

1508 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

○栗原 芳勝 (JR 東日本) 正 [機] 森山 淳 (JR 東日本)

正 [機] 土井 賢一 (JR 東日本) 堀岡 健司 (JR 東日本)

Safety Research Laboratory, East Japan Railway Company
Nissin-cho 2-479, Kita-ku, Saitama City, Saitama, 331-8513 Japan
Yoshikatsu KURIHARA, Atsushi MORIYAMA, Ken-ichi DOI, Kenji HORIOKA

In Order to secure running safety of trains in strong winds, JR East implements operation control such as speed control and operation suspension at prescribed wind speeds. Current operation control rules basically follow the operation control framework of the era before Japan National Railway (JNR) was privatized. Recent technical trends such as for faster speeds and more light weight vehicles have brought about renewed awareness of the importance of the operation control rules. In this Paper, the authors describe the new methods for train operation control based on the recent results of research and the development of calculating system to evaluate the critical wind speed of overturning for various types of vehicle.

Keywords : Disaster due to strong wind, Operation control, Critical wind speed of overturning,
Railway Technical Research Institute Detailed Equation

1. 緒言

2005年12月25日、羽越本線砂越駅～北余目駅間において、特急いなほ号が第2最上川橋梁を通過した直後に脱線・転覆した事故を受けて、強風時の運転規制について規制発令風速を下げるなどの処置を現在も継続している。しかしながら、この処置の合理性や妥当性について検討されることはなかったことから、科学的な根拠に基づく、安全かつ合理的な強風時の運転規制ルールが求められていた。

そこで、鉄道車両の横風に対する転覆限界風速を、車両に吹く風の向き及び盛土や橋梁といった軌道構造物の形状を考慮することで、よりの確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）¹⁾を用い、この総研詳細式を鉄道の強風時運転規制ルール策定に応用して、安全かつ合理的な運転規制ルールを一部線区（羽越線、京葉線）に導入した。

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計算を効率的にできる計算システムを開発したのでその結果を報告する。また、その計算結果を活用した風規制導入例と今後の展開について報告する。

2. 風規制の現状

JR 東日本の在来線における現行の強風時風規制ルールは、国鉄時代から踏襲されている規制ルールが大半の路線の風規制区間で運用されているが、2011年12月より一部線区に「総研詳細式に基づく風規制手法」（以下、新たな風規制ルールもしくは風規制ルール）を導入した。

2.1 国鉄時代から踏襲の強風時運転規制

国鉄時代から踏襲されている、在来線における強風時運転規制の要領は次の通りである。

(1) 風観測手法

・1基の風速計で観測された瞬間風速値を用いる

(2) 転覆限界風速

・国枝式²⁾により計算する

・転覆限界風速が30m/s以上であることを確認する
(3) 運転規制ルール

・一般規制もしくは早め規制とする (Table 1)

早め規制は経験的に強風が吹く一部の箇所に従前から適用されていたが、特急いなほ号の転覆脱線事故後、基本的に当社の全ての風規制区間に適用している。

2.2 総研詳細式に基づく風規制ルール

前述の全風規制区間への早め規制適用は暫定的なものであり、理論に基づいた安全かつ合理的な風規制ルールが求められた。このため、鉄道総研の協力を得て総研詳細式に基づく新たな風規制ルールを策定した。

一部線区に導入した新たな風規制ルールの要領は次の通りである。

(1) 風観測手法

・3基の風速計（5～10m間隔で設置）で観測された瞬間風速値の空間平均（風向角を考慮しない風速値のみのRMS値）を用いる

(2) 転覆限界風速

・総研詳細式（3章に詳述）により計算する

(3) 運転規制ルール

・一般規制もしくは早め規制とする (Table 1)

この風規制ルールは導入に先立ち、強風と輪重減少率の関係をフィールド試験により検証^{3),4),5)}して総研詳細式の妥当性を確認し、外部学識経験者などを交えた検討会、委員会の審議を経て導入している。

Table 1. 現行の運転規制ルール（規制風速）

規制風速	20m/s 以上	25m/s 以上	30m/s 以上
早め規制	25km/h 徐行	運転中止	
一般規制	—	25km/h 徐行	運転中止

3. 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。

3.1 総研詳細式と国枝式の違い

総研詳細式と国枝式の主な違いは以下の通りである。

- ① 空気力の車体形状、地上構造物形状、自然風の風向角、先頭車と中間車の違いに対する依存性を反映。
- ② 横風による空気力として、横力に加え、揚力、ローリングモーメントを考慮し、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ベクトルと自然風ベクトルの合成ベクトルが車両に作用すると仮定し、車両に対する相対風向角に応じた空気力係数を用いて車両に作用する空気力を評価する。
- ④ 車体左右振動加速度として車両・軌道条件に適合した数値を用いる。

上記の中でも特に①、③を考慮することにより、国枝式では考慮することのできなかった、車体形状、地上構造物形状、自然風の風向角、列車走行速度と車両に対する相対風向角などが転覆限界風速に及ぼす影響を定量的に評価することが可能となっている。

3.2 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、列車走行速度の影響、先頭車と中間車の違い）を考慮することができる。現地現物の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については、鉄道総研が提唱する代表的な5車種の車両形状（103系、285系、485系、24系、コキ50000系）と地上（線路）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 のり勾配1.5, 高さ8.72m）の組み合わせ（Fig 1 参照）による風洞試験結果^{6,7)}が参考になる。転覆限界風速を計算する車両の車体断面形状と最も似通っている上記5車種の中の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。もし、計算対象車種の車体形状が独特である、もしくはその車体形状が持つ空気力特性を正確に表わせる空気力係数を求めたい場合は当該車両の模型による風洞試験を実施して求めることとなる。

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
- ・ 許容する輪重減少率

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

- ・ 走行速度に対する転覆限界風速
- ・ 風速に対する走行可能速度
- ・ 曲線内方・外方別転覆限界風速

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。

4. 転覆限界風速計算システム

4.1 転覆限界風速計算システムの開発

総研詳細式に基づく風規制ルールの導入に先立ち、総研詳細式による転覆限界風速計算システムを開発した。

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ることや、

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み合わせ）を組合わせて計算する必要があるため、それらのデータベースとの連携が計算手続きを簡易にする鍵となる。

転覆限界風速計算システムは、これらの課題を解決するために以下データベースを備えるシステムとして開発した。

- ・ 車両諸元データベース
 - － 車両形式毎に一番軽い先頭車と中間車を登録
 - ・ 構造物諸元データベース
 - － 各路線の駅間毎に地上構造物の種類と代表地点（転覆限界風速が低く算出される箇所）を500mおきに手入力登録
 - － 地上構造物の種類は現地調査や図面確認等による査定により決定
 - ・ 空気力係数データベース
 - － 3.1の車体形状5車種、地上（線路）構造物7種類の計35種類の組み合わせそれぞれの空気力係数および個別の風洞試験によって得られた空気力係数を登録
 - ・ 車両運用区間データベース
 - － 各路線にどの車両形式が運用されているかを登録
 - ・ 線区の最高速度・制限速度データベース
 - － 社内規程で定められた線区および車種毎の最高速度、曲線等の制限速度、車両性能で区分される基本の速度などを登録
 - ・ 各路線の曲線諸元データベース
 - － 本システムとは別に管理、運用されている軌道諸元を一元管理するシステムから全線区全曲線の曲線半径、曲線長、カント量、緩和曲線長のデータベースを移植、登録している。なお、データは定期的に最新のものに更新し、工事等による曲線諸元の変更なども計算に反映できるようにしている
- 事前に登録するデータベースのデータ量はかなりの量となるが、一度登録してしまえば、車両の改造や設備の更新が無い限り、都度手入力する必要がなく、簡単に様々な条件下での計算ができるようになっている。
- また、転覆限界風速計算システムは社内ネットワーク上でサーバクライアント構成とし、本システムを利用する特定の担当者がサーバにアクセスして、常に同一のデータベース上で計算ができるようにしている。これによりデータベースのバージョンアップ作業を担当者の端末毎に実施するようなことが無く、信頼性のある安定した計算作業ができるようになっている。

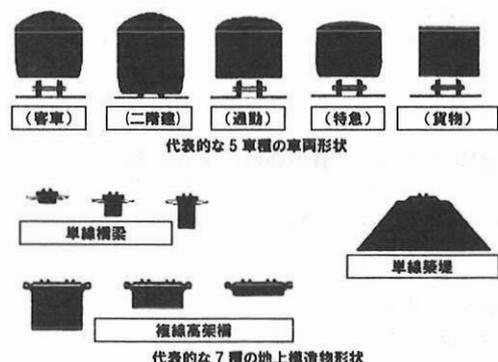


Fig 1. 5車種の車両形状と7種の地上構造物形状
参考文献 8)

4.2 転覆限界風速計算システムの機能

転覆限界風速計算システムは、次の機能を有している。

a) 簡易計算モード

一 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

b) 線路別解析モード

一 簡易計算モードに、許容輪重減少率、横振動加速度の条件、空気密度について任意に変更して計算

c) 車両解析モード

一 選択した車両形式の諸元パラメータを任意に変更して、走行速度、直線・曲線、地上構造物の種類、許容輪重減少率、横振動加速度の条件、空気密度を設定して転覆限界風速を計算

d) 車両形式比較モード

一 異なる車両形式を4種類まで選択し、走行速度、直線・曲線、地上構造物の種類、許容輪重減少率、横振動加速度の条件、空気密度を設定して転覆限界風速を計算

e) 構造物解析モード

一 選択した路線および区間の登録されている地上構造物データベースの設定を任意に変更して計算

f) その他の機能

一 データベースのパラメータ設定、ユーザ管理、アクセス権限管理

a), b)は主に総研詳細式に基づく風規制ルールを導入する際の具体的な計算をするためのモード、c), d)は車両の設計や改造における検討の際に使用するモード、e)は地上構造物の違いによる転覆限界風速への影響を検討するためのモードとなっている。

計算の内部処理は、内方転覆、外方転覆の別に、自然風の風向角を0~90°まで10°刻みとし、輪重減少率の設定値を超えるまで風速を10~60m/sまで0.01m/s刻みで繰り返し計算して転覆限界風速の最小値を求めている。

4.3 転覆限界風速計算システムの出力

転覆限界風速計算システムの計算結果出力例をFig 3に示す。Fig 3は簡易計算モードでの出力例を示している。計算対象の路線、駅間、キロ程、500m毎に区切った区間内の転覆限界風速が低く算出される代表地上構造物、直線もしくは曲線（曲線半径、カント量）、車両形式、その地点の最高もしくは制限速度などのパラメータ欄が左側にあり、右側の計算結果の欄には次の数値が表示される。

- ・ その地点の最高速度もしくは制限速度で走行した場合の転覆限界風速値
- ・ 風速 20m/s 時における走行可能速度の上限値
- ・ 風速 25m/s 時における走行可能速度の上限値
- ・ 風速 30m/s 時における走行可能速度の上限値
- ・ 転覆限界風速値もしくは走行可能速度の上限値が

通称線名	駅1	駅2	キロ程	キロ程	構造物	高さ	空気力係数	線形	半径	カント	車両型式	当該箇所の最高速度 [KM]	転覆限界風速最小値	耐力 20m/s	耐力 25m/s	耐力 30m/s	
●●本線	□□□	△△△	122000	122500	複橋梁	1	1.1	曲線	600	89	カ〇〇〇	曲線半径から決まる制限速度	90	22.01	外方	50	0
●●本線	□□□	△△△	122000	122500	複橋梁	1	1.1	曲線	600	89	カ〇〇〇	曲線半径から決まる制限速度	90	24.45	外方	88	0
●●本線	□□□	△△△	122000	122500	複橋梁	1	1.1	曲線	600	89	カ〇〇〇	曲線半径から決まる制限速度	90	23.84	外方	86	0
●●本線	□□□	△△△	122000	122500	複橋梁	1	1.1	曲線	600	89	カ〇〇〇	曲線半径から決まる制限速度	90	24.62	外方	89	0
●●本線	□□□	△△△	122000	122500	複橋梁	1	1.1	曲線	600	89	カ〇〇〇	曲線半径から決まる制限速度	90	25.4	外方		33
●●本線	□□□	△△△	122500	123000													
●●本線	□□□	△△△	123000	123500	低盛土		1.1	曲線	600	89	カ〇〇〇	曲線半径から決まる制限速度	90	26.36	外方		46
●●本線	□□□	△△△	123000	123500	低盛土		1.1	曲線	600	89	カ〇〇〇	曲線半径から決まる制限速度	90	31.48	外方		
●●本線	□□□	△△△	123000	123500	低盛土		1.1	曲線	600	89	カ〇〇〇	曲線半径から決まる制限速度	90	28.48	外方		86
●●本線	□□□	△△△	123000	123500	低盛土		1.1	曲線	600	89	カ〇〇〇	曲線半径から決まる制限速度	90	31.71	外方		

Fig 3. 出力結果（簡易計算モード）

「内方」転覆の場合のものか、「外方」転覆の場合のものかを「内方」、「外方」で表示

転覆限界風速値の表示欄には、計算結果の風速値によって色分けを自動的に行うようにし、規制風速と車両の転覆耐力の関係が容易に判別できるように配慮した。

これ以外にも、4.2 c), d), e)のモードのように任意のパラメータを変更したときの計算結果も出力される。

5. 転覆限界風速計算システムを活用した風規制

5.1 総研詳細式に基づく風規制ルールの導入手順

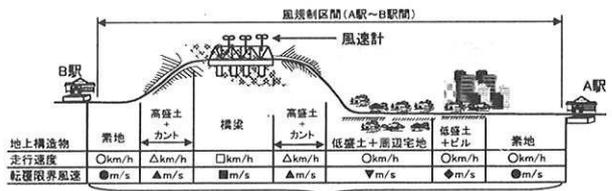
総研詳細式に基づく風規制ルールは下記の手順に則り、転覆限界風速を計算し、その結果を基に必要により5.2で後述する規制方法から適切なものを選択しながらルールを策定する。

- 現状の風規制区間において地上構造物種別を査定する。地上構造物は「素地」、「低盛土」、「高盛土」、「単線橋梁」、「複線橋梁」から選び、橋梁については桁の高さも確認する。
- 風規制区間のキロ程を500m毎に区切り、その500m内で転覆限界風速が最小値となる地上構造物および直線もしくは曲線の組み合わせを抽出し、システムのデータベースに登録する。
- 当該風規制区間の路線、駅間と運用する車両形式を選択して、システムで転覆限界風速を計算する。
- 計算結果により、早め規制、一般規制のいずれが妥当かを評価する。早め規制の規制風速を下回る転覆限界風速が算出された場合は、当該地上構造物区間に防風柵を設置する、走行可能速度から当該区間に常時速度制限を設定する、規制風速を早め規制より低くするなどの対策をする。

Fig 4に上記手順のイメージを示す。以上の手順により、当該風規制区間の規制ルールを設定することになる。

5.2 導入事例（羽越本線 小波渡駅～羽前大山駅間）

2011年12月より総研詳細式に基づく新たな風規制ルールを羽越本線の風規制区間（小波渡駅～羽前水沢駅間、羽前水沢駅～羽前大山駅間）に導入した。地上構造物の査定および転覆限界風速計算システムによる計算によって、導入前は両区間共に早め規制であったものを、沿線全てが平坦で周囲が水田となっている羽前水沢駅～羽前大山駅間は転覆限界風速が一般規制の規制風速値を上回



原則として規制区間において最も厳しい条件をもとに、運転規制ルールを策定する

Fig 4. 区間ごとの地上構造物査定と計算結果イメージ
参考文献 9)

ることが確認できたため、一般規制に変更した。小波渡駅～羽前水沢駅間は計算結果から早め規制のままが妥当とした。また、2.2 で述べたように、これらの2区間では風速計を1基から3基に増設し、風速値は3基が計測する瞬間値のRMS値をとることとした。地上構造物については計算結果から防風柵などの設置は不要とし、設置はしていない。

Fig 5は新たな風規制ルール導入後約4ヶ月間の羽前水沢～羽前大山間における風規制発生時間と導入しなかった場合の比較である。グラフから明らかなように、速度規制(徐行)、運転中止の発生時間が共に減少していることが分かる。

5.2 風規制ルール策定のための対策

5.1の導入事例は比較的導入がスムーズにいった例で、普通は車両形式毎に転覆限界風速にばらつきがでて、運用している車両形式全てに統一した風規制ルールを策定することは困難が伴う。そこで、この風規制ルールを導入拡大するために今後の課題として検討中の対策について述べる。

5.2.1 地上構造物の対策

転覆限界風速が小さくなる箇所は主として「高盛土」、「橋梁」となる。これらの箇所は防風柵の設置が最も効果的な対策となる。しかし、設置コストは膨大となるため輸送影響度、車両側の対策の可否、規制風速の変更などでの対応と勘案する必要がある。また、「高カント」の曲線も転覆限界風速が小さくなる。これに対しては曲線の制限速度を低減すると共に、カント量を低減するなどの対策方法がある。この対策は運転取扱いルールの変更を伴うため課題は多い。

5.2.2 規制発令風速の変更による対策

転覆限界風速計算システムでは様々な条件での走行速度と転覆限界風速の関係を求めることができるため、Fig 4下段にあるように規制発令風速を現行の20,25,30m/sにこだわらずに各地上構造物区間それぞれの転覆限界風速最小値を区間全体の規制発令風速とする方法がある。強風警報を発令するシステムの改修が必要となるが、地上構造物、車両共に既存のままでの対策となるためメリットは大きい。ただし、規制風速を低減した場合、規制発令機会が増加する懸念があることを考慮しなければならない。

5.2.3 速度規制による対策

Fig 3に示したように、転覆限界風速計算システムでは風速に対する走行可能速度が算出できる。規制風速を転覆限界風速が若干下回るような場合は、対策として当該区間を走行可能速度以下で常時速度制限とする方法がある。例としては、規制風速が20m/sのところ走行速度120km/hで転覆限界風速が17m/sであった場合、風速20m/sでは90km/hまで走行可能といったように規制しようとする風速に適合する運転速度を求めることができるため、当該区間を90km/hを下回る85km/hに常時速度制

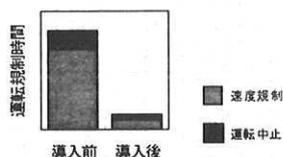


Fig 5. 羽越本線における新たな風規制導入前後の比較

限を設定するという方法である。

制限速度設定によりダイヤ上到達時間が伸び、輸送影響を生ずる恐れがあるようなケースでは採用し難い対策方法ではあるが、輸送影響が小さく、車両形式が限定できるような場合は有効な対策ともいえる。

5.2.3 車両の対策

転覆限界風速計算システムでは、車両形式ごとに細かく転覆限界風速を計算することができるため、転覆耐力の比較が容易である。従って、ある路線の運用車両形式の中で限られた車両形式だけが耐力が低いような場合は、その車両形式をその路線の運用から除外したり、もしくは車両諸元を見直して車体重量を増加したり、低重心化改造をすることで転覆耐力を向上して対策とすることもできる。この検討に計算システムは非常に役に立つようになっている。

6. まとめ

近年の研究成果や知見に基づいた、安全かつ合理的に車両の転覆限界風速を計算できる総研詳細式を用い、新たな風規制ルールを確立すると共に、ルールの策定に伴い生ずる膨大な計算を効率的かつ簡便に行うことのできる転覆限界風速計算システムを開発した。これにより、従来よりも精緻な評価が可能となり、一部線区に導入した結果、安全を担保しながら運転規制時間を減少させることができ、有効性を実証した。

今後の課題は、地上構造物配置が複雑、運用車両形式が多い、転覆耐力の低い車両があるといった困難な条件下の路線に、5.2に示した対策を組み合わせつつ、どのように安全に、効率的に、ルールを適用させていくかである。5.2のそれぞれの対策には一長一短があり、どれも容易に適用させることはできないが、風規制ルールの全体最適の観点から整理していくことが必要である。

この風規制ルールが導入拡大されるまで検討を継続していく計画である。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 森山淳;フィールドデータに基づく鉄道車両の転覆限界風速に関する検証(冬季日本海側路線での測定結果), 日本機械学会論文集C編, Vol. 77, No. 778, pp. 2389-2399, 2011
- 4) 森山淳;フィールドデータに基づく鉄道車両の転覆限界風速に関する検証(車体断面形状の影響), 日本機械学会論文集C編, Vol. 78, No. 791, pp. 2536-2548, 2012
- 5) 金元啓幸ほか;フィールドデータに基づく鉄道車両の転覆限界風速に関する検証(静止列車), 第17回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL 2010)講演論文集, pp. 289-292
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 日比野有ほか;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