

大型風洞試験による軌道面付近に敷設された平板状設置物の飛散可能性の検討

○ [機] 中野 高志 [機] 佐久間 豊 (鉄道総合技術研究所)

湊 卓也 小林 裕太郎 小俣 茂 (東日本旅客鉄道)

Large-scale wind tunnel test to assess flying risk of flat plate object
installed on railway track

○Takashi Nakano, Yutaka Sakuma (Railway Technical Research Institute)

Takuya Minato, Yutaro Kobayashi, Shigeru Omata (East Japan Railway Company)

The flat plates for ballast stabilization in place of chemical agents distributed on track ballast have been newly developed for laborsaving in a process of removing and laying ballast. The risk of flight of the plates by natural strong wind should be assessed for railway safety. Previous study was done to investigate the flow field around the plates and their aerodynamic characteristics by small wind tunnel tests. This study, firstly, aims to measure the aerodynamic forces acting on the plates in a large wind tunnel using the same real ballast as railways. The other objective of this study is to assess the flight risk of the plates when they are exposed to the natural wind at estimated maximum speed. The results show that the flight risk of the plates is low, and the plates have sufficient wind performance against strong natural wind.

キーワード：道床、道床安定化、大型風洞、空気力係数、リスクアセスメント

Key Words：Ballast, Ballast stabilization, Large-scale wind tunnel, Aerodynamic coefficient, Risk assessment

1. 背景

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用品として検討中の、道床肩部及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。道床形状保持プレートの特徴として、道床と密着しやすいように裏面 (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。また表面、裏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。敷設にあたっては、近年多発している台風や竜巻等の異常気象も想定し、強風による飛散の可能性をあらかじめ検討しておく必要がある。プレートの質量は 22kg あり、正常に設置されていれば飛散可能性は低いと推測されるものの、何らかの原因で施工不良状態となり、正常設置時より高い位置にあつたり、風をはらむ方向に角度を持ったりした場合、プレートが自然風により飛散する可能性が高まる。よって高さ、角度と

飛散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。しかしプレートの高さ、角度を変更して体系的に飛散可能性を調査した研究は公開文献を調査した範囲では存在しなかった。そこで飛散可能性の評価のため、風荷重を測定する風洞試験を実施した。先行研究¹⁾ではまずプレートに対して 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。



図 1 プレート外観

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ている。

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制約があり、供試プレートの流れ場、風荷重が実物とは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を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、飛散可能性の検討を行った。

2. 試験方法

2.1 風洞概要

試験は鉄道総研 風洞技術センターの大型低騒音風洞²⁾の開放型測定部にて行った。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し、寸法をそれぞれ長さ、幅とする。吹き出し口寸法は幅 5m×高さ 3m である。実寸スケールで自然風の風速分布を再現する手段がないため、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_x' 、揚力 F_z 、モーメント M_y' （図 4 参照）、その他 3 方向）の測定、軌道模型から十分上流側に離れた位置（模型上流端より 3.6m 上流）でのピトー管による主流風速の測定を行った。なお以下では単に「抗力」「揚力」「モーメント」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 $L=0.36[m]$ を代表長さとしたレイノルズ数は $7.1 \cdot 10^5$ である。

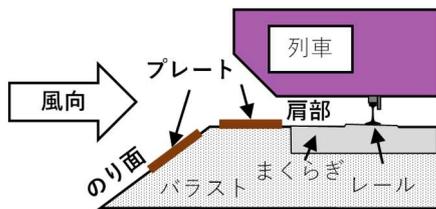


図 2 風洞試験で再現する設置状態

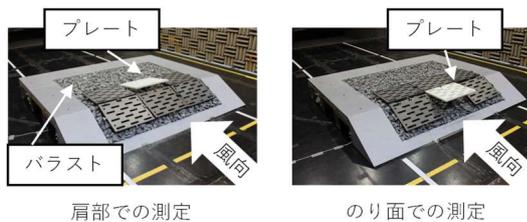


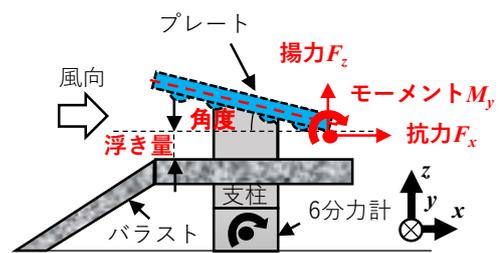
図 3 軌道模型

2.2 模型概要

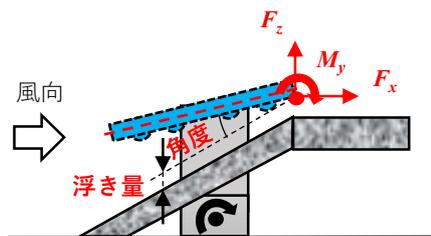
図 2 に風洞試験で再現する設置状態を示す。模型ではバラスト軌道の一部に敷設されたプレートに対して、まくらぎ方向に風が吹く状態を再現した。図 3 に製作した軌道模型を示す。寸法は幅 2.4m×長さ 2.7m×高さ 0.3m である。バラストは営業線で用いられるものと同様のものを使い、深さ 80mm（肩部のみ 130mm）程度で軌道模型表面に散布した。まくらぎおよびレールは空気力への影響は小さいと考え模型では再現しなかった。プレートの設置位置は肩部及びのり面とした。正常施工での条件を浮き量 0mm、角度 0°として、不良施工の条件を浮き量 20mm、角度 10°、20°、30°と設定した。浮き量 20mm の場合、プレートはバラストと全く噛み合っていない状態でこれよりも危険な状態は考えにくく、現実的に最も危険な状態として妥当であると考えられる。一方角度については、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。

図 4 に空気力測定概要を示す。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。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ため、校正の上測定値を補正 ($F_x' \rightarrow F_x$) した。さらに M_y' 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、プレート下流端まわりのモーメントとなるように補正 ($M_y' \rightarrow M_y$) した。その際に作用点（風圧中心）はプレートの幅方向中心、厚さ方向中心に存在すると仮定した上で、モーメント、抗力、揚力から作用点を求めた。

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(1)式により無次元化した。



(a) 肩部



(b) のり面

図 4 空気力測定概要

$$C_D = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho U^2 WL}, C_L = \frac{F_z}{\frac{1}{2}\rho U^2 WL}$$

$$C_M = \frac{M_y}{\frac{1}{2}\rho U^2 WL^2} \dots (1)$$

ここで ρ [kg/m³]は空気密度, U [m/s]は主流流速, W [m]は供試体の幅方向長さ(0.49m), L [m]は供試体の流れ方向長さ(0.36m)である.

2.3 飛散可能性の検討

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_{xA} [N], F_{zA} [N], M_{yA} [N・m]は(2)式で表せる.

$$F_{xA} = F_x \left(\frac{U_N}{U}\right)^2, F_{zA} = F_z \left(\frac{U_N}{U}\right)^2$$

$$M_{yA} = M_y \left(\frac{U_N}{U}\right)^2 \dots (2)$$

プレートは北海道を除く東日本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告³⁾(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, (3)式を用いた. この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.

$$U_{NA} = U_0 E_r, U_{NM} = U_0 E_r \sqrt{G_f} \dots (3)$$

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, 地域により異なる値が与えられる. 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.

3. 実験結果

3.1 風速分布

図 5 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. 小型風洞の結果は PIV により, 大型風洞の結果はピトー管のトラバースにより得たものである. 小型風洞では後述の空気力の測定位置よりも $A=630$ [mm] (A/L 小型風洞 = 7) 程度下流での PIV 測定位置となるため, 境界層の発達程度により空気力測定位置での風速は, 特に床面近くでは, 図 5 の結果よりも多少大きいと推測される. 図 5 の結果から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 ($x/L > 0$) にて, 特に軌道模型表面において, 大型風洞試験の方が風速が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. よって大型風洞では主流およびバラスト表面や内部の静止した流体との混合により, 風速が小さくなったと考えられる. また小型風洞試験は密閉型測定部で実施したため, 閉塞により (閉塞率: 11%程度) 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.

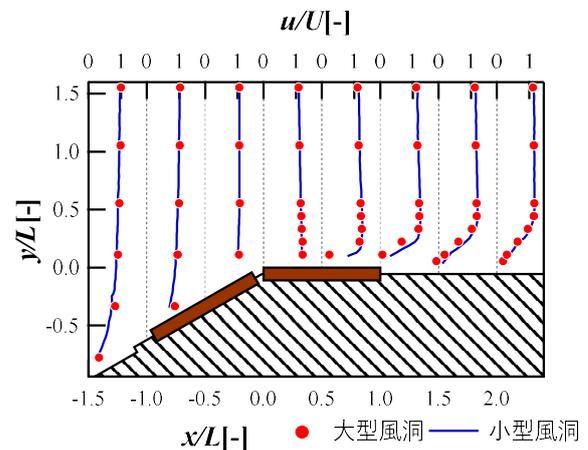


図 5 風速分布比較 (大型風洞 vs. 小型風洞)

3.2 空気力係数

図 6 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 際の結果を示した. また小型風洞で測定が可能であった抗力, 揚力について両係数の小型, 大型風洞での結果を示した. 肩部, のり面とも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, 差は小さい. 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. 小型風洞では実験の都合上, 水平方向断面が矩形である支柱を用いたため, 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. 前述のように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, 閉塞率が小さいことも原因として考えられる. 抗力の角度 0°においては他の角度と違って小型風洞試験の方が空気力係数は小さい. 角度 0°ではプレートの設

位置をわずかにずらすだけで抗力が大きく変動する。軌道模型のエッジ付近の流れ方向に風速が大きく変化する部分にプレートの前縁がかかっていることが原因であると考えられ、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。小型風洞における空気力係数が概ね大きいことから、抗力、揚力について、今後新たな条件でプレートの自然風による飛散可能性を検討する際に、コストの低い小型風洞試験により荷重を求め、飛散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ではないと考えられる。

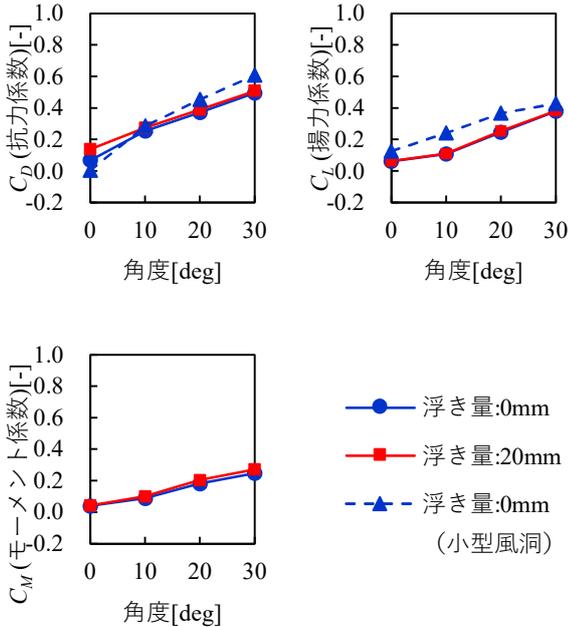


図 6 空気力係数比較 (肩部のプレート)

3.3 飛散可能性の評価

評価荷重 F_{zA} [N]、および供試体の重力 mg ($m = 22$ [kg]) の比を浮き上がり安定度 S_L とする。また、供試体下流端まわりの風によるモーメント、および供試体の重力によるモーメント M_w [N・m] の比を回転安定度 S_R と定義する。定義式を(4)式に示す。

$$S_L = \frac{mg}{F_{zA}}, S_R = \frac{M_w}{M_{yA}} \dots (4)$$

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供試体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供試体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。いずれかの安定度でも 1 未満となれば、その条件では推定される風速により飛散する可能性がある。

図 7 に最大評価 (60m/s) を基にした回転安定度を示す。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 (小さかった) ため、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では自然風により飛散する可能性がある。図 7 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、飛散可能性の観点からは、プレートを営業線に設置することは特に問題ないと考えられる。

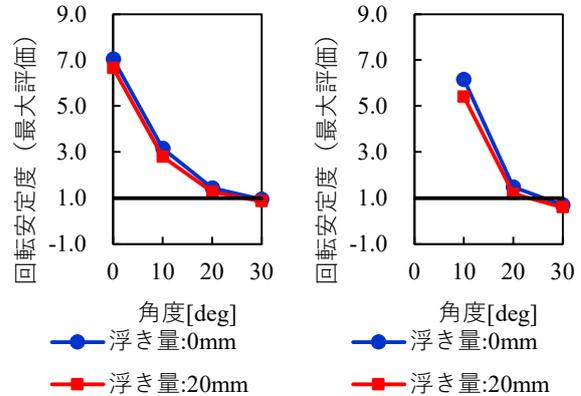


図 7 回転安定度 (左：肩部, 右：のり面)

※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

4. まとめ

実物スケールのプレート模型、実物のバラストを用いた大型風洞試験を実施し、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、飛散可能性の検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- 大型風洞試験で得られた空気力係数は小型風洞試験の空気力係数よりも概ね小さい。これは支柱形状の違い、バラストによるプレートまわりの流れ場の違い、閉塞率の違いなど複数の要因があると考えられる。
- 大型風洞試験で得られた空気力から現地でプレートにかかる空気力を推定して飛散可能性を評価した結果、角度 30°のみ飛散可能性があることが分かった。しかしたとえ不良施工でもプレートが角度 30°を持つ可能性は極めて低く、現場への設置は飛散可能性の観点からは特に問題はないと考えられる。

参考文献

- 1) 中野 高志, 佐久間 豊, 高見 創, 湊 卓也, 小林 裕太郎: PIV を用いた鉄道の軌道面における平板状設置物模型まわりの風速分布測定, 日本機械学会 2019 年度年次大会 講演論文集, S05120, pp. 1-4, 2019.
- 2) 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.
- 3) 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 2020/10/14) .