

野外実測に基づく携帯電話用通信アンテナ支柱の

設計用風荷重に関する研究

STUDY ON WIND LOADS FOR MOBILE PHONE ANTENNA POLES BASED ON FIELD MEASUREMENTS

建築防災分野 石井 佑典

Building Disaster Prevention Yusuke ISHII

携帯電話用通信アンテナ支柱の設計用風荷重に関する研究を風洞実験に基づきこれまで行ってきた。しかし、風荷重を総合的に評価するためには、自然風下での現象に基づく検証も重要である。そこで、実寸大模型を用いた野外実測を行い、自然風下で複合円柱に作用する風力と風洞実験結果とを比較したうえで得られた結果に基づき設計用風荷重を示す。また、自然風下での風応答特性について調べ、携帯電話用通信アンテナ支柱の動的効果を考慮した風荷重と従来の設計用風荷重を比較することで後者の適正を評価する。

Wind loads for mobile phone antenna poles have been examined based on wind tunnel tests so far in our research lab. However, in order to comprehensively evaluate such wind loads, it is necessary to verify whether the obtained results from wind tunnel tests represents the phenomenon in real wind. Therefore, field measurements on compound cylinder model representing mobile phone antenna poles, was performed. Based on the results obtained from the field measurements and the wind tunnel tests, the design wind loads are proposed. Also the wind response characteristics of mobile phone antenna poles under real wind was investigated and the appropriateness of the suggested design load was evaluated by comparing wind loads considering the dynamic effect of the communication support column for mobile phone antenna poles and the conventional design wind load.

1. 序論

近年、携帯電話はスマートフォンの普及率の拡大や災害時の緊急連絡用途としても活躍しており、常時接続の需要が高まっている。そのため今後、さらに携帯電話用通信アンテナの設置増加が見込まれる。

携帯電話用通信アンテナの支持円柱では、支柱の頂部付近に円柱状のアンテナが数本搭載され、複合円柱断面を形成する。一般的にアンテナが1~3基(2~4円柱断面)搭載されたものが使用され、ビルやマンションの屋上に設置されており、日常的に吹く風により振動することが確認されている。

携帯電話用通信アンテナ支柱の耐風設計は、通信鉄塔設計要領¹⁾(以下、設計マニュアル)に従って行われているが、この種の構造物に関する研究事例は少なく、現行の設計では単独円柱とみなして設計用風荷重が算定されているのが現状である。上記のことを考慮して、当研究室では複合円柱断面を対象として、風圧測定風洞実験および可視化風洞実験を実施し²⁾、設計用風荷

重に関する研究を行ってきた。

風荷重を総合的に評価するためには、風洞実験による手法が妥当であると考えられるが、風向・風速の非定常性や粘性の影響など、風洞実験では再現が難しい自然風下での現象が存在するため、自然風下での現象とは異なる可能性も考えられる。特に円形断面構造物では、粘性や風の乱れの影響を強く受けるため、自然風下での現象に基づく検証も重要である。

そこで本研究では、野外に設置した実寸大模型周りの風圧を多点同時計測し、自然風下で複合円柱断面に作用する風圧および風力を風洞実験結果と比較する。さらに、応答加速度計を設置し風応答特性について調べ、これらの結果から携帯電話用通信アンテナ支柱の動的効果を考慮した風荷重を算出する。さらに従来の設計用風荷重と比較することで後者の妥当性を評価することを目的とする。

2. 野外実測概要

2.1 実測模型

野外実測に用いた模型の概要および風向の定義を Fig 1 に示す。風向は真北を 0° とした。実測に用いた模型は実寸大模型であり、アンテナが 3 本搭載されたものを対象とした。また、アンテナ模型が直径 318.5mm、厚さ 3mm、高さ 1900mm のステンレス製鋼材を用いた。支柱模型は、下部支柱が直径 216.3mm、厚さ 6mm、高さ 2000mm で、その上部に直径 165.2mm、厚さ 5mm、高さ 5000mm のステンレス製鋼材を設置し、ボルトで剛に接続した。支柱とアンテナの中心間距離は 407mm で離隔比は約 2.4(アンテナ・支柱の中心間距離/支柱外径)である。また、アンテナと支柱も横つなぎ鋼材を介してボルトで剛に接続した。

2.2 測定概要

野外実測は、那須電機鉄工(株)・大阪工場敷地内(大阪府大阪市西淀川区中島 2-12-5)で行った。基準風速および風向は風向風速計柱を設置し、その上部に超音波風向風速計を取り付けることで測定した。風圧測定はアンテナおよび支柱に風圧測定孔を設け、アンテナの中央高さに 22.5° ピッチで各 16 点(計 64 点)とし、多点同時計測した。サンプリング周波数は 100Hz、1 回の計測での計測時間は約 650 秒である。風力は各点に作用する風圧を積分して、複合円柱全体に作用する風力および各円柱に作用する風力を算出した。また、携帯電話用通信アンテナ支柱の風応答特性を測定するために、アンテナと支柱を接続する横つなぎ鋼材上に 2 成分用の応答加速度計を設置することで測定した。

2.3 接近流の性状

Fig 2(a)に 2017 年 6 月 28 日～11 月 12 日までに観測された風速と平均風向角の関係を、(b)に乱れの強さと平均風速の関係を示す。なお、風向は真北を 0° とし、○に平均風速および●に最大瞬間風速を示す。乱れの強さの定義を式(1)に示す。

$$I_V = \sigma_V / \bar{V} \quad (1)$$

I_V : 乱れの強さ(%) σ_V : 風速の標準偏差(m/s)

\bar{V} : 平均風速(m/s)

本観測では、北東方向が主風向と考えられ、 $0^\circ \sim 120^\circ$ において比較的高風速データが得られている。また、平均風速 8m/s 以上においても乱れの強さは 20～60% 程度の値をとっており、接近流の非定常性が大きい。ばらつきはあるが、風速の増加に伴い、乱れの強さは 30% 程度に収束する傾向を示すため、観測敷地は粗度区分 II または III³⁾ に相当するものと考えられる。

3. 平均風力特性

3.1 複合円柱全体の平均風力係数

野外実測および一様流中で行った風洞実験結果の平

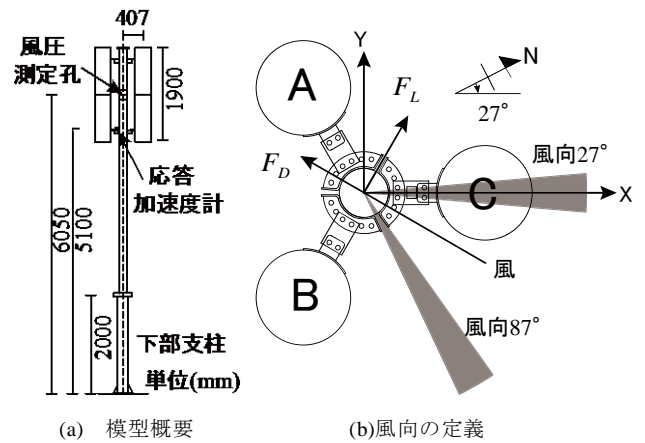


Fig 1 実測模型概要および風向の定義

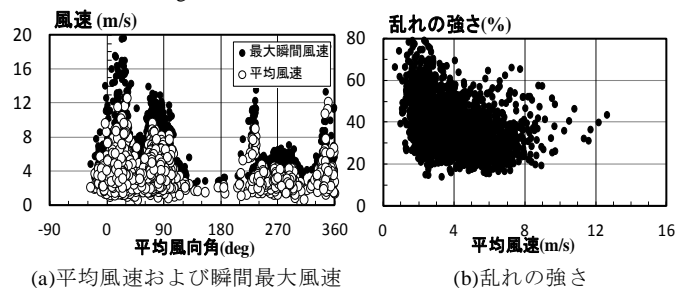


Fig 2 接近流の性状

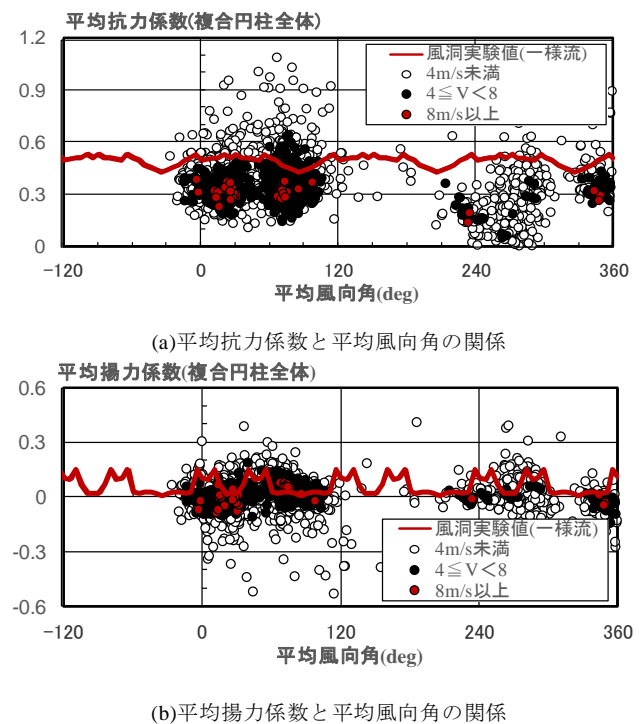


Fig 3 複合円柱全体の平均風力係数と風向の関係

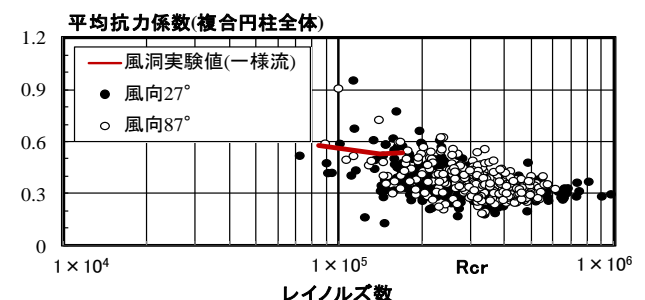


Fig 4 複合円柱全体の平均抗力係数とレイノルズ数の関係

均風力係数を比較する。Fig 3(a)に平均抗力係数と風向の関係、(b)に平均揚力係数と風向の関係を示す。平均抗力係数および平均揚力係数の定義式を(2)、(3)に示す。なお、ここで抗力は風方向、揚力は風直交方向の風力と定義し、複合円柱に作用する単位高さ当たりの風力として算出した。

$$C_D = \overline{F_D} / qA_n \quad (2)$$

$$C_L = \overline{F_L} / qA_n \quad (3)$$

$\overline{F_D}$: 平均抗力(N/m) $\overline{F_L}$: 平均揚力(N/m)

q : 平均風速に基づく速度圧(Pa) A_n : 見付け幅(m)

実測での平均抗力係数の結果は、平均風速 4m/s 未満ではばらつきが大きくなるが平均風速 4m/s 以上では風向 60° および 90° 付近で風洞値を上回る場合もあるが、概ね風洞実験結果の範囲内に収まる結果となっている。また、高風速域の結果を見るためにさらに上限を加えた平均風速 8m/s 以上では、安全側に収まる結果となっており、ばらつきはあるものの平均抗力係数 C_D は 0.3 程度に分布している。また、平均揚力係数についても同様に、平均風速 4m/s 以上においては野外実測の結果は概ね風洞実験結果の範囲内に収まり、-0.2 および 0.2 程度の値をとる。平均風速 8m/s 以上の高風速域では、平均揚力係数 C_L は 0 程度に分布している。

これらの傾向を詳細に考察するために、本観測の主風向と考えられる 0~120° において代表的な風向とアンテナ配置の関係となる、支柱上流にアンテナが 1 本配置される風向(以下、風向 27°) および 2 本のアンテナの間から吹き込む風向(以下、風向 87°) について考察する。なお、各風向とも風向の非定常性を考慮して ±5° までを評価の対象としている。各風向とアンテナ配置の関係は Fig 1 に示している。

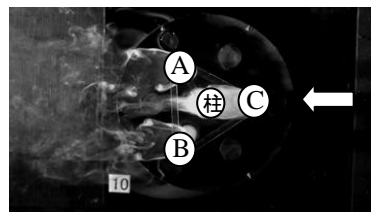
Fig 4 に各風向の平均風力係数とレイノルズ数の関係を示す。レイノルズ数の定義は式(4)に示す。

$$R_e = \overline{V}A_n / \nu \quad (4)$$

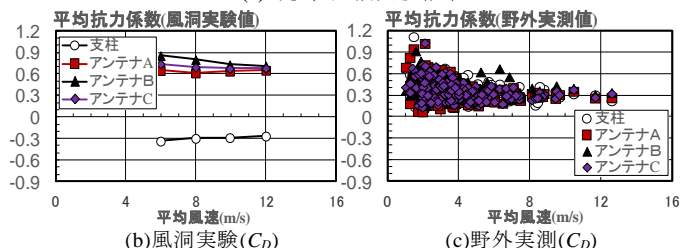
R_e : レイノルズ数 ν : 動粘性係数(m²/sec)

\overline{V} : 平均風速(m/s)

実測では、概ね平均風速 4m/s において 3×10^5 の臨界レイノルズ数(R_{cr})となり、風洞実験値は $R_e < 3 \times 10^5$ 未満の結果となる。実測における $R_e < 3.0 \times 10^5$ の観測値は平均風速が小さくばらつきは大きいと平均的にみると、風洞実験値に近く、平均抗力係数 C_D は 0.5 および 0.6 程度で分布していると考えられる。本観測結果の範囲内で考察すると、レイノルズ数領域が $3.0 \times 10^5 < R_e < 1.0 \times 10^6$ 程度までは平均風速の増加、つまりレイノルズ数の増加に伴い、平均抗力係数 C_D は 0.3 程度に収束すると考えられる。

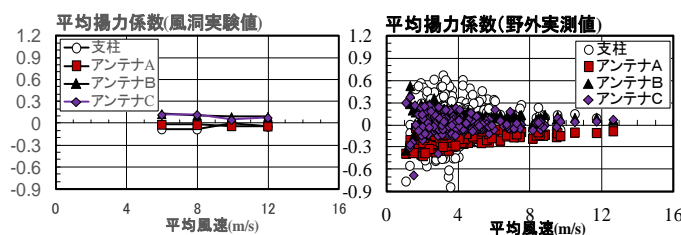


(a)可視化風洞実験結果



(b)風洞実験(C_D)

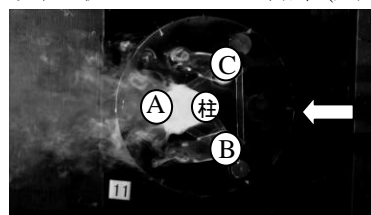
(c)野外実測(C_D)



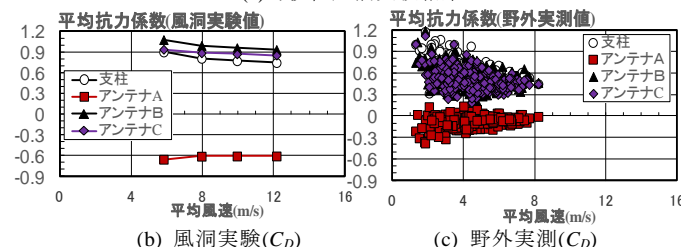
(d)風洞実験(C_L)

(e)野外実測(C_L)

Fig 5 支柱上流にアンテナが 1 本配置(風向 27°)

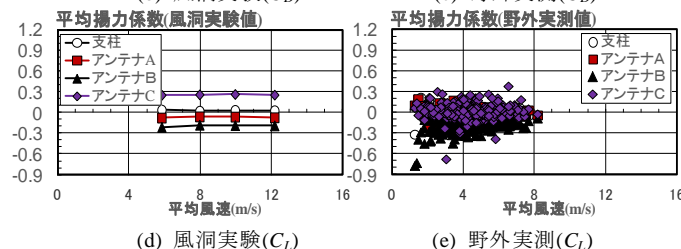


(a)可視化風洞実験結果



(b) 風洞実験(C_D)

(c) 野外実測(C_D)



(d) 風洞実験(C_L)

(e) 野外実測(C_L)

Fig 6 2本のアンテナの間から吹き込む風向(風向 87°)

3.2 各円柱の平均風力係数

自然風下において、複合円柱に作用する平均風力の傾向をより詳細に把握するために、各円柱に作用する平均風力係数を風洞実験値と比較する。Fig 5 に風向 27° の各円柱の平均風力係数と平均風速の関係を、実測および風洞実験結果についてそれぞれ示す。可視化実験結果(a)より風洞実験(b)では、支柱上流アンテナの上下の剥離せん断層に支柱が埋め込まれるような流れになっており、支柱の平均抗力係数は負となっている。

つまり風上側に風力を受けていることが確認できる。一方、野外実測(c)ではこのような現象は確認できず、支柱においても各アンテナと同様の傾向を示し、単独円柱としてふるまっている。また、野外実測における平均揚力係数(e)では平均風速 6m/s 未満で絶対値が 0.7 程度の値をとる場合もある。これらは、風洞実験では風向を固定して計測を行うため、風向は一定であるが、自然風下では本観測における比較的高風速域である平均風速 8m/s 以上でも接近流の乱れの強さが 20~60% と大きい。そのため、支柱における支柱上流アンテナ C の剥離せん断層の影響が風洞実験と野外実測では異なることが考えられる。

Fig 6 に風向 87° の各円柱の平均風力係数と平均風速の関係を、実測および風洞実験結果についてそれぞれ示す。可視化実験結果(a)より、上流側の 2 本のアンテナの影響で支柱の上下の剥離せん断層が広がり後流の幅が広がったことで支柱下流側のアンテナ A と一体となっていることが確認できる。結果風洞実験(b)では、支柱下流側のアンテナ A において平均抗力係数 C_D が負の値をとり、風上側に風力を受けている。なお、風向 87° では -0.7 程度の値をとり風向 27° の風洞実験結果と比較すると絶対値が大きくなっている。一方、野外実測(c)では、支柱下流側のアンテナ A において平均抗力係数 C_D はばらつきはあるが、-0.4 および 0 程度に分布しており、負の値となる傾向が伺える。これは自然風下においても、風洞実験同様、支柱の上下の剥離せん断層および後流域の幅が広がり、支柱下流側のアンテナ A と一体となる現象が起こっていることを示唆している。また、平均揚力係数 C_L は野外実測(e)においてばらつきはあるが、風洞実験(d)に対応した結果となっている。

3.3 平均風圧係数分布

平均風圧係数 $\overline{C_p}$ は、各風圧測定孔に作用する平均風圧力を平均風速に基づく速度圧で除して無次元化した値で式(5)に定義する。

$$\overline{C_p} = \overline{P}/q \quad (5)$$

$\overline{C_p}$: 平均風圧係数 \overline{P} : 平均風圧力(Pa)

各風向(風向 27° および風向 87°)の代表的な 3 つのケースにおける解析結果を Table 1 および 2 に示す。

Fig 7 に風向 27° の各円柱における平均風圧係数分布を示す。なお、各円柱のよどみ点を $\alpha = 0^\circ$ として示す。風洞実験における各円柱のレイノルズ数は、 $0.14 \times 10^5 < R_e < 0.48 \times 10^5$ となり、亜臨界領域となる⁴⁾。一方、実測におけるレイノルズ数は $0.34 \times 10^5 < R_e < 2.07 \times 10^5$ であり風洞実験同様、亜臨界領域である⁴⁾。しかし、各アンテナの平均風圧係数分布を比較すると、風洞実験においては剥離点が 90° 付近となるのに対し、

Table 1 CaseA1~A3 の解析結果(風向 27°)

Case	平均風速	平均風向	乱れの強さ	レイノルズ数($\times 10^5$)		抗力係数	揚力係数
	V	(deg)	$I_v(\%)$	支柱	アンテナ		
CaseA1	3.04	22.57	22.74	0.34	0.67	0.44	0.01
CaseA2	4.31	25.83	23.79	0.48	0.94	0.36	-0.02
CaseA3	9.44	31.41	32.40	1.07	2.07	0.29	-0.04

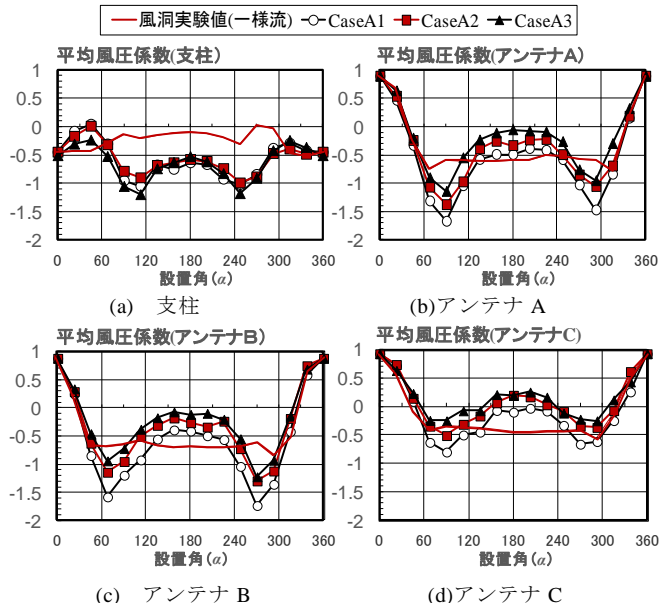


Fig 7 各円柱の平均風圧係数分布(風向 27°)

Table 2 CaseB1~B3 の解析結果(風向 87°)

Case	平均風速	平均風向	乱れの強さ	レイノルズ数($\times 10^5$)		抗力係数	揚力係数
	V	(deg)	$I_v(\%)$	支柱	アンテナ		
CaseB1	3.62	86.79	42.19	0.40	0.77	0.44	0.02
CaseB2	5.89	89.63	20.52	0.65	1.25	0.39	0.03
CaseB3	8.18	85.29	22.16	0.90	1.73	0.33	0.02

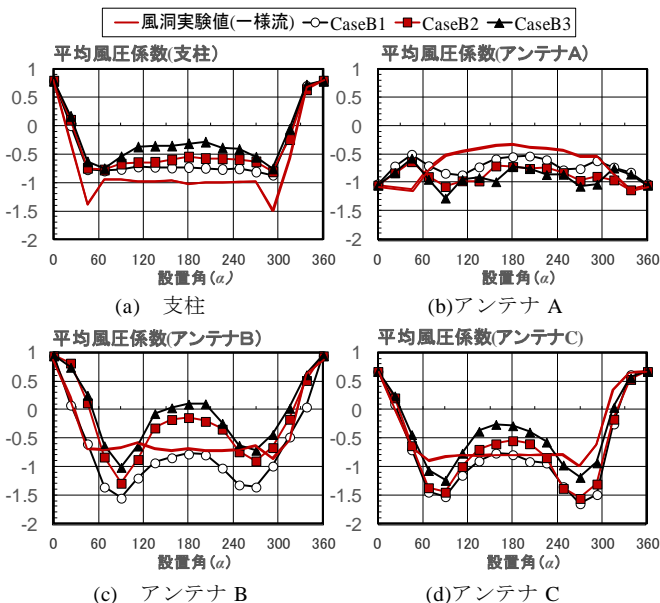


Fig 8 各円柱の平均風圧係数分布(風向 87°)

野外実測では各ケースにおいて剥離点が 130° 付近で一定となっている。実測では一様流中での超臨界領域 ($3.0 \times 10^5 < R_e < 6.0 \times 10^5$) の風力特性に近いと考えられる。これは、自然風下では接近流の乱れの影響で、円柱表面境界層の乱流化が促進されたことで剥離点が風下側に移行したためと考えられる。また、一例としてアンテナ A に着目すると CaseA1 では最小負圧が -1.7

程度であるが、CaseA3では最小負圧が-1.1程度まで回復しており、風速の増加に伴い負圧が回復する傾向にある。同様に、背圧係数の絶対値も風速の増加に伴い回復する傾向にあり、特にCaseA3では絶対値が0.1程度まで回復している。この背圧係数の大きさが平均抗力係数に影響を与えていると考えられる。

また、支柱においては、上流側アンテナCの後流の影響を受けている。風洞実験では、90°付近で負圧が出にくくなっており、上流側アンテナCの剥離せん断層の再付着の影響と考えられる。一方実測では、45°付近で負圧が出にくくなっている。これは、上流側アンテナCの剥離位置が風洞実験と実測では異なっており、上下の剥離せん断層の幅が狭まっているためだと考えられる。また、風洞実験では90°以降の背圧係数の絶対値は0.2程度で概ね一定となっているが、実測では45°以降、一旦負圧は低下し最小負圧は-1.2程度まで低下している。これは支柱におけるアンテナCの上下の剥離せん断層の再付着位置が異なる影響と考えられ、風洞実験では90°付近で再付着しており支柱後流の幅が狭まり、双安定流れとなったことで負圧が出にくくなっていると考えられる。一方実測では、45°付近の風上側で再付着しているため、負圧が低下し支柱後流の幅が広がっているものと考えられる。よって、実測では風向27°では平均抗力係数は単独円柱として振る舞っていると考えられる。

Fig 8に風向87°の各円柱の平均風圧係数分布を示す。この風向における実測での各円柱のレイノルズ数は $0.40 \times 10^5 < Re < 1.73 \times 10^5$ である。実測における上流側アンテナBおよびCでは、すべてのケースにおいて剥離点が130°付近で一定であり、傾向は風向27°の場合における各アンテナと同様である。しかし、支柱およびアンテナAでは、風向27°の場合と傾向が異なる。支柱では実測で風洞実験よりも負圧が小さくなっており、明確な剥離点が見られない。これは、実測では剥離せん断層が支柱の表面より離れていると考えられる。また、支柱の下流側アンテナAでは、45°付近で支柱の剥離せん断層の再付着が認められるが、負圧の回復は見られず概ね平坦な分布を示している。これらは、上流側アンテナBおよびCの影響で支柱の剥離せん断層が広がっており、アンテナAが支柱の剥離せん断層に埋め込まれているためだと考えられる。

4. 風応答特性

4.1 構造特性

本観測モデルの1次固有振動数および構造減衰数を調べるため、無風時においてX方向およびY方向で人力加振実験を実施した。また、アンテナ搭載面に風荷重が作用する状態を想定し、アンテナ中央高さに集中荷重を載荷した時のたわみ曲線から剛性を同定した。

本観測モデルの構造特性をTable 3にまとめる。

Table 3 構造特性

	固有振動数(Hz)	減衰定数(%)	剛性(N/cm)
X	1.465(Hz)	0.51%	446.29
Y	1.465(Hz)	0.60%	

4.2 風応答特性

Fig 9に風向27°および風向87°の応答加速度の標準偏差と平均風速の関係を示す。(a)に風方向、(b)に風直交方向の応答値を示している。応答値は風向によらず、風速の増加に比例して大きくなる傾向を示す。また、アスペクト比の大きな搭状構造物に見られるような風直交方向に卓越する応答は見られず、風方向および風直交方向に同程度応答している。本観測での応答は、接近流の非定常性が大きかったため、主に接近流の乱れに伴う変動風力の影響が支配的であったと考えられる。

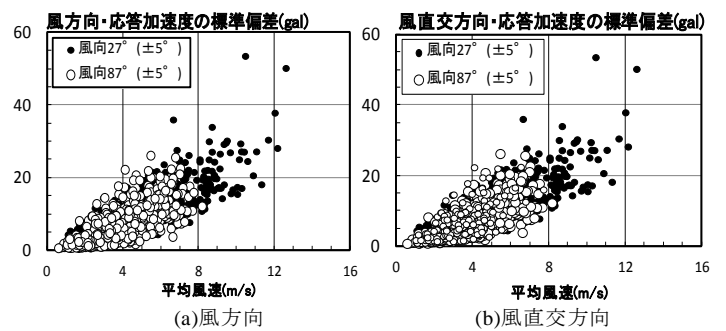


Fig 9 応答加速度の標準偏差と平均風速

5. 従来の設計用風荷重の評価

5.1 従来の設計

設計マニュアル¹⁾に準拠した風荷重算出方法を式(6)に示す。

$$F = 0.5 \rho V_0^2 E_r^2 G_f C_D A \quad (6)$$

F : 風荷重(N) ρ : 空気密度(kg/m³)

V_0 : 基準風速(m/s)(平成12年建設省告示第1号に掲げる数値)

E_r : 平均風速の高さ方向分布係数

G_f : ガスト影響係数

C_D : 風力係数(単独円柱の風力係数適用 1.2)

A : 見付け面積(m²)

E_r および G_f は地表面粗度区分により算定される値で、 G_f はTable 4により与えられる。ここで与えられるガスト影響係数は主に接近流の乱れの影響を加味した係数である。

Table 4 G_f の規定¹⁾

地表面粗度区分	構造物高さ(m)		
	(1) 10m以下	(2) 10<H<40	(3) 40以上
I	2.0	(1)および(3)より直線補間	1.8
II	2.2		2.0
III	2.5		2.1
IV	3.1		2.3

5.2 動的効果を考慮した等価静的風荷重

構造物に作用する風荷重としては等価静的風荷重の概念に基づく風荷重を採用するのが一般的であり、ここでもこれに従う³⁾。構造物に作用する風荷重は平均荷重と変動荷重に分けて考えることができる。平均荷重は時間平均的な風荷重である。一方、変動風荷重は構造物に作用する変動風力の特性だけでは決まらず、振動する構造物の場合、構造物の振動特性が変動風荷重に大きく寄与する。本解析では、実測により得られた応答値を用いて、それと等価な効果を与える静的荷重を求め、平均風荷重に加えて等価静的風荷重とした。

$$F_{\max} = \bar{F} + K g_D \sigma_{D,r} \quad (7)$$

F_{\max} : 等価静的風荷重(N) \bar{F} : 平均風荷重(N)

K : 剛性(N/cm) g_D : ピークファクター

σ_{Drms} : 変動変位(実測値 cm)

平均風荷重は以下の式より算出する。

$$\bar{F} = 0.5 \rho V^2 C_D A H \quad (8)$$

ρ : 空気密度(kg/m³) V : 風速(m/s)

C_D : 平均抗力係数(実測値 0.3) A : 見付け幅(m)

H : アンテナ高さ(アンテナ搭載面に風荷重が作用すると仮定 m)

ピークファクターの実測値と指針値³⁾は以下の式で表される。

$$\text{指針値} : g_D = \sqrt{2 \ln(vT)} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \ln(vT)}} \quad (9)$$

$$\text{実測値} : g_D = \sigma_{D,\max} / \sigma_{Drms} \quad (10)$$

v : レベルクロッシング数 T : 評価時間(sec)

ここで、レベルクロッシング数 v は1次固有振動数とした。また、実測値におけるガスト影響係数 G_D は以下の式で表せる。

$$G_D = \frac{F_{\max}}{\bar{F}} \approx 1 + \frac{K \sigma_{D,r}}{\bar{F}} m g_D^s \quad (11)$$

Fig 10(a)および(b)に、ピークファクターおよびガスト影響係数を示す。実測値のピークファクターは、低風速域ではばらつくが高風速域では概ね指針値³⁾ 2.96 に近づく。よって以降の計算では指針値を用いる。また、実測でのガスト影響係数 G_D は、高風速域でも15程度に分布しているが、これは自然風下では平均成分が小さいことが影響していると考えられる。

5.3 従来の設計用風荷重の評価

野外実測における等価静的風荷重と従来の方法で算出される設計用風荷重(以下、設計値)を比較することで設計値の妥当性を本研究で得られた結果の範囲内で考察する。Fig 11 に設計値と野外実測により得られた等価静的風荷重を示す。図中●には、野外実測で観測された複合円柱に作用する最大抗力(N)をあわせて示

す。複合円柱に作用する実測値は、設計値の範囲内に収まっている。一方、等価静的風荷重は設計値の2倍程度の値となる。つまり、従来の設計では本構造物の動的効果は考慮できておらず、本構造物を対象とした設計方法としては適していないと考えられる。

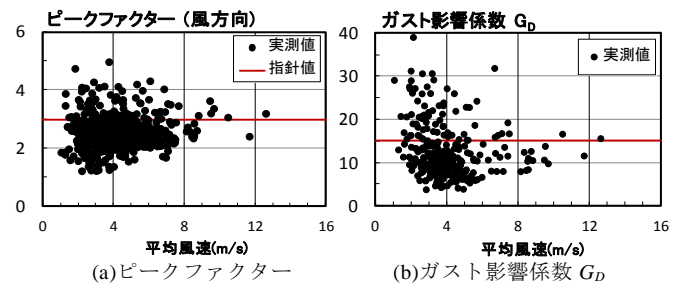


Fig 10 実測におけるピークファクターおよびガスト影響係数

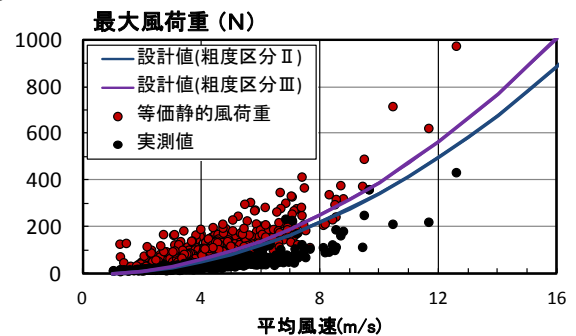


Fig 11 設計用風荷重の比較

6. 結論

本研究では、携帯電話用通信アンテナの実寸大模型を用いた野外実測を行い、以下の知見を得た。

- 1) 複合円柱全体の平均抗力係数は $3.0 \times 10^5 < R_e < 1.0 \times 10^6$ における領域では風向によらず 0.3 程度に分布している。
- 2) 風向 27° では、各円柱の風力特性が異なる影響および風向の非定常性の影響で、実測と風洞実験では異なる現象を示す。一方、風向 87° では、上流側の2本のアンテナの影響で支柱の後流の幅が広がる現象が自然風下でも確認でき、風洞内の現象と一致する。
- 3) 実測の各円柱の風力特性は、接近流の乱れの影響で臨界レイノルズ数(R_{cr})が見かけ上低下し、一様流中の超臨界領域での風力特性に近いと考えられる。風洞実験では亜臨界領域の風力特性を示しており、異なる風力特性を示した。これが、実測の複合円柱全体に作用する平均抗力係数が風洞値を下回る要因である。
- 4) 設計マニュアルでの設計値では不十分であり、今後詳細な検討が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 財団法人日本建築防災協会：通信鉄塔設計要領・同解説、2006年
- 2) 丹園卓樹：複合円柱の変動揚力特性を考慮した携帯電話用アンテナ支柱の設計用風荷重に関する研究、大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻修士論文、2017年
- 3) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説、2015年
- 4) 大熊武司 神田順 田村幸雄：建築物の耐風設計、鹿島出版社、1996年