

火砕流熱風部の障害物周りの流れの特性と減勢

三重大学大学院生物資源学研究所 ○山田 孝
国土交通省九州地方整備局雲仙復興事務所 前田 昭浩 渡部 文人

1,目的

火砕流熱風部が建物に与える影響評価や効果的な緊急対策工開発などのためには、建物などの障害物による熱風部の流れの特性の変化を明らかに必要がある。本研究では、1991年9月15日に雲仙普賢岳で発生した火砕流熱風部による大野木場小学校の被災実態を調査し、校舎の開口部の破壊状況から流れの速度、圧力の校舎周りの分布を推定し、校舎によってどの程度熱風部が減勢したのかを明らかにすることを目的とした。

2, 校舎衝突直前・直後の流れの諸元の推定

火砕流熱風部流下区域での電柱などの倒壊実態調査(建設省土木研究所 1991)から、大野木場小学校衝突直前の熱風部の流速を25m/s(地上高5m)とした。その場合、流れの代表的なスケールを地面から校舎の3階までの高さ(11.5m)とすれば、流れのレイノルズ数は 1.2×10^6 程度(熱風部の温度:400°C, 動粘性係数: $\nu = 2.3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$)となり、高レイノルズ領域の流れとなる。おしが谷からの熱風部の流入方向より、熱風部は校舎山側の隅角部(上流側)付近に偏角20度程度で衝突したとみなした。校舎衝突直前の流れの鉛直方向の流速分布は未知であるが、対数則を適用すると、校舎壁面、ガラス面に対して垂直方向の流速成分は、1階、2階、3階では、各々、17.4m/s, 25.7m/s, 29.9m/sとなる。校舎内(1~3階の階段踊り場)に残存する熱風部の堆積物の粒径分布を調べた。粘土とシルト成分の計が約70~90%と多く、校舎の階による違いは存在せず、熱風部内の浮遊粒子の粒径分布の鉛直方向の違いはなかったと推察される。山側隅角部の破壊された窓ガラスを熱風部採取口とみため、1階~3階の階段踊り場に残存する熱風部の堆積深、堆積物の間隙比、窓枠長(高さ)から、各階に流入した熱風部の平均的な土砂濃度を求めると、1階は1.6%、2階は1.0%、3階は1%となる。熱風部の温度を校舎部材の溶融、燃焼状況から400°Cと仮定し、平均的な土砂濃度の値から、各階に流入した熱風部の平均的な密度を求めると、1階は $4.21 \text{ kgf/s}^2/\text{m}^4$ 、2階は $3.69 \text{ kgf/s}^2/\text{m}^4$ 、3階は $2.65 \text{ kgf/s}^2/\text{m}^4$ となる。熱風部のフロントの平均的な密度は、 $0.57 \text{ kgf/s}^2/\text{m}^4$ となる。土砂濃度、密度は、鉛直方向に高くなる方向に指数関数的に減少する。

3, 校舎周りの流速と圧力, その作用方向の推定

大野木場小学校では建物壁面の破壊は生じていないが、窓ガラスと窓枠の変形が顕著に生じている。窓ガラスは網入りガラスとフロートガラス(透明ガラス)の2種類が、窓枠は鋼とアルミの2種類が使用されている。校舎の全ての窓ガラスの種類と大きさを調べ、ガラスの許容風圧力を建築基準法(平成10年6月改正)により規定された方法で算出した。ガラスの許容風圧力は、網入りガラスが $255.5 \sim 4379.5 \text{ kgf/m}^2$ 、フロートガラスが $151.6 \sim 2087.2 \text{ kgf/m}^2$ である。窓ガラスの破壊率を、窓枠1セットにおける同じ強度のガラス枚数に対する破壊枚数と定義しその分布を調べた結果、以下のことが明らかにされた。①フロートガラスの破壊率は、校舎山側、校庭側、校舎側面いずれもほぼ100%であり、許容風圧力 2087.2 kgf/m^2 のもの(厚さ3mmで大きさは $18 \text{ cm} \times 42.5 \text{ cm}$)のみが、校庭側の一部の箇所に残存している。②網入りガラスの破壊率は、 911.4 kgf/m^2 強度以上では12.5~25%と小さい箇所もある。③全てのガラスの許容風圧力と破壊率との関係を調べると、 803.6 kgf/m^2 以下の強度のガラスの破壊率はほぼ100%である。 911.4 kgf/m^2 、 1053.8 kgf/m^2 、 2087.2 kgf/m^2 強度では、破壊率は0~100%とばらつくが、校舎階別、山側、校庭側、側面による違いは認められない。 4379.5 kgf/m^2 強度のガラス(厚さ6.8mmの網入りガラスで大きさは $18 \text{ cm} \times 42.5 \text{ cm}$)の破壊率は25%以下と小さい。

破壊率が75%以下である場合はガラス面に作用した風圧力の垂直成分が許容風圧力に近いと仮定し、それぞれの箇所での風圧力を求めた。次いで、堆積物調査結果、熱風部の密度などと風圧力の式により、ガラスに垂直方向に作用した流れの流速成分を逆算して求めた。また、風圧力の算定には、校舎内の内圧とガラスの破壊によるその変化は考慮せず、外圧のみで計算した。1階の山側の中央部付近~隅角部(下流側)にかけての風圧力と流速は、約 1050 kgf/m^2 、約15m/sとなった。同様に、1階の校庭側での風圧力と流速は、約 $2,090 \text{ kgf/m}^2$ 、約22m/s、2階の山側の中央部付近~隅角部(下流側)では、約 $910 \sim 1050 \text{ kgf/m}^2$ 、約15~17m/sとなった。校庭側の2階での風圧力と流速は、約 910 kgf/m^2 、約15m/s、3階の校庭側の隅角部(上流側)では、約 650 kgf/m^2 、約15m/sとなった。

次いで、窓枠(鋼・アルミ)の変形方向と変形量(たわみ量)を階別、山側・校庭側・側面別に調べた結果、以下のことが明らかにされた。①鋼の窓枠の変形量は0.5~7cmである。②鋼の窓枠は、一部の縦枠が曲げ塑性破壊している事例が多い。アルミの窓枠は全体が外れて変形している箇所が多く見られる。③1~3階の山側の窓枠のほぼすべてと校庭側の窓枠の多くが校舎内側に変形している。④側面部の窓枠は全て破壊され残存しない。以上から、単純な変形状況を呈する鋼の窓枠を両端固定の単純梁とみなし、熱風部の急速荷重(1質点系モデルによる長方形パルス荷重を想定し、最大動的倍率

を2とした)が等分布状態で作用したと仮定して梁の塑性解析を行った。ここで、降伏時のたわみ量は最小の変形量である0.5 cmとした。また、降伏応力時のたわみ量、形状係数(塑性断面係数÷断面係数)から枠が崩壊荷重に達したときの枠中央のたわみ量を2.4 cmとした。枠の変形量がそれ以上の場合は、枠両端での塑性ヒンジが発生しているばかりでなく、枠中央の崩壊に至っていると判断した。堆積物調査と計算によって求めた熱風部の密度などから、窓枠に垂直方向に等分布荷重状態で作用したと仮定した場合の流れの流速成分を求めた。1階の山側の中央部付近での流速は約12~16m/s、隅角部(下流側)にかけての流速は、約12m/s未満となった。1階の校庭側での流速は、中央部付近~隅角部(下流側)にかけて約16m/sとなった。2階の山側の中央部付近では、約13~17m/s、隅角部(下流側)では、約13m/s未満となった。2階の校庭側では、約17m/sとなったが、局所的に約13~17m/sとなった。窓ガラスの許容風圧力から求めた熱風部の流速と鋼の窓枠の塑性変形解析により求めたそれらとは、比較的近い値となった。

これらの値から、校舎周りの流速比(各階での熱風部衝突直前の流速に対する比)と圧力係数(各階での熱風部衝突直前の風圧力との比)の分布を求めた。1階の山側での流速比、圧力係数は、各々、0.9程度、0.4~0.7程度、校庭側では、各々、1.2程度、1.4程度である。2階の山側での流速比、圧力係数は、各々、0.6程度、0.3~0.4程度、校庭側では、各々、0.6程度、0.3程度である。3階の校庭側での流速比、圧力係数は、各々、0.5程度、0.2~0.4程度である。上層階ほど、流速比、圧力係数が小さくなる傾向が認められるが、各階とも、山側、校庭側の流速比、圧力係数は大きくは変わらない。

一方、幾つかの窓ガラスには、熱風部内部の飛散礫による明瞭な表面剥離(ヘルツコーン)を伴った貫通痕が認められる。それらの等値直径は5cm以上のものが多い。ちなみに、既往の網入りガラスの貫通率と礫直径との関係から、貫通箇所での平均流速を10~20m/sとすると、貫通が生じるための礫の最小等値直径は、約5~7cmとなる。

4. 熱風部の校舎背後(校庭側)への巻き込み特性

山側、校庭側ともに、窓ガラスの破片は、校舎内に散在・堆積していること、窓枠の多くは校舎内側に変形していることから、校庭側では、流れの剥離により負圧が卓越したのではなく、熱風部の渦が校舎の背後に上からと側面から巻き込み、逆向き(校舎内側)の力が卓越したと考えられる。このような巻き込みは、高レイノルズ領域の3次元物体周りの空気の流れにおいて建物の辺長比(建物の横幅に対する長さの比)が大きいときに見られる現象であるが、大野木場小学校の事例においても同様の現象が発生したと想定される(大野木場小学校の辺長比:0.2)。また、前述のように、山側、校庭側の

速度比、圧力の比に大きな違いは認められないが、これは巻き込みによる三次元的緩和効果が発揮されたと考えられる。熱風部の運動状況を撮影した映像資料から、熱風部フロントは様々なスケールの渦からなり、それらの回転運動によって、地表面を這う流れ形態を呈することが理解できる。校舎に衝突した熱風部は、2階屋外ベランダ、3階屋根部ならびに校舎側面から1階、2階の教室に回転渦が相応の速度で巻き込み、熱風部の流れ方向とは逆向きの力を窓に作用させたため、窓枠が校舎内側に変形し、窓ガラスの破片も校舎内に散在・堆積したものと考えられる。校舎周りの速度分布から、比較的同じ流速域のスケールを渦のスケールとみなすと、数10m程度と想定される。

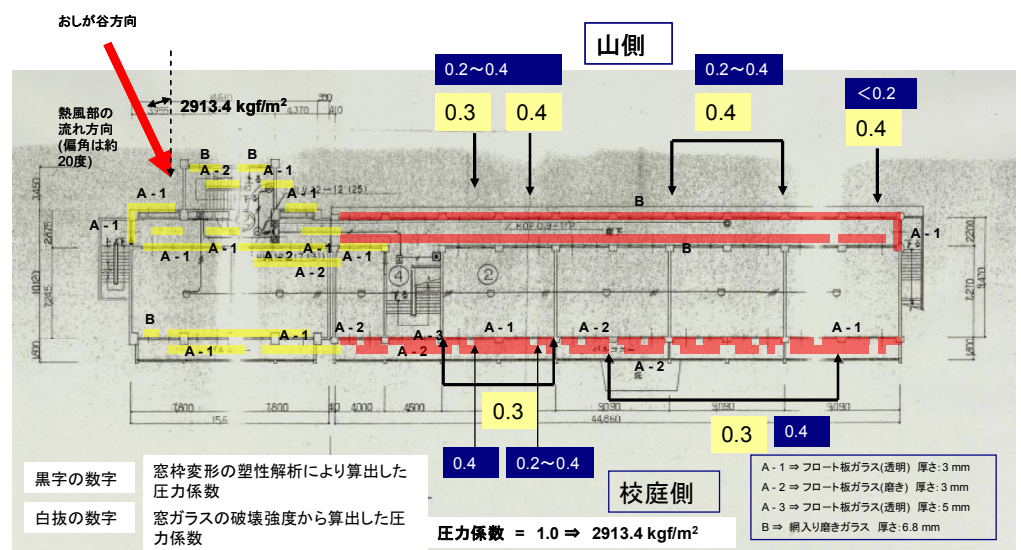


図 校舎周りの圧力の分布(2階)

5. 結論

大野木場小学校の窓ガラスの許容風圧力と破壊率、急速荷重条件下での窓枠(鋼)変形の塑性解析、飛散礫が窓ガラスを貫通するための速度と最小礫径の検討から、校舎により流速比で0.5~0.9程度、圧力係数で0.2~0.7程度、熱風部を減勢したことが推定された。また、熱風部は数10mのスケール渦から構成されると考えられる。