

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

強風の発生確率を用いて 列車の安全性を評価する

強風災害から列車を守るために、耐力（＝車両が安全に走行できる風速）を超える外力（＝強風）が発生しやすい箇所を特定して強風対策設備の新設や運転規制が実施されますが、この際、これらの対策によって安全性がどの程度向上するかを確認する必要があります。また、新たに強風対策設備を施工する必要がある箇所が複数あるような場合に、施工の優先度を定めるためには現在の安全性を定量的に評価する必要があります。ここでは、運転規制に用いられている風速計データから求められる強風の発生確率を用いて、列車の安全性を評価する方法について紹介します。



福原 隆彰
Takaaki Fukuhara
防災技術研究部
気象防災研究室
副主任研究員
【専門分野】強風災害対策



荒木 啓司
Keiji Araki
防災技術研究部
気象防災研究室
主任研究員
【専門分野】強風災害対策



谷本 早紀
Saki Tanimoto
防災技術研究部
気象防災研究室
研究員
【専門分野】強風災害対策

はじめに

鉄道における強風対策としては、防風柵や防風壁などのハード面での対策や運転規制などのソフト面での対策があります。このうち、ソフト対策である運転規制（運転抑止・速度規制）は、多くの鉄道線区で、沿線に設置している運転規制用の風速計により測定された瞬間風速値があるしきい値（規制風速 U_s ）を超えた場合に発令されます。また、風が弱くなり、風速値が規制値未満となる状態が一定時間（以下、様子見時間 n とします）以上継続した場合に規制が解除されます（図1）。

風が強いある線区において防風柵などの設備を取り付けた場合、防風効果により車両に働く力が小さくなるため、車両が安全に走行できる風速の上限値（以下、上限値 A と表記します）が高くなります¹⁾。ここで、防風設備を取り付ける前と取り付けた後で同じ運転規制方法を継続する場合には、上限値 A が高くなることから安全性が向上することは明らかです。しかし、運転規制風速を高くする、すなわち、運転規制基準を緩和するときには、設備の取り付け前よりも安全性が低下しては強

風対策の効果がなくなってしまう。そのため、図2の例1に示すように、変更後の運転規制方法での安全性が変更前のそれと比較して同じかそれ以上となることを確認する必要があります。

また、この上限値 A は車両の走行速度によっても異なり、走行速度が小さくなると上限値 A は高くなることが知られています²⁾。しかし、その一方で走行速度が小さくなれば規制区間を走行する所要時間が増えるために、車両が規制区間で強風にさらされる可能性が高くなります。そこで、図2の例2に示すように、走行速度を小さくしたことで上限値 A が高くなる効果と、規制区間で強風にさらされる可能性が高くなる影響を評価し、速度を変えることで安全性がより向上するのか、または低下するのかを確認する必要があります。

これらを確認するために、強風に対する列車の安全性を定量的に評価する手法を検討しました³⁾。この手法は鉄道沿線などで観測された風向風速のデータから、①ある風速の発生頻度と②風速の時間変化量の発生頻度から、強風発生確率（後述）という指標を求

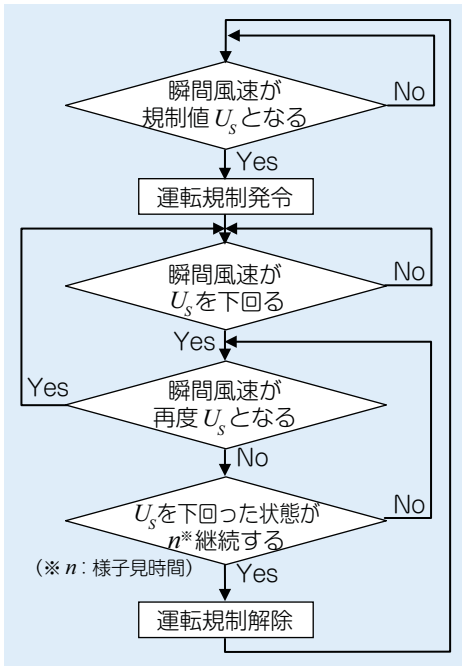


図1 運転規制の発令・解除フロー

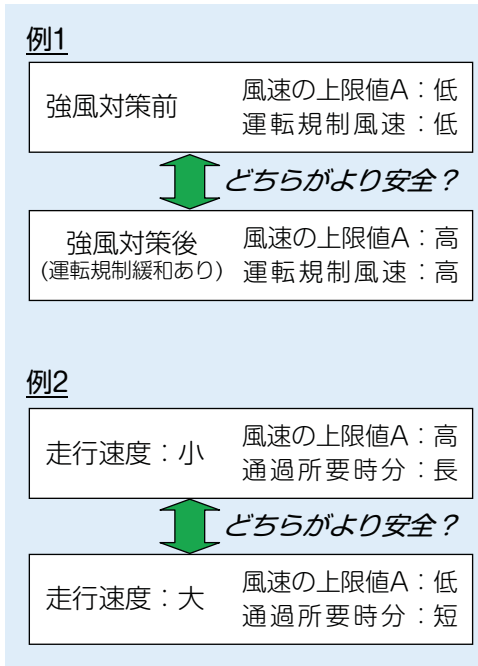


図2 確率を用いた評価の対象場面の例

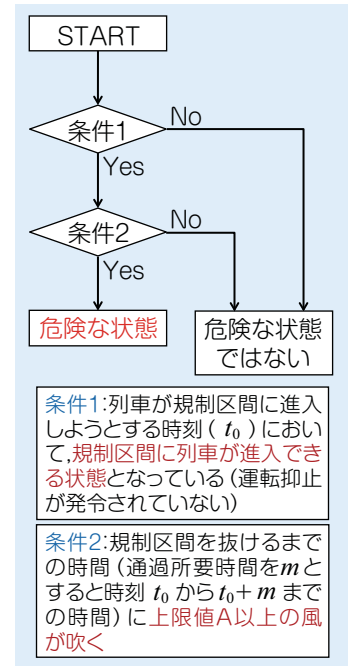


図3 判定フロー

めて評価するものです。

本稿では、この強風発生確率を用いて車両の安全性を定量的に評価する方法について述べるとともに、仮想線区を対象とした安全性の評価例を述べます。

強風発生確率の概要

今回、強風に対する安全性を評価するため、「列車が規制区間に進入することができる場合において、瞬間風速が上限値A以上となる」ことを「危険な状態」とし、この状態が起こる確率を強風発生確率（以下、確率 P_x と表します）として求めることとしました。

このとき、「危険な状態」となるには列車が規制区間に存在することができる場合、すなわち、運転抑止が発令されていない条件（条件1）と、規制区間に進入してから通過するまでの間に瞬間風速が上限値A以上となる条件（条件2）の2つをとともに満たす必要があります（図3）。

この条件1ですが、一般的な運転規制方法では、ひとたび運転規制が発令されると、その後瞬間風速が規制値を下回っていても、その時間が様子見時間 n 以上継続していなければ運転規制が解除されません（図1参照）。すなわ

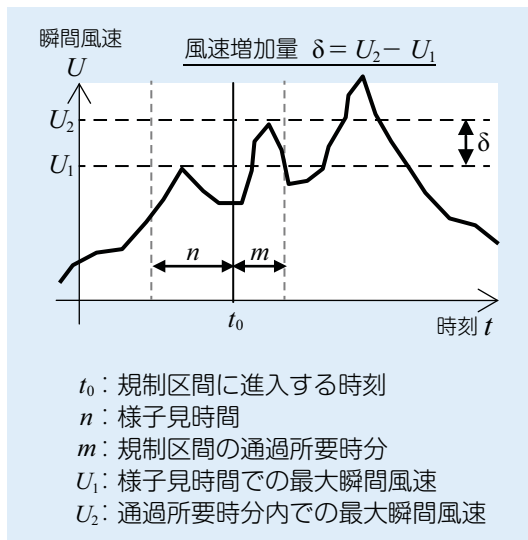


図4 風速の時系列と時間変化量 δ の考え方

ち、規制区間に進入しようとする時刻（ t_0 とします）に運転規制が発令されていないことは、時刻 t_0 より前の様子見時間 n すべてで規制値を下回っていることになります。したがって、図4で示すような風速の時間変化のときには、図4中の U_1 が規制値未満であることになります。つまり、条件1は「時刻 t_0 より前の様子見時間 n 内の最大瞬間風速 U_1 が規制風速未満である」といえることができます。

次に条件2ですが、これは列車が運転規制区間にいる時間での最大瞬間風速（図4中の U_2 ）が上限値A以上で

あることとなります。ただし、条件1がNoのときは除外します。また、危険な状態を回避するためには、列車が規制区間に進入する前に規制区間の風速値を見積もる必要があります。そこで、列車が規制区間に進入する前の様子見時間 n での最大瞬間風速 U_1 と進入してからの運転規制区間の通過所要時分（ m とします）間の最大瞬間風速 U_2 の時間変化量に着目しました。 U_2 と U_1 の差を δ とすると、 δ が $(A - U_1)$ 以上であれば U_2 が上限値A以上となります。したがって、条件2は「風速の時間変化量 δ が $A - U_1$ 以上で

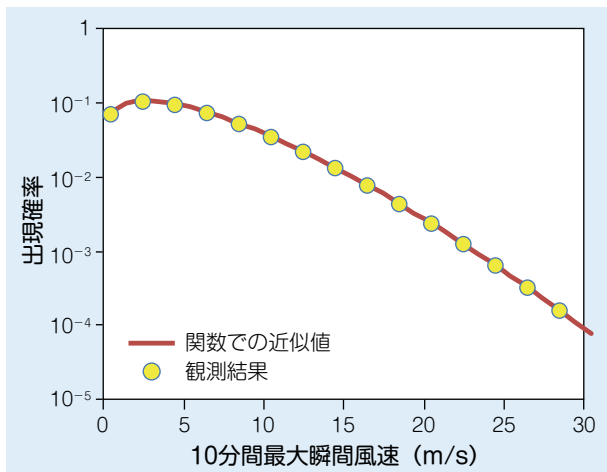


図5 最大瞬間風速の出現確率分布

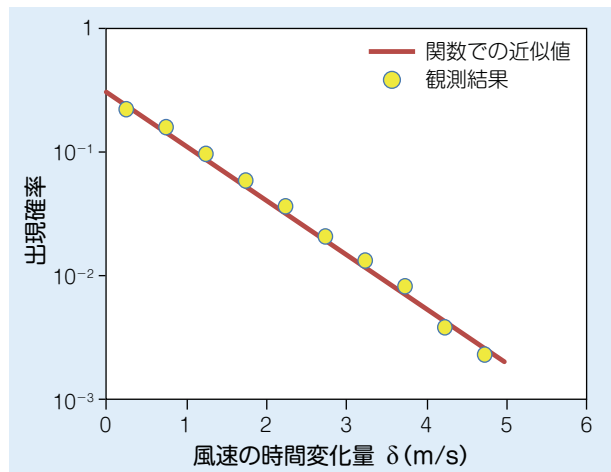


図6 風速の時間変化量の出現確率分布

ある」と言い換えることができます。

これより、条件1の最大瞬間風速と条件2の風速の時間変化量の分布を確率で評価できれば強風発生確率が求められることとなります。

全国各地で行われてきた風観測の結果を分析したところ、地域差はありますが条件1の最大瞬間風速の出現度数は概ね図5で示されるような分布に、また、条件2の風速の時間変化量の出現度数は概ね図6で示されるような分布でそれぞれ近似できることが分かりました。そこで、運転規制の様子見時間 n 、運転規制区間の通過所要時分 m を検討対象線区のものとして条件1および条件2の確率分布の推定式をそれぞれ作成し、それらを組み合わせて確率 P_x を計算します。

得られた確率 P_x により、ある規制区間で強風に対する列車の安全性を評価できるようになります。なお、この確率 P_x は危険な状態となる確率ですので、小さい方がより安全と評価されます。

次の節で安全性の評価例として2例、①規制風速や上限値Aが変わったときの例と、②規制区間を走行する速度が異なる場合の例を示します。ここでは、風の性質をあらわす条件1、2の確率の推定式を定める値は国内の強風地での風観測結果より得られたものを使用しました。

強風発生確率による評価例

上限値Aが変わる場合の評価例

防風設備の施工により上限値Aが変わる場合や運転規制方法が変更となる場合には、規制区間の通過所要時分が変わらない場合でも強風発生確率 P_x の値は異なります。ここでは評価例の一つとして表1に示したようなケースIを基準として、上限値Aおよび運転抑止風速を変えた計3種類の運転規制方法の安全性を比較したものを示します。ケースIは上限値Aを35m/s、運転抑止風速を25m/s、運転規制の様子見時間 n を15分間、規制区間の通過所要時分 m を4分間としました。ケースIIは上限値Aの値のみが33m/sと低くなった場合です。また、ケースIIIは防風柵などのハード対策をして運転規制を緩和することを想定したもので、上限値Aが40m/s、運転抑止風速が30m/sとそれぞれケースIより5m/s高くなった場合です。

本稿ではケースIと比べて安全性が向上するかどうかを示すため、ケースIに対する強風発生確率 P_x の比で示します。したがって、この値が1より小さければより安全であることを意味します。この結果を図7に示します。この図では、ケースIIでの値が1より大きくなっていますので安全性が低下することがわかります。逆に、ケー

スIIIでは値が1より小さくなっており、ケースIより安全であると言えます。したがって、この事例では車両が安全に走行できる風速の上限値が上がると、運転抑止の発令風速を同じだけ上げてもそれまでと同等以上の安全性が保たれることがわかります。

走行速度が異なる場合の評価例

前に述べたように、車両が安全に走行できる風速の上限値Aは走行速度が低いほど大きくなりますが、その一方で規制区間の通過所要時分は長くなるために、規制区間を抜けるまでの時間でより強い風が吹く可能性が大きくなります。そのため、ある規制区間の走行速度を変える場合、風速の上限値Aが変わる効果が大きいのか、強風にさらされる時間が変わることによる影響が大きいのかを評価することで、より安全となる走行速度を定めることが可能となります。

ここでは、表2に示すように、先の評価例でのケースIを基準として、走行速度を大きくした場合と小さくした場合の計3種類の運転規制方法における安全性の評価結果を示します。ケースIは走行速度が90km/hで、規制区間の通過所要時分は4分としました。ケースIVは上限値Aが33m/sと低くなるものの、走行速度を120km/hと高くして、規制区間の

表1 上限値Aを変えた場合の検討条件

	ケースI (基準)	ケースII	ケースIII
上限値A (m/s)	35	33	40
運転規制の様子見時間 n (分)	15	15	15
通過所要時分 m (分)	4	4	4
運転抑止風速 U_s (m/s)	25	25	30

表2 走行速度を変えた場合の検討条件

	ケースI (基準)	ケースIV	ケースV
列車の走行速度 V (km/h)	90	120	60
運転規制の様子見時間 n (分)	15	15	15
通過所要時分 m (分)	4	3	6
運転抑止風速 U_s (m/s)	25	25	25
上限値A (m/s)	35	33	37

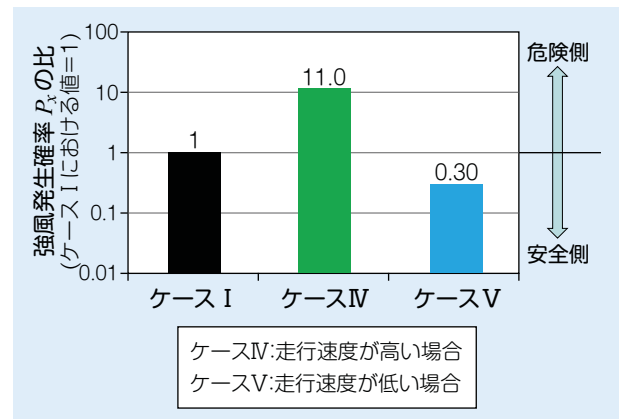
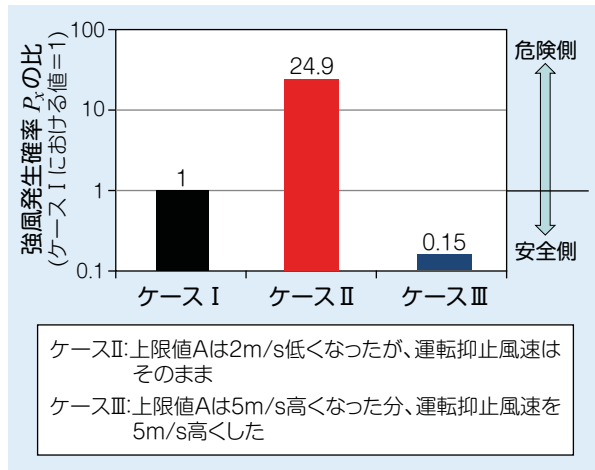


図7 上限値Aを変えた場合の評価結果

図8 走行速度を変えた場合の評価結果

通過所要時分 m を3分とした場合です。ケースVは上限値Aは37m/sと高くなるものの走行速度を60km/hと低くして、規制区間の通過所要時分 m を6分とした場合です。

この条件で求めた強風発生確率 P_x を先ほどの評価例と同様、ケースIの値を1としたときの値を図8に示します。この評価例を見ると、ケースVでの確率はケースIでの確率より小さくなっています。したがって、規制区内で強風にさらされる可能性のある時間がケースIのときより長くなるデメリットより、規制区間を走行する速度を落として車両が安全に走行できる風速の上限値Aを上げるメリットの方が大きく、走行速度を下げて走らせる方がより安全性が高くなるという結果になります。

おわりに

現在の一般的な運転規制方法に準じた場合の強風に対する車両の安全性を定量的に評価する方法を検討しました。

国内での風速の観測結果から風速の出現確率ならびに短時間での風速変化量の出現確率を求め、そこから運転規制に従った場合に風速がある上限値Aよりも大きくなる確率(強風発生確率)を求めました。車両が安全に走行できる風速値や運転規制方法が異なる場合、また、車両の走行速度が異なる場合について、この強風発生確率を用いて列車の安全性の違いを示すことで、より安全な強風対策を検討することができるようになります。

実際には鉄道沿線での風速は空間分布があり、同じ時刻でも少し離れた2地点では風速値は異なりますが、ここでは風速の空間分布は考慮せずに時間変動のみを考慮しています。さらに、規制区間を走行する車種を1種類としたほか、運転規制区間に同時に複数の列車が存在する場合は考慮していません。このように、いくつかの仮定をしたうえで強風発生確率を求めていますので、これらの仮定をより現実的なものにして強風に対する列車の安全性を

精度よく評価することが今後進めていくべき課題と考えています。さらに、他の気象災害と同一の指標で安全性を評価できるようにすることも今後の課題であり、研究を進めていく予定です。

RRR

文献

- 1) 種本勝二, 日比野有: 車両が横風から受ける力を測る, RRR, Vol.68, No.8, pp.22-25, 2011
- 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) 今井俊昭 他: 規制区間で転覆限界風速を超える強風が発生する確率の評価方法, 鉄道総研報告, Vol.26, No.9, pp.47-52, 2012