特集

空飛ぶ凶器－飛散物のインパクト

飛散物の発生防止と防御

Prevention of Occurrence of Windborne Debris and Protection

西村宏昭*

Hiroaki NISHIMURA

1. 序文

飛散物による被害を防ぐ最良の方法は飛散物を発生させないことであるに違いない。しかし、現実には前述のように、種々の飛散物が発生し、それには建築物や工作物などの人工物の部品や部材だけでなく、樹木などの自然物の一部も含まれる。それらは強風でダメージを受けるだけでなく、飛散物による被害が新たな飛散物を生むという被害が連鎖する特徴をもつ。飛散物を完全に無くすることはできないであろうが、飛散物の発生を少なくすることはできるし、その努力は必要なものである。ここでは、飛散物の発生防止と飛散物が発生することを前提とした建築物の防御について述べる。

2. 飛散物の発生防止

飛散物の発生は強風による被害、つまり強風中で風による力が建築物や工作物の一部または部材あるいは樹木などの自然物の耐力を上回るときに生じる。予想される風の力に対して建築物や工作物の耐力が十分に大きいことを実験的または解析的に確認する作業が耐風設計である。近年の台風の直撃を受けて設計風速に至らない風で被害が生じていることは、それらの構造物について耐風設計がなされていないか、またはどこかうまくいっていないことを示している。

多くの住宅建築物(建築基準法第20条の分類による第4号建築物)は耐風設計について建築確認されていないた

め、耐風設計についての構造計算が残されていない。飛散物には屋根葺き材が多いので、屋根の風荷重に注目すると、それらは最低でも(粗い見積もりで) 1000N/m^2 以上の荷重が作用するとして設計されるべきである。瓦は 1m^2 当たり約 16 枚が使用されるので、1 枚の瓦には $1000/16 \approx 62\text{N}$ の風力が作用することになる。1 枚の瓦の重力は約 30N であるので、自身の重力だけで、つまり置かれているだけでは風荷重に抵抗できないのは明らかである。設計風荷重に対して十分に抵抗するためには 1 枚ずつの瓦を下地に固定しなければならないが、そうではない工法が多く採用されている。

一般に、耐風設計では、(設計風荷重) < (部材の耐力)であることを確認することになるが、風荷重と部材の耐力は共にばらつきをもち、確定値ではないことから、部材側で安全率を考慮しなければならない。(安全率) = (許容耐力) / (終局耐力) と定義され、一般に 1.5~2.0 の値を採ることが多い。終局耐力は部材の強度試験で得られる最大の耐力であるから、耐風設計に用いるべき(部材の耐力) = (許容耐力) は、終局耐力を安全率で除した値を採用しなければならない。安全率の設定には、部材間の耐力のばらつき、経年劣化の程度、および施工のばらつきなどの種々の要因を考慮すべきである。

部材間の耐力のばらつきは、試験体の数を多くすることで統計的に評価でき、試験体数によって試験荷重の割り増しを与える方法が決められている規準(例えば、

* 日本建築総合試験所 耐風試験室 主席専門役
Head Researcher, Wind Engineering Lab, General Building Research Corporation of Japan

AS1170.0, Appendix B¹⁾)もある。日射や湿度による部材の経年劣化の程度は、建築物が置かれる環境に強く依存し、定量的に把握されていない建材も多くあると思われる。それらの評価には長い時間を要し、継続的にモニタリングする建材製造者の努力が必要である。もちろん、経年劣化が生じにくい建材の開発も重要であり、それらを短期間で評価する手法（例えば、SSR 2007 の熱伸縮試験²⁾）の開発も望まれる。施工のばらつきは、実際には比較的大きい場合があると思われるが、その程度を評価する前に、施工の品質管理を十分に行って、ばらつきが生じない努力をするべきである。これには、施工マニュアルの整備と施工者の技能を認定する仕組み（例えば、金属屋根工事技士³⁾）が有効であろう。また、施工者の技能に依存しない施工法の開発も有効である。

設計用風荷重が確定的な値でないことは、例えば建築基準法に基づく設計用風荷重の算定で、設計風速がほぼ50年の再現期間で設定されており、これは年超過確率2%をもち、建築物の供用期間を50年とすればその間の実際に生じる風速の超過確率は63%にも達すること、実際の建築物の形状は複雑であるが、多くの場合、設計用外圧係数は独立した単純な形状の建築物模型を用いた風洞試験結果から得られた値を用いて風荷重が算定されることなどから明らかである。また、室内圧の設定、建築物群の遮蔽効果や相互作用、将来の近接建築物の建設なども設計風荷重に不確実性を与える。

以上より、建築物の耐風設計における風荷重とそれを受ける建築部材の耐力は共にばらつきあるいは不確実性をもつと言え、両者の不確定な設計値を補償するために、安全率を考慮した建築部材の許容耐力を設計に用いるべきであると結論付けられよう。不確定な要因の影響が大きいと思われる場合には、安全率を大きく設定しなければならないのは言うまでもない。

実際のところ、建築外装材の構造設計は「選択」である。設計者は基準に基づく風荷重を算定し、終局耐力あるいは許容耐力が明確にされた建材製造者から提供されるデータの中から、種々の要因を考慮して安全率を設定し、あるいは提供されたデータの安全率を確認して、設計荷重に見合う製品を選択することが多い。したがって、建築外装材の設計を確実にするには、建材製造者が提供する技術データ（試験結果）が重要である。

外装材は厳しい気象条件に晒されるので、経年劣化が避けられない。上で劣化の程度を見込んで安全率を設定すべきであると述べたが、その予測は実際には困難であることが多く、またそのためにかなり大きい安全率を課

すことになるかもしれない。建築外装材は、構造部材と違って、取り替えることが可能な部材であり、初期投資を小さくして、建築物の寿命の途中で劣化の進んだ部材を修理することも多い。そのためには定期的および台風が通過した後の点検と維持管理が必要である。

定期的な点検がなされていれば、強風被害を受けずに済んだと思われる建築物被害は多く見られる。例えば、2004年の台風0416号と台風0418号の二つの台風で二重折板がめくれた兵庫県にある大型放射光施設SPRING8は、これらの台風を受ける以前に折板の固定金具が破断しており（写真1参照）、定期点検を実施しておれば不具合が発見されたかもしれない。SPRING8と同じ構法の金属屋根は数多く残存しており、早急な点検が必要であると思われる。

写真1 台風0418号で被害を受けたSPRING8の二重折板。（固定金具のボルトが破断しているが、折板にはゆがみが少なく、熱伸縮の影響でボルトに金属疲労が生じ、強風を受ける以前に破断していたと考えられる。）

3. 飛散物に対する防御

3.1 飛散物による被害

建築物は種々の自然現象（風、雨、日射、温度など）から居住者を守る機能をもつが、多くは飛散物に対して無防備のままである。特に開口部は飛散物に対して脆弱であり、開口部の飛散物に対する防御が建築物の耐風設計に残された最大の課題である。

飛散物は高速で建築物に衝突するので、建築物にいくらかのダメージが生じることは避けられない。飛散物に対する開口部やその他の建築外装材の防御の目的は、居住者の安全を守ることと、建築物のさらなる被害の拡大を防ぐことである。開口部を突き抜けた飛散物や割れたガラスによって居住者が死傷する例はこれまでも発生している。例えば台風9807号で強風によって割れたガラ

ス片が首に刺さり動脈を切断して死亡した例や強風で倒れた玄関戸のガラス片で大腿部を切った例、また台風 9918 号では強風で割れたガラス片が胸に刺さり死亡した例（いずれも©weathernews の調べ）が報告されている。これらの被害は扱いが微妙で、記録に残ることが少ないが、類似の被害を防ぐためには知っておく必要がある。

現在では、台風の進路はほぼ正確に予測され、注意報や警報によって強風の発生を事前に知ることができる。したがって、飛散物が建築物を襲うという前提で、飛散物に対して建築物を防御する時間的な余裕がある程度ある。竜巻などの突風は急速に発達し、非常に狭い範囲に影響を与えるのみであるので正確な予測が困難で、建築物を飛散物から防御する時間的な余裕がないことが多い。しかし、風が強くなるか、空が暗くなるなどの予兆に注意し、窓から離れ、厚手のカーテンを閉めて、ソファなどの家具に身を隠すなどの対処が有効である。また最近では、気象庁から竜巻注意情報も発令されており、これらの気象情報も有効に使うことが推奨される。しかし、最も重要なことは、高い運動エネルギーをもつ（したがって高い殺傷能力をもつ）飛散物に対して人は抗しようもないことを認識し、危険を回避する習慣を身に付けることであろう。

開口部が破られると、室内に風と雨が入り、他の外装材や構造骨組が被害を受けることがある。写真 2 は風上側の窓ガラスが飛来物で割れ、小屋組を吹き飛ばした例である。このような被害の拡大を防ぐために、飛来物によって外装材がダメージを受けたとしても、その後に続く加圧に対してその外装材は脱落することなく、元の位置に留まっていなければならない。また室内に侵入した雨水は室内装飾や室内の物品を濡らし、長期間に渡って建築物を使用不能にすることがある。高温多湿の環境では、カビの発生によって居住者の健康にも害を及ぼす恐れがある。室内浸水の被害は外装材の直接の被害よりも費用が掛かることも多い。

写真 2 風上側の窓の破損によって小屋組が吹き飛ばされた被害（兵庫県美作町の竜巻被害、2009）

3.2 飛散物防御の基標準

飛散物による建築物の被害と防御の研究が海外で始まったのは 1970 年代に遡る。1974 年にオーストラリア北部のダーウィン市を襲った熱帯性サイクロン Tracy は伝統的な工法で作られた家の約 60% を崩壊し、ダーウィン全市の家の 90% 以上の屋根葺き材を吹き飛ばした。住宅建設省内に作られたダーウィン再建委員会は、被害を受けた構造体の、特に接合部の強度が繰り返し力を受けて著しく低下するという弱点を指摘するとともに、大量の飛散物が被害を拡大したという報告書⁴⁾を提出した。多数の住宅が崩壊した原因の一つに、風上側の窓の破損とそれに続く室内の加圧を挙げ、窓の破損の多くは飛来物によるものであったと報告された。これに対して、窓を防御する必要性が議論され、写真 3 のような日除けが有効であったことから、窓の外側にシャッターを付けることが推奨された。

サイクロン Tracy の後、ダーウィン地域建築マニュアルに飛来物（ミサイルと呼ばれた）に対する試験基準⁵⁾が含まれた。これが規定しているのは、窓とドアは 100mm × 50mm で 4kg の木材が 15m/s の速度で当たるときの衝撃に耐えるというものであった。ミサイルは試験体を貫通してはならず、衝撃後の風圧に耐え続ける性能がなければならないとされ、繰り返し圧力载荷の手順が決められた。この試験の目的は、飛来物に対して窓とドアが損傷を受けないことではなく、損傷を受けたとしても、その後の風圧に耐え、被害のリスクを低減するために大きな開口が開かないことを確認することである。

写真 3 ダーウィン市で飛来物に対して有効であった日除け⁴⁾

アメリカ合衆国における飛来物による被害は、Minor ら⁶⁾によって精力的に調査され、1970 年 5 月の Lubbock ストームと 1970 年 8 月のハリケーン Celia による被害で、広範囲にわたる高層建築物のガラスの破損が報告された。写真 4 に示す高層建築物のガラス被害は、近接建築物の屋上に敷設された砂利が強風で飛散し、これらの窓ガラ

スを直撃した結果であるとしている。彼らは建築物が建て込んだ都市部でのガラス張り建築物の脆弱性に強い不安を示した。わが国では、建築物の屋上に砂利を敷設する工法は普及していないが、都心部で巨大台風の直撃を受けた場合に発生する飛散物は想像すらできず、極めて小さい飛来物によってガラスが割れる事実は甚大な被害の発生を予感させる。

高層建築物のガラスの飛来物による破損被害は、その後のハリケーン、例えば 1992 年のハリケーン Andrew⁷⁾、2004 年の Charley⁸⁾、2005 年の Katrina⁹⁾、2008 年の Ike¹⁰⁾でも報告されている。ハリケーン Katrina では、ガラスが割れた部屋の中で外から飛来した小石が見つかった(写真 5)。

アメリカ合衆国の荷重標準 ASCE 7-05「建築物および構造物の最小設計荷重」¹¹⁾には、ハリケーンを対象とした飛来物の衝突による外装材の性能基準が定められている。ハリケーン発生地域内の基本風速(地上高さ 10m での 3 秒ガスト)が 110mph 以上で海岸線から 1 マイル以内の地域とハワイ、および基本風速が 120mph 以上の地域は飛散物地域と定義され、飛散物地域内にある建築物のグレーディング(ガラスとプラスチック製品を指す)は ASTM E1996¹²⁾(詳細は本書「飛散物に対する外装材の耐衝撃性能の評価方法について」を参照されたい)の性能基準を満たす耐衝撃性能を有するか、または耐衝撃カバーで防御しなければならないとしている。ASCE 7-05 で定義される飛散物発生地域をそのままわが国に当てはめるのは必ずしも適切とは言えないが、概ね基準風速 $V_0=34\text{m/s}$ を超える地域の海岸線近くの大都市が相当する。

写真 4 1970 年のハリケーン Celia による高層建築物のガラスの被害⁶⁾

写真 5 ハリケーン Katrina によるニューオリンズ市内の高層ホテルの窓の被害(部屋では、飛来してガラスに衝撃を与えた碎石が見つかった)。

3.3 開口部の防御例

ASCE 7-05 などの基規準でいう耐衝撃性能を有するグレーディングは、それぞれの基規準が指定する試験方法で決められたミサイルの衝撃とそれに続く加圧試験に合格した製品を指し、主には合わせガラスが該当する。強化ガラスや網入りガラスは一般に衝撃に耐える頑健性をもっていない。

比較的大きく重い飛散物は遠くまで飛ばないが、比較的小さく軽い飛散物は遠くまで飛んで被害を与えるという観察から、建築物の低層部(ASTME 1996 では高さ 9.1m 以下)では大きいミサイル、高層部(高さ 9.1m 超)では小さいミサイルに耐える性能が建築外装材に要求される。これに対応して、低層部のガラスは防御能力の高い合わせガラスが、高層部では小ミサイルに対して効果的な防御性能をもつ安全フィルム貼りガラスの使用がそれぞれ推奨されている。これらの製品の性能はわが国ではまだ確認されていないが、高層建築物のガラス壁面の飛散物に対する実地的な防御の方法であると考えられる。写真 6 はハリケーン Katrina で被害を受けたニューオリンズ市内の高層建築物の小石の衝突を受けてダメージを受けたが安全フィルムが貼られていたために脱落しなかったガラスである。

写真6 ハリケーン Katrina で小石の衝突を受けたガラス。安全フィルムを貼っていたために脱落は免れた。

住宅の開口部は、耐衝撃性のあるガラスに代わって、シャッターやスクリーンでガラスを保護することが便利ことがある。ガラスの厚さとそれを収める枠の溝幅（呑み込み幅とも言う）の関係にはほぼ一定の関係があるので、既存の窓のガラスだけを入れ替えるのは困難なことが多い。その場合には、通常の窓の外側をカバーすることで飛散物の衝撃に耐える方法が選ばれる。最も簡易なカバーは合板を窓に取り付ける方法で、その例を写真7¹³⁾に示す。また、FEMA¹⁴⁾は合板シャッターの取り付け方法を分かりやすく説明している（図1）。特に注意する点は合板シャッターの固定ビスを外装材や額縁ではなく、丈夫な下地（構造体）に固定することであるとしている。

図1 合板ストーム・シャッター¹⁴⁾

写真7 合板シャッターによる窓の防御例¹³⁾

アメリカ合衆国では、ハリケーン・シャッターまたはハリケーン・スクリーンと呼ばれる種々の材料と形状の防御デバイスが市販されている。ハリケーン・シャッターの例¹³⁾を図2に示す。飛散物耐衝撃試験に合格した防御デバイスの有用性は最近のハリケーンでも証明されている。これらの防御デバイスによって窓が無傷であった例を写真8～写真10に示す。飛散物による被害を防ぐために、わが国でもこれらと同様の製品の開発と試験による性能確認が必要である。

図2 ハリケーン・シャッターの例¹³⁾

写真8 1階の窓を覆った合板シャッターと2階の窓を覆ったロールダウン式ハリケーン・シャッターによるガラスの防御例¹⁰⁾

写真9 はめ込み式のビニール・キャンバスによる窓の防御例¹⁰⁾

写真10 金属製シャッターの例（隙間があって良くない例として紹介されている）¹⁵⁾

4. おわりに

飛散物の発生を防止することは、適切な耐風設計と確実な施工、および定期的なメンテナンスを実施することに尽きる。しかし、現実の強風時には多くの飛散物が生じるので、防御を真剣に考える必要がある。現実的な防御方法と防御製品が開発されれば、受け入れたいと希望する施主は多くいると思われる。したがって、飛散物に対する防御を耐風設計に組み込む手法を早急に考慮する必要がある。

参考文献

1) Standard Australia, AS/NZS 1170.0 Structural design actions Part0: General principles, 2002.

- 2) 日本金属屋根協会, 日本鋼構造協会, 鋼板製屋根構法標準 SSR 2007, 2008.
- 3) 日本金属屋根協会,
<http://www.kinzoku-yane.or.jp/license/index.html>
- 4) G. Walker, Report on Cyclone “TRACY” – Effects On Buildings – December 1974, Department of Housing and Construction, 1975.
- 5) Experimental Building Station, Department of Housing and Construction, Guidelines for the Testing and Evaluation of products for Cyclone-Prone Areas, Technical Record 440, 1983.
- 6) J.E. Minor, K.C. Mehta and J.R. McDonald, Failures of Structures due to Extreme Winds, J. Struct. Div. ASCE ST11, pp.2455-2571, 1972.
- 7) FEMA, Building Performance: Hurricane Andrew in Florida, Observations, Recommendations, and Technical Guidance, FIA-22, 1992.
- 8) FEMA, Hurricane Charley in Florida, Observations, Recommendations, and Technical Guidance, FEMA 488, 2005.
- 9) FEMA, Summary Report on Building Performance, Hurricane Katrina 2005, FEMA 548, 2006.
- 10) FEMA, Hurricane Ike in Texas and Louisiana, Building Performance Observations, Recommendations, and Technical Guidance, FEMA P-757, 2009.
- 11) American Society of Civil Engineers: ASCE 7-05, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures.
- 12) ASTM E1996-04 : Standard Specification for Performance of Exterior Windows, Curtain Walls, Doors, and Impact Protective Systems Impacted by Windborne Debris in Hurricanes.
- 13) FEMA, Shutter Alternatives, Technical Fact Sheet No.26, FEMA 499 “Home Builder’s Guide to Coastal Construction”, 2005.
- 14) FEMA, Against the Wind – Protecting your home from hurricane wind damage, 1993
- 15) FEMA, Hurricane Ivan in Alabama and Florida, Observations, Recommendations, and Technical Guidance, FEMA 489, 2005.