

建築物の竜巻による被害発生メカニズム の解明に資する実験的研究の展開

喜々津 仁密¹

¹ 独立行政法人建築研究所 構造研究グループ (〒305-0802 茨城県つくば市立原1)

筆者らは竜巻による風力特性や飛来物の挙動を把握することを目的として、竜巻状気流発生装置を設計・製作した。本稿では、同装置の概要や実験気流の特性を示し、竜巻が低層建築物の真上を通過する状況を想定した風圧実験の結果を報告する。また、風圧実験で得た風力特性と2012年茨城県つくば市で発生した竜巻による被害発生状況との対応関係を考察するとともに、竜巻による突風荷重算定の考え方を提案し、現行規定での風荷重との比較を試みる。

キーワード 竜巻、竜巻状気流発生装置、低層建築物、風力係数

1. はじめに

2006年に北海道佐呂間町、2012年に茨城県つくば市(図-1参照)でそれぞれ発生したフジタスケールF3規模の甚大な竜巻災害を背景に、近年では竜巻に対する社会的な関心も高く、また竜巻による被害発生メカニズムの検証等に必要な研究の推進、物的被害を軽減させるための方策の整備が求められている^{1),2)}。一般に竜巻通過時には、図-2に示すように水平方向の旋回流、鉛直方向の上昇流及び周囲からの飛来物が生じ、これらの建築物への作用としては以下が挙げられる^(例えば3)。しかし、これらを実験的に再現するためには従来の乱流境界層風洞では限界があり、竜巻通過時に作用する荷重・外力の特性は十分に明らかにされていないのが現状である。

- 1) 風圧力
- 2) 気圧降下による力
- 3) 飛来物による衝撃力



図-1 つくば市内で発生した竜巻

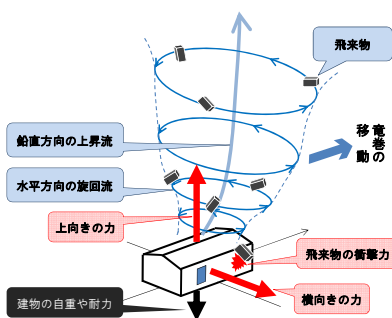


図-2 竜巻による風圧力等の作用

そこで本研究では、竜巻による風力特性や飛来物の挙

動を把握することを目的として、移動する竜巻状の旋回流を模擬できる装置(以下「竜巻状気流発生装置」)を設計・製作した。そして、本装置での実験気流のランキン渦モデルへの適合性を検証し、竜巻が低層建築物の真上を通過することを想定した風圧実験を行った。ここでは、上記1), 2)の外力が建築物に作用する際の風力特性に着目した検討を行い、実際の被害発生状況との対応についても考察する。また、風圧実験の結果に基づき竜巻による突風荷重算定式を提示し、現行規定での風荷重との比較を行う。

2. 竜巻状気流発生装置の概要と実験気流の特性^{4),5)}

(1) 装置の概要

竜巻状気流発生装置はアイオワ州立大学所有の装置(以下「ISU型装置」)⁶⁾の機構に倣ったものであり、国土技術政策総合研究所、建築研究所、東京大学、京都大学防災研究所が共同で設計・製作した。装置は送風機を内蔵した「本体」、横方向に自走可能な「自走式架台」、上下に昇降可能な「ステージ」及び「制御盤」から構成される。

図-3に装置の概観、図-4に本体の断面図をそれぞれ示す。本体各部の寸法はISU型装置の約1/3.7であり、外径と送風機の直径はそれぞれ1.5m、0.5mである。図-4に示すように下降流に強制的に旋回性状を与えるガイドベーンが均等に18枚配置されており、中心からの法線方向に対する角度を0~55度の範囲で設定できる。また、装置の全高は約2.3m、架台の自走範囲は原点に対して±1.4m(最大移動速度0.4m/s)である。ステージの中央部では、模型設置用の平板と気流可視化実験用のガラスをはめ込んだ平板とを交換することができる。

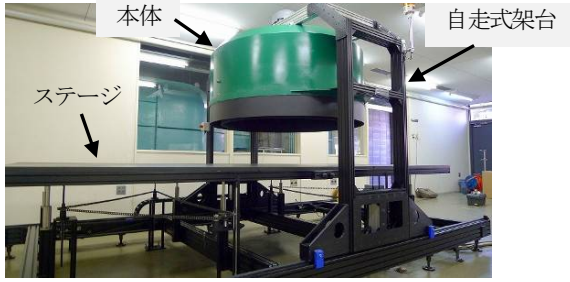


図-3 竜巻状気流発生装置の概観

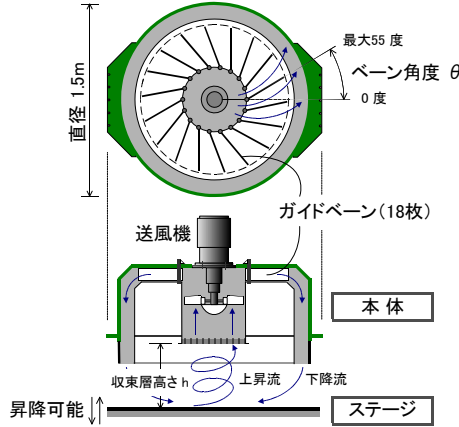


図-4 本体の断面図

(2) 水平面内の気流の基本特性

一般に竜巻の工学モデルとしては、(1)式に示すランキン渦モデルが用いられている^{例えば3,7)}。ここで、 V ：竜巻状気流の接線風速、 V_m ：最大接線風速、 R_m ：コア半径、 x ：竜巻状気流の中心に対する座標である。

$$V(x) = \begin{cases} V_m \frac{|x|}{R_m} & (|x| \leq R_m) \\ V_m \frac{R_m}{|x|} & (|x| > R_m) \end{cases} \quad (1)$$

そこで本装置による実験気流の同モデルへの適合性を確認するため、PIV(Particle Image Velocimetry)実験を行って水平面内の風速分布を把握した。PIV 実験はサンプリング周波数 500Hz、取得画像 2,727 枚の条件で行い、平均流速場の x, y 方向の風速から接線、法線両方向の風速を算出した。測定結果の一例を図-5, 6に示す。 $x=0$ 近傍での接線風速 V はモデルよりも下に凸の傾向を示すが、(1)式に示すランキン渦モデルに概ね適合している。

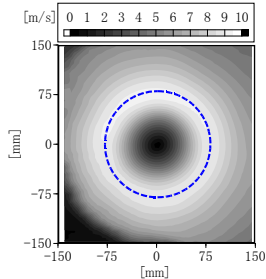


図-5 水平面内の平均流速場 (点線上が最大接線風速の範囲)

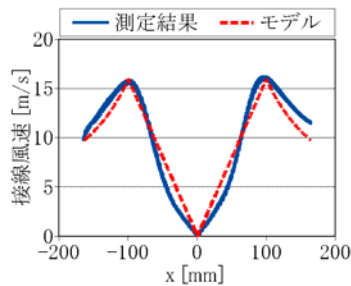
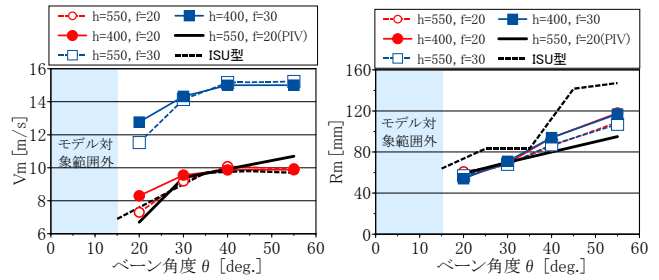


図-6 接線風速の分布

また、PIV 実験及び床面上の風圧実験の結果を踏まえて、実験気流を制御する各種設定値（送風機の回転数制御周波数 f [Hz]、ペーン角度 θ [deg]及び収束層高さ h [mm]）と(1)式を規定する数値 V_m, R_m との関係を図-7に整理した。



(a) 最大接線風速 V_m

(b) コア半径 R_m

図-7 実験気流を制御する各種設定値とランキン渦モデルを規定する数値との関係

3. 低層建築物模型を用いた風圧実験

(1) 風圧実験の概要

本節では、竜巻が低層建築物の真上を通過することを想定した風圧実験の概要をまとめる。距離、風速及び内容積の縮尺率 $\lambda_L, \lambda_{vel}, \lambda_{vol}$ はそれぞれ次式で設定した。文献 8) に倣って、建築物形状は梁間方向 24.4m、桁行方向 38.1m、軒高 12.2m を想定し、開口条件に関しては、各壁面に一様なすき間（当該壁面積に対する面積比 0.13%）と竜巻の進行方向右側の壁面に矩形の卓越開口（同 3.3%）を設けている。図-8 に建築物模型の設置状況を示す。

$$\lambda_L = \frac{1}{350} \quad \lambda_{vel} = \frac{1}{10} \quad \lambda_{vol} = \frac{\lambda_L^3}{\lambda_{vel}^2} = \frac{1}{428,750} \quad (2)$$

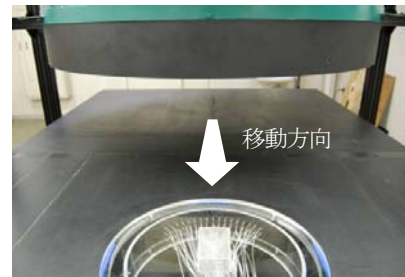


図-8 建築物模型の設置状況

風圧実験はサンプリング 100Hz、データ個数 1024 の条件で行い、建築物模型の外圧測定点は屋根面が計 20 点、壁面が計 26 点である。次節で掲げる風力・風圧係数は、風圧値を V_m から得られる速度圧 $1/2 \cdot \rho V_m^2$ (ρ ：空気密度) で規準化して得たものであり、それぞれの実験ケースについて 10 回のアンサンブル平均結果を掲げている。

装置側の設定に関しては、回転数制御周波数 $f=20$ Hz、ペーン角度 $\theta=55$ deg、収束層高さ $h=550$ mm とし、装置の移動速度 V_T は 0.06, 0.20, 0.36m/s の 3 通りとした。これらの条件に基づけば図-7 より、実験気流の最大接線風

速 $V_m=9.8\text{m/s}$, コア半径 $R_m=0.12\text{m}$ である. さらに, これを(2)式の縮尺率に当てはめれば実スケールで $V_m=98\text{m/s}$, $R_m=42\text{m}$ となり, コア半径は文献 7) に定める設計上の数値 45.7m (150ft) と概ね整合している.

(2) 実験結果

図-9 に座標等の定義, 図-10, 11 に Z 方向の風力係数, 図-11 に X, Y 方向の風力係数の結果をそれぞれ示す.

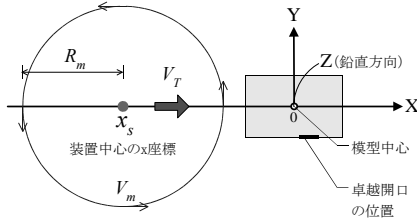


図-9 座標等の定義

各図の横軸は, 模型中心 (原点) に対する装置の中心位置の座標 x_s を旋回流のコア半径 R_m で規準化した数値である.

a) 模型付近の渦中心と移動速度との関係

模型付近の渦中心を外圧係数 C_{pe} のピーク中心 (図-10, 11 中の矢印) 及び風力係数 C_{Fx} , C_{Fy} が 0 となる位置 (図-12 中の矢印) に対応するとみなす. 図-10 の結果によれば, 移動速度 V_T が大きくなるにつれて, 装置中心と模型付近の渦中心との間の距離が大きくなる傾向が認められる. これは, 移動速度が速いほど渦が移動方向に対して前傾する傾向が大きくなることを示しており, その傾向は既往の竜巻模擬実験の結果⁹⁾とも合致している.

移動速度と内圧係数 C_{pi} との関係に注目すると, 移動速度が大きくなるほど内圧係数 (絶対値) の最大値が小さくなり, 特に接近時に内圧の伝播に遅れが生じる傾向が認められた. この傾向は第 4 節(1)に示す風力のモデル化への反映も含めて, 今後より詳細に考察すべき課題であると思われる. なお, 本実験での条件下では, 移動速度と外圧係数 (絶対値) の最大値との関係に明確な傾向は認められない.

b) Z 方向の風力係数

図-10(a)及び図-11 に示す $V_T=0.06\text{m/s}$ の場合を例にする

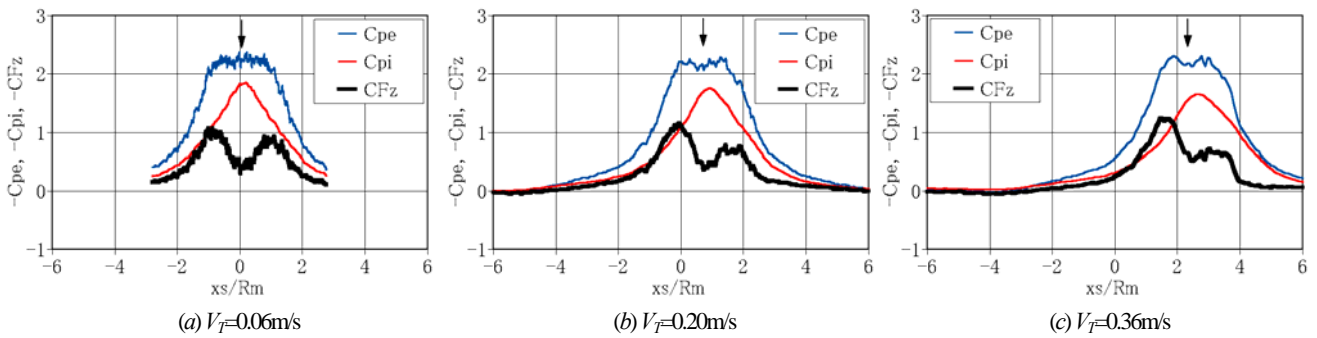


図-10 Z 方向の風力係数 C_{Fz} (すき間のみ有する場合)

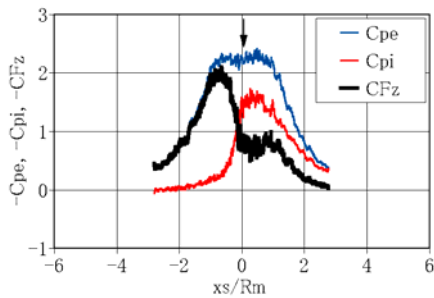


図-11 Z 方向の風力係数 C_{Fz} ($V_T=0.06\text{m/s}$) (すき間と卓越開口を有する場合)

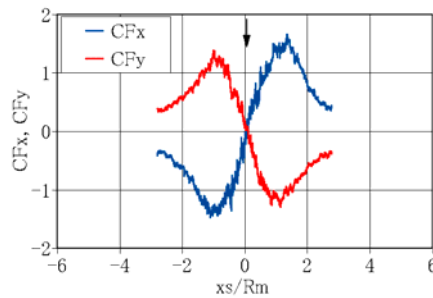


図-12 X, Y 方向の風力係数 C_{Fx} , C_{Fy} ($V_T=0.06\text{m/s}$)

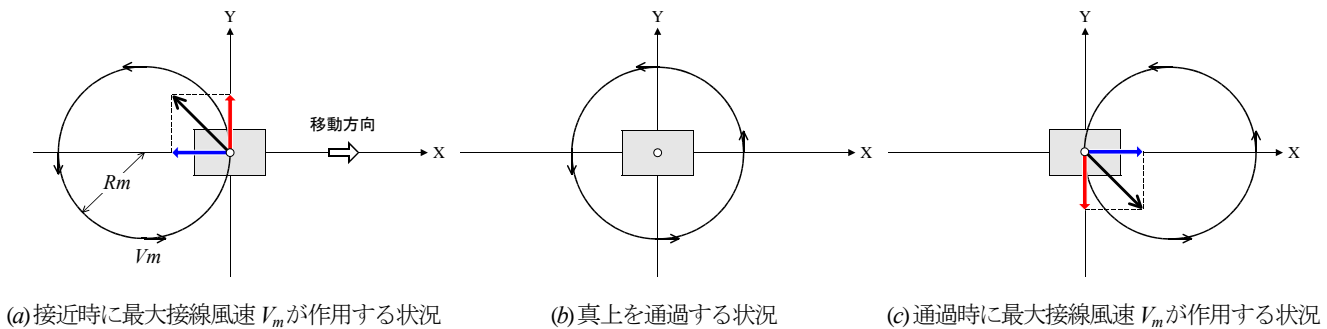


図-13 移動する旋回流の位置と XY 平面内の力の作用方向との関係

と、風力係数 C_{Fz} の絶対値は $x/R_m \approx -1.0$ 又は 1.0 のときに最大値をとる。これは、旋回流の最大接線風速 V_m が模型の中心付近に作用するタイミングに相当する。そして、すき間と卓越開口を有する場合の最大値はすき間のみ有する場合の約2倍となり、この結果から卓越開口を生じさせないことが荷重の軽減に有効であることが言える。

c) X, Y 方向の風力係数

図-12に示す風力係数 C_{Fx} , C_{Fy} いずれも最大・最小値は $\pm 1.0 \sim 1.5$ であり、これらの数値は $V_f=0.06\text{m/s}$ の場合、 $x/R_m \approx -1.0$ 又は 1.0 のときに生じている。この結果から Z 方向の風力係数と同様に、旋回流の最大接線風速 V_m が模型の中心付近に作用するときに X, Y 方向の風力が最大になると考えられる。

次に図-12の結果を踏まえて、移動する旋回流の位置と XY 平面内での水平力の作用方向との関係を図-13にまとめる。接近時又は通過時に最大接線風速が模型中心に作用する状況(同図(a), (c))では、X 方向の力が旋回流の中心に向かう方向、Y 方向の力が接線風速と同じ方向であることから、それらの合力としては、移動する方向に対して接近時に左斜め後方、通過時に右斜め前方に作用することがわかる。また、旋回流の中心が模型中心と一致するタイミング(同図(b))では、水平力がほぼ0になっている。

(3) 実際の被害状況と実験結果との対応関係

ここでは、2012年に茨城県つくば市で発生した竜巻(以下「つくば竜巻」)による被害事例のうち、基礎を伴う上部構造が転倒した木造建築物を対象に、その被害状況と実験結果との対応について考察する。



図-14 基礎を伴う上部構造が転倒した木造建築物の被害状況

図-14に上空から撮影された被害状況を示す。地域住民が撮影した動画や周囲の被害状況から、竜巻の中心はこの建築物付近を通過したものと推定されており¹⁰⁾、図-14をみると推定中心経路に対してべた基礎が右方向に転倒していること、また上部構造の多くが右斜め前方に飛散していることが認められる。これらの被害方向は

図-13(c)に示す力の作用方向と概ね対応していることから、竜巻がこの建築物付近を通過したタイミングでの転倒及び飛散が、被害発生時の可能性の1つとして考えられる。

4. 実験結果に基づく突風荷重の算定

耐風設計上の観点では、第一義的に竜巻による突風荷重レベルを適切に評価することが重要である。そこで本節では、前節の風圧実験結果に基づき屋根に作用する突風荷重を算定し、現行規定での風荷重との比較例を提示する。

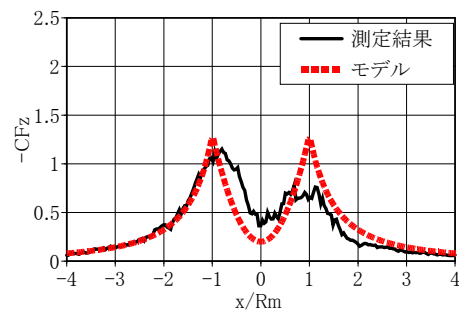
(1) 屋根の風力係数

$V_f=0.20\text{m/s}$ の場合について、風圧実験で得た Z 方向の風力係数を既往の風力モデル⁸⁾による風力係数と比較した結果をまとめる。既往の風力モデルは(3)式の通りであり、 x : 模型付近の渦中心(図-10, 11中の矢印)に対する座標、 C_a : 急激な気圧降下による風力係数、 C_w : 旋回流の直接作用による風力係数、 C_{we}^* : 旋回流による外圧係数、 α_i : 卓越開口の有無の条件に応じた数値、 ε_r : すき間面積に応じた数値、 C_{wi} : 卓越開口を有する場合の内圧係数である。

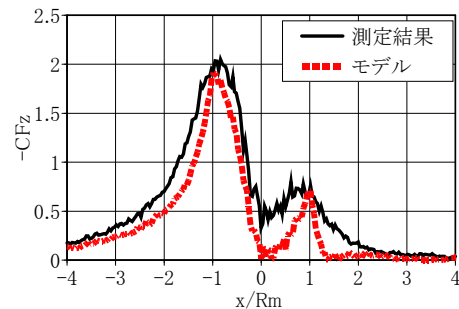
$$C_{Fz}(x) = C_a(x) + C_w(x) \tag{3}$$

$$= C_{ae}(x) + C_{we}(x) - C_i(\alpha_i, x)$$

$$= \begin{cases} \frac{x^2}{R_m^2} (C_{we}^* - \alpha_i \varepsilon_r + 1) - 2(1 - \alpha_i \varepsilon_r) - (1 - \alpha_i) C_{wi}(x) & (|x| \leq R_m) \\ \frac{R_m^2}{x^2} (C_{we}^* + \alpha_i \varepsilon_r - 1) - (1 - \alpha_i) C_{wi}(x) & (|x| > R_m) \end{cases}$$



(a) すき間のみ有する場合



(b) すき間と卓越開口を有する場合

図-15 屋根の風力係数 C_{Fz} に関する実験結果と風力モデルとの比較

図-15に、風力係数の実験結果と同モデルとの比較結果を示す。ここで、 $C_{we}^* = -1.2$, $\varepsilon_r = 0.9$ であり、(a)のすき間のみ有する場合は $\alpha_i = 1$, (b)のすき間と卓越開口を有する場合は $\alpha_i = 0$ とし、卓越開口に近い外圧測定孔4点の平均値を C_{wi} とした。いずれの開口条件の場合も、(3)式による風力モデルは実験結果を適切に記述していることがわかる。

(2) 突風荷重の算定式

風力係数 $C_{Fe}(x)$ の数値は10回のアンサンブル平均結果であるから、ここでは正規母集団の母平均の区間推定の考えに基づき、測定結果間のばらつきを反映した補正係数を導入して風力係数を割り増す。ここで、割り増すための補正係数を $v(x)$ とすれば、屋根に作用する突風荷重 W_t の算定式は(4)式で表される。そして補正係数 $v(x)$ は、10回の測定結果から得た C_{Fe} の変動係数を用いて(5)式で評価した。ここで、 $s_c(x)$: 風力係数の標本標準偏差, $COV(x)$: 風力係数の変動係数, n : 測定回数(ここでは10)であり、 t は自由度 $n-1$, 信頼係数95%としたとき t 分布から得られる数値2.26である。

$$W_t(x) = \frac{1}{2} \rho V_m^2 \cdot C_{Fe}(x) \cdot v(x) \quad (4)$$

$$v(x) = \frac{1}{C_{Fe}(x)} \left[C_{Fe}(x) + \frac{t \cdot s_c(x)}{\sqrt{n}} \right] = 1 + \frac{t}{\sqrt{n}} \cdot COV(x) \quad (5)$$

図-16に補正係数 $v(x)$ を示す。開口条件や x によって結果が異なるが、風力係数の絶対値が最大となり得る $x = \pm R_m$ では、いずれの開口条件の場合も補正係数が約1.2となっている。

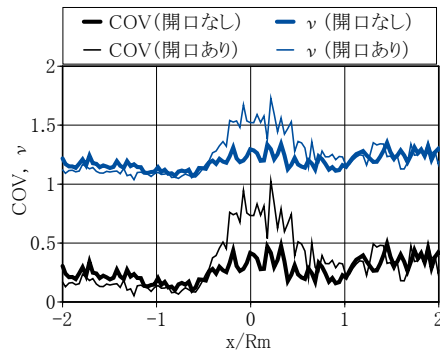


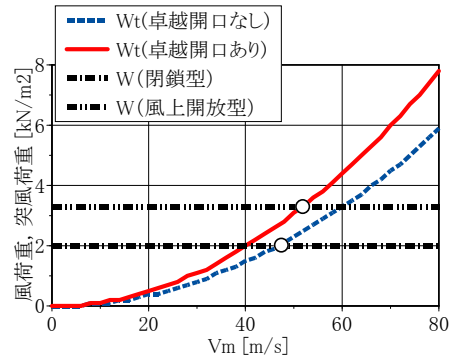
図-16 補正係数 v

(3) 突風荷重と現行規定の風荷重との比較

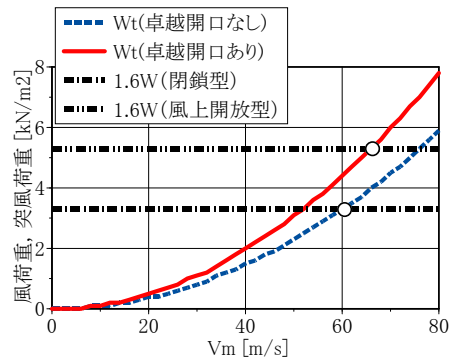
一般に、現行の耐風設計で用いる基準風速には竜巻の通過に伴う突風の風速は反映されていないことから、以下では建築基準法施行令に定める基準風速 $V_0 = 38 \text{ m/s}$ での地域(例えば千葉県茂原市, 高知市)を例として、地表面粗度区分IIでの中程度の風荷重 W , 最大級の風荷重 $1.6W$ と(4)式で得た突風荷重 $W_t(-R_m)$ との比較を行う。ここで現行規定での風荷重の算定に当たり、屋根の外圧係数は -1.0 とする。また、飛来物によって外装材が破壊されて大開口ができる場合を想定し開放型とみなして設

計する考え方(例えば^{11), 12)}もあることから、内圧係数は0(閉鎖型), 0.6(風上開放型)の2通りについて算定し、それぞれ卓越開口がない場合, ある場合の突風荷重と比較する。

図-17に両荷重の比較結果を示す。中程度の風荷重 W は $V_m = 50 \text{ m/s}$ での突風荷重と概ね等しい。一方、瞬間風速の増加とともに開口部の甚大な損壊被害も多くなることから、例えば $V_m = 70 \text{ m/s}$ での突風荷重(卓越開口ありの場合)は、最大級の風荷重 $1.6W$ に対して約1.8倍(閉鎖型とみなす場合), 約1.2倍(風上開放型とみなす場合)の荷重レベルとなっている。



(a) 中程度の風荷重 W との比較



(b) 最大級の風荷重 $1.6W$ との比較

図-17 突風荷重と現行規定の風荷重との比較

5. まとめと今後の展開

(1) 本研究のまとめ

本稿では、筆者らが製作した竜巻状気流発生装置の概要と実験気流の特性をまとめるとともに、竜巻が低層建築物の真上を通過する状況を想定した風圧実験の結果を示した。主な知見等は以下の通りである。

- ① 実験気流の接線風速分布がランキン渦モデルに適合していることを示し、実験気流を制御するベーン角度その他の設定値とランキン渦を規定する数値 V_m , R_m との関係进行を明らかにした。
- ② 風圧実験結果より、移動速度が速いほど旋回流中心が移動方向に対して前傾する傾向が大きくなる。
- ③ X, Y, Z方向いずれも、移動する旋回流の最大接線風速が建築物の中心に作用するタイミングで風力が最大と

なる。また、卓越開口がある場合は、ない場合よりもZ方向の風力が約2倍になった。

④ つくば竜巻による被害事例（転倒した木造建築物）の被害方向が、移動する旋回流の最大接線風速が模型中心に作用するタイミングでの力の方向と概ね対応していることを示した。

⑤ 竜巻による突風荷重の算定式を提案し、現行規定での風荷重との比較を試みた。

(2) 今後の研究の展開

本研究で得た知見を踏まえ、今後展開すべき諸課題を以下にまとめる。

① 系統的な実験パラメータに基づく風力特性の把握

竜巻による風力特性に影響を与えると考えられるパラメータに基づく風圧実験結果を蓄積する必要があるが、具体的には本研究で考慮したパラメータも含め、1) 壁面の開口状況、2) 竜巻-建築物間の相対関係（大きさ・位置）、3) 移動速度、4) 地表面粗度の有無が挙げられる。特に、竜巻が台風による強風と比較してスケールの極めて小さい事象（一般に被害の幅が数百メートル程度）であることから、旋回流のコア半径と建築物の代表寸法との比率や建築物に対する竜巻の通過経路は荷重評価に当たり重要なパラメータになり得る。

② 竜巻による特徴的な被害発生メカニズムの解明

つくば竜巻による被害では、典型的な被害形態がある一方で、過去にはみられなかった新たな被害形態も明らかになったことから、上記①で得られる実験的知見も活用して特徴的な被害の発生メカニズムを解明する必要がある。

③ 竜巻被害軽減のための性能検証法の検討

つくば竜巻では工業団地内にある事業所施設が被災し、多大な経済的な損失が発生した事例もみられた。このような事例を踏まえ、人命・財産・機能保護の観点で被災後の影響が極めて大きい用途施設（重要施設等）を対象に、通常の耐風設計での性能検証クライテリアを超えた竜巻に対する検証の考え方を系統的に整備することは、重要施設等の竜巻による被害軽減及び機能継続を図るうえで必要である。

謝辞 竜巻状気流発生装置の設計・製作に当たり、科学研究費補助金基盤研究(B)「建築物の突風危険度評価に適用可能な竜巻発生装置の開発（課題番号 21360273・研究代表者 喜々津仁密）」の援助を受けた。ここに謝意を表します。

参考文献

1) 田村幸雄ほか：突風に対する各種構造物等の設計ガイドラインの研究、竜巻等の実態および発生予測と対策、平成 19 年度科学技術振興調整費補助金 重要政策課題への機動的対応の推進 研究成果報告書、pp. 403-486、

2008.

- 2) 内閣府：「竜巻等突風対策局長級会議」報告、2012
http://www.bousai.go.jp/tomado_kyokuchou/kyokuchou/houkoku.pdf
- 3) E.Simiu, *et al.*: Wind Effects on Structures, Third edition, John Wiley & Sons, Inc., pp.551-575, 1996.
- 4) 喜々津仁密ほか：トルネード発生装置を活用した低層建築物に作用する風力特性に関する研究、日本風工会誌、Vol. 34, No. 2, pp.237-238, 2009.
- 5) H.Kikitsu, *et al.* : Fundamental Characteristics of Vortex Structure in a Laboratory-Simulated Tornado, Proceedings of 9th International Symposium on Particle Image Velocimetry-PIV'11, 2011.
- 6) F.L.Haan, *et al.*: Design, construction and performance of a large tornado simulator for wind engineering applications, Engineering Structures, Vol.30, Issue 4, pp.1146-1159, 2008.
- 7) U.S. Nuclear Regulatory Commission: Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, 2007.
- 8) 喜々津仁密ほか：竜巻状気流発生装置を活用した低層建築物に作用する風力特性に関する基礎的研究、第 21 回風工学シンポジウム論文集、pp.149-154, 2010.
- 9) 佐々浩司：鉛直軸を持った渦の再現実験、京都大学防災研究所一般共同研究集会 18K-02, pp.20-23, 2006.
- 10) 奥田泰雄ほか：2012 年 5 月 6 日つくば竜巻による建築物の被害、第 22 回風工学シンポジウム論文集、2012（投稿中）
- 11) 国土交通省住宅局建築指導課ほか監修：2007 年版建築物の構造関係技術基準解説書、pp.246-260, 2007.
- 12) International Code Council: ICC/NSSA Standard on the Design and Construction of Storm Shelters, pp.7-15, 2008.