

総研詳細式に基づく風規制手法おける列車運行の安全性評価



南雲 洋介*¹



一木 道弘*¹



三須 弥生*²

Safety assessment of train operation applying a new method for operation control under strong winds

Yosuke NAGUMO*¹, Michihiro ICHIKI*¹ and Yayoi MISU*²

*¹ Researcher, Safety Research Laboratory, Research and Development Center of JR EAST Group

*² Chief Researcher, Safety Research Laboratory, Research and Development Center of JR East Group

Abstract

In this paper, a new method for operation control under strong winds proposed by East Japan Railway Company is reviewed and safety of train operation based on the proposed method is assessed. Firstly, overviews of the proposed method and of the RTRI detailed equation which is used in the proposed method are described. Secondly, a system to calculate critical wind speeds of train overturning and a method to evaluate windbreak effects of fences are explained as related developments to the proposed method. Finally, uncertainties of forces acting on railway vehicles are investigated and the safety of operation control is assessed based on the reliability theory.

●**Keywords:** Crosswind, Operation regulation, Resistant force, Aerodynamic force, Wind load, Safety index

*¹JR東日本研究開発センター 安全研究所 研究員 *²JR東日本研究開発センター 安全研究所 主幹研究員

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(以下、「風規制」とする)が行われる。風規制の基本的な考え方は、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。耐力と外力の関係は、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により評価される。そして、そのつり合いを自然風の風速について解くことによって、風上側の輪重がゼロと計算されるとき風速である転覆限界風速が求められる。転覆限界風速の計算式として、日本では国枝式(国枝¹⁾)と、それを発展させた総研詳細式(日比野、石田²⁾)が広く用いられている。一方、従来から行われてきた風規制では、規制の判断に用いる基準風速が経験的に定められており、転覆限界風速に基づくものではなかった。東日本旅客鉄道株式会社(以下、「JR東日本」とする)では、2005年に発生した羽越本線列車事故(航空・鉄道事故調査委員会³⁾)を契機に、総研詳細式による転覆限界風速の計算結果に基づいて風規制を行う手法である「総研詳細式に基づく風規制手法」を開発、導入した(日比野ほか⁴⁾、栗原ほか⁵⁾)。また、同手法の開発に付随して、沿線での転覆限界風速を計算するシステム(栗原ほか⁶⁾、竹田ほか⁷⁾)や、防風設備の効果を計算に反映させる方法(竹田ほか⁸⁾、一木ほか⁹⁾)を開発した。さらに、同手法における列車運行の安全性を評価し、その妥当性を示した(南雲、石原¹⁰⁾)。

上記一連の研究開発成果を一つにまとめて、総研詳細式に基づく風規制手法の全体像を記述した文献は、これまでになかった。そこで本稿では、総研詳細式に基づく風規制手法の概要と、同手法における列車運行の安全性を評価した結果を、既往文献に基づき紹介する。2章では、総研詳細式およびその活用方法について解説する。3章では、総研詳細式に基づく風規制手法に付随する研究開発について説明する。4章では、車両にはたらく各種作用力の不確かさを調査し、信頼性理論(例えば、星谷、石井¹¹⁾)に基づき列車運行の安全性を評価した結果について述べる。5章では、本稿の結論をまとめる。

2. 総研詳細式に基づく風規制手法の概要

強風時の列車の走行安全性を向上させ、かつ安定輸送の確保を図るためには、耐力評価 (= 転覆限界風速の評価) と外力評価 (= 風観測) を精緻に行い、耐力が外力を上回る状態を実現する風規制を実施する必要がある。本章では、耐力評価に「総研詳細式」、外力評価に車両に作用する空気力をより精緻に評価できる風観測方法を組み合わせた「総研詳細式に基づく風規制手法」について概説する。

2・1 総研詳細式の概要

総研詳細式(日比野、石田²⁾)は、過去の転覆事故や近年の研究で得られた知見を取り入れることで、それまで広く使われてきた国枝式(国枝¹⁾)を発展させた式である。同式では、鉄道車両の軽量化・高速化が車両の転覆に対して不利にはたらくことを踏まえ、空気力や車両のばね系の影響を詳細に考慮できる。特に、転覆に大きな影響を及ぼす空気力に関して、車体形状の影響、地上構造物形状の影響、風向角の影響、先頭車・中間車の違い等を考慮できるようにしている。式(1)に総研詳細式における輪重減少率の計算式を示す。詳細については、文献(日比野、石田²⁾)を参照されたい。

$$D = \frac{1}{b} \cdot \frac{y_{B0}}{1 + \mu} + \frac{1}{b} \left(h_G^* - \frac{e^* F_L}{(1 + \mu) m_{Bg}} \right) \left(\frac{v^2}{Rg} - \frac{c}{G} \right) + \frac{1}{b} \left(h_G^* - \frac{e^* F_L}{(1 + \mu) m_{Bg}} - \frac{\mu}{1 + \mu} h_{GT} \right) \frac{\alpha_y}{g} + \frac{1}{b} \left\{ \frac{h_{BC}^* F_S}{(1 + \mu) m_{Bg}} + (b - y_{B0} + e \phi_{B0}) \frac{F_L}{(1 + \mu) m_{Bg}} + (eb^* - e^*) \frac{F_S F_L}{(1 + \mu) m_{Bg}^2 g^2} \right\} \quad (1)$$

- | | |
|--|------------------------------------|
| D : 輪重減少率 | R : 曲線半径[m] |
| F_S : 横風による横力[N] | v : 走行速度[m/s] |
| F_L : 横風による揚力[N] | G : 軌間[m] |
| m_B : 半車体質量[kg] | $2b$: 左右の車輪/レール接触点間距離[m] |
| m_T : 台車質量[kg] | b^* : 車両のばね系の影響により生じる車体の水平変位量[m] |
| μ : 台車・半車体質量比(= m_T/m_B) | e : 風圧中心～車体重心間距離[m] |
| α_y : 車体左右振動加速度[m/s ²] | e^* : 車両のばね系の影響により生じる車体の上下変位量[m] |
| g : 重力加速度[m/s ²] | c : カント[m] |
| h_{GT} : 台車重心高さ(～レール上面) [m] | |
| h_G^* : 車両のばね系の影響を考慮した車体重心高さ(～レール上面) [m] | |
| h_{BC}^* : 車両のばね系の影響を考慮した風圧中心高さ(～レール上面) [m] | |
| y_{B0} : ≒ストッパ当たりを生じるまでの車体重心の左右変位量[m] | |
| ϕ_{B0} : ≒ストッパ当たりを生じるまでの車体重心のロール角変位量[rad] | |

2・2 車両に作用する空気力をより精緻に評価できる風観測方法

車両に作用する空気力は、車体表面の各微小部位に対する風の作用の総和であると考えられる。そして、その風は空間的にも時間的にも常に変動し、ばらつきがあると考えられる。従来の風観測方法では、図1のように1基の風速計で観測された瞬時値により瞬間風速を評価していた。一方、その風速計で捉えられる空間スケールと車体全体を包含する空間スケールの差を考慮した場合、1基の風速計で観測された瞬時値では転覆に寄与しない成分の風速を捉えていると考えられ、実測での比較でも安全側で

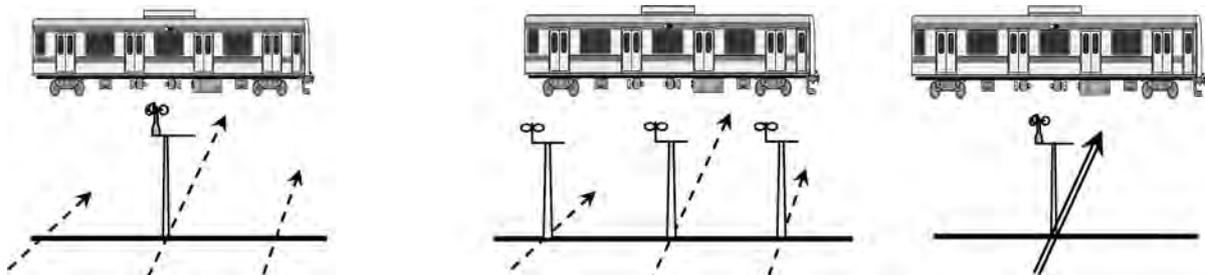


図1 従来の風観測(風速計1基・瞬時値)

(a) 風速計3基・空間平均値

(b) 風速計1基・3秒平均値

図2 車両に作用する空気力をより精緻に評価できる風観測方法

はあるものの車両に作用する空気力を過大に評価する傾向が分かっている。そこで、「総研詳細式に基づく風規制手法」では、車両に作用する空気力をより精緻に評価できる風観測方法として、図2に示す (a) 空間平均値 (日比野ほか⁴⁾) もしくは (b) 3秒平均値 (南雲、石原¹²⁾) により瞬間風速の評価を行う。

2・3 総研詳細式による柔軟な風規制手法

総研詳細式は、国枝式では考慮していなかった項目や条件を考慮し、より精緻に転覆耐力を評価するため、強風に対する弱点箇所の把握や風対策を実施した場合の効果の評価が可能となる。よって、総研詳細式に基づく風規制手法を導入することにより、きめ細かく柔軟な風規制や防風柵等の風対策の効果的な実現につながる。例えば、ある車両が図3に示すような風規制区間 (A駅～B駅間) を運行する場合、地上構造物形状や軌道条件を考慮することによって、図中に示すように線路に沿った転覆限界風速が求められる。この区間を一つの風速値で規制を行うことを考えた場合、対策実施前の転覆限界風速の最低値から、規制風速値を23m/s以下とする必要がある。この最低値となった箇所に対策を行い、転覆限界風速を目標値 (図3の例では、転覆限界風速が2番目に低い値である25m/s) まで向上させることで、規制風速値を25m/s以下とすることが可能となり、運行の安全性と安定性を向上することができる。なお、JR東日本における風規制のシステムの仕様により、現状では1m/s単位の規制は実施しておらず、転覆限界風速が規制風速値 (早め規制の場合、速度規制:20m/s、運転中止:25m/s、一般規制の場合、速度規制:25m/s、運転中止:30m/s) を上回ることを確認した上で、早め規制か一般規制の規制風速値を設定している。転覆限界風速が低く算出された場合の対策としては、防風柵の設置、車両の重量化、車両の入線制限、走行速度の制限、軌道諸元の変更、規制風速値の見直し等があげられる。



図3 総研詳細式に基づく風規制手法による対策実施と規制方法のイメージ

3. 総研詳細式に基づく風規制手法に付随する研究開発

総研詳細式に基づく風規制手法を実運用に供するためには、実際の風規制区間での転覆限界風速の計算を支援するシステムやモデルが必要である。本章では、同手法の運用支援を目的として開発、実用化された成果である転覆限界風速計算システムと耐力評価に防風設備の効果を取り入れる方法を紹介する。

3・1 転覆限界風速計算システムの開発と改良

転覆限界風速システム (栗原ほか⁶⁾) は、沿線での耐力評価に必要な情報をデータベースとして備え、転覆限界風速を自動で計算、出力するシステムである。計算に必要な情報には、車両諸元、地上構造物形状、曲線諸元、速度条件等があり、これらはすべてシステム内でデータベース化されている。ユーザが車種、走行路線、駅もしくはキロ程を指定すると、必要な情報がデータベースから自動的に検索され、転覆限界風速が計算される。また、車両諸元の一部変更や、地上構造物形状、曲線の諸元を変えて転覆限界風速を試算する機能も有している。操作画面は極力簡素化し、プルダウンメニューやチェックボックスを多用することで、扱いやすいインターフェイスを目指した。図4に計算結果の出力例を示す。出力ファイルは、実務場面で必要な情報を端的に確認できるよう書式を工夫するとともに、色分けして視認性の向上を図った。また、システムを社内ネットワーク上のサーバとして構築することで、アクセス権限を付与したユーザがネットワークに接続された任意の端末から利用できるようにした。

初期のシステムでは、人手を介して500m毎に転覆限界風速の評価地点を選定し、その地点の地上構造物形状も同様に人手を介して画像や現地調査により判定、入力していた。そのため、評価地点の選定や地上構造物形状の判定には人による差異が生じる可能性があり、さらには多くの労力を要していた。そこで、社内外のデータを組み合わせることで、これらを連続的かつ客観的に判定できるようにシステムを改良した(竹田ほか⁷⁾)。計算に必要なキロ程、単線複線区分、トンネルの有無、まくらぎ上面高さ等の情報を整備し、社内データとリンクすることで地上構造物形状を自動判定できるようにした。さらに、盛土高を判定するための風の駆け上がり高さを自動的に算出する手法(図5)を採用し、社内データに基づきデータベースを整備した。これらにより、評価地点の選定を行うことなく、20m毎に転覆限界風速を計算できるようにした。

車両型式	当該箇所100m間高さ	[m]	風速20m/s、25m/s、30m/s時の走行可能速度		
			転覆限界風速最小値	転覆限界風速	転覆限界風速
2H100	車頂最高速度	100	35.2	内方	
2H100	車頂最高速度	100	39.5	外方	
2H100	曲線半径から決まる制限速度	160	30.2	内方	
2H100	曲線半径から決まる制限速度	80	26.1	内方	
2H100	曲線半径から決まる制限速度	40	30.2	外方	
2H100	曲線半径から決まる制限速度	20	26.1	内方	
2H100	線区100m間高さ	100	24.0		110
2H100	線区100m間高さ	100	25.5		72
2H100	車頂最高速度	120	24.8		60
2H100	車頂最高速度	120	25.5		72
2H100	車頂最高速度	120	25.5		25
2H100	車頂最高速度	120	110	88	39
2H100	車頂最高速度	100	25.5	外方	64
2H100	車頂最高速度	100	25.5	外方	

当該地点の最高速度もしくは制限速度走行時における転覆限界風速

図4 「転覆限界風速計算システム」出力結果例

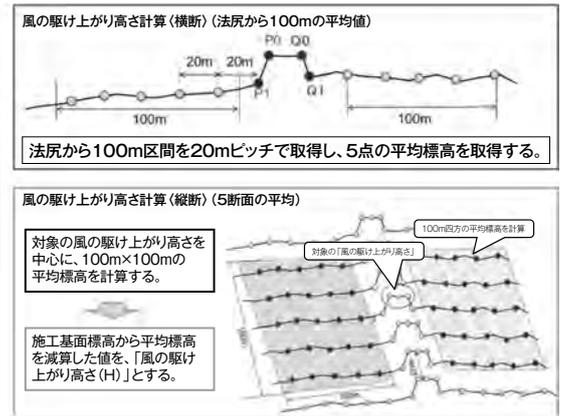


図5 風の駆け上がり高さの計算

3・2 防風設備の効果の取り入れ方法

総研詳細式では、防風設備による空気力の低減効果を定量的に評価することができる。しかし、その計算に必要な空気力係数は限られた条件でしか得られておらず、すべての地上構造物形状や車両形状に防風設備の効果を適用することが難しかった。そこで、防風設備の有無による空気力の比をモデル化し、任意の条件でその効果を転覆限界風速に反映させる手法を提案した(竹田ほか⁸⁾、一木ほか⁹⁾)。以下にその手順を述べる。

横風が車両に当たると、図6に示すように横力 F_S 、揚力 F_L 、ローリングモーメント M_R が車体中心に作用する。これらは、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 $M_{W/R}$ として式(2)で表される。

$$M_{W/R} = F_S l_1 + F_L l_2 + M_R = 1/2 \rho U^2 A (C_{S1} l_1 + C_{L1} l_2 + C_{M1} h) \quad (2)$$

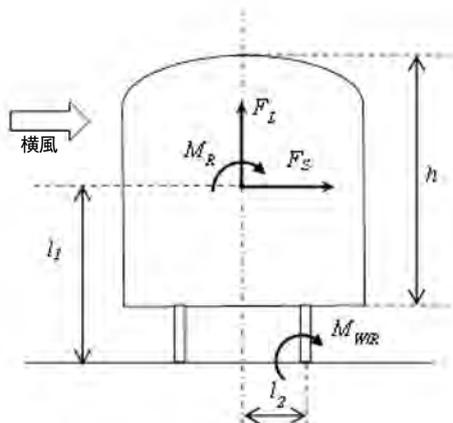


図6 横風による力およびモーメントの関係

ここで、 C_S 、 C_L 、 C_M はそれぞれ横力係数、揚力係数、ローリングモーメント係数、 ρ は空気密度、 U は風速、 A は車体側面積、 l_1 はレールレベルからの車体中心高さ、 l_2 は左右のレール／車輪接触点間距離の1/2、 h は車体高さである。 $M_{W/R}$ を $1/2\rho U^2 A$ で除した値を基準化モーメント $\overline{M}_{W/R}$ として式(3)で定義する。

$$\overline{M}_{W/R} \equiv \frac{M_{W/R}}{1/2\rho U^2 A} = C_S l_1 + C_L l_2 + C_M h \quad (3)$$

空気力の低減効果は、防風設備がある場合とない場合の $\overline{M}_{W/R}$ の比をモーメント減率として求め、それを $\overline{M}_{W/R}$ に対する各空気力成分の寄与割合に応じてそれぞれに割り振った空気力係数比(横力比、揚力比、ローリングモーメント比)として整理した。地上構造物形状の分類は、モーメント減率の傾向に基づき「橋りょう・高架橋」と「盛土(素地含む)」の2種類とした。防風設備の分類は、「防風柵」(防風を目的とした専用設備で、高さがレールレベルから2m、充実率が60%の有孔板)と「高欄」(防音壁や橋りょう下路桁など防風を目的とはしていないもののその効果が期待できる設備で、高さが任意、充実率が100%の無孔板)の2種類とした。防風柵と高欄による空気力低減効果のモデル化には、それぞれJR東日本が過去に実施した風洞実験結果と乙部¹³⁾の風洞実験結果を用いた。 l_1 、 l_2 、 h の値は、転覆限界風速計算システムに登録されている車両諸元を参考に固定値($l_1=2.56$ m、 $l_2=0.56$ m、 $h=2.74$ m)とした。

防風設備による空気力の低減効果をモデル化した結果を表1に示す。地上構造物形状と防風設備の分類に応じて得られる横力比、揚力比、ローリングモーメント比をそれぞれの空気力成分に乗じることで、空気力の低減効果が反映される。各空気力係数比は、モーメント減率換算で風洞実験結果を安全側に包含するように設定した。ここで、 α_W は防風柵に対するモーメント減率の比であり、表2のとおり設定した。防風柵の場合は $\alpha_W=1$ である。高欄の場合は、図7に基づき風洞実験結果を安全側に包含するように高欄高さ x の関数として定式化した。これにより、防風柵、高欄ともにすべての条件で減風効果を取り入れることが可能となる。

表1 防風設備による空気力の低減効果のモデル (α_W : 防風柵に対するモーメント減率の比)

地上構造物形状	横力比	揚力比	ローリングモーメント比
橋りょう・高架橋	$0.77 \alpha_W$	$0.74 \alpha_W$	$0.30 \alpha_W$
盛土(素地含む)	$0.40 \alpha_W$	$0.40 \alpha_W$	$0.17 \alpha_W$

表2 防風柵に対するモーメント減率の比のモデル (x : 高欄高さ)

防風柵	高欄：橋りょう・高架橋	高欄：盛土(素地含む)
$\alpha_W = 1$	$\alpha_W = -0.104 x^2 + 1.250$	$\alpha_W = -1.133 x + 2.326$

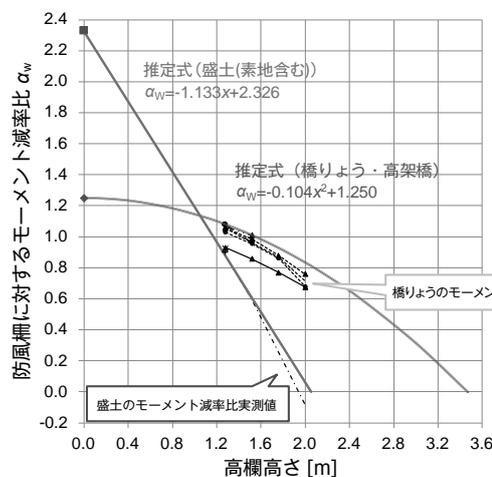


図7 高欄の防風効果推定線

4. 列車運行の安全性評価

本章では、総研詳細式に基づく風規制手法における列車運行の安全性を評価する。まず、車両にはたらく各種作用力の不確かさを評価する。次に、信頼性理論を用いて性能関数の定式化を行う。最後に、安全性指標により列車運行の安全性を定量化するとともに、従来の風規制手法との比較や必要な安全水準について検討する。

4・1 各種作用力の不確かさ

総研詳細式で考慮される作用力は、空気力、重力、超過遠心力、左右振動慣性力の4つである。同式においてこれらの力は確定値として取り扱っているが、実際には様々な原因により不確かさを有する。そこで本節では、実測データに基づき各種作用力の不確かさを定量化する。空気力については、実物大車両模型による空気力・風向風速測定試験のデータ(日比野ほか¹⁴⁾)を用いて、実測値と推定値の比の頻度分布を求めた。重力については、JR東日本の車両検査データを用いて、静止輪重比の頻度分布を求めた。超過遠心力については、JR東日本の営業路線における実軌道の検査データを用いて、カント誤差の頻度分布を求めた。左右振動慣性力については、JR東日本で実施した車両走行試験(大山ほか¹⁵⁾)のデータを用いて、左右振動加速度の頻度分布を求めた。

図8には、各パラメータの頻度分布を示す。図8 (a) は空気力の実測値と推定値の比の頻度分布であり、瞬間風速の評価に3秒平均値を用いた場合の結果とあわせて瞬時値を用いた場合の結果も参考として示した。図8 (a) ~ (d) のいずれのパラメータの平均値も、比であれば1、物理量であれば0であることから、推定誤差の平均値は0である。また、いずれの頻度分布も正規分布におおむね従っていることが分かる。これらの結果に基づき、作用力の不確かさを正規分布で近似し、平均値と標準偏差を用いて性能関数の定式化を行うこととする。

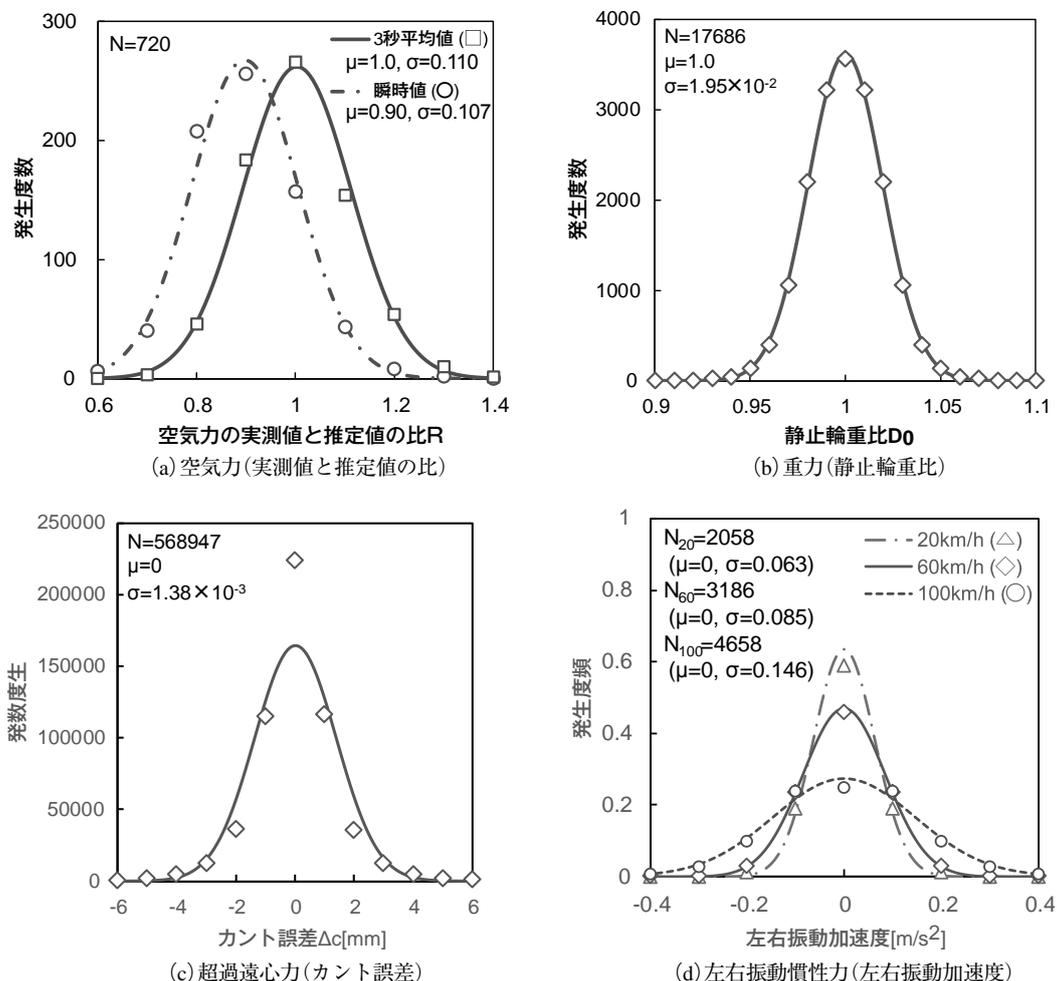


図8 車両にはたらく各種作用力の不確かさ

4・2 信頼性理論を用いた性能関数の定式化

信頼性理論(例えば、星谷、石井¹¹⁾)では、耐力と外力の不確かさに基づき、外力が耐力を上回る確率である破壊確率を直接的または間接的に評価する。図9に耐力と外力の確率分布および破壊確率のイメージを示す。平均値では耐力が外力を上回っているが、両者ともに不確かさを有するため、耐力が外力を下回ることがある。この確率が破壊確率として定義される。本節では、性能関数を定式化して破壊確率を間接的に評価する指標である安全性指標を求める。

性能関数は、耐力と外力の差で定義される。鉄道車両の転覆は、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で評価されるため、各作用力を同様のモーメントで評価することとする。耐力である重力を M_G 、外力である空気力を M_W 、超過遠心力を M_C 、左右振動慣性力を M_A とすると、性能関数 Z は式(4)で表される。

$$Z \equiv M_G - M_W - M_C - M_A \tag{4}$$

性能関数が $Z \leq 0$ となることは破壊を表し、その発生確率が破壊確率となる。次に、性能関数の平均値 μ_Z と標準偏差 σ_Z を求める。各項の平均値を μ_i (添字 i は各項の添字に対応)で表すと、平均値 μ_Z は式(5)で表される。

$$\mu_Z = \mu_G - \mu_W - \mu_C - \mu_A \tag{5}$$

各項の標準偏差を σ_i で表し、それぞれを独立と仮定すると、標準偏差 σ_Z は式(6)で表される。

$$\sigma_Z = \sqrt{\sigma_G^2 + \sigma_W^2 + \sigma_C^2 + \sigma_A^2} \tag{6}$$

安全性の評価に用いられる安全性指標 β は、平均値 μ_Z と標準偏差 σ_Z の比で定義され、式(7)で表される。

$$\beta \equiv \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_G - \mu_W - \mu_C - \mu_A}{\sqrt{\sigma_G^2 + \sigma_W^2 + \sigma_C^2 + \sigma_A^2}} \tag{7}$$

安全性指標 β は、性能関数の平均値 μ_Z が破壊点 $Z=0$ から標準偏差 σ_Z の何倍離れているかを表す指標であり、その値が大きいほど安全性の余裕が大きいことを表す(図10)。

各項の平均値 μ_i と標準偏差 σ_i は、総研詳細式と4・1節の評価結果に基づき、それぞれ式(8)～(11)と式(12)～(15)で求める。

$$\mu_G = M_{G,n}, \quad \mu_W = M_{W,n}(U), \quad \mu_C = M_{C,n}, \quad \mu_A = 0 \tag{8), (9), (10), (11)}$$

$$\sigma_G = 1.95 \times 10^{-2} \times M_{G,n}, \quad \sigma_W = 0.110 \times M_{W,n} \tag{12), (13)}$$

$$\sigma_C = (m_B \cdot h_{GB} + m_T \cdot h_{GT}) \frac{1.38 \times 10^{-3}}{G} g, \quad \sigma_A = m_B \cdot 0.178 \times \frac{V}{V_{\max}} \cdot h_{GB} \tag{14), (15)}$$

ここで、 $M_{i,n}$ は総研詳細式による各項の計算値(添字 i は各項の添字に対応)、 U は空気力項に入力する自然風の風速、 m_B と m_T はそれぞれ半車体質量と台車質量、 h_{GB} と h_{GT} はそれぞれレール面からの車体重心高さや台車重心高さ、 G は左右の車輪/レール接触点間距離、 g は重力加速度、 V と V_{\max} はそれぞれ走行速度と車両最高速度である。 $M_{i,n}$ の計算方法の詳細については、文献(日比野、石田²⁾、南雲、石原¹⁰⁾)を参照されたい。

鉄道車両の耐力は重力に依存するため、その大きさを制御することはできない。一方、風規制を実施することにより、空気力を主とした外力を制御することが可能である。この外力の制御精度が列車運行の安全性に直結する。外力を制御するための変数は、式(9)の空気力項 $M_{W,n}$ に入力する自然風の風速 U である。したがって、入力値となる転覆限界風速を適切に評価することが重要であり、その影響を本節で定式化した安全性指標により評価することができる。

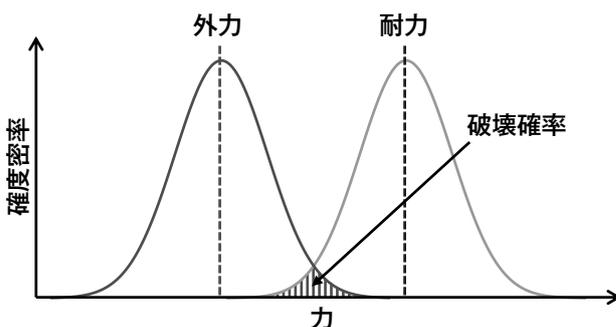


図9 耐力と外力の確率分布および破壊確率のイメージ

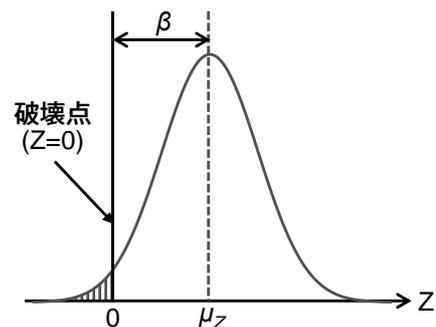


図10 安全性指標のイメージ

4・3 安全性指標による安全性評価

前述のとおり、安全性指標の大きさを決めるのは空気力項に入力する自然風の風速である。ここに風規制の基準風速を入力することで、風規制における列車運行の安全性が求められる。本節では、「総研詳細式に基づく風規制手法」の比較対象として、それ以前から用いられている「従来の風規制手法」の安全性指標も導出する。

従来の風規制手法では、基準風速が経験的に定められており、JR東日本では20m/sを標準としている。一方、総研詳細式に基づく風規制手法では、総研詳細式により計算される転覆限界風速から基準風速が定められ、その値は評価条件に応じて変動する。そこで、基準風速を20m/s(評価条件によらず固定)と総研詳細式で計算される転覆限界風速(評価条件に応じて変動)の2通りに設定して、安全性指標のパラメータスタディを行う。車両は、近年のステンレス製通勤型電車の先頭車を想定した。地上構造物形状は、単線橋梁(桁高2m)、複線高架橋(桁高3.5m)、盛土の3種類を選定した(種本ほか¹⁶⁾)。軌道条件は、直線と曲線2種類の計3条件を選定した。曲線は、2種類ともカント不足量が通勤型車両の許容最大値である60mmとなる条件として、曲線最高速度において超過遠心力が最大になるように設定した。自然風の風向角は75度とした。

図11には、条件の違いによる安全性指標の比較を示す。従来の風規制手法では、地上構造物形状が盛土、半径1400mの曲線で安全性指標が最小となる。これは、外力である空気力、超過遠心力、左右振動慣性力の和が最大になる条件のためである。総研詳細式に基づく風規制手法では、地上構造物形状の違いによる安全性指標への影響はなく、安全性指標は軌道条件のみ依存する。これは、条件に応じて変動する転覆限界風速を各条件における基準風速としているためである。2つの風規制手法で安全性指標が最小となる条件は異なるが、それぞれの最小値は同程度である。このことから、総研詳細式に基づく風規制手法では、従来の風規制手法と同程度の安全性が担保されるといえる。また、総研詳細式に基づく風規制手法では、地上構造物形状の違いによる安全性指標のばらつきが小さいため、従来の風規制手法に比べて合理的な手法であるといえる。

従来の風規制手法において、基準風速に起因する列車の転覆事故はこれまでに発生していない。そのため、従来の風規制手法における列車運行の安全性は、社会的にも許容可能な水準であると考えることができる。この考え方に従うと、総研詳細式に基づく風規制手法においても必要な安全性を担保できるといえる。補足として、総研詳細式には公称の安全率が設けられていないが、それにもかかわらず必要な安全性が担保されるのは、左右振動慣性力項によるものである。総研詳細式では、それぞれの力の最大値が同時に空気力と同じ方向に作用する状況を想定している。そのため、平均値が0の振動現象である左右振動加速度を過大評価しており、これが実質的な安全率の役割を果たすことで必要な安全性が担保される結果となった。

最後に、本稿では、2つの風規制手法で担保される安全性を相対評価することを目的としていた。そのため、簡便に安全性指標を導出、比較できるよう、転覆限界風速と同じ値の風速が転覆限界風速を最小とする角度から常に吹き続ける状況を仮定した。一方で、仮定した状況は安全側の評価が可能ではあるものの、実際の運用環境を表現したものではなく、導出された安全性指標は実際の値よりも小さいことに注意されたい。信頼性理論では、評価対象の運用環境を考慮して1年もしくは耐用期間における安全性指標を評価するのが一般的であるが、前述の理由により本稿ではこれらについては議論しないこととする。

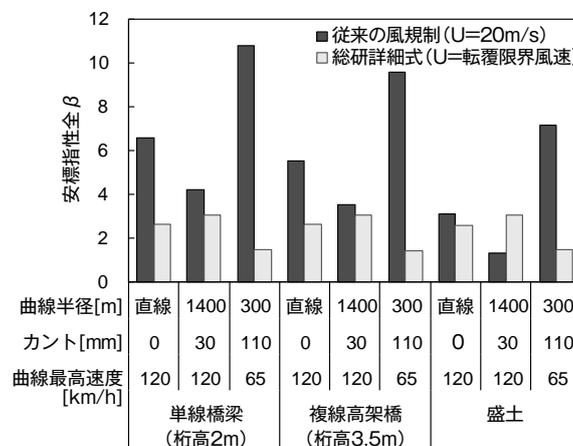


図11 条件の違いによる安全性指標の比較

5. おわりに

本稿では、総研詳細式に基づく風規制手法の概要と、同手法における列車運行の安全性を評価した結果を、既往文献に基づき紹介した。結論を以下にまとめる。

- (1) 総研詳細式およびその活用方法について解説した。車両、軌道、地上構造物形状などの各種条件に応じて沿線での転覆限界風速を計算する方法を確立し、JR東日本の複数線区に導入した。
- (2) 総研詳細式に基づく風規制手法に付随する研究開発について説明した。各種条件に応じて沿線での転覆限界風速を計算するシステムを開発、改良した。また、防風柵や高欄等の壁による減風効果を転覆限界風速の計算に反映させる方法を開発した。
- (3) 車両にはたらく各種作用力の不確かさを調査し、総研詳細式に基づく風規制手法による列車運行の安全性を評価した結果について述べた。信頼性理論に基づき性能関数を定式化し、安全性指標を用いて列車運行の安全性を評価することで、同手法の妥当性を明らかにした。

今後は、総研詳細式に基づく風規制手法の導入拡大を目指すとともに、同手法の導入を支援するための研究開発を進めていく。

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 (1972), pp.1-15.
- 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 (2003), pp.39-44.
- 3) 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).
- 4) 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 (2011) pp.36-41.
- 5) 栗原芳勝、大山安紀子、土井賢一、安田陽一、強風時の新しい運転規制方法の導入、JR EAST Technical Review, No.45 (2014) pp.17-22.
- 6) 栗原芳勝、森山淳、土井賢一、堀岡健司、線路状況や車体形状等を考慮した風規制手法の導入について、第19回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2012) 講演論文集 (2012), pp.473-476.
- 7) 竹田進治、大山安紀子、三須弥生、土井賢一、転覆限界風速計算システムの機能・精度向上、JR EAST Technical Review, No.56 (2017), pp.19-22.
- 8) 竹田進治、南雲洋介、三須弥生、土井賢一、転覆耐力評価における防風柵の減風効果の導入、第24回鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-RAIL2017) 講演論文集 (2017), S7-1-4, pp.1-4.
- 9) 一本道弘、南雲洋介、三須弥生、車両の転覆耐力評価における高欄の防風効果の取り入れ手法、第27回鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-RAIL2020) 講演論文集 (2020), S6-1-5, pp.1-4.
- 10) 南雲洋介、石原孟、各種作用力の不確かさを考慮した横風に対する鉄道車両の耐風性能評価、日本風工学会論文集、Vol.45, No.3 (2020), pp.79-92.
- 11) 星谷勝、石井清、構造物の信頼性設計法、鹿島出版会 (1986).
- 12) 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 (2016) pp.361-366.
- 13) 乙部達志、鈴木実、野口雄平、強風時の車両に対する高欄等による遮風効果、鉄道総研報告、Vol.31, No.9 (2017), pp.5-10.
- 14) 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 (2004), pp.11-16.
- 15) 大山安紀子、鈴木貞治、三須弥生、安田陽一、堀岡健司、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的検証、第22回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2015) 講演論文集 (2015), 1123, pp.1-4.
- 16) 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 (2013), pp.47-50.