

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

横風に対する車両の動きを見る

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ました。例えば、2005年12月に羽越線^{うえつ}で、また2006年9月に日豊線^{にっぽう}で、それぞれ突風が原因と見られる脱線事故が発生しています。突風を受けた車両の安全性評価については、突風そのものの特性（風速の空間分布や時間変化など）を含め、まだまだ解明されていない部分が多くあるのが現状ですが、ここでは、変動する横風に対する車両の安全性評価の基礎的な検討として、急激に風が立ち上がる場合の車両の動きについて検討した例を紹介します。



日比野 有
Yu Hibino
車両構造技術研究部
車両運動研究室
室長
【専門分野】 車両運動、
走行安全性、横風



金元 啓幸
Hiroyuki Kanemoto
車両構造技術研究部
車両運動研究室
副主任研究員
【専門分野】 車両運動、
走行安全性、横風

はじめに

鉄道車両の横風に対する安全性を評価する方法として、風の変動を考慮しない、つまり一定の風が車両に作用していると仮定する静的解析式が一般的に使われています。この種の計算式として、いわゆる「国枝式」¹⁾が日本では古くから使われてきましたが、2003年に、国枝式をベースに近年の研究成果や事故調査から得られた知見を反映させた「総研詳細式」²⁾が日比野らにより提案され、現在鉄道総研では主にこの式を用いて車両の転覆限界風速を評価しています。しかし、これらの式は

いずれも静的解析式であるため、風の変動に対する車両の動きを評価することはできません。そこで、急激に風が立ち上がる場合の車両の動きを調べるために、縮尺1/10の車両模型を用いた横風下走行試験とシミュレーションによる検討を行い、風の立ち上がり特性と車両の動きとの関係を詳細に調べました。

縮尺1/10車両模型

縮尺1/10車両模型の外観を図1に示します。この模型は、空気力に影響を及ぼす車両形状はもちろんのこと、



図1 縮尺1/10車両模型

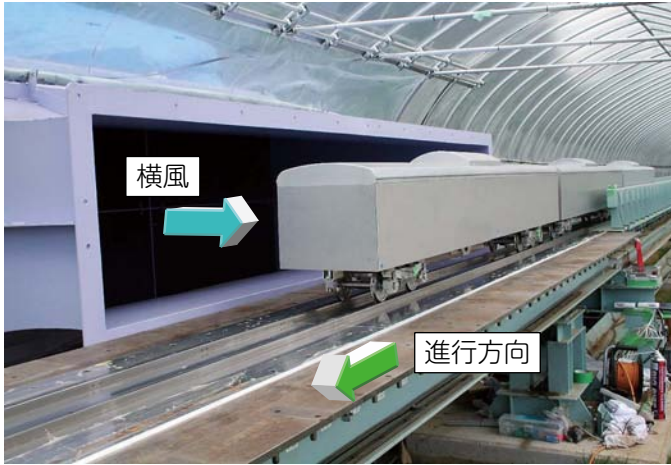


図2 横風下走行試験の様子



図3 加速台車

台車のばねなども忠実に再現され、力を受けたときの車体の動きが、実物と相似になるように設計されているのが特徴です。具体的には、車両形状や寸法は、JR103系通勤型車両をモデルとしていて、模型車体の長さは約2mとなっています。一方、台車は一般的なボルスタレス台車をモデルとしていて、車体質量やばね定数などの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ます。車輪も実物の形状を模擬しており、ベアリングを介して軸ばねおよび台車枠に固定されているため、惰性で走行することができます。ただし、台車にモーターは付いていないので自力で走行することはできません。

横風下走行試験

走行する車両が横風にさらされたときの車体に作用する空気力や車両の動きを調べるために、上述の縮尺1/10車両模型を用いて横風下走行試験を行いました。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いました。横風下走行試験の様子を図2に示します。この試験装置は、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います。無風区間を走行してきた車両は、先頭部から順次強風区間に突入する形になりますが、これは例えば、車両がトンネルから出た直後に急な横風を受ける状況を模擬していることとなります。

車両模型は加速台車により加速しました(図3)。以下に、簡単に仕組みを説明します。加速台車には可倒式のけん引フックがあり、加速時にはけん引フックを立てて車両模型のけん引バーに掛けておきます。加速台車の一端にはゴム紐が固定されており、ゴム紐の弾性を利用して加速台車を引っ張ります。走行路のうち約50mある加速区間の終端には加速台車のブレーキがありますが、加速台車はここで止められるのですが、このときけん引フックが車両模型から外れ、その後車両模型は送風区間を惰性で通過します。

(1) 試験条件

上に述べたとおり、車両模型をゴム紐の弾性を利用して加速させ、送風区間を惰性で通過させました。模型車両の走行速度はゴム紐の張力を変えることによって調整し、結果として約5～30km/h(実車相当約15～95km/h)の幅広い速度条件で試験を行いました。

また、試験風速については、約4～11m/s(実車相当約12～35m/s)の範囲で4段階の条件を設定しました。そのほか、車両は1両～3両編成で試験を行い、先頭車条件と中間車条件との違いが車両の動きに及ぼす影響などを調べました。

(2) 測定項目

主な測定項目は、車体表面圧力、車体ロール角、軸ばね作用力です。まず、車体に働く空気力を推定するために、車体表面の圧力を測定しました。具体的には、車体表面の95箇所^{ひも}に圧力計を設置して各箇所の圧力を測定し、これらの測定値に面積をかけて足し合わせることで1車両に働く空気力を推定しました。また、車体の動きを確認するために、小型のジャイロを車内に載せ、車体ロール角を測定しました。さらに、輪重の変動を把握するため、輪重との相関が比較的高いと考えられる軸ばね作用力(軸ばねと台車枠との間に作用する上下方向の力)をロードセルにより測定しました。

(3) 測定結果

車体表面圧力の測定結果から推定した空気力の時間変化の例を図4に示します。この図では、空気力の大小関係について過去の風洞試験結果との比較

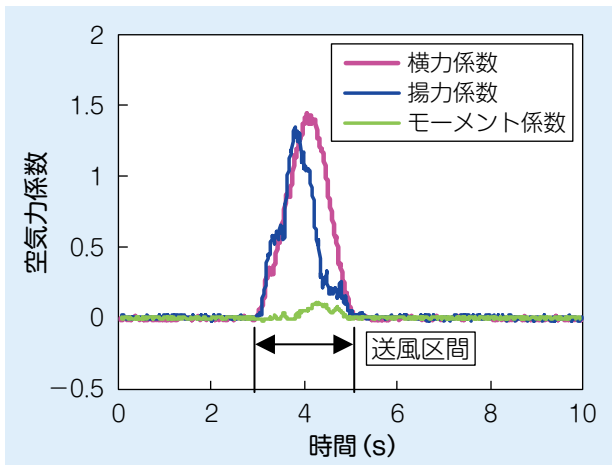


図4 空気力の時間変化の例

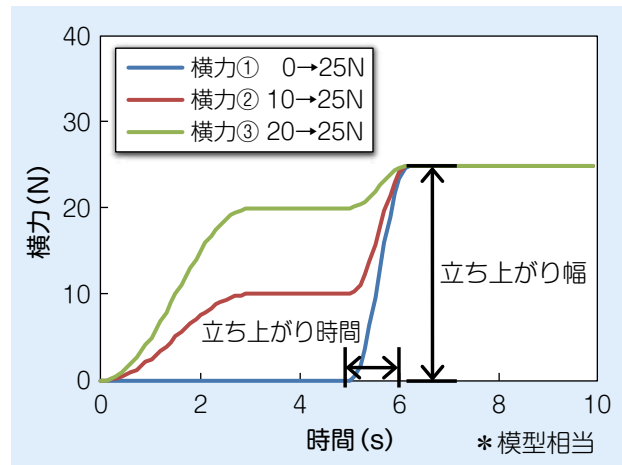


図5 シミュレーションに用いた空気力の波形例

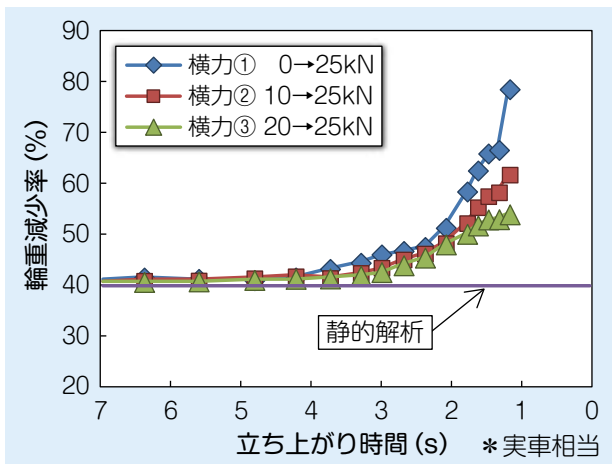


図6 横力の立ち上がり時間と輪重減少率との関係

を可能にするために、空気力を空気力係数(※参照)に換算(無次元化)して示しています。図4から、送風区間を通過する間の空気力の増減の様子がわかります。車両の走行安全性を検討する際には、特にこの横力の立ち上がり方が重要で、立ち上がり波形の形状や立ち上がりにかかる時間が車両の動き

に大きな影響を及ぼします。なお、これまでに実施してきた風洞試験、すなわち、模型を風洞床面に固定し、風洞のターンテーブルを回転して風向角を変化させることによって車両の走行状態を模擬した風洞試験で得られた空気力係数よりも、今回の横風下走行試験で得られた空気力係数の方が大きい傾

向が見られました。その原因としては、測定方法や測定誤差の影響などが考えられますが、今後さらに検討を続けていく必要があると考えられます。

シミュレーション

急激に風が立ち上がる場合の車両の動きを調べるために、シミュレーションによる検討(パラメータスタディー)を行い、風の立ち上がり特性と車両の動きとの関係を詳細に調べました。シミュレーションに用いた空気力の波形例を図5に示します。横力の立ち上がりの形は、図4の実測結果を参考に正弦波の2乗で近似しました。また、トンネル出口を想定して、横力が立ち上がった後は、その値が継続すると仮定しました。例えば、青線で示した横力①は、0Nから25Nまで1秒で立ち上がり、その後25Nが継続して作用することを示しています。この立ち上がり時間をさまざまに変えることによって、立ち上がり時間が車両の動きに及ぼす影響を確認しました。また、立ち上がり幅については、横力②のように10Nから25Nに立ち上がる場合と、横力③のように20Nから25Nに立ち上がる場合を想定し、それぞれ横力①の場合と同じように立ち上

※ 空気力係数

一般的に空気力は風速の2乗に比例する形で表され、その比例定数を空気力係数と呼びます。空気力係数には、車体の横方向に働く力(横力)に関する横力係数、車体の上下方向に働く力(揚力)に関する揚力係数などがあり、特に横力係数が車両の走行安全性に大きく関係します。

【横力の場合】

$$F_s = \frac{1}{2} C_s \rho u^2 S$$

F_s : 横力 u : 風速
 C_s : 横力係数 S : 車体側面積
 ρ : 空気密度

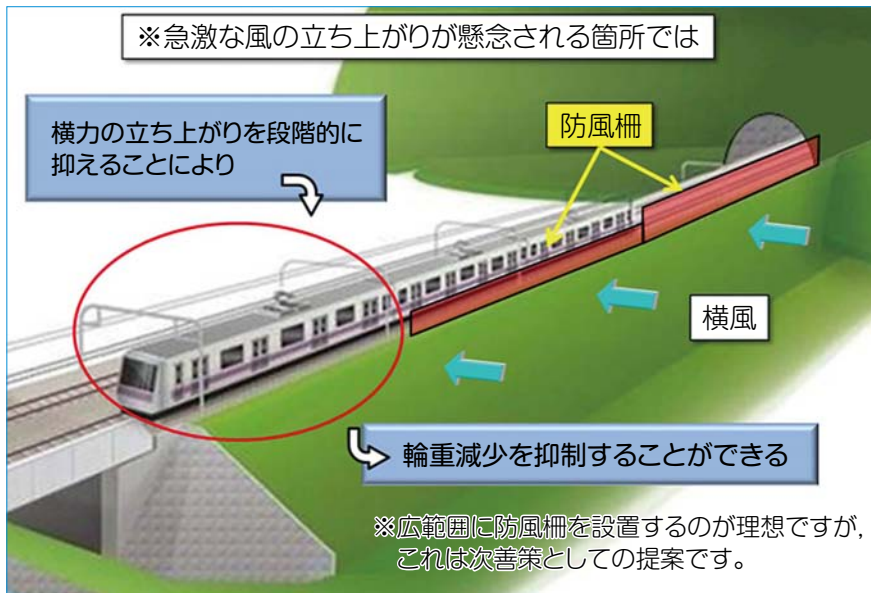


図7 高さを段階的に変えた防風柵のイメージ

がり時間をさまざまに変化させて計算しました。なお、図5は、図4に合わせて模型スケールで示しています。これを実車相当に換算する場合には、横力については1000倍、時間については $\sqrt{10}$ 倍とします。

図6に計算結果の例を示します。横軸は横力の立ち上がり時間、縦軸は輪重減少率の最大値を表しています。この図では、横力の立ち上がり時間を感覚的に把握しやすくするため、実車スケールで示しています。なお、横軸は右へ行くほど車両の走行速度が速いことを表しており、グラフの右端のプロットは、走行速度約120km/hに相当します。図6から、走行速度が速くなるほど、すなわち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ることがわかりました。また、今回の計算例では横力①～③の最大値はいずれも実車相当で25kNでしたが、横力の最大値が同じ場合でも、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ことがわかりました。ところで、横力25kNに対する輪重減少率を、左右振動加速度が

0m/s²という仮定の下で総研詳細式により求めると、約40%でした(図6に紫色で示した実線)。したがって、今回の計算例のように近年の標準的な通勤型車両の場合には、横力の立ち上がり時間が3～4秒程度よりも長い場合には、静的解析結果と動的解析(シミュレーション)結果との差は小さいことがわかりました。

まとめ

急激に風が立ち上がる場合の車両の動きを調べるために、縮尺1/10の車両模型を用いた横風下走行試験とシミュレーションによる検討を行い、風の立ち上がり特性と車両の動きとの関係を詳細に調べました。その結果、横力の立ち上がり時間が短いほど、また、横力の最大値が同じ場合でも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ことがわかりました。このことから、車両がトンネルから出た直後に急な横風を受けるような状況が懸念される箇所では、横力の立ち上がりを段階的に抑えることによって、最終的にさらされる横力が同じであっ

ても輪重減少を抑制できる可能性が考えられます。つまり、図7にイメージ図として示すように、最終的には赤丸で囲ったように防風柵が無い箇所を走行する場合でも、トンネル出口付近に高さを段階的に変えた防風柵を設置することによって、防風柵が全く無い場合と比較して輪重減少を抑えることができると考えられます。もっとも、トンネル出口付近を含めて広範囲に、すなわち強風が想定されるすべての範囲に、十分な高さの防風柵を設置することが、最も望ましいことは言うまでもありません。上記の提案は、あくまでもそれがかなわない場合(現実にはこの場合の方が多いのですが)の次善の策となります。

なお、横風に対する安全性を検討する際には、車両の転覆限界風速だけでなく、防風柵などのハード対策や運転規制ルールなどのソフト対策、強風特性の把握、風観測方法など、多岐にわたる項目について包括的に検討することが重要です。鉄道総研では、車両、空力、気象の各分野の研究者が連携を取りながら、この横風問題に取り組んでいます。

縮尺1/10車両模型を用いた横風下走行試験では、JR東日本研究開発センター安全研究所およびJR東日本総合研修センターの関係者の皆様には多大なるご理解とご協力を賜りました。ここに改めて深謝の意を表します。RRR

文献

- 1) 国枝：鉄道車両の転ぶくに関する力学的理論解析，鉄道技術研究報告，No.793，1972
- 2) 日比野，石田：車両の転覆限界風速に関する静的解析法，鉄道総研報告，Vol.17，No.4，pp.39-44，2003