

庇に作用する変動風力の特性に及ぼす建物高さの影響*

東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 畠山智貴 佐藤公亮 植松康

1. はじめに

電子商取引の急速な拡大などを背景に、近年、物流施設に対するニーズは著しく高まっている¹⁾。物品の管理・流通を主目的とする物流施設(写真1)では、荷役や物品への配慮から、大型の庇が取り付けられることが多い。このような大庇の風荷重の検討は設計上重要な課題である。しかし、これまで庇に作用する風力を調べた研究例は必ずしも十分ではなく、その特性は十分に把握されていない。建設省告示や日本建築学会「建築物荷重指針・同解説」²⁾には、このような庇に対する風力係数に関するデータはない。文献3)では、屋根面の外圧係数と軒下の外圧係数の差分を庇の風力係数としているが、これはやや強引な類推と考えられる。

このような背景から本論では、庇に作用する風力に大きな影響を及ぼす建物高さ⁴⁻⁶⁾を考慮して、庇の骨組設計用の風力係数を提案する。この際、曲げモーメントとせん断力の2つの荷重効果に着目して、それらの最大値を同時に再現する等価設計用風力係数を提案することを目標とする。そして本論6章では文献3)との比較も行う。なお本提案は、ガスト影響係数法の枠組に適合させる。すなわち、設計用風荷重は風に対する最大応答と同じ荷重効果をもたらす静的な風荷重として与え、平均風圧力に対する動的増幅効果をガスト影響係数で考慮する。

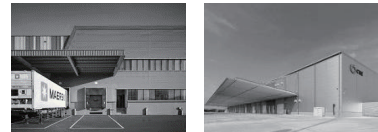


写真1 物流施設例

2. 風洞実験概要

2-1. 国内に実存する物流施設の幾何学的寸法に関する調査

国内物流施設業界における物流施設の基本デザインは、例えば梁下は基本5.5 mであるなど、

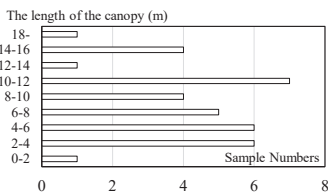


図1 庇の出の調査

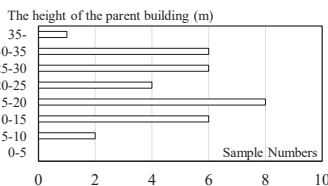


図2 建物軒高さの調査

共通している部分も多い。これは保管効率等を考慮しての数値である。しかしその他幾何学的寸法には、基本デザインなる共通性のないデータもある。そこで、日本に建設されている物流施設の幾何学的寸法に関する調査を行った。調査範囲は、庇の風力係数に関する規定のある諸外国規準⁴⁻⁶⁾で変数に指定されている庇の出と建物高さについてとした。本節ではその調査結果を概観する。なお本結果は、文献調査やヒアリング調査、民間企業各社への図面提供依頼などの結果に基づくものである。

図1は、庇の出の分布である。庇の出では、最大で16 m、最小で2 mのものが確認できた。ただし大半は2 m以上、12 m以下にあることもわかった。図2は、建物軒高さの分布で

*Effect of building height on characteristics of fluctuating wind force acting on canopies by Tomoki Hatekeyama, Kosuke Sato, and Yasushi Uematsu

表 1 実験ケースとその寸法(実スケール)

Case	Type	h (m)	H (m)	h/H	l (m)	L (m)	l/L
1	1	7.0	7.0	1.0	10	10	1.0
2	1	7.0	9.3	0.75	10	10	1.0
3	1	7.0	10.4	0.67	10	10	1.0
4	1	7.0	11.7	0.60	10	10	1.0
5	1	7.0	14.0	0.50	10	10	1.0
6	1	7.0	21.0	0.33	10	10	1.0
7	1	7.0	28.0	0.25	10	10	1.0
8	1	7.0	35.0	0.20	10	10	1.0
9	2	7.0	7.0	1.0	5	5	1.0
10	2	7.0	9.3	0.75	5	5	1.0
11	2	7.0	10.0	0.70	5	5	1.0
12	2	7.0	10.4	0.67	5	5	1.0
13	2	7.0	11.7	0.60	5	5	1.0
14	2	7.0	14.0	0.50	5	5	1.0
15	2	7.0	21.0	0.33	5	5	1.0
16	2	7.0	28.0	0.25	5	5	1.0
17	2	7.0	35.0	0.20	5	5	1.0



写真 2 高床式の例

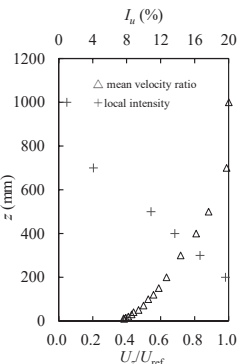


図 3 実験気流

ある。これは、5 m から 35 m 以上までの範囲に広く標本が存在する。その保管効率から、5 m 以下は少ないようであるが、あまり一般的な寸法は無いようである。また基本デザインの 1 つとして、写真 2 のような高床式が多く存在していることもわかった。これは、接車や荷役のためと考えられる。以上の調査結果を鑑み、国内に建設されている物流施設に採用されている幾何学的寸法の大分部を包括できるように次節で述べる実験模型の形状を決定した。

2-2. 実験模型と実験ケース

本実験の全ケースを表 1 に示す。庇の出の異なる 2 つの Type(Type1, Type2)でそれぞれ h/H を変化させた。実験模型はこれらを幾何学的縮尺率 1/200 で作製したものである。大庇を有する建物模型は矩形断面型とした。風洞実験には、建築研究所所有の回流型境界層風洞（幅 3.0 m×高さ 2.5 m×長さ 25 m）を用いた。使用した気流を図 3 に示す。建築物荷重指針²⁾の地表面粗度区分 IV の気流に相当する。その他実験に係る詳細は、既報^{たとえば 7)}の通りである。また本論で扱う幾何学的寸法関連記号の定義は図 4 の通りである。

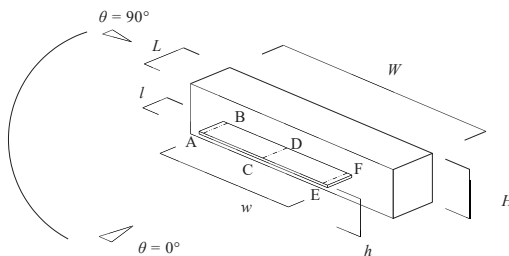


図 4 記号の定義

3. 庇の設計用風力係数の提案の方針

3-1. 風向とせん断力係数および曲げモーメント係数の定義

本論では、庇を受ける構造骨組としての片持梁が庇の中央部と端部に存在するものと仮定する。このような条件下で、風洞実験から得られた変動風圧をそれら梁に作用させ、梁基部の風荷重効果に注目する。ここでいう荷重効果が、曲げモーメントとせん断力であり、それらを数値計算で求める。ただし、骨組が負担する風力の負担幅は単位幅とする。また、風による共振はないものとする。庇骨組の風荷重を評価するための風力係数を、荷重効果に基づいて考察・提案する際の簡便さのため、以下では、庇を受ける構造骨組基部に生じる曲げモーメントとせん断力の時系列を無次元化し、次式のように曲げモーメント係数 $C_M(t)$ ならびにせん断力係数

$C_Q(t)$ として定義する。

(i) 曲げモーメント係数

$$C_M(t) = M(t) / q_H / l^2 \quad (1a)$$

$$M(t) = \sum_{k=1}^n (P_{uk}(t) - P_{dk}(t)) \cdot \Delta x_k \cdot x_k \quad (1b)$$

(ii) せん断力係数

$$C_Q(t) = Q(t) / q_H / l \quad (2a)$$

$$Q(t) = \sum_{k=1}^n (P_{uk}(t) - P_{dk}(t)) \cdot \Delta x_k \quad (2b)$$

ここに、 n : 風圧測定孔の数 (= 5), $P_{uk}(t)$: 時刻 t に底上面(u)の風圧測定孔 k に作用する風圧, $P_{dk}(t)$: 時刻 t に底下面(d)の風圧測定孔 k に作用する風圧, Δx_k : 圧力測定孔 k の負担長さ, q_H : 高さ H における基準速度圧, l : 庇長さ, x_k : 庇基部から圧力測定孔 k までの長さである。なおここでは、鉛直下向きの風力を正とする。

C_Q および C_M の平均値を C_{Q-ave} および C_{M-ave} , 最大値を C_{Q-max} および C_{M-max} , 最小値を C_{Q-min} および C_{M-min} とする。以下、最大値と最小値は総称して極値と呼ぶ (また C_Q^* と C_M^* と書く)。これら値は、フルスケール換算 10 分間の平均値, 最大値および最小値であり, 10 回の測定結果のアンサンブル平均で評価されている。

3-2. 各実験ケースにおける風向と風荷重効果の関係

各 Case において、風向毎に平均値と極値を調べた。結果の一例を図 5, 6 に示す。風圧係数は梁の位置や風向によって、また $h/H, l$ の幾何学的パラメータによっても変化していることが分かる。しかし耐風強度について設計では、極値に注目すべきである。そこで、各 Case の極値を抽出する。次章以降では、抽出した極値に基づき梁位置と $h/H, l$ の変数のみで表すことのでき

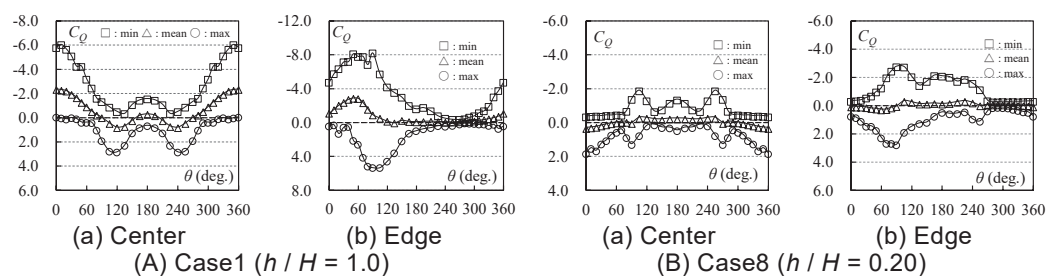


図 5 風向と荷重効果の関係 (Type 1)

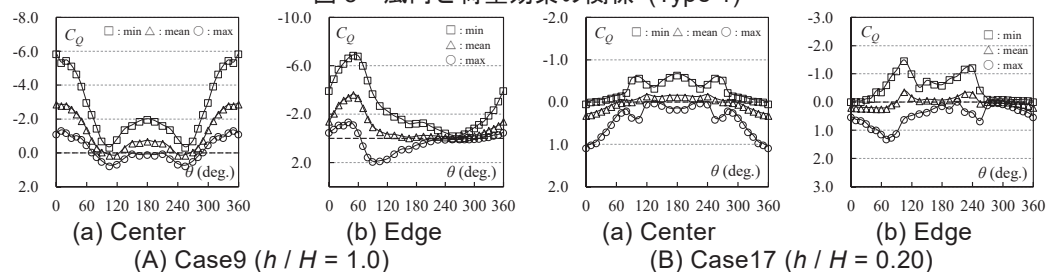


図 6 風向と荷重効果の関係 (Type 2)

る最悪の風荷重効果をもたらす等価静的な風力係数を提案する。

4. 2つの最大荷重効果を同時に満たす設計用風力係数の提案

4.1. 等価設計用風力係数の分布形状

等価設計用風力係数の分布形状は、最大荷重効果が得られる形状であれば任意の形状が可能である。従い本論では図7の例のように、梁を出の方向に均等二分割して、その各面について一様に平均化した平均風力係数 C_{f1} , C_{f2} を定めることとする。すなわち、風力係数の分布形状は均等二分割を基本にししながら、曲げモーメントとせん断力の極値を同時に満足できるように C_{f1} , C_{f2} を定める。またここに、 C_{f1} , C_{f2} を庇構造梁の等価静的風力係数と呼ぶこととする。

4.2. ガスト影響係数

庇構造梁の等価静的風力係数を、ガスト影響係数 G_f で除した値が本論の最終的な構造骨組用風力係数の提案値 C_{f1}^* , C_{f2}^* になる。 G_f は、荷重効果の最大値あるいは最小値と、平均値との比から求められる。図8, 9は、2つのTypeの G_f をそれぞれ $|C_{M-ave}|$ に対してプロットしたものである。これによると、ガスト影響係数を定めることができそうである。Type1では、 G_f はおよそ2.8となる。Type2では、 G_f はおよそ2.1とType1に比べてやや小さめである。

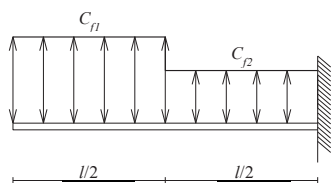


図7 二領域分割図

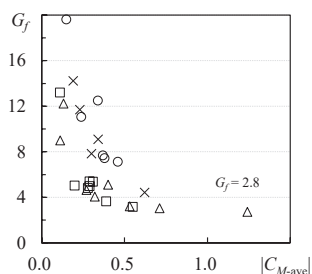


図8 ガスト影響係数(Type1)

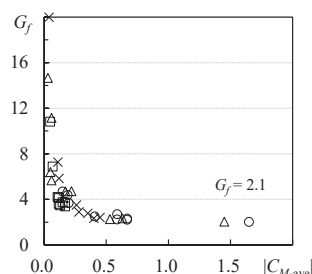


図9 ガスト影響係数(Type2)

4.3. 設計用風力係数の提案値

図5, 図6で一例を示した C_Q と、 C_M の全風向中における極値である C_Q^* と C_M^* に基づき、庇構造梁の等価静的風力係数 C_{f1} と C_{f2} を求めた上で、ガスト影響係数 G_f で除した設計用風力係数 C_{f1}^* , C_{f2}^* を算定した。このように求めた庇構造梁の設計用風力係数の一覧を表2, 表3に示す。

庇を支持する梁に作用する曲げモーメントとせん断力の2つの荷重効果に注目して、最大応答と同等の荷重効果を同時に再現し得るように設定している。本提案手法に基づく設計用風力係数により、建物規模の影響や風向、梁の位置の影響などを合理的に設計に反映することができるようになるものと考え。なお前述の通り、現状我が国には庇の風力係数に関する規定は存在しない。

5. 風力係数の提案値と文献値³⁾との比較

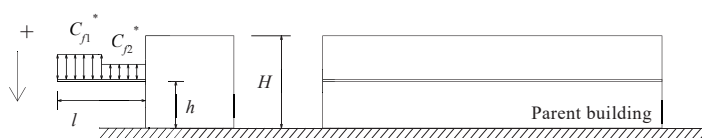
本章では、文献3)での算出方法に基づく庇の風力係数と本提案値を比較する。但し文献3)の

表 2 庇構造骨組設計用風力係数の提案値 (Type1 の結果に基づく)

h/H	Center				Edge			
	Negative (-)		Positive (+)		Negative (-)		Positive (+)	
	C_{f1}	C_{f2}	C_{f1}	C_{f2}	C_{f1}	C_{f2}	C_{f1}	C_{f2}
1	-2.8	-1.7	1.1	1.2	-3.3	-2.8	2.6	1.5
0.75	-1.8	-1.2	1.3	1.0	-2.7	-1.6	2.3	1.4
0.67	-1.4	-0.9	1.2	0.8	-2.3	-1.7	2.2	1.5
0.6	-1.1	-0.7	1.1	0.8	-2.1	-1.6	1.9	1.4
0.5	-1.9	-0.6	1.4	1.0	-2.1	-2.3	2.2	1.5
0.33	-1.1	-0.5	1.2	0.9	-2.0	-1.7	2.9	2.2
0.25	-1.3	-0.9	1.9	-0.6	-2.5	-1.3	3.8	0.7
0.20	-0.8	-0.6	0.8	0.7	-1.1	-1.0	1.3	0.9

表 3 庇構造骨組設計用風力係数の提案値 (Type2 の結果に基づく)

h/H	Center				Edge			
	Negative (-)		Positive (+)		Negative (-)		Positive (+)	
	C_{f1}	C_{f2}	C_{f1}	C_{f2}	C_{f1}	C_{f2}	C_{f1}	C_{f2}
1	-3.0	-2.7	0.5	0.3	-3.1	-3.5	1.2	0.8
0.75	-1.5	-1.4	0.6	0.2	-1.6	-1.3	1.0	0.8
0.70	-1.2	-1.1	0.6	0.2	-1.5	-1.5	1.0	0.7
0.67	-1.4	-0.6	0.6	0.2	-1.4	-1.4	1.1	0.7
0.6	-0.9	-0.5	0.6	0.4	-1.3	-1.3	0.8	0.7
0.5	-0.8	-0.4	0.7	0.4	-1.0	-1.0	0.9	0.7
0.33	-0.5	-0.3	0.5	0.5	-0.9	-0.7	0.8	0.7
0.25	-0.4	-0.3	0.6	0.5	-0.7	-0.7	0.8	0.8
0.20	-0.4	-0.3	0.6	0.5	-0.7	-0.8	0.7	0.6



(表中の記号の定義)

考え方は、庇を吹上げる方向の風力係数しか規定されない。そこで負の風力係数のみを比較検討対象とする。結果は図 10 の通りである。なお風力係数を表す記号には C_f を用いている。

図 10 を見ると、 h/H が大きい範囲では本提案値が大きく得られており、一方 h/H が小さい範囲では特に Type2 と比較すると文献 3) の値が大きくなることが分かった。本論より、現行の方法では風荷重を過小評価あるいは過大評価してしまう可能性が示唆される。

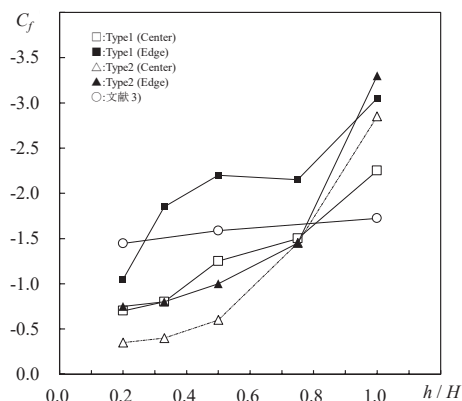


図 10 提案値と文献 3)の比較

6. まとめ

梁位置と $h/H, l$ の変数のみで表される、庇の基部に作用する最悪の風荷重効果を同時に満足する構造骨組用風力係数を提案した。変数の設定は、既存物件に関する寸法調査結果を反映させることで、国内に建設されている物流施設に採用されている幾何学的寸法の大分部を包括できるようにした。対象範囲外における風力係数の検討が今後の課題である。

謝辞

本風洞実験を実施するにあたり、国立研究開発法人建築研究所の奥田泰雄氏に多大な協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。本研究を進めるにあたり、多大なご協力と助言を頂いた亀田一彦様はじめ東北大学工学部第2製作技術班の皆様にも深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 国土交通省：最近の倉庫着工の動向について、
<http://www.mlit.go.jp/toukeijouhou/toukei07/geturei/4/geturei07-045.pdf> (2018.01.09 最終閲覧)
- 2) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，日本建築学会，2015
- 3) 国土交通省建築研究所：改正建築基準法の構造関係規定の技術的背景，ぎょうせい，2001
- 4) DIN EN 1991-1-4, Einwirkungen auf Tragwerke - teil 1-4 : Allgemeine Einwirkungen - Windlasten, 2010
- 5) Standards Australia : Australian/New Zealand Standards, Structural Design Actions, Part 2 : Wind actions, 1170.2, 2002
- 6) Bureau of Indian Standards : Indian Standard code of practice for design loads (other than earthquake) - (Part 3-wind loads) for buildings and structures, 2015
- 7) 島山智貴，奥田泰雄，佐藤公亮，植松康：大庇基部に作用する風力の特性に及ぼす矩形建物規模の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.111-112, 2017.8