

横風による輪重・横圧変化が乗り上がり脱線に及ぼす影響

車両構造技術研究部 車両運動研究室

室長 日比野 有

1. はじめに

横風が車両の走行安全性に与える影響として、一般的には転覆が問題とされることが多く、これまでの研究でも転覆限界風速の評価精度の向上に主眼が置かれてきた。横風による転覆事故は、ひとたび発生すれば大きな被害が想定されることから、転覆に関する研究の重要性は今後も変わらないと考えられる。一方で、横風が乗り上がり脱線に対して影響を及ぼす可能性が考えられる。すなわち曲線外軌側から内軌側に向かって吹く風によって外軌側の輪重が減少し、無風状態よりも脱線係数が大きくなる可能性が考えられる。しかし、このとき同時に外軌側の横圧も減少する可能性があるため、横風が乗り上がり脱線に及ぼす影響を一概に評価することはできず、鉄道総研における研究例もほとんど無い。また、実際の事件事例として横風が乗り上がり脱線に影響を及ぼしたとされる報告例も無い。ただし報告例が無いのは、車両に作用した風速を事故時にさかのぼって正確に評価する手段が一般的には無いためであり、横風の影響が無いことを示しているものではないと考えられる。従って、車両の軽量化などにより横風の影響を受けやすくなっている近年の状況を考慮すると、横風が乗り上がり脱線に及ぼす影響を把握しておく必要があると考えられる。

そこで、横風による輪重・横圧の変化が乗り上がり脱線に及ぼす影響を検討するために、縮尺1/10の車両模型を用いた横風下走行試験（風洞試験）を実施し、風速、走行速度、車体形状、曲線カントの有無などが乗り上がり脱線に及ぼす影響を詳細に調べたので、これらの結果について報告する。

2. 横風下走行試験（風洞試験）

2.1 試験概要

横風が乗り上がり脱線に及ぼす影響を確認するために、風洞に曲線軌道を設置し、横風下を走行する車両模型の輪重・横圧を測定した。使用した車両模型は、在来線の通勤型車両を模擬した縮尺1/10の模型（図1）であり、空気力に影響を及ぼす車体形状のみならず、台車のばね系や車体の大変位を抑制するストッパも忠実に再現され、外力に対する車体変位および輪重変動が実物と相似になるように設計されているのが特徴である。

風洞試験は、鉄道総研の大型低騒音風洞（ゲッチンゲン型水平単帰還方式）の開放型測定部で実施した。試験に使用した風洞気流は、境界層吸い込み装置を動作させた状態で風洞床面に自然に発達する境界層を伴う一様流とした。なお、上述の通り車両模型は空気力と車体変位との関係に原型との相似則が成り立つように設計したため、模型における各ばね定数は原型の



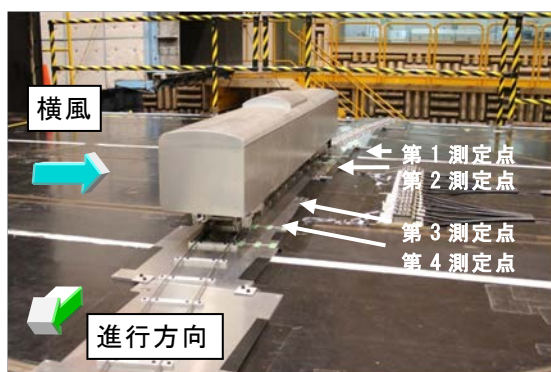
図1 縮尺1/10車両模型

1/100 倍，質量は 1/1000 倍となっている。よって，車両に働く重力は原型の 1/1000 倍となり，模型に作用する空気力も 1/1000 倍と考えることから，風速は原型の $1/\sqrt{10}$ 倍となる。従って，風洞試験における試験風速を実車相当に換算する場合には， $\sqrt{10}$ 倍すればよい（例えば，風洞試験における風速 10m/s は，実車では約 31.6m/s に相当する）。

なお，上記の相似則を考慮して車両模型を設計した関係上，車輪／レール間に作用する力のうち，クリープ力については同一の相似則が成り立たないと考えられる。従って，横圧要素のうちクリープ力に起因する成分の大きさが実際とは若干異なる可能性があるため，脱線係数等の値は参考値として扱うこととし，本報告では定性的な傾向の把握に主眼を置いた。

2.1 測定方法および試験条件

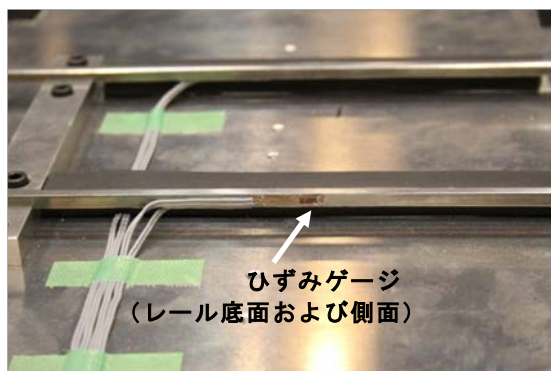
横風下走行試験の様子を図 2 に示す。風洞床面に設置した厚さ 10mm のアルミプレート上に曲線軌道を敷設した。線形は半径 10m の円曲線（実車相当半径 100m）とし，カントは 0mm（カント無し）と 10.5mm（実車相当 105mm）の 2 種類とした。なお，ここでのカントとは，軌道面全体を 105mm のカントに相当する傾斜角（約 5.6 度）だけ傾けたものであり，内外軌の高低差で付与する実際のカントとは若干異なる（図 2 (b)）。輪重および横圧は，レールの底面および側面に貼付したひずみゲージにより測定した（図 2 (c)）。輪重・横圧測定箇所は 4 断面（4 軸分＝8 車輪分）であり，車両が風洞中心上にあるときの各輪軸の位置とした。以下，風上側に向かって右から順に，第 1～第 4 測定点と呼ぶ（図 2 (a)）。なお，レールは SS400 みがき四角棒（5×5mm）を使用し，ゲージコーナー相当部に R1.3mm の面取り加工（R=13mm の実際のレールゲージコー



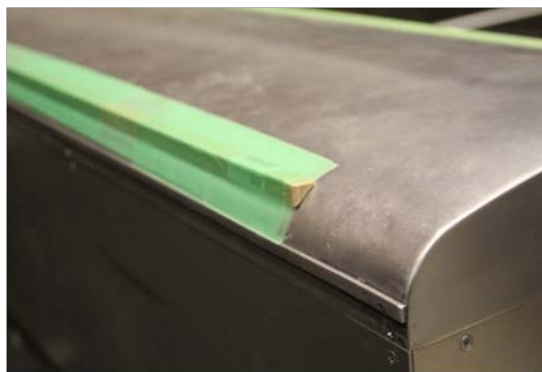
(a) カント無し条件



(b) カント設定状況



(c) 輪重・横圧測定点



(d) 車体形状例（通勤型車（肩角））

図 2 横風下走行試験の様子

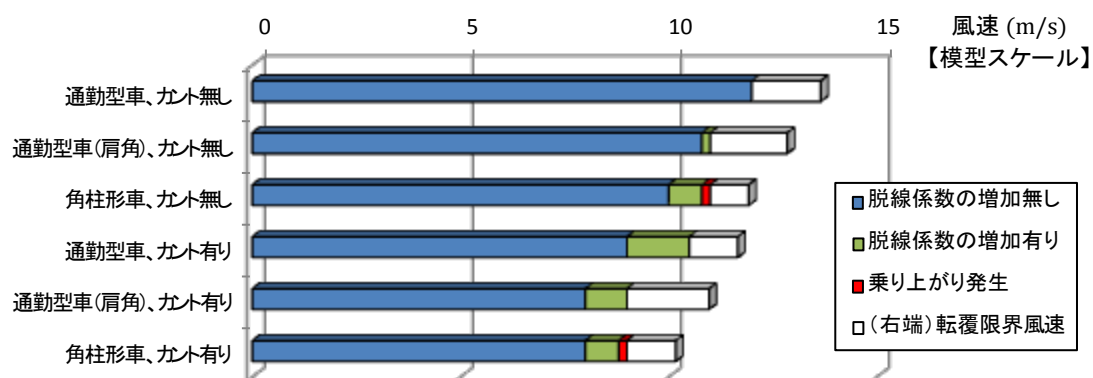
ナーに相当)を施してある。車両は手押しで初速を与え、測定点を惰行で通過させた。本試験における走行速度の実績は、0.3~1.8m/s程度(実車相当4~20km/h程度)であった。これらの走行速度は、直近の2箇所の測定点間を通過した時間とその距離から求めた。

車体形状は次の3種類とした。1種類目は縮尺1/10車両模型のオリジナル形状(図1)であり、以下「通勤型車」と呼ぶ。2種類目は、通勤型車の屋根肩に角部を有する部材を付加したものである。これは、屋根肩の歩み板の有無が空気力係数に比較的大きな影響を及ぼすことが報告されていることから、歩み板を大きめに模擬したものである。以下、便宜上「通勤型車(肩角)」と呼ぶ(図2(d))。3種類目は、車体形状を角柱形としたものである。これは、これまでの風洞試験結果から横力係数が大きくなる傾向が確認されている屋根が角張った車両を模擬したものである。ここでは車体形状の影響のみを通勤型車と比較するために、車体高さ等の外形寸法を通勤型車と同一としており、車体質量もほぼ同等である。以下「角柱形車」と呼ぶ。

試験風速は、いずれの軌道・車両条件においても無風状態からスタートし、4m/s、8m/sと徐々に風速を増加させた。9m/s以上では、乗り上がりや転覆の有無を確認しながら、試験可能な範囲でより高い風速条件を設定した。

3. 試験結果

横風下走行試験で得られたデータのうち、先頭軸が第3測定点を通過する際の測定結果について、輪重、横圧、脱線係数(横圧/輪重比)を、それぞれ外軌側、内軌側について整理した。第3測定点を選択した理由は、他の測定点に比較して測定結果のばらつきが小さく、安定した走行状態が確認されたことによる。なお、本試験における走行速度は前述の通り、実車相当に換算すると4~20km/h程度であった。半径100m、カント105mmの曲線における均衡速度は35km/hであることから、カント有りの試験条件は、いずれもカント超過に該当する。データ整理の結果、いずれのケースにおいても試験風速が増加するにつれて外軌側の輪重が減少するとともに外軌側の横圧も減少する傾向が見られた。結果として外軌側の脱線係数は、試験風速が低いときにはその増加に関わらずほぼ一定の値であったが、試験風速が高い場合には試験条件により変化の様子が異なり、風速が増加しても脱線係数がほとんど変化しないケースと急激に大きくなるケースがあった。一方、内軌側の横圧/輪重比については、いずれのケースにおいても試験条件に関わら



* 棒全体の長さが各条件における転覆限界風速を表す
* 白色を除いた部分が、今回の試験風速の範囲を表す

図3 試験風速と乗り上がり発生状況との関係

ず 0.3～0.5 程度の範囲でほぼ一定の値であった。これらの値は、通常の現車試験において測定される値とほぼ同等であることから、横圧のうちクリープ力に起因する成分の大きさが相似則の関係から実際とは若干異なる可能性が考えられたものの、相似則の影響は小さいと考えられる。なお、今回の走行速度条件では、測定された各項目の走行速度依存性は比較的小さかった。

図 3 に試験風速と乗り上がり発生状況との関係を示す。「通勤型車」および「通勤型車（肩角）」では、今回の試験風速の範囲では乗り上がりは発生しなかった。従って横風による運転抑止規制の発令風速（一般的には 25m/s または 30m/s 程度）以下では乗り上がりが発生する可能性は低いと考えられる。「角柱形車」では、カント無しの場合には試験風速 11m/s（実車相当約 35m/s）、カント有りの場合には試験風速 9m/s（実車相当約 28m/s）で乗り上がりが発生するケースが見られた。いずれも乗り上がりが発生する条件は、転覆限界風速に近い風速が作用し、外軌側の輪重減少率が 80%程度を超えるような状態であった。一方で、横風による脱線係数の増加については、「通勤型車、カント無し」以外のすべての条件で確認された。ただし脱線係数の増加が見られる条件は、最低でも風速 8m/s（実車相当約 25m/s）以上の風が作用する場合であり、転覆限界風速が高い条件ほど脱線係数の増加が始まる風速も高かった。また、実車相当風速 25m/s 程度未満の風速では、横風が脱線係数に及ぼす影響はほとんど見られなかった。なお、今回の試験は乗り上がり脱線に対して特に厳しい急曲線・高カント条件を設定した。通常、このような急曲線では脱線防止ガードが設置されており、逆にこれよりも緩い曲線であれば、外軌側横圧もそれほど大きくなると考えられる。従って、転覆に対する安全性が確実に担保されていれば、横風による乗り上がり脱線に対する安全性も合わせて確保されていると推定され、横風による乗り上がり脱線を第一義に考慮した新たな対策の必要性は低いと考えられる。

4. まとめ

横風が乗り上がり脱線に及ぼす影響を確認するために、縮尺 1/10 車両模型を用いた横風下走行試験（風洞試験）を実施した。風洞試験から得られた結果は以下の通りである。

- ① 転覆限界風速に近い風が作用し、外軌側の輪重減少率が 80%程度を超えるような状態で、乗り上がりが発生する場合があることが分かった。
- ② 脱線係数の増加が見られる条件は、最低でも実車相当風速 25m/s 程度以上の風が作用する場合であり、転覆限界風速が高い車両ほど脱線係数の増加が始まる風速も高かった。逆に、実車相当風速 25m/s 程度未満の風速では、横風が脱線係数に及ぼす影響はほとんど見られなかった。
- ③ 転覆に対する安全性が確実に担保されていれば、乗り上がり脱線に対する安全性も合わせて確保されていると考えられ、横風による乗り上がり脱線を第一義に考慮した新たな強風対策の必要性は低いと考えられる。

なお、今回報告した内容は、縮尺 1/10 の車両模型を用いた試験結果であり、相似則の関係から、横圧要素のうちクリープ力に起因する成分の大きさが実際とは若干異なる可能性がある。従って、脱線係数等の絶対値や、脱線係数の増加が見られる風速値等に関する定量的な議論を行うためには、今後さらに検討を深めていく必要があると考えられる。さらに、軌道に構造的な平面性変位（ねじれ）のあるカント逡減区間では乗り上がり脱線に対する安全余裕が他の軌道条件と比較して相対的に低いため、こうした条件下における横風の影響についても別途精査していく必要があると考えられる。