

# 風に対する車両の安全性

日比野 有

車両構造技術研究部(車両運動 主任研究員)



ひびの ゆう

## はじめに

2005年12月25日に、羽越線砂越駅～北余目駅間で列車が突風にあおられて転覆し、5名の方が亡くられるという痛ましい事故が発生しました。また、2006年9月17日には、日豊線南延岡駅構内で、同じように竜巻による突風にあおられて列車が転覆しました。

風が原因と考えられる列車の脱線・転覆事故は、数こそ多くはありませんが、それでも平均すると数年に1回程度の割合で発生しています。さらに、近年の鉄道車両の高速化・軽量化の傾向や、地球温暖化による異常気象の増加の可能性など、鉄道車両が横風にさらされる環境は、今後ますます厳しくなっていくことが考えられます。

強風時の鉄道車両の走行安全性を考えるときには、「車両は風速何m/sの風まで耐えることができるのか」ということをできるだけ正確に知る必要があります。この風速を転覆限界風速といいます。本稿では、転覆限界風速の考え方について、その概要を説明するとともに、最近の研究から得られた知見を紹介します。また、横風対策として有効な手段について、具体例を挙げながら紹介します。

## 転覆限界風速の考え方

### 転覆限界風速の定義

車両に横風が作用すると、風上側の輪重(車輪がレールを垂直方向に押す力)が減少します。風速が増すと風上側の輪重はさらに減少し、ある風速に達したとき風上側の輪重がゼロになります。この、風上側の輪重がゼロとなるときの風速を「転覆限界風速」と定義します。転覆限界風速を超える横風が車両に作用し続けると、風上側の車輪がレールから浮き上がり、車両は転覆します。

### 国枝の式

鉄道車両の転覆に関する理論解析式は、1972年に国鉄(当時)の技術研究所の国枝正春氏によって提案されたものが基本とされ、「国枝の式」あるいは「国枝式」と呼ばれ

ています<sup>1)</sup>。これは、車両に働く外力による車輪/レール接触点周りのモーメントのつり合いから転覆の危険率を求めるもので、基本的には剛体の転倒問題(図1)と同じように考えます。図1では、質量 $m$ の剛体に横方向の外力 $F$ が作用しているとき、右側の足と地面との接触点まわりのモーメントのつり合いは、次式で表されます。

$$2bP_L + Fh - mgb = 0 \dots\dots\dots (1)$$

左側の足が地面を押す力 $P_L$ がゼロになるときが先ほど定義した転覆限界に相当し、このときの外力 $F$ は式(1)から $F = mgb/h$ と求められます。

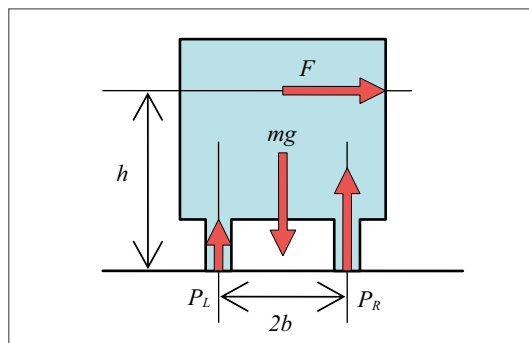


図1 剛体の転倒

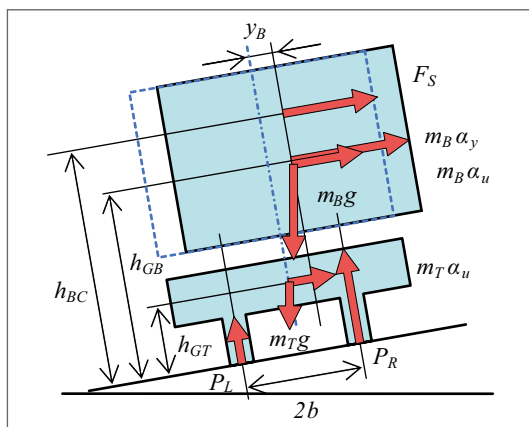


図2 計算モデル(国枝の式)

鉄道車両の転覆問題もこれと同様に考えることができます。文献 1) では、図 2 に示す半車体断面モデルを用い、カントによる傾斜角が十分に小さいと仮定して、風下側の車輪／レール接触点まわりのモーメントのつり合いの式を次のように導きました。

$$2bP_L + F_S h_{BC} + (m_B \alpha_y + m_B \alpha_u) h_{GB} + m_T \alpha_u h_{GT} - m_B g (b - y_B) - m_T g b = 0 \dots\dots\dots (2)$$

式 (2) において、剛体の転倒問題と異なるところは次の 2 点です。

- ① 車両に作用する外力として、横風による空気力  $F_S$ 、曲線通過時の超過遠心力  $m_B \alpha_u$  および  $m_T \alpha_u$ 、車体の左右振動慣性力  $m_B \alpha_y$  を考慮する。
- ② 台車のばねがたわむことによる車体重心の左右変位  $y_B$  を考慮する。

式 (2) を輪重減少率について整理し直すと、式 (3) を得ます。ここで、輪重減少率とは、静止輪重  $P_0$  (平地に静止している時の輪重の左右の平均値) からの減少量を静止輪重で割った値のことであり、式 (4) で定義されます。輪重減少率  $D = 1.0$  が転覆限界に相当します。

$$D = \frac{h_G^* \cdot \frac{\alpha_u}{g} + \frac{h_G^*}{b} \left(1 - \frac{m_T}{m_B + m_T} \cdot \frac{h_{GT}}{h_G^*}\right) \cdot \frac{\alpha_y}{g}}{\frac{h_{BC}^*}{b} \cdot \frac{F_S}{(m_B + m_T)g}} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、

$$D = (P_0 - P_L) / P_0, \quad P_0 = (m_B + m_T)g / 2 \dots\dots\dots (4)$$

式 (3) が、いわゆる「国枝の式」です。式 (3) 右辺の第 1 項は超過遠心力の影響を表し、第 2 項は左右振動慣性力の影響を表し、第 3 項は横風による空気力の影響を表しています。この式は、鉄道車両に作用する外力と輪重減少率との関係を表す式であり、このまま  $D$  について解けば曲線通過時の輪重減少率を求めることができ、また、 $D = 1$  として空気力  $F_S$  に含まれる風速  $u$  (後述) について解けば、転覆限界風速を求めることができます。さて、式 (3) では、 $h_G^*$  や  $h_{BC}^*$  といった式 (2) では見られなかった記号が使われています。これらは、台車のばね系の影響を考慮した場合の車両重心  $h_G$  および風圧中心  $h_{BC}$  の有効高さを表します。外力を受けた車両は、台車のばねがたわむことにより、車体重心が外力の向きに変位します。この変位の影響を、車両重心および風圧中心の高さが高くなることと等価であるとみなしたものが、これらの有効高さです。有効高さの具体的な式の形や導出の過程については、紙面の都合上ここでは省略しますが、詳しくは文献 1) や、後で述べる文献 2) を参考にして下さい。

国枝の式は、車両や軌道的设计などに活用されることが多いのですが、実際に使われる際には、しばしば次の仮定が置かれます。

- ① 有効高さ ( $h_G^*$ ,  $h_{BC}^*$ ) は、それぞれ  $h_G$  および  $h_{BC}$  の 25% 増しとする ( $h_G^* = 1.25 h_G$ ,  $h_{BC}^* = 1.25 h_{BC}$ )。
- ② 空気力係数  $C_S$  は 1.0 とし、風圧中心高さ  $h_{BC}$  は車体中心高さと同一であるとする。
- ③ 左右振動加速度  $\alpha_y$  は、走行速度 80 km/h までは走行速度に比例して  $0.98 \text{ m/s}^2$  まで増加し、80 km/h 以上では  $0.98 \text{ m/s}^2$  とする。

ここで、空気力係数とは風速と空気力との関係を表す係数で、空気力  $F_S$  は  $F_S = 1/2 \cdot C_S \rho u^2 S$  で表すことができます (ただし、 $\rho$ : 空気密度,  $u$ : 風速,  $S$ : 半車体側面積)。

①~③の仮定は、当時の現車走行試験や風洞試験などから得られた結果をもとに、若干厳し目 (すなわち安全側) になるように決めたものです。これらの仮定を置くことにより、式 (3) を容易に解くことができるようになり、簡易かつ実用的な理論式として広く使われるに至りました。現在でも「国枝の式」と言えば上記の仮定を前提としている場合がほとんどです。

### 空気力の考え方

横風による転覆を考えると、式 (3) の中で輪重減少率に対する寄与度が最も大きい項は空気力の項です。前述したように空気力は空気力係数に比例するので、空気力係数を精度良く求めることが空気力および転覆限界風速を推定する上で重要なポイントとなります。一般的に、空気力として車体中心の  $x$ ,  $y$ ,  $z$  軸方向の分力と各軸まわりのモーメントが考えられるのですが、転覆に影響を及ぼす成分としては、車両を横方向に押す横力、上に持ち上げる揚力、および車両の前後軸まわりのローリングモーメントが考えられます (図 3)。

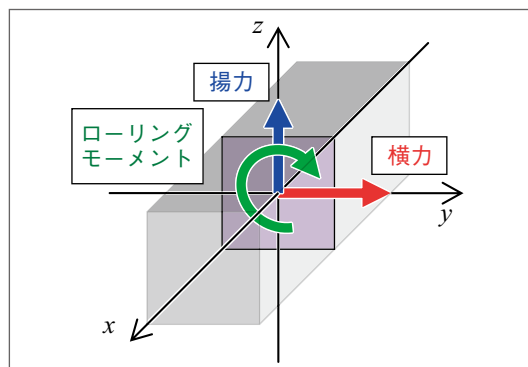


図 3 車両に作用する空気力

各空気力およびモーメントは風速の2乗に比例する形で表すことができ、比例係数を、それぞれ横力係数、揚力係数、ローリングモーメント係数と呼び、総称して空気力係数と呼んでいます。

空気力の考え方(計算上の与え方)は、横風による脱線・転覆事故の歴史と共に変遷してきました。国枝の式では、風が車体側面に対して直角に吹き付けている状態を想定し、横力のみを考慮していました。また、空気力係数(横力係数)については、一部の検証計算においてのみ風洞試験結果から得られた0.92という値を用いていますが、それ以外では前述の通り1.0を仮定していました。

ところが、1986年12月に発生した、山陰本線余部橋りょうにおける列車脱線事故の原因調査において、車両に働く空気力は、車両形状のみならず地上構造物の形状にも依存することが明らかになりました。つまり、同じ車両でも、橋りょう上を走行する場合と盛土上を走行する場合とでは、受ける空気力が異なるのです。また、横力係数の最大値も、地上構造物との組み合わせによっては、これまで仮定して

いた1.0よりも大きくなる場合があることが明らかになりました。

さらに、1994年2月に発生した、根室本線における特急おおぞら号脱線事故、および同じ日に発生した、三陸鉄道南リアス線における列車脱線事故の原因調査において、空気力係数は車両に対する風向角(車両に対する風の角度)によって異なり、その風向角特性が先頭車と中間車とでは異なることが明らかになりました。具体的には、先頭車にななめ前方から風があたるときに横力係数が最も大きくなる場合があることが明らかになりました。

これらの知見を受け、鉄道総研では5種類の車体形状と7種類の地上構造物形状(図4)を組み合わせた風洞試験を風向角を変えながら行い、空気力係数を詳細に調べました。これらの風洞試験結果から、転覆に最も大きな影響を及ぼす横力係数は、車体については屋根が角張っているほど、地上構造物については高架橋または橋りょうの桁の厚みが大きいほど、大きくなる傾向があることなどが明らかになりました。

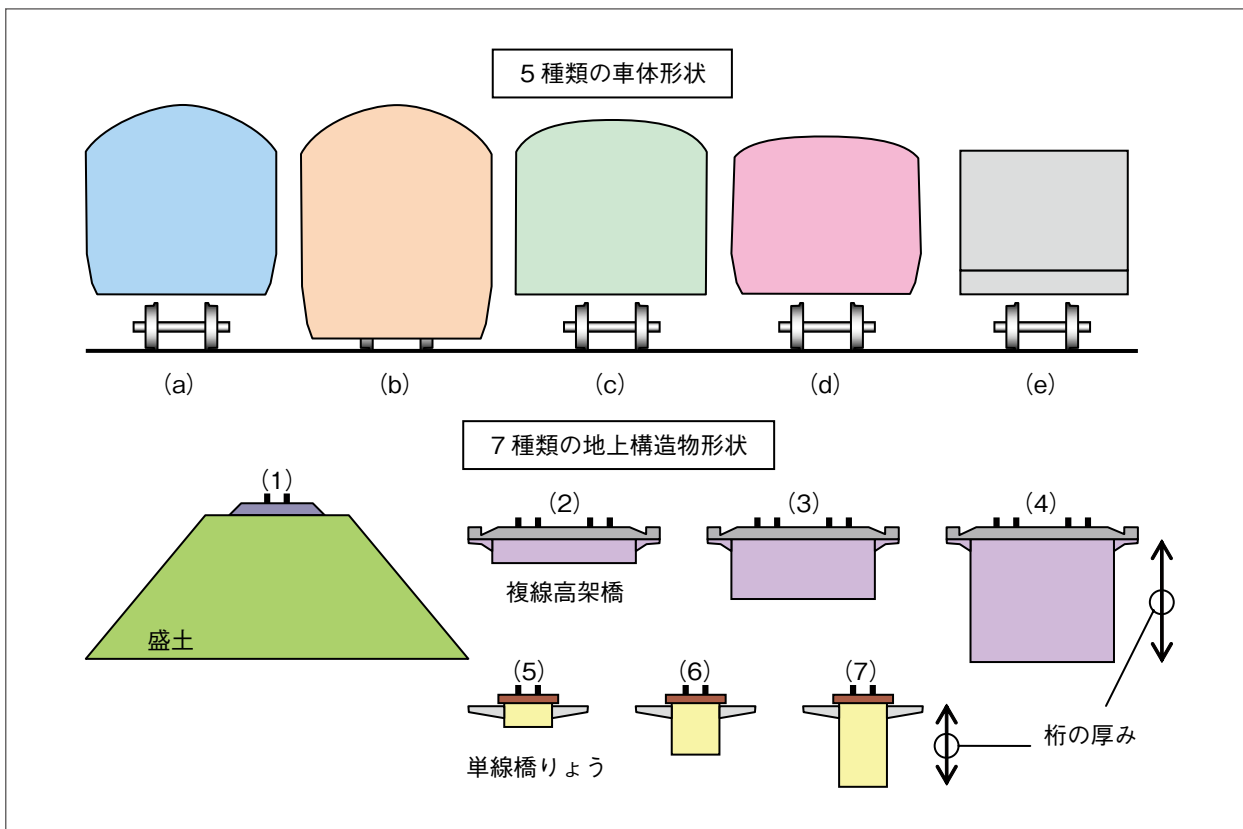


図4 風洞試験用模型(模型断面の概念図)

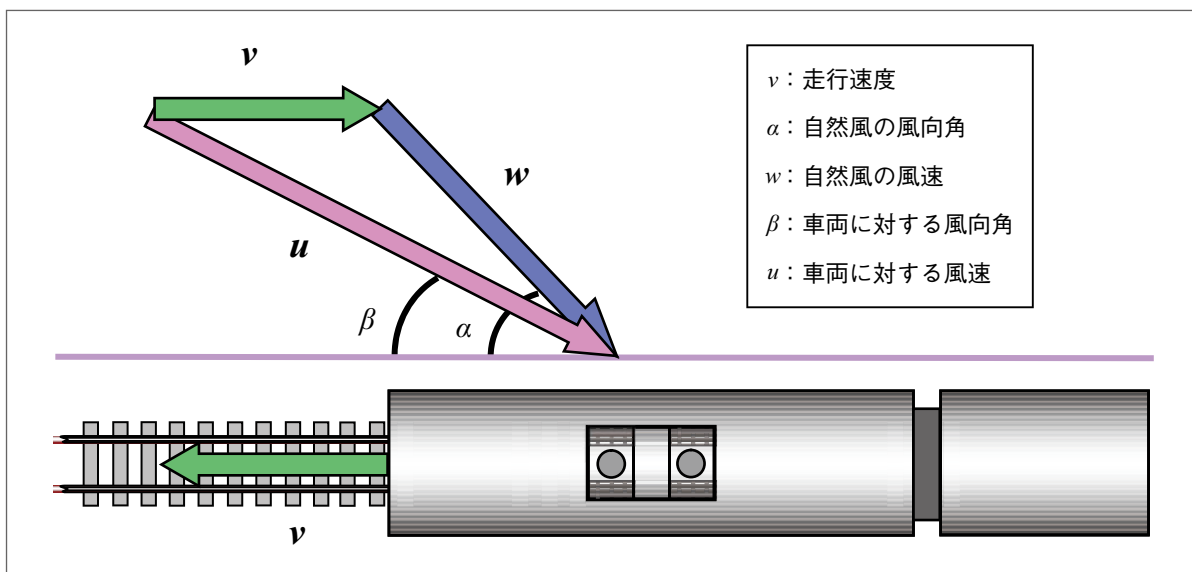


図5 走行中の車両に作用する風

### 転覆限界風速を求める詳細計算式

以上のように空気力係数の推定精度を高めることと併行して、転覆限界風速の計算式そのものについても、検討・修正を行ってきました。現在、鉄道総研が転覆限界風速を評価する際に用いている式は、2003年に日比野・石田によって提案された計算式<sup>2)</sup>で、通称「詳細計算式」と呼ばれています。この計算式も国枝の式と同様に、風下側の車輪／レール接触点まわりのモーメントの静的なつり合いから輪重減少率を求めるのですが、以下の点が詳細に考慮されています。

- ①車体重心の変位量を、車両のばね系のポテンシャルエネルギーのつり合いから求める。その際、車体重心の左右変位とロール変位を考慮する。
- ②ポテンシャルエネルギーのつり合いは、台車の構造に応じたばね系モデルにより解析する。また、台車のストップ当たりの有無を判別しながら計算を進めていく。
- ③空気力として、横力、揚力、ローリングモーメントを考慮する。これらの空気力係数については、風洞試験結果を用いる。また、風圧中心高さも風洞試験結果から求める。
- ④空気力の風向角依存性を考慮する。すなわち、車両に作用する風の風向角・風速が、車両の走行速度に応じて自然風の風向角・風速と異なる影響を考慮し、前者の風向角・風速に対応した空気力を用いて計算する(図5)。
- ⑤車体左右振動加速度については、実測値を用いるか、または、車両の走行速度に比例し、運転最高速度で  $0.98\text{m/s}^2$  となるような1次式を仮定する。

詳細計算式では以上の①～⑤を考慮して計算を行うため、これ以前の計算式では検討することができなかった、車体形状の影響、台車構造の影響、車両諸元の影響、走行速度の影響、空気力の風向角依存性の影響などを検討することができるようになりました。次章では、詳細計算式を用いることにより得られた知見から、横風対策として有効な手段について考えます。

### 横風対策の考え方

横風による車両の脱線・転覆事故を防ぐためには、大きく分けて二つの方法が考えられます。一つは、車両を倒れにくくする方法(車両の転覆耐力を向上させる方法)、もう一つは、車両が受ける空気力を減らす方法です。ここでは、これらの対策方法とその効果(転覆限界風速の増減)について、詳細計算式による計算例も交えながら紹介します。ただし、以下の計算例では、注目した項目が転覆限界風速に及ぼす影響を調べることを目的としており、それ以外の計算条件はすべて同一であると仮定しています。従って、現実の車両条件・走行条件にあてはめて考える場合には、計算結果が異なる可能性があることをご承知おきください。

#### 車両の転覆耐力を向上させる方法

##### ①車両重量

容易に想像できることですが、車両重量が重い方が転覆しにくくなります。例えば、車両重量以外の条件は同じであると仮定して、車両重量が10トン重くなると、転覆限

界風速は約3～7m/s程度高くなる場合があります。

### ②車体重心高さ

車体重心高さは低いほど転覆に対して有利になります。例えば、車体重心高さだけを0.5m低くすると、転覆限界風速は約1～2m/s程度高くなる場合があります(図6)。曲線区間を高速で走行するときには車体重心高さの影響がもう少し大きくなり、転覆限界風速が約3m/s程度高くなる場合があります。ただし、このことは逆に、曲線通過速度の向上を考えるときには、直線区間以上に転覆限界風速の低下を心配する必要があるということになります。

### ③その他の車両諸元

その他の車両諸元についても同様に試算を行ったのですが、いずれも転覆限界風速に及ぼす影響はさらに小さいことが分かりました。例えば、ばね定数は大きい方が(ばねがかたい方が)、ストップ遊間は狭い方が、枕ばねの左右間隔は広い方が、それぞれ転覆に対して有利になるのですが、通常的设计値の範囲内程度で検討すると、転覆限界風速の違いはほとんど無いことが分かりました。従って、上記①、②を併せて考えても、例えば転覆限界風速を10m/s向上させようとしたとき、車両側の対策(諸元の変更)だけでは限界があることがわかります。

## 車両が受ける空気力を減らす方法

### ①車体形状

5種類の車体形状を用いた風洞試験の結果、車体断面の形状(特に屋根の丸み)が空気力係数に大きな影響を及ぼすことが明らかになりました。例えば、通勤電車のように車体の断面形状が比較的角張った車両よりも、寝台客車のように屋根が丸い車両の方が、横力係数は小さくなります。車体形状以外の条件は同じであると仮定して、形状のみを通勤車両形状(図4(c))から寝台客車形状(図4(a))に変えると、転覆限界風速は約5～10m/s程度高くなる場合があります。

### ②防風柵

車両が受ける空気力を減らす方法として、防風柵(または防風壁)を設置して車両に作用する風そのものを弱めることは、最も効果的な方法です(図8)。例として、充実率60%、高さ2m(レールレベルからの高さ)の防風柵を設置した場合の転覆限界風速の向上効果を比較すると、単線橋りょう上では約10m/s程度高くなる場合があります、複線盛土上では約20m/s程度高くなる場合があります(図7)。ここで、充実率とは、柵の面積に対する遮風材の占める面積の割合のことで、防風壁は充実率100%に相当します。

防風柵の効果は主に充実率と高さで決まり、特殊な場合を除いて、充実率60%、高さ2m程度以上であれば、十分な防風効果を期待することができます。ただし、同じ仕様の防風柵でも、地上構造物(盛土、橋りょうなど)や設置場所(線路からの離れなど)によって防風効果が変わるので、具体的な転覆限界風速の向上幅を検討するためには、やはり風洞試験を行って空気力を測定する必要があります。

### ③走行速度

走行速度を低下させる(徐行を行う)と、車両が受ける空気力が走行速度の低下分だけ小さくなるとともに、左右振動慣性力も小さくなるため、転覆限界風速が高くなる傾向が見られます(図6、図7)。特に、先頭車の場合あるいは曲線区間における外方転覆(曲線内側から外側に向かって吹く風による転覆)の場合に、走行速度の影響が顕著に表れます。例えば、図6の例のように、走行速度を100km/hから40km/hに低下させると、転覆限界風速は

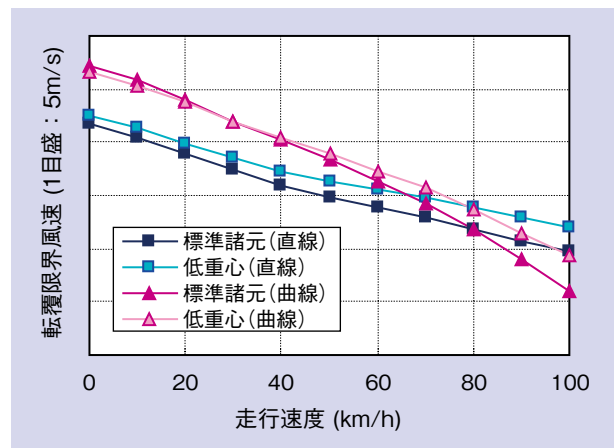


図6 転覆限界風速の計算例(重心高さの影響)

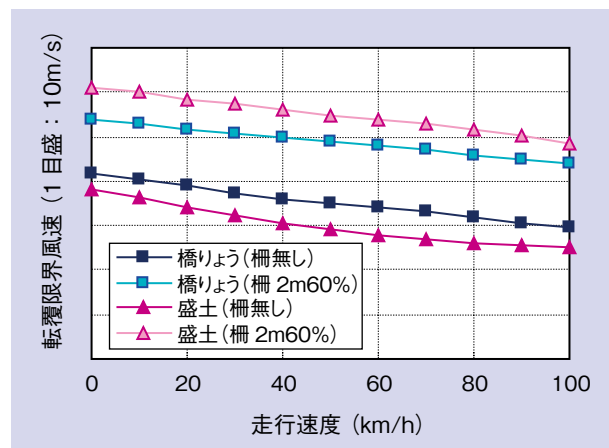


図7 転覆限界風速の計算例(防風柵の効果)

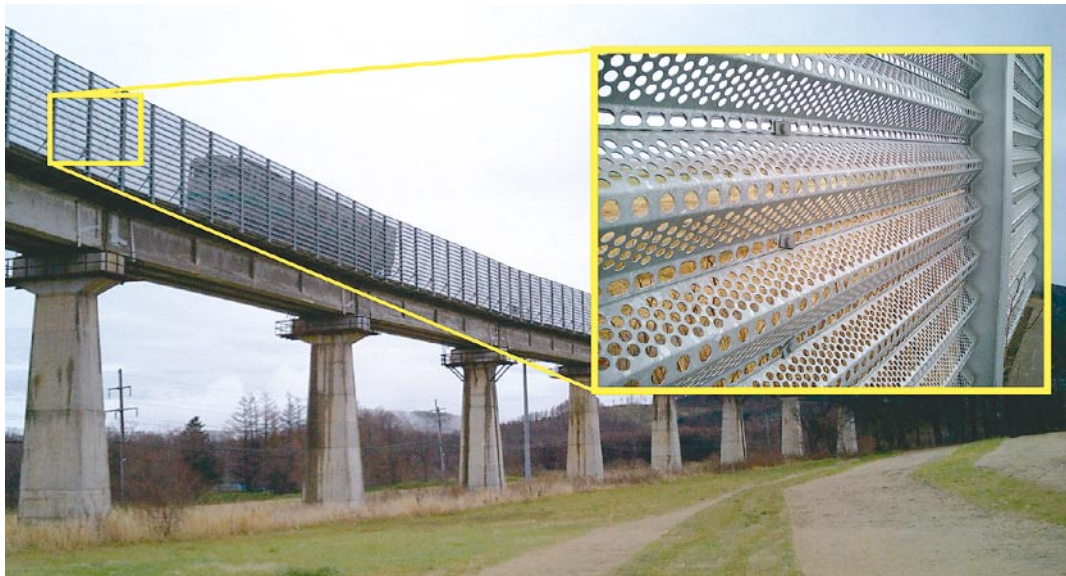


図8 防風柵の施工例

直線区間で約5m/s程度，曲線区間で約10～15m/s程度高くなる場合があります。

#### 運転規制(徐行の効果)

風に対する究極の(?)安全対策は「風が吹いたら走らせないこと」ですが，それでは公共交通機関としての使命を果たせません。そこで，運転規制のルールを工夫することにより「安全性は確保しつつ，できるだけ列車を走らせる」ことを考えます。一般的に運転規制により列車を徐行あるいは停止させれば安全性は向上するのですが，ただ規制値を下げる(厳しくする)だけでは，列車の遅延や遅れといった輸送障害が頻発することになります。そこで，先ほど述べた徐行を行うことによる転覆限界風速の向上効果を，運転規制ルールに適切に反映させると，徐行無しの規制ルールよりも安全かつ効率的なものとする事ができる場合があります。例えば，規制ルール1:「徐行無し，風速25m/sで抑止」と，規制ルール2:「風速21m/sで徐行40km/h，風速28m/sで抑止」を比較すると，「規制ルール2の安全性は，規制ルール1と同等またはそれ以上である」という結果が，ある試算では得られました(注意:ここで紹介した安全性の比較は，ある条件の下での試算結果の一例です。この規制風速，規制ルールおよびその安全性が，すべての線区でそのまま適用できるわけではありませんので，ご注意ください)。

一方で，「徐行すると強風区間を走り抜けるのに必要な時間が長くなるので，強風にさらされる確率が高くなり，より危険なのでは?」といった疑問が聞かれることがあり

ます。この点については，単に転覆限界風速の向上効果だけではなく，その地域の強風特性(風の立ち上がり特性や転覆限界風速を超える風が吹く確率)あるいは強風区間(規制区間)など，さまざまな要素を考慮した上で，総合的に判断しなければなりません。その上で，規制ルールに徐行を取り入れた方が安全性が高まる場合もある，ということで上記の例を紹介しました。

#### おわりに

転覆限界の考え方や横風対策について，それらの概要を紹介しました。横風対策の章からも分かるように，車両だけで対策を考えようとしても，さまざまな制約や限界があり，効率的な対策をとることはできません。従って，風に対する車両の安全性を検討する際には，車両の転覆限界風速だけで議論するのではなく，ハード対策(防風柵など)，ソフト対策(運転規制ルールなど)，強風特性の把握，風観測方法など，多岐にわたる項目について総合的に検討しなければなりません。鉄道総研では，車両，空力，気象の各分野の研究者が連携を取りながら，この横風問題に取り組んでいます。RRR

#### 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) 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