

種々の角柱に作用する変動揚力の低減に関する実験的研究

建築防災研究室 黒田 博之

Abstract

角柱構造物の変動揚力を低減させる方法には様々な方法がある。高さ方向に断面変化を与えた正方形断面角柱についてその風力特性に効果的な形状を探り、風力の低減とその理由に関して考察した既往の研究をもとに、気流の変化が正方形断面角柱に与える風力特性への影響の違いと、その傾向について考察を行った。また、風洞実験において、風洞底板の模型基部付近に空隙がある場合、変動揚力が著しく減少した。そこで、角柱基部周辺の空隙による変動揚力への影響について考察した。その結果、空隙が存在することにより変動揚力は低減し、角柱に作用する揚力の周期性が失われ、その傾向は低層ほど強く表れることを明らかにした。

1. はじめに

断面形状の単純さは、典型的な空力振動の発現の可能性が極めて高い。空力的な制振対策として、吊橋の塔柱は、しばしば隅切断面などが採用されており、市街地にある塔状の高層建築物を見ても隅切断面が用いられているものもある。また、隅切の他にも、建物の上部をセットバックさせることで、風力の低減を試みる研究などがなされている。

本研究の目的は、正方形断面角柱の風力特性に効果的な形状を探り、風力の低減とその理由に関して考察した既往の研究をもとに、気流の変化が正方形角柱の風力特性に与える影響の違いと、その傾向について考察することである。また、風洞実験において風洞底板の模型基部付近に空隙がある場合、変動揚力が著しく減少した。そこで、角柱基部周辺の空隙による変動揚力への影響について調べ、その原因について考察する。

2. 研究概要

図1は、本研究で用いた実験気流の風速比および乱れの強さを示している。勾配流は地表面粗度区分Ⅲとし、一様流については既往の研究結果¹⁾を用いた。風

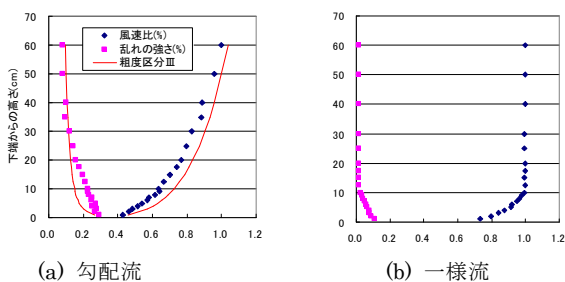


図1 実験気流 (設定風速=10m/s)

洞の設定風速は4m/s, 6m/s, 8m/s, 10m/s, 12m/sの計5通りとした。

模型はアスペクト比5の正方形断面角柱を基本として断面変化をもたせた。図2に本研究の対象とした実験模型の立面図を示す。角柱模型はそれぞれ滑面型(幅32m, 高さ160m, 縮尺1/400の単純な断面の角柱模型)、節型(高さ方向に節を等間隔に取付け不連続に断面が変化する角柱模型)と名づける。また、節型については、既往の研究で変動揚力の低減効果が大きかった分割数8(節の数4)を対象とし、軒の出長さについては既往の研究における軒の出比[軒の出長さ/模型見つけ幅]約4%, 7.5%, 約11%の3種類と、新たに15%, 約19%を加え、合計5種類の節型模型を実験に用いた。

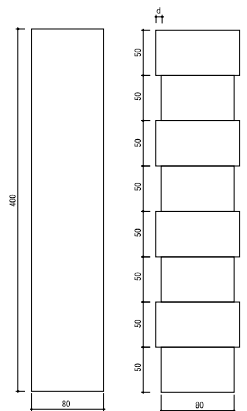


図2 角柱模型の立面図

3. 角柱の断面変化が変動風力に与える影響

3.1 軒の出の影響

図3に、変動揚力係数の軒の出による比較を示す。既往の研究から、一様流では軒の出比約11%で変動揚力係数は大きく減少しているが、勾配流では15%まで軒の出の影響の傾向は見られなかった。これは、変動揚力の発生要因の違いによるものであると考えられる。一様流では、建物の形状変化に敏感であるため、周期的な渦の放出が主要因となることに対し、勾配流では、渦放出が主要因であるものの、もともと気流が乱れて

いるため、建物の形状からの影響を受けにくいと考えられる。このことは、図4に示す揚力のパワースペクトルからも推察できる。一樣流では軒の出が大きくなるのに伴って揚力のパワースペクトルのピークが低減していることから渦発生が弱められているが、勾配流では軒の出の大きさによるスペクトルには大きな違いが見られない。以上より、勾配流は建物の形状の変化による影響を受けにくいと考えられる。

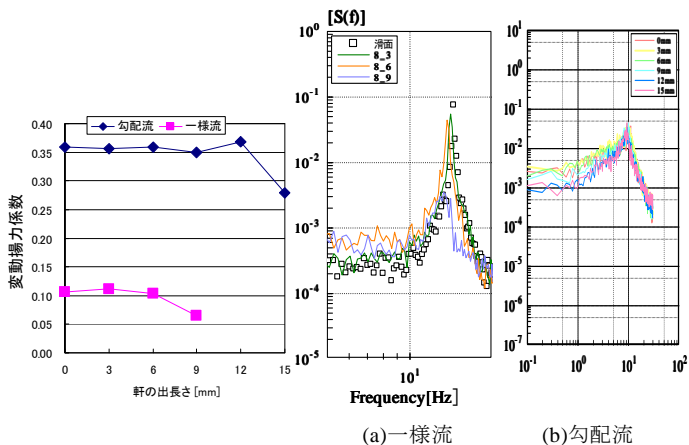


図3 変動揚力係数

図4 揚力のパワースペクトル

3.2 気流の影響

気流による風力係数の比較を行った。図5に平均抗力係数と風方向の平均モーメント係数を示す。平均抗力係数は勾配流より一樣流の方が大きく、逆に平均モーメント係数は一樣流より勾配流の方が大きいことが分かる。この結果から、気流により風力の作用する位置が高さ方向に変化すると考えられる。

そこで、表1に示すように、一樣流、勾配流それぞれについて風方向平均モーメントを平均抗力で除して求めた作用点高さの模型高さに対する比を求め、風力の作用点の高さについて考察する。

表1から、勾配流の方が一樣流より風力の作用点の高さは高いと言え、その高さは一樣流のおよそ1.25倍

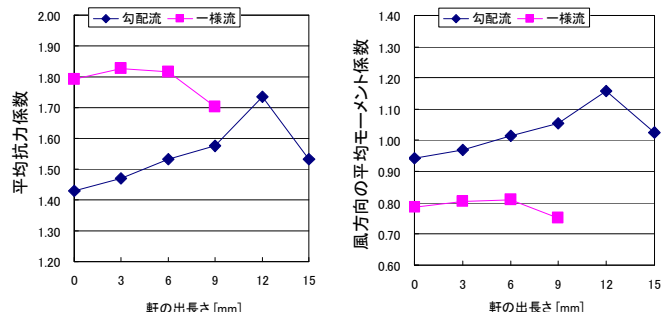


図5 平均抗力係数と風方向のモーメント係数

表1 作用点高さ比

	滑面型	節型				
		約4%	7.5%	約11%	15%	約19%
一樣流	0.44	0.44	0.45	0.44		
勾配流	0.55	0.55	0.56	0.56	0.56	0.56

の値となる。これは、勾配流の風速の鉛直分布によるものであると考えられる。本実験で設定した地表面粗度区分Ⅲにおける風速の鉛直分布は(高さ)=50×(風速比)⁵で近似される。抗力が風速から求めた速度圧の鉛直分布に従うとすると作用点高さは0.58となり、実験結果とほぼ一致する。これにより、風速の鉛直分布が一樣である一樣流に比べ、作用点の位置は高くなったと考えられる。

4. 角柱基部周辺の空隙が風力に与える影響

前項の実験において、模型の基部に取り付けた端板を外し、基部付近に空隙がある状態で風力を測定した結果、変動揚力が著しく減少する現象が見られた。そこで、角柱基部周辺の空隙が風力に与える影響について調べることを目的として、滑面型の模型を用いて風圧実験を行った。なお、本実験では一樣流のみを対象としている。

4.1 風圧係数

空隙がある場合とない場合の平均風圧係数分布および変動風圧係数分布を図6および図7に示す。また、表2は図6の側面の風上側基部付近における測点A, B, C, Dの4点の風圧係数を示したものである。

表2から、空隙がない場合の平均風圧係数は、空隙がある場合に比べて絶対値が大きくなっていることが分かる。これは注目した4点すべてについて例外なく言えることである。その増加率は概ね1.3~1.7倍の範囲であり、両側面とも隅角部に近い測定孔ほど増加率

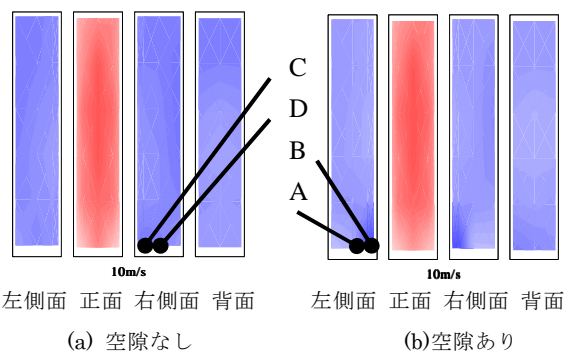


図6 平均風圧係数分布

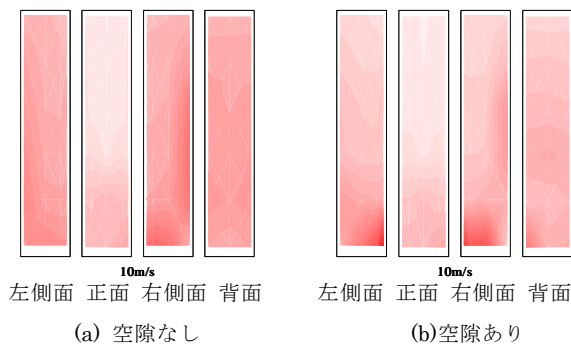


図7 変動風圧係数分布

表2 風圧係数の比較

空隙	平均		変動		増加率	
	あり	なし	あり	なし	平均	変動
A	-0.72	-1.20	0.12	0.20	1.67	1.62
B	-0.73	-1.26	0.12	0.27	1.72	2.23
C	-0.84	-1.18	0.16	0.22	1.41	1.39
D	-0.88	-1.19	0.17	0.19	1.35	1.13

は概ね 1.3~1.7 倍の範囲であり、両側面とも隅角部に近い測定孔ほど増加率が高くなる傾向が見られた。また、変動風圧係数についても同様のことが言え、増加率は概ね 1.1~2.2 倍の範囲となっている。

次に、図 6 に注目すると、両側面低層部の風上側隅角部付近における平均風圧係数は、他の場所と比べて相対的に絶対値が大きくなっていることが示されている。これは図 7 に示す変動風圧係数分布においても同様のことが言える。

以上のことから、角柱基部周辺に空隙を設けることによって、両側面低層部の風上側隅角部付近では剥離泡が形成されて再付着が起こる流れが発生している可能性が考えられる。しかし、このような流れは定常的ではなく、ある瞬間に剥離泡が空隙に吸い込まれては再び剥離泡が形成されるという現象が周期的でなくランダムに繰り返されることによって、この付近の変動風圧係数の絶対値が大きくなったものと考えられる。

なお、このことを確認するために可視化実験を行った結果、空隙がある場合は再付着が起こる流れが発生していることが確認されたが、剥離泡が形成されたことは確認できなかった。

4.2 風圧のパワースペクトル

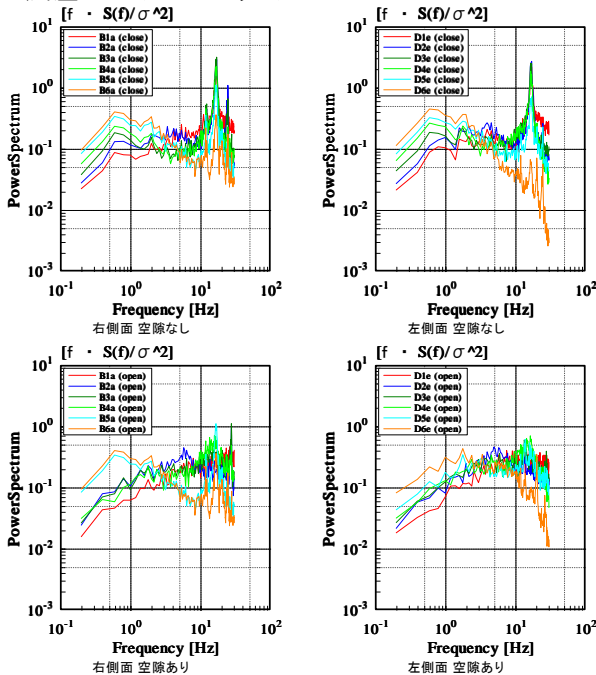


図8 変動風圧のパワースペクトル

図 8 は、風上側隅角部における変動風圧のパワースペクトルを示したものである。同図の凡例の中の 1~6 の数字は、層の高さを示している。両側面において空隙がない場合のスペクトルには明確なピークが存在しているが、空隙がある場合には目立ったピークが存在せず、低層部ほどこの傾向が強い。また、両側面の高層部では、空隙がある場合のスペクトルの形状は空隙のない場合の形状に近づき、僅かにピークが見られるようになる。このことから、角柱基部周辺に空隙を設けることによって、低層部において風上側隅角部から周期的なカルマン渦の発生が抑制されたものと考えられる。

4.3 層風力

図 9 に示した各層に作用する層風力係数について空隙の有無による比較を行うと、空隙がある場合にすべての層で変動風力係数が低減していることが分かる。その中でも、変動揚力係数については低層ほど低減される割合が大きくなる結果となった。

図 10 は、層風力のパワースペクトルについて空隙の有無による比較をした結果を示している。抗力については、空隙がない場合、高層部ほど低周波数成分が大きくなっているが、空隙がある場合には層ごとの変化は見られなかった。また、揚力については、空隙がある場合、低層部ほどピークが低減されていく傾向があり、高層になるにつれて空隙がない場合のスペクトル形状に近づいていき、ピークが現れることが分かった。このことから、角柱基部周辺に空隙が存在することによって、角柱風上側隅角部から発生するカルマン渦の周期性が弱められたものと考えられ、この傾向は低層ほど強く表れるといえる。

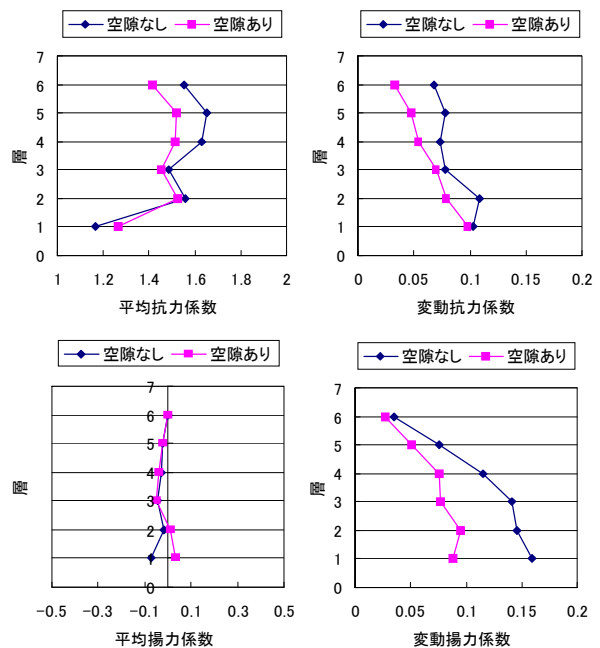


図9 層風力係数

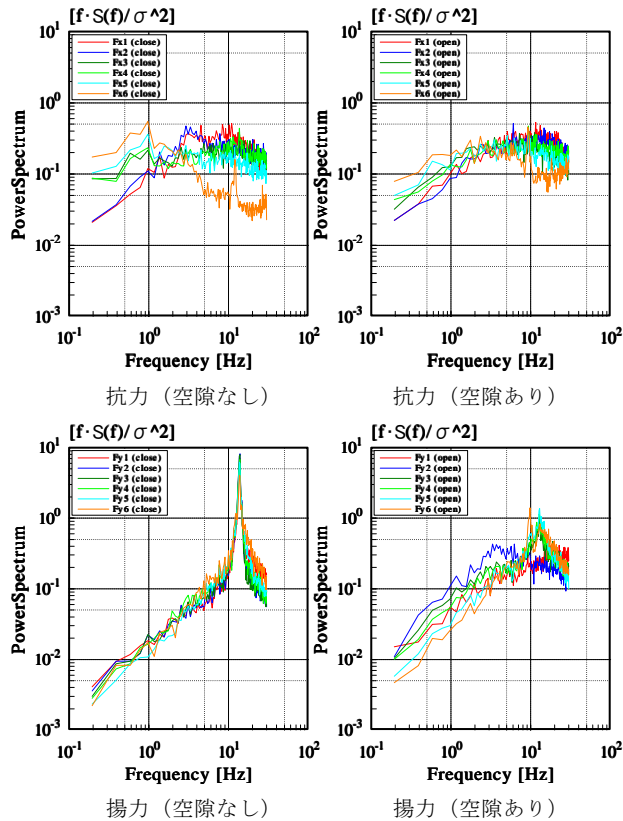


図 10 層風力のパワースペクトル

5. 揚力の低減

ここでは、各種実験から得られた結果をもとに、変動揚力の低減について考察する。

5.1 軒の出による揚力の低減

既往の研究から、勾配流では軒の出の影響による変動揚力への影響は見られなかった。これは変動揚力の発生要因の違いによるものであると考えられる。勾配流はもともと気流が乱れているため、比較的建物の形状からの影響を受けにくいと考えられる。このことは、風力のパワースペクトルの違いからも推察される。一樣流では軒の出が大きくなるのに伴って渦発生の周期性が弱められているが、勾配流では軒の出の大きさによるスペクトルには大きな違いが見られない。したがって、勾配流は建物の形状の変化による影響を受けにくいと考えられる。

5.2 模型基部周辺の空隙による変動揚力の低減

空隙の有無による層風力係数を比較すると、低層ほど揚力が低減されることが判明した。また、空隙がある場合、低層ほど変動揚力のパワースペクトルのピークが低減されていく傾向があり、高層になるにつれて空隙がない場合のスペクトル形状に近づいていき、ピークが現れることが分かった。

また、図 6 および図 7 から分かるように、空隙が存在することによって、局所的に絶対値の大きな圧力が

かかっているが、図 9 に示した各層ごとの変動揚力係数 (右下) を見ると、層全体としては空隙が存在することによって低減している。これは、可視化実験でも確認できたように、空隙がある場合に剥離流が再付着することによって図 11 に示すように側面の後流側にかかる揚力を低減しているためであると考えられる。

以上のことから、模型基部での流れが全体の風力に強い影響を持つことが明らかになった。

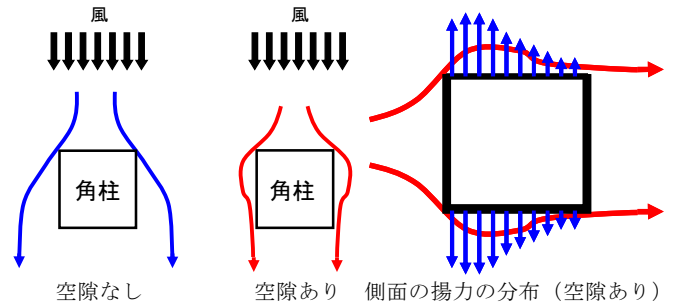


図 11 模型基部付近の流れのスケッチ

6. まとめ

本研究により、以下の知見が得られた。

- 1) 勾配流中において正方形断面角柱に等間隔に節を取り付け、その風力特性を調べ、一樣流のそれとの比較を行った結果、軒の出比 4%~15%程度の小さな断面形状の変化では風力低減に至らなかった。
- 2) 角柱基部周辺に空隙を設けて風圧特性を調べ、空隙がない場合と比較した結果、空隙があることによって両側面低層部の風上側隅角部付近の平均および変動風圧係数は、ともに絶対値の大きい値となった。また、風圧から風力を計算した結果、空隙によって変動揚力係数は低減した。これは、パワースペクトルの形状の影響を合わせて考察すると、角柱に作用する揚力の周期性が弱められるためである。また、層風力係数に注目すると、その傾向は低層ほど強く表れることが分かった。
- 3) 角柱基部周辺に空隙の影響に関する可視化実験の結果から、空隙を設けることによって再付着を起こすようになり、結果として周期的な渦の発生が抑制された。

参考文献

- 1) 西村真：不連続な断面をもつ角柱に作用する風力に関する実験的研究 平成 21 年度修士論文 p.36~p.41, p.57, p.103~107
- 2) 中村良平：免震高層建物に作用する非定常風圧に関する研究—複素 POD 解析による変動風圧の組織的構造— 平成 19 年度修士論文 p.24~30

討議等

◆ 討議 [谷池義人 教授]

風洞内外の圧力差はどうなっているのか？

◆ 回答

まず、風洞内において風が流れることによって生じる圧力、すなわち速度圧を求めます。速度圧は

$$\frac{1}{2}\rho v^2$$

$$\rho = 1.225 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

で求められます。このとき、設計風速 $v = 50 \text{ [m/s]}$ として速度圧を計算すると、

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}\rho v^2 &= 1.225 \times 50 \times 50 / 2 \\ &= 1531.25 \text{ [Pa]} \end{aligned}$$

となります。風洞外の圧力を大気圧 (101325 [Pa])

と考えると、風洞内の圧力は風洞外の約 1.5% 程度の圧力差が生じているといえます。

◆ 討議 [谷口与史也 教授]

角柱基部付近の空隙の有無による影響を調べた実験に関して、実際の構造物ではどのような建物なのか？

◆ 回答

実際の構造物で、建物の基部付近に空隙を設けることは現実的ではないかもしれません。先の質問において、風洞内外では 1.5% 程度の圧力差があるとお答えしました。この 1.5% 分の圧力差が空気を吸い込む効果を生み出しているものと考えられます。したがって、実構造物において実験のような空隙を設けるのではなく、1.5% 分の圧力差に相当する吸い込み効果を得ることができるような設備を建物基部周辺に設置すれば、実験と同様の結果、すなわち、変動揚力を低減することができるかもしれません。

◆ 討議 [吉中進 准教授]

空隙を設けることで角柱模型に作用する変動揚力を低減できたが、ドーム状の構造物ではどうか？

◆ 回答

本研究では角柱模型の基部周辺に空隙を設けることによって、建物周辺の流れが再付着を起こすようになり、結果として変動揚力を低減することができたことから、模型基部での流れが全体の風力に強い影響を持つことが明らかになりました。したがって、ドーム状

の構造物においても、先のご質問でもありましたように、1.5% 分の圧力差に相当する吸い込み効果を得ることができるような設備を建物基部周辺に設置することで、同様の結果が得られると思います。

◆ 討議 [角掛久雄 助教]

層風力のパワースペクトルにおいて、抗力はピークが出ていないが、なぜ揚力はピークが発生し、それは何に起因するのか？

◆ 回答

抗力とは物体に向かって風が吹いたときに、その風向方向に作用する力のことをいい、風の直角方向に作用する力のことを揚力といいます。

構造物に向かって風が吹くことによって、流れが隅角部で剥離し、後流には周期的なカルマン渦が発生します。渦の発生によって構造物には揚力が作用します。

一方、スペクトルとは、ある物事を互いに独立した成分に分け、それぞれの成分の強さを並べたものをいいます。パワースペクトルとは、ある信号を周波数ごとに分類し、それぞれの周波数ごとに含まれているエネルギーを並べたものをいいます。したがって、パワースペクトルのピークが存在するという事は、そのピーク周波数が卓越していることを示します。

以上のことから、角柱模型に向かって風が吹き、渦が周期的に発生することによって風直角方向の揚力が周期的に作用し、これによって揚力のパワースペクトルにピークが表れているといえます。