

竜巻によるアスファルト剥離被害に関する考察

徳島大学 正会員 ○野田 稔
徳島大学 フェロー 長尾 文明

1. はじめに

2012年5月6日正午過ぎにほぼ同時に発生した3つの竜巻が茨城県から栃木県に渡る北関東広域を襲った。図1に被害域の概略を示すが、これらの竜巻は死者1名を含む53名の人的被害、683棟の全壊・半壊を含む2,387棟の建物被害、多大な農業被害等をもたらした。気象庁ではこれらの竜巻についてF1～F3の強さであったと判定している¹⁾。これらの多くの被害の中で、図1に示した竜巻Bが残した被害(図2)のうち、36kmに及ぶ被害域のほぼ中央付近で、写真1に示すように、幅4mの農道に敷かれていた50mm厚、単位重量約1kN/m²のアスファルト舗装がおよそ30mの長さにわたって剥がされ、飛散するという被害が発生した。竜巻Bの強さはF1～F2と判定されており、このクラスの竜巻は日本でも年に数回は観測されるものであるが¹⁾、もしこのアスファルト剥離という現象がF1やF2クラスの風速で発生するものであるとすれば、過去にも同様の被害は幾度となく記録されていてもおかしくない。しかし、実際には、2009年に岡山県美作市で発生したF2の竜巻被害で老朽化したアスファルト舗装材が浮き上がり移動した例が記録されているのみであり²⁾、今回のような健全な状態のアスファルト舗装が被害を受けた例は日本では初めてである。そもそもフジタスケールの定義³⁾に舗装材に関するものはなく、風速との対応関係は不明である。そこで、今回調査したこの竜巻Bによるアスファルト剥離・飛散被害における風速推定を試みた。



図1 2012/5/6の竜巻被害域



図2 被害発生場所



写真1 道路被害の状況

2. 被害概要

現場は写真1に示した通り平坦な田畑に囲まれており、図3に示すような「く」の字に曲がった幅4mの農道である。道路に沿って幅3.5m、1.3mの用水が併設されている。南西から北東に竜巻が進行したのに対して、アスファルトは北西方向に30cm～2m程度の大きさに砕けて飛散していた。図中の黒塗りの楕円が破片の分布状況であり、その被災範囲は道路から40m程度離れた場所まで広がっていた。また、写真2に示すように、道路の破損範囲の北西側にあったガードレールが飛散してきたアスファルト片によって破壊されていた。残っていたアスファルト片は50cm四方程度はあったものと考えられ、その質量は大きめに見積もって25kg程度だったものと考えられる。ガードレールの設計強度は耐えるべき衝突エネルギーで定義されており、最も弱いC基準で45kJの衝突エネルギーを支えることが定められている⁴⁾。25kgの物体が水平かつ直角に衝突する際の衝突エネルギー(運動エネルギー)が45kJに達するためには、 $V=60\text{m/s}$ の衝突速度が必要となるが、実際には斜めに衝突しており、60m/s以上の衝突速度であったものと推測される。

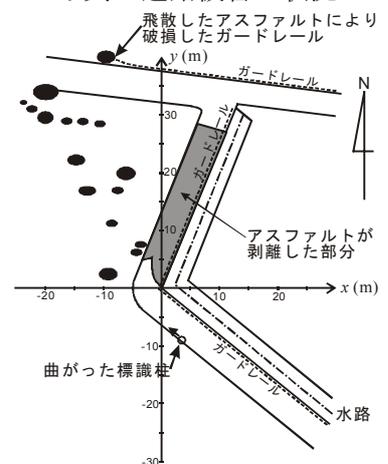


図3 道路被害場所の詳細

キーワード 竜巻被害, 風速推定, 付着強度, フジタスケール

連絡先 〒770-8506 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部 TEL 088-656-7323

3. 飛散物の衝突速度による風速推定

飛散開始からあまり時間が経過していない間は、飛散物の飛行速度は場の風速と同じにはならない⁵⁾。そこで、衝突速度が60m/sになるための場の風速を、一様流場を想定して著者らが開発した飛散物飛行軌道解析プログラム⁵⁾を用いて求めた。紙面の都合上、解析内容の詳細の説明は省略するが、スリップ境界の地面から、迎角を5°ピッチで変化させ、上向きの力が働く角度を初期角として静止状態から飛行を開始した正方形板の運動を求めた。飛行中の正方形板のみの解析結果より求めた飛行距離と平均飛行速度の関係は図4のようになり、飛散物の重量と空気力の比として定義される立川数⁶⁾に左右されない曲線に沿う結果を示した。図3に示したアスファルトの剥離範囲とガードレールの破損位置との関係から飛行距離は20~40mと考えられるため、飛行速度 V は場の風速 U の52%から63%となる。従って、 $V=60\text{m/s}$ に対する場の風速は $U=95\sim 115\text{m/s}$ と推定された。

4. 圧力低下によるアスファルト剥離を想定した風速推定

今回の被害は、アスファルトが竜巻の通過によって生じた圧力低下によって持ち上げられた可能性が高い。竜巻の最大接線風速が U の時、その速度圧 $0.5\rho U^2$ に対して竜巻中心の圧力変化は-2倍 ($C_p = -2$)、最大接線半径一で-1倍 ($C_p = -1$) となることが示されている⁷⁾。そこで、この圧力低下によってアスファルトの自重と基盤との付着力を上回る条件から風速を推定することにした。しかし、もともと圧縮力に耐える素材のアスファルトについて付着強度を求めた例はなかったため、写真3に示すように正方形にカットしたアスファルト片をロードセル付の揚程機によってゆっくりと持ち上げることによってアスファルト舗装の付着強度を実測した。30, 40, 50cm角の供試体に対して求められた結果を図5に示す。30cm角10個、40cm角と50cm角がそれぞれ5個の合計20個の付着強度の平均値 F_{mean} は5.6kPa、標準偏差 σ_F は3.3kPaとなった。これに、アスファルトの重量 $w=1\text{kN/m}^2$ を加えて、 $F_R=w+F_{\text{mean}}\pm\sigma_F=6.6\pm 3.3\text{kPa}$ のアスファルトの鉛直抵抗力を上回る風速範囲は、 $C_p = -2$ に対しては、 $U=52\sim 91\text{m/s}$ 、 $C_p = -1$ に対しては74~128m/sとなった。この結果は、先に推定された風速範囲95~115m/sとも重なっており、妥当な結果と考えられる。

5. まとめ

竜巻によるアスファルト剥離・飛散という、実質的に日本では初めて記録された被害形態に対して、飛散物の飛行速度とアスファルトの剥離条件という2つのアプローチから被害発生時の風速を推定したところ、100m/s前後の風速に達する風が吹いていた可能性を示唆する結果が得られた。これは、FスケールではF3~F4に相当し、その他の痕跡から判断されたF1~F2という強さから大きく乖離している。Fスケールについてはアメリカで構築されたことから日本に直接適用することの問題も指摘されており、日本の環境に合わせたフジタスケールの構築が求められている。今回の結果も踏まえ、今後の竜巻評価について検討を深めていきたい。

参考文献 1) 気象庁ホームページ, <http://www.jma.go.jp/>. 2) 喜々津ら, 平成21年7月19日岡山県美作市竜巻被害調査報告, 国土交通省建築研究所ホームページ, 2010. 3) Fujita, "Proposed Characterization of Tornadoes and Hurricanes by Area and Intensity, SMRP Paper, No. 91, 1971. 4) 日本道路協会, 防護柵の設置基準・同解説, 2008. 5) Noda et al., Behavior of Plate-like flying debris, Proc. of 13th ICWE, 2011. 6) Tachikawa, Trajectories of flat plates in uniform flow with application to wind-generated missiles, JWEIA, Vol.14, 1983. 7) Sabareesh et al, Characteristics of surface pressure on a building under a tornado-like flow at different swirl ratios, JWE, Vol.8, No.2, 2011.



写真2 飛散物による破損

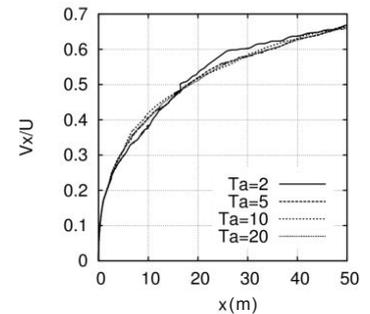


図4 飛行距離と飛行速度

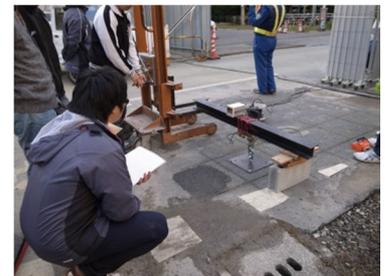


写真3 付着強度計測試験

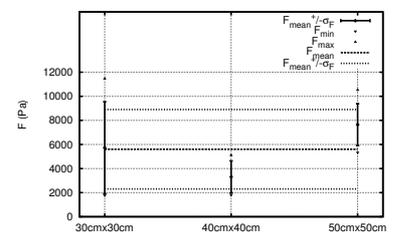


図5 アスファルトの付着強度