

軌道面付近に敷設された平板状設置物の 風洞試験による風荷重評価

中野 高志* 佐久間 豊* 井上 達哉*
湊 卓也** 小林 裕太郎** 小俣 茂**

Assessing Aerodynamic Force of Flat Plate Object Installed on Railway Track by Wind Tunnel Test

Takashi NAKANO Yutaka SAKUMA Tatsuya INOUE
Takuya MINATO Yutaro KOBAYASHI Shigeru OMATA

A flat plate for ballast stabilization has been newly developed for laborsaving in a process of removing and laying ballast in place of chemical agents distributed over track ballast. The risk of the plate going up into the air by natural strong wind should be assessed for safety. First, the small- and the large-scale wind tunnel tests are done to measure the aerodynamic forces acting on the plate. Second, this study assesses the risk of the plate flying away when they are exposed to the wind at estimated maximum speed using the tunnel test results. As a result, the risk is low, and the plates have sufficient anti-wind performance against natural strong wind.

キーワード：道床安定化，風洞，PIV，空気力係数，飛散，リスクアセスメント

1. はじめに

道床形状保持プレート（以下，プレート）とは，温度上昇期～酷暑期に軌道の張出しを防止する道床安定剤の代替として検討中の，道床肩部およびのり面に設置するプレートである。図1にプレートの外観を示す。プレートの特徴として，道床と密着しやすいように下面（道床と接する面）は不規則な凹凸で構成される砕石形状となっている。そのため，プレートをバラスト上に設置して，プレート上面から振動を与えれば，プレートの最大厚さ約40mmのうち，半分の約20mmがバラストに噛み合う。プレートの質量は22kgあり，容易には動かないことで，バラストの形状が保持される。さらに上面，下面の圧力差による揚力を低減するため，複数の長孔が設けられている。一方敷設にあたっては，台風や竜巻等の異常気象を想定し，強風による飛散の可能性を検討する必要がある。正常に施工されていれば飛散の可能性は低いと推測されるものの，何らかの原因で不良施工状態となり，正常施工時よりプレートが高い位置にあったり，風をはらむ方向に角度を持った場合，プレートが飛散する可能性が高まる。よって高さ，角度と飛散の可能性の関係について定量的に把握することが安全性を高めるために重要である。プレートは新規開発品であるため，プレートの高さ，角度を変更して体系的に飛散の可能性を調査した研究は，調査した範囲では存在しなかった。そこで飛散の可能性の評価のため，風洞試験を実施した。

まず本研究ではプレートに対して1/4スケールの縮尺模型（以下，供試プレート）を用いて小型風洞試験を行い，供試プレートまわりの風速分布および風荷重を測定した。小型風洞試験は大型風洞試験と比較して試験の手間，コストは大幅に少ないことから，小型風洞試験により飛散の可能性を適切に評価できれば便利である。また小型風洞試験では，大型風洞試験よりも比較的容易に風速分布の測定ができるため，供試プレートの空力特性について荷重，流れ場の両面から考察できる点も優れる。

しかし小型風洞試験では実物のバラストを使うことができないなどの制約があり，供試プレートの流れ場，風荷重が実物と異なる可能性がある。したがって，本研究では実験環境をより現場に近づけるため，実物スケールのプレート模型（以下，実物スケールのプレート模型もプレートと呼称する），実物のバラストを用いた大型風洞試験も実施して空気力を測定し，小型風洞試験と比較した。さらに，ある再現期間で現場で吹く可能性のある最大の風速を推定して，現場でプレートにかかると推定される最大荷重を算出し，飛散の可能性を検討した。

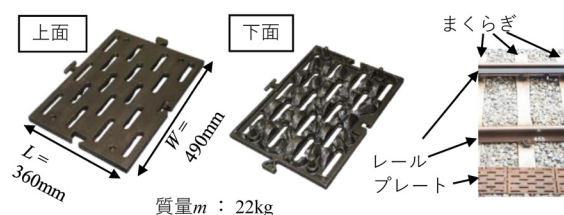


図1 プレート外観

* 環境工学研究部 車両空力特性研究室

** 東日本旅客鉄道株式会社

2. 試験方法

本章では風洞試験の方法について示す。2.1 節では小型風洞試験、2.2 節では大型風洞試験について詳細を示す。最初に、両試験で共通する条件を示す。

図2に風洞試験で再現した設置状態を示す。プレートがバラスト上の、水平面（肩部とする）に置かれた状態、傾斜面（のり面とする）に置かれた状態を再現した。この状態を再現するため、小型風洞試験、大型風洞試験とも軌道模型を製作し、その上に縮尺模型である供試プレート、または実物大のプレートをそれぞれ設置した。風は自然風を想定し、プレートに対してまくらぎ方向に風が吹く状態を再現した。これは事前検討において、まくらぎ方向の風向の方が、レール方向よりもプレートに大きな空気力がかかると考えられたためである。在来線での設置を想定したため、列車風は自然風による強風よりも風速は小さいと考えられ、考慮していない。まくらぎとレールは、プレートの空気力への影響が小さいと考えられるため、再現していない。

図3にプレートが不良施工となった際の模式図を示す。分かりやすく示すため、図3では現実には起こりえないような極端な不良施工を示した。不良施工の状態は、プレート全体がバラストから浮いて施工される状態、プレートが角度を持って施工される状態を想定し、パラメータをそれぞれ浮き量 [mm]、角度 [°] と定義する。正常施工での条件を浮き量 0mm、角度 0° とした。よって傾斜面であるのり面において角度 0° という条件では、図2のように水平面から 30° 傾いた状態で設置される。これらのパラメータが大きくなると、図3で示した抗力 F_D [N]（流れ方向の空気力）、揚力 F_L [N]（高さ方向の空気力）が大きくなる。さらに、空気力が大きくなるとプレートの下流端を軸としたモーメント M_p [N・m] も大きくなる。

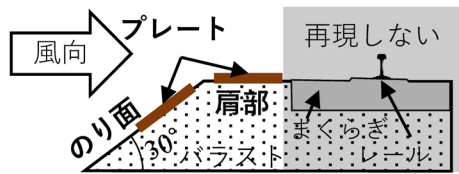


図2 風洞試験で再現する設置状態

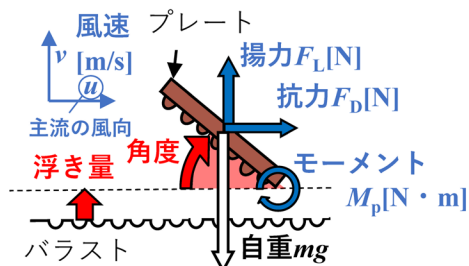


図3 不良施工状態の模式図

2.1 小型風洞試験

小型風洞試験は鉄道総研所有の小型低騒音風洞、密閉型測定部にて行った。小型風洞では、縮尺模型を用いた風速分布および風荷重の測定を行った。以下では主流の風向を流れ方向、流れ方向と直角で水平方向を幅方向とする。吹き出し口寸法は幅 0.72m、高さ 0.6m である。主流はラフネスブロック等のない一様流とした。測定は、3 分力計を用いた 3 方向の空気力（抗力、揚力、横力）の測定、および PIV（Particle Image Velocimetry：粒子画像流速測定法）を用いた 2 方向の風速の測定（流れ方向風速 u [m/s]、高さ方向風速 v [m/s]）を行った。PIV とは、流れに分散させた粒子に対してシート状のレーザー光を照射して粒子像を撮影し、その移動量と速度を画像解析によって求める実験手法である。ピトー管等の圧力測定と異なり、流れを乱さずに広範囲の風速を同時に測定できる点が特徴である。横力は抗力、揚力と比較して微小なため、考察対象としない。供試プレート中心より 364mm 上流側の位置で、ピトー管により主流風速 U [m/s] を測定した。以降、「抗力」「揚力」と表記した際は測定値の時系列データの平均値をさすこととする。風洞の主流風速 U は 30m/s で、プレート長さ $L = 0.09$ m を代表長さとしたレイノルズ数は 1.8×10^5 である。

図4に製作した模型を示す。寸法は幅 0.62m、長さ 0.42m、高さ 0.07m である。閉塞率は 11% 程度で、プレートの角度により若干大きくなる。軌道模型上に、プレートの 1/4 スケールである供試プレートが設置される。供試プレート周辺には供試プレートとほぼ同形状のダミープレートを設置した。供試プレートは、3D プリントで製作しており、下面の凹凸形状等も忠実に再現している。縮尺模型のために実物のバラストを用いることは難しいため、軌道模型表面に凹凸をつけて、バラストの表面形状のみを簡易的に再現した。この凹凸は、供試プレート下面の凹凸の反転形状となっているため、現場にて設置される際にプレートとバラストが噛み合う状況を、本模型で模擬することが可能である。表1に試験条件を示す。不良施工の条件を検討した結果、角度については、プレートをバラストに恣意的に角度をつけて設置したとしても 20° 以上の状態を再現することは不可能であった。現実的には危険な状態を考慮しても 20° 以下で設置されると考えて問題ないと考えられる。ただし本実験では、角度に対する空力特性の変化を調査するため 30° まで試験を行った。また供試プレートが風をはらまない方向である負の角度（供試プレートの上流端を軸に回転）も実験を行った。一方で浮き量については、事前検討から現実的な浮き量では空力特性に与える影響は小さいと判断され、小型風洞試験では 0mm のみとした。

PIV 測定は西華デジタルイメージ製の 2D-PIV システムを用いた。のり面上流端から上面下流端付近の範囲で

2次元風速測定を行った。密閉型測定部上部にレーザー発振器を設置し、シリンダカルレンズにてシート状にしたレーザーを供試プレートに上から照射した。サンプリング周波数は本システムの最大値である1ペアにつき7.5Hz（画像1枚では15Hz）とし、300ペア（600枚）の画像について3回相関解析を繰り返して風速を取得した。300ペアの風速の平均を、各試験条件における風速 u 、 v とした。

空気力は、供試プレートと3分力計（共和電業：LSM-B-50NSA1）を、支柱を介して接続して測定した。試験前にデジタルフォースゲージにより各力の方向に荷重を負荷した結果、負荷した荷重と測定値は良好に一致した。本試験で測定した空気力は、支柱に作用する空気力を含んでいる。しかし支柱の空気力は、測定対象であるプレートの空気力と比較して小さいと考えられること、また飛散の可能性を評価する上で、支柱を含めた空気力はプレート単体の空気力よりも大きくなり、安全側の評価となることから、支柱を含めて空気力を評価しても問題はない。空気力は式(1)、式(2)により無次元化した。

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U^2 WL} \quad (1)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho U^2 WL} \quad (2)$$

ここで ρ [kg/m³] は空気密度、 $W = 0.12$ [m] は供試プレートの幅方向長さ、 $L = 0.09$ [m] は供試プレートの流れ方向長さである。

2.2 大型風洞試験

試験は鉄道総研 風洞技術センターの大型低騒音風洞¹⁾、開放型測定部にて行った。吹き出し口寸法は幅5m、高さ3mである。主流はラフネスブロック等のない一様流とし、境界層吸込装置を使用した。6方向の空気力（抗力 F_D' 、揚力 F_L 、モーメント M_p' 、その他3方向）の測定、およびピトー管をトラバースし、流れ方向風速 u を測定した。ただしクォーターション付の抗力は、6分力計原点での測定値、クォーターション付のモーメントは、6分力計原点まわりのモーメントである。軌道模型上流端より3.6m上流で、ピトー管により主流風速を測定した。風洞の主流風速 U は30m/sで、プレート長さ $L = 0.36$ mを代表長さとしたレイノルズ数は 7.1×10^5 である。

図5に製作した軌道模型を示す。寸法は幅2.4m、長さ2.7m、高さ0.3mである。バラストは営業線で用いられる実物を使用し、深さ80mm（肩部のみ130mm）程度で軌道模型表面に散布した。表2に試験条件を示す。不良施工の条件を浮き量20mm、角度10°、20°、30°と設定した。浮き量が20mmの場合、プレートはバラストと噛み合っていない状態のため、現実的に起こりうる最も浮き上がった条件として適当であると考えられる。

空気力の測定はプレートを6分力計（共和電業：LFM-A-1KN）に治具を介して固定した。デジタルフォースゲージにより荷重の確認を行ったところ、抗力のみ荷重の作用点の高さによる測定値の依存性が見られた。そのため作用点の高さと測定値の関係を調査した上で、6分力計原点での抗力から、作用点（風圧中心）での抗力となるよう補正（ $F_D' \rightarrow F_D$ ）した。さらに M_p' は6分力計原点まわりのモーメントの測定値であるため、プレート

表1 小型風洞試験条件

主流風速 U	[m/s]	30
代表長さ L	[mm]	90
スケール比		1/4
レイノルズ数		1.8×10^5
浮き量	[mm]	0
角度	[deg]	-30~30 (10°刻み)

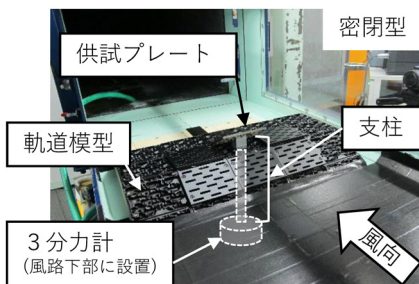


図4 小型風洞用の模型外観

表2 大型風洞試験条件

主流風速 U	[m/s]	30
代表長さ L	[mm]	360
スケール比		1/1
レイノルズ数		7.1×10^5
浮き量	[mm]	0, 20
角度	[deg]	0~30 (10°刻み)

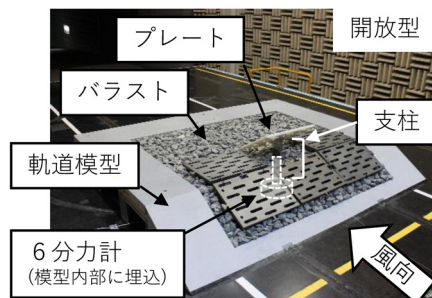


図5 大型風洞用の模型外観

下流端まわりのモーメントとなるように補正 ($M_p' \rightarrow M_p$) した。補正に必要な作用点 (風圧中心) は、プレートの幅方向中心、厚さ方向中心に作用点が存在すると仮定した上で、モーメント、抗力、揚力から求めた。以降では大型風洞試験について「抗力」「モーメント」と表記した場合は、補正値をさすこととする。支柱は水平方向断面が長円形状であるため支柱単体の抗力は小さく、プレートと支柱を合わせた空気力に対して概ね 1% 未満であったため、補正していない。空気力は前述の式 (1)、式 (2) および下記の式 (3) により無次元化した。大型風洞試験では 1/1 スケールのため、 $W = 0.49[m]$ 、 $L = 0.36[m]$ である。

$$C_M = \frac{M_p}{\frac{1}{2} \rho U^2 W L^2} \quad (3)$$

3. 試験結果

3.1 風速分布

3.1.1 小型風洞試験と大型風洞試験の比較

図 6 に小型風洞試験および大型風洞試験における風速分布を示す。横軸および縦軸はプレート長さ L で無次元化した距離を示し、原点は肩部上プレートの上面、上流端である。実験の都合上、小型風洞では、空気力の測定位置は PIV の測定位置よりも 630mm 程度上流である。よって境界層の発達程度により、空気力の測定位置での風速は、図 6 の結果よりも床面近くでは多少大きいと推測される。肩部のプレート前縁から上流側 ($x/L \leq 0$) にて大型風洞試験と小型風洞試験でよく一致している。肩部のプレートから下流側 ($x/L > 0$) では、特に軌道模型表面において、大型風洞試験の方が風速は小さい傾向が見られる。小型風洞試験で使用した軌道模型にはバラストを用いておらず、表面の凹凸でバラスト表面を再現したのみである。よって大型風洞の軌道面風速は、バラスト表面や内部の静止した流体と主流が混合することにより、風速が小さくなると考えられる。また小型風洞試

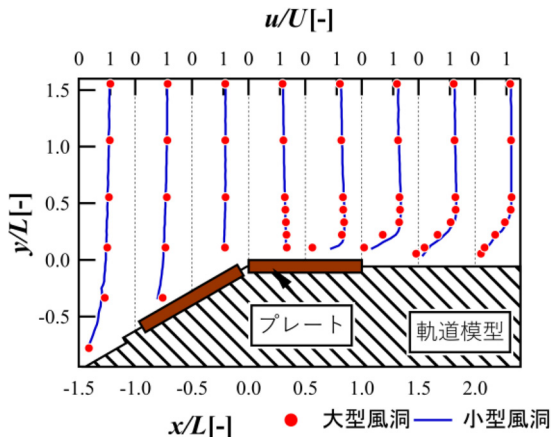


図 6 風速分布比較 (大型風洞 vs. 小型風洞)

験は密閉型測定部で実施したため、閉塞により流れの有効断面積が小さくなり、風速が大きい可能性もあるが、軌道模型表面近くの風速の差異が大きい部分は、バラストの影響が支配的と考えられる。

3.1.2 プレートまわりの風速分布 (小型風洞)

図 7 に浮き量 0mm、角度 0° における流れ方向、鉛直方向の風速分布を示す。色は流れ方向風速 u 、鉛直方向風速 v を主流風速 U で割った無次元風速を示す。流れ方向の風速の結果より、供試プレート上部付近の風速は主流の 1.2 倍程度の風速が見られる。模型による流路の縮小や、のり面を駆け上がる流れによるものと考えられる。鉛直方向の風速の結果より、のり面の上部付近で $v/U = 0.3$ 程度の風速が見られる。 $v/U = 0.3$ 程度の領域は供試プレート前縁付近にまで達している。よって供試プレートへの接近流は、のり面の影響を受けた上向きの風向角を持った流れになると考えられる。

図 8 に浮き量 0mm、角度 30° の流れ方向風速分布を示す。ただし供試プレート下部はレーザーが届かず、風速分布を測定できない (ドット柄の部分)。角度 30° の場合、供試プレート前縁付近を見ると、供試プレートの前縁ではなく、前縁から少し下流側にずれた位置から $u/U = 0.6$ 程度の緑色の領域が下流に続く様子が見られる。この付近には供試プレートの上流側の孔があるため、流れが孔を通過すると考えられる。また供試プレートの下流側の孔からも $u/U = 0.3$ 程度の孔を抜ける流れが見られる。一方で供試プレートの中心付近から下流側には、

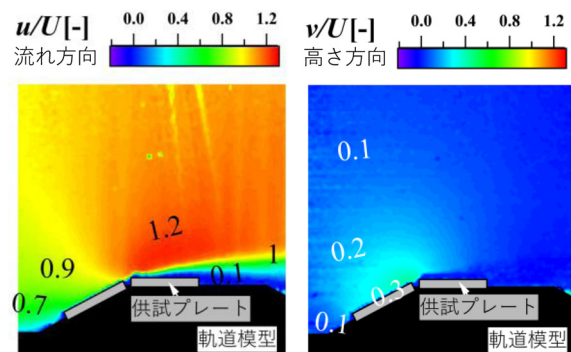


図 7 風速分布 (浮き量 0mm, 角度 0°)

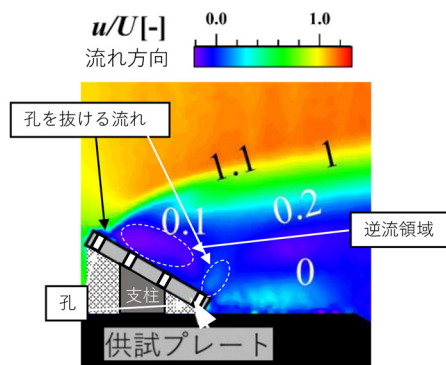


図 8 流れ方向風速分布 (浮き量 0mm, 角度 30°)

広く青から紫色の、風速の小さい、または逆流の領域が見られる。原因として、支柱が供試プレートに中心に近い2孔をふさいでいることや、そもそも供試プレートの面積に対して孔の面積は20%程度であるため、供試プレートの孔を通過する流れよりも、供試プレートを回り込む流れが支配的であることが考えられる。

以上より、供試プレート下流には逆流領域が見られることから、プレート下流側が負圧領域となり、抗力の要因となっていることが推測される。また孔を通過する流れが見られることから、大きい角度では流れが孔を通過することにより、孔のない場合よりも抗力や揚力が低減されることが推測される。

3.2 空気力（小型風洞および大型風洞）

図9に肩部における角度に対する各係数の変化を示す。横軸に角度、縦軸に各係数を示し、浮き量0mm、20mmの際の結果を示した。また抗力、揚力について各係数の小型、大型風洞での結果を示した。小型風洞試験の結果に着目すると、各係数とも角度0°を挟んで非対称な形状である。これは前述のように、のり面を駆け上がる流れにより供試プレートへの接近流が風向角を持った流れとなるためと考えられる。絶対値が同じ正負の角度で抗力係数を比較すると、のり面を駆け上がる流れと正対する正の角度の方が、抗力係数が大きいことが分かる。大型風洞試験の結果に着目すると高さおよび角度の増加に伴い、抗力係数、揚力係数、モーメント係数とも概ね単調に増加する。角度が大きいほど上流側から見た供試体の投影面積が増加することで各空気力係数が増大したと考えられる。浮き量20mmの方が0mmよりも空

気力係数は大きいものの、その差はわずかである。抗力係数、揚力係数については大型風洞の方が小型風洞よりも概ね小さい。原因の一つとしては、小型風洞では実験の都合上、水平方向断面が矩形の支柱を用いたため、測定した空気力にその影響が含まれることが原因と考えられる。また大型風洞試験ではバラストにより軌道模型表面の風速が小さいこと、閉塞率の影響が小さいことも原因であると考えられる。抗力の角度0°においては、他の角度と違い小型風洞試験の方が空気力係数は小さい。軌道模型のエッジ付近は、流れ方向に風速が大きく変化する部分であり、その部分にプレートの前縁がかかって設置されるため、プレートの設置位置をわずかにずらすだけで抗力が大きく変動する傾向が見られた。よって小型風洞と大型風洞でプレートの設置位置がわずかにずれたことで他の角度とは違う傾向となったと考えられる。ただ角度0°では空気力が小さいため、飛散の可能性の評価には影響を与えない。

以上より、小型風洞試験における空気力係数は、大型風洞試験の値と比較して概ね大きい。よって抗力、揚力について、コストの低い小型風洞試験により荷重を求め、飛散の可能性の評価に用いても、大型風洞試験の評価よりも危険側とはならないと考えられる。

4. 飛散の可能性の評価

4.1 評価方法

軌道面設置物の飛散形態は、揚力による上方への浮き上がり、および、揚力、抗力による供試体下流端を軸とした回転を想定した。摩擦力により発生する可能性がある横滑りについては、プレート同士が連結されていればその可能性は低いと考えられるため、評価していない。自然風風速 U_N [m/s] が吹いた際に供試体にかかる力を推定し、飛散の可能性の評価に用いる。風洞と現地で空気密度が同じであるとした場合、風洞の主流風速 $U = 30$ m/s を用いて、評価荷重 F_{DA} [N]、 F_{LA} [N]、 M_{pA} [N・m] は式(4)～式(6)で表せる。

$$F_{DA} = F_D \left(\frac{U_N}{U} \right)^2 \tag{4}$$

$$F_{LA} = F_L \left(\frac{U_N}{U} \right)^2 \tag{5}$$

$$M_{pA} = M_p \left(\frac{U_N}{U} \right)^2 \tag{6}$$

プレートは北海道を除く東日本エリアに設置されることを想定した。自然風風速 U_N は、その地域の最大風速 U_{NA} (10分間平均の風速の最大値)、および最大瞬間風速 U_{NM} (3秒間平均の風速の最大値) とし、それぞれの風速を用いた評価を「平均評価」、「最大評価」とする。それぞれの風速の求め方は過去の強風による被害調査報

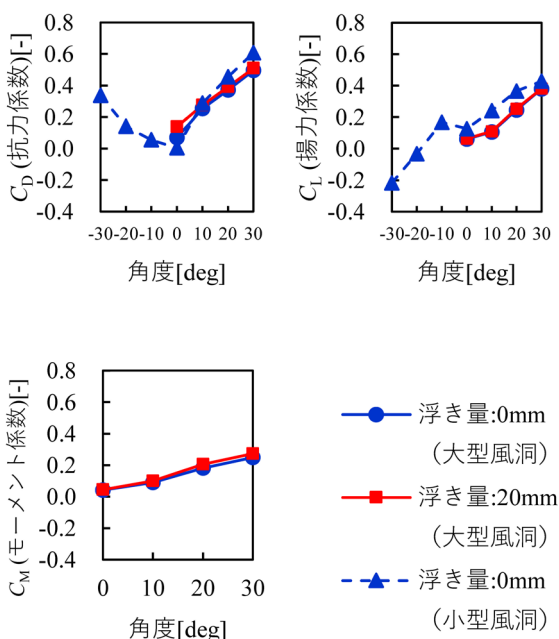


図9 空気力測定結果（肩部のプレート）

告²⁾ (千葉県等に甚大な被害をもたらした 2019 年台風 15 号における被害調査) を参考にし、式 (7)、式 (8) を用いた。同報告では台風通過時に観測された最大風速、最大瞬間風速が概ね以下の式から得られる風速と同程度か小さいことが報告された。

$$U_{NA} = U_0 E_r \quad (7)$$

$$U_{NM} = U_0 E_r \sqrt{G_f} \quad (8)$$

U_0 [m/s] は基本風速を表す。基本風速は地上 10m における 10 分間平均風速の再現期間 100 年に対する値で、地域により異なる。基本風速は東日本の最大値である 42m/s (房総半島南端付近) とした。 E_r は風速の鉛直分布係数であり、地表面粗度区分 II (田畑や住宅が散在している箇所) の高さ 5m 以下における値 (0.899) とした。 G_f はガスト影響係数 (瞬間風速を考慮するための係数) であり、地表面粗度区分 II、高さ 10m 以下の値 (2.2) とした。以上の値を代入すると、 U_{NA} は 37.8m/s、 U_{NM} は 56.1m/s となる。目安として活用しやすいよう、5m/s 単位で切り上げ、 U_{NA} を 40m/s、 U_{NM} を 60m/s とする。

最後に、浮き上がり安定度 S_L と回転安定度 S_R を式 (9)、式 (10) のように定義する。

$$S_L = \frac{mg}{F_{LA}} \quad (9)$$

$$S_R = \frac{M_w}{M_{pA}} \quad (10)$$

ここで m [kg] はプレートの質量、 g [m/s²] は重力加速度、 M_w [N・m] はプレートの自重のみによるモーメントである。浮き上がり安定度が 1 未満になると、風荷重による揚力がプレートに作用する重力を超えることとなり、浮き上がる可能性が高くなる。回転安定度が 1 未満になると風によるモーメントがプレートの重力によるモーメントを超えることとなり、回転する可能性が高くなる。これらの安定度が 1 未満の条件を不安定とし、飛散の可能性があると評価した。それぞれの指標について、前述の平均評価および最大評価を行った。

4.2 評価結果

図 10 に最大評価 (60m/s) を基にした回転安定度を示す。平均評価と最大評価では、当然最大評価の方が安全側の評価 (厳しい評価) となり、最大評価について浮き上がり安定度と回転安定度を比較した結果、概ね回転安定度の方が安全側であった。ここでは代表例として最も安全側となった回転安定度 (最大評価) を示した。(安定度) = 1 の直線よりも下の条件は不安定であると定義し、自然風により飛散する可能性があるとした。図 10 より、のり面、肩部とも 1 を下回った条件は角度 30° であり、それ以外の条件では飛散の可能性は低いと考えられ

る。前述のように不良施工であったとしてもプレートが 30° の角度を持つ可能性は極めて低いことを考慮すると、プレートの飛散の可能性は低いと考えられる。

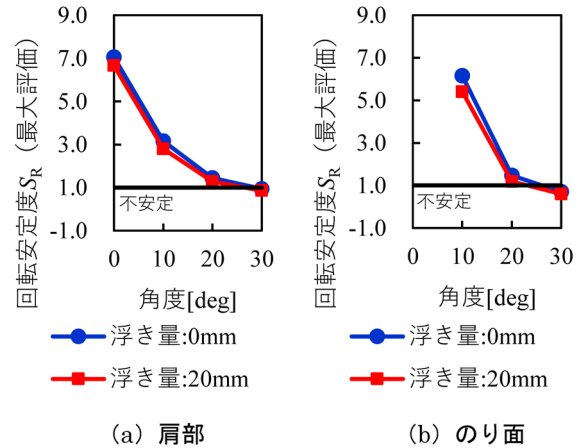


図 10 回転安定度

(のり面、角度 0° はプレートがバラストに押し付けられる方向のモーメントのため、除外した。)

5. まとめ

プレートの飛散の可能性を調査するため、実物のプレートに対して 1/4 スケールの縮尺模型 (供試プレート) を用いた小型風洞試験、および、実物スケールのプレート模型と実物のバラストを用いた大型風洞試験を行った。そして大型風洞試験の結果からプレートの飛散の可能性を評価した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 浮き量によらず、角度 30° においては飛散する可能性がある。しかし、プレートはたとえ不良施工であっても角度 30° で設置される可能性は低く、プレートの飛散の可能性は低いと考えられる。
- (2) コストの低い小型風洞試験により荷重を求め、それを飛散の可能性の評価に用いたとしても、大型風洞試験での評価よりも危険側とはならないと考えられる。

文献

- 1) 井門 敦志：風洞技術センターの概要と風洞を活用した研究開発, RRR, 75 巻, 12 号, pp. 24-27, 2018
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 国立研究開発法人建築研究所：令和元年台風第 15 号に伴う強風による建築物等被害現地調査報告 (速報), pp. 4-5, 2019, <https://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/2019/typhoon15.pdf> (参照 2021 年 2 月 1 日)