強風下での平板状物体の初期飛散状況に及ぼす固定力の影響に関する研究

近藤　潤一

１．序

構造物の強風被害は直接的な風圧力による構造骨組みや外装材の被害の他に，強風下で生じる飛散物の衝突による深刻な被害が少なくない．数値実験を用いた飛散物の運動に関する研究は数多い[1),2)]が，立川の研究[1)]のような風洞実験でその性状を検証した例は少ない．Lin ら[3),4)]は電磁石を利用して試験体の固定度を制御した飛散実験を行い，Brent ら[5)]は切妻屋根模型の棟部付近に屋根葺材を想定した試験体を電磁石で固定し，風洞内に乱れを再現して飛散実験を行った．実際の屋根葺材などは釘やボルトで構造躯体に固定されており，それらの固定力を高精度に制御するのは容易ではない[6)]．上述の磁力を利用する方法では，一般に残留磁気が残る電磁石の特性が釘などの固定力を高精度に再現することを難しくしている．本研究では，まず平板状試験体の固定方法にエアパッド吸着装置を用いた手法を開発し，本吸着装置の性能の検証を行った．次いで，開発した吸着装置を風洞実験に適用し，試験体の固定力を種々変化させることで，平板状物体の初期飛散状況に及ぼす固定力の影響を明らかにした．

２．エアパッド吸着装置の固定力の再現精度に関する確認実験

2.1 エアパッド吸着装置

エアパッド吸着装置の概要を図１に示す．本装置は 1.3×10^{-6} 気圧（$=1.3\times10^{-4}$kPa）まで吸引可能な真空ポンプ，エア圧力調整器，電磁弁，エア圧力表示計及び直径 20mm のエアパッドから構成されている．試験体に作用する吸着力はエア圧力調整器で制御し，エア圧力は 0.1kPa 単位で調整した．また，コントロールボックスによって吸着力の ON/OFF を手動で制御することができる．

2.2 確認実験結果

エア圧力調整器でエア吸引量を調整し，本システムが再現性の高い吸着力を発揮できるかを確認した．圧力吸引量と発揮した吸着力の関係を図２に示し，各吸着力での平均値及び平均値に対する吸着力の標準偏差をばらつきの指標として表１に示す．ただし，図２に示す圧力吸引量は大気圧との差圧を指す．吸着力のばらつきの程度を確認するために，各圧力吸引量に対して５回の試行を行った．図２及び表１を見ると，真空

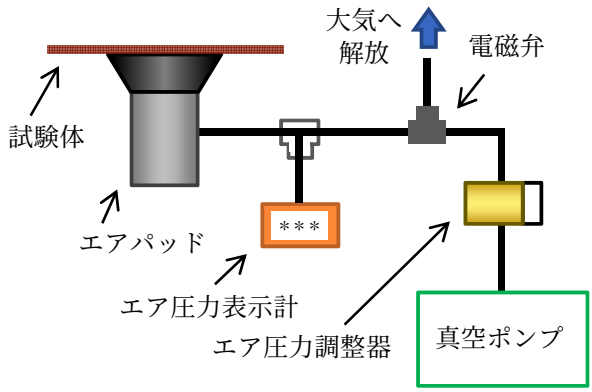


図１　エアパッド吸着装置の概要

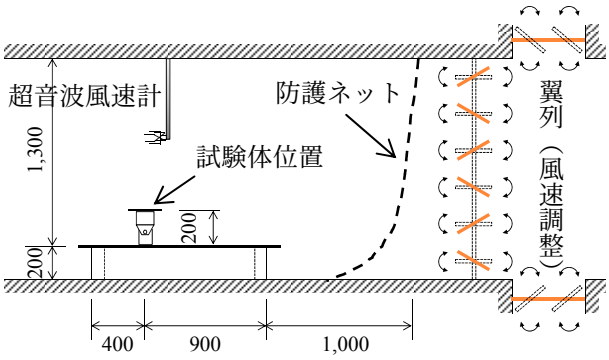


図３　風洞実験配置図（単位[㎜]）

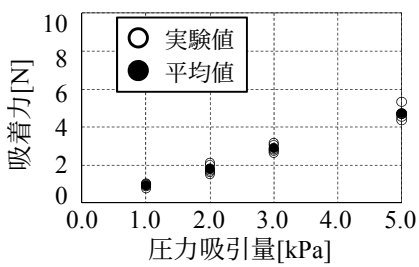


図２　圧力吸引量と吸着力の関係

表１　エアパッド吸着力の実験結果

	圧力吸引量[kPa]			
	4.0	6.0	10.0	15.0
吸着力の平均値[N]	1.1	1.7	3.3	4.7
標準偏差／平均値	0.10	0.05	0.06	0.07

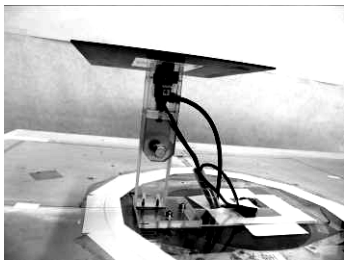


写真１　試験体設置の様子

ポンプの圧力吸引量にかかわらず安定した吸着力を再現しており，圧力吸引量と吸着力の関係はほぼ線形関係であることがわかる．また，吸着力の平均値に対する標準偏差の割合はおよそ 10%以下であり，安定した吸着力を示すことを確認した．以上の結果とエアパッドの開口面積から本装置の固定力を算出した．

３．風洞実験概要

3.1 実験装置と試験体概要

上記エアパッド吸着装置を用いて，正方形平板状試験体の飛散実験を実施した．風洞は九州大学大学院人間環境学研究院のエッフェル型吸込式風洞を用いた．同風洞は試験体の設置位置の下流に水平方向に設置した６枚の翼列の角度を調整することで，風速の微調整が可能である．風洞断面内での各計測機器の配置状況を図３に示す．計測部断面寸法は 1500mm×1500mm，計測部前面の風速調整部は 2000mm である．エアパッドに印加する圧力吸引量をエア圧力表示計で，また風速値を超音波風速計で計測した．なお，圧力吸引量及び風速の各電圧信号を 200Hz でサンプルした．

平板状試験体には，屋根瓦を模擬して一辺 200mm，厚さ 2mm，重さ約 100g の正方形アクリル板を使用した．この模型を固定するための治具を風洞床面から 200mm 離れた端板面に設置して実験を行った．試験体を風洞内に設置した様子を写真１に示す．

3.2 測定方法と実験パラメータ

測定は風洞下流部の翼列を閉じた状態から開始し，翼列の角度を調整して風速を徐々に大きくし，試験体がエアパッドから離れる瞬間を目視により確認した．

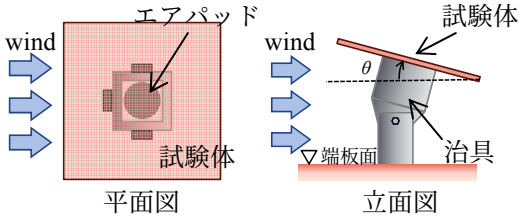


図４　試験体の設置概要

試験体の設置角度 θ は図４に示す方向を正として変化させ，エアパッドから試験体が離れた後の風速を飛散開始風速, 試験体から離れる前の吸着力を固定力とし，設置角度と以下に示す固定度をパラメータとして実験を行った．

Wills ら[7]は強風下で物体が飛散する状況をモデル化するために，ある固定力で取り付けられている物体の飛散の条件式を固定度 I を用いて定義している．本研究では，平板状試験体の設置角度 θ が変化した時の固定度 I を次式のように定義し，実験を行った．

$$\text{固定度} I = \frac{\text{固定力} + mg\cos\theta}{mg} \tag{1}$$

ここに，m：物体の質量，g：重力加速度である．

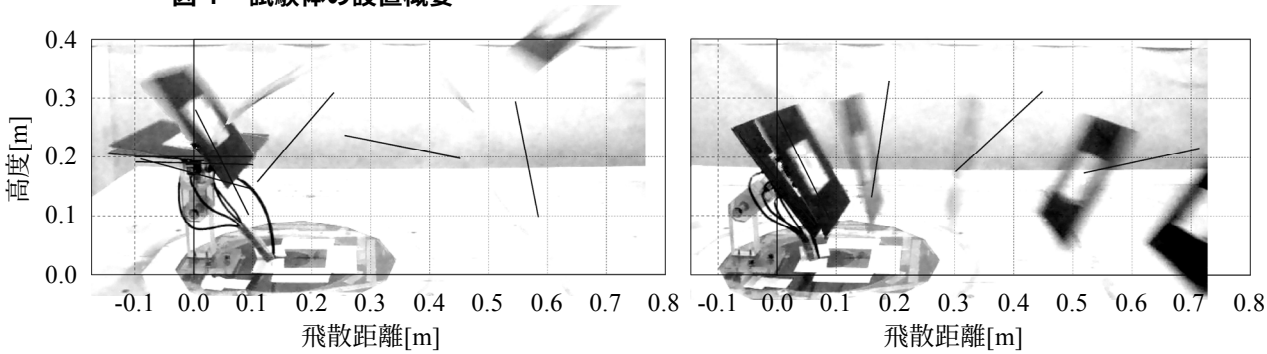
４．風洞実験と数値実験による飛散物の運動軌跡

4.1 飛散シミュレーション概要

立川の研究[1]を参考に，矩形体が一様な風速場の中を飛散する場合の二次元 xz 鉛直平面内の運動をシミュレートした. 運動方程式の解法にはルンゲ・クッタ・ギル法を用い，計算時間刻みは試験体の飛散の様子を撮影したハイスピードカメラの撮影フレーム数の 1/5（=600Hz）に合わせた．なお，飛散シミュレーションで用いる矩形体の諸元は 3.1 節で示した試験体と一致させ，シミュレーションで用いた風速は風洞実験で得られた試行回数５回の飛散開始風速の平均値とした．

4.2 風洞実験結果と飛散シミュレーション結果の比較

一例として，固定度６で設置角度 0 度の場合の風洞実験結果と飛散シミュレーション結果を図５(a)に併せて示し, 固定度６で設置角度 50 度の場合の結果を同図(b)に示す．なお，図５(a)(b)の飛散シミュレーションで用いた風速はそれぞれ 11.6m/s と 12.1m/s であり, 同図に示す試験体の運動軌跡は動画及び計算サンプルを 0.05sec（=20Hz）間隔に間引いたものである．図５(a)(b)で風洞実験と飛散シミュレーションの結果を比較すると，飛散シミュレーションは概ね風洞実験を追跡でき



(a)設置角度 0 度，固定度６の場合　　(b)設置角度 50 度，固定度６の場合

図５　風洞実験と飛散シミュレーションの比較

ている．しかしながら図５(a)の場合，風洞実験では試験体が上方に浮き上がっているのに対し飛散シミュレーションではほとんど浮き上がりが見られない．これは，飛散シミュレーションでは試験体を支持する治具を考慮していないため，シミュレーションでの飛散開始直後に物体が落下方向に加速することが原因であると考えられる．同図の飛散中の回転角度に注目すると，シミュレーション結果の方が飛散中の回転速度が遅い．同図(b)の場合，試験体の浮き上がりや飛散距離は概ね追跡できている．しかし，シミュレーション結果の方が飛散中の回転速度が速く，同図(a)のサンプルと異なる傾向を示している．これは，矩形体を固定している治具の影響，もしくは風洞実験とシミュレーションの風力係数の差異が原因であると考えられる．

５．陸屋根模型屋根面に位置する平板状物体の飛散実験結果

5.1 試験体及び陸屋根模型概要

本実験で使用した試験体は，一辺 65mm，厚さ 2mm，重さ約 11g の正方形アクリル板である．この試験体を奥行きが異なる三種類の陸屋根模型（幅 200mm×壁面高さ 200mm×奥行き 200mm，400mm 及び 1500mm）の風上屋根面に設置して実験を行った．陸屋根模型に対する試験体の設置位置を図６に示す．以下では，奥行き 200mm，400mm 及び 1500mm の陸屋根模型をそれぞれ小模型，中模型及び大模型と記す．一例として，中模型を風洞内に設置した様子を写真２に示す．

5.2 固定度が初期飛散状況に及ぼす影響

小模型に試験体を設置した場合で，目標とした固定度と発現した固定度の関係を図７に示す．目標とする固定度の大きさに関わらず，安定した固定力が得られていることがわかる．

小模型に試験体を設置した場合の浮き上がり風速及び試行回数５回の飛散開始風速の平均値を図８に示し，一例として固定度３と６の場合の試験体の運動の様子をそれぞれ図９(a)と(b)に示す．なお，図９(a)と(b)の最も左の図は浮き上がり風速に達した時の試験体の様

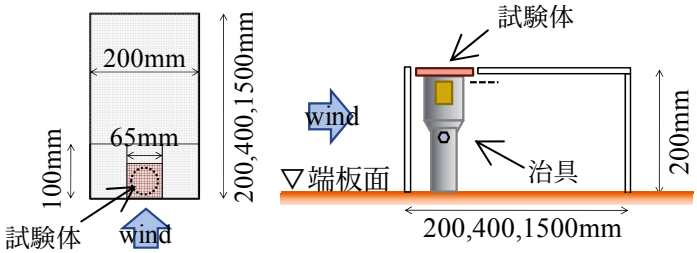


図６　試験体の設置状況概要図

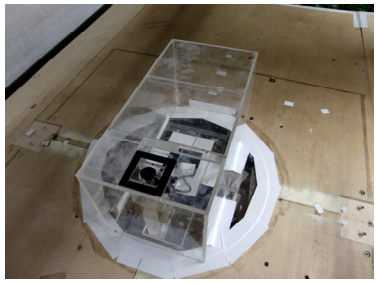


写真２　風洞内に中模型を設置した様子

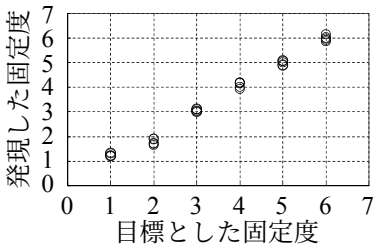


図７　目標固定度と発現固定度（小模型に試験体を設置した場合）

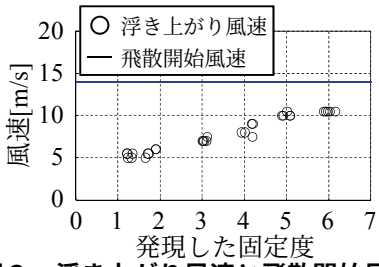


図８　浮き上がり風速と飛散開始風速（小模型に試験体を設置した場合）

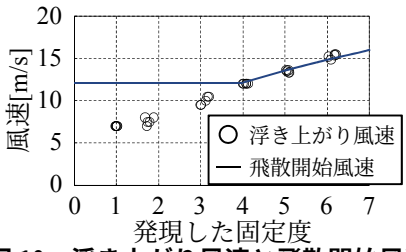
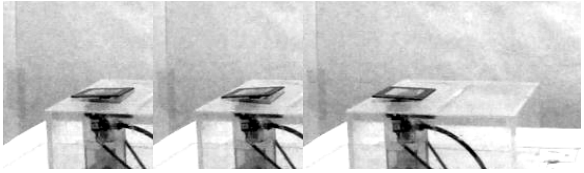
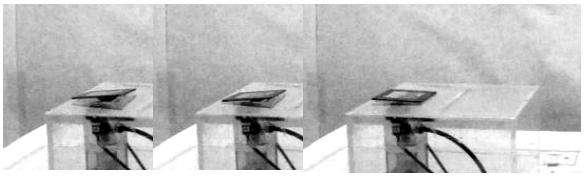


図 10　浮き上がり風速と飛散開始風速（大模型に試験体を設置した場合）



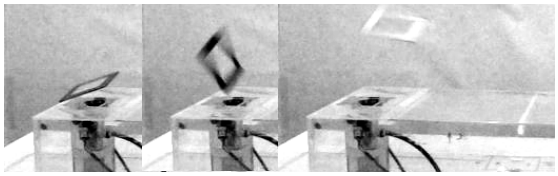
(a)固定度３の場合



(b)固定度６の場合

図９　試験体の運動の様子（小模型）

(a)固定度３の場合



(b)固定度６の場合

図 11　試験体の運動の様子（大模型）

子である．同様に大模型に試験体を設置した場合の浮き上がり風速及び飛散開始風速を図 10 に示し，固定度３と６の場合の試験体の運動の様子をそれぞれ図 11(a)と(b)に示す．なお本実験では，試験体がエアパッドから浮き上がった瞬間の風速を「浮き上がり風速」，試験体が遠くまで飛散する風速を「飛散開始風速」と記す．図８及び図 10 を見ると，浮き上がり風速は固定度の平方根に比例していることがわかる．しかし，小模型に試験体を設置した場合，本実験範囲では飛散開始風速は浮き上がり風速より常に大きく，浮き上がり風速時の試験体の様子を示した図９(a)(b)を見ても，試験体を設置した位置で試験体がわずかに動いているだけである．図 10 を見ると，大模型に試験体を設置した場合，固定度４以上で浮き上がり風速と飛散開始風速が等しくなる．つまり，固定度４以上で大模型に試験体を設置した場合，エアパッドから試験体が離れた瞬間，試験体は遠くまで飛散することを示しており，図 11(b)を見ると，試験体がエアパッドから浮き上がり，その後遠くまで飛散していることが確認できる．

5.3 模型サイズが初期飛散状況に及ぼす影響

試行回数５回の浮き上がり風速の平均値及び飛散開始風速の平均値を陸屋根模型の大きさごとに図 12 に示す．図 12 を見ると，陸屋根模型が大きいほど浮き上がり風速が大きくなる傾向が見られる．そのため，図９(b)と図 11(b)で比較すると，大模型に試験体を設置した場合のみ，一旦，試験体がエアパッドから浮き上がると，試験体は遠くまで飛散したと考えられる．図 12 中の飛散開始風速に注目すると，固定度が小さい範囲では陸屋根模型が大きいほど飛散開始風速は小さいが，固定度が大きくなると陸屋根模型が大きいほど飛散開始風速は大きくなる．これは，屋根長さに対する試験体の大きさの割合が異なるので，屋根面上での剥離流のパターンが異なるためと考えられる．

６．まとめ

本研究では，外装材が構造躯体に取り付けられている状況を再現するために，エアパッド吸着装置を開発するとともに本装置を利用して風洞実験を実施した．風洞実験と数値実験で得られた初期飛散状況を比較したところ，以下の所見を得た．

1) 全てのサンプルにおいて試験体を支持している治具の影響が見られるが，設置角度や飛散中の風速の大きさに関わらず，サンプリング時間間隔に試験体が飛散する水平距離は概ね追跡できる．
2) 設置角度が大きいほど，シミュレーションの方が風洞実験結果より試験体の回転速度は大きくなる．しかし，設置角度が小さければ風洞実験の方が試験体の回転速度が大きくなる．

また，陸屋根模型風上屋根面に試験体を設置した場合の初期飛散状況を検討したところ，以下の所見を得た．

3) 試験体がエアパッドから浮き上がる瞬間の風速は，試験体の固定度の平方根に比例する．
4) 同じ固定力で試験体を取り付けた場合，陸屋根模型の風流れ方向の長さが長いほど，試験体の浮き上がり風速は大きくなる．

謝辞

本研究は平成 22 年度竹中育英会研究助成金の援助を受けました．ここに厚くお礼申し上げます．

参考文献

1) 立川正夫，福山雅弘：強風による物体の飛散経路について，日本建築学会大会学術講演梗概集，第 52 号，pp.953-954，1977.10
2) 近藤潤一，前田潤滋，竹内真弓，森本康幸：強風下での球状物体の飛散状況に及ぼす地表面粗度の影響に関する数値実験，風工学シンポジウム，第 21 回，pp.173-178，2010.12
3) Ning Lin, Chris Letchford, John Holmes：Investigation of plate-type windborne debris ― Part I. Experiments in wind tunnel and full scale，Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 94, pp.51-76，2006.1
4) J.D.Holmes, C.W.Letchford, Ning Lin：Investigations of plate-type windborne debris ― Part II : Computed trajectories，Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics，94，pp.21-39，2006.1
5) Brent T. Visscher, Gregory A. Kopp：Trajectories of roof sheathing panels under high winds，Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics，95，pp.697-713，2007.1
6) 松井正宏，田村幸雄：電磁解放センサを用いた建築物から飛散物が発生する状況の再現実験，風工学シンポジウム，第 21 回，pp.119-124，2010.12
7) J. A. B. Wills, B. E. Lee, T. A. Wyatt：A model of wind-borne debris damage，Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics，90，pp.555-565，2002.5

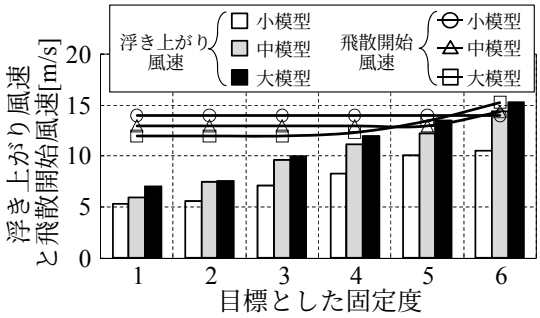


図 12　浮き上がり風速と飛散開始風速