

建築物の竜巻被害軽減に向けた研究と課題

構造研究グループ 主任研究員 喜々津 仁密

目 次

- I はじめに
- II 建築物等の竜巻被害の概要
 - 1) 建築物等の被害形態
 - 2) 被害発生メカニズムの整理
- III 竜巻状気流発生装置を活用した実験的研究の展開
 - 1) 竜巻状気流発生装置の概要
 - 2) 移動速度と卓越開口の有無を考慮した風圧実験
 - 3) 竜巻被害の事例に基づく風圧実験
 - 4) 竜巻による突風荷重モデルの提案
- IV 竜巻を想定した設計の方向性と課題
 - 1) 重要建築物の考え方
 - 2) 竜巻の発生頻度等を考慮した最大風速の設定
 - 3) 設計法の種類
 - 4) その他の課題
- V おわりに
- 参考文献

I はじめに

平成24年5月6日に北関東地方を中心に複数の竜巻が発生し、つくば市内でもフジタスケールF3の竜巻(写真1・以下「つくば竜巻」)によって多数の全壊住家等の被害をもたらした。さらに平成25年9月には、2日に埼玉県越谷市から千葉県野田市にかけて幅300m、長さ19kmの広範囲にわたり1,300棟以上の被害をもたらした竜巻(以下「越谷竜巻」)をはじめ、国内で計16件の竜巻被害が報告されており、相次ぐ竜巻の発生と被害の甚大さは社会的にも大きなインパクトを与えた。

一般に竜巻は発生頻度が低く、発生した場合であってもその作用が局所的であるため、個々の建築物が竜巻による突風領域に入る確率は極めて低く、竜巻を通常の耐風設計で考慮するのは経済的に合理的ではない。また、広域的な台風時の強風と異なり気象観測網で捉えることが極めて稀であるため、設計・検

証に反映できる工学的な知見が不十分なのが現状である。

しかし、その一方でつくば竜巻による被害のなかには、工業団地での高機能化が図られた複数の事業所施設で広範囲の被害が発生し、屋内空間にも被害が波及した事例がみられた。これらの施設では構造躯体が健全である一方で、内外装材及び設備の被害が甚大であり、一時的な機能の喪失と経済的損失が生じた事例もあったといわれている。このような被害経験を踏まえれば、被害発生後の人命・財産・機能その他の影響を考慮し、通常の耐風設計の延長上で竜巻に対する配慮が求められる場合



写真1 つくば竜巻

も予想される。

上記の状況を背景にして建築研究所では、つくば竜巻の発生後から基盤研究課題「建築物の竜巻による被害発生メカニズムの解明（平成 24～25 年度）」を実施している。本稿では、まずⅡ節で近年の現地調査結果から建築物等の竜巻被害の実態を概観する。次に上記の研究課題内容のうち、Ⅲ節で竜巻状気流発生装置を活用した実験的研究の展開、Ⅳ節で竜巻を想定した設計をいかに考えるべきか、その方向性と課題についてそれぞれ述べる。

Ⅱ 建築物等の竜巻被害の概要

建築研究所では、竜巻による建築物等の被害概要を把握することを目的に現地調査を継続して行っており、調査の詳細は建築研究所ホームページ¹⁾にて公表している。現在までに調査を行った竜巻被害の概要を表 1 に示す。現地調査を通して、我が国で確認が報告されているフジタスケール F0 から F3 の竜巻による被害形態を系統的に分類している。

1) 建築物等の被害形態

平成 24 年のつくば竜巻³⁾、平成 25 年の越谷竜巻⁴⁾では甚大な建築物等の被害が発生し、既往の被害調査で見られた典型的な被害形態だけでなく、新たな被害形態も確認した。以下ではこ

れらの被害を例にして、建築物等の竜巻による被害形態を以下の項目に従って整理する。

- ・ 木造建築物の被害
- ・ 鉄骨造建築物の被害
- ・ RC 造建築物の被害
- ・ 飛来物による被害
- ・ その他の被害

① 木造建築物の被害

木造建築物の主な被害事例を以下に示す。(a)及び(b)が外装材、(c)から(f)が構造躯体の被害形態である。

(a) 開口部の損壊

開口の大小によらず、竜巻による大きな面外荷重の作用や飛来物の衝突によって、開口部が損壊したと考えられる事例が確認された(写真 2)。開口部が損壊することによって、室内に被害が進展しやすい状況になる。



写真 2 開口部の損傷 (つくば市)

表 1 建築研究所が調査を実施した竜巻被害の概要^{注1)}

発生日時	調査実施場所	竜巻規模			人的被害(人)		住家被害(棟)		
		フジタスケール	被害域幅(m)	被害域長さ(km)	死亡	負傷	全壊	半壊	一部損壊
平 02. 12. 11(火) 19:13	千葉県茂原市	F3	500～1200	6.5	1	73	82	161	1504
平 14. 07. 10(水) 16:00 頃	埼玉県境町	F2	100～150	4.5	0	11	7	0	87
平 16. 06. 27(日) 07:17	佐賀県佐賀市	F2	200～400	8.0	0	15	15	25	305
平 18. 09. 17(日) 14:03	宮崎県延岡市	F2	150～300	7.5	3	143	79 ^{注2)}	348 ^{注2)}	753 ^{注2)}
平 18. 11. 07(火) 13:23	北海道佐呂間町	F3	100～300	1.4	9	31	7	7	25
平 21. 07. 19(金) 19:00 頃	岡山県美作市	F2	200	6.0	0	2	2	11	65
平 21. 07. 27(土) 14:00 頃	群馬県館林市	F1～F2	50	6.5	0	21	14	24	286
平 21. 10. 08(木) 05:00 頃	茨城県土浦市	F1	200～300	2.8	0	2	1	11	94
平 24. 02. 01(水) 04:15 頃	島根県出雲市	F0	600	7.0	0	0	0	0	6
平 24. 05. 06(日) 12:35	茨城県つくば市	F3	500	17	1	37	76	158	400
平 25. 09. 02(月) 14:00 頃	埼玉県越谷市 他	F2	300	19	0 ^{注3)}	64 ^{注3)}	14 ^{注3)}	27 ^{注3)}	1000 ^{超注3)}

注 1) 国土技術政策総合研究所と共同実施した調査事例を含む。また、発生日時と被害統計は気象庁「竜巻等の突風データベース」²⁾による。注 2) 他の気象現象による被害数を含む。注 3) 平成 25 年 9 月 10 日現在の統計結果による。

(b) 屋根ふき材と外壁材の脱落・飛散等

屋根ふき材の脱落・飛散は典型的な竜巻による被害形態の1つであり、写真3に示すような粘土瓦の被害が多く確認された。また、金属板のふき材は軽量かつ受風面積が比較的大きいため、かなり遠くまで飛散した例が確認された。

一方、外壁材の脱落はモルタル外壁（写真4）に多くみられ、外壁の下地材が腐朽している例も確認された。モルタル外壁の場合は、構造躯体のせん断変形又は面外力が生じない限り脱落しないとされているが、この例がそのいずれによるかは特定していない。



写真3 屋根ふき材の脱落・飛散 (越谷市)



写真4 モルタル外壁の脱落 (つくば市)

(c) 小屋組の破壊・飛散

小屋組の破壊・飛散も強風や突風による典型的な被害形態であり、多くの被害事例が確認された。写真5は切妻屋根、写真6は片流れ屋根の被害例である。外観から判断して比較的新しいと思われる住家でも被害が発生している。また(a)と同様に、小屋組が倒壊することによって室内に被害が進展する事例も見られた(写真7~8)。



写真5 小屋組の破壊・飛散 (つくば市)



写真6 小屋組の破壊・飛散 (つくば市)



写真7 小屋組の破壊 (越谷市)



写真8 写真7の住家の室内状況

(d) 上部構造の倒壊

上部構造の倒壊事例は、つくば竜巻、越谷竜巻双方で確認した。既に倒壊した建築物の詳細な構造仕様は把握できないが、写真9~10の木造住家では、竜巻による風圧力が建築物が保有する耐力を上回り層崩壊したと考えられる。なお、写真10の事

例は、居住者の話によると昭和54年（新耐震基準以前に相当）に建設されたとのことである。また、写真11に示す木造住家については、近隣から飛来した建築物の上部構造が衝突したことによって倒壊した可能性がある。



写真9 上部構造の倒壊（手前の建築物の残がい）（つくば市）



写真10 上部構造の倒壊（越谷市）



写真11 上部構造の倒壊（越谷市）

(e) 上部構造の水平移動・飛散

つくば竜巻では上部構造全体が飛散した建築物が見られた。写真12の事例では一部土台を残すものの、ほとんどの上部構造が飛散しているのに対し、写真13の事例では床板より上の部分が飛散している。また、上部構造が道路上に移動した事例も見られた（写真14）。



写真12 土台を含む上部構造の飛散（つくば市）



写真13 上部構造の飛散（つくば市）



写真14 上部構造の水平移動（つくば市）

(f) 上部構造の基礎を伴う転倒

つくば竜巻では写真15に示すように、べた基礎の底面が地盤から離れ、上部構造とともに完全に裏返しになった事例が見られた。これは過去の調査事例では見られなかった新たな被害形態である。



写真15 基礎を伴う上部構造の転倒（つくば市）

② 鉄骨造建築物の被害

鉄骨造建築物の主な被害事例を以下に示す。(a)及び(b)が外装材、(c)及び(d)が簡易な建築物の構造躯体の被害形態である。

(a) 開口部・外壁材の損壊

つくば竜巻が通過した工業団地では、鉄骨造による事業所施設のガラス、外壁材等の損壊が確認された(写真16)。



写真16 外壁材とガラスの損傷 (つくば市)

(b) 屋根ふき材等の脱落・飛散

鉄骨造建築物の場合も木造と同様に、屋根ふき材等の脱落・飛散の被害形態が多く見られた。写真17に示す文教関連施設では、主な被害として鋼板製の屋根ふき材及び母屋の破壊が確認されている。屋根ふき材と母屋が巻き上げられた際に、母屋に取り付けられていた天井も同時に上向きに引き上げられて破壊したと思われる(写真18)。

写真19に示す幼稚園では、ピロティの天井の一部が面的に剥がれるとともに、吊りボルトの位置で面材が破損している。天井面が上向きの力を受けたと考えられ、上向きに変形した下地やハンガーが確認された。



写真17 鋼板製の屋根ふき材及び母屋の破壊 (越谷市)



写真18 写真17に示す施設の天井の破壊 (越谷市)



写真19 ピロティの天井の被害 (越谷市)

(c) 構造骨組の残留変形

倉庫と思われる建築物において、構造骨組の残留変形が認められた(写真20)。



写真20 骨組の残留変形 (つくば市)

(d) 上部構造の転倒

車庫として供される鉄骨造建築物の転倒がみられた(写真21)。



写真21 上部構造の転倒 (つくば市)

③ RC 造建築物の被害

RC 造建築物の主な被害事例を以下に示す。RC 造建築物の場合は構造躯体の被害は確認されていない。

(a) 開口部・建具の損壊

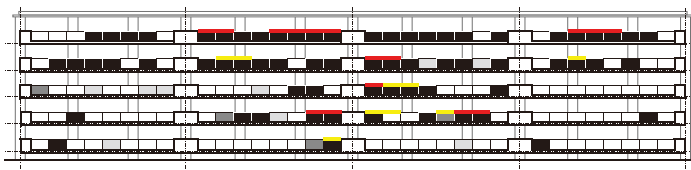
つくば市内にある RC 造 5 階建ての集合住宅では、竜巻によって南面の窓ガラス、サッシの枠、ベランダの手すり等が著しく損壊した (写真 22, 23)。開口の面積が小さいものの、北面でも同様に損壊がみられた。外観目視に基づく南面の被害分布 (図 1) を見ると、上階ほど手すり等の被害範囲が広がる傾向を示しており、本事例は竜巻作用の高さ方向の分布を把握する上で貴重な資料である。



写真 22 集合住宅(南面)の被害状況 (つくば市)



写真 23 窓とベランダ手すりの損壊 (つくば市)



部位	色	被害の状況
目隠し パネル	淡灰	軽微な衝突痕又は亀裂
	濃灰	著しい衝突痕
	黒	全面的な破壊
アルミ 手すり	黄	著しい変形
	赤	手すりの両端又は片端の離脱

図 1 集合住宅(南面)におけるベランダの目隠しパネルとアルミ手すりの被害分布

(b) 内装材の損壊

つくば竜巻が通過した工業団地内では、RC 造 (一部鉄骨造) の事業所施設が外装材の破損によって、天井材その他の内装材に被害が及んだ事例も確認された (写真 24~25)。机やイス等の家具等の転倒も見られた。



写真 24 内装材の被害 (つくば市)



写真 25 内装材(天井材)の被害 (つくば市)

④ 飛来物による被害

竜巻通過時には多数の飛来物が発生するため (例えば写真 26)、飛来物の衝突による被害も多数発生し、これは二次的な被害として位置づけられる。

写真 27 はショッピングセンターのエントランスでの衝突痕、写真 28 は飛来した屋根の衝突事例である。越谷竜巻の事例では、写真 29 に示すように上部構造全体が飛散し、近隣の住家に衝突する状況も見られた。



写真 26 電線に引掛かった飛来物(鋼板製屋根材) (つくば市)



写真 27 窓ガラスへの衝突痕 (つくば市)



写真 30 ガソリンスタンドの屋根の脱落 (つくば市)



写真 28 飛来物(屋根)の衝突 (つくば市)



写真 31 石塀の倒壊 (つくば市)



写真 29 飛来物(上部構造)の衝突 (越谷市)



写真 32 電柱の折損による屋根の被害 (越谷市)

⑤ その他の被害

①から④までに掲げた以外の工作物等の被害事例を以下に示す。写真 30 はガソリンスタンドでの屋根の脱落、写真 31 は石塀の倒壊、写真 32 は折損した電柱が隣家の屋根に衝突した状況、写真 33 は樹木の折損、写真 34 は比較的重量のあるトラックの横転である。写真 34 に類する例として越谷市では、鋼製コンテナの転倒事例も確認した。



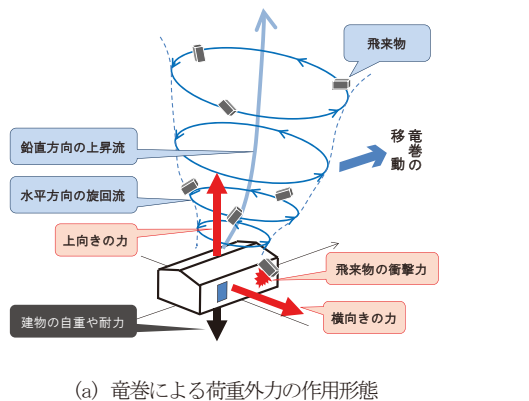
写真 33 樹木の折損 (つくば市)



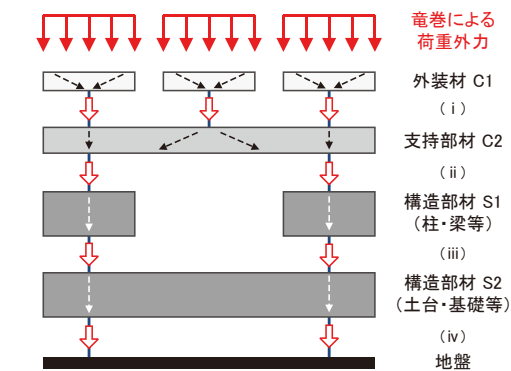
写真34 トラックの横転 (つくば市)

2) 被害発生メカニズムの整理

一般に竜巻が通過するとき、その中心付近では旋回流や急激な気圧降下が生じるほか、周囲から多くの飛来物が発生し、その結果として建築物には上向きと横向きの力及び飛来物の衝撃力が作用する (図 2(a))。そして、これらの荷重外力は図 2(b) に示すように建築物の外装材から構造部材、地盤へと伝達されるが、1) 項に掲げた被害形態はこの伝達経路のうち最も弱い部分が発現した状況として捉えることができる。



(a) 竜巻による荷重外力の作用形態



(b) 建築物の各部における荷重外力の伝達経路

図2 竜巻による被害発生概念図

木造建築物を例にして、代表的な被害形態と荷重外力の伝達経路における弱い部分との対応を表 2 に示す。例えば被害形態 d (上部構造の倒壊) の発生要因としては、以下の状況が考えられる。

- ・せん断力が耐力壁等 (S1) の水平耐力を上回ること
- ・転倒モーメントによって生ずる力又は鉛直上向きの力が 1 階柱脚接合部 (iii) 又は土台-基礎間のアンカーボルト (S2) の引き抜き耐力を上回ること

表 2 1) 項に掲げる被害形態と荷重外力の伝達経路における弱い部分との対応 (木造建築物の場合)

1) 項に掲げる被害形態	図 2(b) に掲げる弱い部分							
	C1	i	C2	ii	S1	iii	S2	iv
a 開口部の損壊	○							
b 屋根ふき材と外壁材の脱落・飛散等	○	○						
c 小屋組の破壊・飛散			○	○				
d 上部構造の倒壊					○	○	○	
e 上部構造の水平移動・飛散						○	○	
f 上部構造の基礎を伴う転倒								○

III 竜巻状気流発生装置を活用した実験的研究の展開

Ⅱ節 2) 項に示したように竜巻の突風によって生ずる力は、通過時の気圧降下や旋回流の接線風速がその主な要因として挙げられ、通常の乱流境界層風洞での実験で評価される風力特性と大きく異なる。しかし、竜巻による風力特性に関する実験的知見は十分に蓄積されていないのが現状である。そこで図 3 に示す突風による風力特性及び飛来物による衝撃リスクを実験的に評価することを目的に、建築研究所では国土技術政策総合研究所、東京大学、京都大学防災研究所と共同で、平成 21 年度に竜巻状気流発生装置の製作を行った。

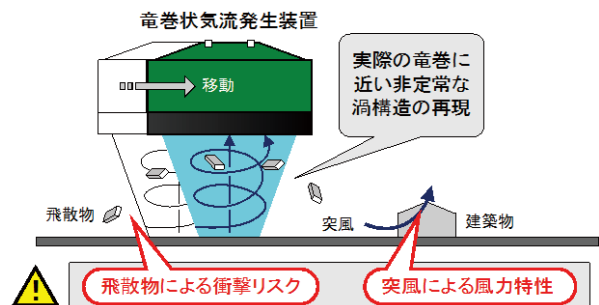


図3 竜巻通過時を想定した突風危険度の評価項目

以下の1)項で同装置の概要、2)～3)項で低層建築物模型を用いた風圧実験、4)項で実験結果に基づく竜巻による突風荷重モデルについてまとめる。

1) 竜巻状気流発生装置の概要⁵⁾

竜巻状気流発生装置は、米国アイオワ州立大学が所有する装置^{6),7)}の機構に倣って設計・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。写真35に装置の概観、図4に本体の断面図をそれぞれ示す。本体の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。

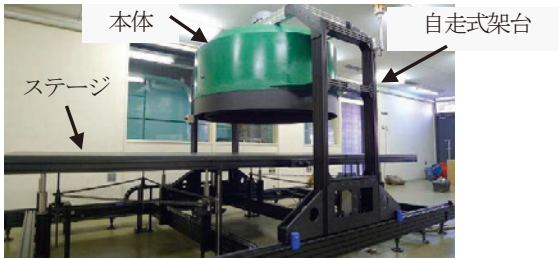


写真35 竜巻状気流発生装置の概観

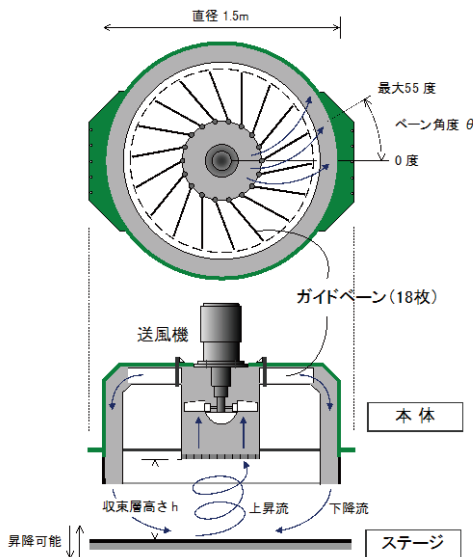


図4 竜巻状気流発生装置本体の断面図

一般に竜巻の工学モデルとして(1)～(2)式で表されるランキン渦モデルが用いられていることから、装置による実験気流が

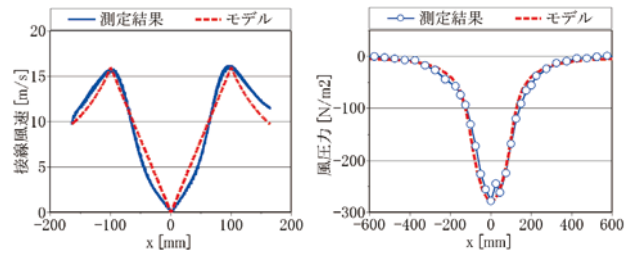
当該モデルにどの程度対応しているか確認するため、風圧実験及びPIV (Particle Image Velocimetry) とよばれる気流可視化実験を実施した。

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

$$P(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} P_{\min} \left[2 - \frac{x^2}{R_m^2} \right] & (|x| \leq R_m) \\ \frac{1}{2} P_{\min} \frac{R_m^2}{x^2} & (|x| > R_m) \end{cases} \quad (2)$$

上式において、 V : 中心からの座標 x での接線風速(m/s)、 V_m : 最大接線風速(m/s)、 R_m : コア半径(m)、 P_{\min} : 最小圧力(N/m²)である。図5～6はこれらの実験結果の一例を示したもので、接線風速と圧力降下量のいずれも(1)～(2)式のモデルに適合していることがわかる。

上式を規定する数値(V_m , R_m 及び P_{\min})は、送風機の回転数制御周波数、ベーン角度及び収束層高さの調整によって制御することが可能であり、これまでの実験結果から V_m は8～16m/s、 R_m は50～120mmの範囲で設定できることを確認した。したがって、例えば風速の縮尺率を1/5と設定すれば、40～80m/sの実風速に相当する現象を竜巻の工学モデルとして模擬することが可能である。



(a) 接線風速分布 (b) ステージ上の風圧分布

図5 実験気流の測定結果例

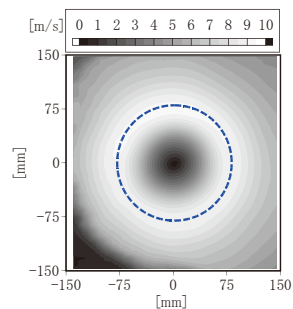


図6 平均流速場のPIV測定例 (図中の点線は半径 R_m の円周を示す)

2) 移動速度と卓越開口の有無を考慮した風圧実験⁸⁾

① 実験の概要

本項では、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紹介する。風圧実験は外圧だけでなく内圧

の性状にも着目し、卓越開口の有無を考慮して実施した。距離及び風速の縮尺率はそれぞれ 1/350、1/10 である。建築物の形状は梁間方向 24.4m、桁行方向 38.1m、軒高 12.2m を想定し、開口条件として模型の各壁面に一様なすき間（当該壁面積に対する面積比 0.13%）と移動方向に対して右側の壁面に矩形の卓越開口（同 3.3%）を設けている。

風圧実験はサンプリング 100Hz の条件で行い、外圧測定点は屋根面が計 20 点、壁面が計 26 点である。以下に示す風力・風圧係数は、風圧値を V_m から得られる速度圧 $1/2 \cdot \rho V_m^2$ で規準化して得たものであり、それぞれの実験条件について 10 回のアンサンブル平均結果を掲げている。また、装置の移動速度 V_T は 0.06~0.36m/s の範囲、実験気流の最大接線風速 V_m は 9.8m/s、コア半径 R_m は 0.12m であり、これに縮尺率を考慮すれば実スケールで $V_m=98\text{m/s}$ 、 $R_m=42\text{m}$ となる。

② 実験結果

図 7 に座標等の定義、図 8~10 に移動時における鉛直 (Z) 方向

及び水平 (X, Y) 方向の風力・風圧係数の結果をそれぞれ示す。各図の横軸は、模型中心（原点）に対する装置中心の座標 x_s を旋回流のコア半径 R_m で規準化した数値である。図 8~9 中の青線は屋根に作用する外圧係数 C_{pe} 、赤線は屋根に作用する内圧係数 C_{pi} であり、黒線は風力係数 C_{Fz} で次式で算出される。

$$C_{Fz} = C_{pe} - C_{pi} \quad (3)$$

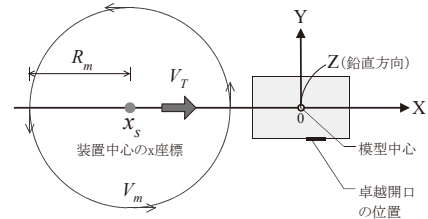


図 7 座標等の定義

i) 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 8~9 中の

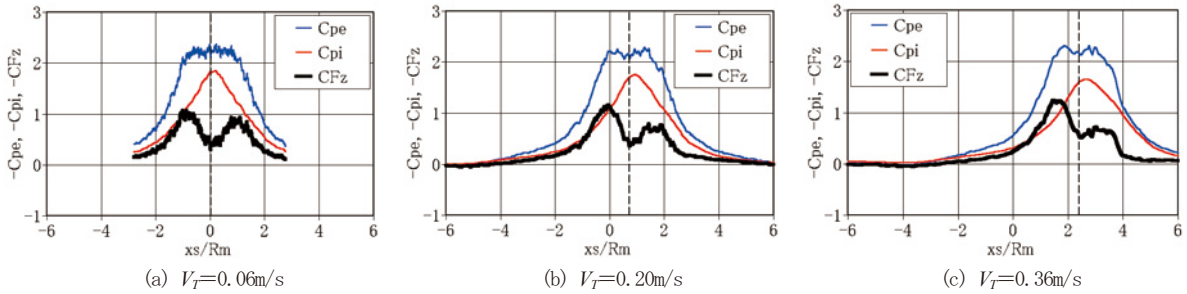


図 8 Z 方向の風力係数 C_{Fz} (卓越開口がない場合)

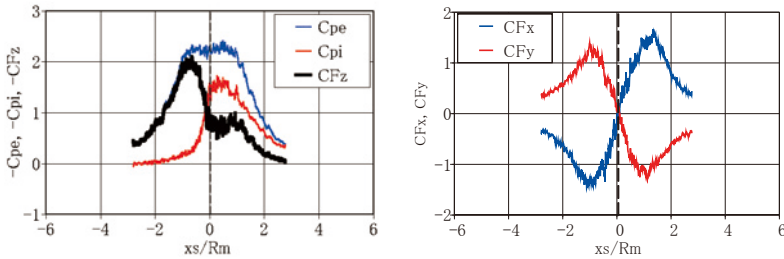


図 9 Z 方向の風力係数 C_{Fz} ($V_T=0.06\text{m/s}$ 、卓越開口を有する場合)

図 10 X, Y 方向の風力係数 C_{Fx} , C_{Fy} ($V_T=0.06\text{m/s}$)

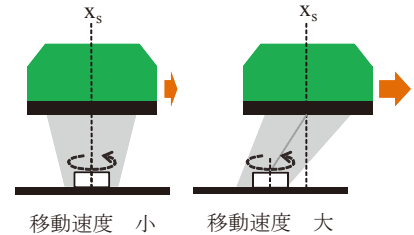
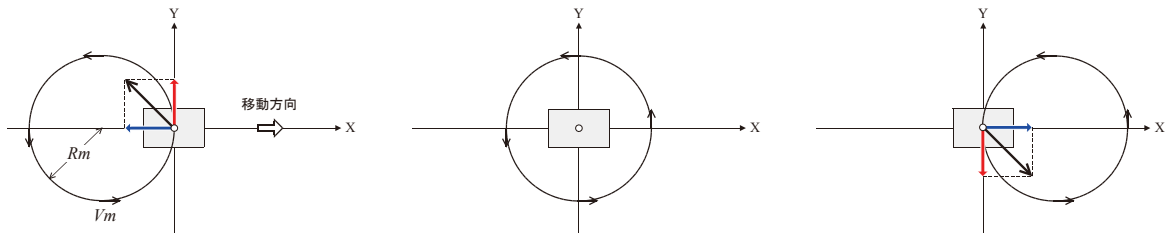


図 11 渦中心の位置と移動速度との関係



(a) 通過前に最大接線風速 V_m が作用する状況 (b) 真上を通過する状況 (c) 通過後に最大接線風速 V_m が作用する状況

図 12 移動する旋回流の位置と水平面内の力の作用方向との関係

点線) 及び風力係数 C_{Fz} , C_{Fy} が 0 となる位置 (図 10 中の点線) に対応するとみなす。図 8 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の鉛直軸が移動方向に対して前傾する傾向が大きくなること (図 11) を示しており、その傾向は既往の竜巻模擬実験の結果⁸⁾ や実際の竜巻の動画での状況とも合致している。

ii) 鉛直(Z)方向の風力係数

図 8(a) 及び図 9 に示す $V_T=0.06\text{m/s}$ の場合を例にすると、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、卓越開口を有する場合の最大値は卓越開口がない場合の約 2 倍となり、この結果から飛来物の衝突等による大きな開口を生じさせないことが、屋根に作用する荷重の軽減に有効であることが言える。

iii) 水平(X, Y)方向の風力係数

図 10 に示す風力係数 C_{Fx} , C_{Fy} はいずれも最大・最小値は $\pm 1.0 \sim 1.5$ であり、これらの数値は $V_T=0.06\text{m/s}$ 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ことがわかる。

この結果を踏まえて、移動する旋回流の位置と水平力の作用方向との関係を図 12 にまとめる。通過前又は通過後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通過前に左斜め後方、通過後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 になるため、相対的に鉛直方向の力が大きくなる。

3) 竜巻被害の事例に基づく風圧実験

本項では、竜巻状気流発生装置を活用した被害発生メカニズムの解明の一例として、写真 15 に示す木造建築物の転倒事例を想定した突風の作用状況を実験的に再現し、実験結果に基づいて荷重の作用分布と転倒開始風速の推定を試みる。

① 実験の概要及び結果

写真 36 に上空から見た木造建築物の被害状況、写真 37 に風圧模型の設置状況を示す。この建築物は床平面が梁間方向 $D=6.5\text{m}$ 、桁行方向 $B=9.2\text{m}$ 、屋根平均高さ $H=6.65\text{m}$ と推定されて

おり、風圧模型の縮尺率は約 1/280 である。実験気流のコア半径は 0.12m なので、これに縮尺率を考慮すれば実スケールで約 34m となり、被害調査結果 (約 35m)³⁾ と整合する。

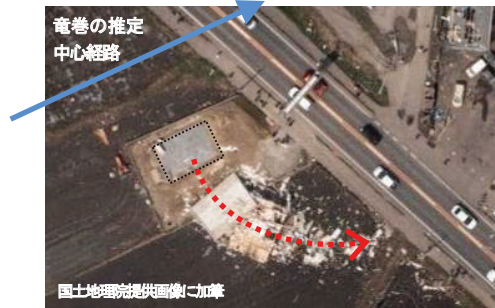


写真 36 木造建築物の被害状況

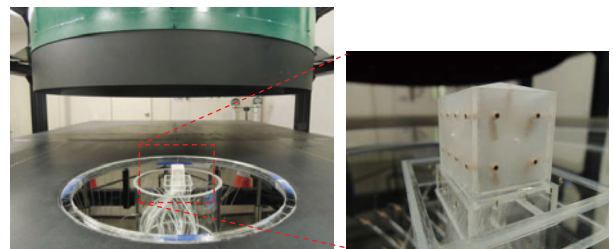


写真 37 風圧模型の設置状況

べた基礎が反転していた状況を踏まえれば、上部構造だけでなく基礎底面にも竜巻による圧力が作用していた可能性が考えられるため、模型の円盤 (地盤に相当) と建物部分が接続する位置に内径 0.2mm の通気孔を複数設け、通気孔を介して伝達される内圧も測定した。この内圧が基礎底面に作用する圧力とみなす。

図 13(a) に鉛直(Z)方向の外圧係数・内圧係数、同図(b)に桁行(Y)方向の風力係数の結果を示す。通気孔の面積を 1 階床面積で除した数値は 1.05×10^{-4} である。上部構造の飛散した方向は移動する方向に対して右斜め前方 (写真 36) であるから、転倒開始時は、装置が模型を通過後に最大接線風速が模型中心に作用するタイミングに相当するとみなす (図 13 中の点線)。このときの風力係数は $C_{Fz} \approx 0.8$ 、 C_{Fy} の絶対値 ≈ 1.6 となる。

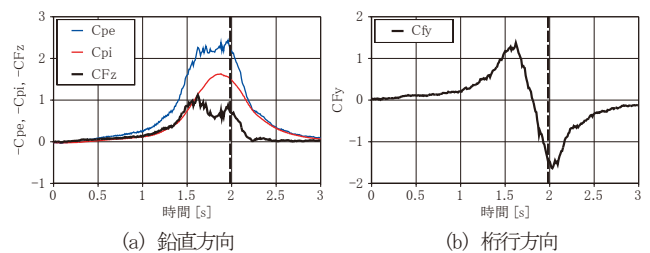


図 13 外圧係数・内圧係数・風力係数

② 転倒開始風速の推定

①の結果を用いて木造建築物の転倒開始風速を推定した。ここで建築物の総重量は、表3に示す仮定のもとで $w=630.5\text{kN}^3$ とした。

表3 建築物重量算定時の仮定³⁾

項目	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、瓦(飛散物より推定)、3寸勾配、軒の出0.455m
基礎	べた基礎(一般的な木造住家の仕様を勘案して、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 (地震力算定用の積載荷重の半分)
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%(一般的な木造住家を想定)

建築物の基礎回転中心周りの転倒抵抗モーメントを M_w 、水平方向及び鉛直方向の力によって生ずる転倒モーメントを M_h 及び M_v 、転倒開始風速を V 、空気密度を ρ とすると、それぞれ次式で算出される。

$$M_w = w \cdot \frac{D}{2} \times 1000 \quad (4)$$

$$M_h = \frac{1}{2} \rho V^2 C_{FY} \cdot \frac{1}{2} H^2 B \quad (5) \quad M_v = \frac{1}{2} \rho V^2 C_{FZ} \cdot \frac{1}{2} B D^2 \quad (6)$$

これらの数値を用いれば、 $M_w = M_h + M_v$ より転倒開始風速 $V = 82\text{m/s}$ となる。ただし、風力係数が基礎底面と地盤面との間の通気状況、竜巻の移動速度等の実況に依存するので、風速の推定結果には幅があると考えられる。なお、気圧降下の影響を考慮せず、一様な水平流が作用することを想定した場合の風速は、上記よりも大きい推定結果(97m/s)³⁾となっている。

4) 竜巻による突風荷重モデルの提案

竜巻通過時に建築物に作用する風力については、その要因を気圧降下と旋回流の作用に区別し、ランキン渦を前提としたモデル化^(例えば9)がされている。しかし既往のモデルでは、2)項の実験結果で認められた開口条件に応じた内圧の効果が陽な形で表されていないため、筆者らは実験結果を踏まえて屋根に作用する風力係数のモデル化を行った。以下にその概要をまとめる。

一般に竜巻通過時に屋根に作用する力 F_Z は、(7)式のように急激な気圧降下による力 F_a と旋回流の直接作用による風力 F_w との和で表される。そして、最大接線風速 V_m で速度圧を定義すれば、風力係数 C_{Fz} は上記に対応する風力係数をそれぞれ C_a 、 C_w とし

て(8)式で表される。

$$F_Z(x) = F_a(x) + F_w(x) = \frac{1}{2} \rho V_m^2 C_{Fz}(x) \quad (7)$$

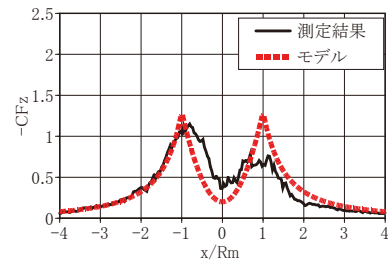
$$C_{Fz}(x) = C_a(x) + C_w(x) \quad (8)$$

実験気流が(1)~(2)式に示すランキン渦モデルに適合することを前提とし、各種の実験パラメータを反映することによって式展開すれば、(8)式から最終的に以下の(9)式が導出される。

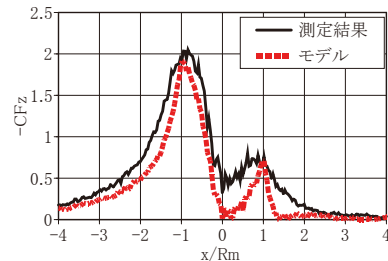
$$C_{Fz}(x) = C_a(x) + C_w(x) = C_{ae}(x) + C_{we}(x) - C_i(\alpha_i, x) = \begin{cases} \frac{x^2}{R_m^2} (C_{we}^* - \alpha_i \varepsilon_r + 1) - 2(1 - \alpha_i \varepsilon_r) - (1 - \alpha_i) C_{wi}(x) & (|x| \leq R_m) \\ \frac{R_m^2}{x^2} (C_{we}^* + \alpha_i \varepsilon_r - 1) - (1 - \alpha_i) C_{wi}(x) & (|x| > R_m) \end{cases} \quad (9)$$

ここで、風圧係数 C_{Fz} は当該面を押し方向を正とし、 x : 屋根高さ付近での旋回流の中心(図8, 9中の点線)に対する座標、 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。

図14に風力係数の実験結果と(9)式との比較結果を示す。ここで、 $C_{we}^* = -1.2$ 、 $\varepsilon_r = 0.9$ であり、卓越開口がない場合は $\alpha_i = 1$ 、卓越開口を有する場合は $\alpha_i = 0$ とし、卓越開口に近い測定孔4点での外圧の平均値を C_{wi} とした。いずれの開口条件の場合も、(9)式による風力係数は実験結果と概ね整合していることが確認できる。



(a) 卓越開口がない場合



(b) 卓越開口を有する場合

図14 風力係数 C_{Fz} に関する実験結果とモデルとの比較

IV 竜巻を想定した設計の方向性と課題

一般に、個々の建築物が1年間に竜巻に遭遇する確率^{*}は 2.6×10^{-5} と極めてまれであり¹⁰⁾、竜巻が発生した場合でもその作用は局所的であるといった偶発的な事象であるため、建築基準体系において竜巻の作用は想定されていない。しかし人命・財産・機能保護の観点で、竜巻による被害を最小限に軽減することが期待される重要な用途建築物（以下「重要建築物」）に対しては、設計時に竜巻による作用をいかに考慮するべきか、その考え方をきめ細かく整備することも求められる。この観点で基盤研究課題では、II～III節に示した既往の調査研究の結果、国内外での関連動向を参考にして、竜巻による作用を想定した設計（以下「対竜巻設計」）の検討を行っている。

検討に当たっては

- ・ 通常の耐風設計の延長上に対竜巻設計を位置づけること
- ・ 複数の設計法の種類を提示すること
- ・ 今後の検討すべき課題を明確にすること

の3点に留意しており、現時点での検討の概要を以下の各項にまとめる。

1) 重要建築物の考え方

例えば米国のFEMAガイドライン¹¹⁾では、学校、病院その他の重要な施設（Critical facilities）を対竜巻設計の対象としている。これに関連して表1に示す竜巻実績をみると、土・日曜日あるいは平日の早朝・夕方以降に発生した事例も多く、たまたま学校内での甚大な人的被害が顕在化していなかったが、つくば竜巻による被害を契機に文部科学省は学校施設の防災機能の強化（ガラスの安全対策等）を中期的な取組として掲げている¹²⁾。また平成20年に一部修正された防災基本計画¹³⁾では、竜巻等突風に対しても企業の事業継続計画（BCP）策定ニーズに応えられる条件整備が求められているが、その一方でつくば竜巻により工業団地内の複数の事業所施設が被災し、業務操業の継続に対するせい弱性も顕在化した（例えば写真16、24～25）。

設計時に竜巻等突風の作用を考慮するか否かの判断は、建築物ごとのリスク要因や重要度等を鑑みて施主又は設計者に委ねられる。それらを評価するためには複数の観点又は定量的な尺度が考えられるが、例えば文献14)では、設計対象の建築物が性能区分のどれに該当するか検討する際に考慮すべき項目（表4）を掲げており、上記判断の拠り所として参考になる。

^{*} 年間平均20.5個発生する竜巻が可住地（12万3千km²）に一樣に分布していると仮定した場合。

表4 建築物の性能区分の背景となる項目¹⁴⁾

項目	小項目	概要
リスク要因	収容人数	当該施設が収容可能な最大の人数
	滞在時間	占有者が当該施設に滞在する最大の時間
	占有者の就寝の有無	占有者が当該施設内で就寝し得るか否か
	占有者の建築物の熟知の程度	占有者が当該施設の配置や避難方法を熟知し得るか否か
	占有者のせい弱さの程度	占有者の何割程度が災害時の要援護者（高齢者等）となり得るか
ハザード要因	ハザードの性質	設計対象の作用が占有者、施設及び収容物に与えることが想定される影響
重要度	人数	当該施設に多数の人々が収容されることが想定されるか
	施設用途	当該施設に災害時・災害後の緊急対応等の機能が求められるか
	被害の可能性	広域的／長期的な人的・物的被害が生ずる可能性があるか
	地域における重要性	当該施設又はその機能が地域における経済的な安定性や重要な機能に対して責を負う可能性があるか

2) 竜巻の発生頻度等を考慮した最大風速の設定

設計・検証の基本となる竜巻中心付近の最大風速 V_{max} は建築基準法に定める基準風速と同様に、地域ごとに異なると考えられる。例えば米国での基準¹⁵⁾では、想定する年超過確率を 10^{-7} として、i)中西部と南西部では103m/s、ii)東部とi)の周縁では89m/s、iii)西部では72m/sと地域に応じた風速を設定している。

これと同様に我が国を対象にした検討例として、「竜巻等の突風データベース」²⁾を活用して都道府県ごとの最大風速を検討した結果を以下に示す。対象期間は1961～2012年（52年間）であり、まず(10)式で年超過確率 P_a を算出する。ここで、 P_a ：フジタスケール(FS)が j 以上の竜巻の年超過確率(1km²当たり)、 T ：対象期間(=52)、 A ：当該都道府県の面積(km²)、 n_k ：当該都道府県でのフジタスケール k の発生回数である。

$$P_a(FS \geq j) = \frac{1}{TA} \sum_{k=j}^3 n_k \quad (10)$$

上式で算出した結果に基づき、同じ年超過確率 P_a を基準にしたときの都道府県別の(フジタスケールに対応した)風速値を図15に示す($P_a=10^{-5}$ 、 10^{-6} の場合)。同じ年超過確率で比較すると、例えば関東平野、濃尾平野又は宮崎平野等を含む地域の最大風速が相対的に大きく評価されることが分かる。これは簡単な検討例であるが、より詳細に竜巻ハザードを検討する場合は年発生数の確率分布、最大風速の確率密度関数の設定等が求め

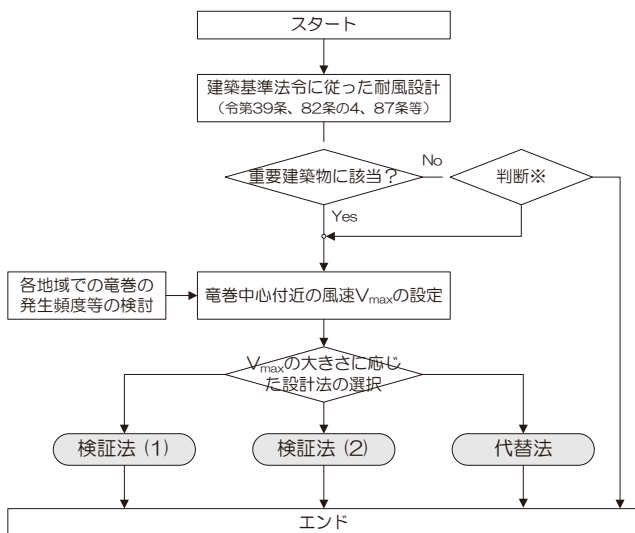
られる。さらに3)項に示す設計法において、例えば性能目標ごと(人命保護・機能維持等)、部位ごと(構造躯体・外装材等)に発生頻度を想定することも考えられるが、この数値の具体的な設定に関する検討と合意形成が今後の課題である。



図15 年超過確率 P_a の大きさに応じた都道府県別風速値

3) 設計法の種類

1)、2)項に示した建築物の重要度及び竜巻の最大風速の設定条件を踏まえ、対竜巻設計の考え方を以下にまとめる。図16に対竜巻設計のフロー、表5に最大風速の大きさに応じた設計法のイメージを示す。ここでは設計法の種類を便宜上、「検証法(1)」、「検証法(2)」及び「代替法」と呼ぶ。



※) 判断とは、設計者の設計方針に基づく判断のこと。重要建築物に該当しない場合であっても、竜巻を想定した詳細な設計を選択する判断等のことを示している。

図16 建築物の対竜巻設計フローのイメージ

表5 最大風速の大きさに応じた設計法のイメージ

設計法の種類		V_{max} の目安		
		約20~50m/s	約50~70m/s	約70m/s~
検証法	(1) 竜巻の作用を直接考慮した突風荷重による計算	○	○	○
	(2) 建築基準法等に定める数値を割り増した荷重を準用した計算	○	△	△
代替法	屋根や開口部等について、耐風性能の向上に配慮した構造方法の採用	○	△	—

凡例)

○: 当該方法によることができる。

△: 当該方法によることができるが、竜巻の中心付近での気圧降下の影響には慎重な判断を要する。

—: 当該方法以外の方法による。

注) 「 V_{max} の目安」には例として、フジタスケールF0~1、F2、F3に概ね対応する風速値を表記しているが、今後の調査研究に基づいて数値が変更される可能性がある。

① 検証法(1)

検証法(1)は、竜巻の作用を直接考慮した突風荷重を用いて計算するものであり、竜巻による突風荷重 W_t は次式で表される。

$$V_m = V_{max} - V_t \quad (11.1)$$

$$W_t(x) = \frac{1}{2} \rho V_m^2 \cdot C_F(x) \cdot v(x) \quad (11.2)$$

ここで、 V_m : 旋回流の最大接線風速、 V_{max} : 竜巻の中心付近の最大風速、 V_t : 竜巻の移動速度、 ρ : 空気密度、 x : 竜巻の中心に対する位置(座標)、 C_F : 竜巻の作用を直接考慮した風力係数、 v : ばらつきを考慮した補正係数である。例えば屋根の場合には(9)式が C_F に相当し、この式によれば、竜巻の中心付近での非定常な流れ場の気流性状や急激な気圧降下による荷重の効果を検証時に考慮することができる。限られた条件下であるが、(9)、(11)式及び図14の結果を用いて屋根に作用する突風荷重 $W_t(-R_m)$ を検討した例を図17に示す。

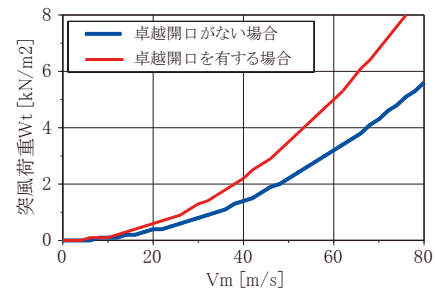


図17 (9)、(11)式で算出した竜巻による突風荷重 W_t

なお筆者の知る限り、現時点で検証法(1)の考え方が国内外の基準に採用された例はないと思われる。実験や解析による知見を蓄積して、竜巻状渦—建築物間の相対的な(大小・位置)関係、竜巻の進行速度、地表面粗度の程度等を考慮し、風力係数の精緻化を図ることが今後の課題である。

② 検証法(2)

検証法(2)は、建築基準法その他の基準に定める数値を割り増した荷重を準用して計算するものであり、当該荷重 W_w は次式で表される。

$$W_w = \frac{1}{2} \rho V_{\max}^2 C_F \quad (12)$$

ここで、 C_F : 建築基準法その他の基準に定める風力係数である。この方法は、例えば米国の FEMA ガイドライン¹¹⁾、ストームシェルターの設計規準¹⁶⁾、原子力発電施設の規準¹⁵⁾、我が国の原子力発電所の竜巻影響評価ガイド¹⁷⁾での検証の考え方に該当する。設計上の配慮として、例えば文献16)では、飛来物の衝撃によって大開口ができる場合を想定して、「閉鎖型」の建築物であってもあらかじめ「開放型」とみなし、内圧係数を安全側に設定することが定められている。

また、この方法によって急激な気圧降下による荷重を併せて考慮する場合には以下の2通りが考えられ、検証法(1)の簡便な方法として位置づけることができる。ただし、いずれも実況を反映した内圧の特性を考慮することは難しいと思われる。

i) 文献15)、17)の考え方

文献15)及び17)では次の2式によって検証することを提案しており、(13.1)式は最大風速が作用する状況、(13.2)式は竜巻の渦中心と建築物の中心が一致する状況を想定していると考えられる。

$$W_t = W_w + 0.5W_p \quad (13.1)$$

$$W_t = W_p \quad (13.2)$$

ここで、 W_t : 竜巻による突風荷重、 W_p : 気圧差によって生ずる荷重であり、想定される最大接線風速 V_m を用いて(14)式で表される。

$$W_p = \rho V_m^2 \left(= \frac{1}{2} \rho V_m^2 \cdot 2.0 \right) \quad (14)$$

ii) 文献18)の考え方

文献18)での提案式を(15)式に示す。ここでは気圧差によって生ずる負圧を考慮するため、ASCE7¹⁹⁾に従って算出した荷重 W_w を竜巻の強さに応じて割り増すこととしている。次式において、

W_t : 竜巻による突風荷重、 a : 負圧の割り増し係数であり、改良フジタスケールEF2以下が1.5、EF3が2.0である。

$$W_t = a \cdot W_w = a \cdot \frac{1}{2} \rho V_{\max}^2 C_F \quad (15)$$

③ 代替法

代替法は上記の検証法の代替として、フジタスケールF2相当以下の風速を想定した設計法である。

既往の現地調査の結果を見ると、適切に設計施工された上部構造のF2以下の竜巻による倒壊事例は稀である。したがって代替法は、F2相当以下の風速に対して有すべき構造躯体の水平耐力は耐震・耐風設計で確保されることを前提にして、主に外装材とその支持部材に着目した設計法として位置づけた。具体的には、竜巻の作用に対して弱い部位(例えば屋根と開口部)を対象にして、通常の耐風対策の延長上で耐風性に優れた構造方法を採用することによって計算による検証を要しないこととしている。特に構成部材間の接合部での耐力確保に配慮することがこの設計法の要点であり、該当すると考えられる構工法の例を以下に紹介する。

i) 粘土瓦

「瓦屋根標準設計・施工ガイドライン」²⁰⁾では、建築基準法に定める基準風速が大きい地域で対応できる仕様として、図18(b)に示す防災瓦を全数緊結することが例示されている。防災瓦は右下隅に突起形状を有するもので、当該重なり部分で隣合う瓦との間で荷重伝達経路が新たに形成され、引張力に抵抗する効果の向上が期待できる。図19に示す引き上げ試験(写真38)の結果²¹⁾によれば、防災瓦(全数緊結)は通常瓦(全数緊結)の4倍程度の引張耐力が出ており、防災瓦の採用が脱落・飛散(写真3)の可能性の軽減に有効であると考えられる。

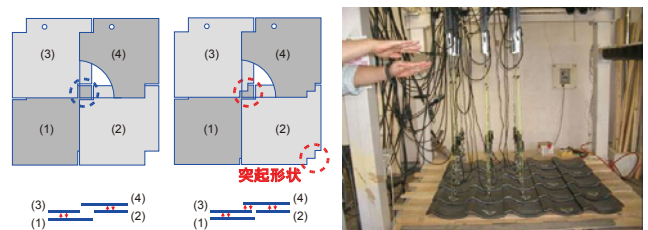


写真38 瓦の引き上げ試験状況

図18 通常瓦と防災瓦の概要

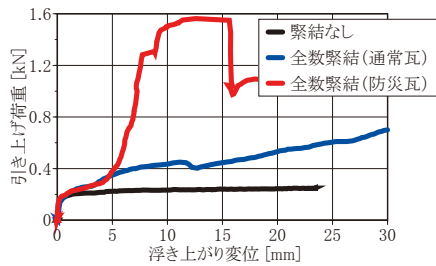


図 19 瓦の引き上げ試験結果の例²¹⁾

ii) 木造小屋組

一般に小屋組の構成部材間の接合ディテールは多様であるが、写真5~7のように飛散する可能性を軽減するためには、接合部の引張耐力を考慮した構法の選択が重要となる。例えば図20に示す小屋束接合部の引張試験結果²²⁾によれば、長ほぞに割くさびを施した場合のほうがかすがいを両面打ちした場合よりも、耐力の平均値が1.4倍程度大きくなっている。

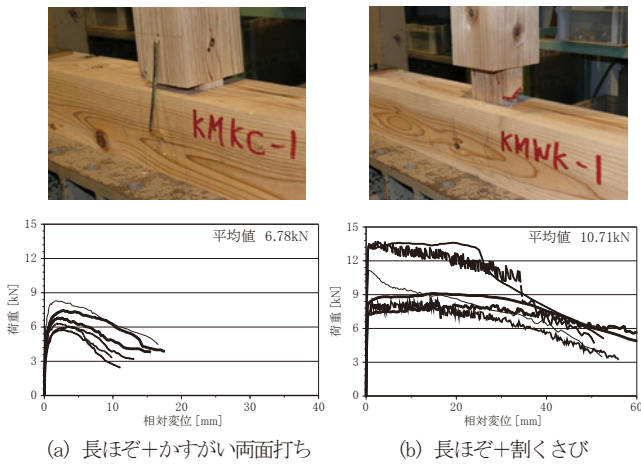


図 20 小屋束接合部の引張試験の例²²⁾

4) その他の課題

対竜巻設計の整備に係る課題として、1) ~ 3) 項に掲げた以外に考えられる事項を以下にまとめる。

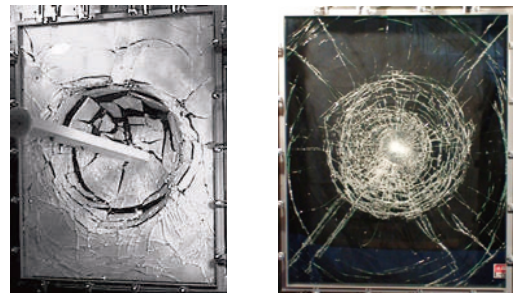
① 飛来物に対する耐衝撃性能の検討

図2(a)に示したように竜巻通過時には周囲から多数の飛来物が発生するため、開口部等が損壊することによって屋内に被害が及ぶほか、屋根に作用する力が大きくなる可能性もある。したがって、竜巻等突風による飛来物を対象にした耐衝撃性能に関する試験・評価法の整備が課題であり²³⁾、これと並行して、耐衝撃性能を有する構法や仕様の事例を蓄積・整備することも設計上有用である。例えば下記の外装材については、過去の試験実績に基づいて耐衝撃性能に配慮した構法が提案されており、

対竜巻設計の際にも参考になると思われる。

i) ガラス²⁴⁾

フロート板ガラスと比較して、合わせガラスが飛来物の衝突に対してより有効であること(写真39)。また、飛来物をガラスに衝突させないためには雨戸やシャッターの設置が有効であること

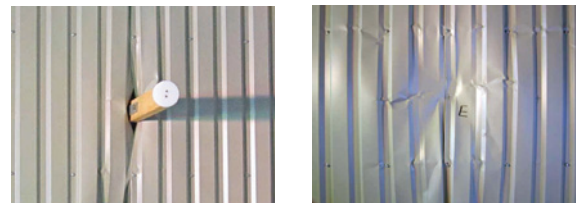


(a) フロート板ガラス (b) 合わせガラス

写真 39 ガラスの耐衝撃試験の例(京都大学防災研究所提供)

ii) 鋼板製外壁²⁵⁾

鋼板の板厚を 0.6mm 以上、又は鋼板同士の重ね部を 1 山重ねとすることで、木質系部材の衝突に対してより有効であること(写真40)。



(a) 1山重ねなし (b) 1山重ねあり

写真 40 鋼板製外壁の耐衝撃試験の例²⁵⁾

② 適切な危険回避行動に対応した設計要件の整備

例えば文献18)では、改良フジタスケール EF4~5 の竜巻を設計対象とする場合には構造躯体の検証とともにストームシェルターの確保を提案している。このように規模や強さの大きい竜巻を想定するとき、荷重外力の作用が構造躯体の安全限界を上回る場合も考えられることから、人命保護の観点で適切な危険回避行動が取れることを目標にした設計要件の整備も求められる。

V おわりに

本稿では、近年の現地調査を通して把握した建築物等の竜巻被害の実態を概観するとともに、竜巻状気流発生装置を活用した実験的研究の概要、対竜巻設計の方向性と課題について述べ

た。竜巻は台風と比べて発生頻度が低い一方で、事前の予測が難しいこと、発生したときの影響範囲が局所的であることから、設計の考え方には通常の耐風設計と異なる発想が求められる。今後も本稿で述べた課題等に取り組み、建築物の対竜巻設計の整備に資する技術的な知見を蓄積していく予定である。

謝辞 本稿に掲げた研究成果の一部は、JSPS 科研費 21360273, 25289191 の助成を受けた。また図 15 の地図作成には白地図 KenMap Ver. 9.1 を活用させて頂いた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 建築研究所：災害調査ホームページ
<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/activities/other/other.html>
- 2) 気象庁：竜巻等の突風データベース
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/>
- 3) 国土技術政策総合研究所・建築研究所：平成 24 年(2012 年)5 月 6 日に茨城県つくば市で発生した建築物等の竜巻被害調査報告，建築研究資料，No. 141，2013
- 4) 国土技術政策総合研究所・建築研究所：平成 25 年 9 月 2 日に発生した竜巻による埼玉県越谷市、北葛飾郡松伏町及び千葉県野田市での建築物等被害（速報），2013
<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/2013/130904.pdf>
- 5) 喜々津仁密，奥田泰雄，河井宏允，神田順：竜巻通過時に低層建築物に作用する風力特性に関する実験的研究，第 22 回風工学シンポジウム論文集，pp. 209-214，2012
- 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) 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，pp. 149-154, 2010
- 8) 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
- 9) E. Simiu, et al. : Wind Effects on Structures, Third edition, John Wiley & Sons, Inc., pp. 551-575, 1996
- 10) 田村幸雄ほか：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 重要政策課題への機動的対応の推進・研究成果報告書，2008
- 11) FEMA : Recovery Advisories from the Tornado Mitigation Assessment Teams for Alabama, Mississippi, Tennessee, Georgia, and Missouri, 2011
<http://www.fema.gov/library/viewRecord.do?id=4723>
- 12) 竜巻等突風対策局長級会議：「竜巻等突風対策局長級会議」報告，2012
<http://www.bousai.go.jp/fusuigai/tatsumakikyokuchou/pdf/houkoku.pdf>
- 13) 内閣府中央防災会議：防災基本計画
- 14) International Code Council: Performance Code for Buildings and Facilities, 2012
- 15) U. S. Nuclear Regulatory Commission: Design-basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, Regulatory Guide 1. 76, 2007
- 16) International Code Council: ICC/NSSA Standard on the Design and Construction of Storm Shelters, pp. 7-15, 2008
- 17) 原子力安全基盤機構：原子力発電所の竜巻影響評価ガイド（案）及び解説，JNES-RE レポート，2013
- 18) D. O. Prevatt, et al. : Joplin, Missouri, Tornado of May 22, 2011, Structural Damage Survey and Case for Tornado - Resilient Building Code, ASCE, 2013
- 19) American Society of Civil Engineering: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE7-10, 2010
- 20) (社)全日本瓦工事業連盟他：瓦屋根標準設計・施工ガイドライン，2001
- 21) 岡田恒，喜々津仁密：工法の実態調査及び引き上げ試験に基づく瓦屋根の耐風性能評価，日本建築学会構造系論文集，No. 596, pp. 9-16, 2005
- 22) 喜々津仁密，河合直人：構成部材の引張載荷試験に基づく木造小屋組の耐風性能評価に関する研究，日本建築学会構造系論文集，Vol. 74, No. 646, pp. 2181-2188, 2009
- 23) 竜巻等突風対策局長級会議：「竜巻等突風対策局長級会議」報告，2013
<http://www.bousai.go.jp/fusuigai/tatsumakikyokuchou/pdf/h25-t/houkoku.pdf>
- 24) (一財)日本建築防災協会：安全・安心ガラス設計施工指針，2011
- 25) (一社)日本金属屋根協会，(一社)日本鋼構造協会：鋼板製屋根・外壁の設計・施工・保全の手引き，2014