

日本型竜巻の新しい工学的竜巻モデルの開発

東京工芸大学 ○金容徹 1*
重慶大学 田村幸雄 2**

工学的竜巻モデル 半径方向分布 鉛直方向分布
垂直応力度 準定常仮定 飛散特性

研究の目的

本研究の目的は、初年度に日本型竜巻の新しい工学的竜巻モデルを開発し、次年度にそれによる低層・高層建物における荷重効果および飛来物の飛散特性を明らかにすることである。

研究の内容

(1) 工学的竜巻モデルの提案(2019年度)

初年度には竜巻に関するこれまでの知見を十分に反映した1セル型の工学的竜巻モデルを提案した。

$$\bullet \text{ 半径風速: } \bar{U} = -\frac{2\bar{r}}{1+\bar{r}^2} \frac{1-\bar{z}^2}{(1+\bar{z}^2)^2} \quad (1a)$$

$$\bullet \text{ 接線風速: } \bar{V} = \frac{C\bar{r}^{2\alpha-1}}{(1+\bar{r}^2)^\alpha} \frac{\bar{z}^\alpha}{(1+\bar{z}^2)^\alpha} \quad (1b)$$

$$\bullet \text{ 鉛直風速: } \bar{W} = \frac{4\zeta}{(1+\bar{r}^2)^2} \frac{\bar{z}}{1+\bar{z}^2} \quad (1c)$$

ここで、 U, V, W は半径、接線、鉛直風速、 r と z は半径と高さ、 $\zeta = z_{ref}/r_{ref}$ 、 C と α は係数で、 $C=4$ 、 $\alpha=1$

式(1)の風速成分はすべて基準風速 U_{ref} で、半径は基準半径 r_{ref} で、高さは基準高さ z_{ref} で無次元化されている。半径風速は $r = r_{ref}$ と $z = 0$ で絶対値の最大値が、接線風速は $r = r_{ref}$ と $z = z_{ref}$ で最大値が、鉛直風速は $r = 0$ と $z = z_{ref}$ で最大値があらわれる。なお、半径方向及び高さ方向の分布を明確に示している。

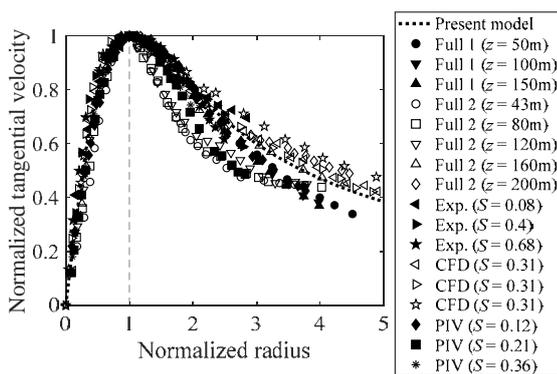


図1 提案モデルと既往文献との比較(接線風速の場合)

図1に提案モデルの接線風速と既往の実験、数値解析及び実測結果との比較を示す。接線風速と半径は最大接線風速と最大接線風速があらわれた半径で無次元化した。

点線で示した提案モデルは既往の実験、数値解析及び実測結果とよく一致していることが分かる。ここで示していないは、他の風速成分に関しても同じである。

(2) 低層・高層建物における荷重効果の評価(2020年度)

低層建物における荷重効果は柱に発生する垂直応力度で評価した。竜巻の特性に関しては日本でよく発生する過去の研究に基づいて、基準風速は $U_{ref} = 65$ m/s、移動速度は $U_{mov} = 15$ m/s、基準半径と基準高さは $r_{ref} = 50$ m と $z_{ref} = 50$ m と設定した。図2に既往の工学的竜巻モデルによる最大垂直応力度と修正ランキンモデルによる最大垂直応力度との比を示した。図2から分かるように、提案モデルによる最大垂直応力度はバガス-ロットモデル、クオーウェンモデル、フジタモデルと同程度の値を示しており、修正ランキンモデルの約80%となる。ベイカーモデルは修正ランキンモデルの約20%に過ぎず大変小さな値を示す。

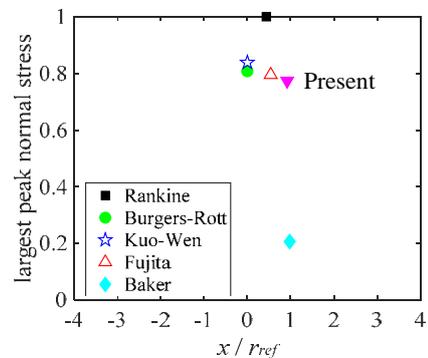


図2 最大垂直応力度の比較

次に、竜巻により高層建物に働く層風力を準定常仮定に基づいて評価した。竜巻は高層建物の中心を通過すると仮定しており、低層建物の計算で用いた竜巻と同じ特性を持つ竜巻を想定した。図3に最大層風力係数の比較を示す。工学的竜巻モデルにより最大層風力係数があらわれる高さが異なることに注意をされたい。クオーウェンモデルの C_{FX} が一番大きく、バガス-ロットモデルと提案モデルの C_{FX} は同程度である。 C_{FY} の場合、修正ランキンモデルとクオーウェンモデルが大きな値を示しており、バガス-ロットモデルは最小値を示す。提案モデルの最大

層風力係数は他モデルと比べると中間程度の値を示す。なお、ベイカーモデルの最大値は他モデルより大変大きくなる(平均的に約 19 倍)。

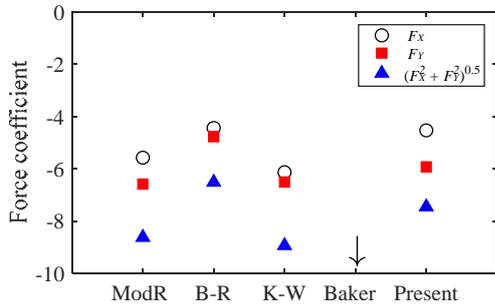


図 3 最大層風力係数の比較(ベイカーモデル, $C_{FX}: -110.6, C_{FY}: -98.7$)

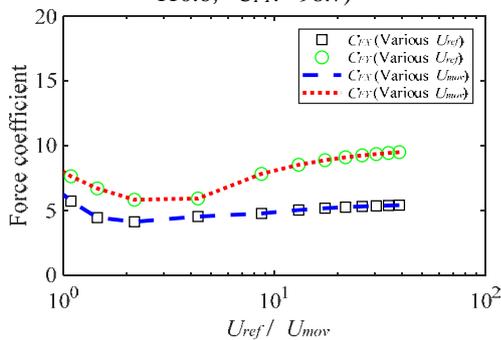


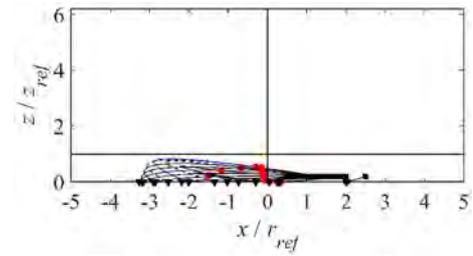
図 4 無次元速度(U_{ref}/U_{mov})の影響(提案モデル)

図 4 は最大層風力係数に与える基準風速と移動速度の比(無次元風速, U_{ref}/U_{mov})の影響を示したものである。図 4 から分かるように層風力係数は、個別の変化と関係なく、無次元風速が同じであれば層風力係数は同じ値を示すことが分かる。即ち、基準風速と移動速度の個別の影響よりもそれらによる無次元風速の影響がより重要であることを示唆する。ここには示していないが、基準半径と基準高さの影響は小さい。

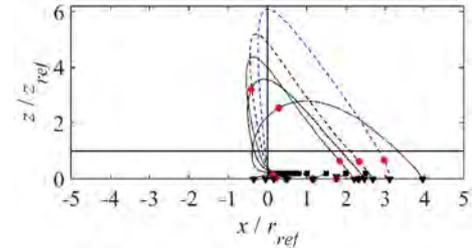
(3) 飛来物の飛散特性の評価(2020 年度)

提案モデルによる飛来物の飛散特性を明らかにすることを目的として、耐竜巻設計でよく用いられる修正ランキンモデルと提案モデルによる飛散特性を検討した。

図 5 は計算結果の一例で、飛来物が竜巻進路の延長線上にあるときの X-Z 平面(水平線-高さ平面)における飛散軌跡である。修正ランキンモデルは無次元高さ 1 以下で飛散し、無次元半径が約 1.1 で最も高く飛散することがわかった。それに対し、提案モデルは無次元高さ 6 付近まで飛散し、飛来物が竜巻中心に近いときに最も高く飛散することがわかった。これは、提案モデルでは、竜巻の中心に存在する上昇気流の影響を強く受けることからである。



(a) 修正ランキンモデル



(b) 提案モデル

図 5 X-Z 平面における飛散軌跡

研究の成果、新知見

- ① 提案モデルは半径方向及び高さ方向に風速分布を明確に示しつつ、多くの工学的竜巻モデルと同程度の荷重効果をもたらすことが分かった。
- ② 層風力係数は基準風速や移動速度の個別の変化と関係なく、無次元風速が同じであれば層風力係数は同じであることが分かった。
- ③ 最大水平速度の場合、提案モデルは修正ランキンモデルの約 75%、最大衝撃荷重は約 56%に相当する。
- ④ 修正ランキンモデルの場合飛来物は規則正しく飛散するが、提案モデルの場合飛来物が竜巻の中心に近いときに飛散することが分かった。これは、竜巻の中心に存在する上昇気流の影響を強く受けることからである。

今後の予定

竜巻による荷重を評価する際には、風速成分による風圧力、竜巻に伴う気圧低下、そして飛来物による衝撃荷重を考慮する必要がある。本研究では、風速成分による風圧力と飛来物による衝撃荷重を評価した。今後の予定としては、竜巻に伴う気圧低下まで考慮して、総合的に荷重効果を評価することにより、耐竜巻設計の整備に必要な技術的な知見が提供できるように進めたい。なお、米国等でよく発生する 2 セル型の竜巻に関しても新しい工学的竜巻モデルが提案できるように研究を続けいきたい。

謝辞

本研究は一般財団法人大成学術財団から助成を受けたものである。なお、実験に参加した学生に深く謝意を表す。

*東京工芸大学大学院・教授

**重慶大学土木大学院・教授

* Tokyo Polytechnic University・Professor

**Chongqing University・Professor