



論文



流入風の乱流特性を考慮した鉄道車両の空気力係数の予測に関する研究

A Study of Aerodynamic Coefficients on a Train Car Considering Turbulence Effects of Approaching Flow

南雲洋介*¹

石原 孟*²

Yosuke NAGUMO

Takeshi ISHIHARA

SUMMARY

In this study, aerodynamic coefficients of train cars are predicted considering turbulence effects of approaching flow. Firstly, wind tunnel tests are carried out to measure wind speeds, turbulence intensities, mean aerodynamic coefficients of a train car and mean pressures around a car-body in uniform and turbulent flows. A model is then proposed to predict aerodynamic coefficients in the turbulent flow from those obtained in the uniform flow, in which the differences of mean wind speed profiles and the mean pressures around the car-body in the uniform and turbulent flows as well as effects of fluctuating wind speed and direction are considered by using correction factors. The predicted aerodynamic coefficients by the proposed model show good agreement with those obtained from the wind tunnel test.

key words: Train car, Wind speed, Turbulence intensity, Mean aerodynamic force, Mean Pressure

1. はじめに

鉄道では、横風による車両の転覆防止や転覆時の被害軽減を目的として、強風時に速度規制や運転中止といった運転規制を行っている。運転規制において重要なことは、車両の転覆に対する耐力が車両に作用する外力を上回る状態を担保することである。耐力は、風上側の車輪／レール間の力がゼロになるときの自然風の風速として評価される。この自然風の風速は、日本では転覆限界風速、欧州では Characteristic wind speed と呼ばれる。転覆限界風

速は、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のつり合いを自然風の風速について解くことで求められる。この解析法として、日本では国枝¹⁾により提案された静的解析法や日比野・石田²⁾により提案された準静的解析法が広く用いられている。また、日比野ら³⁾は、横風に対する車両の動的解析法として、1 車両シミュレーションモデルを提案している。一方、欧州では横風に対する列車の走行安全性の評価規格である EN14067-6 (European committee for standardization⁴⁾)において、準静的

* 1 東日本旅客鉄道株式会社 J R 東日本研究開発センター防災研究所 研究員

Researcher, Disaster Prevention Research Laboratory, 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: 2019 年 1 月 9 日, 採用決定年月日: 2019 年 7 月 12 日)

解析法や動的解析法が規定されている。

転覆限界風速の導出では、車両に作用する空気力を精度よく評価することが重要である。空気力のうち車両の転覆に影響を与える主な成分は、車体中心位置で考えると、横力、揚力、車体中心まわりのローリングモーメントの3つである。これらは、一般的には風洞実験により車両ごと、風向角ごとに導出された空気力係数を用いて推定される。空気力係数の値は、気流条件によって大きく異なる。そのため、空気力係数の導出にあたっては、適切な気流特性の設定が重要である。建築物や土木構造物は静止体であるため、現地に合わせて気流条件を設定すればよい。一方、鉄道車両は移動体であるため、乱流である自然風と一様流である車両走行風の相対風が車両に当たっている。そのため、車両まわりの気流特性は、走行速度に応じて時々刻々と変化している。したがって、本来であれば気流の乱流強度を細かく変化させながら、あらゆる乱流強度における空気力係数をそれぞれ導出することが理想的である。しかし、実態としては一つの代表的な乱流強度に対象を絞った空気力係数が導出されている。例えば、日本では自然風を模擬した乱流（例えば、鈴木ほか⁵⁾、日比野ほか⁶⁾）が用いられ、欧州では一様流（EN14067-6⁴⁾）が用いられている。

日本では、強風による列車の転覆が問題になるのは主に在来線である。これは、新幹線や世界の鉄道で広く採用されている標準軌（軌間 1435mm）に対して、日本の在来線が狭軌（軌間 1067mm）を採用しており、車両の自重による復元力が小さいためである。実際に、日本における過去の強風による列車の転覆事故は、いずれも在来線で発生している。事故事例やその概要については、餘部事故技術調査委員会（中村⁷⁾、藤井ら⁸⁾、航空・鉄道事故調査委員会⁹⁾、島村¹⁰⁾、今井ら¹¹⁾、荒木ら¹²⁾を参照されたい。そして、日本の在来線は、特急電車でも最高速度が 130km/h と比較的低速であるため、走行時においても自然風の影響が大きいと考えられている。これらより、日本では自然風を模擬した乱流中で空気力係数を導出する方法が一般的である。この風洞実験法は、鈴木ら⁵⁾により検討され、日比野ら⁶⁾が実物大模型車両実験によりその空気力係数の導出精度を検証している。そして、種本ら¹³⁾により車体形状と線路構造物形状を組み合わせた風洞実験が実施され、空気力係数のデータベースが整備されている。

一方、欧州では、横風に起因する列車の転覆事故はこれまでにほとんど発生していない。しかしながら、近年における高速鉄道網の拡大に伴い、横風に対する転覆防止の問題意識は高まっている。そのため、欧州が対象としてい

るのは主に高速鉄道であり、欧州規格の EN14067-6 では最高速度 200km/h 以上の列車に対してのみ細かい評価方法が規定されている。空気力係数を導出するための基本的な考え方は日本と同様であるが、最も大きな違いは一様流中での風洞実験の実施が規定されていることである。そして、流入風の乱流の効果は、乱流特性（乱流強度、スペクトル、長さスケール）を考慮して発生した自然風またはガスト風速を用いることで反映させ、準定常理論に基づき最大空気力を評価している。空気力係数に関する研究では、Baker et al.¹⁴⁾が実物大車両を用いたフィールド試験と縮尺模型による風洞実験を実施して両者の結果を比較している。また、DEUFRAKO プロジェクト（Gautier et al.¹⁵⁾）において風洞実験法を含む横風に対する列車の安全性評価法が検討され、その知見が EN14067-6 や欧州内における各国間の相互乗り入れ基準である Technical Specification of Interoperability (TSI) (European Railway Agency¹⁶⁾)に反映されている。これらの規格では、一様流中での風洞実験が規定されるとともに、空気力係数のベンチマーク結果が示されている。また、これらの規格に基づいた一様流中の風洞実験も数多く行われている（例えば、Bocciolone et al.¹⁷⁾）。

以上のように、空気力係数を導出するための風洞実験において、日本と欧州では異なる気流を用いている。しかし、実際の列車の走行時には、乱流である自然風と一様流である走行風を合成した相対風が車両に当たっている。そのため、低速走行時には乱流の影響を大きく受け、高速走行時には一様流に近い気流が車両に作用すると考えられる。したがって、走行車両の転覆耐力を精度よく評価するためには、車両の走行速度を考慮して任意の乱流強度における空気力係数を予測する必要がある。これに対して、三須・石原¹⁸⁾は、一様流と乱流の2種類の気流で車両の空気力係数を測定し、気流特性の違いが空気力係数へ与える影響を明らかにした。さらに、気流の乱流強度に応じて一様流中と乱流中の空気力係数を内挿し、任意の乱流強度における空気力係数を予測する手法を提案したが、流入風の乱流強度の違いにより空気力係数が変化するメカニズムには言及されていない。そのため、一様流中と乱流中の空気力係数の違いのメカニズムを考慮した予測モデルを構築し、その予測精度を検証する必要がある。

そこで、本研究では、一様流中の空気力係数から任意の乱流強度の気流中におけるそれを予測するモデルを提案するとともに、その予測精度を検証する。2章では、風洞実験により気流特性、空気力係数および車体まわりの風圧分布を測定し、一様流中と乱流中の空気力係数の違い

のメカニズムを明らかにする。3章では、風洞実験の結果をもとに一樣流中の空気力係数から乱流中のそれを予測するモデルを提案する。4章では、提案モデルによる空気力係数の予測精度を風洞実験結果と比較することにより検証する。5章では、本研究のまとめを述べる。

2. 風洞実験の結果

本章では、一樣流と乱流の2種類の気流による風洞実験を実施する。気流特性、車両に作用する空気力および車体まわりの風圧分布を測定し、気流の違いが鉄道車両の空気力係数へ与える影響を評価する。

2. 1 風洞実験の概要

風洞実験の条件設定は、三須・石原¹⁸⁾に準じた。本研究では、三須・石原¹⁸⁾が実施した橋梁上の車両における風洞実験に加え、盛土および素地上の車両における空気力を正確に計測するための仮床を設置し、新しい風洞実験を行った。

風洞は、東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻橋梁研究室の風工学実験室¹⁹⁾に設置されてい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 $\pm 1\%$ 、乱流強度は0.5%以下である。

鉄道車両および線路構造物の模型は、縮尺1/40とした。車両模型は通勤型電車を想定した形状とし、先頭車両と後尾車両の2両編成とした。測定対象は先頭車両とし、車両の床下機器を再現した。測定対象ではない後尾車両の床下機器は省略した。図1には、先頭車両の主な寸法を示す。 h_1 は風洞床面からの車体中心高さである。鉄道における線路構造物は、代表的な橋梁、盛土および素地の3種類とした。図2には、線路構造物模型の側面図を示す。図2(a)は橋梁模型を示し、構造は複線である。橋梁の桁高さは、実物大換算で1mとした。図2(b)は盛土模型を示し、構造は単線である。盛土高さは、実物大換算で5mである。素地は、風洞床面上に直に車両を設置する構造と

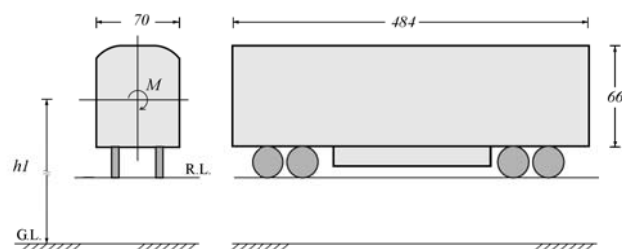
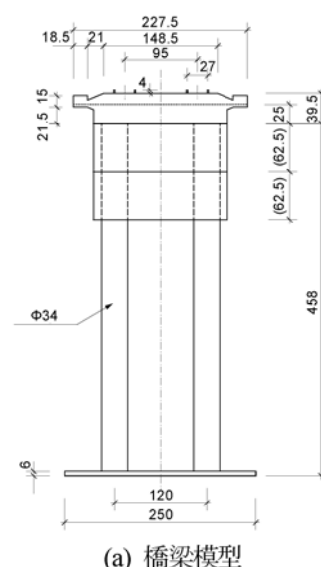


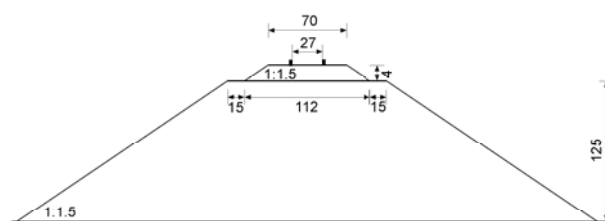
図1 縮尺1/40先頭車両模型

Fig.1 1/40 scale model of the leading car

した。図3には、車両模型を設置した状態の風洞内のイメージを上面図で示す。先頭車両の中心がターンテーブル中心になるようにした。風向角 ψ は、先頭車両の前方向を0度として、風上側方向との相対角度として設定し、時計周りを正とした。座標は、ターンテーブル中心の床面高さを原点にとり、主流方向(u成分)をx、主流直角方向(v成分)をy、鉛直方向(w成分)をzとした。xとyの方向は図3に示すとおりであり、zは鉛直上向きを正とした。実際の走行車両は地面との相対運動を生じるため、厳密には図3の設定風向角とは気流の状態が異なる。走行状態と静止状態の気流の違いが空気力係数に与える影響については、鈴木²⁰⁾が走行車両模型を用いた素地上



(a) 橋梁模型



(b) 盛土模型

図2 線路構造物模型の側面図

Fig.2 Side views of the line structure models

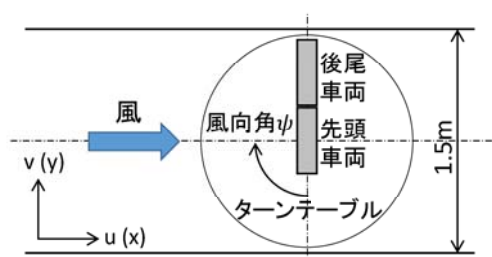


図3 風洞内における車両模型の上面図

Fig.3 Top views of the train car model in the wind tunnel

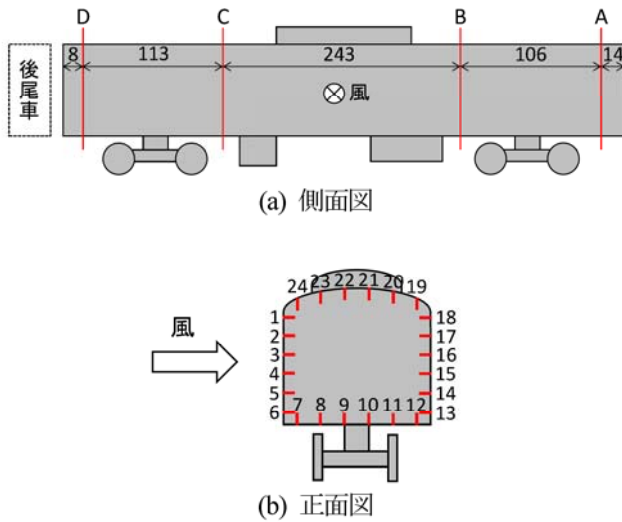


図4 風圧測定用の車両模型

Fig.4 The car model for wind pressure measurements

の空気力測定試験を実施し、車両走行の影響が小さいことを確認している。本研究では同文献に基づき、素地については走行速度と静止状態の気流の違いを無視できると判断し、橋梁と盛土についても同様の仮定をした。

気流の測定には、Dantec Dynamics 社の X 型プローブ 55R54 および計測システム Multichannel CTA 54N80 を用いた。気流の測定は、主流方向 (u 成分) と主流直交方向 (v 成分) とした。平均風速および乱流強度の評価時間は 60 秒とし、500Hz のローパスフィルタを通して 1kHz で A/D 変換を行った。気流の測定は、線路構造物を設置しない状態での流入風と、線路構造物を設置した状態での構造物上の車両位置における気流の 2 通りを実施した。

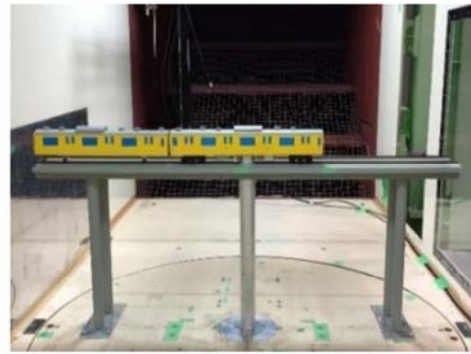
空気力の測定には、日章電機製の 6 分力天秤 LMC-6511-2 を用いた。平均空気力の評価時間は 60 秒とし、30Hz のローパスフィルタを通して 500Hz で A/D 変換を行った。車両の転覆に影響する空気力は、主に横力 F_S 、揚力 F_L 、車体中心まわりのローリングモーメント M_R の 3 つである。そこで、天秤で測定された空気力から、横力係数 $C_S(\bar{\psi})$ 、揚力係数 $C_L(\bar{\psi})$ 、車体中心まわりのローリングモーメント係数 $C_M(\bar{\psi})$ をそれぞれ式(1)、式(2)、式(3)で求めた。

$$C_S(\bar{\psi}) = \frac{\overline{F_S(\bar{\psi})}}{\frac{1}{2} \rho \bar{U}_r^2 A} \quad (1)$$

$$C_L(\bar{\psi}) = \frac{\overline{F_L(\bar{\psi})}}{\frac{1}{2} \rho \bar{U}_r^2 A} \quad (2)$$

$$C_M(\bar{\psi}) = \frac{\overline{M_R(\bar{\psi})}}{\frac{1}{2} \rho \bar{U}_r^2 A h} \quad (3)$$

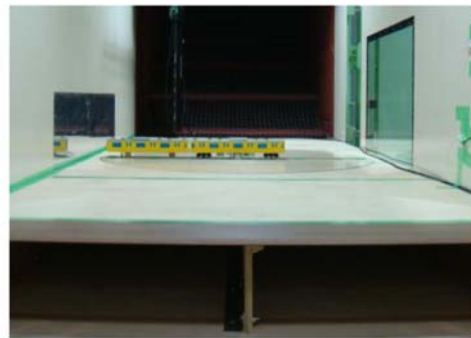
ここで、 ρ は空気密度、 $\bar{U}_r$ は基準風速、 A は車体側面積 (0.032m²)、 h は車体の下端から上端までの高さ (0.066m) である。空気密度 ρ は、風路内で測定した気温と大気圧から



(a) 橋梁上に設置した車両模型 (風洞床上)



(b) 盛土上に設置した車両模型 (仮床上)



(c) 素地上に設置した列車模型 (仮床上)

図5 車両と線路構造物の模型の設置状況

Fig.5 Scale models of train car on the different line structures

計算した。基準風速 $\bar{U}_r$ は、車両および線路構造物を設置しない状態における車体中心高さの平均風速とした。本研究では、レイノルズ数の空気力係数への影響が少ないことから¹⁸⁾、実験に用いる流入風の平均風速は天秤の定格荷重を考慮して、10m/s 前後で線路構造物ごとに 1 種類とした。

車体まわりの風圧分布を明らかにするため、本研究では、メロンテクノス社の多点圧力センサ (48ch) および同社の多点圧力計測システムを用いて風圧の測定を新たに実施した。平均圧力の評価時間は 64 秒とし、ローパスフィルタは通さずに 256Hz で A/D 変換を行った。図4には、風圧測定に用いた車両模型の概要を示す。模型の形状お

よび寸法は、空気力の測定に用いた模型（図1）と同じである。測定断面は、車体まわりに機器の配置されていない4断面（A～D）を選定した。1断面あたりの測定点は24点で、1辺あたり6点である。各測定点の圧力係数 $C_{p,i}(\bar{\psi})$ は、測定点番号を添字 i で表し、式(4)で求めた。

$$C_{p,i}(\bar{\psi}) = \frac{\bar{P}_i(\bar{\psi})}{\frac{1}{2}\rho U_r^2} \quad (4)$$

図5には、車両と線路構造物の模型の設置状況を示す。図5(a)は、風向角90度における車両と橋梁の組み合わせである。橋梁端部の有無による空気力係数の変化は無視できることから¹⁸⁾、本実験では橋梁端部は風洞壁面まで延長しないこととした。図5(b)は、風向角70度における車両と盛土の組み合わせである。盛土端部による空気力係数の影響があるため、盛土模型は風洞壁面まで延長した。図5(c)は、風向角90度における車両と素地の組み合わせである。素地の場合にはレールの天端と地面と同じ高さで仮定し、レールを設けないこととした。盛土条件での閉塞率は10.0%（風路断面積2.7m²、盛土投影面積

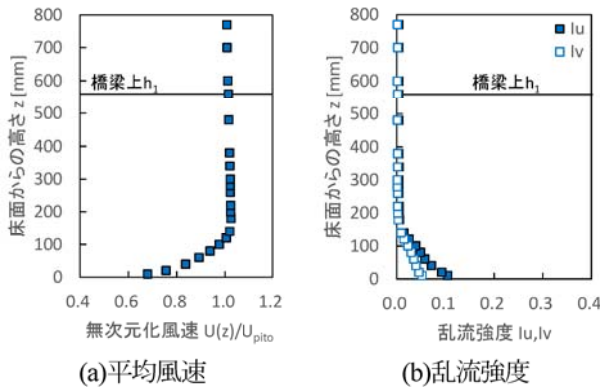


図6 一様流中の平均風速および乱流強度の鉛直分布
Fig.6 Vertical profiles of mean wind speed and turbulence intensities in the uniform flow

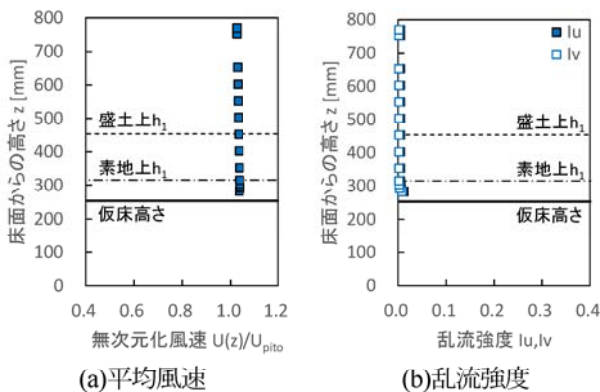


図7 仮床上の平均風速および乱流強度の鉛直分布
Fig.7 Vertical profiles of mean wind speed and turbulence intensities on the provisional floor

0.206m²、車両投影面積0.064m²)であり、測定された空気力係数と圧力係数には閉塞率の影響が含まれている。なお、仮床の影響については風速増速として考慮して、空気力係数と圧力係数を評価した。

2. 2 気流特性

(1) 流入風の気流特性

最初に、線路構造物を設置しない状態での流入風の測定結果を示す。気流の測定はターンテーブル中心で行い、平均風速はピトー管位置（x=-3345mm, y=-250mm, z=770mm）の平均風速 $\overline{U}_{pito}$ で無次元化した。

図6には、一様流中の平均風速および乱流強度の鉛直分布を示す。図中には、橋梁上の車両模型の車体中心高さ h_1 を実線（z=560mm）であわせて示した。この図から、橋梁については車体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であることがわかる。一方、風洞床面付近の高さでは、境界層の影響を受ける。そのため、盛土と素地のケースでは、線路構造物および車両を仮床上に設置した。図7には、仮床上の気流の鉛直分布を示す。図中には、仮床高さを太実線（z=253mm）、盛土上の車体中心高さを破線（z=253+201mm）、素地上の車体中心高さを一点鎖線（z=253+62mm）であわせて示した。仮床上では高さによらず平均風速が一定となり、乱流強度もほぼ0となっていることが確認できる。

乱流のケースでは、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作成した。図8には、自然風を模擬した乱流境界層の平均風速および乱流強度の鉛直分布を示す。また、各線路構造物上の車体中心高さをあわせて示した。乱流境界層の平均風速は、式(5)に示すべき法則²¹⁾により表す。

$$\frac{\overline{U}_z}{U_r} = \left(\frac{z}{z_r}\right)^\alpha \quad (5)$$

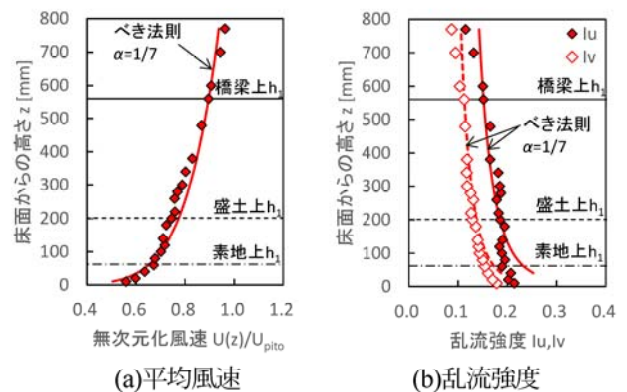


図8 乱流中の平均風速と乱流強度の鉛直分布
Fig.8 Vertical profiles of mean wind speed and turbulence intensities in the turbulent flow

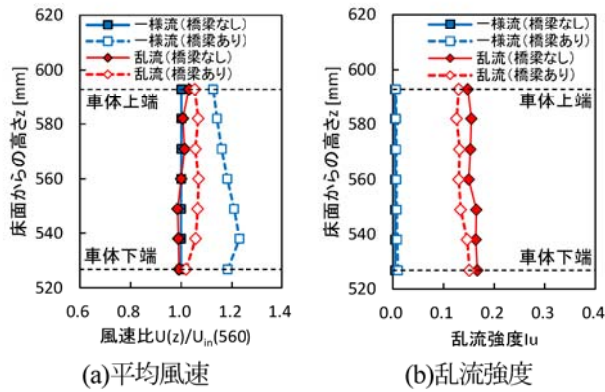


図9 橋梁上の車両位置における平均風速と乱流強度

Fig.9 Mean wind speeds and turbulence intensities at the car position on the bridge

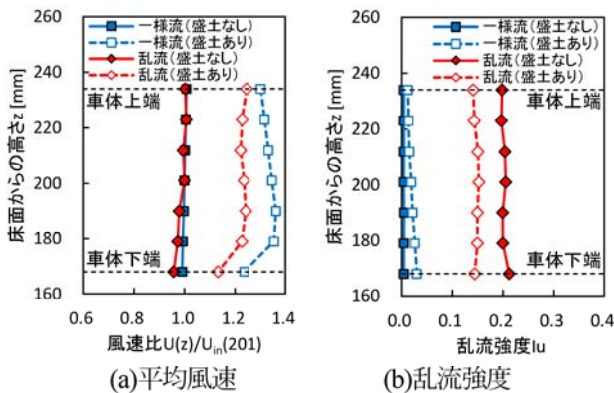


図10 盛土上の車両位置における平均風速と乱流強度

Fig.10 Mean wind speeds and turbulence intensities at the car position on the embankment

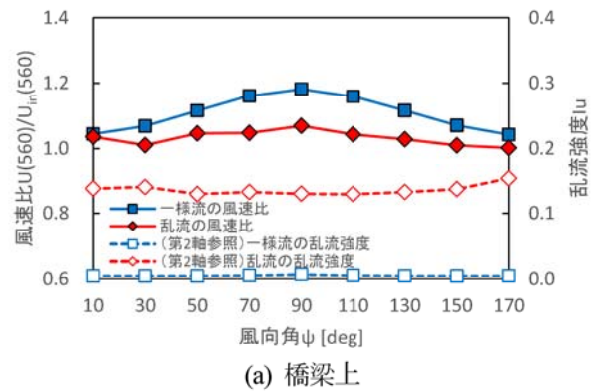
ここで、 z_r は基準高さ、 $\bar{U}_r$ は基準高さにおける平均風速、 $\bar{U}_z$ は高さ z における平均風速である。図8(a)には、橋梁模型上の車体中心高さ($z=560\text{mm}$)を基準として、べき指数を $\alpha = 1/7$ としたときに式(5)により求められる平均風速の鉛直分布を実線であわせて示した。実験で得られた平均風速の鉛直分布は、べき法則とほぼ一致していることがわかる。一方、乱流強度の鉛直分布は式(6)によって表される²¹⁾。

$$I_z = I_r \left(\frac{z}{z_r} \right)^{-\alpha-0.05} \quad (6)$$

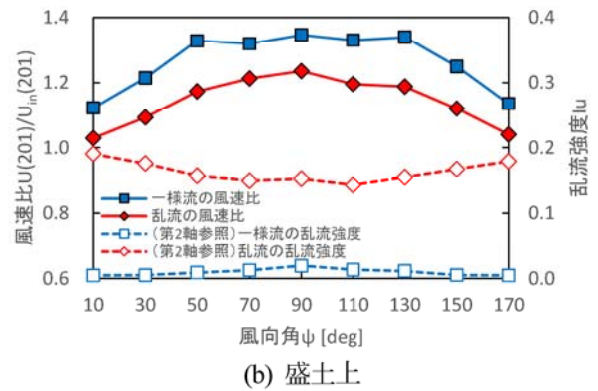
ここで、 z_r は基準高さ、 I_r は基準高さでの乱流強度である。図8(b)には、橋梁模型上の車体中心高さを基準として、 $\alpha = 1/7$ としたときに式(6)により求められる乱流強度(I_u は実線、 I_v は破線)の鉛直分布をあわせて示した。実験で得られた乱流強度は、 u 成分、 v 成分ともにべき法則と概ね一致していることがわかる。

(2) 構造物上の気流特性

次に、線路構造物上の車両位置における気流の測定結



(a) 橋梁上



(b) 盛土上

図11 構造物上の車両位置における平均風速と乱流強度の風向角による変化

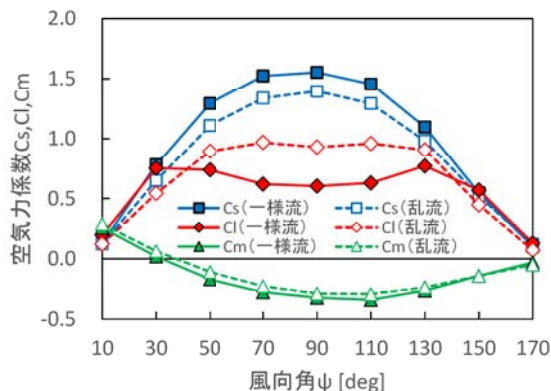
Fig.11 Variation of mean wind speeds and turbulence intensities at the car position on the line structures with the wind angle of attack

果を示す。車体の風上側の側面位置において、車体の下端から上端までの気流を測定した。図9には、風向角90度における橋梁上の車両位置での平均風速と乱流強度を示す。車体の下端と上端の高さは、破線で示した。図9(a)は、橋梁上の車両の車体中心高さにおける流入風の平均風速 $U_{in}(560)$ で無次元化した風速比の分布である。参考のために、橋梁を設置しないときの同じ位置における流入風の平均風速をあわせて示す。橋梁を設置した状態では、設置しない状態に比べて風速が増加されており、その増速割合は乱流に比べて一様流の方が大きい。図9(b)は、 u 成分の乱流強度 I_u の鉛直分布である。一様流では橋梁の有無により乱流強度はほとんど変化しないが、乱流では橋梁を設置した状態の方が乱流強度は小さい。これは、橋梁の有無によらず、変動風速の標準偏差が同程度であるのに対して、橋梁を設置した状態では平均風速が大きくなるためである。

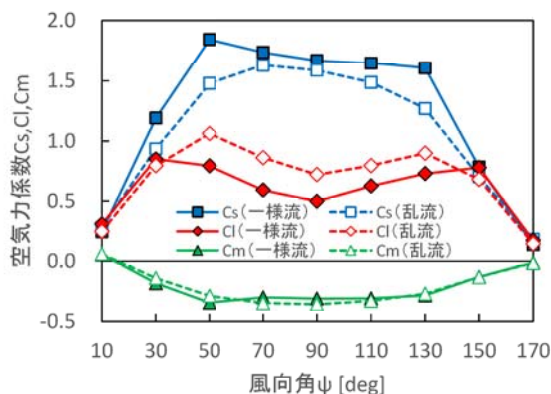
図10には、風向角90度における盛土上の車両位置での平均風速と乱流強度を示す。図10(a)は、盛土上の車両の車体中心高さにおける流入風の平均風速 $U_{in}(201)$ で無

次元化した風速比の分布である。傾向は橋梁の場合と同様であるが、構造物上の風速の増速割合は盛土の方が大きい。これにより、流入風に対して盛土上の乱流強度 I_u の減少割合は、橋梁の場合に比べて大きくなっている。

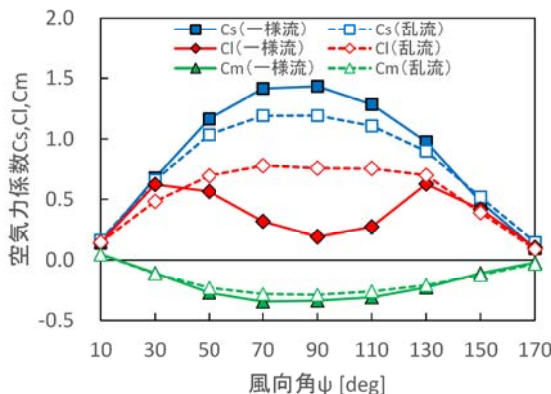
図 11 には、構造物上の車両位置における平均風速と乱流強度の風向角特性を示す。測定点の高さは車体中心高さとした。構造物や気流によらず、風向角 90 度で風速が最も大きくなっている。



(a) 橋梁上



(b) 盛土上

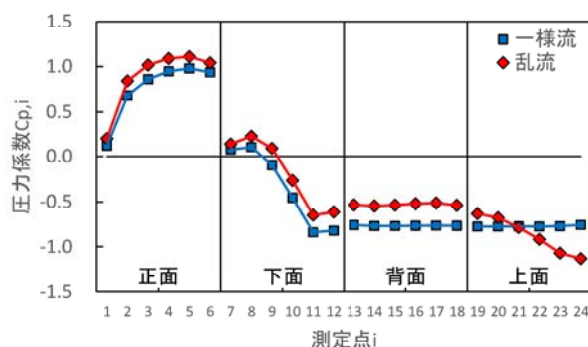


(c) 素地上

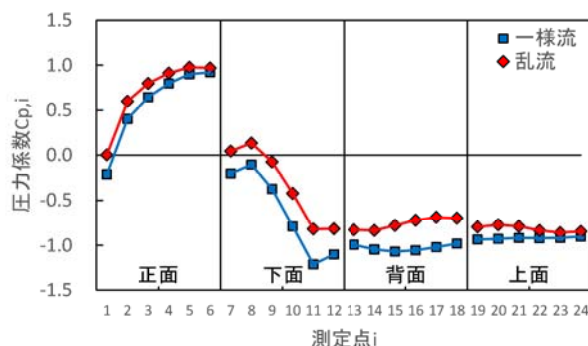
図 12 車両の空気力係数の風向角による変化
Fig.12 Variation of aerodynamic coefficients of the train car
with the wind angle of attack

2. 3 空気力係数

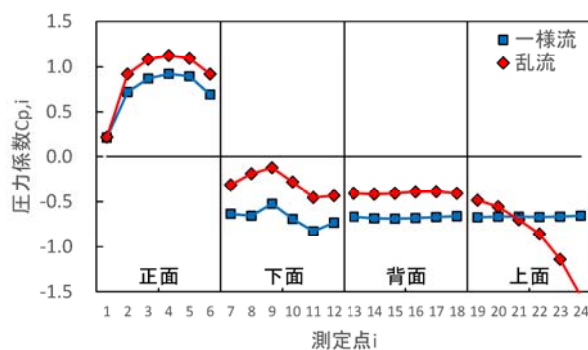
図 12 には、車両の空気力係数の風向角による変化を示す。いずれの線路構造物においても、横力係数 C_s は一樣流中の値に比べ乱流中の方が小さくなっている。また、盛土の上では、一樣流中のときに 50 度と 130 度に極大値がみられる。一方、揚力係数 C_L は、横力係数 C_s と異なり、一樣流中の値に比べ乱流中の方が大きい傾向である。また、盛土上の揚力係数 C_L は、一樣流と乱流中ともに、極大値が 30~50 度および 130~150 度で見られる。同様な傾向は一樣流中の素地上の揚力係数 C_L にも見られる、ローリングモーメント係数 C_M については、風向角 90 度付近で



(a) 橋梁上

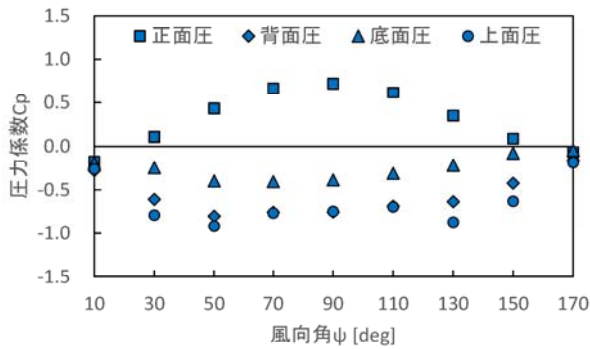


(b) 盛土上

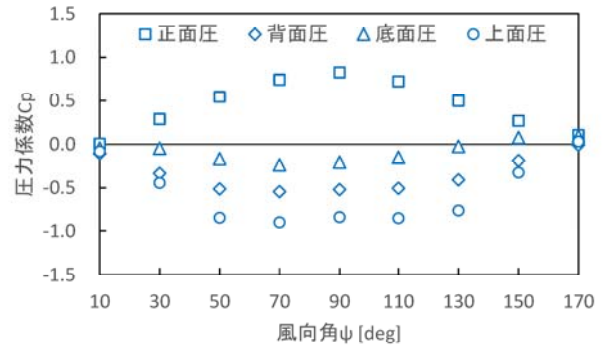


(c) 素地上

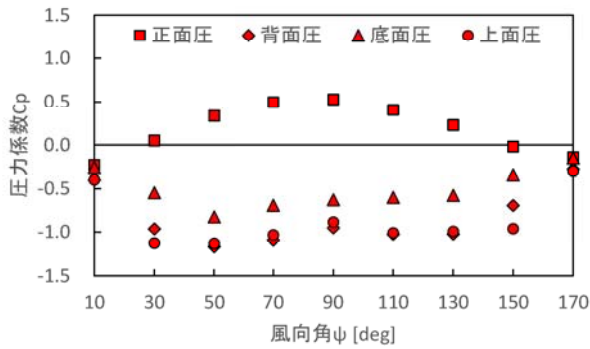
図 13 断面 C での車体まわりの圧力係数 (風向角 90 度)
Fig.13 Pressure coefficients around the car-body at section C
(Wind angle of attack is 90 degree)



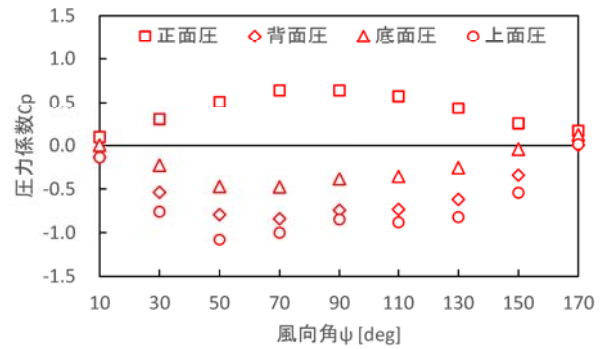
(a) 橋梁上



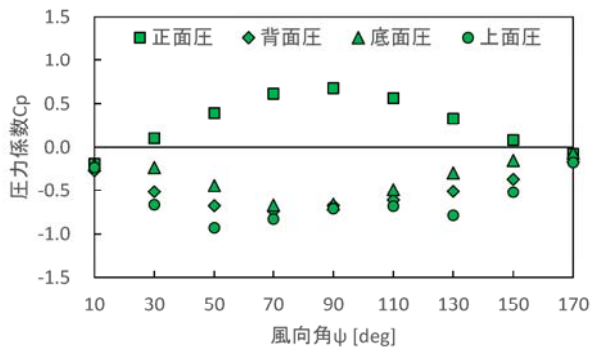
(a) 橋梁上



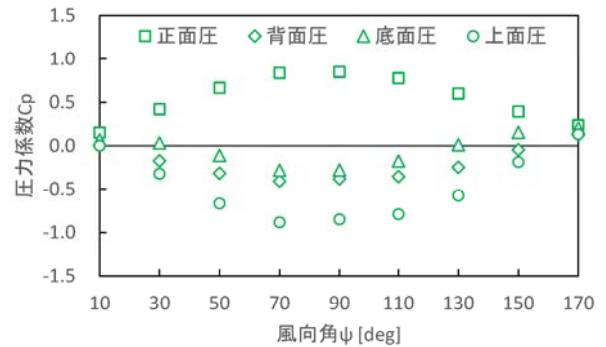
(b) 盛土上



(b) 盛土上



(c) 素地上



(c) 素地上

図 14 一様流中の車両表面圧力の風向角による変化
Fig.14 Variation of wind pressures of the car-body with wind angle of attacks in the uniform flow

図 15 乱流中の車両表面圧力の風向角による変化
Fig.15 Variation of wind pressures of the car-body with wind angle of attacks in the turbulent flow

最も小さくなり、角度が大きくまたは小さくなるにつれて大きくなっていく。横力係数や揚力係数に比べてその値は小さく、一様流と乱流による違いもほとんどない。

2. 4 風圧分布

図 13 には、風向角 90 度、断面 C における車体まわりの圧力係数 $C_{p,i}$ の測定結果を示す。各測定点番号 i の位置は図 4(b) に示すとおりであり、No.1~6 が正面、No.7~12 が下面、No.13~18 が背面、No.19~24 が上面である。いずれの線路構造物においても、正面圧は主に正圧で、背面圧、下面圧および上面圧は主に負圧となっている。横力係

数に影響する正面圧と背面圧に着目すると、いずれの線路構造物においても正面圧は乱流の方が大きく、背面圧の絶対値は一様流の方が大きい。乱流中の正面圧が大きくなるのは変動風速によるものであり、3. 2 節に述べる平均速度圧補正項によりモデル化される。揚力係数に影響する下面圧と上面圧に着目すると、下面圧の絶対値は一様流の方が大きく、上面圧の絶対値は盛土の条件を除いて乱流の方が大きい。正面圧と背面圧の差および下面圧と上面圧の差は 3. 2 節に述べる平均圧力補正項によりモデル化される。

図 14 および図 15 には、それぞれ一様流と乱流中にお

ける車両表面圧力の風向角による変化を示す。表面圧力は、図 4(b)における各面（正面、下面、背面、上面）の圧力係数の 6 点の平均値を求め、さらにそれらを各断面（A, B, C, D）の影響割合に基づき加重平均することで計算した。各断面の影響割合は、図 4(a)に示す断面配置に基づいて隣接断面との中間点で影響範囲を分割することで計算し、断面 A を 14%、断面 B を 36%、断面 C を 37%、断面 D を 13%と仮定した。

図 14 および図 15 から、一様流中の正面圧は背面圧の絶対より小さく、その比率は概ね 4 対 6 である。また、乱流中の正面圧が一様流のそれに比べ増大し、背面圧が減少している。正面圧の増大は流入風中の乱れの増大によるものであり、背面圧の減少は流入風中の乱れによる後流域の減少に対応する。正面圧と背面圧における乱流の効果は 3 章で定量的に評価する。一方、一様流の上面圧の絶対値は下面圧の絶対値より大きく、その比率は概ね 2 対 1 である。また、乱流中の上面圧が一様流のそれに比べほとんど変化しないのに対して、下面圧が大きく減少した。乱流中の上面圧がほとんど変化しないのは車両上面での剥離位置が変化していないことによるものであり、乱流中の下面圧の減少は地面付近の平均風速の減少によるものである。

3. 空気力係数の予測モデルの提案

本章では、前章で得られた風洞実験の結果に基づき、一様流中の空気力係数から乱流中のそれを予測するモデルを提案するとともに、風洞実験結果との比較を行い、提案したモデルの予測精度を示す。

3. 1 予測モデルの概要

本予測モデルでは、一様流中の空気力係数に乱流効果を表す 4 つの補正項を乗じて乱流中の空気力係数を求める。既往モデルで考慮される乱流効果を定式化すると共に、新たに平均圧力補正項を提案する。

乱流効果を考慮して空気力を予測する既往モデルとしては、EN14067-6 におけるマルチボディシミュレーションによる車両の時刻歴応答解析が挙げられる。この方法では、一様流中の空気力係数の平均値と自然風の乱れを考慮した瞬間風速の時系列データを用いて、瞬間空気力を計算する。そのため、空気力の評価には、平均風速の鉛直分布の影響、乱れによる変動風速と変動風向の影響が自動的に反映される。次節では、これらの影響をそれぞれ (1)平均風速分布補正項、(2)平均速度圧補正項、(3)変動風向角補正項として定式化し、解析的に乱流効果をモデル

化する。さらに、2 章で乱流により車体まわりの風圧分布が変化することが明らかになったため、各面の圧力に対して気流の違いによる変化を考慮した新たな補正項として、(4)平均圧力補正項を提案する。

3. 2 予測モデルの定式化

本研究で提案する乱流中の空気力係数の予測モデルは、一様流中の空気力係数と 4 つの補正項により式(7)で表す。

$$C_{i,t}(\bar{\psi}) = f_z f_l f_{\psi,i} f_{p,i} C_{i,u}(\bar{\psi}) \quad (7)$$

ここで、 $C_{i,t}(\bar{\psi})$ は乱流中の空気力係数、 $C_{i,u}(\bar{\psi})$ は一様流中の空気力係数、 f_z は平均風速分布補正項、 f_l は平均速度圧補正項、 $f_{\psi,i}$ は変動風向角補正項、 $f_{p,i}$ は平均圧力補正項である。また、添字 i は、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 のそれぞれの添字に対応している。以下では、各補正項の定式化を行う。

(1) 平均風速分布補正項

本研究ではストリップ理論に基づき、平均風速分布補正項を定式化する。Liu & Ishihara²²⁾は竜巻の風向風速の鉛直分布を考慮して、構造物に作用する空気力の予測を行っている。この論文を参考にして、一様流に対する乱流の平均風速の比から平均空気力の変化量を求め、その違いを平均風速分布補正項として空気力係数に反映させる。

図 16 には、一様流と乱流の平均風速の鉛直分布の違いのイメージを示す。一様流中の平均風速 $\overline{U_u(z)}$ は、高さによらず一定の鉛直分布を持つ。一方、乱流中の平均風速 $\overline{U_t(z)}$ は、べき法則に従った鉛直分布を持つ。そのため、車体中心高さ h_1 の平均風速を基準に考えると、乱流の平均風速は車体中心より下側では一様流よりも小さく、上側では大きくなる。この影響による空気力係数の補正項を f_z として考慮すると、乱流中の空気力について式(8)の関係が得られる。

$$\frac{1}{2} f_z C_{i,u} \rho l \int_{h_0}^{h_2} \overline{U_u}^2(z) dz = \frac{1}{2} C_{i,u} \rho l \int_{h_0}^{h_2} \overline{U_t}^2(z) dz \quad (8)$$

ここで、 l は車両長さである。 f_z については式(8)により、

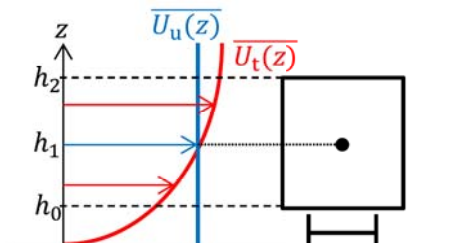


図 16 一様流と乱流中の平均風速の鉛直分布の概念図
Fig.16 Schematic of vertical profiles of mean wind speeds in the uniform and turbulent flows

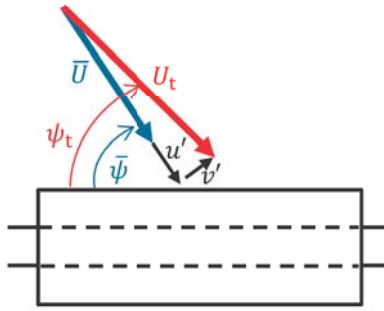


図 17 車体側面にあたる風速と風向角の関係

Fig.17 Relationship of wind speeds and wind angles of attack on the side area of car-body

式(9)が得られる。

$$f_z = \frac{\int_{h_0}^{h_2} \bar{U}_t^2(z) dz}{\int_{h_0}^{h_2} \bar{U}_u^2(z) dz} \quad (9)$$

(2) 平均速度圧補正項

Xu & Ishihara²³⁾は乱流が平均速度圧に与える影響を考慮して、風車タワーに作用する風荷重の解析モデルを提案している。この論文を参考にして、一様流中の平均速度圧に対する乱流中の平均速度圧の比から平均空気力の変化量を求め、その違いを平均速度圧補正項として空気力係数に反映させる。

図 17 には、車体側面にあたる風の風速と風向角のイメージを示す。図中で、 $\bar{U}$ は平均風速、 $\bar{\psi}$ は平均風向角、 u' は流れ方向の変動成分、 v' は流れ直角方向の変動成分である。一様流中では、瞬間風速は平均風速に一致する。一方、乱流中では、瞬間風速は平均風速と異なる。一様流中と乱流中における流れ方向の瞬間風速の2乗の平均値は、それぞれ式(10)と式(11)で表される。

$$\overline{U_u^2} = \bar{U}^2 \quad (10)$$

$$\overline{U_t^2} = \bar{U}^2 + \overline{u'^2} \quad (11)$$

式(10)と式(11)より、平均風速が同じでも乱流中では一様流中に比べて平均速度圧が大きくなるのがわかる。この影響を空気力係数に反映させるための補正項 f_l は式(12)で表される。

$$f_l = \frac{\overline{U_t^2}}{\overline{U_u^2}} = 1 + \frac{\overline{u'^2}}{\bar{U}^2} \quad (12)$$

ここで、 $\overline{u'^2}$ は変動成分の2乗の平均値、すなわち、分散 σ_u^2 に一致する。したがって、式(12)は、流れ方向の乱流強度 I_u を用いて、式(13)のように表される。

$$f_l = 1 + I_u^2 \quad (13)$$

(3) 変動風向角補正項

本研究では準定常空気力の仮定に基づき、変動風向角補正項を定式化する。井澤ら²⁴⁾は乱流による瞬間風向角

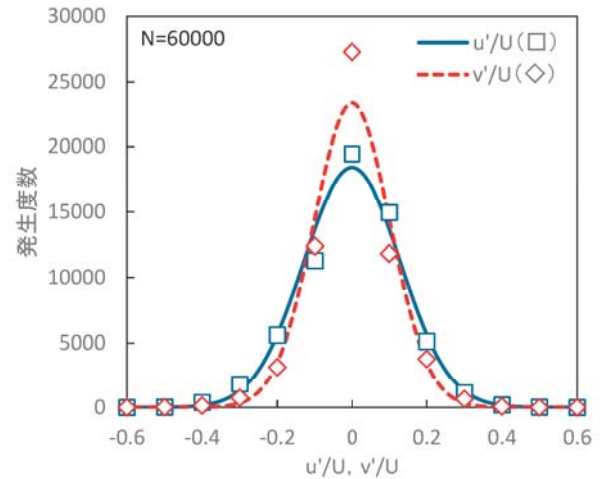


図 18 乱流中における風速の変動成分の頻度分布

Fig.18 Frequency distributions of the fluctuating wind velocity components in the turbulent flow

の変動に着目し、それが横力係数に与える影響をモンテカルロシミュレーションにより評価している。この論文を参考にして、変動風向角による空気力の変動量を変動風向角補正項として空気力係数に反映させる。図 17 から、瞬間風向角 ψ_t は式(14)で表される。

$$\psi_t = \bar{\psi} - \arctan\left(\frac{v'}{\bar{U} + u'}\right) \quad (14)$$

ここで、変動風速の分布を考える。図 18 には、 u' と v' の頻度分布の例を示す。測定位置は、橋梁上の車両側面位置($x=-35\text{mm}$, $y=0$, $z=560\text{mm}$)である。サンプリング周波数は1kHz、測定時間は60秒、データ数は $N=60000$ である。変動風速成分は平均風速 $\bar{U}$ で無次元化した。0.1刻み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。同図より、変動風速成分 u' 、 v' はともに正規分布に概ね従っていることがわかる。そこで、本研究では、 u' および v' が平均値0、標準偏差 σ_u 、 σ_v の正規分布（以下、それぞれ $N(0, \sigma_u)$ 、 $N(0, \sigma_v)$ とする）に従うものと仮定した。この影響を考慮して乱流中の空気力係数 $C_{i,t}(\bar{\psi})$ を予測すると、 $C_{i,t}(\bar{\psi})$ は瞬間風向角 ψ_t に対応する一様流中の空気力係数の期待値 $E[C_{i,u}(\psi_t)]$ として計算される。 $N(0, \sigma_u)$ において $u' = j$ となる確率を $P[u' = j; N(0, \sigma_u)]$ 、 $N(0, \sigma_v)$ において $v' = k$ となる確率を $P[v' = k; N(0, \sigma_v)]$ とすると、 $C_{i,t}(\bar{\psi})$ は式(15)で表される。

$$\begin{aligned} C_{i,t}(\bar{\psi}) &= E[C_{i,u}(\psi_t)] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} P[v' = k; N(0, \sigma_v)] \int_{-\infty}^{\infty} P[u' = j; N(0, \sigma_u)] \\ &\quad \cdot C_{i,u}\left\{\bar{\psi} - \arctan\left(\frac{k}{\bar{U} + j}\right)\right\} dj dk \quad (15) \end{aligned}$$

この影響を空気力係数へ反映させるための補正項 $f_{\psi,i}$ は

式(16)で表される。

$$f_{\psi,i} = \frac{E[C_{i,u}(\psi_t)]}{C_{i,u}(\bar{\psi})} \quad (16)$$

変動風向角補正項は、準定常空気力の期待値から導出されるため、母数が十分であれば変動気流の空間相関に完全相関と独立のどちらを仮定しても同一の値となる。そのため、本研究では、モデルの簡単化の観点から、参考文献 24) に従い完全相関を仮定した代表点での評価とした。なお、車両に作用する瞬間空気力に対する空間スケールの影響は、別の研究 (南雲・石原²⁵⁾) において瞬間風速の評価方法として考慮することができる。

(4) 平均圧力補正項

既往研究として、角柱などの基本断面まわりの風圧分布や気流の違いがそれらに与える影響を調査した研究は多くある (例えば、Lee²⁶⁾)。風洞実験の結果から、鉄道車両についても各面の風圧分布の特性は既往研究と同様の傾向を示している。一方、気流による風圧分布の変化を考慮した空気力の予測やモデル化の例がない。

そこで本研究では、風洞実験の結果に基づき、平均圧力補正項 $f_{p,i}$ を提案する。線路構造物によって車体まわりの風圧分布は若干異なるが、ここでは実用性を考慮して線路構造物によらない補正項を提案する。

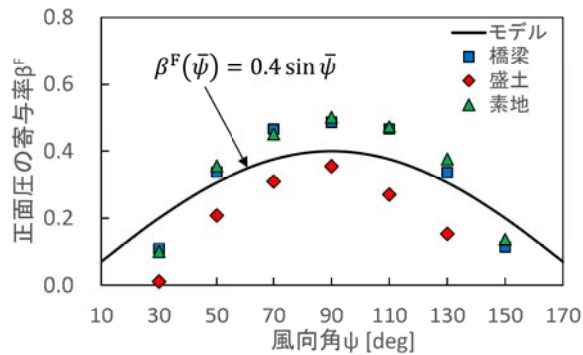
横力係数については正面圧と背面圧の平均圧力変化量を、揚力係数については下面圧と上面圧の平均圧力変化量を平均圧力補正項として空気力係数に反映させる。ローリングモーメント係数の平均圧力補正項は1とした。横力係数の平均圧力補正項 $f_{p,S}$ 、揚力係数の平均圧力補正項 $f_{p,L}$ およびローリングモーメント係数の平均圧力補正項 $f_{p,M}$ は、それぞれ式(17)、式(18)、式(19)で表す。

$$\begin{aligned} f_{p,S} &= \frac{C_{S,t}(\bar{\psi})}{C_{S,u}(\bar{\psi})} = \frac{C_{p,t}^F(\bar{\psi}) - C_{p,t}^R(\bar{\psi})}{C_{p,u}^F(\bar{\psi}) - C_{p,u}^R(\bar{\psi})} \\ &= \frac{C_{p,u}^F(\bar{\psi})(1 + \gamma^F(\bar{\psi})I_u) - C_{p,u}^R(\bar{\psi})(1 + \gamma^R(\bar{\psi})I_u)}{C_{S,u}(\bar{\psi})} \\ &= \beta^F(\bar{\psi})(1 + \gamma^F(\bar{\psi})I_u) - \beta^R(\bar{\psi})(1 + \gamma^R(\bar{\psi})I_u) \quad (17) \end{aligned}$$

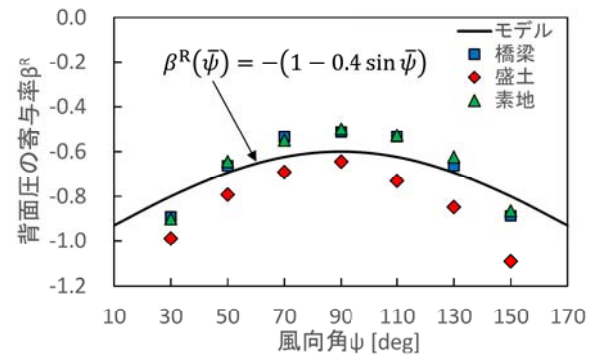
$$\begin{aligned} f_{p,L} &= \frac{C_{L,t}(\bar{\psi})}{C_{L,u}(\bar{\psi})} = \frac{C_{p,t}^L(\bar{\psi}) - C_{p,t}^U(\bar{\psi})}{C_{p,u}^L(\bar{\psi}) - C_{p,u}^U(\bar{\psi})} \\ &= \frac{C_{p,u}^L(\bar{\psi})(1 + \gamma^L(\bar{\psi})I_u) - C_{p,u}^U(\bar{\psi})(1 + \gamma^U(\bar{\psi})I_u)}{C_{L,u}(\bar{\psi})} \\ &= \beta^L(\bar{\psi})(1 + \gamma^L(\bar{\psi})I_u) - \beta^U(\bar{\psi})(1 + \gamma^U(\bar{\psi})I_u) \quad (18) \end{aligned}$$

$$f_{p,M} = 1 \quad (19)$$

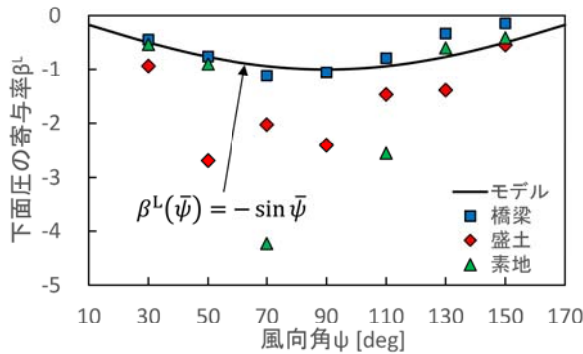
ここで、 $C_{p,u}^i(\bar{\psi})$ は一樣流中における車両各面の表面圧力、 $\gamma^i(\bar{\psi})$ は一樣流中の表面圧力から乱流中のそれへの各面の補正係数である。添字 i は、正面圧 F、背面圧 R、下面圧 L、上面圧 U にそれぞれ対応する。 $C_{S,u}(\bar{\psi})$ と $C_{S,t}(\bar{\psi})$ は



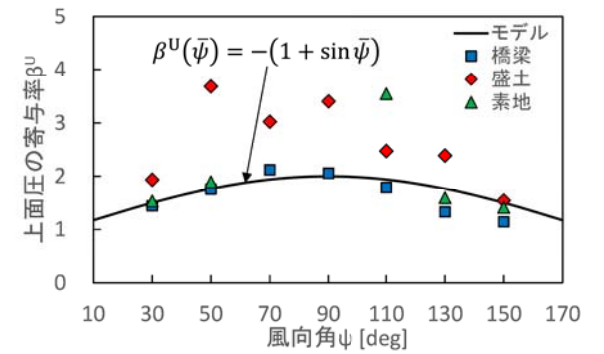
(a) 正面圧



(b) 背面圧



(c) 下面圧



(d) 上面圧

図 19 一樣流中の空気力係数に対する各面圧の寄与率

Fig.19 Ratio of the wind pressures on the each side against the aerodynamic coefficients in the uniform flow

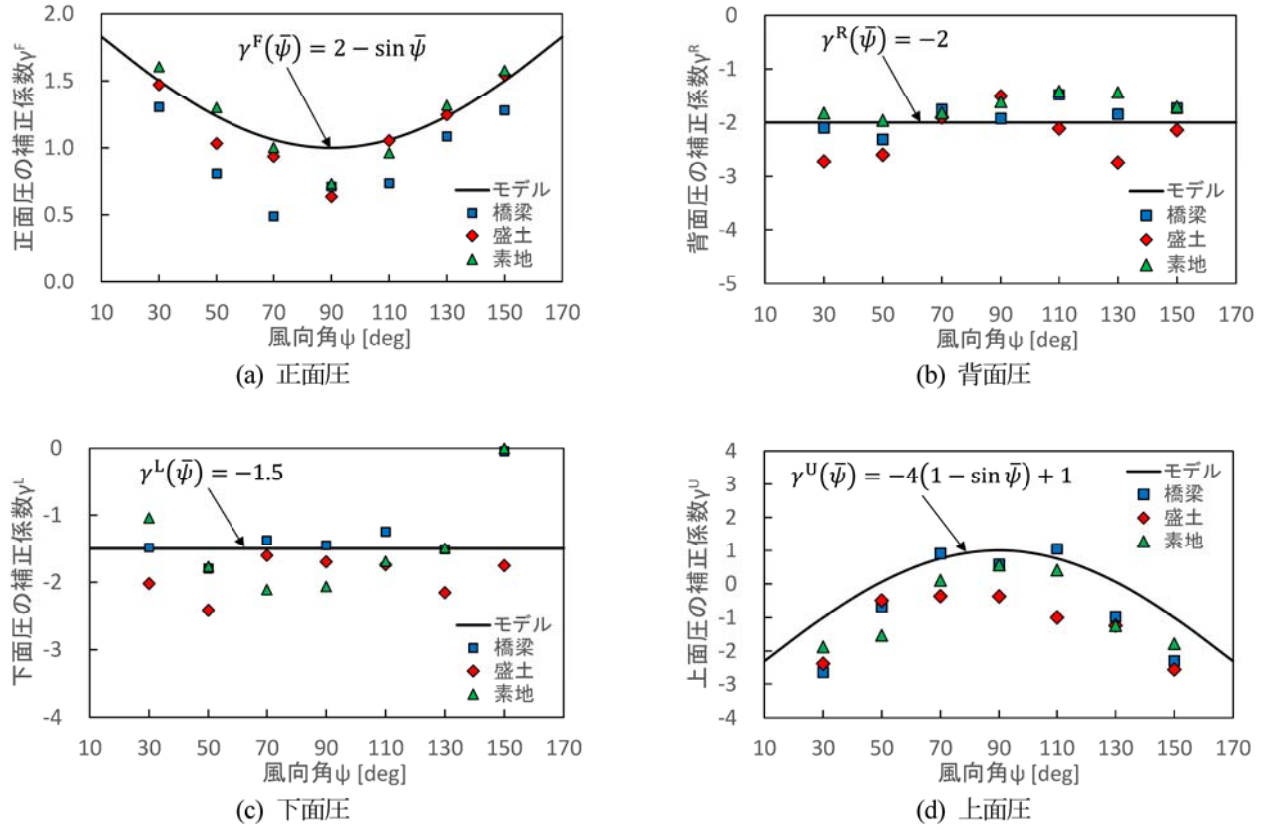


図20 一様流中の表面圧力から乱流中の表面圧力への補正係数

Fig.20 Correction coefficients to the wind pressures in the turbulent flow from those in the uniform flow

それぞれ一様流と乱流中における横力係数であり、正面圧と背面圧の差から求める。また $C_{L,u}(\bar{\psi})$ と $C_{L,t}(\bar{\psi})$ はそれぞれ一様流と乱流中における揚力係数であり、下面圧と上面圧の差から求める。空気力係数に対する各面圧の寄与率 $\beta^i(\bar{\psi})$ は、正面圧と背面圧の差および下面圧と上面圧の差が1となるように、式(20)～式(23)で定式化した。

$$\beta^F(\bar{\psi}) = 0.4 \sin \bar{\psi} \quad (20)$$

$$\beta^R(\bar{\psi}) = -(1 - 0.4 \sin \bar{\psi}) \quad (21)$$

$$\beta^L(\bar{\psi}) = -\sin \bar{\psi} \quad (22)$$

$$\beta^U(\bar{\psi}) = -(1 + \sin \bar{\psi}) \quad (23)$$

ここで、寄与率の係数の風向による変化は、正弦関数で近似した。同定した関数と実験結果との比較を図19に示す。一様流中の表面圧力から乱流中の表面圧力への補正は、流れ方向の乱流強度 I_u の一次関数としてモデル化した。 I_u に乗じる補正係数 $\gamma^i(\bar{\psi})$ は、図20により同定した。正面圧の補正係数 $\gamma^F(\bar{\psi})$ と上面圧の補正係数 $\gamma^U(\bar{\psi})$ は風向角 $\bar{\psi}$ の影響が見られたため正弦関数として設定し、背面圧の補正係数 $\gamma^R(\bar{\psi})$ と下面圧の補正係数 $\gamma^L(\bar{\psi})$ は定数として、式(24)～式(27)で定式化した。

$$\gamma^F(\bar{\psi}) = 2 - \sin \bar{\psi} \quad (24)$$

$$\gamma^R(\bar{\psi}) = -2 \quad (25)$$

$$\gamma^L(\bar{\psi}) = -1.5 \quad (26)$$

$$\gamma^U(\bar{\psi}) = -4(1 - \sin \bar{\psi}) + 1 \quad (27)$$

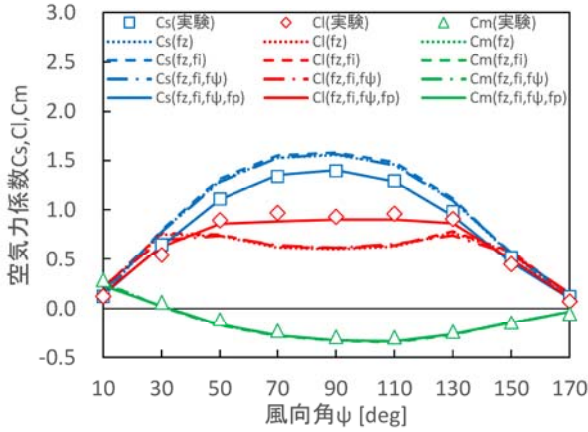
本項で設定した補正係数 $\gamma^i(\bar{\psi})$ の値は、本研究で対象とした通勤型電車に対するものである。車両形状が変化すると補正係数が変化する可能性があるため、その場合には補正係数を風洞実験により別途求める必要がある。

4. 予測モデルによる空気力係数の精度検証

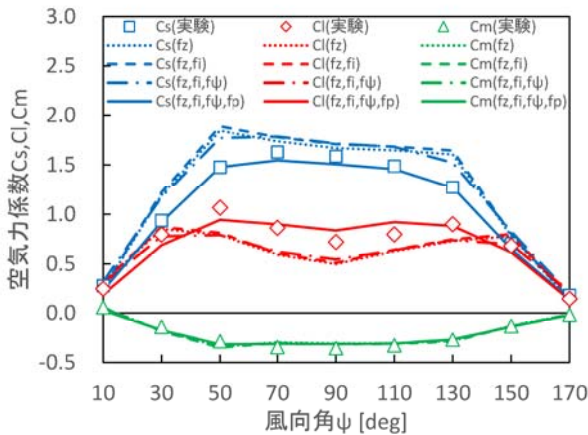
前章で定式化したモデルを用いて、一様流中の空気力係数から乱流中のそれを予測する。平均風速分布補正項 f_z の計算に用いる平均風速の鉛直分布について、橋梁では図6(a)と図8(a)、盛土と素地では図7(a)と図8(a)の実験結果を線形補間して用いた。平均速度圧補正項 f_l の計算に用いる流れ方向の乱流強度 I_u について、橋梁では図11(a)、盛土では図11(b)の構造物上の車体中心高さにおける実験結果を風向角ごとに用い、素地では図8(b)の実験結果を全ての風向角に用いた。変動風向角補正項 $f_{\psi,t}$ の計算に用いる風速変動成分の標準偏差 σ_u と σ_v は、 f_l と同様に構造物上の車体中心高さの実験結果を用いた。その積分範囲は、 $-0.99\bar{U} \sim 0.99\bar{U}$ とした。計算上の風向角が、実際に測定を行った風向角である10～170度の範囲内の場合には、実験結果を線形補間した。風向角が10～170度の範囲外となる場合には、風向角0度および180度における

空気力係数をいずれも0と仮定した。平均圧力補正項 $f_{p,i}$ の計算に用いる流れ方向の乱流強度 I_u は、 f_l の計算に用いる値と同様とした。

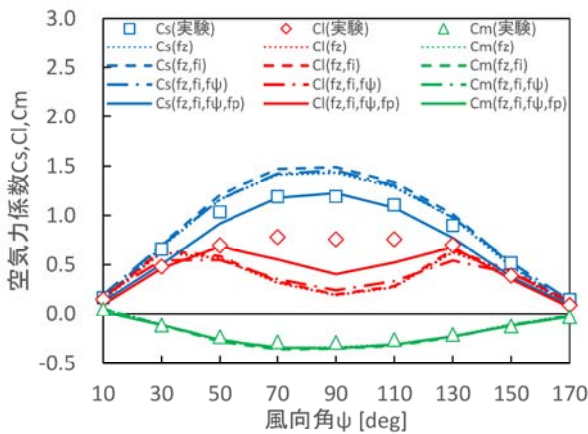
図21には、乱流中の空気力係数の実験値と予測値の比



(a) 橋梁



(b) 盛土

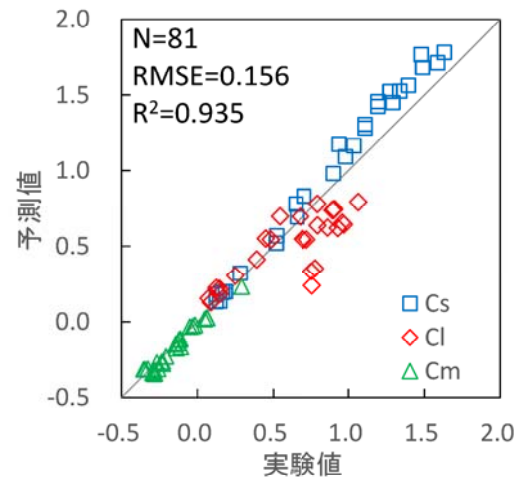


(c) 素地

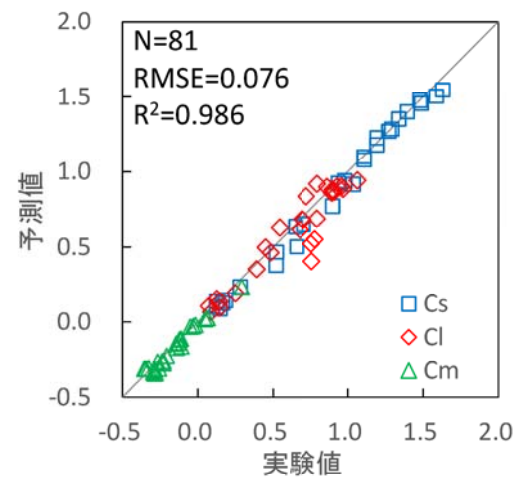
図21 各種線路構造物上の車両における空気力係数の予測値と実験値の比較

Fig.21 Comparison of predicted and measured aerodynamic coefficients of a train car on the different line structures

較を示す。提案モデルは式(7)に示したとおりであるが、各補正項の影響を明確にするために、一様流中の空気力係数に補正項を1つずつ加えていき、それぞれの補正結果を示した。平均風速分布補正項 f_z による空気力係数の変化は、ほとんど見られない。これは、鉄道車両のスケールでは、一様流と乱流で平均風速の鉛直分布に大きな違いがないためである。平均速度圧補正項 f_l は、空気力係数を全体的に大きくする効果がある。これは、乱流の風速変動成分により平均速度圧が大きくなるためである。変動風向角補正項 $f_{\psi,i}$ は、一様流中の空気力係数の風向角特性を乱流中のそれに補正する効果がある。これは、乱流の風速変動成分により瞬間風向角が変化し、空気力係数のピーク値が風向角方向に平均化されるためである。特に盛土については、図12(b)の実験結果から、一様流中にお



(a) 既往モデル (f_z , f_l , $f_{\psi,i}$ を考慮)



(b) 提案モデル (f_z , f_l , $f_{\psi,i}$, $f_{p,i}$ を考慮)

図22 各種モデルによる空気力係数の予測値と実験値の比較

Fig.22 Comparison of predicted and measured aerodynamic force coefficients for several models

る風向角 50 度と 130 度の横力係数にピークが見られるが、予測結果ではそのピークが補正されている。ローリングモーメント係数は、一樣流と乱流で大きな違いがないため、これら 3 つの補正項で良好な予測結果が得られている。しかし、横力係数と揚力係数については、これら 3 つの補正項だけでは予測精度が低く、横力係数を過大評価、揚力係数を過小評価している。一方、本研究で提案する平均圧力補正項 $f_{p,i}$ を加えることで、横力係数は過大評価が改善され、いずれの構造物においても実験結果と予測結果がほぼ一致している。揚力係数は過小評価が改善され、橋梁では実験と予測がほぼ一致している。盛土と素地では、風向角によって 0.2 前後の誤差が生じているが、 $f_{p,i}$ を加える前と比べて過小評価は改善されている。鉄道車両の転覆に影響する風下側の車輪／レール接触点まわりのローリングモーメントを考えると、空気力係数の大きさやモーメントの腕の長さから、揚力に比べて横力の影響が支配的である。したがって、揚力の予測誤差の影響は比較的小さいと考えられる。

図 22 には、既往モデルと提案モデルについて、空気力係数の予測値と実験値の散布図による比較を示す。図 22(a)は、既往モデルとして、平均風速分布補正項 f_z 、平均速度圧補正項 f_i 、変動風向角補正項 $f_{\psi,i}$ の 3 つの補正項を用いて一樣流中の空気力係数から乱流中のそれを予測した結果である。既往モデルでは、乱流中の横力係数を過大評価しており、揚力係数は過小評価になっていることがわかる。図 22(b)は、本研究の提案モデルとして、既往モデルに平均圧力補正項 $f_{p,i}$ を加えて一樣流中の空気力係数から乱流中のそれを予測した結果である。提案モデルでは横力係数の過大評価と揚力係数の過小評価が改善されていることがわかる。二乗平均平方根誤差は半分に減少し、決定係数も 0.94 から 0.99 まで向上した。

以上の結果から、空気力を各面圧に分けてそれぞれ定式化し、気流による車体まわりの風圧分布の変化を補正することにより、既往モデルに比べて乱流中の空気力係数の予測精度が向上した。

5. おわりに

本研究では、風洞実験を実施し、気流の違いが空気力係数に与える影響を調べた。また得られた風洞実験結果に基づき、一樣流中の空気力係数から任意の乱流強度の気流中のそれを予測するモデルを提案した。最後に、提案モデルによる乱流中の空気力係数の予測精度を風洞実験結果との比較により検証した。これらにより、以下の結果を得た。

- (1) 風洞実験により、一樣流と乱流中における空気力係数および車体まわりの風圧分布の特徴を明らかにした。車両の転覆で特に重要な横力係数を決定づける車体の正面圧と背面圧は、線路構造物によらず正面圧は一樣流に比べて乱流の方が大きく、背面圧は乱流の方が小さくなることを明らかにした。
- (2) 風洞実験で得られた結果をもとに、一樣流中の空気力係数から乱流中のそれを予測するモデルを提案した。既往モデルで考慮される乱流効果を平均風速分布補正項、平均速度圧補正項、変動風向角補正項として解析的に定式化するとともに、平均圧力補正項を新たに提案した。
- (3) 既往モデルで考慮される 3 つの補正項のみを用いると、乱流中の横力係数を過大評価、揚力係数を過小評価する。一方、本提案モデルにある平均圧力補正項を用いることにより、横力係数の過大評価と揚力係数の過小評価が改善され、乱流中の空気力係数の予測精度が向上した。

謝辞

本研究の風洞実験の実施にあたり、老川進博士より多大なる指導と貴重な助言をいただいた。ここに記して謝意を表する。

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) 日比野 有, 金元 啓幸, 下村 隆行, 「1 車両モデルを用いた車両の横風に対する安全性評価」, 鉄道総研報告, Vol.26, No.10, pp.5-10, (2012)
- 4) European committee for standardization, “EN14067-6 Railway applications -Aerodynamics- Part 6: Requirements and test procedures for cross wind assessment”, (2010)
- 5) 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)
- 6) 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)
- 7) 中村 英男, 「餘部事故技術調査委員会報告書概要」, JREA, Vol.31, No.6, pp.17865-17869, (1988)

- 8) 藤井 昌隆, 藤井 俊茂, 村石 尚, 「強風時の運転規制の歴史」, 鉄道総研報告, Vol.9, No.3, pp.43-48, (1995)
- 9) 航空・鉄道事故調査委員会, 「鉄道事故調査報告書(東日本旅客鉄道株式会社 羽越線砂越駅～北余目駅間列車脱線事故)」, (2008)
- 10) 島村 誠, 「自然災害に対する列車運行安全基準の成立と改良」, 土木学会安全問題研究論文, Vol. 4, pp.1-9, (2009)
- 11) 今井 俊昭, 荒木 啓司, 福原 隆彰, 「規制区間で列車が強風に遭遇する確率の評価方法」, 鉄道総研報告, Vol.23, No.3, pp.5-10, (2009)
- 12) 荒木 啓司, 日比野 有, 鈴木 実, 「列車運行と強風規制」, 日本風工学会誌, Vol.40, No.1, pp.10-16, (2015)
- 13) 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)
- 14) Baker, C. J., Jones, J., Lopez-Calleja, F. and Munday, J., “Measurements of the cross wind forces on trains”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.92, pp.547-563, (2004)
- 15) Gautier, P. -E., Tielkes, T., Sourget, F., Allain, E., Grab, M. and Heine, C., “Strong wind risks in railways: The DEUFRAKO crosswind program”, Proceedings of the 6th World Congress on Railway Research, Edinburgh, pp. 463–475, (2003)
- 16) European Railway Agency, “Technical Specifications for interoperability”, (2003)
- 17) Bocciolone, M., Cheli, F., Corradi, R., Muggiasca, S. and Tomasini, G., “Crosswind action on rail vehicles: Wind tunnel experimental analyses”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.96, pp.584–610, (2008)
- 18) 三須 弥生, 石原 孟, 「走行速度を考慮した鉄道車両の空気力係数の推定」, 日本風工学会論文集, Vol.37, No.4, pp.117-123, (2012)
- 19) 東京大学大学院工学系研究科, 「風工学実験室」, (2014), http://www.bridge.t.u-tokyo.ac.jp/wind_tunnel.pdf (2018年11月29日閲覧)
- 20) 鈴木 実, 「車両模型走行装置を用いた横風空気力特性風洞試験手法」, 鉄道総研報告, Vol.30, No.7, pp.41-46, (2016)
- 21) 風洞実験法ガイドライン研究委員会, 「実務者のための建築物風洞実験ガイドブック (2008年版)」, 日本建築センター, (2008)
- 22) Liu, Z. Q. and Ishihara, T., “A study of tornado induced mean aerodynamic forces on a gable-roofed building by the large eddy simulations”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.146, pp.39–50, (2015)
- 23) Xu, N. and Ishihara, T., “Analytical formulae for wind turbine tower loading in the parked condition by using quasi-steady analysis”, WIND ENGINEERING, Vol.38, No.4, pp.171-189, (2014)
- 24) 井澤 信明, 菊地 勝浩, 鈴木 実, 「風速変動を考慮した鉄道の間車両に対する横力係数のばらつきに関する研究」, 日本風工学会論文集, Vol.41, No.1, pp.1-11, (2016)
- 25) 南雲 洋介, 石原 孟, 「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」, 風工学シンポジウム論文集, No.24, pp.361-366, (2016)
- 26) Lee, B. E., “The effect of turbulence on the surface pressure field of a square prism”, Journal of Fluid Mechanics, Vol.69, Part 2, pp.263-283, (1975)