

新幹線列車の通過時の軌道面流れを再現した 地上側敷設物の飛散に関する風洞試験

井上 達哉* 中野 高志* 井門 敦志**

Wind Tunnel Test to Reproduce Track Surfaces Flow
When Shinkansen Trains Pass for Ballast and Ballast Screen Scattering

Tatsuya INOUE Takashi NAKANO Atsushi IDO

Air flow is induced on track surfaces when Shinkansen trains pass. To prevent ballast scattering due to the air flow, measures such as ballast screens are taken on track surfaces. However, considering the extension of Shinkansen lines and speed up in the future, it is necessary to improve current measures to prevent ballast scattering and to develop new ballast screens. Therefore, in this study, we developed the wind tunnel test method that can be used for research on measures to prevent ballast scattering and studied the scattering phenomenon of objects.

キーワード：風洞試験，新幹線，軌道面流れ，バラスト，バラストスクリーン，飛散

1. はじめに

新幹線列車が通過する際の軌道面付近には、車両の通過に伴う流れ（以下、軌道面流れとよぶ）が誘起される¹⁾²⁾。この流れによりバラストが飛散した場合、飛散したバラストが車両の床下機器に当たることで、動作不良や損傷を招く危険性がある。また、駅のホームや沿線にバラストが飛散した場合には、人に危害を加える危険性もある。そこでバラストが飛散しないように、軌道面には、バラストを覆うバラストスクリーンの敷設や、バラストを固定する樹脂の散布といった、バラスト飛散防止対策が実施されている³⁾。バラストスクリーンは、それ自体が飛散しないように、スクリーン同士がベルトや樹脂ジョイントで締結され、さらに、レール外側の道床に埋め込まれたアンカーに固定される。現状では、これらの対策により、バラストやバラストスクリーン（以降、総称して地上側敷設物とよぶ）が飛散することはない。しかし、今後の新幹線の延伸等を考慮すると、バラスト飛散対策にかかる保守コストの低減や飛散防止性能の向上など、対策方法の改良や新たな開発が求められる。現状では、これらの改良や開発には現地試験が有効であるが、現実には現地試験における地上側敷設物を飛散させる危険性や、実施するための費用を考慮すると、現地試験を活用しての研究開発は困難である。そこで、バラスト飛散対策方法の改良や開発を目的として、鉄道総研所有の大型低騒音風洞による風洞試験方法を開発し、風洞

試験により地上側敷設物の飛散現象に関する研究を行った⁴⁾⁵⁾ので、その内容を報告する。

2. 風洞試験方法の開発

2.1 使用風洞とバラスト軌道模型の配置

本研究は、大型低騒音風洞の開放型測定部で実施した。図1に風洞と軌道模型の配置を示す。前方胴開口部の大きさは、幅5.0m×高さ3.0mである。バラスト軌道模型は、模型支持台車（幅5.5m×長さ7.0m）上に配置した。バラスト軌道模型下流側には、地上側敷設物が飛散しても風路に入らないように飛散防止ネットを配置した。前方胴内には風洞制御用のピトー管が設置されてお

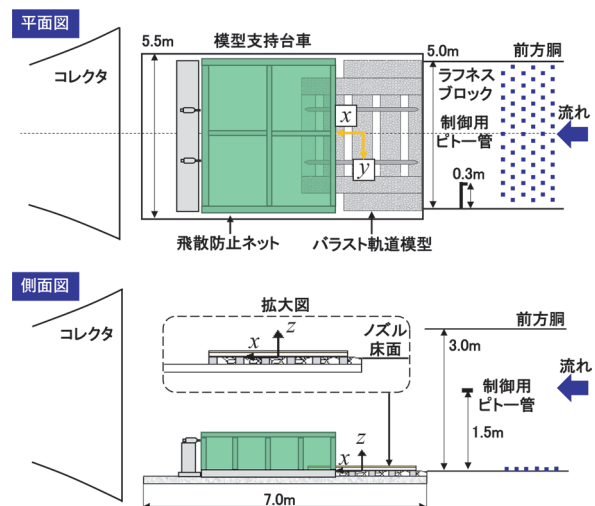


図1 風洞と軌道模型の配置

* 環境工学研究部 車両空力特性研究室

** 研究開発推進部 風洞技術センター

り、これにより算出した風速を風洞試験風速とした。

2.2 バラスト軌道模型

図2にバラスト軌道模型を示す。軌道模型のバラストには、新幹線軌道で実際に使用されているバラストを使用した。一方で、軌道面流れに影響を及ぼすレールやまくらぎは、新幹線軌道で使用されている形状を再現した実寸大の模型とした。なお、レールとまくらぎ間の締結装置は、軌道面流れに大きな影響を与えないと判断して省略した。本実験では、模型支持台車の長さの制限を考慮し、軌道長さを2.7mとし、流れ方向のレールの中央部（上流から3つめの区間：図2参照）を測定区間とした。測定区間のバラストの深さは、現実の軌道で実施しているバラスト飛散防止のための中すかし（レール間の軌道面からバラストの一部を取り除く）状態でも、バラストが2~3層以上確保できる深さ（195mm）とした。バラスト軌道模型の上流端は前方胴下流端とあわせ、バラスト面高さは、前方胴の底面高さとも一致させた。

2.3 バラスト軌道面の風速分布の再現

風洞試験では、前方胴の床面にラフネスブロックを設

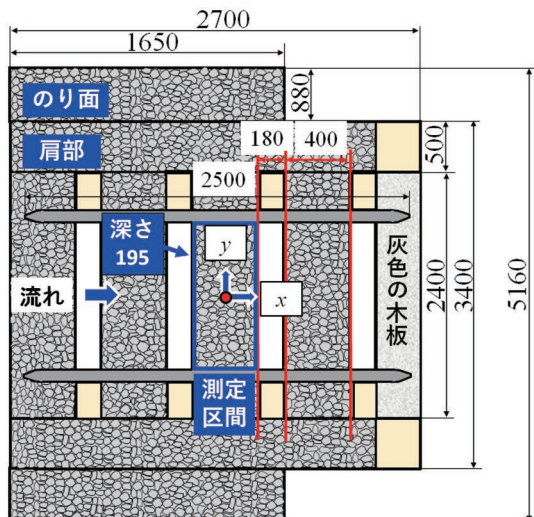
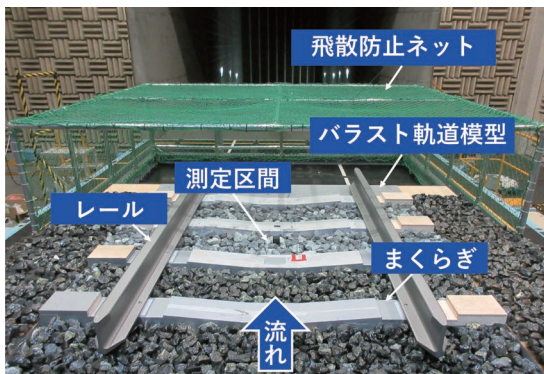


図2 バラスト軌道模型（単位：mm）

置し、そのブロックの大きさ、数、配置を調整することによって、バラスト軌道模型の測定区間に現車（新幹線16両編成、列車速度280km/h）通過時の軌道面の風速分布を再現した。

図3にバラスト軌道面の風速分布の測定状況を示す。レール模型上にピトー管を、測定区間のバラスト上に、くし型総圧管を設置する。原点は軌道面の流れ方向、まくらぎ方向の中央である（図2参照）。くし型総圧管の先端が $x=0, y=0$ となるように設置した。なお、くし型総圧管の管数は合計19本で、軌道面上7.5mmの位置から10mmピッチで187.5mmまで測定した。くし型総圧管の総圧およびピトー管の静圧は、多点圧力計（Digital Sensor Array：DSA-3217, Scani Valve Corp.）で測定した。各々のくし型総圧管高さでの風速は、各々の総圧と、ピトー管の静圧との差圧、すなわち動圧より算出した。図4に、風洞試験および現地試験¹⁾での軌道面の風速分布を示す。ラフネスブロックの配置を調整することで、測定区間の風速分布を現地試験結果とほぼ一致させることができた。また、この時の風洞試験風速（前方胴に設置した制御用ピトー管の風速）は、50m/sであった。なお、ここで再現している風速分布は、列車の中間部が通過している際の時間平均風速であり、乱れ強さや局所的な流れは再現されていない。

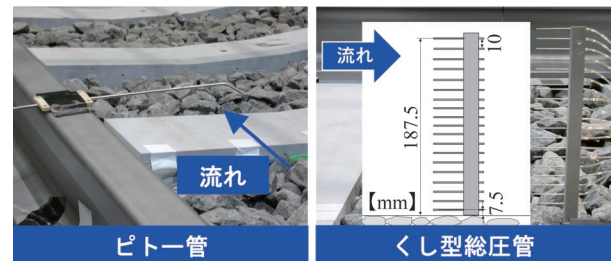


図3 軌道面の風速分布測定

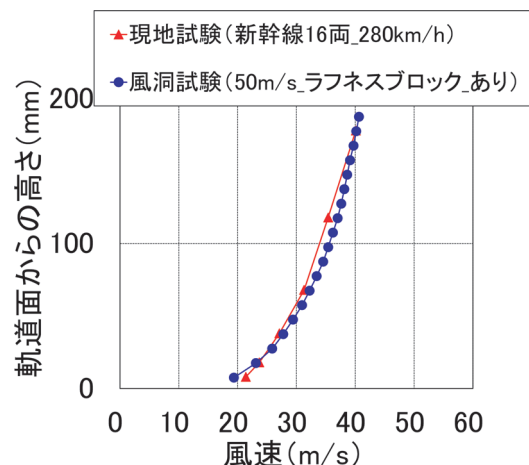


図4 軌道面の平均風速分布

2.4 バラスト振動の再現

現地試験結果を参考に、車輪通過に起因する振幅の大きい振動を風洞試験で模擬することとした。周波数は、列車速度270km/h時を想定し30Hzとした。また振動波形は、より厳しい条件として連続的な正弦波とした。振動加速度についても、現地試験結果を参考に、約 5m/s^2 とした。ただし、実際に車両が通過する場合には、車輪通過時以外でも振動が発生し、軌道の広い範囲が振動するが、風洞試験に用いる軌道模型全体を振動させることは困難であり、実際の軌道上の振動を完全に模擬できていないことに注意されたい。

図5に風洞試験で用いた、軌道模型の一部のバラストに上下方向の振動を与える振動装置（幅0.3m×長さ0.3m×高さ0.1m）を示す。この振動装置を軌道模型内に組み込んだ後、バラストを埋め戻し、振動装置の上に載せたバラストに振動を与えた状態で送風を行い、バラストの振動が飛散に与える影響を調べた。

2.5 風洞試験風速と列車速度

図4に示したように軌道模型上に、現実の列車（走行速度：280km/h）が通過した際の軌道面の風速分布を再現した場合、風洞試験風速は50m/sであった。列車速度に対する試験風速の割合が一定であるとすると、風洞試験風速を1.56倍（ $280/(50 \times 3.6)$ ）することで、通過する列車の速度に換算できる。

3. バラストに関する風洞試験

3.1 バラスト模型

前述したように、新幹線には、バラストが飛散しないように、バラストを固定する樹脂の散布やバラストスクリーン等の敷設等の対策が実施されているが、全ての区間において行われているわけではない。そのため、対策の無い区間を対象として、バラストの飛散に関する風洞試験を実施した。

図6に、風洞試験で使用した4種類のバラスト模型と寸法を示す。本試験に用いた4種類のバラスト模型は、①形状が極端でなく、一般的によく見られる「標準模型」②フラットな形状で、軽量であり飛散の可能性が大きいと考えられる「扁平模型」③基本的な形状として



図5 バラスト振動装置（単位：mm）

一辺50mmの「立方体模型」④立方体模型の比較対象として、立方体模型の下の角部を斜めにカットし、流れを下部に誘導（飛散につながる）する形状の「立方体切欠模型」である。このうち現実のバラストを模擬した①と②は、3Dプリンタにより形状を再現した。

3.2 バラストの空気力測定試験

図7に、バラストの空気力測定時の様子を示す。空気力を測定するバラスト用天秤（日章電機社製3分力天秤：LMC-31480）は、水平面の原点（図2参照）に設置した。模型には6分力が作用するが、本試験ではバラスト飛散に大きな影響を及ぼすと考えられる、抗力 D （N）、揚力 L （N）、ピッチングモーメント M （Nm）（以下、単にモーメントとよぶ）の3分力の時間平均値を、バラスト用天秤により測定した。模型の設置高さは、図8に示すように、まくらぎ上面とバラスト模型の上面をあわせた場合の高さ0mm、バラストスクリーン（厚さ20mm）の敷設を想定した場合の高さ-20mm、中すかしを模擬した場合の高さ-50mmで試験を実施した。風洞試験風速は、0、14、28、42、50m/s（列車速度換算：0、78.4、156.8、235.2、280.0km/h相当）の5速度段、測定時間は20sである。

図9に、高さ0mm時に4種類の各模型に加わる空気力を示す。バラスト形状に関わらず、現実のバラストの自重（標準：2.5N、扁平：1.8N）と比較して、空気力は非常に小さな値となる。さらに低い高さに設置した場

	立体図 (3D-View)	側面図(Side-View)
①標準模型		
②扁平模型		
③立方体模型		
④立方体切欠模型		

図6 バラスト模型とその種類（単位：mm）



図7 バラストの空気力測定時の風景

合は、さらに小さい（ほとんどゼロ）値となり、バラストがまくらぎ上面より低い位置にある場合には、バラストにはほぼ空気力は加わらないことが分かった。

3.3 バラストの飛散可能性の検討

軌道面より低い位置（バラスト高さ0mm以下）にバラストが存在する際に、バラストが飛散する可能性を検討する。バラストの飛散可能性の評価には、バラストが回転するかどうかを指標として、バラストの下流側・下端回りのモーメントを求めた（図10の図中、 M を「黄色」、 M_+ を「赤」、 M_- を「青」で示す）。ここで l (m) は、バラスト模型中心から模型下流端までの距離、 m (kg) は実物バラストの質量を示す。 $M_+ (=M+Ll)$ は軌道面流れによるモーメント、 $M_- (=mgl)$ は自重によるモーメントである。現実には、バラストが回転するかどうかは、空気力によるモーメントの最大値や作用時間に依存するが、ここでは、空気力の時間平均値により、 M_+ を求めて、 M_+ の絶対値が M_- の絶対値より大きければ、軌道面流れによりバラストは回転し始め、 M_- の絶対値が M_+ の絶対値より大きければ、バラストは回転しない、と考えることにする。本実験では、空気力の時間平均値で評価を行ったが、瞬間的に大きな空気力が作用した場合、バラストが回転する可能性があることに留意する必要がある。

図10に、バラスト高さ0、-20、-50mm、風洞試験風速50m/s（列車速度換算280km/h）の条件での、標準模型、扁平模型に加わるモーメント（ M_+ と M_- ）の絶対値を示す。両模型とも、全てのバラスト高さで、 M_+

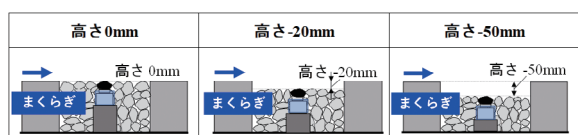


図8 バラスト模型とその種類

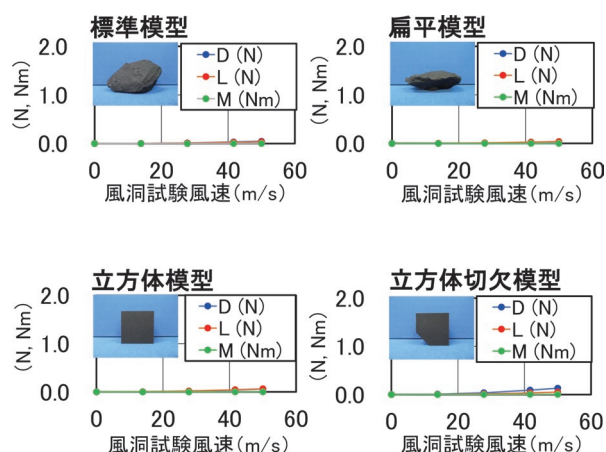


図9 バラストの空気力測定（バラスト高さ0mm）

の絶対値が M_- の絶対値より十分小さくなり、本試験で用いたバラストでは、軌道面流れによりバラストが回転する可能性は、ほとんどないと考えられる。このことより、新幹線が280km/hで走行する現実の軌道においても、バラスト高さが0mm以下（バラスト上面が、まくらぎ上面より低い）であれば、バラストが飛散する可能性は非常に小さいと推定される。

3.4 バラストの挙動確認試験

図11に、バラストを飛散させるために、バラスト高さ+40mmで、風洞試験風速を最大72m/s（列車速度：404km/h相当）まで上げた際の、バラスト飛散時の挙動を高速カメラで撮影した画像を示す。バラスト飛散時の挙動は、①風速が上がると、一部の不安定なバラストは揺れはじめる。②さらに風速を上げた場合、必ずしも揺れているバラストが転がるわけではないが、バラストが軌道面上を転がり始める。③軌道面上を転がったバラストは、下流へ流されて途中で止まる場合と、下流へ流される途中で風に巻き上げられ、空中へ飛散する場合があることがわかった。また、バラストが空気をはらみ、浮き上がる際の挙動も確認することができた。バラストの形状は千差万別であるが、今後、バラスト飛散防止対策を検討する際に、本試験方法を用いて、バラスト飛散・浮き上がり時の挙動を観察できることは、非常に有効であると考えられる。

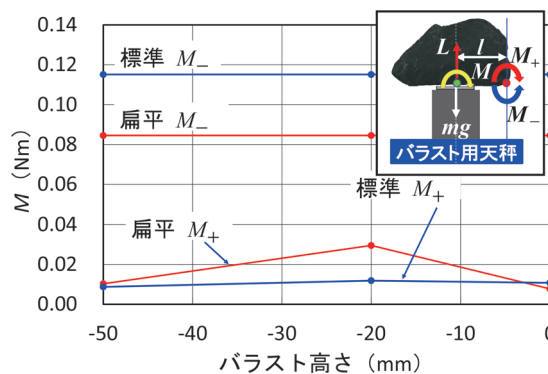


図10 バラストの飛散可能性の検討

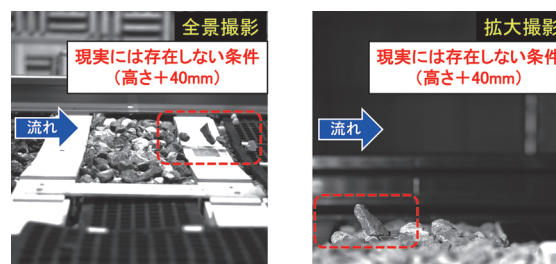


図11 バラストの挙動確認試験（バラスト高さ+40mm）

3.5 バラストの振動が飛散に与える影響

バラスト上面をまくらぎ上面とあわせ（バラスト高さ0mm）、バラスト振動装置（図5参照）を使用してバラストに振動を加え、風洞試験風速72.2m/s（列車速度：405km/h相当）で試験を行ったが、バラストは飛散しなかった。このことより、今回の風洞試験では、バラストに振動を与えることでバラストが飛散しやすくなることは、確認できなかった。

4. バラストスクリーンに関する風洞試験

4.1 バラストスクリーンの構成と固定方法

図12に、バラストスクリーン（以降、単にスクリーンとよぶ）の構成と固定方法を示す。スクリーンは軌道間に設置される軌道内部材、レールより外側に設置される軌道外部材で構成される。また軌道内部材と軌道外部材は、ジョイントで締結する。軌道内部材は、軌間中心付近に設置される1個の中心パーツとこれに隣接する2つの外パーツの合計3個で構成され、外パーツと中心パーツはベルトで締結する。まくらぎを挟んで線路方向に隣接する軌道内部材は、まくらぎ下を通した固定用ロープで締結する（今回の風洞試験では、固定用ロープは設置していない）。この様に、スクリーンは軌道面に強固に固定され、飛散する可能性はない。しかし、固定用ロープを設置した場合、バラスト点検時などに、より多くの労力が必要となる。そこで本研究では、省力化を目的とし、固定用ロープを省略した場合に、スクリーンが飛散する可能性を風洞試験により検討した。

4.2 バラストスクリーンの空気力測定試験

新幹線列車が通過する際の軌道面の風速は、車体中心付近の風速が最も大きいことが知られている²⁾。このこ

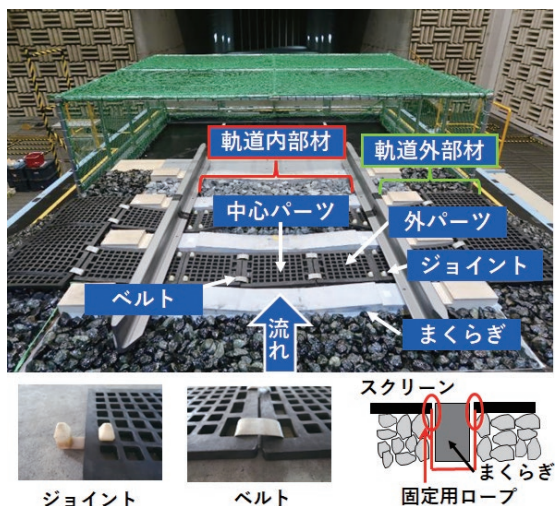


図12 バラストスクリーンの構成と固定方法

とから、スクリーンに加わる空気力は中心パーツが最も大きいと判断し、現実のスクリーンと同じ形状の模型を用いて、中心パーツに働く空気力をスクリーン用天秤（日章電機社製6分力天秤：LMC-61481）により測定した。なお空気力測定時には、外パーツに加わる空気力が測定結果に影響しないよう、中心パーツと連結するベルトは外している。図13に、スクリーンの設置状態を示す。スクリーンの厚さは20mmである。スクリーン試験時のまくらぎ上面からバラスト上面までの高さは、（0mm、-20mm、-50mm）とする。スクリーンの角度は、スクリーンの下にバラストをはらんだ状態を想定し、最大角度を20°とする。すなわち、スクリーン試験時の試験条件は、高さ（0mm、-20mm、-50mm）と角度（0°、10°、15°、20°）を組み合わせる。また空気力の評価には、抗力 D 、揚力 L 、モーメント M を風洞試験風速により無次元化した、抗力係数 C_D 、揚力係数 C_L 、モーメント係数 C_M を用いた。風洞試験風速は27.8m/s、測定時間は20sである。その結果を図14に示す。図14より、スクリーンの高さや角度が大きいほど、スクリーンに加わる空気力係数は大きくなるのがわかる。

4.3 バラストスクリーンの飛散可能性の検討

スクリーン（中心パーツ）が飛散する可能性を検討する（ベルト、固定用ロープ、ジョイント全て無し条件）。スクリーンの飛散可能性は、スクリーンの下流側・下端回りに加わるモーメントにより評価した。図15にスクリーンを設置した際に、スクリーンの下流側・下端回りに加わるモーメントの模式図を示す。 M_s (Nm) は軌道

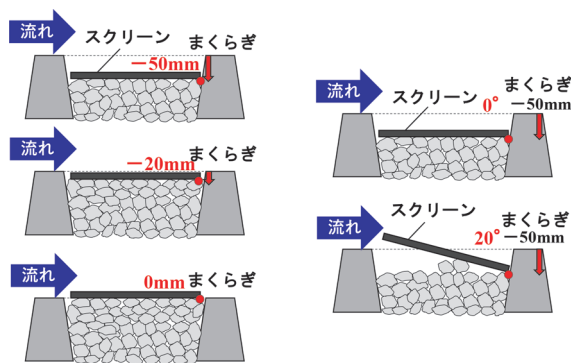


図13 バラストスクリーンの設置条件

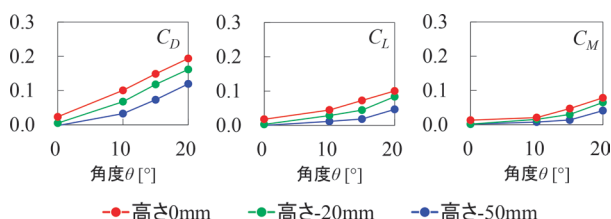


図14 バラストスクリーンに加わる空気力係数

面流れによるモーメント、 M_w (Nm) はスクリーンの重力によるモーメントである。ここで回転安定度 S を、 M_s/M_w と定義する。回転安定度 S が 1 を超える (M_s が M_w より大きくなる) と、スクリーンは浮き上がる。逆に、回転安定度 S が 1 未満の場合には、スクリーンが浮き上がることはない。 S の検討結果 (列車速度 300km 相当) を示した図 16 をみると、高さが 0mm、-20mm、かつ角度が 20° の場合に、回転安定度 S は 1 以上となり、スクリーンは浮き上がる可能性があることがわかる。このことから、固定用ロープを設置せず、高さや角度が大きい (高さ -20mm 以上、かつ角度 20° 以上) 場合には、スクリーンが浮き上がる可能性がある。しかし現実のスクリーンの設置条件は、高さ -50mm、角度 0° であり、本試験の結果からも回転安定度 S は、ほぼ 0 (図 16 参照) であることから、このような現象が生じることはないことがわかる。今回の試験は、スクリーンの飛散可能性を検討したものであり、現実には浮き上がることはな

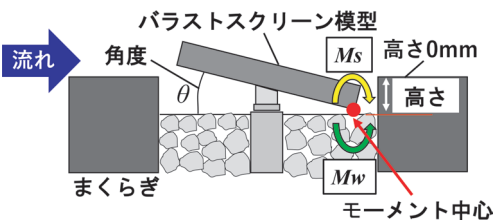


図 15 スクリーン下流側・下端のモーメント

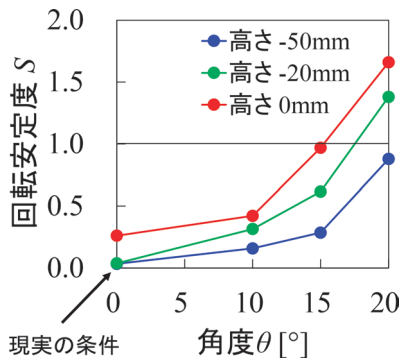


図 16 バラストスクリーンの飛散可能性の検討 (列車速度 300km/h 相当, 中心パーツ, ロープなし)



図 17 バラストスクリーンの挙動確認試験 (高さ-20mm, 角度 20°)

い点に、注意が必要である。

4.4 バラストスクリーンの挙動確認

図 17 に、高さ -20mm、角度 20° で、風洞試験風速を最大 71m/s (列車速度 399km/h 相当) まで上げた際の、スクリーン浮き上がり時の挙動を高速カメラで撮影した画像を示す。スクリーン浮き上がり時の挙動は、①風速が上がるにしたがって、中心パーツは徐々に浮き上がり始める。②ベルトを介して、中心パーツと外パーツは連結されているため、外パーツも中心パーツに引っ張られて持ち上がる。③その後、中心パーツの下流側も浮き上がり、中心パーツの下流側の一部がまくらぎ上を覆う。④送風を停止すると、スクリーンは下流側に移動したままであった。このことより、下流へ流されたスクリーンは、元の状態の様に戻らず、バラスト飛散防止の役割を果たせないこと、浮き上がったスクリーンは、車両限界や建築限界を支障する可能性があることがわかった。なお、本試験も、挙動確認のために実施した試験であり、高さ -20mm、角度 20° の設置条件は現実には存在しない。

5. まとめ

本研究では、今後の新幹線の延伸や速度向上等をふまえて、バラスト等の地上側敷設物の飛散防止対策に関する研究に活用可能な風洞試験方法を開発した。さらに開発した風洞試験方法を用いて、バラストやバラストスクリーンに加わる空気力の測定や、飛散や浮き上がる可能性の評価を行った。その結果を以下に示す。

- ①実物大のバラスト軌道模型を飛散防止ネットで覆い、バラスト等の飛散が可能な風洞試験方法を開発した。
- ②風洞のノズル床面にラフネスブロックを設置し、新幹線列車が通過する際の軌道面の風速分布を再現した。
- ③バラストに加わる空気力を測定した結果、バラストの設置高さがまくらぎより低い場合、バラストにはほぼ空気力は加わっていないことがわかった。
- ④バラストスクリーンに加わる空気力を、設置の高さや角度を変えて測定し、飛散する可能性のある高さや角度を明らかにした。
- ⑤バラストが飛散する際の挙動や、バラストスクリーンが浮き上がる際の挙動を明らかにした。

文献

- 1) 井門敦志：車上側および地上側からの計測による車両床下流れの評価，鉄道総研報告，Vol.23, No.7, pp.39-44, 2009
- 2) 岩崎誠，井門敦志，山崎展博，宇田東樹，若林雄介：新幹

- 線車両の床下流れの特性, 鉄道総研報告, Vol.29, No.5, pp.11-16, 2015
- 3) 吉田眞, 内田雅夫, 矢口直幸, 御船直人: 高速走行時のバラスト飛散防止対策, 鉄道総研報告, Vol.6, No.6, pp.27-36, 1992
- 4) 井上達哉, 中野高志, 井門敦志: 実物大軌道模型を用いて鉄道車両の通過時に誘起される軌道面付近の流れを再現した風洞実験方法, 日本実験力学会講演論文集, B208, 2022
- 5) 井門敦志: 大型低騒音風洞における鉄道の技術開発の変遷, RRR, Vol.79, No.3, pp.4-9, 2022