

建築物の竜巻被害の概要と竜巻発生装置を活用した研究の展開

国立研究開発法人建築研究所 構造研究グループ 主任研究員

喜々津 仁密 *Hitomitsu Kikitsu*

1. はじめに

2012年5月6日に北関東地方を中心に複数の竜巻が発生し、茨城県つくば市内でもフジタスケールF3の竜巻（以下、つくば竜巻）によって多数の全壊住家などの被害をもたらした。さらに2013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300 m、長さ19 km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が極めて低く、竜巻を通常の耐風設計で考慮するのは合理的ではない。また、気象観測網で捉えることが極めて稀であるため、設計・検証に反映できる観測データなどの知見が不十分なのが現状である。その一方で上記の竜巻被害のなかには、大人数を収容する体育館や工業団地での複数の事業所施設において、広範囲にわたる屋根ふき材や窓ガラスの被害が発生し、屋内空間にも被害が及んだ事例がみられた。このような人命・財産・機能への被害経験を考慮し、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。

本稿では、上記の状況を背景にして建築研究所で取り組んでいる調査研究の概要を紹介する。まず次節で最近の現地調査結果から建

築物などの竜巻被害の実態を概観し、第3節で竜巻発生装置を活用した研究の概要と今後の展開についてそれぞれ述べる。

2. 建築物の竜巻被害の概要¹⁾

本節では、つくば竜巻と越谷竜巻の事例から、木造建築物と鉄筋コンクリート造建築物の被害や飛来物による被害の状況について概要を示す。なお、ここに掲げていない工作物や樹木などの被害状況の詳細は文献²⁾を参照されたい。写真は文献^{1),2)}からの引用である。

(1) 木造建築物の被害

①外装材の被害

外装材として屋根ふき材、外壁材、開口部の被害を示す。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一つであり、**図1**に示すような粘土瓦の被害が多く確認された。瓦以外の屋根ふき材としては、軽量かつ受風面積が比較的大きい金属板のふき材が、

図1 屋根ふき材の脱落・飛散（越谷市）



図2 開口部の損傷（つくば市）



図3 屋根小屋組の被害（つくば市）



図4 上部構造の転倒（つくば市）



図5 上部構造の倒壊（越谷市）



図6 上部構造の飛散（つくば市）



かなり遠くまで飛散した例があった。また、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もあり、開口部の損壊に伴い室内に被害が進展する状況となる（図2）。

②屋根の骨組の被害

屋根の骨組（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、つくば市と越谷市の調査でも多くの事例が確認された。図3は切妻屋根の例であるが、切妻以外の屋根形状（寄棟屋根、片流れ屋根）についても被害が見られ、また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。図2の開口部被害と同様に、小屋組が飛散することによって室内に被害が進展する事例もあった。

③上部構造の被害

図4は、基礎を伴う上部構造の転倒事例である。べた基礎^{※1}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ており、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。上部構造が倒壊、飛散

した事例も複数確認した。構造仕様の詳細は正確には把握できないが、図5の例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。また、図6の事例は一部の土台を残すものの、ほとんどの上部構造が飛散している状況である。

(2) 鉄筋コンクリート造建築物の被害

鉄筋コンクリート（以下、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、床や壁、梁など建築物の構造を支える骨組の被害は確認されておらず、全て外装材の被害である。

※1
べた基礎
建築物や設備機械の直下全面を板状の鉄筋コンクリートにした基礎をいう。

図7 集合住宅(南面)の被害状況(つくば市)

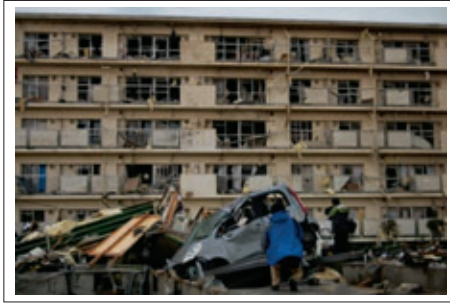


図9 内装材の被害(つくば市)



図8 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

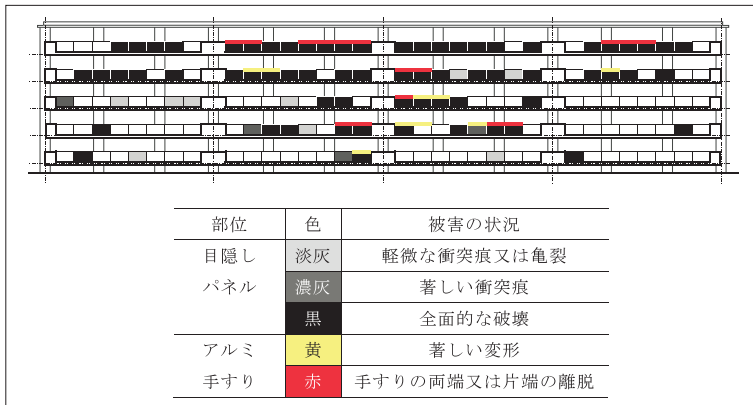


図10 窓ガラスへの衝突痕(つくば市)



図11 飛来物(屋根)の衝突(つくば市)



①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、ベランダの手すりなどが著しく損壊した(図7)。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8)を見ると、上階ほど手すりなど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。

②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(図9)。机やいすなどの家具などの転倒も見られた。

(3) 飛来物による被害

竜巻通過時に発生する多数の飛来物による外装仕上げ材や開口部の被害も多数確認され

た。図10はショッピングセンターのエントランスでの衝突痕、図11は飛来した屋根が衝突した事例である。

3. 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³⁾

前節に掲げた被害調査の結果、典型的な被害形態がある一方で、過去の調査ではみられなかった新たな被害形態である基礎を伴う木造住宅の転倒や、5階建て集合住宅の建具などの損壊も明らかになった。これらの特徴的な被害形態を分析するためには、竜巻による

突風が建築物に作用する状況を実験的に再現したうえで、当該荷重下での被害発生メカニズムを解明する必要がある。本節では、このような実験的研究に資することが期待できる実験装置の概要とこれを活用した今後の展開について述べる。

(1) 竜巻通過時に建築物に作用する力

図12に示すように竜巻が通過するとき、その中心付近では旋回流（渦巻き状の風の流れ）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作用する力は 1) 風圧力、2) 気圧降下による力（竜巻の中心付近）、3) 飛来物の衝撃力に大きく分類される。これらの荷重・外力は、建築物の外装材から構造部材、地盤へと伝達されるが、前節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顕在化した状況として捉えることができる。

また、上記1)、2)の特性は、台風時の強風による風力特性と大きく異なることから、

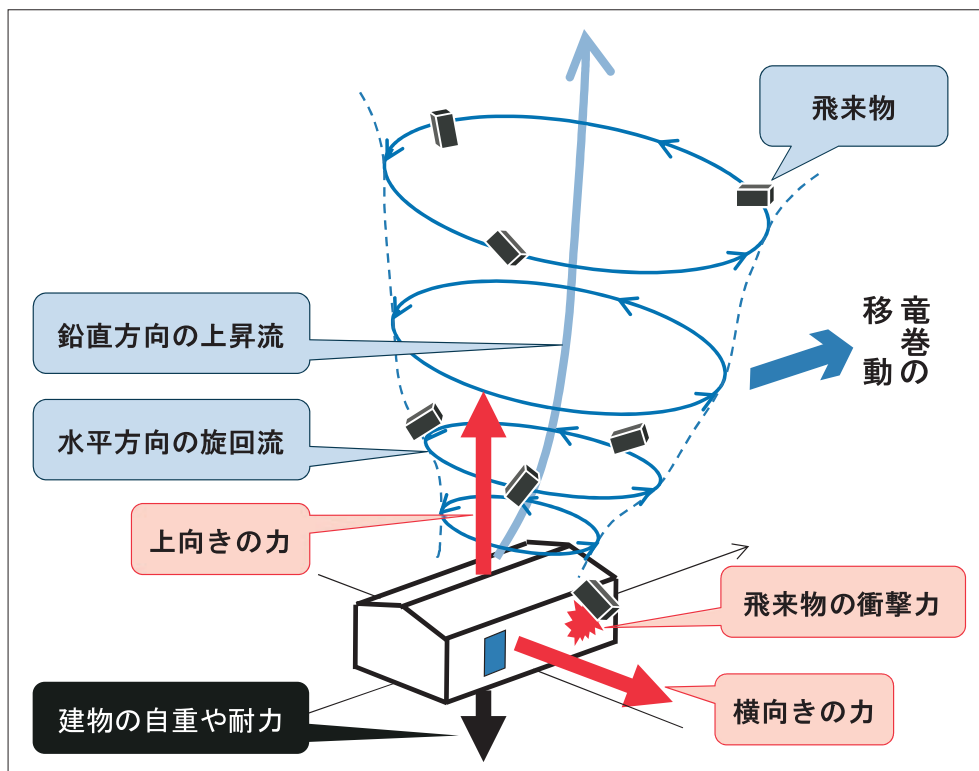
通常の乱流境界層風洞による実験的評価とは別のアプローチが求められる。

(2) 竜巻発生装置の概要

筆者らは竜巻通過時の突風危険度評価を目的として、2010年に竜巻発生装置（正式名称：竜巻状気流発生装置）を製作した。これは実際の竜巻に近い非定常な渦構造と圧力降下の状況を再現するとともに、建築物上を移動することができるものであり、米国アイオワ州立大学所有の装置（以下、ISU型装置⁴⁾の機構に倣っている。

図13に装置の概観、図14に装置本体の断面図をそれぞれ示す。装置は送風機を内蔵した「本体」、横方向に自走可能な「架台」、上下に昇降可能な「ステージ」および「制御盤」から構成される。本体各部の寸法はISU型装置の約1/3.7となっており、本体の外径は1.5m、内蔵された送風機の直径は0.5mである。図14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（案内羽根）

図12 竜巻による力の作用形態



は均等に18枚配置されており、0~55度の範囲で法線方向に対する角度を設定できる。ガイドペーンの角度を大きくするほど、大きな旋回流半径と最大風速が形成される。

図13 竜巻発生装置の概観



(3) 竜巻発生装置を活用した研究の展開

筆者らは既に、同装置での実験気流分布がランキン渦モデルとよばれる竜巻の工学モデルの性状に適合していることを確認したうえで、竜巻が建築物の真上を通過することを想定した建築物模型の風圧実験を実施している。

図15に竜巻通過時に屋根に作用する風力の実験例を示す。図中の横軸は、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 で除した数値であり、負の値が接近中、正の値が通過した後の状況にそれぞれ

図14 竜巻発生装置本体の断面図

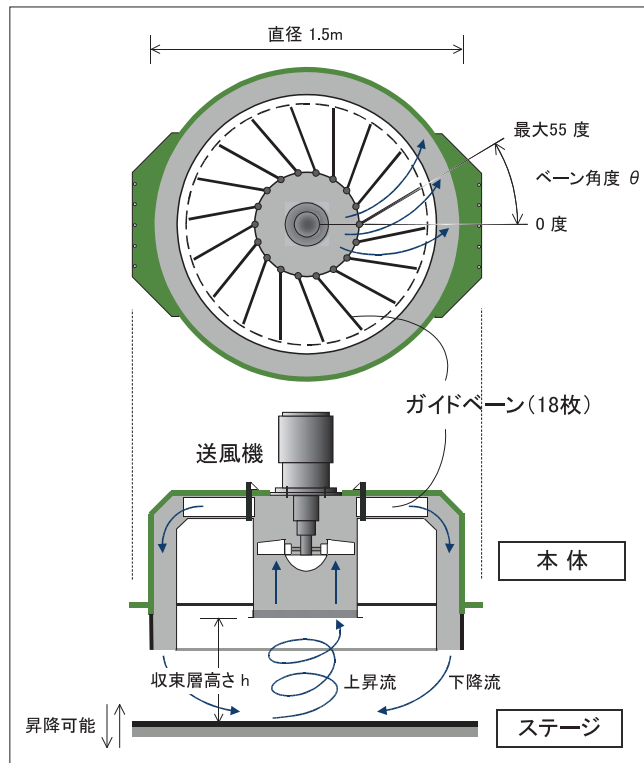
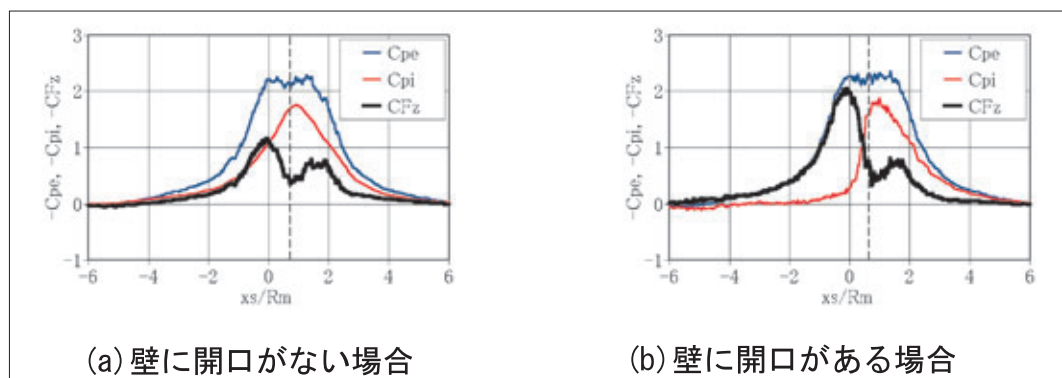


図15 屋根面の風力・風圧係数



れ相当する。縦軸は実際の風力や圧力を基準圧力で除した風力・風圧係数である。絶対値が大きいくほど風力や風圧が大きくなることを示しており、竜巻が接近するにつれて屋根に作用する圧力が急激に変化することがわかる。黒太線で表す風力係数 C_{Fz} は、外圧係数 (C_{pe}) - 内圧係数 (C_{pi}) によって計算され、 C_{Fz} の結果を模型の壁に大きな開口がある場合とない場合で比較すると、前者が約2倍の大きさになっている。この結果は、窓ガラスなどの開口部が破損した後の屋根の風力増加の可能性を示すとともに、脆弱な開口部の防御措置（雨戸など）の重要性を裏付けるものである。

4. おわりに

本稿では、最近の現地調査を通して把握した建築物の竜巻被害の実態、竜巻発生装置を活用した実験的研究の概要を紹介した。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、発生した時の影響範囲が限定的であることから、竜巻対策や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。

建築研究所では竜巻被害の状況を踏まえ、以下のテーマのもとで竜巻発生装置を積極的に活用した研究を展開しており、今後も引きつづき、建築物の対竜巻設計・性能検証法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。

- 1) 竜巻による建築物の被害形態の整理・分析
- 2) 竜巻発生装置を活用した建築物に作用する突風荷重の評価
- 3) 竜巻による特徴的な被害発生メカニズムの解明
- 4) 竜巻被害軽減に資する建築物の対竜巻性能検証法の構築

参考文献

- 1) 喜々津仁密：建築物の竜巻被害軽減に向けた研究と課題、平成25年度独立行政法人建築研究所講演会テキスト、pp.49-65, 2014. <http://www.kenken.go.jp/japanese/research/lecture/h25/pdf/K5.pdf>
- 2) 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（2012年）5月6日に茨城県つくば市で発生した建築物などの竜巻被害調査報告、建築研究資料、No.141, 2013. <http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/publications/data/141/index.html>
- 3) 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.
- 4) F. L. Haan, et al. : Design, construction and performance of a large tornado simulator for wind engineering applications, Engineering Structures, 30, Issue 4, 1146-1159, 2008.

ききつぷしとみつ

香川県丸亀市出身。東京大学工学部卒、同大学大学院新領域創成科学科博士課程修了。1997年建設省建築研究所採用。国土交通省住宅局建築指導課構造係長、アイオワ州立大学客員研究員、国土技術政策総合研究所主任研究官などを経て、2012年から現職。博士（環境学）。