

強風時の車両に対する高欄等による遮風効果

乙部 達志* 鈴木 実* 野口 雄平*

Wind Protection Effect by the Wall for a Vehicle with Strong Wind

Tatsushi OTOBE Minoru SUZUKI Yuhei NOGUCHI

Parapets, noise barriers and through girders which have a solidity ratio of 100% are not built for the wind protection. Hereafter, parapets, noise barriers and through girders are referred to as the wall. However, a wind protection effect can be expected as long as the height of the wall and the distance between the wall and the vehicle meet certain criteria. Then, in order to confirm the wind protection effect, a wind tunnel tests were carried out. As a result, the conditions under which the wall has the wind protection effect equivalent to the windbreak fence (60% solidity) were clarified. In this paper, we report these conditions.

キーワード：鉄道車両，横風，風洞実験，防風柵，高欄

1. はじめに

強風に対する主な安全対策には、一般的に防風柵によるハード面からの対策や運転規制によるソフト面からの対策が考えられる。予め強風が吹きやすい区間であることが分かっている場合には、防風柵による対策が効果的であるが、防風柵の設置には大きな投資が必要となる。一方、防風柵ではないものの一定の条件を満たせば防風柵と同程度の遮風効果が得られると期待されるものも鉄道沿線にはある。そのようなものとして、充実率（面積に対する部材の占める割合）が100%の高欄、防音壁、下路桁（以下、高欄等と呼ぶ）がある。一般的に防風柵の充実率は60%程度である。本報告では、防風柵と高欄等をまとめて遮風壁と呼ぶ。

そこで、本報告では構造物（高架橋、橋りょう、幅広盛土）上の車両に対して、遮風壁の高さ及び隔離（遮風壁と車両中心の距離）をパラメータとした風洞試験を実施することにより車両に働く空気力を把握する。例えば「防風設備の手引き¹⁾」で例示された条件である防風柵高さレールレベル（以下、R.L.と書く）2.0m、充実率60%、隔離3.0m（本報告では、この仕様条件を「防風柵基本条件」と呼ぶ）に対して、遮風効果がどの程度得られるかを評価した。

2. 風洞試験方法

2.1 風洞設備

風洞試験は、鉄道総研所有の大型低騒音風洞密閉型測定部で実施した。測定部の大きさは幅5m、高さ3m、

* 環境工学研究部 車両空力特性研究室

長さ20mで、測定部上流端より16.8m下流の床面にターンテーブル（中心）が設置されている。このターンテーブル上に模型を設置し、空気力を測定する。また、自然風を模擬するために、ターンテーブルの上流側にバリア、スパイア、ラフネスブロックを設置し、乱流境界層を生成する²⁾。座標系は、密閉型測定部上流端の床面の幅方向中心を原点とし、主流方向をX、幅方向をY、鉛直上方向をZとする右手系の直交座標系である。密閉型測定部を図1、風洞試験状況を図2に示す。また、風洞風速を制御するピトー管をX=11.800m、Y=1.504m、Z=1.800mの位置に設置し、このピトー管による風速指示値を試験風速 U_0 と呼ぶ。試験風速は20m/s、25m/s、30m/sで実施した。

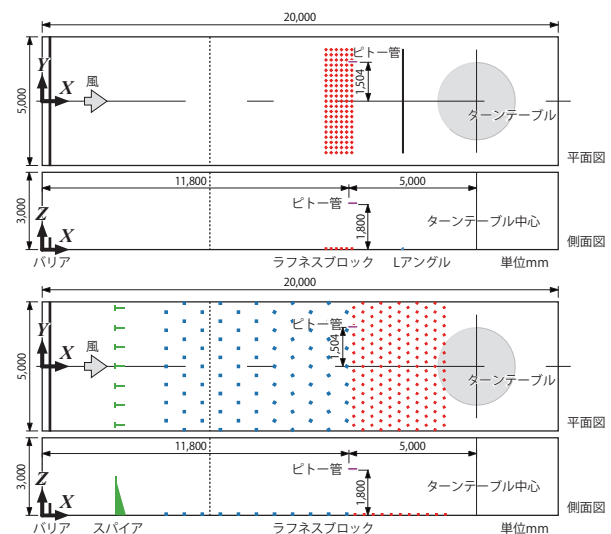


図1 密閉型測定部内の乱流境界層生成装置の配置 (べき指数 0.14 (上), 0.26 (下))

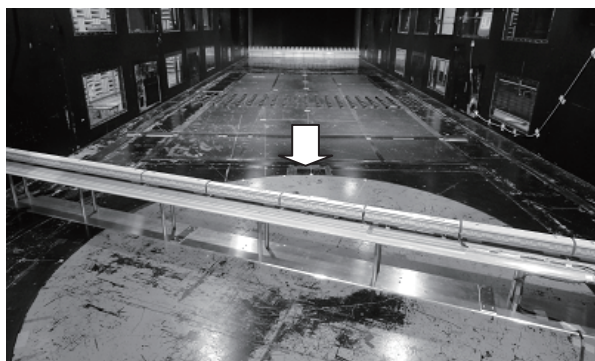


図2 風洞試験状況（下流側から望む）

風洞気流は、文献2)に示されている自然風を模擬した気流（乱流境界層べき指数 0.14, 0.26）である。風洞床面からの高さが同じ時、乱流境界層べき指数の大きい方が試験風速に対する風速比が小さい。高架橋、橋りょうに対する風洞試験では、乱流境界層べき指数 0.14、幅広盛土に対する風洞試験では、乱流境界層べき指数 0.26 で実施した。

2.2 空気力の評価方法

風転覆安全性評価に必要な空気力は、横力 S 、揚力 L 、ローリングモーメント M （以下、モーメントと呼ぶ）であり、それぞれの正の方向を図3に示す。空気力の座標軸は、風向角 β を変化させた際にも同時に変化する車体に固定した軸（車体軸）である。

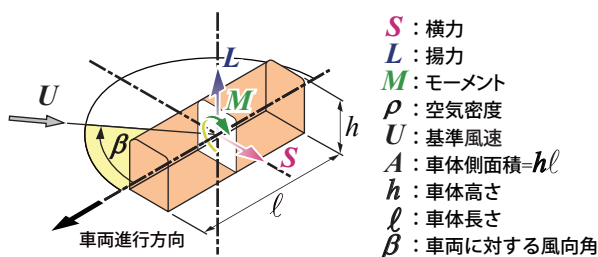


図3 車両模型に働く空気力

空気力係数を算出する際に用いた車両模型の諸元を表1に示す。空気力係数は、平均空気力を平均動圧と、車体高さ $h \times$ 車体長さ l で表す車体側面積 A （投影面積ではない）で除した値、モーメント係数については代表長さとして車体高さ h で更に除した値である。平均空気力は、サンプリング周波数 100Hz、収録時間 42 秒のデータから求められた値である。また、平均動圧は、空気力係数算出の基準位置における風速の平均値 $U_{BL}(Z_V)$ を用いて算出された値である。 $U_{BL}(Z_V)$ は、風洞の計測システムで収録された試験風速 U_0 の平均値に表1の「 U_0 に対する Z_V における風速の比（ $=Z_V$ における風速 / U_0 ）」を乗じた値である（図4）。モーメント中心は車体高さ

の 1/2（車体中心）にあり、モーメント係数は風上側から風下側に転倒する向きが正である。空気力係数は式(1)から式(3)で算出した。

$$\text{横力係数: } C_S = \frac{S}{\frac{1}{2} \rho (U_{BL}(Z_V))^2 A} \quad (1)$$

$$\text{揚力係数: } C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho (U_{BL}(Z_V))^2 A} \quad (2)$$

$$\text{モーメント係数: } C_M = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho (U_{BL}(Z_V))^2 Ah} \quad (3)$$

表1 空気力係数の算出に用いた値（模型寸法）

模型	項目	記号	単位	模型縮尺
車両	車両代表長さ（車体高さ）	h	m	0.0666
	車両代表面積（車体高さ×車体長さ）	A	m ²	0.0325
	R.L. 車体中心高さ	h_V	m	0.0572
高架橋 橋りょう	高架橋、橋りょうの地上 R.L. 高さ	Z_{RL}	m	0.3000
	地上（風洞床面）からの車体中心高さ	Z_V	m	0.3572
	U_0 に対する Z_V における風速の比（べき指数 0.14）			0.7826
幅広盛土	幅広盛土の地上 R.L. 高さ	Z_{RL}	m	0.2180
	地上（風洞床面）からの車体中心高さ	Z_V	m	0.2752
	U_0 に対する Z_V における風速の比（べき指数 0.26）			0.6132

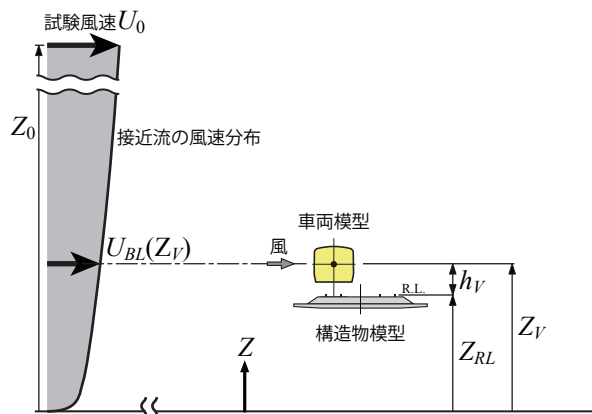


図4 乱流境界層分布と車両、線路構造物の関係

2.3 風洞試験模型

遮風壁を設置した構造物（高架橋、橋りょう、幅広盛土）に対する風洞試験は、全て縮尺 1/40 で実施した。ここで高架橋とは有道床橋、橋りょうとは無道床橋をさす。風洞試験に用いた遮風壁を設置した構造物（高架橋、橋りょう、幅広盛土）の車両設置部の断面形状は、図5に示すような形状である。図中には風洞試験のパラメータを示した（図中の寸法は実物大寸法）。

高架橋、橋りょうの風洞試験では、車両模型位置を固定したまま高欄等の位置を変更することにより離隔を変更した。高架橋の風洞試験では、複線高架橋模型を1個（離隔 2m から 7m）もしくは2個（離隔 12m から 17m）用いることにより、離隔が 2m から 17m（複々線相当）

の範囲で試験を実施した。橋りょうの風洞試験では、単線橋りょう模型を1個（離隔2mから3m）もしくは並列に2個（離隔6mから30m）用いることにより、離隔が2mから30mの範囲で試験を実施した。

構造物、遮風壁の条件は表2の通りである。表2のR.L.桁高はレール面を基準とした桁高で、文献3)で定義されている高架橋、橋りょうの桁高とは異なることに注意が必要である。文献3)で定義されている高架橋、橋りょうの桁高は、本報告のR.L.桁高より実物大でそれぞれ0.74mおよび0.36m低い。

遮風壁の高さ、離隔は模型（縮尺1/40）にした時にきりの良い数字とした。図5に示すように、遮風壁はレール面より上部のものと同じ充実率のものを下部の構造物から立ち上げた（即ち、構造物との間に隙間はない）。また、遮風壁は構造物（高架橋、橋りょう、幅広盛土）の上流側のみ設置した。

風洞試験に用いた車両模型は通勤型中間車両を模擬したものであり、実物大車両の屋根部の曲率半径は

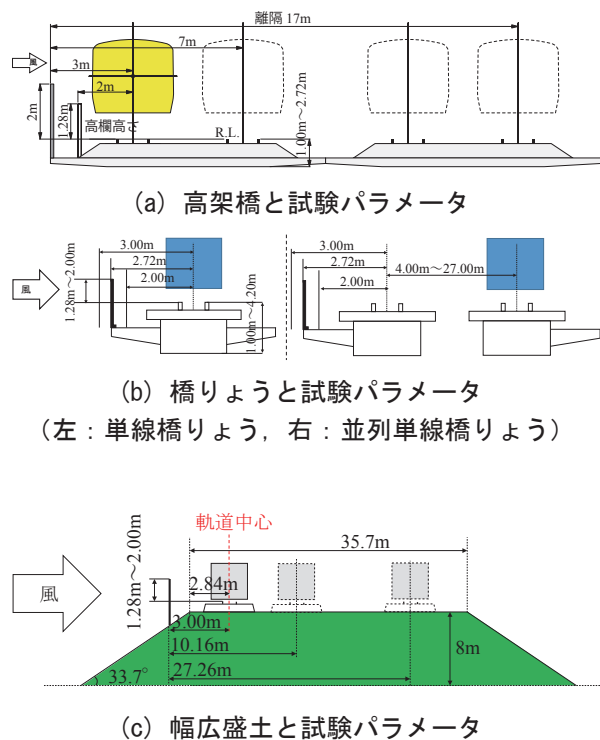


図5 遮風壁を設置した構造物（高架橋、橋りょう、幅広盛土）と試験パラメータ

表2 構造物、遮風壁の条件

構造物	R.L. 桁高 (m)	遮風壁		風向角 (°)
		充実率 (%)	R.L. 高さ (m)	
高架橋	1.00, 1.72, 2.72	60	2.00	90, 70, 50, 30
		100	1.28, 1.52, 1.76, 2.00	
橋りょう	1.00, 1.72, 4.20	60	2.00	90, 70, 50, 30
		100	1.28, 1.52, 1.76, 2.00	
幅広盛土	-	60	2.00	90
		100	1.28, 1.52, 2.00	

5000mmと6000mmであり、それぞれR5000中間車、R6000中間車と呼ぶ。R5000中間車とR6000中間車の模型は、車両模型の上部のみ交換する構造となっており、屋根部と肩部の曲率半径以外は共通である。風洞試験は主にR5000中間車に対して実施し、一部条件（橋りょう、R.L.桁高4.2m、風向角90度）でR6000中間車に対しても実施した。

3. 風洞試験結果

ここでは、列車の風転覆に対して影響の大きい横力係数に関して述べる。横力係数は試験風速によらず概ね一致（横力係数の差の最大値は0.07）したので、以下の図6から図13では試験風速が30m/sの横力係数の結果について示す。また、本報告の結果は、特に断らない限りR.L.桁高1m、R5000中間車、風向角90度に対する結果である。

各風洞試験条件（各車両、各構造物、各R.L.桁高、各遮風壁条件、各離隔、各風向角）に対して得られた横力係数を「防風柵基本条件（防風柵R.L.高さ2.0m、充実率60%、離隔3.0m）」（車両、構造物、R.L.桁高、風向角は同じ条件）に対して得られた横力係数で除したものを横力係数比と呼ぶ。横力係数比が1より小さければ、防風設備の手引きで例示された条件（防風柵基本条件）の防風柵に対する横力係数よりも小さいことを示す。これは、防風柵基本条件の防風柵よりも横力の低減効果が大きいことを示している。

3.1 防風柵基本条件

高架橋（R.L.桁高1m）、橋りょう（R.L.桁高1m）、幅広盛土上のR5000中間車に対する防風柵無し、防風柵有り（防風柵基本条件）での横力係数を図6に示す。防風設備の手引き¹⁾で例示されているグラフは一様流の条件での値を示しているが、図6に示す値は乱流境界層の条件での値である。

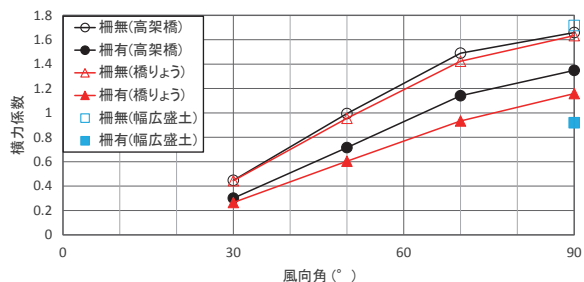


図6 横力係数（防風柵無し、防風柵有り（防風柵基本条件））

3.2 高架橋

高架橋に対する横力係数比を図7に示す。風向角90

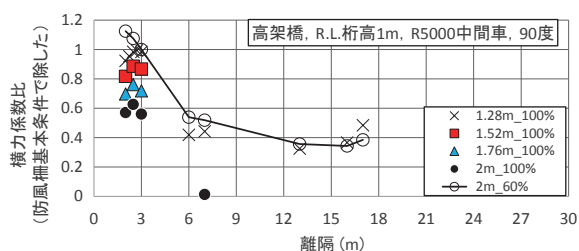


図7 高架橋 (R.L. 桁高 1m) の横力係数比

度の防風柵基本条件に対する横力係数 C_s は 1.35 である (図 6)。図 7 から、試験風速 30m/s では、離隔が 2m から 17m において R.L. 高さ 1.28m (充実率 100%) の高欄等は「防風柵基本条件」よりも横力低減効果があることが分かる。ただし、離隔が 3m よりも近いところでは横力係数比がほぼ 1 に等しい。そこで、試験風速 20m/s, 25m/s の時の横力係数比も確認したところ、横力係数比が 1 よりも大きくなる離隔の条件もあった。従って、R.L. 高さ 1.28m (充実率 100%) では「防風柵基本条件」よりも横力低減効果があるとは言えない可能性がある。一方、離隔が 2m から 3m では R.L. 高さ 1.52m (充実率 100%) の高欄等は「防風柵基本条件」よりも横力低減効果があることが分かる。

また、遮風壁の高さが高くなれば横力低減効果が大きくなるため、離隔が 2m から 17m では R.L. 高さ 1.52m 以上 (充実率 100%) の高欄等は「防風柵基本条件」よりも横力低減効果があると考えられる。

次に、風向角ごとの横力係数比をみるために、離隔が 2m, 3m に対する R.L. 高さ 1.28m (充実率 100%) の時の横力係数比を図 8 に示す。風向角が小さくなるにつれ横力係数比が大きくなった。この原因として、風向角が小さくなると防風柵の見かけの充実率が大きくなり、防風柵基本条件での横力係数が小さくなるため、横力係数比が大きくなることが考えられる。

風向角を変化させた風洞試験は、R.L. 高さ 1.28m (充実率 100%) の条件のみで実施したが、それ以外の遮風壁高さに対して風向角を変化させた時の空気力係数を求める場合は、R.L. 高さ 1.28m (充実率 100%) の結果から推測することになる。「防風柵基本条件」よりも横力低減効果があるためには風向角 90 度から 30 度で横力係数比が 1 以下であることが必要である。

風向角 90 度に対して、R.L. 高さ 1.52m (充実率 100%) の横力係数比は 1 よりも小さいが、R.L. 高さ 1.28m (充実率 100%) の時と同様に風向角が小さくなると横力係数比が大きくなり、横力係数比が 1 より大きくなる可能性がある。

離隔 2m, 3m の風向角 90 度に対する 30 度の横力係数比の比率を考える。ここでは、異なる試験風速に対する横力係数のばらつきを考慮して試験風速 20m/s, 25m/s, 30m/s

の横力係数比全てで考える (図 8 は試験風速 30m/s の時の横力係数比)。離隔 2m 及び 3m の横力係数比の比率の最大値 ((風向角 90 度, 試験風速 3 条件) × (風向角 30 度, 試験風速 3 条件) = 9 条件での最大値) をそれぞれ r_{2m} ($=1.21$), r_{3m} ($=1.15$) と書く。R.L. 高さ 1.28m (充実率 100%) 以外の遮風壁高さに対しても離隔 2m, 3m の風向角 90 度と 30 度の横力係数比の比率 r_{2m} , r_{3m} が、R.L. 高さ 1.28m (充実率 100%) の場合と同じであると仮定する。この仮定の下、風向角 30 度で横力係数比が 1 以下となるためには、離隔 2m, 3m の風向角 90 度で横力係数比がそれぞれ $1/r_{2m}$ ($=0.83$), $1/r_{3m}$ ($=0.87$) 以下であることが必要である。このことと図 7 から R.L. 高さ 1.52m (充実率 100%) では横力低減効果が不十分な可能性があり、R.L. 高さ 1.76m (充実率 100%) 以上であれば「防風柵基本条件」よりも横力低減効果があると推測されるが、本報告の結果だけからは断言することが難しく、風向角が横力係数比に及ぼす影響は今後も継続して検討していく必要がある。

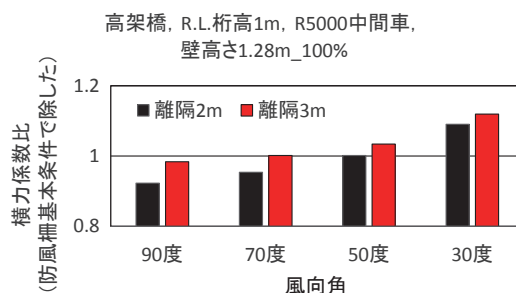


図8 風向角ごとの横力係数比

3.3 橋りょう

橋りょうに対する横力係数比を図 9 に示す。風向角 90 度の防風柵基本条件に対する横力係数 C_s は 1.16 である (図 6)。図 9 から、離隔が 2m から 13m では R.L. 高さ 1.52m (充実率 100%) の高欄等は「防風柵基本条件」よりも横力低減効果があることが分かる。また、遮風壁の高さが高くなれば横力低減効果が大きくなるため、離隔が 2m から 30m では R.L. 高さ 1.52m 以上 (充実率 100%) の高欄等は「防風柵基本条件」よりも横力低減効果があると考えられる。

次に高架橋の時と同様に、風向角ごとの横力係数比をみる。離隔が 2m, 3m に対する R.L. 高さ 1.28m (充実率 100%) の時の横力係数比を図 10 に示す。風向角 70 度から 30 度の時の横力係数比は、風向角 90 度の時の横力係数比よりも大きくなった。この原因として、風向角が小さくなると防風柵の見かけの充実率が大きくなり、防風柵基本条件での横力係数が小さくなるため、横力係数比が大きくなることが考えられる。また、高架橋の傾向 (風向角に対する横力係数比の単調性) と異なる

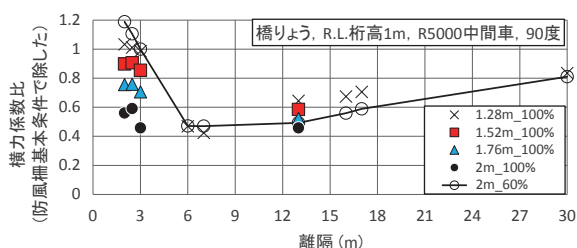


図9 橋りょう (R.L. 桁高 1m) の横力係数比

原因として、橋りょうは無道床であるために有道床の高架橋とは違い車両周りで複雑な流れ場となっていることが考えられる。橋りょうの条件でも風向角を変化させた風洞試験は、R.L. 高さ 1.28m (充実率 100%) の条件のみで実施したため、それ以外の遮風壁高さに対して風向角を変化させた時の空気力係数を求める場合は、R.L. 高さ 1.28m (充実率 100%) の結果から推測することになる。

風向角 90 度に対して、R.L. 高さ 1.52m (充実率 100%) の横力係数比は 1 よりも小さいが、R.L. 高さ 1.28m (充実率 100%) の時と同様に風向角が 70 度から 30 度の時の横力係数比は風向角 90 度の時の横力係数比よりも大きくなり、横力係数比が 1 より大きくなる可能性がある。従って、高架橋の場合と同様に風向角 70 度から 30 度の時に、R.L. 高さ 1.52m (充実率 100%) 以上の高欄等で「防風柵基本条件」よりも横力低減効果があるかは本報告の結果だけからは断言できない。

R.L. 桁高 4.2m に対する横力係数比を図 11 に示す。試験風速 30m/s, R.L. 桁高 4.2m, 風向角 90 度の防風柵基本条件に対する横力係数 C_s は 1.35 である (図 6 には示されていない)。R.L. 桁高 4.2m の条件では、離隔が 2.48m から 3m で R.L. 高さ 1.52m (充実率 100%) の高欄等は「防風柵基本条件」よりも横力低減効果があることが分かる。また、遮風壁の高さが高くなれば横力低減効果が大きくなるため、R.L. 桁高 4.2m の条件では、離隔が 2m から 7m で R.L. 高さ 1.52m 以上 (充実率 100%) の高欄等は「防風柵基本条件」よりも横力低減効果があると考えられる。

一部条件で R6000 中間車に対する風洞試験も実施し

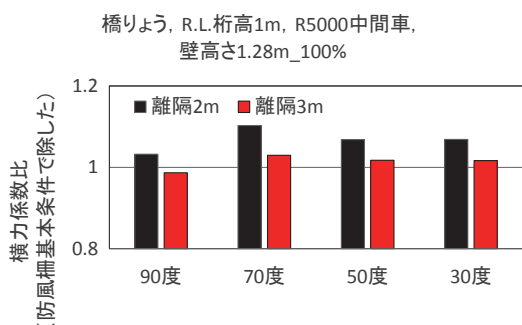


図 10 風向角ごとの横力係数比

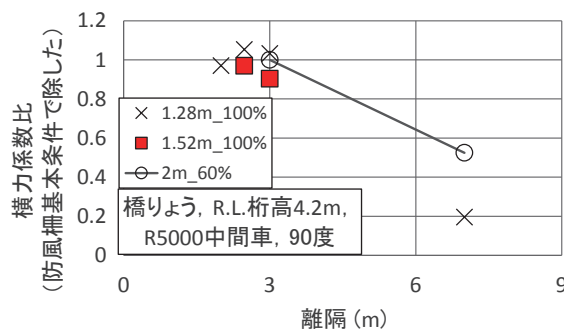


図 11 橋りょう (R.L. 桁高 4.2m) の横力係数比

た。R.L. 桁高 4.2m, R6000 中間車に対する横力係数比を図 12 に示す。試験風速 30m/s, R.L. 桁高 4.2m, R6000 中間車, 風向角 90 度の防風柵基本条件に対する横力係数 C_s は 1.34 である (図 6 には示されていない)。図 12 から、試験風速 30m/s, R.L. 桁高 4.2m, R6000 中間車の条件では、離隔が 2.72m から 3m で R.L. 高さ 1.28m (充実率 100%) の高欄等は「防風柵基本条件」よりも横力低減効果があることが分かる。ただし、離隔 2.72m では横力係数比がほぼ 1 に等しい。そこで、試験風速 20m/s, 25m/s の時の横力係数比も確認したところ、横力係数比が 1 よりも大きかった。従って、R.L. 高さ 1.28m (充実率 100%) では「防風柵基本条件」よりも横力低減効果があるとは言えない可能性がある。一方、R.L. 桁高 4.2m, R6000 中間車の条件では、離隔が 2.72m から 3m で R.L. 高さ 1.52m (充実率 100%) の高欄等は「防風柵基本条件」よりも横力低減効果があることが分かる。

また、遮風壁の高さが高くなれば横力低減効果が大きくなるため、R.L. 桁高 4.2m, R6000 中間車の条件では、離隔が 2.72m から 3m で R.L. 高さ 1.52m 以上 (充実率 100%) の高欄等は「防風柵基本条件」よりも横力低減効果があると考えられる。

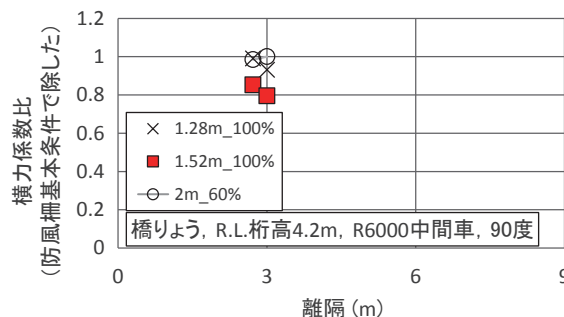


図 12 R6000 の横力係数比

3.4 幅広盛土

高架橋、橋りょうの風洞試験は、乱流境界層べき指数 0.14 で実施したが、幅広盛土の風洞試験は、乱流境界層べき指数 0.26 で実施した。

特集：空気力学・騒音

幅広盛土に対する横力係数比を図13に示す。風向角90度の防風柵基本条件に対する横力係数 C_s は0.92である(図6)。図13から、離隔が3mから27.26mではR.L.高さ1.28m(充実率100%)の高欄等は「防風柵基本条件」よりも横力低減効果があることが分かる。また、遮風壁の高さが高くなれば横力低減効果が大きくなるため、離隔が3mから27.26mではR.L.高さ1.28m以上(充実率100%)の高欄等は「防風柵基本条件」よりも横力低減効果があると考えられる。

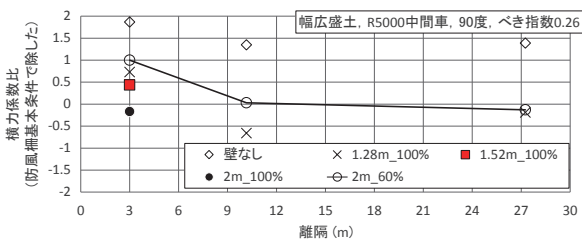


図13 幅広盛土の横力係数比

4. まとめ

本報告では、構造物(高架橋, 橋りょう, 幅広盛土)上のR5000中間車とR6000中間車の一部条件に対して、高欄等の高さ及び離隔(遮風壁と車両中心の距離)をパラメータとして風洞試験により空気力係数を求めた。風洞試験により得られた風向角ごとの横力係数を「防風設備の手引き」で例示された条件である防風柵R.L.高さ2.0m, 充実率60%, 離隔3.0m(「防風柵基本条件」と呼ぶ)の風向角ごとの横力係数で除した値(横力係数比)によって整理した結果、以下のことが分かった。

- (1) 高架橋に対して, R.L.桁高1m, R5000中間車, 風向角90度の条件では, 離隔が2mから17mでR.L.高さ1.52m以上(充実率100%)の遮風壁は横力係数比が1より小さいと考えられる。
- (2) 橋りょうに対して, R.L.桁高1m, R5000中間車, 風向角90度の条件では, 離隔が2mから30mで

- R.L.高さ1.52m以上(充実率100%)の高欄等は横力係数比が1より小さいと考えられる。
- (3) 橋りょうに対して, R.L.桁高4.2m, R5000中間車, 風向角90度の条件では, 離隔が2mから7mでR.L.高さ1.52m以上(充実率100%)の高欄等は横力係数比が1より小さいと考えられる。
- (4) 橋りょうに対して, R.L.桁高4.2m, R6000中間車, 風向角90度の条件では, 離隔が2.72mから3mでR.L.高さ1.52m以上(充実率100%)の高欄等は横力係数比が1より小さいと考えられる。
- (5) 高架橋, 橋りょうに対して, 風向角90度の条件でR.L.高さ1.52m(充実率100%)の高欄等の横力係数比が1より小さい場合でも, 風向角70度から30度の条件では横力係数比が1より大きくなる可能性がある。
- (6) 幅広盛土に対して, R5000中間車, 風向角90度の条件では, 離隔が3mから27.26mではR.L.高さ1.28m以上(充実率100%)の高欄等は横力係数比が1より小さいと考えられる。

謝辞

実験に協力いただいた株式会社テスの加藤健氏に感謝する。

文献

- 1) 鉄道強風対策協議会：防風設備の手引き, 2006.9
- 2) 鈴木実, 種本勝二, 斎藤寛之, 今井俊昭：自然風を模擬した車両に働く空気力に関する風洞試験法, 鉄道総研報告, Vol.17, No.11, pp.47-52, 2003
- 3) 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, pp.47-50, 2013
- 4) 種本勝二, 鈴木実, 斎藤寛之, 今井俊昭：風洞試験による防風対策の評価, RRR, pp.10-13, 2005.2