

左右振動加速度の実測値を考慮した転覆限界風速評価

日比野 有* 金元 啓幸*

Evaluation of the Critical Wind Speed of Overturning
in Consideration of the Measured Lateral Vibrational Acceleration

Yu HIBINO Hiroyuki KANEMOTO

The critical wind speed of overturning obtained by the RTRI detailed equation, which is a method of static analysis of railway vehicle overturning due to cross wind, tends to be lower than that intuitively estimated because it assumes the superposition of the worst conditions. In order to improve the accuracy of the evaluation, the previous researches focused on the evaluation of the aerodynamic forces that have the greatest influence on the calculation results, but little study on the lateral vibrational inertia force has been conducted. Therefore, in order to evaluate the critical wind speed of overturning reflecting the actual conditions, we examined the evaluation method based on the measured values of the lateral vibrational acceleration.

キーワード：横風，転覆限界風速，総研詳細式，左右振動加速度，頻度分布，確率

1. はじめに

鉄道車両の転覆限界風速を評価する総研詳細式¹⁾は、従来用いられてきた国枝式²⁾をベースに近年の研究成果を反映させた計算式であるが、計算の中で考慮する各条件については最悪条件の重ね合わせを前提としている。そのため、計算結果が経験的に推測される風速よりも低くなる傾向があり、より実態に即した評価が求められている。転覆限界風速の推定精度を高めるために、これまでの研究では、最も影響度の大きい空気力の評価に主眼が置かれてきたが、左右振動慣性力に関する検討は、現行の仮定の妥当性を確認する目的で行われた走行試験と、加速度の周波数が輪重変動に及ぼす影響評価以外にはほとんど行われてこなかった。そこで本稿では、実態により即した転覆限界風速の評価を行うことを目的として、左右振動加速度の実測値を考慮した転覆限界風速の評価方法を検討したので、これらについて報告する。

2. 総研詳細式における左右振動慣性力の考え方

総研詳細式では、転覆に大きな影響を及ぼす作用力として、①横風による空気力、②曲線通過時の超過遠心力、③左右振動慣性力の3力を考慮している。このうち①については、車体形状、地上構造物形状、車両に対する風向角等に大きく依存することがこれまでの研究により明

らかになっており、可能な限り風洞試験により空気力係数を求め、実態に即した評価を行うことが推奨されている。また、個別に風洞試験を行うことが困難である場合には、鉄道総研が過去に行った5種類の車体形状と7種類の地上構造物形状を組み合わせた風洞試験結果³⁾を準用することもある。次に、②については、曲線半径、カント、車両の質量、および走行速度が定まれば一意に求められる。一方、③については、車体の左右振動加速度と車体質量の積により求めることができるが、左右振動加速度の値については、車両、軌道、走行速度などの条件により発生状況が大きく変わりうるため、文献1)では最高速度走行時に 0.98m/s^2 となるような走行速度に関する以下の1次式を仮定している。

$$\alpha_y = 0.98v/v_{\max} \quad (1)$$

ただし、 α_y :左右振動加速度 [m/s^2]、 v :走行速度 [km/h]、 v_{\max} :最高速度 [km/h]

式(1)は、数は少ないながらも過去の実車走行試験結果から仮定されたものであり、車両転覆に影響を与えない2Hz程度以上の高周波成分を除いた上で、片振幅の最大値を包含するように考慮したものである。また、最近では、式(1)の一般性および適用範囲を改めて確認するために、走行中の車両に発生する左右振動加速度の測定が行われており、式(1)の仮定を超過する加速度は、測定を行った3線区における全データの1%未満程度と、ごくわずかであることが報告されている⁴⁾。従って、式

* 鉄道力学研究部 車両力学研究室

特集：車両技術

(1)は安全側の仮定としては概ね妥当であると考えられるが、前者①および②の2項目と比較して実態との差が大きい可能性が考えられる。なお、文献1)では、事故調査等において特定の箇所での転覆限界風速を推定する場合には、当該箇所の軌道条件に対応した実車の左右振動加速度データを用いることが望ましいとされている。そこで次章以降では、これを一般化し、かつ実態に即した評価を行うために、複数の走行線区および車種について実施された左右振動加速度測定結果から、実測データに基づく転覆限界風速の評価方法を検討する。

3. 左右振動加速度の測定

3.1 測定試験概要

測定試験はJR西日本車両部車両設計室が行い、鉄道総研は同社より測定データの提供を受けた。測定試験は、線路等級の異なる複数の線区で、一般形・通勤形車両または特急形車両を使用して行われた。測定試験を行った線区の線路等級や車両等の条件を表1に示す。なお、線路等級については、同社の基準を便宜上2グループに分けたもので、グループA、グループBと称することとする。測定項目は、車体中央床面における左右振動加速度および走行速度であるが、在来線における測定試験では、車体ロール角および車体ヨー角速度も併せて測定した。

表1 測定試験条件

条件	線路等級	測定車両	総走行距離	測定対象
条件1	グループA	特急形車両	約540km	3両編成のうち3両
条件2	グループA	通勤形車両	約440km	7両編成のうち4両
条件3	グループB	振り式特急形車両	約660km	2両編成の先頭車
条件4	グループB	一般形車両	約570km	2両編成の先頭車
条件5	新幹線	新幹線車両	約1240km	16両編成の先頭車

3.2 測定データの一次処理

測定データについては、次に示す一次処理を行った。まず、ノイズや転覆には影響しない高周波成分を除去するために、2Hzのローパスフィルタ処理を行った。次に、曲線通過時の左右定常加速度の影響を除去するために、2Hzローパスフィルタ処理後の時系列データから、3秒間移動平均値(前後1.5秒分の平均値)を減算した時系列データを作成した。すなわち、左右振動加速度に含まれる2Hz以下の振動成分(偏差成分)のみを抽出した時系列データを、サンプリング周波数100Hzで作成した。これをもとに、走行速度と左右振動加速度(絶対値)との関係、および左右振動加速度の頻度分布を求めた。

3.3 データ整理結果

3.3.1 走行速度と左右振動加速度との関係

(1) 全データの比較

表1に示した条件1~4における、走行速度と左右振動加速度(絶対値)との関係を図1(a)~(d)に示す。なお、各図には現行の総研詳細式における仮定式(式(1))を実線で併せて示す。走行速度の増加とともに左右振動加速度が増加する傾向が各図に共通して見られるが、概ね総研詳細式における現行の仮定式により推定される値よりも小さい場合が多いことが分かる。しかし、50km/h程度以下の中~低速域では、現行の仮定式を超過するケースが散見される。

図1(a),(b)と図1(c),(d)との比較より、グループAの方がグループBよりも全体的に最大値が小さいことから、線路等級により左右振動加速度の発生状況は異なることが分かる。また、同一線路等級の場合、図1(a)と(b)の比較から、通勤形車両と特急形車両でそれほど大きな差は無い一方で、図1(c)と(d)の比較から、一般形車両と振り式特急形車両とでは、高速域において若干差が見られることが分かる。ただし、図1(a)~(d)のいずれにおいても、現行の仮定式(式(1))を下回る場合が多く、中~低速域において仮定式を超過したデータの割合はいずれも1%未満であった。これは、文献4)で報告された内容と同様である。なお、条件5の新幹線については、軌道整備基準や車両諸元、走行条件等が在来線とは大きく異なるため、本稿においては他条件との直接的な比較は行わないが、左右振動加速度の最大値が走行速度にはほぼ比例する傾向は在来線と同様であり、最大値の大きさは在来線の半分程度であった。また、軌道変位により左右振動が励起され、それが車両の転覆に影響を与えるという物理的過程は同一であることから、後述する転覆限界風速を評価する際の手順(考え方)は在来線の場合と同一である。

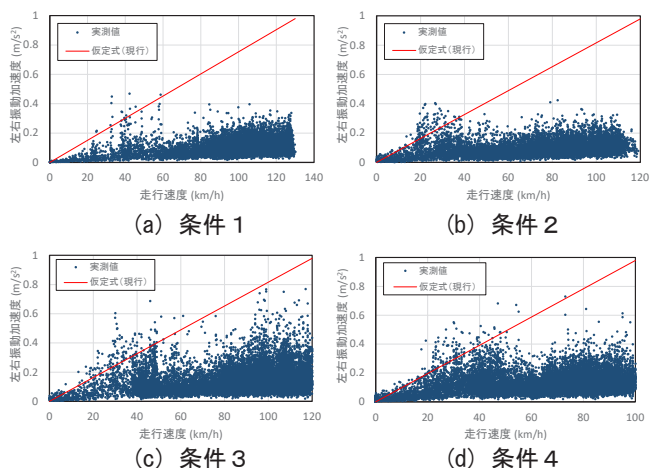


図1 走行速度と左右振動加速度との関係

以上の結果より、線路等級（または軌道整備基準等）や車種に関わらず、現行の総研詳細式における仮定式(式(1))は安全側の仮定として概ね妥当であることが改めて確認された。また、線路等級や車種によって、実測された左右振動加速度の発生傾向に差異が見られる場合には、それぞれに応じた実測値または実測ベースの仮定を用いることにより、安全性を損なうことなく実態により即した評価が可能であることが明らかになった。

(2) 分岐器通過データ除外後の整理結果

前述の中～低速域で見られた仮定式を超過するデータ（以下、著大値という）は、経験的には主に分岐器を通過する際に発生したものと推定されているが、詳細に確認されたことはこれまで無かった。そこで、本稿では条件1（図1(a)）のデータについて、分岐器通過データを除外して、再度整理を行った。具体的には、試験車両の走行経路をJR西日本から提供していただき、分岐器の分岐側を通過した箇所を確認した。その上で、車体ヨー角速度の時系列波形から、1～2秒程度の短い時間で大きな変化がある地点（左右に大きく振れる地点）を抽出し、別途車体ヨー角速度から推定した曲線（向き、半径）と線路図から照合した時系列波形上のキロ程から分岐器と判断される箇所のデータを除外した。分岐器通過データ除外後の整理結果を図2に示す。図2より、中～低速域で散見された著大値はほとんどなくなり、いずれも現行の仮定式により推定される値未満となった。

以上の結果から、走行速度と左右振動加速度との関係において、中～低速域で散見された著大値のほとんどは、分岐器通過の影響によるものであることが確認された。なお、今回は条件1についてデータを詳細に整理したが、左右振動加速度の時系列波形を概観する限りでは他の条件における時系列波形の特徴と大差なかったため、他の条件においても中～低速域で散見される著大値のほとんどは同様に分岐器通過の影響によるものであると考えられる。従って、運転規制ルールの検討など一般的な区間における転覆限界風速を評価する場合には、これらの著大値を除外して評価した加速度仮定式を用いることが妥当であると考えられる。逆に、分岐器通過時のデータも含めた最大値を包含する形で左右振動加速度を評価すると、全体としては1%にも満たない割合の著大値に転覆

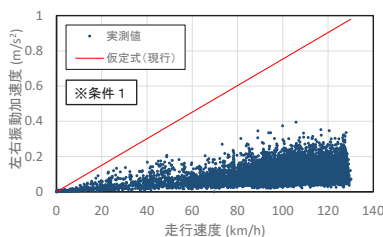


図2 分岐器通過データ除外後の整理結果

限界風速の計算結果が影響されるため、安全余裕を過大に見込む可能性があると考えられる。なお、分岐器通過時のデータを除く方法としては、本稿の検討方法のように時系列データから分岐器通過時のデータを個々に確認した上で除くのが最善であるが、実務上困難な場合も考えられる。従って、分岐器通過を含む全データに対して、高速域の実測データの最大値を包含し、比較的低速域では超過を認めて走行速度と左右振動加速度との関係を仮定しても、概ね同様の結果が得られると考えられる。

また、ここで除外した分岐器通過時の横風に対する走行安全性については、必要がある場合にのみ個別に検討すればよいと考えられるが、一般的にはその必要性は低いと考えられる。これは、分岐器が設置されている箇所は主要駅の前後が多く、周囲に建物等があるため強風に吹きさらされるような状況は想定されにくいことや、これらの分岐器の分岐側を通過する速度は比較的低いため、転覆限界風速は比較的高くなることなどから、分岐器通過時を検討の対象外としても、直ちに全体的な安全性評価に問題が生じる可能性は低いと考えられるためである。逆に、これらとは反対の条件に該当する分岐器が存在する場合、すなわち、高速で走行し、かつ強風に吹きさらされるような環境に設置されている分岐器が存在する場合には、その箇所に限定して転覆限界風速を評価し、必要に応じて、風観測態勢の強化、防風柵の設置、走行速度の低下などの対策を講じることが望ましいと考えられる。

なお、左右振動加速度の実測データに基づいて分岐器通過時の転覆限界風速を評価する場合には、以下の点に留意する必要がある。3.2節で述べた左右振動加速度のデータ処理では、円曲線における左右定常加速度成分を除くために、2Hzローパスフィルタ処理後の時系列データから、3秒間移動平均値を減算した時系列データ作成した。しかし、分岐器リード曲線部分の通過にかかる時間は、分岐側制限速度程度で走行している場合には、いずれの番数においても1.5～2秒程度であり、上記の3秒移動平均減算処理では遠心加速度の影響を適切に除外することができない。また、分岐器を通過する際の左右振動は車両の下心ローリングによるものが多く⁴⁾、その1周期相当の時間と大きな差が無いので、実測波形において遠心加速度と左右振動加速度とを直接区別することも困難である。従って、左右振動加速度の実測データに基づいて分岐器通過時の転覆限界風速を評価する場合には、便宜上、遠心加速度を含んだ左右振動加速度を計算式における左右振動加速度の項に与え、遠心加速度の項はゼロとして計算すればよい。ただし上述のように、分岐器通過時の横風に対する走行安全性については、必要がある場合にのみ個別に検討すればよいと考えられ、一般的にはその必要性は低いと考えられる。

特集：車両技術

3.3.2 左右振動加速度の発生頻度解析

(1) 各走行速度における頻度分布

前述の分岐器通過除外後のデータについて、走行区間および走行速度が左右振動加速度の発生状況に及ぼす影響を確認するため、走行試験時の停車を区切りとする15区間にデータを分け、それぞれ走行速度10km/hごとに、加速度0.03m/s²の階級幅で左右振動加速度の発生頻度を求めた。これらの結果のうち、最も走行距離が長かった区間の、0～10km/h、40～50km/h、80～90km/h、120～130km/hにおける相対出現頻度を図3(a)～(d)に例として示す。また、各図には、左右振動加速度の各データ群から算出された標準偏差σを記載するとともに、平均値を0、標準偏差を前記の値とする正規分布を実線で併せて示す。各図から、左右振動加速度の発生頻度は概ね正規分布に従い、測定号車間の差はほとんど無いことが分かる。紙面の都合で全データを示すことはできないが、その他の区間、走行速度においても同様の傾向が見られた。

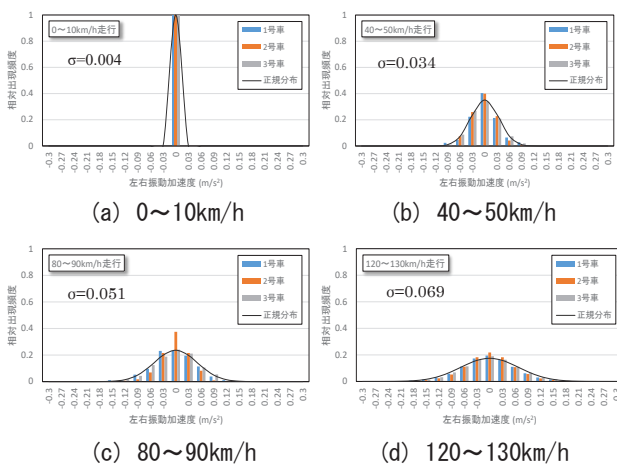


図3 左右振動加速度の発生頻度分布（条件1）

(2) 走行速度と加速度標準偏差との関係

上記の整理結果から得られた、各区間における走行速度と標準偏差との関係を図4に示す。図4から、左右振動加速度の標準偏差は概ね走行速度に比例して大きくなる傾向が見られ、区間による違いは比較的小さいことが分かる。従って、3.3.1項(2)での考察結果も併せて考慮すると、左右振動加速度の実測データに基づいて一

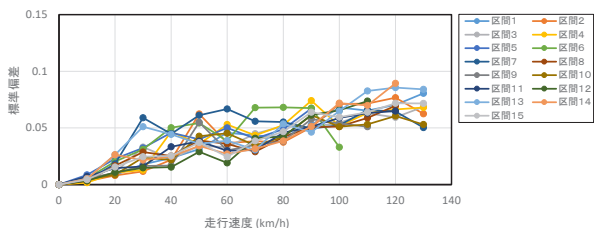


図4 走行速度と標準偏差との関係（条件1）

般的な区間における転覆限界風速を評価する際には、走行速度と左右振動加速度との関係として1次式を仮定すればよく、実測データの最大値を包含（ただし、中～低速域における分岐器通過によると推定される著大値を除く）するようにすれば、安全かつ実態により即した評価が可能であると考えられる。

4. 左右振動加速度の実測データに基づく転覆限界風速の試算

4.1 実測データに基づく左右振動加速度の仮定

本章では、左右振動加速度の仮定式の違いが転覆限界風速の計算結果に及ぼす影響を検討する。転覆限界風速の試算条件を表2に示す。計算に用いた車両諸元は、近年の比較的軽量の通勤形車両の標準的な値を想定した近似値とし、車両質量を30tと仮定した。空気力係数は桁厚1mの複線高架橋上の103系車両先頭車に対して実施した風洞試験結果³⁾を使用した。走行区間の線形は直線および曲線とし、曲線の場合には走行速度が高くかつカント不足量の大きい条件（横風による転覆に対して厳しい条件）を選定した。左右振動加速度については、現行の仮定（式(1)）に加え、図2に示した条件1における左右振動加速度の実測結果から、最大値を概ね包含する1次式として次式を仮定した。

$$a_y = 0.5v/v_{\max} \quad (2)$$

ただし、この仮定は本稿における条件1の測定結果に対するものであり、軌道の整備状態等の条件が異なれば、仮定式も異なるものとなる。

表2 転覆限界風速の試算条件

車両	通勤形車両（先頭車） ※架空諸元（車両質量30tを仮定）
地上構造物	複線高架橋（桁厚1m）
線形	①直線、②曲線（R500m、C105mm）
左右振動加速度	①現行の仮定（式(1)） ②実測ベースの仮定（式(2)）※条件1
走行速度	0～100km/h

4.2 転覆限界風速の試算結果

試算結果を図5に示す。図5から、直線区間、曲線区間のいずれにおいても、左右振動加速度として実測ベースの仮定を用いることにより、現行の仮定と比較して最大で2～3m/s程度転覆限界風速が高く計算されることが分かる。従って、軌道の整備状態にもよるが、現行の仮定を用いた転覆限界風速の計算結果は、実態よりも低めに（安全側の仮定で）計算されていたことが分かる。

なお、このように左右振動加速度の実測ベースの仮定

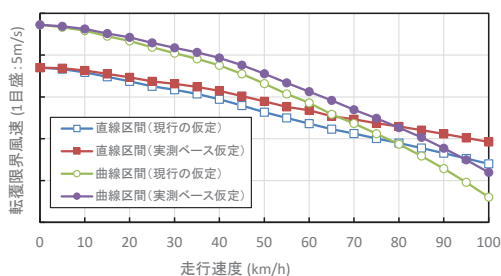


図5 走行速度と転覆限界風速との関係

を用いて計算する場合でも、実測値の最大値をほぼ包含する形で仮定式を定めているので、なおも安全側の仮定であるといえる。しかもそのような最大値に近い値の発生頻度は非常に低いことが図3から容易に推測できる。例えば、図3(d)を例とすると、実測データの解析結果から左右振動加速度(絶対値)の最大値は 0.32m/s^2 であったが、これは同図の分布では 4.6σ 相当の値である。また実測ベースの仮定(式(2))では最高速度走行時に 0.5m/s^2 を仮定しており、これは 7.2σ 相当の値となる。

従って、これらの安全余裕を確率的に解釈することによって、走行安全性と輸送安定性をより高いレベルで両立するような運転規制ルールを検討できる可能性がある。そこで次章では、左右振動加速度が正規分布に従う確率分布で表現できるものとして、転覆限界風速計算結果の確率的な解釈を試みる。

5. 左右振動加速度の発生確率を考慮した転覆限界風速

5.1 転覆限界風速計算結果の確率的解釈

国枝式や総研詳細式のような静的解析の前提では、左右振動加速度と転覆限界風速との間にはほぼ線形の関係がある(図6)。従って、前述の左右振動加速度の確率分布に対応して転覆限界風速も確率分布を持つと見なすことができる。すなわち、図3に示した頻度分布の横軸を、図6の関係を用いて転覆限界風速に置き換えればよい。例として図3(d)に示した確率分布を転覆限界風速の確率分布に置き換えた概念図を図7に示す(転覆限界風速の計算条件は架空の条件である)。図7から、前

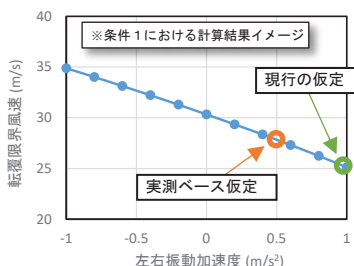


図6 左右振動加速度と転覆限界風速との関係

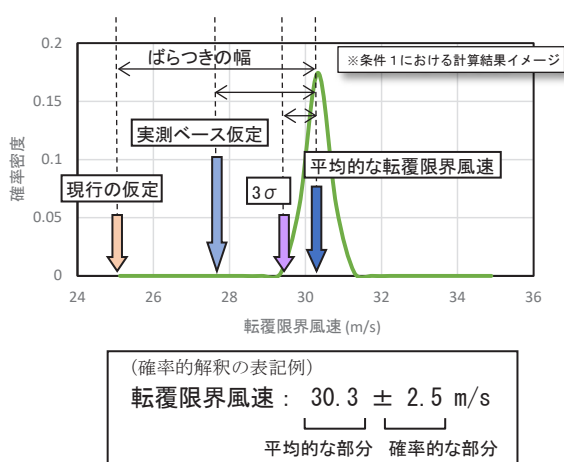


図7 転覆限界風速の確率分布(概念図)

節で述べた実測ベースの仮定に基づく転覆限界風速の計算結果は、非常に低い確率で発生する事象を想定していることが分かる。左右振動加速度を現行の仮定(式(1))とした場合には、その確率はさらに低くなり、現行の仮定のもとで計算される転覆限界風速が、冒頭に述べたように経験的に推測される風速よりも低くなる傾向があるのは、「非常に稀にしか発生しない条件を想定していたためである」と解釈できる。

なお、本稿では確率分布を仮定する対象を左右振動加速度のみに限定して試算したが、例えば自然風の風向角など、他にも確率分布を仮定できる対象は存在する(本稿では、風向角については「最悪条件」を仮定した。この点においても安全側の仮定である)。しかし、左右振動加速度と比較して、自然風の風向角は気象条件や地形等の影響を受けるため、一般化・単純化しにくい面があると考えられる。今後は、風向角も含めそのほか確率的取り扱いが適している要素の有無やその影響度について検討を重ねるとともに、確率の定量的評価、安全性評価に用いる基準値の検討などを行っていく予定である。

5.2 確率的解釈による転覆限界風速の表記方法

前節のような確率的解釈による転覆限界風速は、現行のように一つの数値で表されるものではなく、確率分布に対応したばらつきを持つものとなる。例えば図7の例のように、左右振動加速度の確率分布として「平均値 μ 、標準偏差 σ の正規分布」を仮定し、転覆限界風速もそれに対応した確率分布を持つと仮定すると、個々の瞬間の転覆限界風速は「平均的には● m/sであるが、▲ σ のばらつき(発生確率)を考慮すると±■ m/sの幅を持つ」ことになる。例えば図7の例では、 3σ 相当(10^{-3} オーダー)の発生確率を考慮すれば「 $30.3 \pm 1.0\text{m/s}$ 」、前章における実測ベースの仮定式(2)(図7の場合には 7.2σ 相当(10^{-13} オーダー))の発生確率を考慮すれば「 30.3

特集：車両技術

± 2.5m/s」などの表記方法が一案として考えられる。従来の表記方法では、例えば実測ベースの仮定式(2)による計算結果の場合には下限値である「30.3 - 2.5m/s」すなわち「27.8m/s」という一つの数値だけで表していたため、平均的(確定要素的)な部分と確率的(変動要素的)な部分との区別ができず、計算結果の持つ意味を実態(現象)に即した形で把握することができなかった。従って、上記のような表記方法を採れば、これらの区別が明確になり、想定する発生確率に対応した形での転覆限界風速の表記が可能となる。すなわち、「±■ m/s」の部分が安全余裕を考慮するベースとなり、想定する発生確率(何σまでの安全余裕を見込むか)によって値が変わってくる。また、現行の運転規制ルール of 妥当性を確認する場合でも、平均的な部分と確率的な部分が明確に分かれていることにより、転覆限界風速を超える強風に遭遇する可能性等を感覚的に理解しやすくなると考えられる。ただし、運転規制ルールを検討する際に最も重要な問題として「安全余裕をどこまで見込むか」という点については、今後も引き続き慎重な検討が必要である。特に横風に対する安全性の評価では、日本ではこれまで決定論的に安全性を議論してきた経緯もあり、確率論的な安全性の議論は未成熟で研究開発の余地が残されている。今後は、他の技術分野(例えば、航空や原子力など、あるいは海外の事例など)における安全性評価手法も参考にしながら、車両、気象、空力の各分野の研究者で連携して、評価手法の確立と実務への応用を図りたいと考えている。

6. まとめ

総研詳細式を用いて実態により即した転覆限界風速を評価するために、左右振動加速度の実測値を考慮した転覆限界風速評価方法を検討した。JR西日本より提供を受けた車体左右振動加速度実測データの解析結果、およびそれをベースとした転覆限界風速の試算結果等は以下の通りである。

- (1) 線路等級の異なる複数の線区で、複数の車種を用いて測定された左右振動加速度データの解析を行い、線路等級や車種による左右振動加速度の発生傾向の差異を明らかにした。
- (2) 走行速度と左右振動加速度との関係を調べた結果、走行速度の増加とともに左右振動加速度が増加する傾向が見られたが、概ね総研詳細式における現行の仮定式により推定される値よりも小さい場合が多い

ことが分かった。なお、50km/h程度以下の中～低速域では、現行の仮定式を超過するケースが散見されることがあったが、これらは主に分岐器を通過する際に発生したものと推定された。

- (3) 左右振動加速度の実測データに基づいて一般的な区間における転覆限界風速を評価する際には、走行速度と左右振動加速度との関係において、実測データの最大値(ただし中～低速域における分岐器通過によると推定される著大値を除く)を概ね包含するような1次式を仮定すれば、より実態に即した評価が可能であると考えられる。
- (4) 左右振動加速度の発生頻度を走行速度10km/hごとに求めた結果、いずれの走行速度帯においても概ね正規分布に従うことが分かった。また、標準偏差は概ね速度に比例して大きくなる傾向が見られた。
- (5) 左右振動加速度の確率分布を仮定することにより、転覆限界風速計算結果の確率的解釈が可能であることを示した。また、転覆限界風速計算結果を、平均的(確定要素的)な部分と確率的(変動要素的)な部分とに分けることにより、想定する発生確率に対応した形での転覆限界風速の表記が可能となることを示した。

謝辞

実車による左右振動加速度測定試験に関して、JR西日本車両部車両設計室および安全推進部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。

文献

- 1) 日比野有, 石田弘明: 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
- 2) 国枝正春: 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
- 3) 種本勝二ほか: 在来線車両の空気力係数に関する風洞試験結果, 鉄道総研報告, Vol.27, No.1, pp.47-50, 2013
https://www.rtri.or.jp/publish/rtrirep/2013/rep13_01_J.html
(参照日: 2018年12月20日) ※修正版
- 4) 大山安紀子ほか: 車両の風に対する転覆耐力評価のための左右振動加速度の検証, 第22回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2015), 2015