

竜巻飛来物の建屋等への年間衝突確率評価法の開発

Development of Evaluation Method for Annual Strike Probability of Tornado-borne Missile on Buildings and Structures

| | | | |
|---------|--------|--------------------|--------|
| 電力中央研究所 | 江口 譲 | Yuzuru EGUCHI | Member |
| 電力中央研究所 | 平口 博丸 | Hiromaru HIRAKUCHI | |
| 電力中央研究所 | 村上 貴裕 | Takahiro MURAKAMI | |
| 電力中央研究所 | 杉本 聡一郎 | Soichiro SUGIMOTO | |
| 電力中央研究所 | 服部 康男 | Yasuo HATTORI | |

A computer code, TOMAXI, was developed to evaluate annual strike probability of a tornado-borne missile for a vertical or horizontal plate of unit area placed in an arbitrary position in our previous study, assuming that the direction of tornado translational path is stochastically random. In the present study, the authors have extended the function of TOMAXI to compute annual strike probability of a tornado-borne missile for a building or a structure of arbitrary shape placed in an arbitrary position. As an example of the application, the code has been applied to annual strike probability estimation of an automobile against a rectangular building.

Keywords: Tornado, Missile Strike, Probability, Building, Structure

1. 序論

著者らは、竜巻の方向依存性が統計的に一様である場合を想定し、竜巻飛来物が任意の場所の微小平面へ衝突する年間確率（以下、特に断りがない限り、すべて単位面積当たりの確率）を評価するための数値解析コード TOMAXI を開発した[1]。このコードを用いる際には、Fig.1 に示すように主に2種類の入力データが必要となる。1つは飛来物の軌跡データであり、竜巻との種々の相対位置関係にある飛来物がどのような軌跡で飛来するかを TONBOS(ver.4)を用いて計算する[2]。TONBOS(ver.4)では浮上・飛散する物体の姿勢のランダム性や風速の変動を考慮することができる。2つめの入力データは竜巻ハザード曲線であり、TOWLA[3]を用いて評価することができる。TOMAXI では TONBOS(ver.4)で得られた確率的な飛来物の軌跡と TOWLA で得られた風速ハザード曲線と組み合わせ、物体が微小平板に衝突する年間確率の空間分布（軸対称分布）を計算することができる。

本発表では、TOMAXI によって得られる年間衝突確率の空間分布を用いて、任意形状の建物や構造物の表面に物体が衝突する確率を計算する手法について説明する。次に、自動車が矩形建屋に衝突する場合について具体的な計算例について紹介する。

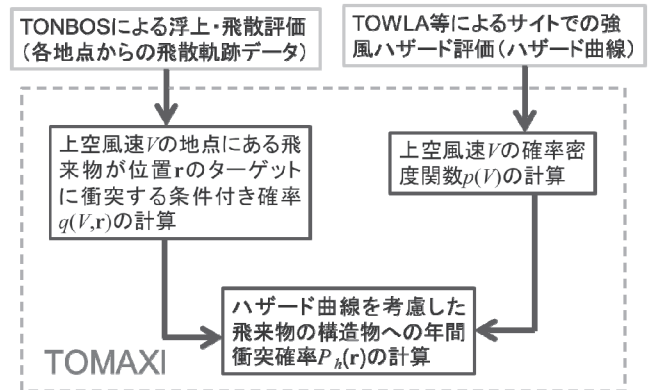


Fig.1 Computing flow of annual strike probability in TOMAXI

2. 建物等への衝突確率計算法

Fig.2 のように竜巻飛来物が原点上にあり、被衝突体の表面上の点が直交座標で (x,y,z) 、円柱座標で (r,θ,z) で表されるものとする。ここで、 $r^2=x^2+y^2$ 、 $\tan\theta=y/x$ の関係にあり、この点での外向き単位法線ベクトルを \mathbf{n} とする。また、1年間にこの点を通る飛来物のフラックスの期待値 \mathbf{p} は TOMAXI の計算で得られる軸対称の確率空間分布 (P_r, P_θ) を用いて以下のように仮定できるものとした。

$$\mathbf{p} = (P_r \cos\theta, P_r \sin\theta, -P_z) \quad (1)$$

ここで、飛来物は被衝突体付近で上方から地面方向に移動するものと仮定した。この場合、被衝突体の表面位置での年間衝突確率 σ はベクトル \mathbf{p} と外向き単位法線ベクトル \mathbf{n} によって以下のように計算できる。

$$\sigma = \begin{cases} -\mathbf{p} \cdot \mathbf{n} & (\mathbf{p} \cdot \mathbf{n} < 0) \\ 0 & (\mathbf{p} \cdot \mathbf{n} \geq 0) \end{cases} \quad (2)$$

外向き単位法線ベクトル \mathbf{n} は微分幾何の公式より以下のように求められる。

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{N}}{|\mathbf{N}|}, \quad \mathbf{N} = \left(\frac{\partial(y,z)}{\partial(u,v)}, \frac{\partial(z,x)}{\partial(u,v)}, \frac{\partial(x,y)}{\partial(u,v)} \right) \quad (3)$$

ここで、被衝突体の表面上の点 (x,y,z) がパラメータ u, v によって表されるとし、法線ベクトル \mathbf{N} の各成分は以下のヤコビアンから計算される。

$$\frac{\partial(y,z)}{\partial(u,v)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial z}{\partial u} \\ \frac{\partial y}{\partial v} & \frac{\partial z}{\partial v} \end{vmatrix}, \quad \frac{\partial(z,x)}{\partial(u,v)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial z}{\partial u} & \frac{\partial x}{\partial u} \\ \frac{\partial z}{\partial v} & \frac{\partial x}{\partial v} \end{vmatrix}, \text{ etc.} \quad (4)$$

TOMAXI での計算では、被衝突体の表面を有限個 (N_e) の小さな四角形の集合で模擬し、各四角形について (u, v) を局所座標とする一辺 2 の正方形 $(-1 \leq u, v \leq 1)$ に写像した。この場合、 σ_i, \mathbf{N}_i を四角形 i における衝突確率、式(3)の法線ベクトルとすると、被衝突体全体での年間衝突確率(全表面) P_{all} は以下で計算される。

$$P_{all} = \int_S \sigma dS = \sum_{i=1}^{N_e} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \sigma_i |\mathbf{N}_i| dudv \quad (5)$$

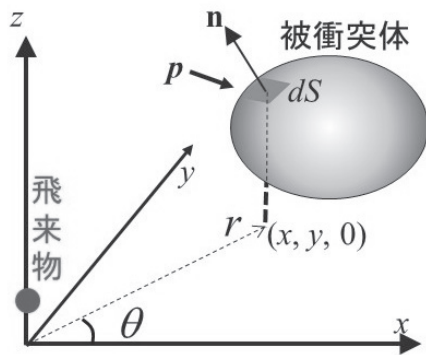


Fig.2 Spatial relation between a missile and a target

3. 適用例

地上に飛来物として自動車(寸法: 4.4mx1.7mx1.5m, 質量: 1,140kg)が1台あるものとし、最大竜巻風速 90m/s (移動速度 18m/s, 旋回速度 72m/s, 竜巻半径 45.7m) の

竜巻がランダムに来襲するものとした。まず、一辺が竜巻半径の4倍の正方形領域に約 60,000 台の自動車を等間隔で配置して飛散軌跡を TONBOS(ver.4)で計算した。この軌跡データを TOMAXI の入力データとして、竜巻風速 V の条件付衝突確率 $q(V, \mathbf{r})$ を計算した。一方、竜巻風速 V の年超過確率 $H(V)$ は $H(V) = 1.52 \times 10^{-3} \exp(-0.10466V)$ で表されるものと仮定した。この年超過確率 $H(V)$ と条件付衝突確率 $q(V, \mathbf{r})$ を用いて、軸対称の確率空間分布(P_1, P_2)を求めた。被衝突体としては Fig.3 に示すような高さ 5m、幅 5m、奥行き 10mの直方体建物を設定し、その表面を 800 個の四角形に分割した。単位面積当たりの年間衝突確率の分布は Fig.3 に示すものとなった。

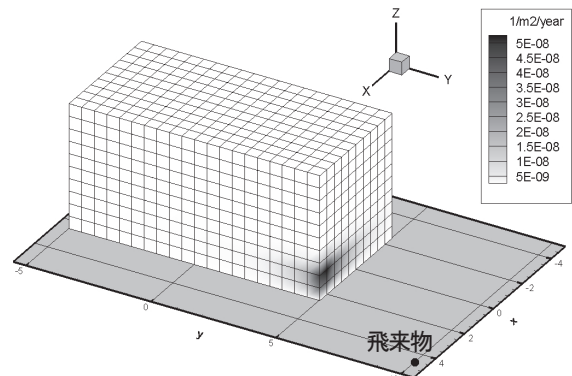


Fig.3 Annual strike probability for a rectangular building

4. 結論

竜巻によって物体が浮上・飛散し、安全上重要な機器や構造物に衝突する年間確率を計算するための評価方法を示した。この方法をコード化した TOMAXI を自動車が矩形状の建物に衝突する場合に適用し、建物表面での年間衝突確率分布を計算できることを示した。

参考文献

- [1] 江口 譲, 平口 博丸, 村上 貴裕, 杉本 聡一郎, 服部 康男, 強風飛来物衝突確率評価コード TOMAXI の開発とその適用例, 日本保全学会第15回学術講演会 要旨集, pp.98-103, 2018.
- [2] 江口 譲, 村上 貴裕, 杉本 聡一郎, 服部 康男, 平口 博丸, ランダム回転モデルによる強風下での角柱飛散解析, 日本流体力学会 2017, 2017.
- [3] 平口 博丸, 野原 大輔, 杉本 聡一郎, 江口 譲, 服部 康男, 沿岸立地原子力発電所の竜巻風速ハザードモデル TOWLA の開発, 電力中央研究所 研究報告書 O15005, 2016.