

転覆限界風速計算システムの機能・精度向上

Improvement of function and precision of overturning critical wind speed calculation system



竹田 進治*



大山 安紀子**



三須 弥生*



土井 賢一*

In overturning critical wind speed calculation system that we have developed, if we need to develop structure specifications correctly, it was found to be a part of strict calculation result. We have spent the time and effort to the development of construction specifications. So, in this system, we have to improve the accuracy and the structure so that it can be automatically determined.

●キーワード：風規制、総研詳細式、転覆限界風速、地上構造物自動判定、風の駆け上がり高さ

1. はじめに

2005年12月25日、羽越本線砂越駅～北余目駅間において、特急いなほ号が脱線・転覆した事故を受けて、在来線において風規制を行っている全ての箇所について、それまで風速25m/sで速度規制(25km/h)、風速30m/sで運転中止としていたものを、暫定的に風速20m/sで速度規制(25km/h)、風速25m/sで運転中止(いわゆる「早め規制」)に変更している。当社では1972年に国枝氏が開発した評価式(国枝式¹⁾)を用いて転覆耐力評価を行っており、現在も国枝式をもとに車両設計を行っている。しかし、同羽越本線の脱線・転覆事故をきっかけに、鉄道車両の横風に対する転覆限界風速を、車体形状の影響、地上構造物の影響、風向角の影響、先頭車と中間車の違い等を考慮することでより精緻に評価することが可能な鉄道総研提唱の新しい解析式(以下、「総研詳細式」という。)²⁾を用い、安全かつ合理的な運転規制ルールを一部線区・区間に先行導入してきた。またこれに伴い、多くのパラメータを要する総研詳細式による転覆限界風速の計算を効率的にできる計算システム(以下、「転覆限界風速計算システム」という。)³⁾を開発した。

転覆限界風速計算システムは、新たな風規制ルール「総研詳細式に基づく風規制の取扱い」の策定に伴い生ずる膨大な計算を簡便に行うことが可能であり、「総研詳細式に基づく風規制の取扱い」の実導入につなげることができた。

「総研詳細式に基づく風規制の取扱い」は地上構造物形状、周辺風環境を考慮するため詳細な評価ができる反面、データ等の管理が煩雑である。また、地上構造物諸元は、人手を介して当該箇所の画像や現地調査により判定するため、精度に差異が生じ、かつ労力を要していた。そこで人手を介さずに地上構造物を判定する手法を検討した結果、当社で保有していた地上構造物の盛土高さデー

タは、転覆耐力評価に必要な風の駆け上がり高さの定義と乖離があり、新たにデータベースを整備する必要があることがわかってきた。

そこで、転覆限界風速計算に必要なキロ程、線名、単線複線区分、トンネル、風の駆け上がり高さ、橋梁桁高等、地上構造物の既存のデータベースを再整備し、いままでの転覆限界風速計算システムの計算フローを見直し、人手を介さず地上構造物の判定を自動的に行い、車両に影響する空気力をより精密に選定する手法を開発した。さらに周辺の地盤高さ及び周辺の地表面粗度を考慮した風の駆け上がり高さを求める手法を開発した。

2. 総研詳細式

車両転覆事故における近年の研究などから得られた知見を反映し、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、地上構造物の影響、風向角の影響、先頭車と中間車の違い等を考慮し、かつ車両のばね系の影響を詳細に考慮できる新たな転覆限界風速の計算式が総研詳細式である。

2.1 総研詳細式と国枝式の違い

総研詳細式では、国枝式と以下の主な違いがある。

- ①車体形状、地上構造物形状、自然風の風向角、先頭車と中間車に対する空気力の違いを考慮する。
- ②横風による空気力として、横力、揚力を考慮しさらに、ローリングモーメントを用いて風圧中心高さを求める。
- ③国枝式では真横から吹く風のみを対象としているが、総研詳細式では車両の走行による相対風と自然風の合成風が車両に作用するとして車両に作用する空気力を評価する。

2.2 総研詳細式のパラメータと計算結果

総研詳細式は前述の通り、国枝式より多くの条件（車体形状、地上構造物、列車走行速度、先頭車と中間車の違い）を考慮することができ、風による影響を詳細に求めることができる。

総研詳細式の計算に必要な空気力係数（当該小区間の線路構造に関する情報と当該小区間を走行する車両に関する情報に基づいて求められる）については、鉄道総研が実施した代表的な5車種の車両形状（103系、285系、485系、24系、コキ50000系）と地上構造物7形状（単線橋梁 桁高1m、2m、3.5m、複線高架橋 桁高1m、3.5m、6m、単線築堤法面勾配1.5、高さ8.72m）の組合せ（図1参照）による風洞試験結果^{4）、5）}を使用する。転覆限界風速を計算する車両の車体断面形状と最も類似していると判定した上記5車種の内の1車種を選び、その空気力係数を準用することで計算する。地上構造物形状については風規制区間において地上構造物判定を行い、区間内の地上構造物を図1の代表的な7種の地上構造物形状のいずれかに当てはめて計算する。このとき計算対象の形状を図1の代表的な形状から選択するのが難しい場合は、安全側の評価となるように形状を選択する。

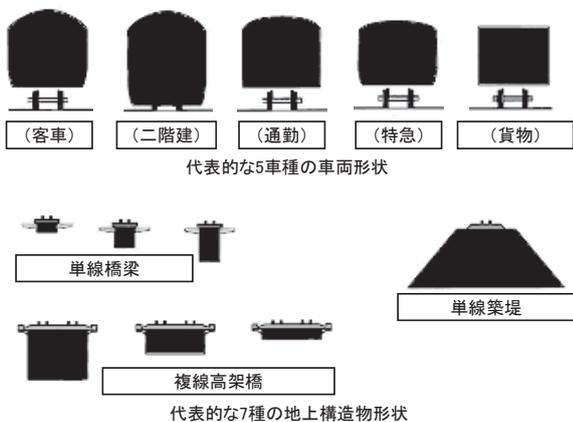


図1 5車種の車両形状と7種の地上構造物形状⁶⁾

また、その他の必要なパラメータとして、車両各部の主要寸法、質量、ばね諸元、曲線諸元（曲線半径、カント量）、計算対象箇所制限速度などが必要となる。これらのパラメータによる計算結果として、特定の地上構造物上を走行する車両の走行速度及び曲線内方・外方別に対する転覆限界風速、風速に対する走行可能速度を求めることができ、さらにこの結果に基づいて風規制ルールを策定することが可能となる。

3. 転覆限界風速計算システム

3.1 新しい転覆限界風速計算システムの概要

「総研詳細式に基づく風規制の取扱い」の導入に先立ち、転覆限界風速計算システムを開発した³⁾。総研詳細式は、国枝式と比べパラメータが多く、手計算や表計算ソフトによる計算は非常に手間がかかり、さらに転覆限界風速を計算する線区における運用車両の諸元、軌道諸元、制限速度、使用する空気力係数（車両形状と地上構造物の組合せ）を組合せて計算する必要がある。そこで車両諸元、空気力係数、車両運用区間、線区の最高速度・制限速度、各路線の曲線諸元のデータベースを備えるシステムとして開発した。システム上で、路線および区間（駅間またはキロ程間）と車両形式を設定すると、その路線および区間の地上構造物や曲線条件と車両形式の組み合わせにおける転覆限界風速を計算することが可能である。

しかし、転覆限界風速を計算する際に必要な地上構造物諸元は、500m毎に人手を介して当該箇所の画像や現地調査により判定し入力する必要があるため、精度に差異が生じ、かつ労力を要していた。そこで人手を介さずに地上構造物を判定する手法を検討した結果、当社で保有していた地上構造物の盛土高さデータは当社敷地内の地盤からまくらぎ上面までの高さであったため、転覆耐力評価に必要な風の駆け上がり高さの定義と乖離があり、風の駆け上がり高さのデータベースを新たに整備する必要があった。

そこで、転覆限界風速を計算するために必要な地上構造物等の判定を自動的に行う手法、及び周辺粗度を考慮した風の駆け上がり高さを求める手法を開発した。

3.2 地上構造物等計算パラメータの判定の自動化

「総研詳細式に基づく風規制の取扱い」は地上構造物形状、周辺風環境を考慮し精緻な評価ができる反面、データ等の管理が煩雑である。転覆限界風速計算システムの計算フローを見直すことにより、地上構造物等の判定を自動的に行える手法を開発した。

計算に必要なキロ程、単線複線区分、トンネルフラグ・まくらぎ上面高さについて既存のデータベースの再整備を行い、キロ程はMARS（土木構造物管理システム）、線区名、線名はTRAMS（保線設備管理システム）のデータベースを組合せて、20m毎に転覆限界風速等を計算できるようにした。

3.2.1 風の駆け上がり高さの判定

盛土上の車両に働く空気力は周辺粗度により決まる。また空気力は地表面から斜面を上につれて加速し、斜面付近の平均風速は平坦な地形上よりも大きくなる⁸⁾。そのため、転覆限界風速をより正確に算出するためには、周辺粗度を考慮した風の駆け上がり高さを求めることが必要である。

風の駆け上がり高さは、3D線路情報のデータを利用して算出し、周辺地盤からまくらぎ上面高さまでの高さとして、線路の左右別に定めた。算出方法は、まず対象区間の線区及びキロ程を20m毎に分割、評価地点の横断面（線路法線方向）を切り出し、切り出した線路中心から勾配の絶対値が一番大きい箇所を盛土法尻（P1）、及び切取法尻（Q1）と定義し、盛土法尻及び切取法尻を検索した。さらに切り出した線路中心とP1、Q1間において、点P、Qを中心とした円を描き、円の面積に占める地面の割合（遮蔽率）のうち最も遮蔽率が少ない点を盛土の始点P0、最も遮蔽率が大きい点を切取の始点Q0と定義し、盛土法尻及び切取法尻を検索した。定義した盛土法尻P1からまくらぎ方向の外側20m毎に5点、合計100mの区間の標高を取得し、5点の平均標高を算出した。さらに求めたい風の駆け上がり高さの地点を中心に前後線路方向20m毎に合計100m×100mの周辺地盤平均標高を計算し、風の駆け上がり高さをまくらぎ上面高さから周辺地盤平均標高の差分として1m単位で求めた（図2、3、4参照）。

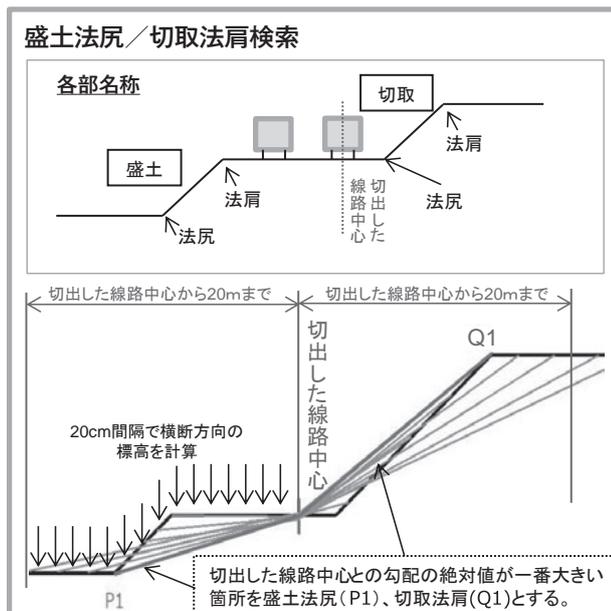


図2 盛土法尻/切取法尻の検索方法

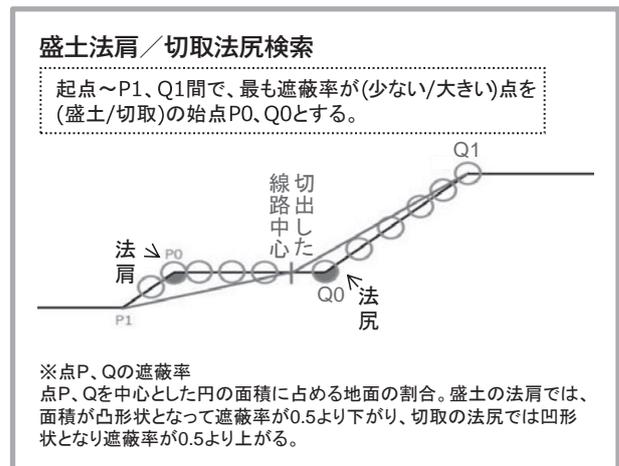


図3 盛土法尻/切取法尻の検索方法

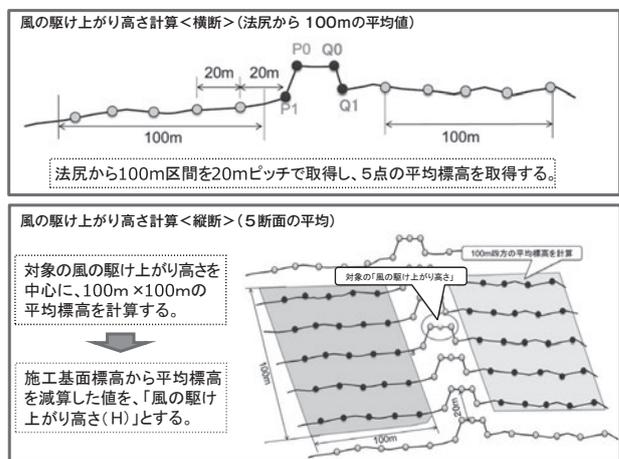


図4 風の駆け上がり高さの計算(5断面の平均)

3.2.2 有効高さの算出

ここで算出した風の駆け上がり高さHは周辺の建物等の地物を無視した地表面からの寸法である。新しい転覆限界風速計算システムでは周辺粗度を考慮して実質的な風の駆け上がり高さとして有効高さzをHから求め、このzを用いて土工を「高盛土」「素地」の2つに分類する。有効高さzは、3.2.1により算出した100m×100mの周辺地盤を取り囲む400m×400mの領域を対象に表1に示す粗度区分を用いて判定する（図5参照）。

・有効高さzの決定方法

H：線路風向側100m×100m領域の平均標高と枕木上面高さの差

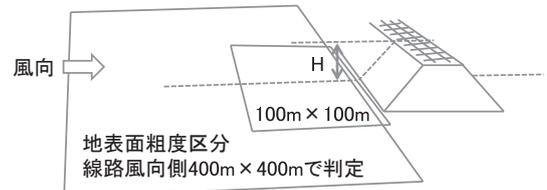


図5 風の駆け上がり高さHと地表面粗度区分の評価領域

全体の地表面粗度区分I、IIのような海岸地帯、田園地帯と判定する場合には、有効高さ z =風の駆け上がり高さ H とする。一方、周辺に高い建築物が林立している地表面粗度区分IIIあるいはIV、Vのような状況では、実質的な風の駆け上がり高さ H を割り引くことができると考え、地表面粗度区分をIIIと判定する場合には3m、IVあるいはVと判定する場合には5mを H から差し引いて有効高さ z とした。有効高さ z が4m以上の場合には高盛土、有効高さ z が4m以下の場合には素地（低盛土）と判定した（図6参照）。有効高さを正確に算出することにより、過剰に安全性を考慮することなく、より実態に即した有効高さ判定が可能となる。

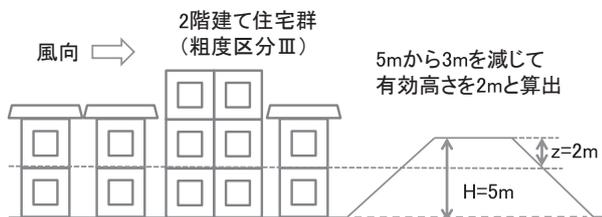


図6 地表面粗度区分による風の駆け上がり高さの補正

表1の粗度区分に従い、粗度区分I~V（図7）の判定を定義し、航空測量データから全風規制区間の軌道左右の粗度区分データベースを作成した。

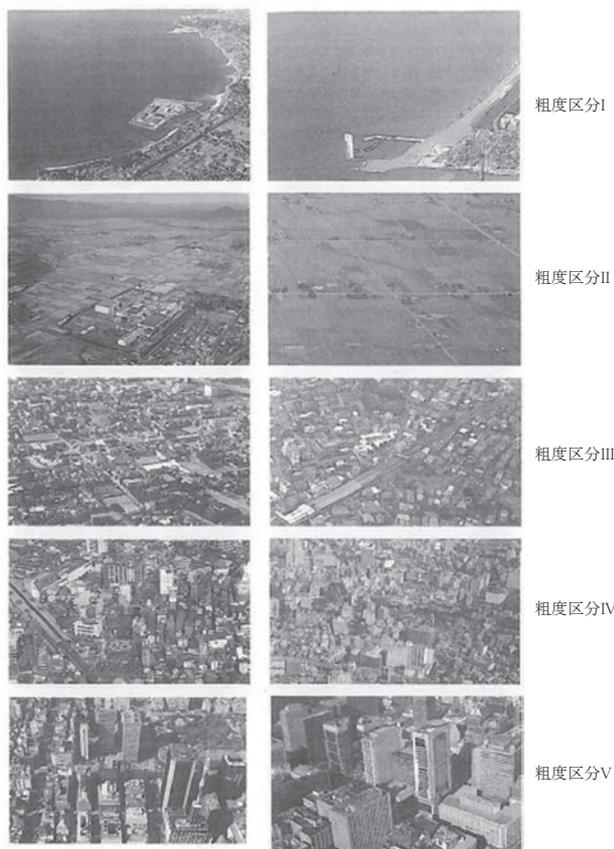


図7 粗度区分に対応する地表面の例^{7) 8)}

表1 粗度区分

	周辺地域の地表面の状況	代表例
I	障害物のほとんどない平坦地	海岸地帯
II	農作物程度の障害物がある地域及び樹木・低層建築物が散在している地域	田園地帯
III	樹木・低層建築物などが密集している地域及び中・高層建築物（4-9階建）が散在している地域	森林地帯 工場地帯 住宅地
IV	中・高層建築物（4-9階建）が広範囲に密集している地域	中・高層市街地
V	高層建築物（10階建以上）が密集する地域	高層市街地

4. おわりに

「総研詳細式に基づく風規制の取扱い」導入に伴い開発した転覆限界風速計算システムにおいて、いままでは地上構造物を当該箇所の画像や現地調査により人手を介して判定していたが、既存データベースを再整備し、かつ現行計算フローを見直すことにより、自動的に判定できるようにした。本開発により、地上構造物の判定の精度に差異がなくなり、車両に影響する空気力をより精密に算出できることが可能となった。さらに転覆限界風速をより正確に算出するため、新たに周辺粗度を考慮した風の駆け上がり高さを求める手法を開発した。今後は、転覆限界風速計算システムを深度化し、導入拡大のさらなる検討に活用していく計画である。

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.793,1972.2
- 2) 日比野有ほか: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, 2003.4
- 3) 栗原芳勝ほか: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), 2012.12
- 4) 種本勝二ほか:横風に対する車両の空気力学的特性風洞試験, 鉄道総研報告, Vol.13, No.12, pp.47-52, 1999.12
- 5) 種本勝二ほか:強風下での車両に働く空気力と低減対策に関する風洞試験, 鉄道総研報告, Vol.13, No.12, pp.47-52, 1999.12
- 6) 日比野有:風に対する車両の安全性, RRR, Vol.65, No.9, pp.2-7, 2008.9
- 7) 日本建築学会編:構造物荷重指針・同解説, pp.262-263, 1993.6
- 8) 日本建築学会編:構造物荷重指針・同解説, pp.347-349, 2004.10