

京都大学工学部 学生会員 ○立花嵩
京都大学大学院工学研究科 正会員 白土博通

京都大学大学院工学研究科 学生会員 稲毛健至
京都大学大学院工学研究科 正会員 八木知己

1. 序論

角状コンテナ型の大型車が横風に煽られ横転する事故が時々報道される。移動中の車両に作用する風は、横風に加え自身の移動により生じる風を考慮する必要がある。そのため固定点で計測した横風により決定された規制風速では十分に安全を確保できていない可能性がある。本研究では風洞実験を用いて移動中の物体が受ける風速変動特性及び閾値超過確率を求め、仮定された大型車の横力係数をもとに通行規制風速設定法について考察する。

2. 実験概要及び式の定義

本研究では、固定された風速計により計測される風速と移動中の物体が受ける風速の両者についての変動特性及び風速閾値超過確率を比較するため、格子乱流中で熱線流速計プローブを風洞中央点で固定した計測、及び風洞主流直角方向に対して 0[deg]、45[deg]の方向に 1.0[m/s]で熱線流速計プローブを移動させた計測の両者を実施した。45[deg]のケースでは、風洞主流方向の風を追い風及び向かい風として受ける場合の 2 ケースを測定した。風洞設定風速は 0.7[m/s]、0.8[m/s]、1.0[m/s]、1.5[m/s]、2.0[m/s]とした。

Figure 1.2 に風洞風速と熱線流速系プローブの移動速度のベクトル合成和 U 及び U の時間微分 $\dot{U}$ の標準偏差 σ_U 、 $\sigma_{\dot{U}}$ を示す。横軸は風洞風速である。これより固定点で計測した場合よりも、0[deg]や 45[deg]向かい風状態で移動させた時に風速変動の乱れが小さくなることがわかる。また風速の時間微分の乱れについては、45[deg]追い風時に値が小さくなることが示された。

本研究で用いた式の定義を以下に示す¹⁾。

ある確率過程 $y(t)$ を考える。 $y(t)$ が時間間隔 dt 内で閾値 a を下から上に超過する条件は、

$$y < a \quad \text{かつ} \quad \dot{y} > \frac{a-y}{dt} \quad (1)$$

と示される。移動物体が受ける風速 U の時系列を正規定常確率過程とみなし、 U と $\dot{U}$ の 2 次元同時確率密度関数より(1)式の条件を満たす確率を得、単位時

間内に閾値 a を下から上へ通過する回数 $v^+(a)$ は

$$v^+(a) = \frac{1}{2\pi} \frac{\sigma_{\dot{U}}}{\sigma_U} \exp\left(-\frac{a^2}{2\sigma_U^2}\right) = v^+(0) \exp\left(-\frac{a^2}{2\sigma_U^2}\right) \quad (2)$$

と求められる。 $v^+(0)$ は風速の平均値を上向きに通過する回数である。ここで U と $\dot{U}$ の 2 次元同時確率密度関数のヒストグラムを Figure 3 に示し、 $\dot{U}=0$ 及び $U=0$ 断面で区切ったヒストグラムと σ_U 、 $\sigma_{\dot{U}}$ を用いて算出したガウス分布の形状を Figure 4,5 で比較する。分布形は概ねガウス分布と一致する結果となった。

大型車がある橋梁上を一定の速度で通過する時間を 30 秒、風速データのサンプリング周期を 1[kHz] と仮定する。この間に車両が転倒する確率を 1000 台中 1 台と設定すれば、(2) 式の $v^+(a)$ を用いて以下の関係が成立する。

$$1 - (1 - v^+(a) dt)^{30fs} = 10^{-3} \quad (3)$$

(fs : サンプリング周期, $dt = 1/fs = 0.001[\text{sec}]$)

これらより $v^+(a) = 3.3 \times 10^{-5}$ と求められる。

ここで、閾値 a を車両の横転限界風速と橋梁通過時の平均風速と車両の走行速度のベクトル合成和の差、すなわち $a = U_{\text{limit}} - \bar{U}$ と定義する。 U_{limit} は車両が転倒し始める風速である。(2)式を変形することにより、閾値超過風速係数 T_C を以下に定義する。

$$T_C = U_{\text{limit}} / \bar{U}_c = \left(1 + \sqrt{-2I_U^2 \log\left(\frac{v^+(a)}{v^+(0)}\right)} \right) \times \bar{U} / \bar{U}_c \quad (4)$$

ただし、 $\bar{U}_c$ は(橋梁上の)固定点で計測した平均風速、 I_U は乱れ強度とする。

U_{limit} は車体に作用する横力による転倒モーメントと復元モーメントのバランスにより決定できる。本研究では数値流体解析結果を参考に車体の横力係数 C_S を、Figure 6 に示すような値と仮定した。 C_S は風が真横(水平偏角 $\alpha=90[\text{deg}]$)から吹く場合よりもやや斜め方向($\alpha=67.5$)から吹く場合に最大値 $C_S=2.00$ をとる。

以上の情報を用いると、 $U_{\text{limit}}=22.24[\text{m/s}]$ と試算できる。風洞実験の結果を用いて T_C を求めることで、通行規制風速に対応する $\bar{U}_c$ を求めることができる。

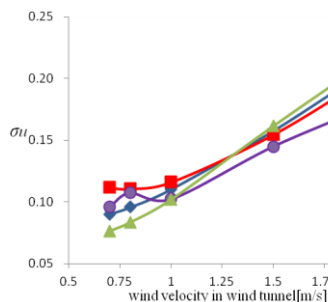


Figure 1 標準偏差 σ_U

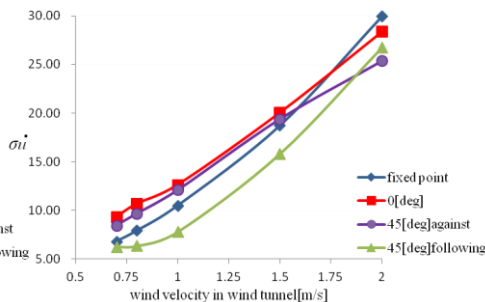


Figure 2 標準偏差 $\sigma_{\dot{U}}$

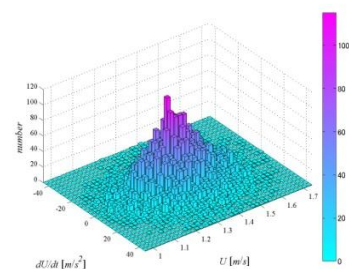


Figure 3 2次元同時確率密度関数 $p(U, \dot{U})$ のヒストグラム

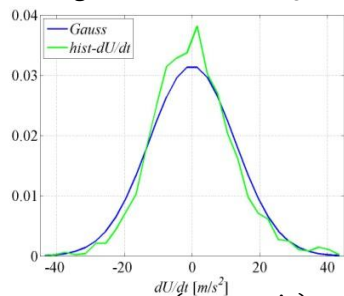


Figure 4 $p(U=0, \dot{U})$ と
ガウス分布との比較

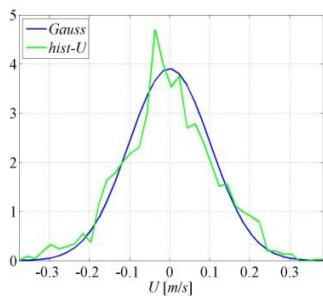


Figure 5 $p(U, \dot{U}=0)$ と
ガウス分布との比較

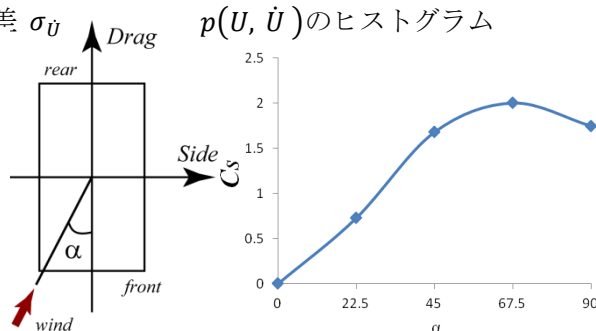


Figure 6 車体の横力係数

3. 実験結果

Figure 7 に平均値通過回数 $v^+(0)$ を、Figure 8 に風洞風速による T_c の変化をケースごとに示す。 $v^+(0)$ 、 T_c とともに 0[deg] や 45[deg] 向かい風状態で、固定点で計測した場合より大きい値が得られた。 $v^+(0)$ が大きいほど風速が閾値超過する可能性が高くなるため、静止時と比べ 0[deg] や 45[deg] 向かい風状態で走行する時の転倒確率が上昇することがわかる。車両に作用する風速と転倒確率の関係には、風速の大きさだけでなく風向や走行方向も考慮に入れる必要があり、通行規制風速の設定には移動中の車両が受ける風速の変動特性や閾値超過確率を反映させる必要があると判断される。Table 1 に転倒限界風速 U_{limit} 、閾値超過風速係数 T_c 、並びに通行規制風速 $\bar{U}_c$ との関係性を示す。この関係式から通行規制風速 $\bar{U}_c$ を求めることができる。なお、実際には場の風向、風速に関する生起確率や、車両の動特性、転倒により傾斜した車体に作用する空気力など他に検討すべき要因が多数残されており、今後継続的に検討を行う予定である。

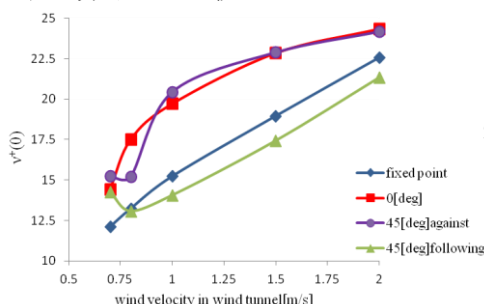


Figure 7 平均値閾値超過回数 $v^+(0)$

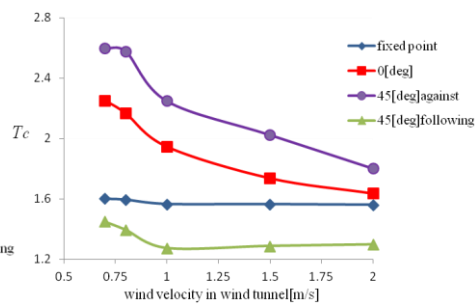


Figure 8 閾値超過風速係数 T_c

横転限界風速 U_{limit}	車両の形状から導出
閾値超過風速係数 T_c	a : 車両の転倒確率設定により $v^+(a)$ を決定 → a を決定
	$I_U, v^+(0)$: 実験値 (観測値) から導出 → (4) 式より T_c を導出
一通行規制風速 $\bar{U}_c$	U_{limit}, T_c より決定

Table 1 車両横転限界風速及び通行規制風速の関係性

4. 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 移動中の車両に作用する合成風速の閾値超過確率の考え方をを用いることで、車両が転倒し始める風速 U_{limit} 及び閾値超過風速係数 T_c を導出し、固定された風速計による場の平均風速 (通行規制風速) $\bar{U}_c$ との関係性を示した。
- 2) 実験結果から、移動物体に作用する合成風速が大きいほど T_c の値が大きくなる。今後現実の通行規制風速の設定には、風速及び風向の生起確率、車両の動特性、傾斜した車体に作用する空気力などを考慮する必要がある。

参考文献

- 1) D.E.Newland: “An Introduction to Random Vibrations, Spectral & Wavelet Analysis”, (Dover books)