

空気力推定値の不確かさを考慮した横風に対する鉄道車両の信頼性評価

RELIABILITY OF TRAIN CAR AGAINST CROSS WINDS CONSIDERING UNCERTAINTY IN ESTIMATED AERODYNAMIC FORCE

南雲 洋介¹⁾ 石原 孟²⁾

Yosuke NAGUMO¹⁾ and Takeshi ISHIHARA²⁾

ABSTRACT

In this study, a method to evaluate reliability of train cars against cross winds considering uncertainty in estimated aerodynamic force is proposed. First, estimation accuracy of aerodynamic force acting on train car is clarified. We compared the measured aerodynamic forces which act on a full-scale train car model under natural winds with the estimated ones from the measured natural wind speeds. As a result, it was found that spatial average wind speed and 3 seconds time average wind speed were the appropriate methods to estimate the peak values of the aerodynamic forces which act on the train car. Second, safety index to evaluate safety of train car against cross winds is found by using a method of reliability-based design. We calculated the performance functions from the critical wind speeds of overturning of the train cars, the wind speed for regulation of the train and the uncertainties in the estimated aerodynamic forces. As a result, it was found that the safety index varied sensitively depending on the wind resistant performances of the train cars.

Key Words: Railway, Wind speed, Overturning, Reliability-based design, Safety index

1. はじめに

鉄道運行を安全に行うために、強風時には速度規制や運転中止といった列車運転規制が行われる。列車運転規制の基本的な考え方は、車両にはたらく風荷重が車両の転覆に対する耐力を上回らないようにすることである。風荷重と転覆耐力は、国枝¹⁾や日比野・石田²⁾により提案されている風下側の車輪/レール接触点まわりのローリングモーメントに関する静的つり合い式(以下、それぞれ国枝式、総研詳細式とする)を風速について解くことによって、それぞれ風速と転覆限界風速として求められる。転覆限界風速は、車両の種類、軌道の曲線半径およびカント、線路構造物の種類および走行速度(以下、耐力評価条件とする)に応じてあらかじめ計算しておき、転覆限界風速を下回るように列車運転規制の風速基準値が設定される。一方、風速は、線路沿線に設置された風速計により瞬間風速をリアルタイムに観測する。日本の鉄道における瞬間風速の評価方法に関して、一般的には1基の風速計から出力される生の値をそのまま列車運転規制に用いている。この方法では、鉄道車両長の空間スケールにおいてもばらつきのある自然風を適切に評価できていない可能性がある。南雲ら³⁾は、鉄道車両全体に当たる風を精緻に評価できる瞬間風速の評価方法として、鉄道車両長である20mの範囲に複数基の風速計を設置し、各風速計で観測される瞬時値の同時刻における空間平均値(以下、空間平均風速とする)を用いる方法を提案している。その後、南雲ら⁴⁾は、3秒

¹⁾ 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 大学院生 (〒113-8656 文京区本郷 7-3-1) / 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 研究員 (〒331-8513 さいたま市北区日進町 2-479)

²⁾ 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 教授 (〒113-8656 文京区本郷 7-3-1)

程度の時間平均値(以下、3 秒平均風速とする)で瞬間風速を評価することで、実測の横力と風速から推定した横力の平均値が一致し、かつ推定誤差のばらつきが空間平均風速と同程度になることを報告している。ただし、これらの研究で評価対象としている空気力は横力のみであり、鉄道車両の転覆に影響を与えるそのほかの力である揚力と車体中心まわりのローリングモーメント(以下、車体モーメントとする)が考慮されていない。車両の転覆評価を精緻に行うためには、横力、揚力および車体モーメントから風下側の車輪／レール接触点まわりのローリングモーメント(以下、転覆モーメントとする)を求める必要がある。また、空気力の実測値と推定値が平均的に一致したとしても推定誤差は生じるため、その不確かさを考慮した信頼性評価を行うことが課題である。

そこで、本研究では、まず実測のデータに基づき、空間平均風速と3 秒平均風速を用いた場合の転覆モーメントの推定精度を検証する。次に、現行の列車運転規制方法および代表的な耐力評価条件に基づき外力と耐力を設定し、転覆モーメントの推定値の不確かさを考慮した横風に対する安全性指標の評価を行う。

2. 転覆モーメントの推定精度の評価

2.1 評価に用いるデータ

転覆モーメントの推定精度の評価には、公益財団法人鉄道総合技術研究所が北海道島牧村において 2001 年から 2004 年にかけて実施した実物大車両模型による空気力・風向風速測定試験⁵⁾の測定データを用いる。測定データのうち解析に用いる測定量は、風向、風速、大気圧、気温および荷重で、いずれもサンプリング周波数は 10Hz である。解析に際して、測器の応答性能や測器同士の空間的な離れを考慮して、0.5 秒の区間時間平均により 2Hz データに変換する。時間平均の方法について、風向角は単位ベクトル平均とし、それ以外の測定量は単純平均とする。

図 1 および図 2 に測定環境を示す。日本海に面した平地に実物大の単線高架橋(全長 80m、地上高さ 8m、桁高 1m)と車両模型(103 系通勤型車両)が、主風向に対して直交するように配置されている(図 1(a))。風向と風速は、先頭車両模型の風上側 20m の位置に、高さ 10m、離隔 10m で設置した 3 基のプロペラ式風向風速計(YOUNG 社製 5103LM)で観測する(図 1(b)、図 2(a))。風向角 α は線路平行の先頭車側を 0 度として時計回りを正にとる。風向風速計の設置高さは、高架橋上 2m の高さとなり、車両模型にはたらく空気力の風圧中心高さに相当する。横力、揚力および車体モーメントは、高架橋と車両模型の間に設置した 4 台のロードセル(共和電業製 2 分力計 LSM-A-30KNSA8)で測定される荷重から算出する(図 1(b)、図 2(b))。解析対象期間として、風速の瞬時値で 20m/s を超えるかそれに近い風が車両直角方向に近い風向角で観測され、かつ欠測が少ない 12 強風事例 12 時間を選定する。

2.2 評価モデル

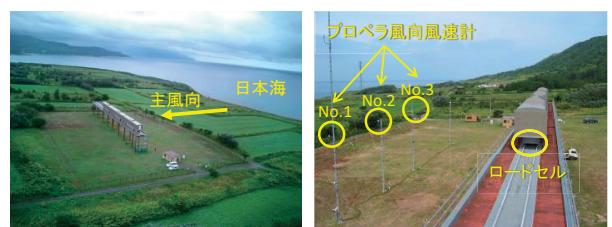
車両にはたらく空気力の実測値は、図 2(b)に示すロードセル No.1~No.4 の同時刻における荷重の合計値として計算する。ロードセルの測定成分のうち、車両模型と直角の水平方向成分 x は風下側を正、上下方向成分 z は下向きを正に取っている。そのため、時刻 t における実測横力 $F_{S,M}(t)$ 、実測揚力 $F_{L,M}(t)$ 、実測車体モーメント $M_{C,M}(t)$ は、ロードセルの測定荷重 $F_{ij}(t)$ (添字 i は測定成分、 j はロードセル番号)、ロードセル・車体中心間距離 $h_l(=1.52\text{m})$ 、ロードセル左右設置間隔 $2b_l(=1.2\text{m})$ を用いてそれぞれ式(1)~式(3)で求める。

$$F_{S,M}(t) = F_{x1}(t) + F_{x2}(t) + F_{x3}(t) + F_{x4}(t) \quad (1)$$

$$F_{L,M}(t) = -\{F_{z1}(t) + F_{z2}(t) + F_{z3}(t) + F_{z4}(t)\} \quad (2)$$

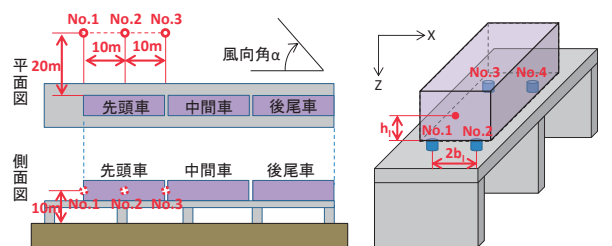
$$M_{C,M}(t) = -\{F_{x1}(t) + F_{x2}(t) + F_{x3}(t) + F_{x4}(t)\}h_l - \{F_{z1}(t) - F_{z2}(t) + F_{z3}(t) - F_{z4}(t)\}b_l \quad (3)$$

実測転覆モーメント $M_{O,M}(t)$ は、実測横力 $F_{S,M}(t)$ 、実



(a) 遠景 (b) 近景

図1 測定環境の外観



(a) 風向風速計 (b) ロードセル

図2 測定機器の配置

測揚力 $F_{L,M}(t)$ 、実測車体モーメント $M_{C,M}(t)$ 、車輪／レール接触点からの車体中心高さ $h_w(=2.36\text{m})$ 、左右の車輪／レール接触点間距離 $2b_w(=1.12\text{m})$ を用いて式(4)で求める(図3)。

$$M_{O,M}(t) = F_{S,M}(t)h_w + F_{L,M}(t)b_w + M_{C,M}(t) \quad (4)$$

一方、車両にはたらく空気力の推定値は、横力係数 $C_S(\alpha_i, t)$ 、揚力係数 $C_L(\alpha_i, t)$ 、車体モーメント係数 $C_M(\alpha_i, t)$ 、空気密度 $\rho(d, p, t)$ 、評価風速 $u_i(t)$ 、車体側面積 $A_S(=51.3\text{m}^2)$ 、車体高さ $h_c(=2.62\text{m})$ から計算する。準定常状態を仮定し、時刻 t における推定横力 $F_{S,E,i}(t)$ 、推定揚力 $F_{L,E,i}(t)$ 、推定車体モーメント $M_{C,E,i}(t)$ をそれぞれ式(5)～式(7)で求める。なお、添字 i は風速の評価方法であり、詳細については後述する。

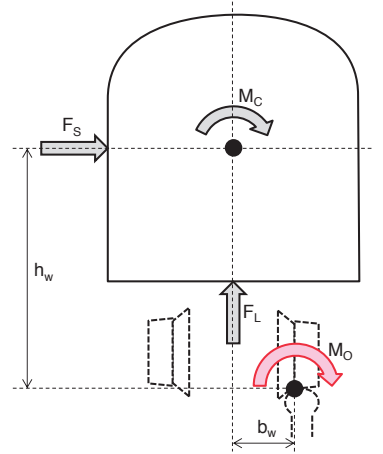


図3 車両にはたらく空気力

$$F_{S,E,i}(t) = \frac{1}{2}C_S(\alpha_i, t)\rho(d, p, t)u_i^2(t)A_S \quad (5)$$

$$F_{L,E,i}(t) = \frac{1}{2}C_L(\alpha_i, t)\rho(d, p, t)u_i^2(t)A_S \quad (6)$$

$$M_{C,E,i}(t) = \frac{1}{2}C_M(\alpha_i, t)\rho(d, p, t)u_i^2(t)A_S h_c \quad (7)$$

横力係数 $C_S(\alpha)$ 、揚力係数 $C_L(\alpha)$ および車体モーメント係数 $C_M(\alpha)$ は、鈴木ら⁶⁾が風洞実験で風向角ごとに求めた値を使用し、10度刻みに四捨五入した風向角に対応する値を適用する。空気密度 $\rho(d, p, t)[\text{kg}/\text{m}^3]$ は、気温 $d(t)[^\circ\text{C}]$ 、大気圧 $p(t)[\text{hPa}]$ として、式(8)で計算する。

$$\rho(d, p, t) = 1.293 \times \frac{273.15}{273.15 + d(t)} \times \frac{p(t)}{1013.25} \quad (8)$$

評価風速 $u_i(t)$ は、以下に示す評価方法により求める。

・瞬時風速 $u_{inst}(t)$: 風速計 No.2(図 2(a)参照)で観測される風速の瞬時値

$$u_{inst}(t) = u_{2,inst}(t) \quad (9)$$

・空間平均風速 $u_{sa}(t)$: 風速計 No.1～No.3 で観測される瞬時値の同時刻における二乗平均平方根

$$u_{sa}(t) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 u_{i,inst}^2(t)}{3}} \quad (10)$$

・3秒平均風速 $u_{3s-gust}(t)$: 風速計 No.2 で観測される瞬時値の現時刻を含む過去3秒間(データ6個)の平均値

$$u_{3s-gust}(t) = \frac{\sum_{i=1}^6 u_{2,inst}\left(t - 3 + \frac{i}{2}\right)}{6} \quad (11)$$

評価風向角 $\alpha_i(t)$ は、 $u_i(t)$ の算出に用いる風速データに対応する風向角を単位ベクトル平均して求める。推定転覆モーメント $M_{O,E,i}(t)$ は、推定横力 $F_{S,E,i}(t)$ 、推定揚力 $F_{L,E,i}(t)$ 、推定車体モーメント $M_{C,E,i}(t)$ から式(12)で求める。

$$M_{O,E,i}(t) = F_{S,E,i}(t)h_w + F_{L,E,i}(t)b_w + M_{C,E,i}(t) \quad (12)$$

式(4)と式(12)で求められる転覆モーメントの最大値を比較することで、空気力の推定精度を評価する。最大値の評価時間は、三須・石原⁷⁾の鉄道における評価時間に関する分析を参考に60秒に設定する。60秒の時間区間 T における実測転覆モーメントの最大値を $\max[M_{O,M}(T)]$ 、推定転覆モーメントの最大値を $\max[M_{O,E,i}(T)]$ (添字 i は風速の評価方法)とし、転覆モーメントの実測値と推定値の比 $R_i(T)$ を式(13)で定義する。

$$R_i(T) \equiv \frac{\max[M_{O,M}(T)]}{\max[M_{O,E,i}(T)]} \quad (13)$$

2.3 推定精度の評価結果

図4には、転覆モーメントの実測値と推定値の比 $R_i(T)$ を0.1ごとの階級に分けた頻度分布と正規分布による近似

曲線を示す。データ数は $N = 720$ である。 $R_i(T) = 1$ のときに転覆モーメントの実測値と推定値が一致し、 $R_i(T) < 1$ では転覆モーメントを過大に推定、逆に $R_i(T) > 1$ では過小に推定していることになる。 R_i の平均値 μ_i と標準偏差 σ_i を $R_i(\mu_i, \sigma_i)$ として表すと、風速の評価方法ごとにそれぞれ $R_{sa}(1.01, 0.102)$ 、 $R_{3s-gust}(1.00, 0.110)$ および $R_{inst}(0.897, 0.107)$ となる。これらの結果から、転覆モーメントの推定において、平均値の観点からは瞬時風速を用いると過大評価になり、空間平均風速もしくは3秒平均風速を用いることで適正評価になることがわかる。また、空間平均風速と3秒平均風速は、推定値の不確かさの分布がよく一致する。図の見やすさの観点から省略したが、評価風速の平均化時間が長くなるにしたがい転覆モーメントは過小評価になっていく。なお、次章の信頼性評価に用いるため、瞬時風速については国枝式の考え方に基づく転覆モーメントの推定結果 $R_{inst,KE}$ をあわせて示す。空気力は横力のみを考慮し、横力係数は車両形状、地上構造物の種類、風向角によらず1を仮定すると、 $R_{inst,KE}(1.12, 0.185)$ となる。

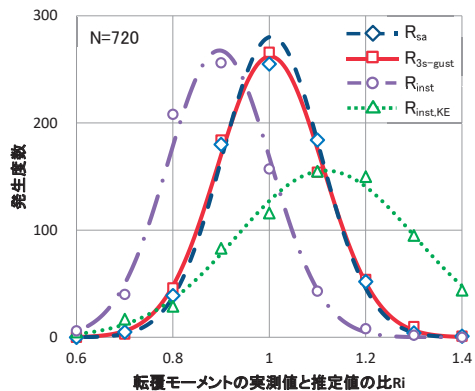


図4 転覆モーメントの実測値と推定値の比の頻度分布

3. 転覆モーメント推定式の信頼性評価

3.1 安全性指標の導出

評価風速に空間平均風速または3秒平均風速を用いることにより、車両にはたらく空気力の実測値と推定値が平均的に一致することがわかった。一方、平均値からのばらつきは生じており、その不確かさを考慮した信頼性評価を行う必要がある。本章では、信頼性設計法⁸⁾に基づき転覆モーメント推定精度の安全性を評価する。本論文の冒頭で述べたとおり、車両の転覆は、風下側の車輪/レール接触点まわりのローリングモーメントに関する静的つり合い式により評価される。この式では、転覆に対する耐力として車両重量、遠心力、横振動慣性力が、外力として風荷重が考慮される。そして、耐力モーメントと外力モーメントがつり合う状態が転覆限界とされる。ここで、簡単のために車両重量モーメントを M_{weight} 、遠心力モーメントを M_{cf} 、横振動慣性力モーメントを M_{vf} 、風荷重モーメントを M_{wind} とおくと、性能関数 Z は式(14)で表される。

$$Z = (M_{weight} - M_{cf} - M_{vf}) - M_{wind} \quad (14)$$

本研究では空気力推定精度の信頼性評価を行うことを目的としているため、遠心力モーメント M_{cf} と横振動慣性力モーメント M_{vf} の項を無視すると、式(15)のようになる。

$$Z = M_{weight} - M_{wind} \quad (15)$$

ここで、車両重量モーメント M_{weight} と風荷重モーメント M_{wind} の推定値をそれぞれ $M_{weight,E}$ 、 $M_{wind,E}$ で表すことにする。車両重量モーメントについては、車両諸元がわかれば正確な値を推定できるため、式(16)の関係式を用いる。ただし、 C_0 は転覆モーメント係数、 u_r は耐力に相当する風速値であり転覆限界風速を指す。

$$M_{weight} = M_{weight,E} \equiv \frac{1}{2} C_0 \rho u_r^2 A_s h_w \quad (16)$$

風荷重モーメントについては、式(13)より実測値 M_{wind} と推定値 $M_{wind,E}$ の比を係数 R とおき、式(17)の関係式を用いる。ただし、 u_s は外力に相当する風速値であり観測風速を指す。

$$M_{wind} = \frac{M_{wind}}{M_{wind,E}} \cdot M_{wind,E} \equiv R \cdot \frac{1}{2} C_0 \rho u_s^2 A_s h_w \quad (17)$$

式(16)と式(17)を式(15)に代入すると、式(18)が得られる。

$$Z = (u_r^2 - R \cdot u_s^2) \frac{1}{2} C_0 \rho A_s h_w \quad (18)$$

風荷重モーメントの推定誤差以外には不確かさがないものとするれば、式(18)において確率変数として扱うパラメー

タはRのみである。したがって、Rの平均値を μ_R 、標準偏差を σ_R とすると、性能関数Zの平均値 μ_Z 、標準偏差 σ_Z はそれぞれ式(19)、式(20)となる。

$$\mu_Z = (u_r^2 - \mu_R \cdot u_s^2) \frac{1}{2} C_{0\rho} A_s h_w \quad (19)$$

$$\sigma_Z = \sigma_R \cdot u_s^2 \cdot \frac{1}{2} C_{0\rho} A_s h_w \quad (20)$$

信頼性設計においては、安全性の評価として性能関数の平均値 μ_Z を標準偏差 σ_Z で除した値である安全性指標 β が用いられる。式(19)と式(20)から β を求めると式(21)が導かれる。

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{u_r^2 - \mu_R \cdot u_s^2}{\sigma_R \cdot u_s^2} \quad (21)$$

3.2 安全性指標の評価結果

現行の列車運転規制方法および代表的な耐力評価条件に基づき外力と耐力を設定し、導出した評価式を用いて安全性指標 β のケーススタディを行う。一般的に鉄道事業者では、外力評価を瞬時風速により、耐力評価を国枝式により行っている。一方、日比野ら⁹⁾は、空間平均風速による外力評価と総研詳細式による耐力評価を組み合わせた列車運転規制方法を提案しており、南雲ら⁴⁾も3秒平均風速による風速評価法の導入にあたっては総研詳細式と組み合わせると述べている。そこで、これらの外力評価と耐力評価の組み合わせによる安全性評価を行うこととする。

安全性指標 β を計算するためのパラメータの値を設定する。確率変数 $R(\mu_R, \sigma_R)$ は2.3節の結果を適用し、瞬時風速で $R_{inst,KE}(1.12, 0.185)$ 、空間平均風速で $R_{sa}(1.01, 0.102)$ 、3秒平均風速で $R_{3s-gust}(1.00, 0.110)$ とする。観測風速 u_s は、列車運行が可能な最大値を想定し、多くの鉄道事業者が強風時の運転中止基準値としている25m/sとする。転覆限界風速 u_r は、耐力評価条件に応じて総研詳細式で計算する。ただし、本論文では風荷重の影響のみを評価することを目的として、遠心力と横振動慣性力は考慮しない。自然風向角は90度を仮定する。

最初に、走行速度が安全性指標に与える影響を調査した。図5には、安全性指標 $\beta_{i,j}$ (添字*i, j*はそれぞれ風速と

耐力の評価方法)の走行速度による変化を示す。首都圏の代表的な通勤型電車の先頭車両(主な諸元は、車両質量31600kg、車両長19.6m、車体高さ2.67m)が2.1節の試験と同じ高架橋上を直線走行する条件とし、走行速度は0から120km/hまで10km/h刻みに変化させた。走行速度が大きくなるにしたがい、安全性指標は小さくなる。これは、列車走行風により車両にあたる相対風速が大きくなるためである。空間平均風速と総研詳細式の組み合わせの $\beta_{sa,HBN}$ と3秒平均風速と総研詳細式の組み合わせの $\beta_{3s-gust,HBN}$ は同程度の値となり、瞬時風速と国枝式の組み合わせの $\beta_{inst,KE}$ はこれよりも小さな値となる。このことから、瞬時風速と国枝式の組み合わせに比べ、空間平均風速もしくは3秒平均風速と総研詳細式の組み合わせが高い信頼性を示す。許容安全性指標については、日本において列車の転覆に対して明示された例がないため、今後検討する必要がある。

次に、線路構造物の種類と車両の種類が安全性指標に与える影響を調査した。図6には、3秒平均風速と総研詳細式の組み

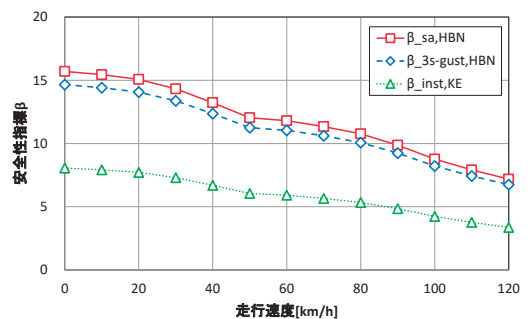
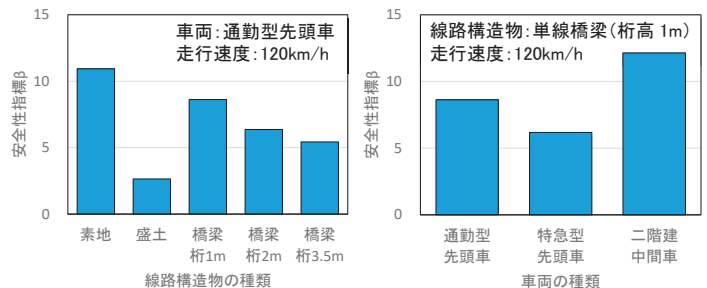


図5 安全性指標の走行速度による変化 (通勤型先頭車、単線高架橋(桁高1m))



(a) 線路構造物の影響 (b) 車両の影響

図6 安全性指標 $\beta_{3s-gust,HBN}$ の線路構造物および車両による変化

合わせによる安全性指標 $\beta_{3s-gust, HBN}$ の線路構造物および車両による変化を示す。転覆限界風速の計算に用いる空気力係数は、素地以外の線路構造物については種本ら¹⁰⁾の風洞実験結果を用いた。素地については森山ら¹¹⁾が提案する方法に準じ、国枝式の仮定値である風向角 90 度で横力係数 1 を適用し(揚力係数およびモーメント係数は考慮しない)、その風向角特性は盛土と同様とした。図6(a)について、 $\beta_{3s-gust, HBN}$ は素地の場合に最も高く、盛土の場合に最も低くなり、その差は非常に大きい。橋梁については、桁高が大きくなるにしたがい $\beta_{3s-gust, HBN}$ が小さくなる。なお、図5の走行速度 120km/h と図6(a)の橋梁(桁高 1m)で $\beta_{3s-gust, HBN}$ の値が若干異なるのは、図5の解析において参考文献 6)の空気力係数を適用しているためである。図6(b)について、車両の種類によっても $\beta_{3s-gust, HBN}$ は大きく変化する。安全性指標 β は、列車の耐風性能によって大きく変化することがわかった。

4. おわりに

本研究では、風下側の車輪/レール接触点まわりのローリングモーメント(転覆モーメント)について、評価風速を変えた場合の推定精度を検証し、推定値の不確かさを考慮した信頼性評価を行い、以下の結論が得られた。

- (1) 横力、揚力および車体モーメントを考慮して転覆モーメントの推定精度を評価した。その結果、空間平均風速もしくは 3 秒平均風速を用いて空気力を推定することにより、転覆モーメントの実測値と推定値の平均値が一致し、両風速からの推定値の不確かさの分布がよく一致することがわかった。
- (2) 空気力推定値の不確かさを考慮した安全性指標の評価式を導出し、各転覆限界風速推定式の信頼性評価を行った。その結果、瞬時風速と国枝式に比べ、空間平均風速もしくは 3 秒平均風速と総研詳細式の組み合わせが高い信頼性を示すことがわかった。また、安全性指標は、列車の耐風性能により大きく変化することがわかった。今後、遠心力や横振動慣性力を考慮した場合の転覆限界風速推定式の信頼性評価を行う予定である。

謝辞 本研究にあたり、(公財)鉄道総合技術研究所より試験データを提供いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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, pp.1-15, 1972
- 2) 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
- 3) 南雲洋介, 栗原智亮, 鈴木博人, 島村誠, 強風時の列車運転規制に用いる風速の評価方法に関する検討 -自然風の空間的なばらつきへの考慮-, 鉄道工学シンポジウム論文集, No.18, pp.133-140, 2014
- 4) 南雲洋介, 鈴木博人, 島村誠, 強風時の列車運転規制に用いる風速の評価方法に関する検討 -実物大車両模型の実測データを用いた瞬間風速の平均化時間の解析-, 風工学シンポジウム論文集, No.23, pp.181-186, 2014
- 5) 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
- 6) 鈴木実, 種本勝二, 斎藤寛之, 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
- 7) 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
- 8) 星谷勝, 石井清, 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 1986
- 9) 日比野有, 三須弥生, 栗原智亮, 森山淳, 島村誠, 強風時の新しい運転規制方法の検討, JR East Technical Review, No.35, pp.36-41, 2011
- 10) 種本勝二, 鈴木実, 斎藤寛之, 井門敦志, 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
- 11) 森山淳, 堀岡健司, 土井賢一, 車両転覆限界風速算出装置及び車両転覆限界風速算出方法, 特許公報(B2), 5888931, 2016