

風工学と都市防災

東京理科大学 創域理工学部 社会基盤工学科 教授 きむら きちろう 木村 吉郎

1. はじめに

かぜこうがく
風工学は、多くの方にはなじみのない分野だと思えます。風工学とは、「人間の活動とそれらを取り巻く様々なスケールの空気の流れの相互作用を理解し、人と風の関わり方を追求する学問」（日本風工学会のホームページ (<https://jawe.jp>) より) である、とされています。要するに、「風」に関わる工学なのですが、その風工学の立場から都市防災について記述します。

なお本特集では、筆者が所属する、2023年から新しい学科名となった「社会基盤工学科」のメンバーが執筆しています。風工学は分野横断的で、気象・建築・土木・機械などの境界領域なので、ここでの記述は、「社会基盤工学」が通常の意味で対象とする橋梁などの「土木工学」分野以外のものが主体となります。

2. 建築物の被害

強風が引き起こす災害として代表的なものは建築物の被害で、特に大きな力（風荷重）が作用する屋根部分を損傷することが多いです。風は、基本的に高い位置の方が地表の凹凸の影響を受けないために強いことと、形状に起因して、屋根には上向き大きな風荷重が作用します。屋根瓦が飛ばされた住家の屋根の軽微な被害の例を【図1】に、屋根だけではなく外壁や、柱、梁にまで被害が生じた例を【図2】に示します。台風の強風によりこうした被害が生じると、雨水による被害も生じ、そうした浸水被害の費用の方が、屋根など

の補修費用よりも高額となることもあります。また大規模な建築物においても強風被害が生じることがあります。【図3】は、ドームの膜屋根が被害を受けた例で、膜屋根を押さえるケーブルとの隙間に堆積した砂が長期間の振動にともなって膜表面を削り、強度を低下させたことが原因とされています¹⁾。

建築物の被害に必ずしも限りませんが、強風被害の特徴の一つに、「被害の連鎖」があります。これは、一つの建築物に被害が生じ、瓦などの屋根ふき材やその他の部材が飛散すると、風下側に隣接する建築物などに二次被害が生じ、さらにその被害がその他の建築物に被害を生じさせる、というものです。被害の生じていない建物であれば耐えられる強風でも、飛散物の衝突により風上側の窓が破損すると、そこから吹き込む風により室内の圧力が増加し、それが屋根を下から押し上げる形となって、もともと屋根に外側から作用していた風荷重の効果と合わさって、屋根を飛散させてしまうといった現象もあり、こうした二次被害の影響は深刻です。【図4】は、竜巻で発生した飛散物により被害を受けた建物の外壁の例ですが、50 m/sに達するような風とともに飛ばされてくる飛散物の恐さがわかります。強風時には建物外に出ないことが大切です。

建築物の強風被害を減らすためには、強風に対して耐えられるように、それぞれの建築物を適切に設計することが大切です。そのために、強風により作用する風荷重や、建築物がどの程度の外力に耐えられるかを算出する必要がありますが、これらの値はばらつきをともないます。したがって、1つに決めることはでき



【図1】住家の軽微な被害¹⁾



【図2】住家の甚大な被害¹⁾



【図3】木造ドームの膜屋根の被害¹⁾

ず、例えば、50年に1回程度作用すると考えられる風荷重であるとか、部材の強度が公称値を下回る確率が5%である、といった形で、確率統計的に扱うことが適切です。また建築物であれば、建築基準法で満たすべき強度が定められていますが、それは最低限の強度であり、個々の建築物の状況に応じて、リスクを判断し、それに基づいて設計していくこととなります。さらに、飛来物に対する防御は別途しておく必要があります。ガラス窓には、雨戸やシャッター、防災合わせガラスなどの使用が有効です。



【図4】竜巻により生じた飛散物による被害¹⁾



【図5】ゴルフ練習場のネット支柱の倒壊¹⁾

3. 工作物の被害

強風被害の調査に行くと、構造計算が義務付けられていない小規模な建築物や建築基準法の適用外となっている工作物の被害が特に目立ちます。これらは耐風設計は行われず、経験的に決められた仕様のみによって、耐風性を満たすことが期待されているためです¹⁾。風荷重は、風にさらされる面積に比例して増加しますが、看板やカーポート、物置などは、面積の割に軽量なものが多く、部材強度が自重や地震力を支えるためには十分でも、風荷重に対しては不十分となってしまうこと、当初の強度を保つための維持管理が適切でないこと、などが原因です。これらには、重要性の低いものもあるかもしれませんが、被害を受けると前述の飛散物が発生し、二次被害にもつながることも問題です。

やや特殊な例として、ゴルフ練習場のネット支柱の突風により生じた倒壊を【図5】に示します。強い台風の接近など、強風が予測される場合には、ネットを下げることで風荷重を低減し被害を防ぐことになっていますが、突風ではそうした対応が間に合わずに倒壊などが生じてしまうことがあります。こうしたネットの支柱が倒壊すると、近隣の二次的被害につながることもあるので、十分な対策が必要です。

近年多く見かけるようになった太陽光発電用のパネルも、強風被害が発生しやすいものです。建物上に設置されたパネルの被害もみられますが、地上設置型の比較的大規模な太陽光発電設備などの被害も頻繁に生じています。【図6】に示した例は、ダウンバースト（積乱雲から吹き降ろす下降気流により生じる突風）と推測



【図6】太陽光発電設備の被害例¹⁾

される強風による被害で、パネルを支える架台は仮設足場等に使われる単管と単管クランプで作られており、単管クランプのずれや抜け、または杭の抜けなどが原因で被害が生じました。架台や基礎を、強風にも耐えられるように設計・施工することが、被害低減のために必要で、それに向けたガイドラインなどが整備されてきました。

カーボンニュートルの実現のための取り組みとして、太陽光発電の設置範囲は、水上などにも広がっていますが、その中でも「営農型」と呼ばれる、農地で作物を生産しながら、その上方に設置した太陽光発電パネルで発電を同時に行う取り組みも注目されています。こうした営農型太陽光発電システムでは、パネルの設置位置の地上高さが、通常の地上設置型のものよりも高くなったり、設置形態が異なったりするために、異なる風荷重が作用する可能性があり、その特性を検討したり、ガイドラインに反映させる作業が進められています。

電力に関連しては、強風時には、電柱や、頻度はより下がりますが送電鉄塔などの送電設備が被害を受けることもあります。別名「令和元年房総半島台風」とも呼ばれる2019年台風15号は、強風域の半径は小さかったものの中心気圧955 hPaの非常に強い勢力となり、房総半島を中心に深刻な強風被害が生じまし



【図7】強風により倒壊した送電鉄塔

た。君津市で送電鉄塔2基が倒壊し（【図7】）、2000本近い電柱の損傷が停電の長期化につながり、気温の高い時期であったこともあり、被災者に多大な負担を強いることになりました。

生じた送電鉄塔の倒壊は、台風による強風と、周辺の複雑地形の影響で特定の風向において送電線に作用する風速が高くなり、それにより送電鉄塔に作用する風荷重が設計値を超えたことにより生じたと考えられています。送電鉄塔などの設計において、こうした影響も取りこめるように、「送電用支持物設計標準」の改訂が進められています。

強風により、建設や解体時に建築物周りに設置される鋼管足場の被害も、比較的頻繁にみられます。足場の外側には、粉塵や騒音防止のために、シートやパネルが設置されます。これらのシートやパネルに作用する風荷重が大きいため、シートの場合には、強風が予測される場合にはシートを巻き取ることによって風荷重を低減し、被害を予防します。一方防音性が高く、解体工事において多用されるパネルの場合には容易には取り外すことができないため、そのままの状態が強風が作用し、大きな風荷重によって足場が倒壊してしまう事故が生じることがあります【図8】。足場を支えるために建物との間に設置している「壁つなぎ」の本数を、どれだけ増やして強度を確保する必要があるのか設計するために、解体の各段階で生じる様々な形状のパネル付き足場に作用する風荷重を算出するための検討も進めています。なお、仮設用足場が設置される期間は数ヵ月程度と短いために、確率統計的にはそうした短い期間に作用する可能性のある強風を考慮すれば良いとも考えられます。この強風は、例えば50年に1回作用する強風よりは低風速になり、対象としている一つの足場に対しては合理的な設計が行えます。しかし都市全体を考えると、仮設用足場は常にどこかに存在しているわけで、そのような低風速にしか



【図8】足場が倒壊した解体中の建物（外壁が見える部分の足場が倒壊した）¹⁾

耐えられないような足場ばかりだと、50年に1回作用するような台風のように、強風が広い範囲で発生すると、たまたまそのタイミングで設置されていた足場は倒壊してしまうこととなります。このように、安全性を考える範囲はどのようにとるべきかは、社会的な合意も重要となってくるため判断が難しい問題です。

4. 長大橋の被害、走行車両への影響

スパン（橋脚と橋脚の間のひとまたぎの距離）が100mを超えるような長大橋では、風により振動が生じることがあります。有名な例は、1940年の旧タコマ橋の崩落事故で、大きなねじれ振動を起こして落橋する様子を撮影した動画をご覧になった方も多いと思います。こうした事故が生じないように、風洞実験や数値流体解析による検討が設計時に行われており、落橋にいたるような事例はその後みあたりません。一方、不安を感じさせるような橋桁の振動や、損傷を生じさせるような部材の振動、発生原因が必ずしも明らかではない斜張橋ケーブルの振動などもあり、風により生じる振動の予測手法や対策の確立に向けて、研究開発が続けられています。

橋桁に生じる振動は、橋桁の形状を工夫して抑制することが多いですが、そのために設置される部材の耐久性が問題になることがあります。維持管理費用を低減するために、耐風性が再検討された例もあります²⁾。

橋梁上は、周囲に障害物が少ないことが多いため、強風が作用する傾向があり、走行車両の横転事故などが生じることがあります。事故を防ぐために強風時には、通行規制が実施されますが、利用者の利便性低下や通行料の収入減につながるため、安全性は確保しつつ、通行止めの時間はなるべく減らすことが望ましいです。そのような安全かつ合理的な通行規制はどのようにすべきか、規制を判断する風速の測定方法や、車

両に作用する風荷重，また車線別や車両種類の規制方法などについて検討が進められています。なお風速 50 m/s といった非常に強い風が作用する場合には，橋梁上でなくても，また，停止している車両でも，横転したり，吹き飛ばされたりといった被害が生じます。

5. 竜巻による被害と避難

竜巻は，わが国で発生するものでも非常に強いものだと，風速が 80 m/s またはそれ以上の猛烈な風が瞬間的に作用する可能性があります。しかし，強い竜巻の発生頻度は低く，また，その被害範囲も台風と比べると非常に狭いです。したがって，このような高風速にも耐えられるように構造物を設計することは，例えば原子力発電所のように損傷が生じた場合の被害がとてつもなく大きい場合以外は，適切とは考えられません。鉄筋コンクリート造の建築物は，窓などの開口部が被害を受けるとしても，地下部分や窓のない部屋は強風に対して概ね安全といえます。戸建て住宅も，雨戸やカーテンを閉め，1 階の建物中心部に近い部屋に移動することで安全性を高めることができます。竜巻をもたらすような，低く黒い積乱雲の接近などの兆しがある場合には，こうした避難行動をとり，身の安全を確保することが大切です。気象庁では，「竜巻注意情報」を提供しており，それも参考にすることができますが，竜巻発生後に発令される場合もあるなど，大きく頼ることは危険です。身の守り方については，「気象庁 竜巻から身を守るには」で検索すると，気象庁の HP の情報にアクセスすることができるので，リーフレットなど活用して頂きたいと思います。

6. ビル風，居住性能

ここまでは，台風や竜巻といった，特に高風速の風を生じさせる強い気象擾乱にともなって生じる現象を取り上げてきました。一方そこまでの強風でなくても悪影響が生じる現象として，ビル風があります。ビル風は，高層建築物の周辺で生じるもので，上空の強い風が建物の壁にあたって吹き降ろされることと，建物の角の部分で流れが集中して風速が増すことが主な原因となって，地上部で強い風が生じて，歩行者の歩行の支障や，転倒の被害などにつながるものです。ビル風により生じる環境問題を含む紛争の適正な解決をはかるために，「中高層建築物紛争予防条例」といったものを自治体が制定していることが多く，近隣住民へ

の説明のためにビル風の影響を事前に検討することが，特に大規模な建築物においては一般的です。風洞実験や数値流体解析による検討で，ビル風の影響が大きいことが予測される場合には，植栽や防風効果を持つフェンスなどの設置によってその影響を低減す



【図9】ビル風低減のため中空部分を設けたビル³⁾

ることが多いです。一方高層建築物そのものの形状を工夫して，ビル風を低減することも可能で，【図9】に示すのは，低層階の上の位置に中空部分を設けて，風を吹き抜けさせることで対策としたものです。

また，細長い超高層建築物や，観光タワー，飛行場の管制塔といった構造物は，橋に生じるのと同様に風により振動することがあり，「風揺れ」と呼ばれます。こうした場合，数秒の周期で振動が生じ，中にいる人が船酔いのような状態になってしまうため，対策が必要です。振動を抑制するような Tuned Mass Damper と呼ばれる装置を設置したり，形状を工夫したりするなどの対策が，事前に検討されることが多いです。

7. おわりに

本稿では，風工学の立場から，様々な風災害やその対策などについて記述しました。より包括的に，強風の風速と，人や車両，構造物に及ぼす影響の関係をつかみたい方は，日本風工学会のホームページで公開されている，「瞬間風速と人や街の様子との関係」をご覧いただくと，イメージがわくと思います。本稿を通じて，風災害や風工学に興味を持って頂いたり，防災に役立てて頂ければ，ありがたいと思います。

【参考文献】

- 1) 一般社団法人日本風工学会 風災害研究会：強風災害の変遷と教訓，第3版（2022）
- 2) 本州四国連絡橋公団長大橋技術センター：門崎高架橋耐風性の再評価，長大橋NEWSレター，No. 13（2002）
https://www.jb-honshi.co.jp/corp_index/technology/lbec/information_center/pdf/news-13.pdf
- 3) 防災リスク管理研究会：都市防災がわかる本，彰国社（2022）