資 料

マルチファン型非定常気流風洞装置の紹介 Introduction of Multi-fan Unsteady Flow Wind Tunnel

飯田有未^{*1}

Yumi IIDA

染川大輔^{*1}

Daisuke SOMEKAWA

1. はじめに

建築物の耐風設計は、建築物の大型化・高層化に伴い設計過程において重要なウエイトを占めるようになってきた。以来、風荷重の評価の精緻化・高度化が進められてきているが、未だに強風イベント発生時の風による被害は後を絶たない。

建築物の強風被害の中で最も多いものは外装材の被害である。外装材の被害は、瞬間的に生じる風圧が原因となる可能性が指摘されている¹⁾が、時間的、空間的に変化の大きい、すなわち非定常な風速変動が外装材の風荷重に与える影響について検討している研究は少ない。これは現在一般的に使用されている境界層風洞では、非定常な風速変動を再現できないことに起因すると思われる。

図1 竜巻による被害(2006年北海道佐呂間町)

またSNSの浸透によって、竜巻やダウンバーストといった局地的な突風現象による被害や観測事例が増加している(図1)。たとえば、2012年に茨城県つくば市等で発生した3つの竜巻による災害では死傷者50人以上の人的被害、2000棟以上の建物被害が生じた²⁾。近年では2019年の千葉県市原市、宮崎県延岡市で台風に伴い生じた竜巻により構造物に被害が生じている。

こうした状況のもと、従来の境界層風洞では再現できない非定常な風速変動や、局地的な強風現象を再現するためにエッフェル型の風洞を新設した。本報告では、新設した風洞の特徴および性能の概要を報告する。

2. マルチファン型非定常気流風洞装置の概要

2.1 マルチファン型非定常気流風洞装置

新設した装置は、時間的・空間的に大きな変化を伴う瞬間的な風の再現を可能とした「マルチファン風洞装置」、竜巻状およびダウンバースト状気流を再現する「竜巻発生装置」、「ダウンバースト発生装置」の3種類の装置によって構成され、それらを独立あるいは組み合わせて使用することができる。総称として「マルチファン型非定常気流風洞装置」と呼んでいる。装置の概要を図2および図3に示す。

風路の断面寸法は1.5m×1.5mであり、風路の長さは10mである。風路上部に沿ってレールが設置されており、竜巻発生装置またはダウンバースト発生装置を取り付け、

^{*1} 大林組技術研究所 研究員 iida.yumi@obayashi.co.jp
Technical Research Inst. of Obayashi Corp.

自走させることが可能である。自走範囲は風路中央から約±3.7mの範囲で、最大2m/sの速さで移動する。

2. 2 マルチファン風洞装置

マルチファン風洞装置は複数の小型ファンと風路によって構成される(図4, 図5)。直径240mmの小型ファンを、縦方向と横方向に9台ずつ、計81台配置している。小型ファンの制御回転数(以下、ファン回転数)は0~50Hzであり、正方向あるいは逆方向に回転することができ、正転時の最大風速は約10m/sである。各ファンの回転数をそれぞれ独立して制御することが可能で、風路内に時間的・空間的に変化する気流を発生させることができる。

2. 3 竜巻発生装置

竜巻の風速分布モデルとして一般的なランキン渦モデルを再現するアイオワ州立大学の竜巻状気流発生装置(以下、ISU型装置³⁾)と同様の機構の装置を導入した。竜巻発生装置の概観を図6(a)に、本体の断面図と座標軸の定義を図7に示す。外形と送風機の直径はそれぞれ約1.5m, 0.5mである。ガイドベーンは18枚配置され、0~70°の範囲で設定可能である。これにより下降流には強制的に旋回性状が与えられ、その気流をファンによって

吸い上げることで竜巻状の気流を再現する。吸込口から床面までの距離である収束層 h_0 は175mm~1,860mmの範囲である。収束層とは積乱雲直下の地表付近を示し、この範囲に竜巻が再現される。ファンの回転数は1~3,000rpmの範囲で変えることができる。最大風速は約10m/sである。なお、本装置によって縮尺率1/100程度の竜巻を再現できる。また検討の対象とする竜巻の風速は最大風速80m/s程度(藤田スケール3程度)を想定している。

2. 4 ダウンバースト発生装置

ダウンバースト発生装置の概観を図6(b)に、本体の断面図と座標軸の定義を図8に示す。ファンによる強い気流が送風口から吹き降ろされ、風路の床面に衝突することで、地表に衝突するダウンバーストの下降噴流が模擬される。送風口の直径は1mである。ファンの回転数は1~2000rpmの範囲で、送風口から床面までの距離は10mmから1,883mmまで変えることができる。最大風速は約10m/sである。なお、本装置によって縮尺率1/1000程度のダウンバーストを再現できる。また検討の対象とするダウンバーストの風速は最大風速66m/s程度(藤田スケール2程度)を想定している。

図2 マルチファン型非定常気流風洞装置

図3 マルチファン型非定常気流風洞装置

図4 マルチファン風洞装置 立面図

図5 マルチファン風洞装置

図7 竜巻発生装置 断面図

(a) 竜巻発生装置 (b) ダウンバースト発生装置

図6 竜巻・ダウンバースト発生装置

図8 ダウンバースト発生装置 断面図

3. 実験装置の性能

3. 1 マルチファンによる風速変動

(1) 実験概要

装置の構成要素の一つであるマルチファンによる風速変動の再現性を確認するため、ファンの回転数を正弦波状に変化させ、風速測定を行った。

熱線風速計(I 型プローブ)を用い、風路の風上端部を $x=0$ (図4)として $x=2,700\text{mm}$ 、高さ 200mm の位置で測定した。ファンの回転数は周期4秒で $0\sim 50\text{Hz}$ の範囲で変化させ、サンプリング周波数は 500Hz 、計測時間は60秒とした。

(2) 実験結果

風速とファンの回転数の出力値の時系列データを図9に示す。得られた風速は、 0m/s まで下がることはないが、ファン回転数の増加・減少に概ね追従する結果となった。風速とファン回転数の時系列データの無次元パワースペクトル密度を図10に示す。どちらのピークも 0.25Hz 付近で生じており、この周期での風速変動をマルチファンにより再現できることが確認できた。

図9 風速とファン回転数出力値の時系列データ

図10 無次元パワースペクトル密度

3. 2 竜巻状気流の風速測定

(1) PIV について

一般に気流の測定に用いられる熱線風速計は測定できる風向が限定されるため、風向変化が大きい竜巻状気流の測定は難しい。そこで、3次元PIV(Particle Image Velocimetry, 散布された微細泡の動きの可視化により風速を測る装置)を導入した。ヘリウムガスを含むバブルを発生させる粒子発生装置、光源となるLEDライトと4台のハイスピードカメラを図11および図12に示す位置に設置し測定を行った。撮影は解像度1,024×1,024pixelで行い、可視化範囲は図11の斜線の範囲とした。これにより、最小で0.6mm毎(1pixelあたり0.6mm程度)に風速値を得ることができる。

(2) 実験概要

竜巻発生装置はガイドベーンを 50° 、収束層 h_0 を600mmと設定した。装置内のファン回転数は1,000Hzとした。測定における x , y , z 軸の定義を図11に示す(z 軸は紙面の手前向き)。ここでは竜巻装置中央位置を $(x, y)=(0, 0)$ とし、 x , y , z 軸方向の風速成分をそれぞれ u , v , w とする。サンプリング周波数を2kHzとし4,000枚の画像(2秒間)を取得した。これを3セット行った。

(3) 実験結果

PIVで得られた各粒子の動きと移動速度のスナップショットを図13に示す。粒子群の輪郭が漏斗状の形状となっている様子が3次元的にとらえられており、各粒子の風速と風向もあわせて取得することができた。

得られた風速比(接線風速/最大接線風速)について既往の実験および野外観測値^{4),5)}との比較を図14に示す。ここで示す結果は3セットのアンサンブル平均値であり、 $y=0$ mm(竜巻中央部)、 $z=50$ mmの x 軸上の平均速分布を示している。縦軸は接線風速の最大値、横軸は竜巻中心から最大風速発生位置までの距離 R_{max} で無次元化してある。なお、本実験の R_{max} は約100mmである。PIVで得られた竜巻状気流の風速比は、既往の研究の竜巻装置および実測による風速比とよく一致している。

平均風速の $y=0$ mm(竜巻中央部)における $x-z$ 断面分布を図15に示す。風速 v では $x=-100$ mmと100mm付近に最小(負値)・最大(正值)風速が生じており、気流が上から見て反時計回りに旋回していることが分かる。風速 w では同じ $x=-100$ mm, 100mmの位置で上昇気流が見られた。これは竜巻に類似した旋回上昇気流を表しており、旋回流の中心付近では弱い下降気流となっていることなど、竜巻に見られる特徴が表れている。以上より本装置によって竜巻状の旋回流が再現できると言える。

図11 PIV計測状況

図12 ハイスピードカメラの設置状況

図13 PIVによる風速計測結果のスナップショット

図 14 既往の実験・実測の風速比との比較

図 15 平均風速分布(x-z 断面)

4. おわりに

今回新設した「マルチファン型非定常気流風洞装置」について、装置の概要と基本的な性能確認のための実験結果について報告した。

この装置の導入によって、これまで実験的な検証が難しかった風向・風速が変化する現象などについて検討していくことが可能になっただけでなく、3次元のPIVを併用することで数値解析によって得られた風速分布の比較が可能となった。これにより、数値解析技術の向上にも寄与できるものと考えている。そうした成果によって、強風による被害低減につなげていきたいと考えている。

最後に、本装置の計画にあたり、貴重なご助言を頂いた宮崎大学の宮城弘守助教、国土技術政策総合研究所の喜々津仁密氏に厚く御礼申し上げます。

参考文献

1) 喜多村 美保, 友清 衣利子, 前田 潤滋, 「構造物被害

に及ぼす風速変動特性の影響」, 第18回風工学シンポジウム論文集, pp 187-192, (2004)

- 2) 気象庁, 「竜巻等の突風データベース」, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/>, (2020.10)
- 3) F. Haan, P. Sarkar, W. Gallus., “Design, construction and performance of a large tornado simulator for wind engineering applications”, Engineering Structures, Vol. 30, Issue. 4, pp. 1146-1159, (2008)
- 4) 喜々津 仁密, 奥田 泰雄, 河井 宏允, 神田 順, 「竜巻通過時に低層建築物に作用する風力特性に関する実験的研究」, 第22回風工学シンポジウム論文集, pp 209-214, (2012)
- 5) H. Hu, Z. Yang, P. Sarkar, F. Haan, “Characterization of the wind loads and flow fields around a gable-roof building model in tornado-like winds”, Experiments in Fluids 51(3), pp 835-851, (2011)