

転倒した木造建築物に作用した風速の推定について

—平成 24 年 5 月 6 日に茨城県つくば市で発生した竜巻による建築物被害の考察—

国土交通省 国土技術政策総合研究所
独立行政法人 建築研究所

1. 検討の主旨

国土技術政策総合研究所と建築研究所は、平成 24 年 5 月 6 日に茨城県つくば市で発生した竜巻による建築物被害の現地調査を実施し、被害形態の分類を行うとともに、竜巻により被災した建築物などについて採寸等を行った¹⁾。以下の検討では竜巻による転倒が確認された木造建築物について、水平方向の旋回流や急激な気圧降下によって生じる力、建築物の転倒メカニズム、建築物重量等のいくつかの計算上の仮定に基づき、建築物の基礎の風上端が浮き上がり始める風速(以下「転倒開始風速」)を推定した。なお、本報告は速報として示したものであり、今後、さらに検討・考察を加え、それらを含めた報告を公開する予定である。

2. 風力評価

一般に、竜巻によって建築物に作用する力としては、以下の 3 つが挙げられる^{例えば 2)}。

- i) 水平方向の旋回流によって生じる風力
- ii) 急激な気圧降下によって生じる力
- iii) 飛来物による衝撃力(本検討では考慮しない)

i) では、一様な水平流が建築物に作用すると仮定し、その風圧力 ω (N/m²) は下式で表される。ここで、 ρ : 空気密度 (1.2 kg/m³)、 V : 竜巻の突風風速 (m/s)、 C_f : 風力係数であり、 V は水平方向の旋回流の風速と竜巻の進行速度をベクトル的に加算したものである((2.1)式)。

$$\omega = \frac{1}{2} \rho V^2 \times C_f \quad (\text{N/m}^2) \quad (2.1)$$

一方、ii) では、一様な水平流を想定した風力算定では考慮されないものであり、竜巻の中心が建築物付近を通過する場合など、i)に加えて、竜巻による急激な気圧降下により鉛直上向きに吸い上げる力が屋根等の各部を含めた建築物全体に作用する。

なお、本推定では風力による転倒モーメントについて検討しているため、水平方向に対しては屋根平均高さから地盤面までの風圧力の積分値、鉛直方向に対しては屋根面の範囲(軒の出の範

囲を除く)での風圧力の積分値がそれぞれ風力として建築物に作用したと考えている。

3. 突風による転倒が確認された被災木造建築物

当該建築物(文献1)の写真1,2)は茨城県つくば市北条に所在する木造2階建てであり、基礎が上下反転した状態で張間方向に転倒し、1階部分が崩壊していた(写真1参照)。周辺には傾斜した鉄骨造建築物(文献1)の写真18)、土台基礎を残し上部構造が飛散した木造建築物(文献1)の写真5,6)等が確認され、竜巻で生じた突風により建築物等に甚大な被害が確認された地域である。

転倒した基礎の寸法(レーザー距離計測および写真から推定)から床平面は張間6.5m×桁行9.2mと推定された。屋根は寄棟瓦屋根であり3寸勾配と仮定した。軒の出の長さは航空写真から測定された屋根平面と床平面を比較し、木造建築物の標準的な寸法も踏まえて0.455m(片側)と推定した。これらより、地盤面からの屋根平均高さは6.45mと算定される。また、崩壊メカニズムは張間構面の風下側の基礎底辺(図1(a)の基礎底辺)を転倒回転中心と仮定し、高さHとして6.45m(地盤面からの屋根平均高さ)+0.2m(基礎の底盤厚さ)=6.65mを用いた。一方、建築物総重量は、630.5kNと算定した(参考1参照)。

4. 風速の推定

(1) 竜巻の水平方向の旋回流のみが建築物に作用する場合

当該建築物に対して一様な水平流を想定した風力係数(水平および鉛直上向き方向)で算定した風力が、当該建築物の転倒抵抗モーメントに達する時の風速は、以下のとおり算定される。

桁行長さB(m)、張間長さD(m)、高さH(m)とする。

建築物総重量W(kN)、基礎の底盤厚さH'(m)とする。

転倒抵抗モーメント M_w (Nm)、水平方向の風力による転倒モーメント M_h (Nm)、鉛直方向の風力による転倒モーメント M_v (Nm)とする。

ここで、建築物の基礎回転中心周りの転倒抵抗モーメント M_w は建築物総重量Wに建築物張間長さDの半分を乗じて算定している((4.1)式)。一方、風力による転倒モーメント(M_h および M_v)は建築物の屋根面(B×D)と建築物桁行の壁面(B×(H-H'))に作用する風圧力($0.5\rho V^2 \times C_{fh}$ または C_{fv1} 、 C_{fv2} 、 C_{fv3} 、 C_{fv4})を積分して算定している((4.2)式、(4.3)~(4.4)式)。ここで、qは速度圧(N/m²)を表し、 C_{fh} は建築物桁行の壁面の風力係数、 C_{fv1} 、 C_{fv2} 、 C_{fv3} 、 C_{fv4} はそれぞれ寄棟屋根に作用する鉛直上向きの風力係数である。

$$M_w = W \times (D/2) \times 1000 \quad (\text{Nm}) \quad (4.1)$$

$$M_h = B \int_{H'}^H (0.5 \rho C_{fh} V^2) x dx \quad (\text{Nm}) \quad (4.2)$$

$$q = 0.5\rho V^2 \quad (\text{N/m}^2) \quad (4.3)$$

$$M_v = \int_0^{D/2} 2C_{fv2}qx^2 dx + \int_{D/2}^D 2C_{fv1}qx(D-x)dx + \int_0^{D/2} C_{fv4}qx(B-2x)dx + \int_{D/2}^D C_{fv3}qx(B-2D+2x)dx$$

$$= \left\{ \frac{1}{12}D^3C_{fv2} + \frac{1}{6}D^3C_{fv1} + \left(\frac{1}{8}BD^2 - \frac{1}{12}D^3 \right)C_{fv4} + \left(\frac{3}{8}BD^2 - \frac{1}{6}D^3 \right)C_{fv3} \right\} q \quad (\text{Nm}) \quad (4.4)$$

ここで想定した風圧力分布を図 1(a)に示す。鉛直上向きの風力係数 C_{fv1} 、 C_{fv2} 、 C_{fv3} 、 C_{fv4} としては、文献 4)に掲載されている寄棟屋根を有する建築物に作用する外圧係数($C_{fv1} = -1.0$, $C_{fv2} = -0.5$, $C_{fv3} = -0.69$, $C_{fv4} = -0.5$)を仮定し、建築物桁行の壁面の風力係数 $C_{fn} = 1.2$ を仮定すると、

転倒開始風速 $V = 97$ (m/s)

(2) 竜巻による急激な気圧降下が建築物に作用する場合

当該建築物に対して、水平方向の旋回流によって生じる風力に加えて竜巻通過時の急激な気圧降下によって生じる力が作用する場合、これらの合力としての力が当該建築物の転倒抵抗モーメントに達する時の風速は、以下のとおり算定される。

ここで、鉛直上向きの風力係数 C_{fv} と建築物桁行の壁面の風力係数 C_{fn} は、既往の移動する竜巻状気流発生装置を活用した風圧実験結果³⁾を援用する(参考 2 参照)。ただし、実験結果は表 1 に示す限られた実験条件で得られたものである。一般に風力係数の値は旋回流のコア半径と建築物の寸法との比や竜巻の移動速度等の諸条件によって異なると考えられることから、建築物桁行の壁面の風力係数として一様な水平流を想定した場合に用いる係数 1.2 による検討も行った。これらの検討においては、べた基礎の底面に作用する圧力は竜巻状気流発生装置による風圧実験での模型内圧(模型壁面には均質に微小な隙間が開けられている)と仮定し、竜巻通過時の気圧差(屋根面と基礎底面との圧力差 参考 2 図 3(a)の中 CF_z)による鉛直上向きの力として最大値を用いた。

(1)での検討と同様に建築物の基礎回転中心周りの転倒抵抗モーメント M_w は建築物総重量 W に建築物張間長さ D の半分を乗じて算定している((4.5)式)。一方、風力による転倒モーメント(M_h および M_v)は建築物の屋根面($B \times D$)と建築物桁行の壁面($B \times (H \cdot H')$)に作用する風圧力($0.5\rho V^2 \times C_{fn}$ または C_{fv})を積分して算定している((4.6)式、(4.7)式)。

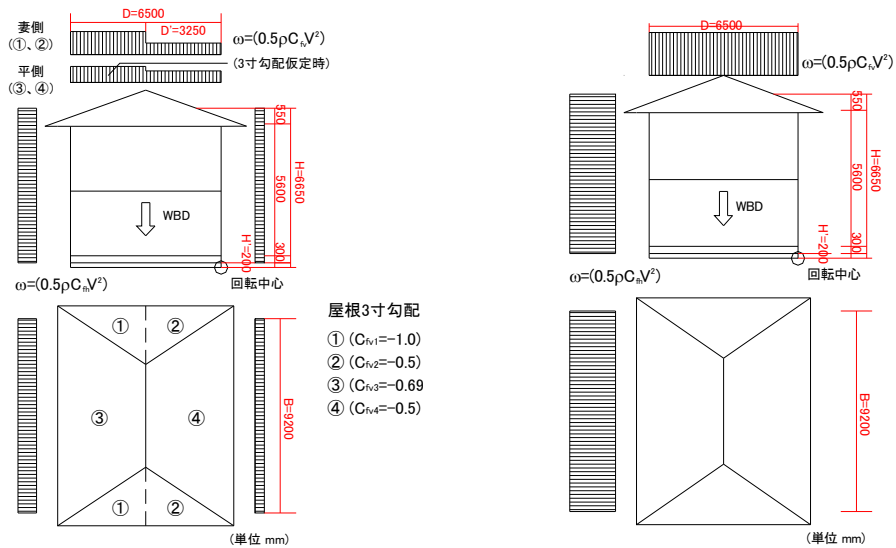
$$M_w = W \times (D/2) \times 1000 \quad (\text{Nm}) \quad (4.5)$$

$$M_h = B \int_{H'}^H (0.5 \rho C_{fn} V^2) x dx \quad (\text{Nm}) \quad (4.6)$$

$$M_v = B \int_0^D (0.5 \rho C_{fv} V^2) x dx \quad (\text{Nm}) \quad (4.7)$$

ここで想定した風圧力分布を図 1(b)に示す。参考 2 に示す竜巻状旋回流の実験(図 2、表 1 参照)の結果を踏まえて、図 3(a)の C_{pe} ($x/R_m \doteq 1.0$)から鉛直上向きの風力係数を $C_{FV} = -1.8$ とする。また、竜巻状旋回流が反時計周りに建築物に作用するものとして、図 3(b)の C_{Fy} ($x/R_m \doteq 1.0$)から建築物桁行の壁面の風力係数を $C_{Fh} = 2.0$ 又は 1.2 とすると、

$V = 68 \text{ m/s}$ (建築物桁行の壁面の風力係数 C_{Fh} が 2.0 の場合) 又は
 77 m/s (建築物桁行の壁面の風力係数 C_{Fh} が 1.2 の場合)



(a) 水平方向の旋回流のみが作用する場合

(b) 急激な気圧降下が作用する場合

図 1 想定した風圧力分布



写真 1 転倒した木造建築物

参考 1 建築物重量算定時の仮定

壁	:	外壁／サイディング, 内壁／せっこうボード(飛散物より推定)
屋根	:	寄棟屋根, 瓦(飛散物より推定)、3寸勾配、軒の出 0.455m
基礎	:	べた基礎 (一般的な木造住宅の使用を勘案して立ち上がり高さ 0.3m、幅 0.15m、底盤厚さ 0.2m と仮定)
積載重量	:	0.3 kN/m ² (通常の積載荷重の半分とする)
内壁壁線	:	桁行方向 3 通り、張間方向 4 通り (基礎立ち上がりから推定)
外壁開口率	:	1 階 30%、2 階 20% (一般的な木造住宅を想定)
建築物の地盤面からの屋根平均高さ	:	6.45m (=0.3m+2.8m×2+0.5×1.1m) (図 1(a)参照)
建築物総重量	:	630.5 kN

参考 2 文献 3)における座標等の定義、実験条件および風圧実験結果

C_{pe} : 鉛直上向きの外圧係数、 C_{Fy} : 壁面の風力係数(Y 方向)

(C_{pi} : 内圧係数、 C_{Fz} : 鉛直上向きの風力係数、 C_{Fx} : 壁面の風力係数(X 方向))

x : 模型の中心に対する移動する竜巻状気流発生装置の中心の座標、 R_m : 旋回流のコア半径

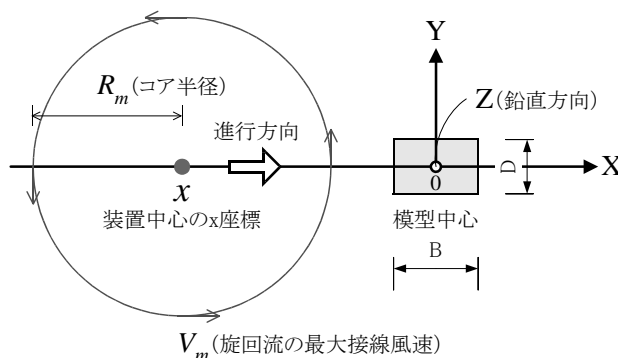
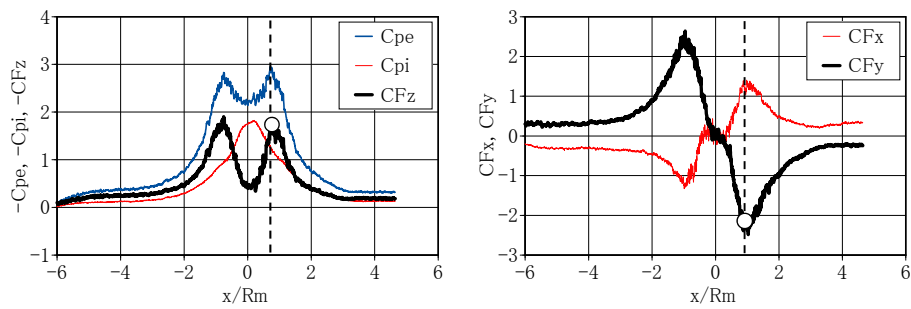


図 2 座標等の定義

表 1 実験条件 (実験縮尺スケールは 1/250)

模型の寸法	張間 D	98mm
	桁行 B	152mm
	軒高	49mm
	屋根勾配	1/12 (切妻)
旋回流のコア半径 R_m		0.36m
模型の寸法と旋回流のコア半径との比 $(BD)^{0.5}/R_m$		0.34
旋回流の最大接線風速 V_m		9.6m/s
装置の移動速度		0.15m/s



(a) 鉛直上向きの外圧係数

(b) 壁面の風力係数

図3 竜巻状気流発生装置を用いた風圧実験結果

参考文献

- 1) 国土交通省 国土技術政策総合研究所，独立行政法人 建築研究所：平成 24 年 5 月 6 日に茨城県つくば市で発生した突風による建築物被害（速報），2012.5
<http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h24tsukuba/h24tsukuba.pdf>，又は
<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/activities/other/disaster/kaze/2012tsukuba/120506-tsukuba.pdf>
- 2) Emil Simiu, Robert H. Scanlan : Wind Effects on Structures, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., pp.551-575, 1996
- 3) 喜々津仁密，パーサ サーカー，フレッド ハーン：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，Vol.21，pp.149-154，2010
- 4) 中村修，河井宏允，奥田泰雄，岡田恒：「風圧力、耐風設計等の基準の合理化に関する調査」の実施結果報告，ビルディングレター，日本建築センター，pp.2-5，2012.1