



研究報告



走行速度を考慮した鉄道車両の空気力係数の推定

Prediction of Aerodynamic Coefficients Considering the Train Speed

三須弥生*1 石原 孟*2

Yayoi MISU, Takeshi ISHIHARA

SUMMARY

The measurements of aerodynamic coefficients of train are carried out by wind tunnel tests in uniform and turbulence flows. An interpolation method for aerodynamic coefficients is proposed with consideration of the train speed, in which an increase of the train speed leads to a decrease of the turbulence intensity. The proposed method enables to provide the critical wind speed of overturning considering the train speed.

keywords: Aerodynamic coefficient of train, Wind tunnel test, Uniform flow, Turbulence flows, Critical wind speed of overturning, Train speed

1. はじめに

強風にさらされた場合の車両の転覆耐力は、日本、ヨーロッパ共に、風上側の車輪にかかる重量が0となる風速を限界風速として、その風速値により評価している。これらの限界風速は風洞実験から得られる空気力係数を基に、車両の力学的解析により推定される^{1), 2)}。

日本においては、強風による車両の転覆事故が過去に幾つか発生しており、事故原因の究明過程において車両の転覆耐力の評価が行われてきた。近年では1986年12月に山陰本線余部橋りょうで発生した車両脱線転落事故の調査³⁾により、車両に働く空気力は車両形状のみならず、地上構造物形状に依存することが明らかとなった。また1994年2月の同日に発生した、根室本線における特急脱線事故、および三陸鉄道南リアス線における列車脱線事故の原因調査において、空気力係数は車両に対する風向

角によって異なることが明らかになった。そこで、地上構造物と車両の組合せおよび風向角を考慮した風洞実験を行って空気力係数を求める手法が取り入れられた。さらに、自然風にさらされる車両の空気力の特性を明らかにするため、屋外に設置した実物大車両模型により風力の測定を行った⁴⁾。この現地観測の結果を基に、自然風を再現した風洞実験により空気力係数を測定する手法⁵⁾が提案された。自然風を再現した風洞実験手法を用いた理由としては、在来線は比較的低速で走行し、自然風の影響が大きいと判断したためと考えられる。

一方、ヨーロッパでは、近年エネルギー効率の向上のため、高速鉄道においてモーター分散型車両の導入による先頭車両の軽量化やさらなる高速化が試みられていることから、車両に対する横風の影響や車両の転覆耐力に関する研究が多く行われた⁶⁾。これらの研究を基にEU域

*1 東日本旅客鉄道株式会社 JR 東日本研究開発センター 防災研究所 主席
Assistant Manager, Disaster Prevention Research Lab., R&D Center of JR East Group, East Japan Railway Company

*2 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 教授
Professor, Department of Civil Engineering, School of Engineering, The University of Tokyo
(原稿受理年月日: 2012年5月25日, 採用決定: 2012年6月29日)

内の相互乗り入れ基準である TSI (Technical Specification of Interoperability)²⁾に横風に対する転覆耐力の評価手法が定められている。この中で、空気力係数の評価については、日本と同様に地上構造物と車両の組合せおよび風向角の影響を考慮している一方、風洞実験は一樣流を用いて実施することになっている。これは、対象としている車両が高速車両であり、走行により生じる一樣流の影響が大きいと判断しているためと考えられる。

このように空気力係数測定のための風洞実験において、日本では自然風を模擬した乱流境界層を用いている一方、ヨーロッパでは走行による気流を考慮して一樣流を用いている。しかし、実際の車両の走行では、図 1 に示すように車両に吹き付ける自然風と車両の走行によって発生する一樣流を合成した相対風速による力が働いている。従って、低速走行では自然風の影響、高速走行では走行による一樣流の影響が大きくなると考えられ、走行速度によって気流条件が異なることが考えられる。一般的に一樣流で求められた空気力係数は乱流で求められた空気力係数より大きい⁵⁾。このことから、走行速度を考慮した空気力係数の評価手法の確立は、列車の転覆耐力の評価精度の向上に繋がる。

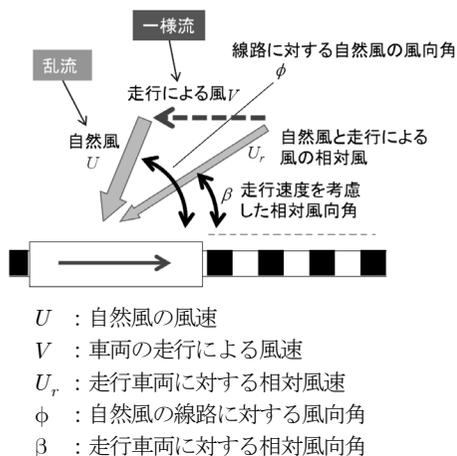


図1 列車走行を考慮した相対風速と相対風向角
Fig.1 Relative wind speed and wind direction with consideration of the train speed

そこで、本研究では、まず、一樣流と乱流を用いた風洞実験を実施し、乱流強度が空気力係数に与える影響を明らかにする。次に、車両の空気力係数は乱流強度の関数とし、走行速度による乱流強度の変化を求めることにより、走行速度を考慮した空気力係数の推定手法を提案すると共に、一樣流および乱流から求められた転覆限界

風速と比較することにより、提案手法の有効性を示す。

2. 風洞実験の結果

2.1. 風洞気流の特性

本研究では、一樣流と自然風の 2 種類の気流分布を再現して風洞実験を実施し、気流の違いによる列車の空気力係数への影響を評価した。風洞実験では、東京大学・橋梁研究室が所有する風工学実験室にある強風シミュレーション風洞を用いた。測定部の断面は、幅 1.5m、高さ 1.8m であり、測定部の長さは 11m である。風洞の平均風速の偏差は±1%、乱流強度は 0.5%以下である。気流は DANTEC 社の X 型プローブ(55R53)を用いた熱線風速計(Multi channel CTA 54N80)により計測した。

図 2 には一樣流の平均風速および乱流強度の鉛直分布を示す。図中には測定対象となる車両模型の中心高さを点線で示す。この図から、車両模型中心高さ付近では平均風速の変化がなく、乱流強度もほぼ 0 であることが分かる。

図 3 には自然風を再現した気流の平均風速および乱流強度の鉛直分布を示す。バリアおよびラフネスブロックを風洞床面に設置することにより自然風を模擬した乱流境界層を再現した。

乱流境界層の平均風速は、式(1)に示すべき法則⁷⁾により表す。

$$\frac{V_Z}{V_R} = \left(\frac{z}{z_R} \right)^a \quad (1)$$

ここで、 z_R は基準高さ、 V_R は基準風速、 V_Z は任意の高さ z での風速を示す。式(1)により求められる平均風速の鉛直分布を図 3(a)に示す。本風洞実験で用いられた平均風速分布はべき法則とよく一致していることが分かる。

一方、流れ方向の乱流強度の鉛直分布は次式によって表される。

$$I_u = I_{uR} \left(\frac{z}{z_R} \right)^{-a-0.05} \quad (2)$$

ここで、 z_R は基準高さ、 I_{uR} は基準高さでの乱流強度である⁷⁾。図 3(b)には式(2)により求められる乱流強度の鉛直分布を示す。今回の風洞実験で使用した気流の乱流強度はおおむねべき法則と一致していることが分かる。

自然風の相似パラメータとしては、平均風速、乱流強度の他、乱流長さスケールもあげられるが、実物大模型に働く空気力を再現した風洞実験では、乱流長さスケール

ルの差が2倍～3倍程度の範囲にある場合には、実測と同等の空気力係数が求められることが確認されている⁵⁾。本実験では乱流中の風方向の乱流長さスケールは26.8m、自然風の風方向の乱流長さスケール86.4mの約3分の1である。

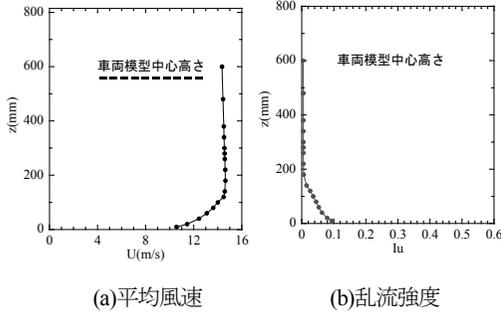


図2 一様流中の平均風速および乱流強度の鉛直分布
Fig.2 Vertical profile of mean wind speed and turbulence intensity of the uniform flow

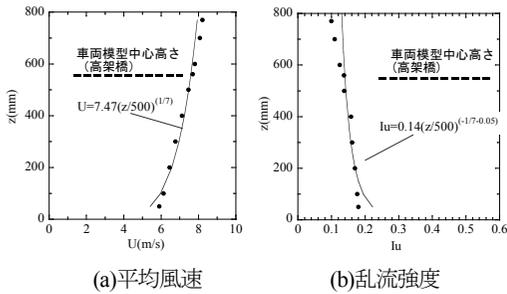


図3 乱流中の平均風速と乱流強度の鉛直分布
Fig.3 Vertical profile of mean wind speed and turbulence intensity of the turbulent flow

2.2 空気力係数の測定

本実験では日章電機製の6分力天秤を使用している。気流の乱流強度が空気力係数に与える影響を明らかにするため、一様流および乱流を用いた風洞実験を実施し、空気力係数を測定した。

鉄道車両の転覆に寄与する風力としては、図4に示す横力 F_S 、揚力 F_L およびローリングモーメント M_R があげられる。風洞実験により得られる空気力から、横力係数 C_S 、揚力係数 C_L 、ローリングモーメント係数 C_M を式(3)、(4)、(5)から求めた。

$$C_S = \frac{F_S}{\frac{1}{2}\rho U_r^2 S} \quad (3)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho U_r^2 S} \quad (4)$$

$$C_M = \frac{M_R}{\frac{1}{2}\rho U_r^2 S h} \quad (5)$$

ここで、 ρ は空気密度、 S は車体側面積、 h は車体高さを示す。

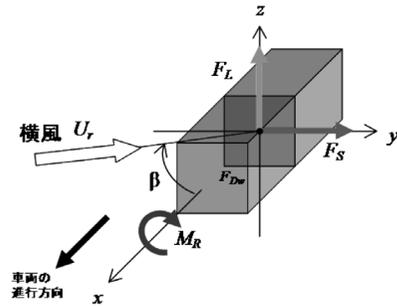


図4 車両に働く風力の定義

Fig.4 Aerodynamic forces acting on the vehicle

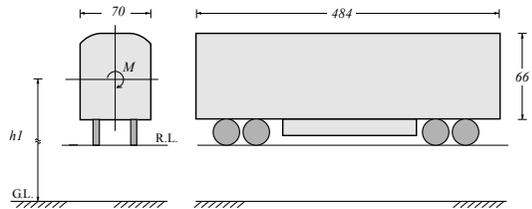


図5 1/40 先頭車両模型の寸法 (mm)

Fig.5 The measure of 1/40 scale model of the first car (mm)

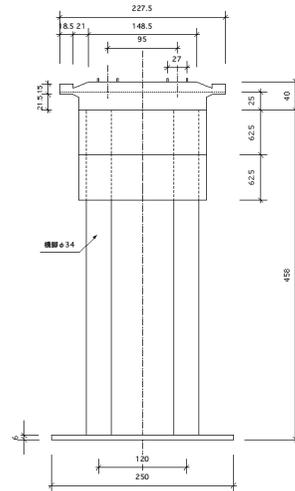


図6 1/40 高架橋の寸法 (m)

Fig.6 The measure of 1/40 scale model of the viaduct (m)

今回の風洞実験には、縮尺 1/40 の車両模型および複線高架橋の模型を使用した。車両模型には通勤型車両を想定した車両模型を用い、先頭車両と 2 両目以降の組合せとした。先頭車両の底面の床下には機器の模型を設置し、2 両目以降の車両は床下に機器を設置しない模型とした。図 5 に先頭車両の代表寸法を示す。h1 は地上からの車両中心高さ (560mm) である。高架橋は実寸 1.0m, 3.5m, 6.0m の 3 つの桁高さを対象に模型を作成した。図 6 には桁高さ実寸 1.0m の高架橋の 1/40 モデルの寸法を示す。高架橋 (桁高さ実寸 1.0m) と車両の模型設置状況を図 7 に示す。

なお、本実験においては、端部の影響のないことを予備実験で確認したので、ターンテーブルを回転し、空気力係数を計測した。

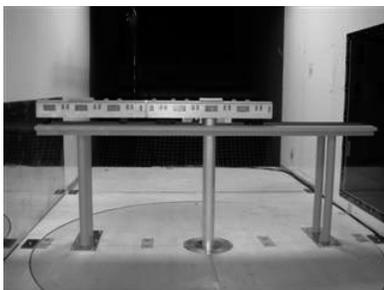


図7 車両と高架橋の模型設置状況

Fig.7 Scale model of the vehicle on a viaduct

2.3. 空気力係数の測定結果

風洞実験では、一般にレイノルズ数を一致させることが難しい。そこで、本実験ではレイノルズ数の変化による影響の有無を確認するため、風速を変化させた場合の横力係数を調べ、図 8 に示す。一樣流中および乱流中で得られた横力係数共に、ほぼ一定値を示す。以上のことから、今回の風洞実験で得られた空気力係数は、レイノルズ数の影響が小さいことが分かる。

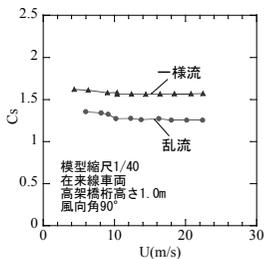


図 8 空気力係数の風洞風速による変化

Fig.8 Variation of side force coefficients with wind speed in the wind tunnel

本研究で用いた模型を実験風速 (10m/s), 算出されたレイノルズ数は、実列車および実風速 (10~25m/s) から算出されたレイノルズ数 1/40~1/100 である。日比野らの研究⁴⁾では、本実験と同型の車両の実物大車両模型 (高架橋桁高さ 1.0m) に働く横力係数を自然風中で計測している。乱流強度 20%前後における実物大車両の風向角 90° の横力係数は約 1.25 程度である。本実験の乱流中における横力係数約 1.3 であり、実物大車両から得られた横力係数とほぼ同じであり、レイノルズ数の影響が小さいと思われる。

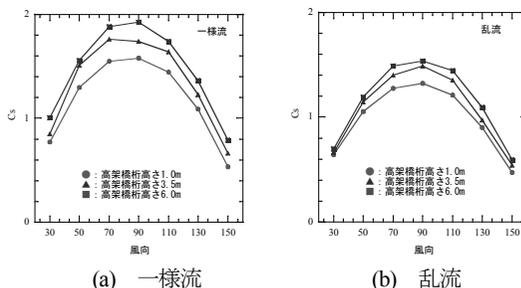


図 9 複線高架橋上の車両の横力係数の風向特性

Fig.9 Side force coefficients of the vehicle on a double track viaduct in the uniform and turbulent flow

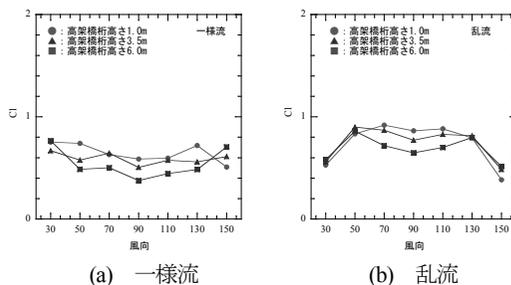


図 10 複線高架橋上の車両の揚力係数の風向特性

Fig.10 Lift coefficients of the vehicle on a double track viaduct in the uniform and turbulent flow

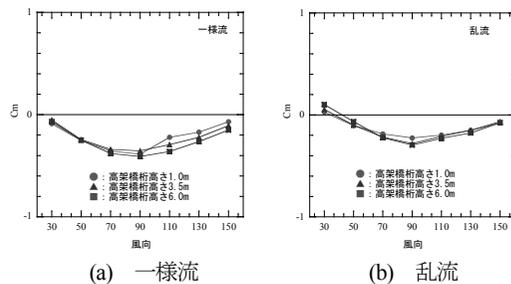


図 11 複線高架橋上の車両のローリングモーメント係数の風向特性

Fig.11 Rolling moment coefficients of the vehicle on a double track viaduct in the uniform and turbulent flow

図9～図11には複線高架橋上の車両の横力係数 C_S 、揚力係数 C_L 、ローリングモーメント係数 C_M と風向との関係を示す。

図9からは、横力係数 C_S は同一の線路条件で、一樣流の方が乱流よりも大きな値となり、70～90°にピークが存在する。また同一の気流条件では、桁高が高いほど横力係数が大きくなること分かる。

図10からは、揚力係数 C_L は横力係数の場合と異なり、同一の線路条件で、乱流の方が一樣流よりも大きな値を示す。また揚力係数 C_L は、一樣流と乱流のいずれも横力係数 C_S でみられたような顕著なピークを示さず、90度付近で下がる傾向にある。桁高さが高くなるにつれて90度付近で大きく下がる傾向にある。

図11からは、ローリングモーメント係数 C_M は同一の線路条件で、一樣流の方が乱流より若干大きな値となる。またローリングモーメント係数 C_M は、構造物形状による変化がほとんど見られず、ほぼ同じ値を示す。

3. 走行速度を考慮した空気力係数の推定

本章では、走行速度の変化による気流の違いを反映した転覆耐力評価を可能とするため、走行速度を考慮した空気力係数の推定手法を定式化するとともに、得られた空気力係数から転覆限界風速を算出し、提案手法の有効性を示す。

3.1. 走行速度を考慮した空気力係数の定式化

車両に作用する相対風速による空気力は自然風と走行による一樣流の合成した平均風速 \bar{U}_r と乱流強度 I_r に依存すると仮定し、一樣流と乱流を用いた風洞実験から得られた空気力係数に対し、走行速度の変化による気流の乱流強度の変化を考慮することにより、走行速度を反映した空気力係数の推定手法を提案する。本研究では、空気力係数は相対風速の平均値 \bar{U}_r と乱流強度 I_r の関数として推定する。

相対風速に対応する空気力係数 C_{ar}^* は一樣流および乱流を用いて測定した空気力係数 C_{as} および C_{at} を内挿することにより、式(6)から求めることができると仮定した。

$$C_{ar}^* = (1 - \gamma)C_{as} + \alpha C_{at} \quad (6)$$

ここで、 γ は比例係数であり、車両中心高さにおける一樣流の乱流強度 I_s 、乱流の乱流強度 I_t および相対風速の乱流強度 I_r により、式(7)より求める。

$$\gamma = (I_r - I_s) / (I_t - I_s) \quad (7)$$

相対風速に対応する乱流強度を求めるためには、相対

風速の変動成分を求める必要がある。相対風速 $U_r(t)$ は図1の自然風と走行速度との関係から、自然風の風速 $U(t)$ と走行速度 V の合成風速は、式(8)により求めることができる。また、相対風速の変動成分は式(9)によって求めることができる。

$$U_r(t) = \sqrt{(V + U(t) \cos \phi)^2 + (U(t) \sin \phi)^2} \quad (8)$$

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (U_r(t) - \bar{U}_r)^2} \quad (9)$$

その結果、相対風速に対応する乱流強度は、相対風速の標準偏差 σ_r と平均値 \bar{U}_r の比により式(10)から求められる。

$$I_r = \sigma_r / \bar{U}_r \quad (10)$$

ここで、自然風の風速 $U(t)$ は時系列データであり、石原ら⁸⁾により提案された手法により、風洞実験で使用した平均風速 \bar{U} および乱流強度 I_t を用いて、変動風速を数値的に発生させた。相対風速の標準偏差 σ_r と平均値 \bar{U}_r は走行速度 V を考慮し、式(8)と式(9)から求めた。

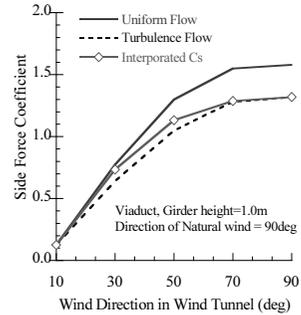


図12 走行速度を考慮した空気力係数の推定

Fig.12 Prediction of aerodynamic force coefficients with consideration of the train speed

図12には、提案手法により推定した空気力係数の一例を一樣流および乱流の風洞実験で求められた空気力係数と併せて示す。ここでは、複線高架橋（桁高実寸1.0m相当）の風洞実験結果を用い、自然風の風向を90°とした。横軸は風洞風向を示し、走行速度を考慮した相対風向から求める。自然風の風向が90°の場合には、走行速度が上昇するにつれて相対風向が小さくなっていく。図12に示した内挿した空気力係数は、風洞風向が90°の時に乱流の空気力係数と一致する。これは、走行速度0で自然風のみが車両に吹き付けている状態であるためである。走行速度が上昇するにつれ、走行による一樣流の影響が大きくなるため、相対風向が小さくなり、一樣流の空気力係数に近づいていくことが分かる。

3.2 転覆限界風速の算出と提案手法の評価

車両の転覆耐力は、風洞実験で得られる空気力係数を用いて、車両の静力学的解析により、列車が風を受けて転覆する場合の最小の自然風の風速（転覆限界風速）として評価することができる。転覆限界風速の算出は日比野ら⁹⁾により提案された手法を用いた⁹⁾。転覆限界風速の算出に必要な空気力係数は、本研究から得られた風向 $30^\circ \sim 150^\circ$ の空気力係数を用いた。自然風の風向が 30° 以下および 150° 以上の空気力係数については、 30° および 150° の時の空気力係数から推定した。図13、図14に複線高架橋（桁高実寸1m相当）を対象とした場合の転覆限界風速の推定結果を示す。

図13には自然風の風向角が 90° の時の走行速度に対する一樣流、乱流で求められた転覆限界風速と提案手法により求められた空気力係数から算出した転覆限界風速の変化を示す。全速度域において、一樣流の方が乱流よりも 5m/s 程度低い。これは、同じ模型の風洞実験により求められた空気力係数、特に転覆限界風速に最も影響を与える横力係数が乱流よりも一樣流の方が大きいためである。提案手法により求められた転覆限界風速は、走行速度が 0 の場合には自然風のみが車両に働くため、乱流の転覆限界風速と一致し、速度が上昇するにつれて、乱流から離れて一樣流の転覆限界風速に近づく傾向をみることができる。

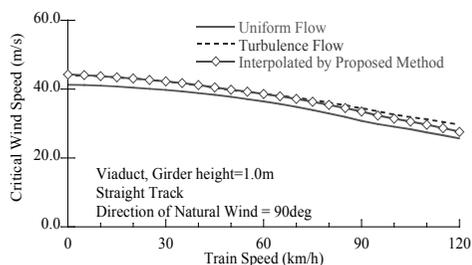


図13 走行速度を考慮した転覆限界風速の推定

Fig.13 Prediction of critical wind speeds of overturning with consideration of the train speed

図14には自然風の風向が変化した場合の走行速度 120km/h での転覆限界風速を示す。提案手法により求めた転覆限界風速のほか、一樣流、乱流で求められた転覆限界風速も示す。転覆限界風速は全風向角において、一樣流の方が乱流よりも 5m/s 程度低くなる。これは図13と同様に横力係数が乱流よりも一樣流の方が大きいためである。提案手法により求められた転覆限界風速は、自然風の風向角が小さい場合と大きい場合に乱流の転覆限

界風速に近接し、自然風の風向角 $40^\circ \sim 110^\circ$ 付近で乱流の転覆限界風速から離れて一樣流の転覆限界風速に近づく。自然風の風向角 70° の時に最も一樣流の転覆限界風速に近づく。これは、自然風の風向角が小さいあるいは大きい場合には、転覆に至る自然風の風速が高くなり、走行速度に対し自然風の割合が大きくなるため、乱流中の転覆限界風速に近づくと考えられる。

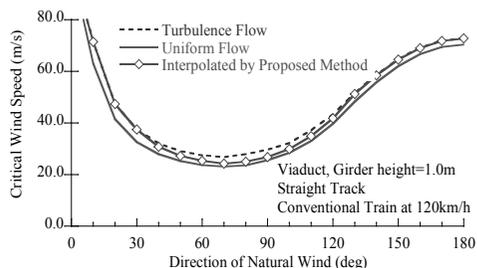


図14 走行速度を考慮した転覆限界風速の風向特性

Fig.14 Variation of critical wind speeds of overturning with the natural wind direction

4. まとめ

本研究では、複線高架橋上の車両の空気力係数を一樣流および乱流中における風洞実験により求めた。また走行速度の変化による気流の乱流強度の変化を考慮した空気力係数の推定手法を提案すると共に、一樣流および乱流による風洞実験結果を用いて、走行速度を考慮した空気力係数の推定および転覆限界風速の算定を行った。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 風洞実験により、一樣流および乱流中における複線高架橋上の車両の横力係数、揚力係数、ローリングモーメント係数の風向特性を明らかにした。横力係数とローリングモーメント係数は一樣流の方が乱流より大きな値を示し、 90° 度付近にピーク値をとるのに対して、揚力係数は反対に乱流の方が一樣流より大きな値を示し、 90° 度付近の値が下がることが分かった。
- (2) 走行速度の変化による気流の乱流強度の変化を考慮した空気力係数および転覆限界風速の推定手法を提案した。自然風の風向角を 90° として走行速度を変化させた場合には、走行速度 0km/h の転覆限界風速は、乱流条件で求めた転覆限界風速と一致し、速度が増すにつれて一樣流の条件で求めた転覆限界風速に近づく傾向が明らかになった。また走行速度を 120km/h と固定した場合には、風向角を変化させた場合の提案手法による転覆限界風速は、自然風

の風向角が小さいまたは大きい場合、転覆に至る相対風のうち自然風の割合が大きくなり、乱流から求めた転覆限界風速に近接することを示す一方、自然風の風向角が車両の横方向にあたる場合には、転覆に至る相対風のうち走行による風の割合が大きくなり、一様流から求めた転覆限界風速に近づくことが分かった。

参考文献

- 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) European Railway Agency, “Technical Specifications for interoperability”, (2003)
- 3) 餘部事故技術調査委員会, 「餘部事故技術調査委員会報告書」(1988)
- 4) 日比野有, 今井俊昭, 種本勝二, 「自然風下の実物大車両模型に働く空気力の観測」, 鉄道総研報告, Vol.18, No.9, pp.11-16, (2004)
- 5) 鈴木実, 斎藤寛之, 種本勝二, 今井俊昭, 「自然風を模擬した車両に働く空気力に関する風洞試験法」, 鉄道総研報告, Vol.17, No.11, pp.47-52, (2003)
- 6) Barkhand Schulte-Werning, Remi Gregoire, Antonio Malfatti (Eds.), “TRANSAERO - A European Initiative on Transient Aerodynamics for Railway System Optimization : Community Research in Railway Technology”, Springer, Berlin, (2002)
- 7) 財団法人日本建築センター, 「実務者のための建築物風洞実験ガイドブック 2008年版」, (2008)
- 8) 石原孟, ファムバンフック, 山口敦, 「実測風速を組み込んだ風力発電設備支持物の風応答予測」, 第20回風工学シンポジウム論文集, pp.265-270, (2008)
- 9) 三須弥生, 石原孟, 「風観測と数値流体解析を利用した運転規制区間内の強風発生頻度の予測」, 日本風工学会論文集, Vol.37, No.1, pp.11-24, (2012)