

急激な風の立ち上がりに対する車両の挙動解析

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

近年、竜巻などの突風による被害が日本でも目立つようになってきた。例えば、2005年12月に羽越線で発生した特急いなほ号の脱線事故の原因は「局地的な突風」とされており、また2006年9月に日豊線で発生した特急にちりん号の脱線事故の原因は「竜巻による突風」とされている。さらに、2006年11月に北海道佐呂間町で、また2012年5月に茨城県つくば市などで竜巻災害が発生し、鉄道被害こそ無かったものの人命が失われるなどの甚大な被害が生じている。

鉄道車両の横風に対する走行安全性評価手法として、鉄道総研では主として、外力の静的なつり合いから風速と輪重減少率との関係を求める静的解析法(総研詳細式)を用いている。これは、通常の横風に対する安全性を評価する手法としては概ね妥当であることが、実車を用いた検証試験などによって確認されている。しかし、突風に対する車両の応答は、突風そのものの特性(風速の空間分布や時間変化)を含め、ほとんど未解明である。

本研究では、突風に類する風の急激な立ち上がりの例として、車両がトンネル等から出た直後に強風にさらされる状況を想定し、縮尺1/10の車両模型を用いた横風下走行試験およびシミュレーションによるパラメータスタディを行い、空気力の立ち上がり特性と車両挙動との関係を検討したので、その結果を紹介する。

2. 縮尺1/10車両模型

本研究で使用した縮尺1/10車両模型の外観を図1に示す。この模型は、空気力に影響を及ぼす車両形状のみならず、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、外力に対する車体の変位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。車体形状・寸法はJR103系通勤型車両をモデルとしており、模型車体の長さは約2mである。一方、台車は一般的なボルスタレス台車をモデルとしており、車両諸元も近年の標準的な通勤型車両の値を参考にしている。



図1 縮尺1/10車両模型

3. 風洞試験

横風下走行試験に先立ち、車両模型の基本的な空気力特性を把握するために風洞試験を実施し、試験風速9m/sおよび11m/sの条件で、各風向角における各車輪の輪重を測定した。なお、風向角とは車両に作用する風の角度のことで、車両前方から作用する場合を0°、車両真横から作用する場合を90°とする。

風洞試験では各車輪直下に設置されたロードセルにより輪重を測定し、輪重値から各風向角に

における空気力係数を推定した。なお、空気力係数とは風速の2乗と空気力との関係を表す比例定数であり、ここでは車両の転覆に大きな影響を及ぼす横力、揚力、ローリングモーメントについて空気力係数を推定した。空気力係数の推定結果については、後述の横風下走行試験結果と併せて図4に示す。

4. 横風下走行試験

走行する車両が横風に遭遇した際の空気力の変動や車両の挙動を調べるために、前述の縮尺1/10車両模型を用いた横風下走行試験を行った。走行試験は、JR東日本総合研修センター内に仮設された模型走行装置を使用して行った。横風下走行試験の様子を図2に示す。本試験装置は、延長約100mの走行路とその脇に設置された送風機から構成され、長さ3m(車両模型1.5両分)の吹き出し口から車両模型に風を当てる構造となっており、無風区間を走行してきた車両は、先頭部から強風区間に順次突入する。試験における走行速度は約5~30km/h(実車相当約15~95km/h)で、試験風速は約4~11m/s(実車相当約12~35m/s)であり、車体表面圧力、車体ロール角、軸ばね作用荷重などを測定した。

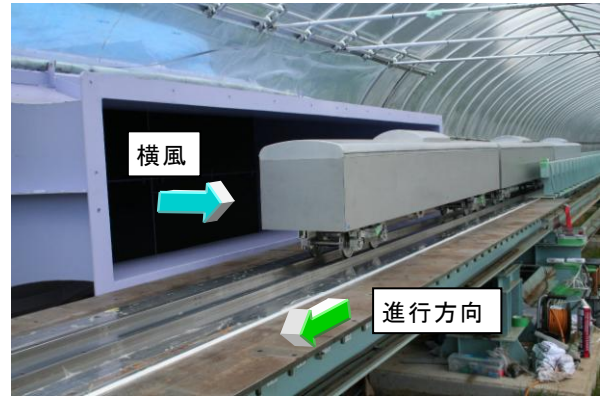


図2 横風下走行試験

横風下走行試験では、車体表面圧力の測定結果から空気力係数を推定した。具体的には、車体表面に設けられた95点の圧力計の測定結果から1車両に作用する空気力を推定し、それを動圧および車体側面積(モーメント係数の場合にはさらに車体高さ)で除することにより、空気力係数を求めた。送風区間を走行する際の空気力係数の時系列波形例を図3に示す(正確には、空気力の時系列波形を、動圧を一定と仮定して無次元化したものであり、その最大値が前述の風洞試験における空気力係数の値に対応する)。このようにして推定された空気力係数のうち横力係数について、前述の風洞試験結果と併せて図4に示す。同図から、横風下走行試験において車体表面圧力測定結果から推定された横力係数は、風洞試験において輪重測定結果から推定された横力係数よりも1.5倍程度大きいことが分かる。これは、横風下走行試験と風洞試験とでは、空気力係数の推定方法や推定精度が異なることによるものと考えられる。

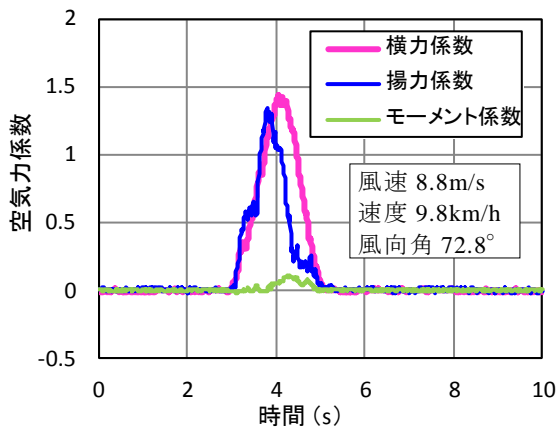


図3 空気力係数の時系列波形例

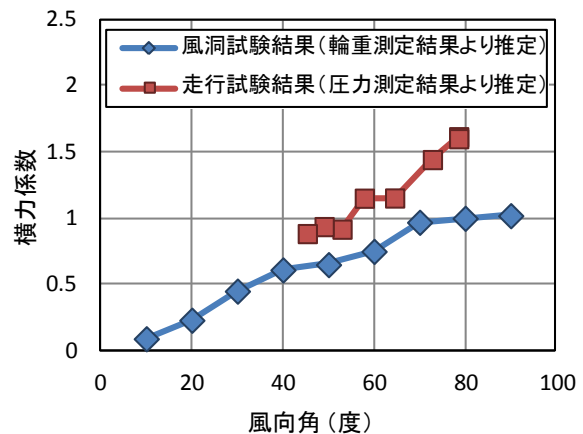


図4 横力係数推定結果

5. シミュレーションによる車両挙動の検討

5.1 入力空気力の考え方

急激な風の立ち上がりに対する車両の挙動を検討するために、風の立ち上がり時間や立ち上がり幅をパラメータとしたシミュレーションを行い、空気力の立ち上がり特性と車両挙動との関係を確認した。

最初に、シミュレーションに入力する空気力波形の与え方を検討した。図3で示した実測波形から推定される空気力(①実測空気力という)を入力条件としたシミュレーションを行い、車両ロール角について実測値と比較した結果、シミュレーション結果の方が大きく変位していることが分かった(図5①)。これは図4で示したように、横風下走行試験では横力係数が大きめに推定されているためであると考えられる。そこで、図3で示した横力係数の最大値が風洞試験結果と等しくなるように、補正係数(風洞試験結果と走行試験結果との比)を実測空気力に乗じたもの(②補正空気力という)を入力条件としたシミュレーションを行った。その結果、シミュレーション結果は、時系列的な細かい変動は実測波形とは異なるものの、最大変位は概ね実測値と合っていることが分かった(図5②)。さらに、任意の風の立ち上がりに対する車両の挙動を検討するために、入力空気力波形を簡易的に模擬する方法を検討した。具体的には、空気力の立ち上がり波形を正弦波の2乗で近似し、その最大値を風洞試験結果から評価し、立ち上がり時間を実測結果に基づいて車体長さが見かけ上長くなったとみなす「補正長さ」を用いて補正することにより、模擬的な空気力波形を仮定した(③模擬空気力という)。模擬空気力を用いたシミュレーションの結果は、実測結果および補正空気力によるシミュレーション結果と概ね同等となることが確認された(図5③)。他の試験条件についても補正空気力および模擬空気力を入力条件として同様にシミュレーションを行い、その結果を走行速度と車体ロール角の最大変位との関係として整理したものを、横風下走行試験における実測結果と併せて図6に示す。同図から、いずれの条件においても補正空気力および模擬空気力によるシミュレーション結果と実測結果は概ね一致することが分かった。ただし、模擬空気力の最大値の評価や立ち上がり時間の補正方法については、今回の横風下走行試験結果から経験的・統計的に求めたものであり、理論的な根拠から導出したものではない。この点については、空気力評価の問題として今後さらに検討する必要がある。

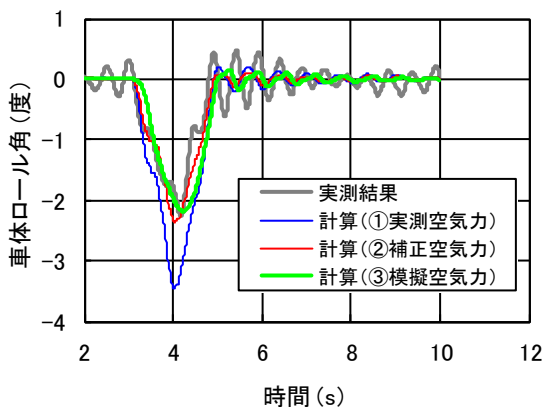


図5 車体ロール角の時系列波形の比較

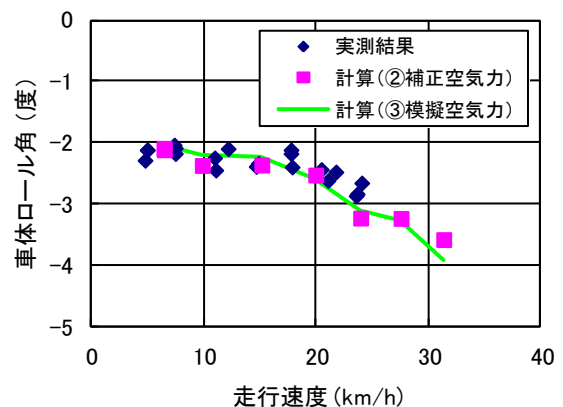


図6 車体ロール角の最大変位の比較

5.2 模擬空気力によるパラメータスタディ

前節で仮定した模擬空気力を用いて、風の立ち上がり時間と立ち上がり幅に関するパラメータ

スタディを行った。具体的には、実車相当換算の立ち上がり時間を 1.2 秒～10.8 秒（走行速度 10km/h～117km/h でトンネル出口から退出する状況に対応）、横力の立ち上がりを 0→25kN, 10→25kN, 20→25kN の 3 ケースとした。シミュレーションで得られた走行速度と輪重減少率との関係を図 7 に、図 7 の横軸を立ち上がり時間に換算した図を図 8 にそれぞれ示す。両図から、走行速度が速くなるほど、すなわち立ち上がり時間が短くなるほど輪重減少率が大きくなるのが分かる。また、横力の最大値が等しい場合でも、立ち上がり幅が大きいほど、輪重減少率が大きくなるのが分かる。また、走行速度が 40km/h 程度よりも遅い場合には、すなわち横力の立ち上がり時間が 3 秒程度よりも長い場合には、静的解析結果との差は小さいことが分かる。

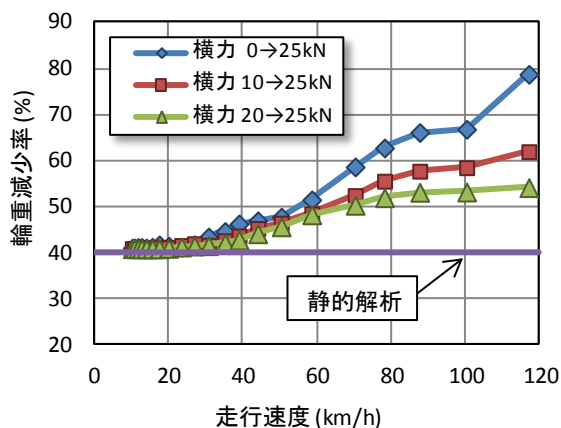


図 7 走行速度と輪重減少率との関係

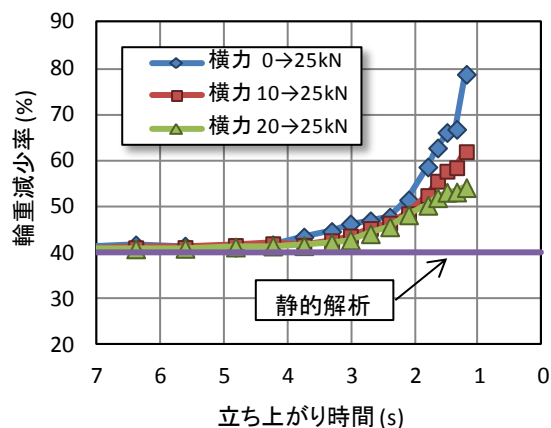


図 8 立ち上がり時間と輪重減少率との関係

6. まとめ

風の急激な立ち上がりに対する車両の挙動を調べるために、縮尺模型を用いた横風下走行試験およびシミュレーションによるパラメータスタディを行った。空気力の立ち上がり特性と車両挙動との関係を検討した結果は次の通りである。

- (1) 縮尺模型を用いた横風下走行試験により、車両に働く空気力の時間変動を明らかにした。また、その結果を、定置模型を用いた風洞試験結果により補正することによって、車両の挙動を概ね適切に評価できることを明らかにした。
- (2) 風の急激な立ち上がりを模擬する空気力波形として、空気力の最大値を定置模型による風洞試験結果から評価し、立ち上がり波形を正弦波の 2 乗で近似し、車体長さが見かけ上長くなったとみなす「補正長さ」を用いて立ち上がり時間を求めた波形を仮定することにより、車両の挙動を概ね適切に評価できることを明らかにした。
- (3) 横力の立ち上がり時間が短くなるほど、輪重減少率の最大値が大きくなり、横力の最大値が等しい場合でも、横力の立ち上がり幅が大きいほど、輪重減少率の最大値が大きくなるのが明らかになった。
- (4) 近年の一般的な通勤型車両に 25kN 程度の横力（風速 25～30m/s 程度に相当）が作用する場合には、横力の立ち上がり時間が 3 秒程度よりも緩やかであれば、静的解析でも転覆に対する安全性を概ね適切に評価できることが明らかになった。
- (5) トンネル出口等における横風対策として、部分的に防風柵などを敷設するなどして、横力の立ち上がりを段階的に抑制することが効果的であることが明らかになった。