

パイプテントに作用する旋風による風荷重評価の基礎的検討
Investigation toward wind load evaluation of pipe tent subjected to whirlwind

○奥田博貴・西嶋一欽

○Hiroki OKUDA, Kazuyoshi NISHIJIMA

Pipe tents used at outdoor activities are sometimes blown off by whirlwinds like dust devils and cause injury to people. However, there are no clear rules for measures to prevent pipe tents from blowing off. The objective of this study is to evaluate wind load on pipe tents subjected to whirlwind and develop reasonable countermeasures. As a preliminary step the study evaluates wind load of the assumed pipe tent under uniform flow by wind tunnel test and calculate wind load effects at the support of the assumed pipe tent. Using the calculated wind load effects, weights required to resist the wind load are estimated.

1. はじめに

旋風（塵旋風）とは、強風を伴う渦巻き状の上昇気流のことである。旋風の気流性状の特徴としては、①風速の鉛直成分が無視できないこと、②風速が水平方向に勾配があること、③通過時に急激な気圧降下があること等がある。また、太陽に熱せられた地表面で生じるため、好天時に多く発生することも旋風の特徴である。そのため、運動会などの屋外イベントにて旋風が発生し、イベント用の小型のパイプテントが飛ばされ、怪我人が生じるといったことが日本では時折報告されている。しかし、現状としてパイプテントの耐風手段に関する明確な基準は存在せず、パイプテントの空力特性に関する研究も進んでいない。

そこで本研究では旋風に対するパイプテントの耐風手段の確立を研究目的とし、風洞実験を用いることで旋風によってパイプテントに作用する風荷重の基礎的な評価を行う。また、風洞実験を用いて評価した風荷重を用いて、現状の耐風手段の一つとして使用されているパイプテント支柱柱脚部に取り付ける重石に着目し、「旋風の代表風速に対してパイプテントが飛ばないように必要最低限の柱脚部重石一個あたりの質量」（以下、必要重石質量と呼称する）を推定する。

2. 既往の研究

パイプテントに作用する風荷重についての既往の研究として、立川ら¹⁾が鹿児島県末吉町の小学校の運動会でテントが旋風によって飛ばされたという実際の事例について、解析モデルを用いてパイプテントに作用した揚力を推定している。また、

西村ら²⁾が福井県敦賀市にて大型のパイプテントがガストフロントによって飛ばされたという実際の事例について、風洞実験を用いてパイプテントの浮き上がり開始風速を推定している。本研究では、風荷重の算定方法について西村らの研究を参考とする。

3. 風洞実験の概要

旋風の気流性状を風洞内で再現することは難しいため、本研究ではまず接近風を一様流とすることで、風荷重の評価を行う。幾何学的縮尺率は1/15、実験風速は10m/s、風向角 θ は $0^\circ \sim 90^\circ$ で 5° ピッチとする。旋風の代表風速を20m/s、実スケールでの評価時間3sとすると、相似則より風洞での評価時間は0.4sとなる。ここで、短い評価時間において、ピーク値と平均値はほぼ変わらないため、実験で得られる平均風力係数を、ピーク風力係数として扱う。パイプテント（切妻屋根、垂れ幕有）の概要を図1に示す。テント中心点を地面に投影した点を原点Oとし、図1のように原点Oを通るx、y、zの3軸を設定する。なお、各軸はパイプテントに固定されたものとする。風力

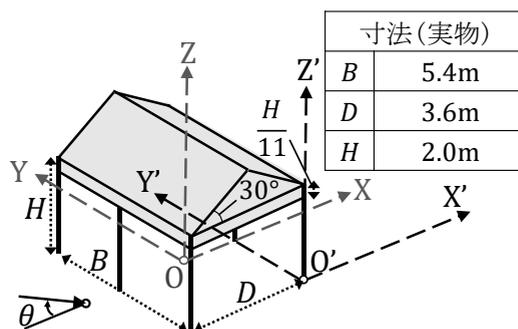


図1 パイプテントの概要

天秤を用いて得られた風力を無次元化することで風力係数とし、それらは式(1)、(2)で表せられる。

$$C_{Fi} = \frac{F_i}{qBD} \quad (1)$$

$$C_{Mk} = \frac{M_k}{qBDH} \quad (2)$$

ただし、 F_i は各軸方向の平均風力($i = X, Y, Z$)、 M_k は各軸まわりの平均転倒モーメント($k = X, Y$)である。 q は屋根平均高さでの平均風速 V に基づく速度圧である。

4. 風荷重効果の評価

実験から得られた風力係数を用いて、パイプテントに作用する風荷重効果の評価する。原点 O と X, Y, Z の3軸を図1のように平行移動させたものをそれぞれ点 O', X' 軸、 Y' 軸、 Z' 軸と定義する。ここで破壊モードとして、 l 軸($l = X', Y'$)まわりにパイプテントが転倒するモードの2種類について考え、パイプテントに作用する風荷重効果として、 l 軸における転倒モーメント M_l を評価する。なお、パイプテントが垂直に浮き上がるモードについては、 C_{FZ} の値が小さいことから考えないものとする。パイプテントに作用する力を $Y-Z$ 平面、 $X-Z$ 平面に投影したものをそれぞれ図2、図3に示す。なお、図中の各パラメータは以下の通りである。

$$C_{FYZ} = \sqrt{C_{FY}^2 + C_{FZ}^2}, C_{FXZ} = \sqrt{C_{FX}^2 + C_{FZ}^2} \quad (3)$$

$$\tan \beta = \frac{C_{FZ}}{-C_{FY}}, \tan \gamma = \frac{C_{FZ}}{C_{FX}} \quad (4)$$

$$L_X = \frac{C_{MX}H}{C_{FYZ}}, L_Y = \frac{C_{MY}H}{C_{FXZ}} \quad (5)$$

C_{FYZ} 、 C_{FXZ} は合成風力係数、 β 、 γ は合成風力係数の傾き、 L_k はテント中心からの作用距離である。 H 、 B 、 D は実スケールのものとし、 m_t 、 m_{wl} については5章で述べる。これより、 l 軸における転倒モーメント M_l は次式で評価され、それらを風向角毎に並べたものを図4に示す。

$$M_{X'} = \frac{1}{2} \rho V^2 B D C_{FZY} \left(L_X + \frac{B \sin \beta}{2} \right) \quad (6)$$

$$M_{Y'} = \frac{1}{2} \rho V^2 B D C_{FZX} \left(L_Y + \frac{D \sin \gamma}{2} \right) \quad (7)$$

ただし、 ρ は空気密度であり、風速 V は実スケールの旋風の代表風速として 20m/s とする。グラフより風向角 $0^\circ \sim 25^\circ$ では転倒モーメントの値が負となり、転倒が起きないことが示唆される。

5. 必要重石質量の推定

図2、3における m_t はパイプテントの質量であ

り、 80kg と仮定する。また、 m_{wl} は l 軸まわりの転倒における必要重石質量であり、 l 軸まわりのモーメントの釣り合いを考えることで求められる。風向角ごとの m_{wl} を図5に示す。なお、必要重石質量が負の値となったものは 0kg とする。グラフより、風向角 50° にて転倒が最も起こりやすく、その際の旋風の代表風速 20m/s に対する必要重石質量は 11.9kg であることがわかる。

6. おわりに

旋風によってパイプテントに作用する風荷重の基礎的な評価を行い、旋風の代表風速に対してパイプテントが飛ばないように必要最低限の重石の質量を推定した。今後の課題としては、接近風をより旋風に近いものとするのが挙げられる。

参考文献

- [1] 立川正夫, 出口清孝, “塵旋風; 運動会を襲う,” 日本風工学会誌, vol. 1987, no. 31, pp. 13-16, 1987.
- [2] 西村宏昭, 高森浩治, 丸山 敬, “大型テントの壁面閉鎖による風荷重の増加,” 日本風工学会論文集, no. 121, pp. 95-102, 2009.

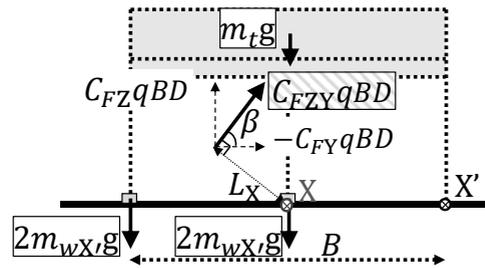


図2 パイプテントに作用する力(Y-Z平面投影)

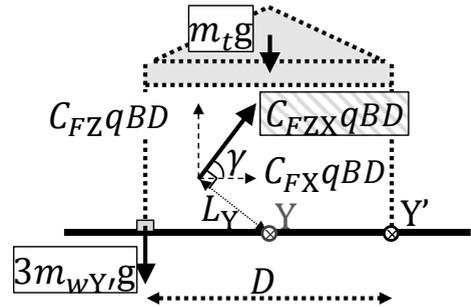


図3 パイプテントに作用する力(X-Z平面投影)

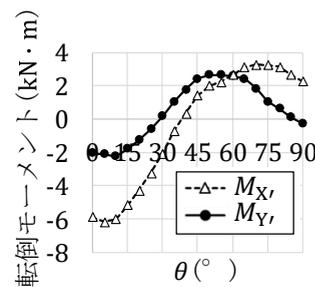


図4 風向角毎の転倒モーメント

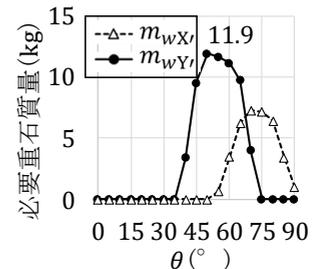


図5 風向角毎の必要重石質量