

鉄道車両の転覆限界風速計算式の近似手法に関する一検討

○ [土] 南雲 洋介 (東日本旅客鉄道)

A study on a simplified formula for calculating critical wind speeds of overturning of railway vehicles

○Yosuke Nagumo, (East Japan Railway Company)

In this study, a simplified formula for calculating critical wind speeds of overturning is proposed to assess crosswind resistant performance of railway vehicles with allowable accuracy. Firstly, approximated forces acting on the railway vehicles and approximation ratios multiplied by them are formulated to reduce the number of the vehicle specifications needed for the calculation. Secondly, values of the approximation factors are estimated based on actual vehicle specifications. Finally, accuracy of the proposed formula is assessed by comparing the critical wind speeds of overturning calculated from the proposed formula with those calculated from the original one.

キーワード: 横風, 強風, 耐力, 準静的解析, 総研詳細式

Key Words: Crosswinds, strong winds, resistant force, quasi-static analysis, RTRI detailed equation

1. はじめに

強風時における列車運行の安全性を確保するためには、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維持する必要がある。耐力は、風上側の輪重がゼロと計算されるとき自然風の風速である転覆限界風速として評価される。転覆限界風速の計算式として、日本では国枝¹⁾により提案された静的解析式(以下、国枝式とする)や日比野・石田²⁾により提案された準静的解析式(以下、総研詳細式とする)が広く使われている。総研詳細式では、各種作用力の計算における近似や仮定を最小限にしているため、国枝式と比較してより精緻に転覆限界風速を計算することが可能である。その精度については、日比野ら³⁾が実施した実物車両を用いた横力負荷試験により示されている。一方、総研詳細式による計算では、詳細な車両諸元が必要である。実用性の観点からは、転覆限界風速を許容精度で極力簡便に計算できることが理想的である。

本研究では、総研詳細式を基礎として、転覆限界風速の計算に必要な車両諸元を削減するための近似手法を提案する。まず、車両諸元を削減した近似作用力を定式化し、その影響を補正するために近似作用力に乗じる近似係数を定式化する。次に、実際の車両諸元に基づき、各近似係数の値を推定する。最後に、推定した近似係数を用いて転覆限界風速の試算を行い、近似式の精度を評価する。

2. 近似手法の構築

2.1 総研詳細式の概要

総研詳細式は、半車両の2次元断面モデルである(図1)。車両への作用力として、耐力である重力と外力である空気力、超過遠心力、左右振動慣性力の計4種の力が考慮される。これらを風下側の車輪/レール接触点まわりのローリングモーメントとして扱えば、風上側の輪重がゼロとなるときのつり合いは式(1)で表される。

$$M_G = M_W(U) + M_C + M_A \quad (1)$$

ここで、 M_G は重力モーメント、 M_W は空気力モーメント、 M_C は超過遠心力モーメント、 M_A は左右振動慣性力モーメントである。各作用力は、それぞれ式(2)~(5)で求められる。

$$M_G = m_B g (G/2 - y_B) + m_T g \cdot G/2 \quad (2)$$

$$M_W = \frac{1}{2} \rho U_r^2 (U, V) A_S \{ C_S(\psi_r) \cdot h_{BC} + C_L(\psi_r) (G/2 - y_B + e\phi_B) \} \quad (3)$$

$$M_C = \left| (m_B \cdot h_{GB} + m_T \cdot h_{GT}) \left(\frac{V^2}{r} - \frac{c}{G} g \right) \right| \quad (4)$$

$$M_A = m_B \cdot 0.1 g \frac{V}{V_{max}} \cdot h_{GB} \quad (5)$$

ここで、 m_B は半車体質量、 m_T は台車質量、 g は重量加速度、 G は左右の車輪/レール接触点間距離、 y_B は車体重心の左右変位、 ρ は空気密度、 U_r は自然風 U と車両走行速度 V の相対風速、 A_S は半車体側面積、 C_S は横力係数、 C_L は揚力係数、 h_{BC} はレール面からの風圧中心高さ、 e は車体重心から風圧

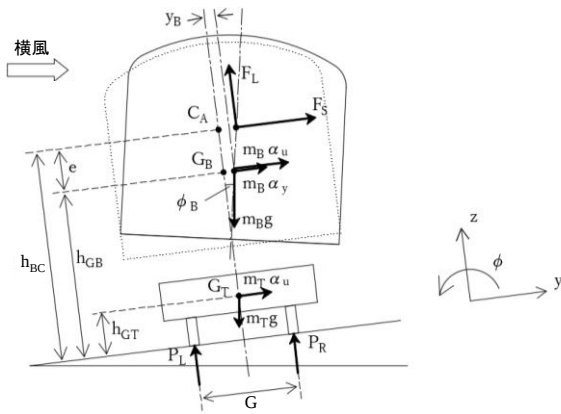
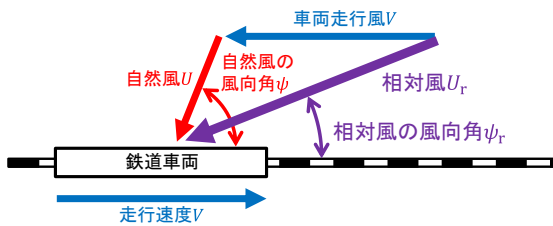
図1 総研詳細式の概要(日比野・石田²⁾に一部追記修正)

図2 鉄道車両にあたる相対風のイメージ

中心までの距離, ϕ_B は車体重心まわりのロール変位, h_{GB} はレール面からの車体重心高さ, h_{GT} はレール面からの台車重心高さ, r は軌道の曲線半径, c はカント, $V_{\max}$ は車両最高速度である。式(3)における相対風速 U_r と相対風向角 ψ_r は, それぞれ式(6)と式(7)で求める (図2)。

$$U_r = \sqrt{(U \cos \psi + V)^2 + (U \sin \psi)^2} \quad (6)$$

$$\psi_r = \arctan \frac{U \sin \psi}{U \cos \psi + V} \quad (7)$$

超過遠心力は正負両方の値を取り得るが, 軌道の内方側と外方側の両方向の転覆を考慮したうえで安全側の値を取るようにするために, 式(4)のとおり絶対値で表現した。式(1)を自然風の風速 U について解くことで, 転覆限界風速が得られる。風圧中心高さ h_{BC} と変位 y_B , ϕ_B の導出方法については, 参考文献2)を参照されたい。

2.2 近似作用力と近似係数の定式化

本研究で提案する近似手法の基本的な考え方は, 取得しづらい車両諸元を省略または他の諸元で代替することで不要とすることである。総研詳細式による転覆限界風速の計算において取得しづらい車両諸元として, 変位 y_B , ϕ_B の導出に必要なばね系諸元と, 台車諸元 m_T , h_{GT} が挙げられる。これらを省略または他の諸元で代替し, それにより生じる誤差を近似係数で補正する。近似作用力と近似係数を用いた近似式は式(8)のように表す。

$$\gamma_G M_G^* = \gamma_W M_W^*(U) + M_C + \gamma_A M_A^* \quad (8)$$

ここで, M_i^* は各作用力 M_i の近似値, γ_i は近似作用力 M_i^* に乗じる近似係数である。添字 i は各項の添字に対応する。近似係数は, 式(1)と式(8)から式(9)のように定義される。

$$\gamma_i \equiv \frac{M_i}{M_i^*} \quad (9)$$

車体重心の左右変位 y_B とロール変位 ϕ_B を省略し, さらに

表1 転覆限界風速の計算に必要な車両諸元

番号	項目	総研詳細式	提案近似式
1	半車体質量 (半車両質量)	○	○
2	レール面からの車体 (車両) 重心高さ	○	○
3	台車質量	○	
4	レール面からの台車重心高さ	○	
5	車輪半径	○	
6	車体高さ (車体下端—車体上端)	○	○
7	半車体側面積	○	○
8	左右の車輪/レール接触点間距離	○	○
9	車両最高速度	○	○
10	レール面からの空気ばね中心高さ	○	
11	レール面からの左右動ストッパ中心高さ	○	
12	左右動ストッパ隙間	○	
13	上下動ストッパ隙間	○	
14	台車中心—軸ばね中心間距離	○	
15	台車中心—空気ばね中心間距離	○	
16	台車中心—上下動ストッパ中心間距離	○	
17	軸ばね上下ばね定数	○	
18	空気ばね上下ばね定数	○	
19	空気ばね左右ばね定数	○	
20	左右動ストッパゴムばね定数	○	
21	上下動ストッパゴムばね定数	○	
—	合計	21	6

半車体質量 m_B と台車質量 m_T を半車両質量 m_C として, 車体重心 h_{GB} と台車重心 h_{GT} を車両重心 h_{GC} として代替すると, 式(2)~(5)はそれぞれ式(10)~(13)のように近似される。

$$M_G^* = (m_B + m_T)g \cdot \frac{G}{2} = m_C g \cdot \frac{G}{2} \quad (10)$$

$$M_W^* = \frac{1}{2} \rho U_r^2 (U, V) A_s \left\{ C_S \cdot h_{BC} + C_L \cdot \frac{G}{2} \right\} \quad (11)$$

$$M_C = \left| m_C \cdot h_{GC} \left(\frac{V^2}{r} - \frac{c}{G} g \right) \right| \quad (12)$$

$$M_A^* = m_C \cdot 0.1 g \frac{V}{V_{\max}} \cdot h_{GC} \quad (13)$$

近似係数 γ_i は評価条件ごとに異なる値となるが, これらを固定値として設定することで, 少ない車両諸元で簡便に転覆限界風速を計算することが可能になる。表1には, 転覆限界風速の計算に必要な車両諸元の比較を示す。総研詳細式では21個のパラメータが必要なのに対し, 提案近似式ではそれが6個に削減される。

3. 近似係数の推定

3.1 評価条件

本章では, 近似係数を固定値として設定するために, その適切な値を推定する。本節では, 近似係数を推定するための評価条件を整理する。車両形状と線路構造物の条件は, 種本⁴⁾の風洞実験に基づき, それぞれ5車両形状 (通勤型, 特急型, 二階建, 客車型, 貨車型) と7線路構造物 (築堤, 単線橋梁: 桁高1m, 2m, 3.5m, 複線高架橋: 桁高1m, 3.5m, 6m) を選定した。各車両形状に対して代表的な1車種を選定し, 1車種につき先頭車および中間車の2ケースを対象とした。軌道条件と運転条件は, 表2に示す5ケースとした。以上の組み合わせにより, 評価条件は計350ケ

ースとした。空気密度 ρ は 1.23kg/m^3 、自然風の風向角 ψ は 90 度、自然風の風速 U は各評価条件において総研詳細式により計算された転覆限界風速とした。転覆限界風速の計算において、横力係数 C_S と揚力係数 C_L は種本ら⁴⁾の風洞実験結果を用い、相対風向角 ψ_r に対応する値を線形補間して適用した。

3.2 推定結果

図3には、前節の評価条件により求めた近似係数の平均値 $\mu_{\gamma,i}$ を示す。全車両形状をまとめて評価した結果と、車両形状ごとに個別に評価した結果を並べて示す。近似係数の平均値は、いずれも1未満である。 γ_G については、重力モーメント M_G の腕の長さが車体重心の左右変位 y_B により短くなるところを、近似値 M_G^* では変位の省略により過大評価しているためである。 γ_W については、空気力モーメント M_W における揚力の腕の長さが風圧中心の左右変位 $y_B - e\phi_B$ により短くなるところを、近似値 M_W^* では変位の省略により過大評価しているためである。 γ_A については、左右振動慣性力モーメント M_A が本来は半車体にのみ作用するのを、近似値 M_A^* では台車も含めた半車両に作用するものとして過大評価しているためである。車種ごとの傾向を見ると、通勤型、特急型、二階建の3車両形状は、いずれの近似係数でも同程度の値となっている。対して、客車型と貨車型は傾向が異なり、特に γ_G においてその他3車両形状とは約0.1の差が生じている。これは、2次ばねの左右剛性の違いが原因である。

図4には、近似係数の標準偏差 $\sigma_{\gamma,i}$ を示す。 γ_G における全車両形状の標準偏差は、他の条件に比べて突出して大きい。これは、 γ_G の全車両形状の平均値と客車型および貨車型の平均値の差が大きいためである。 γ_A について、その値は半車体と台車の質量および重心にのみ依存する。客車型と貨車型の車両は、先頭車と中間車で同じ車両諸元を用いているため、これら2形状の標準偏差は0になっている。

以上の推定結果に基づき、近似式の使用目的に応じて近似係数を固定値として設定することで、必要な車両諸元を削減した転覆限界風速の計算が可能である。

4. 近似式の精度検証

4.1 近似係数の設定

本研究で提案する近似式の使用目的として、2つの用途が考えられる。1つめは、総研詳細式の代替式として用いることである。この用途では、近似式と総研詳細式の計算結果が平均的に一致することが望ましいと考え、近似係数

には推定結果の平均値を用いる。2つめは、総研詳細式による評価の前段に予備評価として用いることである。この用途では、総研詳細式による本評価の必要性を判断することが目的となるため、総研詳細式よりも安全側の評価となるように近似式を調整することが望ましいと考えられる。これらの両方の用途に対応できるように、近似係数は式(14)のように設定する。

$$(\mu_{\gamma,G} - n\sigma_{\gamma,G})M_G^* = (\mu_{\gamma,W} + n\sigma_{\gamma,G})M_W^*(U) + M_C + (\mu_{\gamma,A} + n\sigma_{\gamma,A})M_A^* \quad (14)$$

ここで、 n は近似係数の標準偏差に乘じる係数である。本研究では、 n の値を0, 0.5, 1.0, 1.5の4通りに設定した。

$n=0$ は1つめの用途に対応し、 $n \neq 0$ は2つめの用途に対応する。3.2節における近似係数の推定結果より、客車型と貨車型は他の車両と比較して近似係数の傾向が異なることがわかった。そして、旅客輸送を考えると、大半は通勤型、特急型、二階建の3車種に集約される。そこで本研究では、近似係数を5車種と3車種（通勤型、特急型、二階建）の2通りで導出し、それぞれのケースについて精度評価を行う。表3には、精度評価に用いる近似係数をまとめた。対

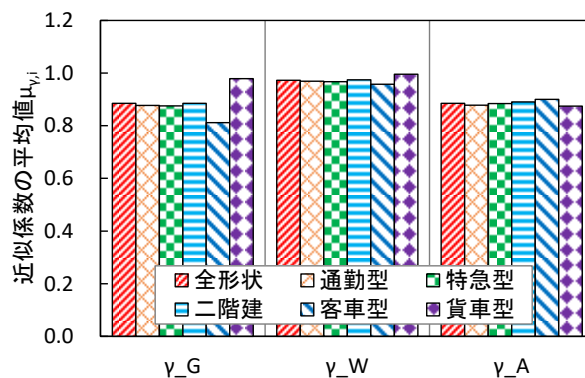


図3 近似係数の平均値

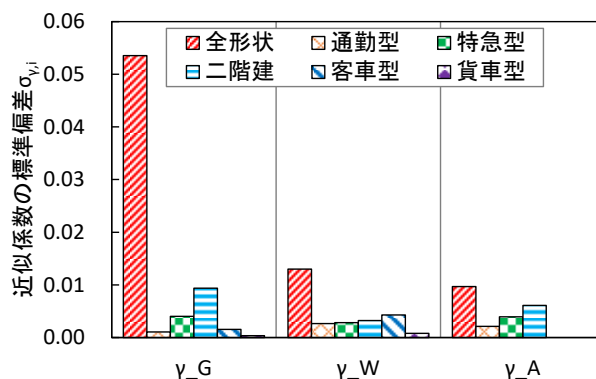


図4 近似係数の標準偏差

表2 軌道条件および運転条件

番号	曲線半径 $r[\text{m}]$	カント $c[\text{m}]$	走行速度 $V[\text{m/s}]$ ($[\text{km/h}]$)
1	直線	0	$V_{\max}$
2	1500	0.03	$V_{\max}$
3	900	0.05	27.8 (100)
4	500	0.07	22.2 (80)
5	300	0.10	19.4 (70)

表3 評価に用いる近似係数

項目 i	5車両形状 (all) 全車種		3車両形状 (three) 通勤型, 特急型, 二階建	
	$\mu_{\gamma,i}^{\text{all}}$	$\sigma_{\gamma,i}^{\text{all}}$	$\mu_{\gamma,i}^{\text{three}}$	$\sigma_{\gamma,i}^{\text{three}}$
γ_G	0.885	0.054	0.879	0.007
γ_W	0.973	0.013	0.970	0.004
γ_A	0.885	0.010	0.884	0.007

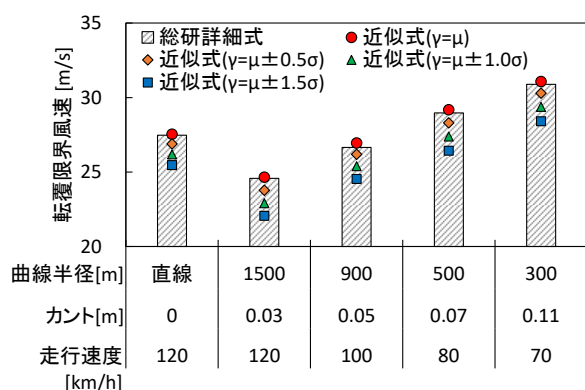


図5 転覆限界風速の計算例

(通勤型先頭車, 単線橋梁: 桁高 2m, 5 車両形状を対象)

象を 3 車種に限定することで, 近似係数の標準偏差が大きく低減されていることがわかる。

4.2 転覆限界風速の比較

近似式による転覆限界風速の推定精度は, 総研詳細式による転覆限界風速との差 ΔU_{cri} として, 式(15)で評価する。

$$\Delta U_{cri} = U_{cri}^{APP} - U_{cri}^{HBN} \quad (15)$$

ここで, U_{cri}^{APP} は提案近似式による転覆限界風速, U_{cri}^{HBN} は総研詳細式による転覆限界風速である。 ΔU_{cri} が正のときには転覆限界風速を過大すなわち危険側に評価, 負のときには過小すなわち安全側に評価することを表す。

図 5 には, 転覆限界風速の計算例を示す。車両は通勤型先頭車, 線路構造物は単線橋梁: 桁高 2m, 近似係数は 5 車両形状から導出したものを用いた。近似係数を平均値として設定した場合は, 総研詳細式と近似式の転覆限界風速が同程度の値になっている。近似係数が大きく (重力の近似係数は小さく) になると, 近似式の転覆限界風速は総研詳細式に比べて小さくなり, 安全側評価となる。これは計算結果の一例であるため, 3.1 節の評価条件にあわせて転覆限界風速を計算することで近似式の精度を評価する。

図 6 には, 5 車両形状から推定した近似係数を適用したときの転覆限界風速の差を示す。平均値, 最小値, 最大値を $\gamma_i = \mu_{\gamma,i} \pm n\sigma_{\gamma,i}$ ($n = 0, 0.5, 1.0, 1.5$) の 4 通りについて示した。 $\gamma_i = \mu_{\gamma,i}$ のとき, ΔU_{cri} の平均値はほぼ 0 であるが, 最小値と最大値は平均値から 2m/s 程度の差が生じる。 n が大きくなるにしたがい, ΔU_{cri} は小さくなっていき, $n = 1.5$ のときには最大値がほぼ 0 になる。このことから, 5 車両形状を対象とする場合には, 近似係数の平均値から標準偏差の 1.5 倍程度の余裕を取ること安全側の評価になるといえる。図 7 には, 3 車両形状から推定した近似係数を適用したときの転覆限界風速の差を示す。5 車両形状の場合と比べて, 平均値からの最大値と最小値の差は大幅に低減されており, 対象車両を絞り込むことで高い精度で評価が可能であることがわかる。 $n = 1$ のときに最大値が 0 になっていることから, 3 車両形状を対象とする場合には, 近似係数の平均値から標準偏差の 1 倍程度の余裕を取ること安全側の評価になるといえる。なお, これらは本研究で定めた評価条件に対する結果であることに留意されたい。

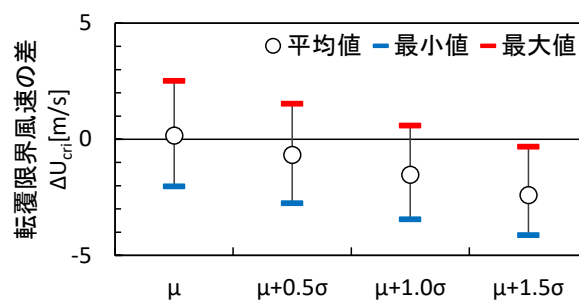


図6 転覆限界風速の差 (対象: 5 車両形状)

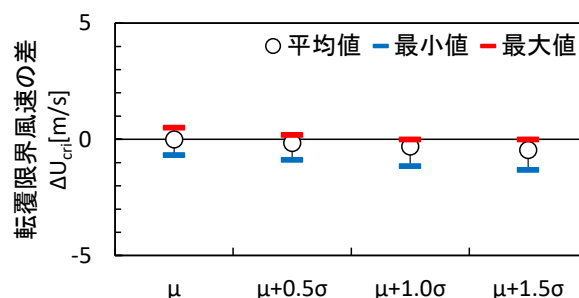


図7 転覆限界風速の差 (対象: 3 車両形状)

5. おわりに

本研究では, 総研詳細式を基礎として, 転覆限界風速の計算に必要な車両諸元を削減した近似式を提案した。得られた結果は, 以下のとおりである。

- (1) 転覆限界風速の計算に必要な車両諸元を削減するために, 近似作用力とそれ乗じる近似係数を定式化した。これにより, ばね系諸元と台車諸元を不要とした。
- (2) 実際の車両諸元に基づきパラメータスタディを行い, 近似係数の値を推定した。車種による近似係数の違いが確認され, 対象車両を絞り込むことで評価条件による近似係数のばらつきを低減できることがわかった。
- (3) 推定した近似係数を用いて転覆限界風速の試算を行い, 近似式の精度を検証した。近似式の用途や対象車両に応じた近似係数の傾向や転覆限界風速の推定精度の違いを明らかにした。

最後に, 本研究で提案した近似手法の実用性に際しては, その用途や必要とする精度に応じて, 近似係数を別途定めることが望ましい。

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, 下村隆行, 谷藤克也: 鉄道車両の転覆限界風速に関する静的解析式の検証, 日本機械学会論文集(C編), Vol.75, No.758, pp.2605-2612, 2009.
- 4) 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.