばらつきはあるが、いずれのモデルも 0.07 以下と非常に小さい値を示した。煙突も支持鉄塔も風向に対して左右対称であるため、横力の平均値がほぼ 0 になるためである。

図 5(c)の変動横力係数の比較では、鉄塔上部の位置において支持鉄塔を取り付けたモデルの変動横力係数は煙突単体モデルよりも著しく小さい値を示した。また、支持鉄塔付きモデルの変動横力係数を鉄塔風向角で比較すると、鉄塔風向角 0 度時の変動横力係数の方が 45 度の

場合よりも小さいことがわかる。

支持鉄塔で囲まれた断面はすべて煙突単体の場合より抗力係数が同様に小さくなるので、代表して断面 E での煙突単体モデルと支持鉄塔付きモデル（鉄塔風向角 0, 45 度）の抗力の時刻歴波形を図 6-1 に示す。一方、変動揚力係数は鉄塔の有無で著しく変化し、とくに鉄塔上部位置断面 O を境にその特性が変わるので、断面 O での変動横力係数に着目して、煙突単体モデルと支持鉄塔付きモデル（鉄塔風向角 0, 45 度）の横力の時刻歴波形を図 6-2 に示す。図 6-1 では煙突単体モデル、支持鉄塔付きモデル鉄塔風向角 0 度、45 度となるにつれ抗力の平均

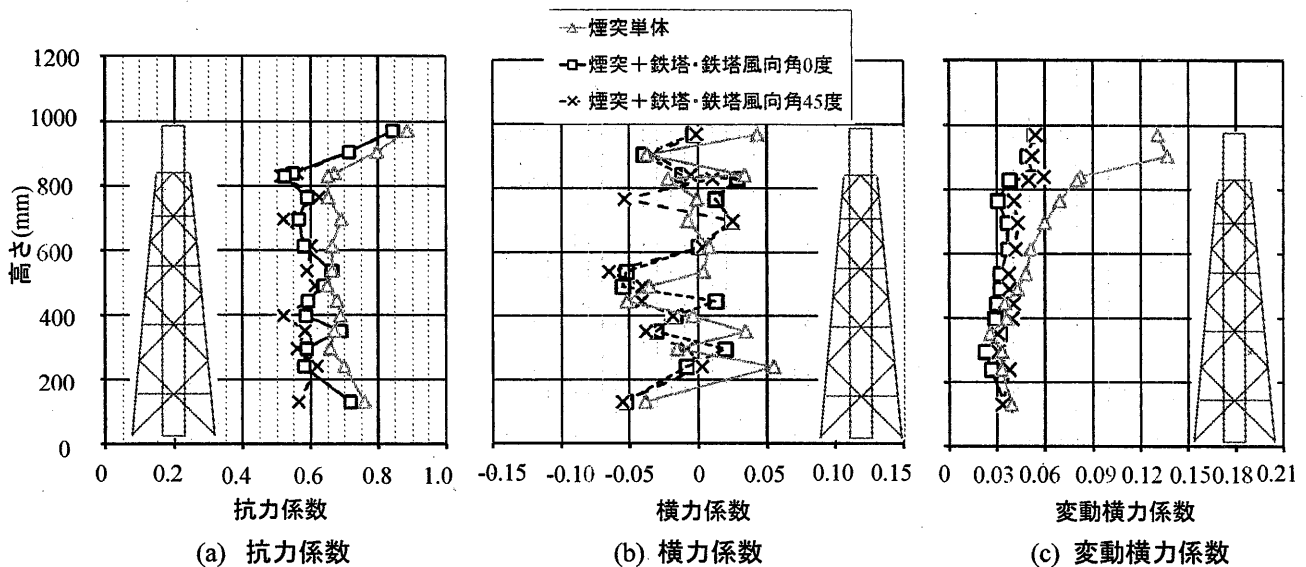


図 5 各断面での抗力・横力・変動横力係数比較 煙突単体, 煙突+鉄塔(鉄塔風向角 0 度, 45 度)

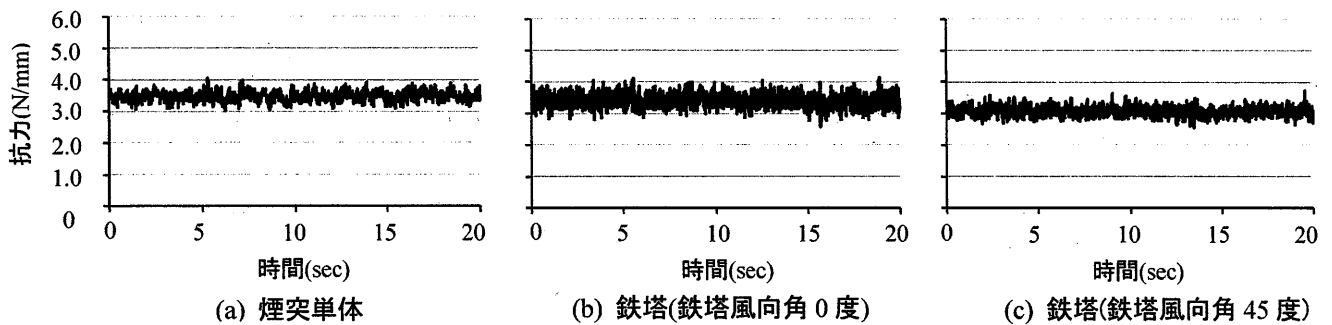


図 6-1 煙突単体, 鉄塔モデルでの抗力時刻歴波形 (断面 E)

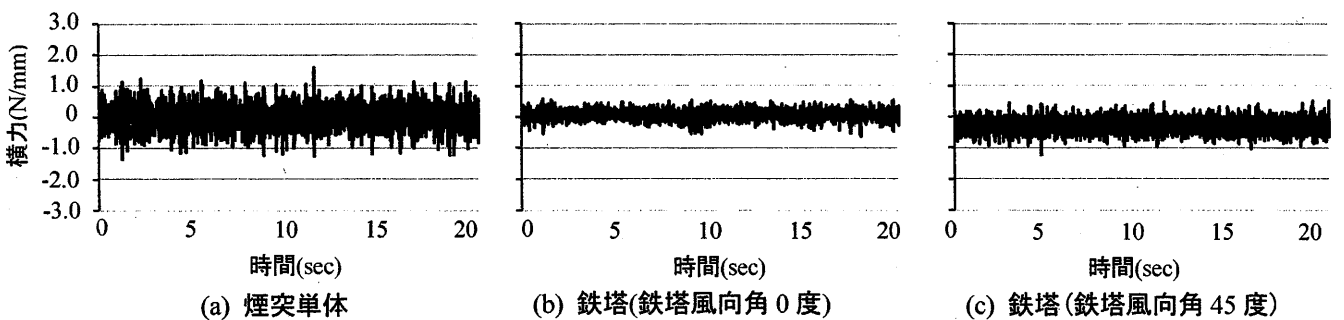


図 6-2 煙突単体, 鉄塔モデルでの横力時刻歴波形 (断面 O)

値が小さくなっていることが確認され、図 6-2 では横力の平均値はすべてのモデルでほぼ 0 であるが、煙突単体モデル、支持鉄塔付きモデル鉄塔風向角 45 度、0 度となるにつれ横力の変動が小さくなっていることが確認でき、支持鉄塔によって煙突の風直交方向の振動が抑えられるが、鉄塔風向角 45 度の場合はその抑制効果が小さくなる。

図 7 に図 5(a)で抗力係数が最も大きな値を示した断面 S と、他断面位置を代表して断面 E での抗力係数の算出に使用した 8 点での風圧力の抗力方向成分を示す。断面 S は煙突単体モデルでの結果、断面 E は煙突単体モデルと煙突+鉄塔モデル(鉄塔風向角 0 度、45 度)での結果である。図 7 から、煙突単体モデルの 2 つの断面を比べると断面 S は断面 E より断面位置 0 度での風圧の抗力成分は小さいが、断面位置 135 度、180 度、225 度ではかなり大きく、断面 S では煙突背面での負圧が大きいため図 5(a)のように断面 S の抗力係数が大きくなる。また、断面 E において煙突単体モデルと煙突+鉄塔モデル(鉄塔風向角 0 度、45 度)を比べると、煙突+鉄塔モデルは煙突単体モデルより煙突正面(断面位置 0、45、315 度)での圧力が小さくなり鉄塔の影響が顕著にみられるが、煙突背面(断面位置 135~225 度)では、圧力はほとんど変わら

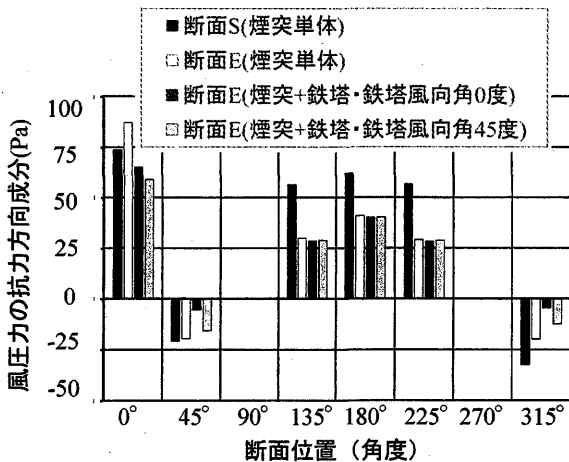
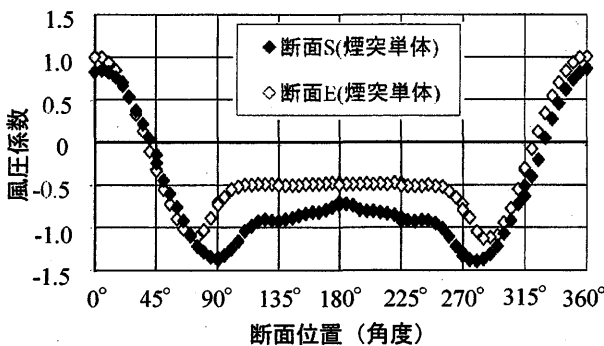


図 7 各断面位置での風圧力の抗力成分



(a) 煙突単体モデル風圧係数(断面 S, E)

ず鉄塔の影響はほとんど見られない。断面 E において煙突+鉄塔モデルの風向角の違いを比べると、断面位置 45 度、315 度において鉄塔風向角 0 度ときの風圧力の絶対値が小さくなっている。

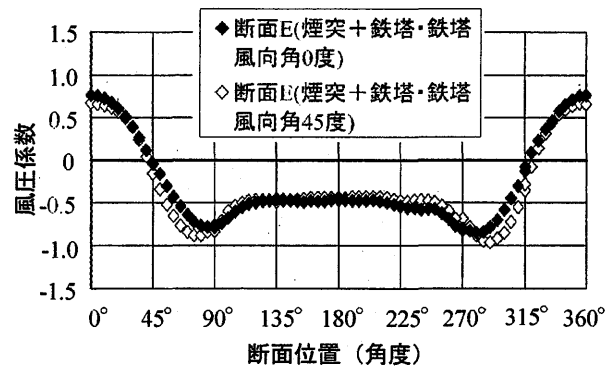
図 8 には図 7 で着目した断面での風圧係数の円周方向分布を示す。モデル正面を 0 度とし、反時計回りに 5 度間隔 72 点での風圧力を速度圧で除した値である。図 8(a) は煙突単体モデルの断面 S と断面 E の比較を、図 8(b) は支持鉄塔を取り付けたモデルの断面 E での、鉄塔風向角 0 度と 45 度の比較を示す。図 8(a)の煙突単体モデルでは煙突背面全体で、断面 E よりも断面 S の風圧係数が大きい。煙突最上部である断面 S は、他の断面とは風の流れが違い、三次元的な渦が作用していると考えられる。図 8(b)の鉄塔風向角による比較を見ると、煙突正面(断面位置 0 度、360 度)付近で鉄塔風向角 45 度の風圧係数が鉄塔風向角 0 度の場合より小さいが、鉄塔風向角 45 度ではモデル正面の風上に鉄塔支柱材が位置するためと考えられる。また、鉄塔風向角 0 度と 45 度では、風圧係数が極小となる角度が変化するが、鉄塔風向角によって取り付けられた鉄塔部材の位置が異なり、煙突周りに発生する渦の剥離の位置が変化したためと考えられる。

3.3 煙突に支持鉄塔と階段を取り付けた場合

風向に対して非対称に設置された階段が煙突周りの風力特性に及ぼす影響を検討するため、煙突に支持鉄塔および階段を取り付けたモデルの各高さ断面での抗力係数、横力係数、変動横力係数をそれぞれ図 9(a), (b), (c)に示す。

図 9(a)から、階段と鉄塔を取り付けたモデルの場合も図 5 での比較と同様に、多くの断面で鉄塔風向角 0 度の抗力係数は 45 度の場合よりも大きい。図 9(b)に示すように、横力係数は風向角の違いによっていくつかの断面で大きな差が生じた。また、図 9(c)で変動横力係数についてほとんど階段の影響は確認されなかった。

図 10(b)で風向角により横力係数の値に大きな差が生じた支持鉄塔と階段付きモデル(鉄塔風向角 0、45 度)



(b) 煙突+鉄塔モデル断面 E 風圧係数

図 8 煙突の風圧係数分布

の断面 M の横力の時刻歴波形を示す。どちらのモデルでも変動の大きさはほとんど同じであるが、図 10 から、鉄塔風向角 0 度 のとき、横力の平均値が 0 から大きくシフトしていることがわかる。

図 11 に横力係数の算出に使用した 8 点の風圧力の横力方向成分を示す。支持鉄塔および階段を取り付けた場合の横力係数に風向角の影響が大きく表れた断面の一例として断面 M の結果に着目する。図 11 において、鉄塔風向角 0 度 の場合に着目すると、風方向に対して対称に位置する 90 度と 270 度の計測点での値は、絶対値がほぼ等しく正負が異なるために横力方向成分をほぼ打ち消す。鉄塔風向角 45 度 の場合には、断面位置 90 度と 270 度および 135 度と 225 度の計測点で同様に、互いに圧力の横力方向成分をほぼ打ち消している。しかし、その他の角度では風方向に対して対称な位置の計測点での圧力値が異なっており、横力方向成分を打ち消すことができない。鉄塔風向角 0 度 の場合の方が鉄塔風向角 45 度 の場合よりも、正側の横力方向成分が大きいため、図 9(b) で示したような差が生じたものと考えられる。

図 12 に図 10 と図 11 で着目した断面 M での風圧係数

の分布について、支持鉄塔および階段を取り付けたモデルの鉄塔風向角 0 度 と 45 度 の場合の結果を示す。鉄塔風向角の違いにかかわらず、断面位置 80 度と 280 度付近で生じる風圧係数の極小値に差が生じた。特に鉄塔風向角 0 度 の場合でその差が顕著で、断面位置 80 度付近の風圧係数が大きい。鉄塔風向角の変化と共に階段の位置が 45 度変化したため、煙突の左右の風圧係数の極小値に違いが生じたものと考えられる。鉄塔風向角 0 度 と 45 度 の場合の、断面 M の鉄塔支柱材と階段、煙突の略断面図をそれぞれ図 13(a) と (b) に示す。鉄塔風向角 0 度 の場合は断面位置 45 度 から 90 度 付近に階段が位置し、断面 M とは断面位置約 70 度 で交差する。鉄塔風向角 45 度 の場合、階段は断面位置 90 度 から 135 度 付近に位置し、断面 M とは断面位置約 115 度 で交差する。この階段が断面位置 0~180 度 側の渦の剥離に影響を及ぼし、断面位置 80 度 付近に生じる風圧係数の絶対値は、鉄塔風向角 45 度 よりも風向角 0 度 の場合が小さくなったと考えられる。

4. まとめ

鉄塔支持型煙突の煙突部分の風力特性に及ぼす支持鉄

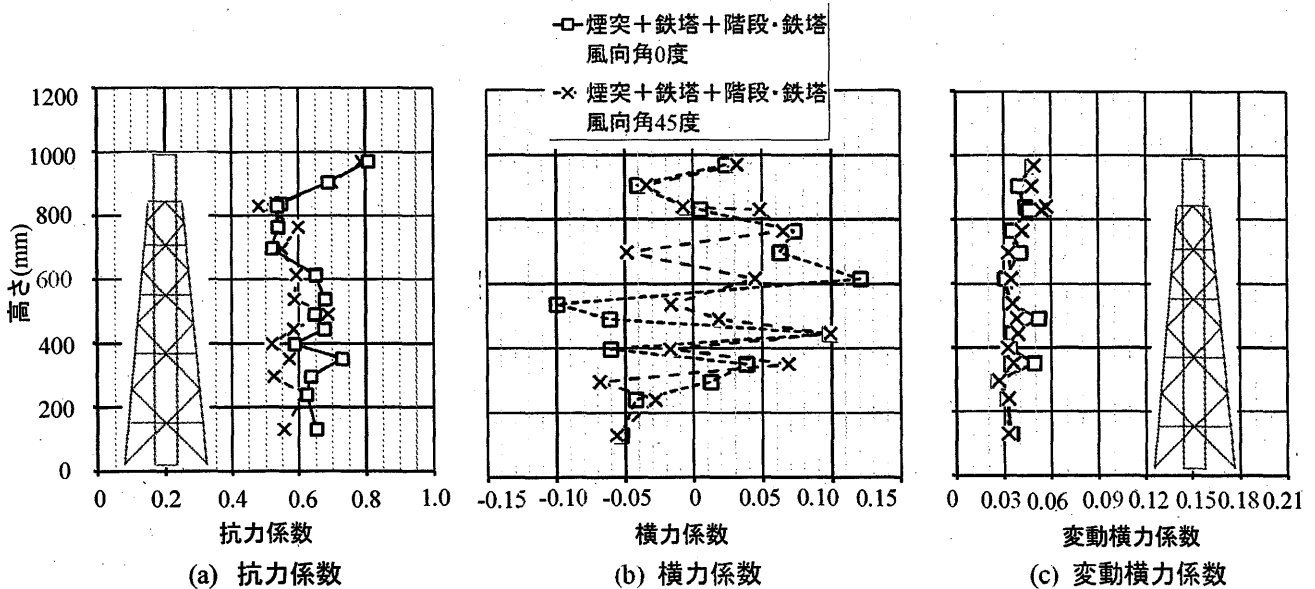


図 9 各断面での抗力・横力・変動横力係数比較煙突+鉄塔+階段(鉄塔風向角 0 度, 45 度)

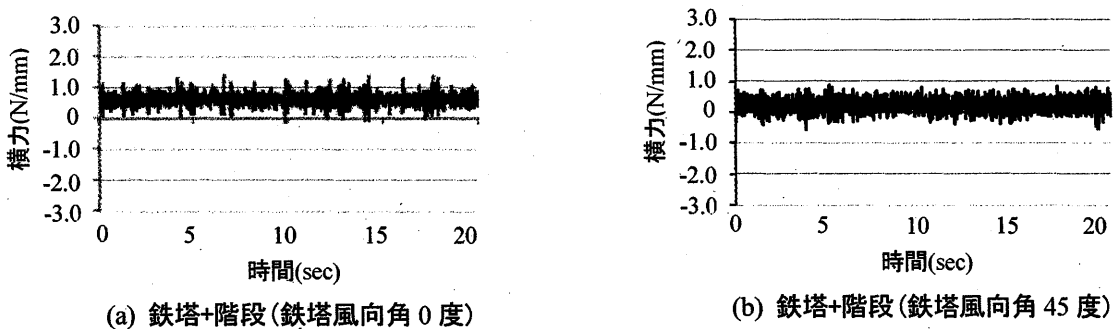


図 10 鉄塔+階段モデルでの横力時刻歴波形 (断面 M)

塔や階段等の附設物および風向角による影響を明らかにするため、風洞実験を行ったところ、以下の所見が得られた。

- (1) 煙突単体に比べて支持鉄塔を取り付けると主に鉄塔上部で抗力係数と変動横力係数が小さくなる。
- (2) 支持鉄塔を取り付けた煙突モデルの抗力係数は鉄塔風向角0度の場合に比べて鉄塔風向角45度の方が小さいが、変動横力係数は鉄塔風向角0度の場合に比べて鉄塔風向角45度の方が大きい。
- (3) 鉄塔風向角45度の場合には支持鉄塔の支柱材が煙突正面の風上に位置するため、煙突正面付近の風圧係数が小さくなる。
- (4) 支持鉄塔のみを取り付けた場合、鉄塔の風向角によ

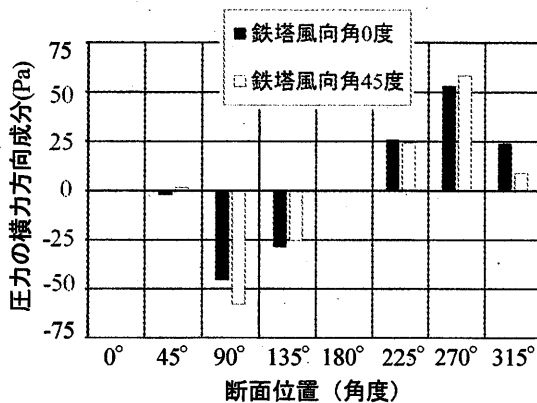


図 11 各断面位置での風圧力の横力成分
煙突+鉄塔+階段・断面 M(鉄塔風向角 0 度, 45 度)

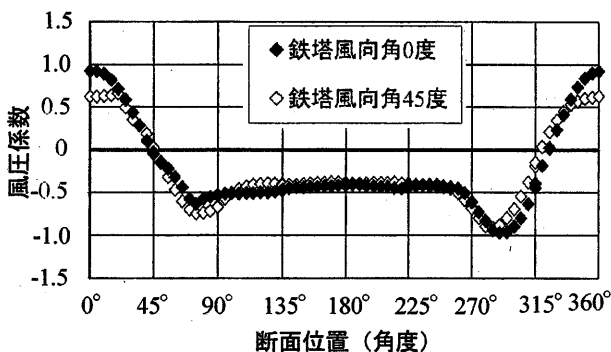


図 12 煙突の風圧係数分布
煙突+鉄塔+階段・断面 M(鉄塔風向角 0 度, 45 度)

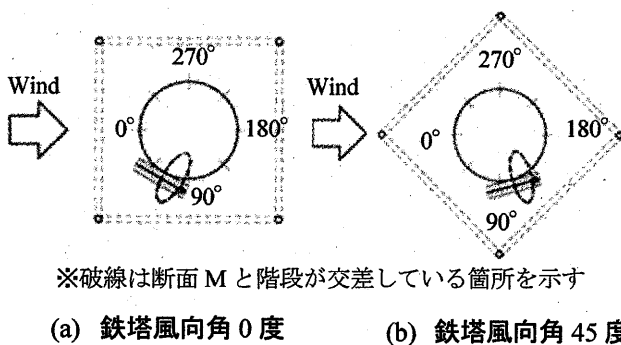


図 13 断面 M 略断面図

て煙突周辺に発生する剥離渦の位置が変化するため、風圧係数が極小となる位置が異なる。

- (5) 支持鉄塔と階段を取り付けると、風向に対してモデルが非対称となる断面で横力係数が大きくなる。
- (6)
- (7) 断面位置 70 度の辺りに階段が取り付けられている場合には、階段が付いている側の風圧係数の極小値が抑えられ、附設物の影響が大きい。

参考文献

- 1) 丸川比佐夫, 田村幸雄, 眞田早敏, 中村修, 大型 RC 煙突に作用する揚力と振動応答, 日本風工学会誌, 第 19 号, pp.37-52, 1984.
- 2) 巻幡敏秋, 前田潤滋, 多田泰輔, 宮嶋浩, 本間真, 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論文集, pp.457-462, 2002
- 3) Buresti, The effect of surface roughness on the flow regime around circular cylinders, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, pp.105-114, 1981
- 4) 片桐純治, 丸川比佐夫, 中村修, 田村幸雄, 大熊武司, 円柱構造物に作用する空気力特性に関する研究, 第 9 回風工学シンポジウム論文集, pp.103-108, 1986.
- 5) 薄達也, 他, 鉄塔支持型鋼製煙突の振動特性および風応答の観測, 日本建築学会九州支部研究発表会 第 42 号・1, pp.217-220, 2003.
- 6) 花田淳也, 他, 鉄塔支持型鋼製煙突の振動特性と風応答観測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.211-212, 2003
- 7) 本間真, 薄達哉, 花田淳也, 前田潤滋, 大森睦, 鉄塔支持型煙突における鉄塔構成部材の動的風応答, 第 18 回風工学シンポジウム論文集, pp.479-484, 2004.
- 8) 薄達哉, 前田潤滋, 藤村真弓, 花田淳也, 鉄塔支持型鋼製煙突の渦励振の振幅成長評価に及ぼす風速平均化時間の影響, 第 19 回風工学シンポジウム論文集, pp.406-410, 2006.
- 9) 竹内崇, 薄達哉, 大坪和広, 鶴則生, 前田潤滋, 高煙突の空力特性に及ぼす附設物の影響に関する検討, 2012 年度日本建築学会大会(東海)学術講演梗概集, pp. 191-192, 2012.9.
- 10) 竹内崇, 前田潤滋, 薄達哉, 大坪和広, 鶴則生, 高煙突の空力特性に及ぼす付帯物の影響に関する実験的研究, 第 22 回風工学シンポジウム論文集, pp.167-172, 2012.12.
- 11) Takeuchi, T., Maeda, J., Otsubo, K., Susuki, T., Experimental Studies of Properties of Wind Force Acting on a Tower-Supported Steel Stack, Proceedings of 19th Conference on Electric Power Supply Industry, USB 8pages, 2012.10.

(受理：平成 25 年 11 月 14 日)