

# 片切片盛地形上の鉄道車両に作用する空気力の評価

乙部 達志\* 立松 知紘\*\* 井澤 信明\*\*  
鈴木 実\* 野口 雄平\*

## Evaluation of the Aerodynamic Force on a Railway Vehicle in Half-bank Half-cut Line Sections

Tatsushi OTOBE Tomohiro TATEMATSU Nobuaki IZAWA  
Minoru SUZUKI Yuhei NOGUCHI

Evaluation of running safety of railway vehicles in high cross winds is carried out using an aerodynamic coefficient obtained from wind-tunnel tests. There are many types of section topography along actual railway lines, but the aerodynamic coefficient is sought for seven standard types of structure. Many lines close to the coast or rivers are often flanked by a slope on one side and a bank on the other (half-bank half-cut sections), and sections like this are treated as embankments. However, in sections with high cutting on the downwind side, the aerodynamic side force acting on the train is different from that in sections of normal embankments. Therefore, wind-tunnel tests were conducted to obtain the aerodynamic coefficient in a half-bank half-cut section.

キーワード：鉄道車両，横風，風洞実験，片切片盛，盛土

### 1. はじめに

転覆限界風速を総研詳細式により計算する際にベースとなる空気力係数は、既往の研究により7種類の線路構造物に対して求められている<sup>1)</sup>。7種類の線路構造物とは、単線盛土、複線高架橋（桁高1.0, 3.5, 6.0m）、単線橋りょう（桁高1.0, 2.0, 3.5m）である。しかしながら、実際の線路沿線の地形等はさまざまな形状があるため、これらにあてはまらない空気力係数になると考えられる箇所もある。その1つとして海岸地形によくみられる海岸側が盛土、内陸側が切取（片切片盛と呼ぶ）の地形が考えられる。

現在、片切片盛地形に対して総研詳細式<sup>2)</sup>により転覆限界風速を計算する場合、単線盛土の空気力係数が適用されているが、片切片盛の空気力係数は車両に対して風下側となる切取の影響により単線盛土の空気力係数とは異なる。文献3)では、風向角90度の片切片盛地形上の中間車両の場合のみを扱っている。

そこで、本報告では片切片盛地形上の車両に対して、風向角、編成車両（先頭車，中間車），車両位置及び切取形状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し、単線盛土上の車両に対する空気力と比較する。

### 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、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（べき指数0.26）を生成する<sup>4)</sup>。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に示す。

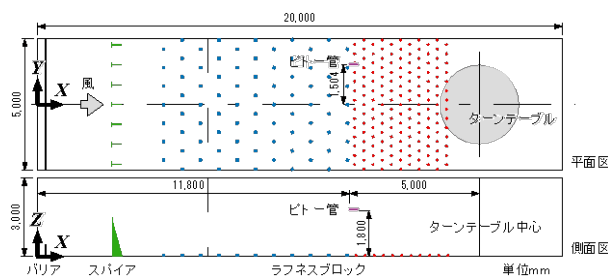


図1 密閉型測定部内の乱流境界層生成装置の配置（べき指数0.26）

\* 環境工学研究部 車両空力特性研究室  
\*\* 環境工学研究部 車両空力特性研究室  
(現 西日本旅客鉄道株式会社)

特集：空気力学・騒音

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  $X=11.800\text{m}$ ,  $Y=1.504\text{m}$ ,  $Z=1.800\text{m}$  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  $30\text{m/s}$  である。

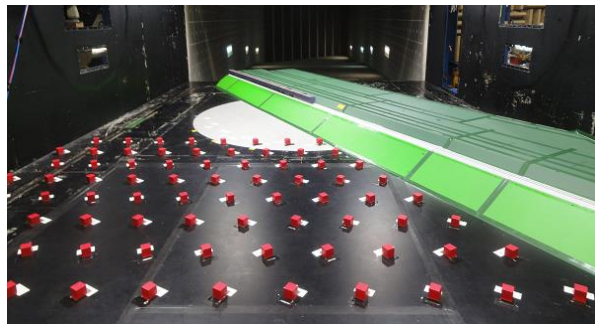


図2 風洞試験状況（上流側から望む）

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  $\beta$  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。

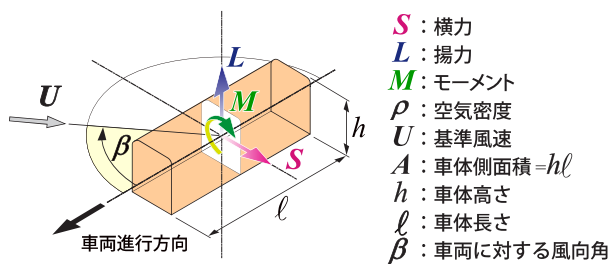


図3 車両模型に働く空気力

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  $h$  × 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  $100\text{Hz}$ 、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  $Z_V$  における風速の時間平均値  $U_{BL}(Z_V)$  を用いて算出された値である。 $U_{BL}(Z_V)$  は、模型がない条件での  $U_0$  に対する  $Z_V$  における風速比（ $=Z_V$  における風速 /  $U_0$ ）を試験風速  $U_0$  の平均値に乗じた値である（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）

項目	記号	単位	模型縮尺	
			1/60	1/40
代表長さ（車体高さ）	$h$	[m]	0.0444	0.0666
代表面積（車体高さ×車体長さ）	$A$	[m <sup>2</sup> ]	0.0144	0.0325
R.L. 車体中心高さ	$h_V$	[m]	0.0381	0.0572
片切片盛の地上 R.L. 高さ （風洞床面から R.L. までの距離）	$Z_{RL}$	[m]	0.1453	0.2180
地上からの車体中心高さ （風洞床面から車体中心までの距離）	$Z_V$	[m]	0.1834	0.2752
在来線軌道における車輪とレールの接触点間距離	$I_R$	[m]	0.0187	0.0280

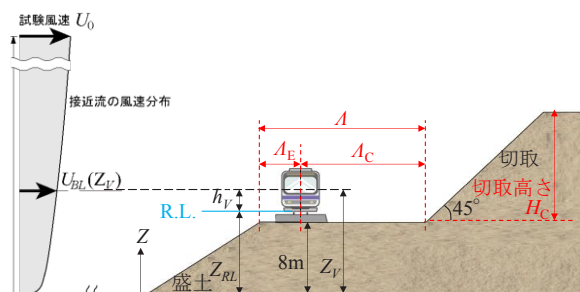


図4 乱流境界層分布と車両、片切片盛の関係

2.3 風洞試験模型

風洞試験に用いた片切片盛地形の断面形状は、図4に示すような形状であり、図中に風洞試験のパラメータを示す（図中の  $8\text{m}$  も含めて寸法は実物大）。盛土部分のはり面勾配  $1:1.5$ （ $33.7$  度）、高さ  $8\text{m}$  に固定、切取部分は切取傾斜角  $45$  度に固定しており、風洞試験のパラメータは、切取高さ  $H_C$ 、切取端（のり尻）と軌道中心の距離  $A_C$ 、盛土端（のり肩）と軌道中心の距離  $A_E$ 、盛土端（のり肩）と切取端（のり尻）の距離  $A (=A_E+A_C)$  である。添え字の  $C$  は Cutting（切取）、 $E$  は Embankment（盛土）の頭文字である。

風洞試験に用いた車両模型は通勤型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  $5000\text{mm}$  で、歩み板が設置されている。以降、 $R5000$  車両と呼ぶ。

風洞試験条件は、表2の通りである。切取高さ  $H_C$  が大きいと密閉型測定部に対する閉塞率が大きくなるため、切取高さ  $H_C$  が  $10\text{m}$  以下の模型は縮尺  $1/40$  で、 $10$ 、 $15\text{m}$  の模型は縮尺  $1/60$  で試験を行った（切取高さ  $10\text{m}$  に対しては縮尺  $1/40$  と  $1/60$  の両方で実施）。切取高さ  $H_C$  が  $10\text{m}$  で縮尺  $1/40$  の時の閉塞率は  $15\%$ 、切取高さ  $H_C$  が  $15\text{m}$  で縮尺  $1/60$  の時の閉塞率は  $13\%$  である。気流は、縮尺によらず同じである。

表2 風洞試験条件

縮尺	HC	測定車	A=6m		A=10m		A=20m				
			A <sub>E</sub>	A <sub>E</sub>	A <sub>E</sub>	A <sub>E</sub>	A <sub>E</sub>	A <sub>E</sub>	A <sub>E</sub>	A <sub>E</sub>	
			2.84m	2.84m	6.84m	2.84m	6.42m	10m	13.42m	16.84m	
1/40	1m	先頭	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		中間	⑨	-	-	-	-	-	-	-	-
	2m	先頭	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		中間	⑨	⑨	⑨	⑨	-	-	-	-	⑨
	3m	先頭	⑨⑦⑤③	⑨⑦	⑦	⑨⑦⑤③	-	-	-	-	⑨⑦⑤③
		中間	⑨⑦⑤③	⑨⑦	⑨⑦	⑨⑦⑤③	-	-	-	-	⑨⑦⑤③
	4m	先頭	⑦	-	-	-	-	-	-	-	-
		中間	⑨⑦	⑨	⑨	⑨	-	-	-	-	⑨
	5m	先頭	⑨⑦⑤③	⑨⑦	⑦	⑨⑦⑤③	-	-	-	-	⑨⑦⑤③
		中間	⑨⑦⑤③	⑨⑦	⑨⑦	⑨⑦⑤③	-	-	-	-	⑨⑦⑤③
6m	先頭	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	中間	⑨	⑨	⑨	⑨	-	-	-	-	⑨	
7m	先頭	⑨⑦⑤③	⑨⑦	-	⑦⑤	-	-	-	-	-	
	中間	⑨⑦⑤③	⑨⑦	⑨	⑨⑦⑤	-	-	-	-	⑨	
8m	先頭	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	中間	⑨	-	-	-	-	-	-	-	-	
9m	先頭	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	中間	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
10m	先頭	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	中間	⑨	-	-	-	-	-	-	-	⑨	
1/60	10m	先頭	⑨⑦⑤③	⑨⑦⑤③	⑨⑦⑤③	⑨⑦⑤③	-	⑨	-	⑨⑦⑤③	
		中間	⑨⑦⑤③	⑨⑦⑤③	⑨⑦⑤③	⑨⑦⑤③	⑨	⑨③	⑨	⑨⑦⑤③	
15m	先頭	⑨	⑨	⑨	⑨⑦⑤③	-	-	-	-	⑨	
	中間	⑨	⑨	⑨	⑨⑤③	-	⑨	-	-	⑨	

凡例 (色の意味は3.6節参照)  
 ⑨⑥③: 先頭車, 風向角 90 度  
 ⑦⑦⑦: 先頭車, 風向角 70 度  
 ⑤⑤⑤: 先頭車, 風向角 50 度  
 ③③③: 先頭車, 風向角 30 度  
 ⑨⑨⑨: 中間車, 風向角 90 度  
 ⑦⑦⑦: 中間車, 風向角 70 度  
 ⑤⑤⑤: 中間車, 風向角 50 度  
 ③③③: 中間車, 風向角 30 度

3. 風洞試験結果

本章では、風洞試験結果の中から、風による列車の転覆に対して影響の大きい横力係数に関して述べる。

以下、「片切片盛の各風洞試験条件に対して得られた横力係数」を「同じ車両条件 (先頭車, 中間車), 同じ風向角条件, 同じ縮尺の単線盛土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。

3.1 単線盛土に対する空気力係数

片切片盛に対する風洞試験結果を述べる前に単線盛土に対する空気力係数を図5に示す。縮尺 1/40 に対しては風向角  $\beta=90, 70, 50, 30$  度, 縮尺 1/60 に対しては風向角  $\beta=90, 70$  度で試験を実施した。風向角  $\beta=90, 70$  度に対して縮尺 1/40, 1/60 の空気力係数は概ね一致していることが分かる。縮尺 1/60 では風向角 50, 30 度の単線盛土の風洞試験を実施していないため空気力係数が得られていない。そこで、縮尺 1/60 の風向角  $\beta=50, 30$  度の横力係数比の算出において、縮尺 1/40 の風向角  $\beta=50, 30$  度の単線盛土の横力係数を準用することとした。

3.2 切取高さ  $H_C$  と横力係数比

本節では、 $A$  および  $A_E$  を固定した条件下で、 $H_C$  が変化した場合の横力係数比に対する影響について述べる。

図6に中間車、風向角  $\beta=90$  度の時の切取高さ  $H_C$  と横力係数比の関係を示す。図には示していないが、先頭車や90度以外の風向角の場合も切取高さ  $H_C$  が1mから3~5m程度に増加した場合の横力係数比は概ね増加傾

向か変化なし、切取高さ  $H_C$  が3~5m程度から15mに増加した場合は横力係数比は減少傾向となった。

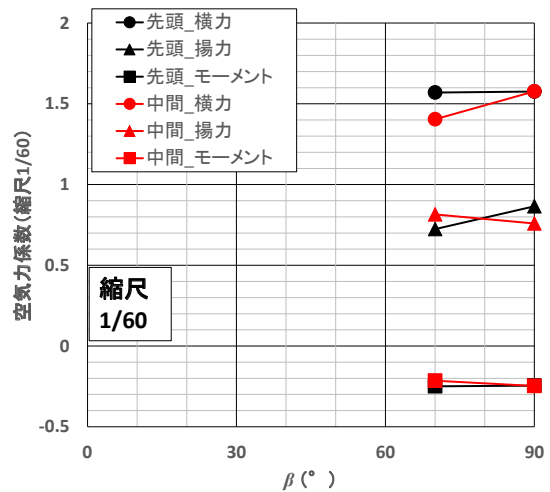
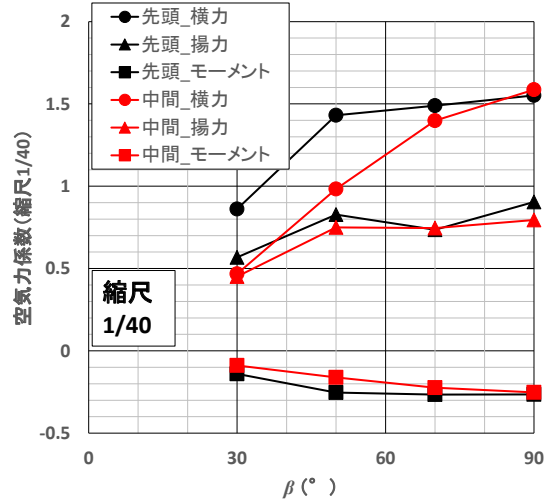


図5 単線盛土の空気力係数

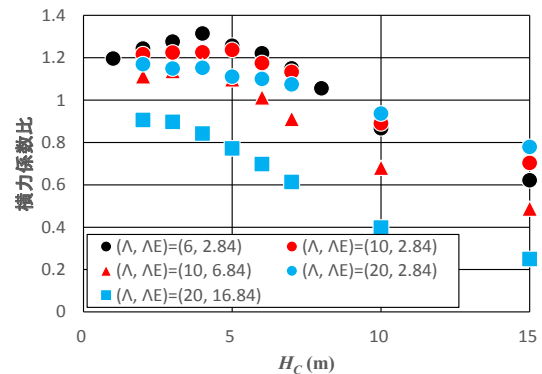


図6 切取高さ  $H_C$  と横力係数比 (中間車, 風向角  $\beta=90^\circ$ )

特集：空気力学・騒音

3.3 のり肩から軌道中心の距離  $A_E$  と横力係数比

本節では、のり肩とのり尻の距離  $A$  および切取高さ  $H_C$  を固定した条件下で、のり肩と軌道中心の距離  $A_E$  が変化した場合の横力係数比に対する影響について述べる。

図7に中間車，風向角  $\beta=90$  度の時ののり肩と軌道中心の距離  $A_E$  と横力係数比の関係を示す。図には全ての条件の結果を示してはいないが，測定車及び風向角によらずのり肩と軌道中心の距離  $A_E$  が増加した時には横力係数比は減少傾向となった。

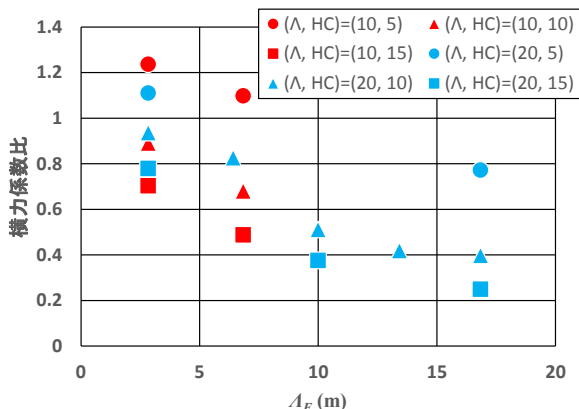


図7 のり肩から軌道中心の距離  $A_E$  と横力係数比 (中間車，風向角  $\beta=90^\circ$ )

3.4 のり肩からのり尻の距離  $A$  と横力係数比

本節では、切取高さ  $H_C$  およびのり肩と軌道中心の距離  $A_E$  を固定した条件下で、のり肩とのり尻の距離  $A$  が変化した場合の横力係数比に対する影響について述べる。

増減傾向の一覧を表3に示す。表中の赤色はのり肩とのり尻の距離  $A$  が増加した時に横力係数比が増加，黄色は  $A$  が増加した時に横力係数比がほぼ変化なし，青色は  $A$  が増加した時に横力係数比が減少，橙色は  $A=10\text{m}$  までは  $A$  が増加したときに横力係数比が増加し，その後ほぼ変化なしを意味する。表3において中間車の上領域および先頭車の左上領域には青色（のり肩とのり尻の距離  $A$  に関して減少）が多く，中間車の下領域および先頭車の右下領域には赤色（ $A$  に関して増加）が多い傾向にあることが分かる。図8に中間車，風向角  $90$  度の時ののり肩とのり尻の距離  $A$  と横力係数比の関係を示す。

表3 のり肩からのり尻の距離  $A$  を増加させた時の横力係数比の増減傾向

固定		変数		中間車 風向角				先頭車 風向角			
$H_C$	$A_E$	$A$		90度	70度	50度	30度	90度	70度	50度	30度
2m	2.84m	6m~20m	6m	青	青	青	青	青	青	青	青
3m			青	青	青	青	青	青	青	青	青
4m			青	青	青	青	青	青	青	青	青
5m			青	青	青	青	青	青	青	青	青
6m			青	青	青	青	青	青	青	青	青
7m			青	青	青	青	青	青	青	青	青
10m			青	青	青	青	青	青	青	青	青
15m	青	青	青	青	青	青	青	青	青	青	

凡例 (赤：増加，黄：変化なし，青：減少，橙： $A=10\text{m}$  まで増加後変化なし)

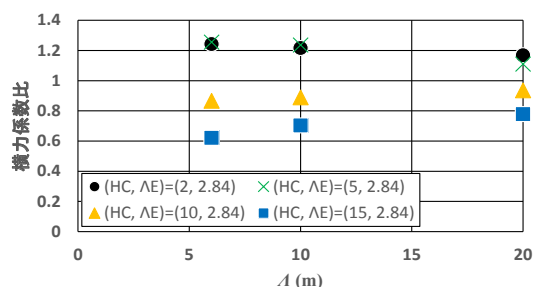


図8 のり肩からのり尻の距離  $A$  と横力係数比 (中間車，風向角  $\beta=90^\circ$ )

3.5 風向角と横力係数比

本節では、切取高さ  $H_C$ ，のり肩とのり尻の距離  $A$  およびのり肩と軌道中心の距離  $A_E$  を固定した条件下で、風向角が変化した場合の横力係数比に対する影響について述べる。

切取高さ  $H_C$ ，のり肩とのり尻の距離  $A$  およびのり肩と軌道中心の距離  $A_E$  を固定した条件下で、4通りの風向角  $\beta=90, 70, 50, 30$  度の全てで風洞試験を実施した。条件数 ( $H_C, A, A_E$  の組合せ) は，中間車で12条件，先頭車で13条件である (表2)。

風向角  $\beta$  を変化させたときの横力係数比の変化を見るため、「風向角  $\beta=90, 70, 50, 30$  度での横力係数比の最大値から最小値を引いた値」を「風向角  $\beta=90, 70, 50, 30$  度の4つの横力係数比の平均値」で除した値  $r$  を定義する。

中間車における  $r$  は12条件に対して0.05から0.16，先頭車における  $r$  は13条件に対して0.13から0.55であった。中間車は，先頭車に比べて風向角による横力係数比の差異が小さいことが分かる。先頭車の時の  $r$  は0.13から0.55と変化が大きいが， $A$  の大きさで区分して  $r$  の値を整理した結果， $A=6\text{m}$  の時に0.34から0.55， $A=10\text{m}$  の時に0.43から0.53， $A=20\text{m}$  の時に0.13から0.27であった。図9に  $r$  の値が大きい3条件 (三角形の凡例，全て先頭車) と小さい3条件 (丸形の凡例，全て中間車) について，風向角と横力係数比の関係を示す。  $r$  の値が大きい3条件では風向角が大きくなると横力係数比が大きくなった。

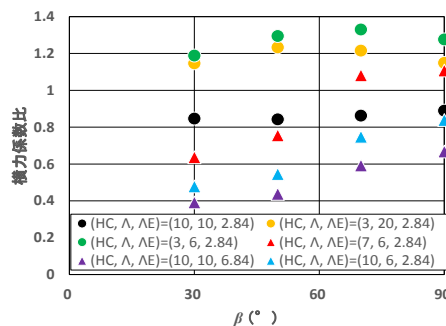


図9 風向角と横力係数比

3.6 横力係数比の最大値

本節では、測定車および風向角  $\beta$  ごとの横力係数比の最大値について説明する。

測定車および風向角  $\beta$  を固定した条件下で、実施した風洞試験条件中の横力係数比が最大となる切取高さ  $H_C$ 、のり肩とのり尻の距離  $A$ 、のり肩と軌道中心の距離  $A_E$  を求めた。その結果、表 2 中の赤で示した条件で横力係数比が最大となった。ただし、中間車の風向角 90 度、先頭車の風向角 70 度では  $(H_C, A, A_E)=(3\text{m}, 6\text{m}, 2.84\text{m})$  と  $(H_C, A, A_E)=(4\text{m}, 6\text{m}, 2.84\text{m})$  の横力係数比の差は 0.03 であり、傾向としては  $H_C$  が 3m 程度、 $A_E$  が 2.84m で横力係数比の最大値をとることが分かった。また、のり肩とのり尻の距離  $A$  の値は測定車と風向角条件により異なり、中間車の全風向角と先頭車の 90、70 度では  $A$  が 6m、先頭車の 50、30 度では  $A$  が 20m で横力係数比の最大値をとることが分かった。

風向角  $\beta$  と横力係数比の最大値の関係を図 10 に示す。

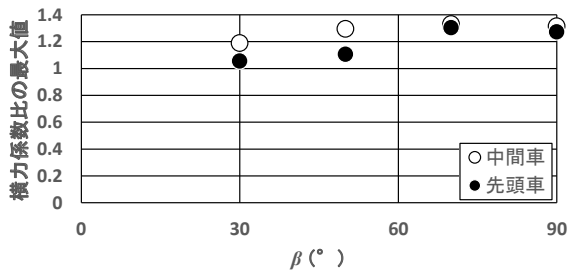


図 10 風向角と横力係数比の最大値

図 10 から全ての測定車および風向角条件での横力係数比の最大値が 1 より大きくなる事が分かる。従って、全ての測定車および風向角条件で単線盛土よりも横力係数が高い条件が存在することが分かる。

上では切取高さ  $H_C$  の範囲が 1m から 15m での横力係数比の最大値を求めたが、次に  $H_C$  を 10m から 15m の範囲に限定して横力係数比の最大値を求めた。その結果、表 2 中の青で示した条件で横力係数比が最大となった。

風向角  $\beta$  と横力係数比の最大値（切取高さ  $H_C$  を 10, 15m に限定）の関係を図 11 に示す。

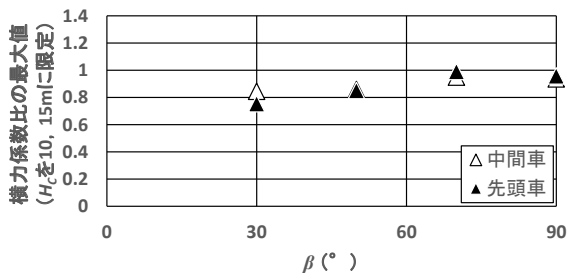


図 11 風向角と横力係数比の最大値 ( $H_C$  を 10, 15m に限定)

$H_C$  を 10, 15m に限定すると、全ての測定車および風向角条件で横力係数比の最大値が 1 より小さくなる事が分かる。即ち、切取高さ  $H_C$  を 10, 15m に限定すると、片切片盛土の横力係数は単線盛土の横力係数よりも小さいことを意味する。

4. 片切片盛地形に対する空気力係数の適用

片切片盛地形はパラメータの種類が多いため、実地形に適用する際にはどの空気力係数を適用すれば良いかが分かりにくい。そこで、本章では片切片盛地形の空気力係数の代わりに、単線盛土における空気力係数を定数倍して適用する方法を提案する。

定数倍する空気力係数は、適用が容易となるように 3 種類の空気力係数の中で転覆限界風速に最も影響を与える横力係数とした。

車両転覆の観点で評価できる指標である風下レール（風下側の車輪とレールの接触点）周りのモーメント係数  $C_{M\_lee}$  を式 (4) で求める。

$$C_{M\_lee} = \frac{C_S h_V}{h} + \frac{C_L l_R}{2h} + C_M \quad (4)$$

同式の  $h$ ,  $h_V$  および  $l_R$  は表 1 で定義した通りである。図 12 の赤の矢印で風下レール周りのモーメントの意味を示す。

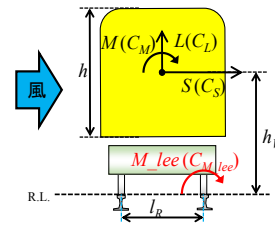


図 12 風下レール周りのモーメント

単線盛土の横力係数  $C_S$  を定数倍するために与える倍率  $k$  を決定する方法について説明する。まず、単線盛土の横力係数  $C_{S\_emb}$ 、揚力係数  $C_{L\_emb}$  およびモーメント係数  $C_{M\_emb}$  と定数  $k$  を式 (5) に代入し、単線盛土の空気力係数に対して横力係数のみ  $k$  倍した条件の風下レール周りのモーメント係数  $C_{M\_lee}'(k)$  を計算する。

$$C_{M\_lee}'(k) = \frac{(kC_{S\_emb})h_V}{h} + \frac{C_{L\_emb}l_R}{2h} + C_{M\_emb} \quad (5)$$

添え字の emb は Embankment (盛土) の略字である。式 (5) の右辺は式 (4) の右辺の  $C_S$  に  $kC_{S\_emb}$ 、 $C_L$  に  $C_{L\_emb}$  および  $C_M$  に  $C_{M\_emb}$  を代入したものである。

次に、片切片盛地形のパラメータに応じた空気力係数を用いて式 (4) から算出された  $C_{M\_lee}$  と、単線盛土の空気力係数を用いて式 (5) から算出された  $C_{M\_lee}'(k)$  を比較する。 $C_{M\_lee}'(k)$  が片切片盛地形の  $C_{M\_lee}$  より小さい場合、

定数倍する  $k$  が小さく、車両転覆の観点から安全側の適用とならないことを意味する。一方、 $C_{M\_lee}(k)$  が片切片盛地形の  $C_{M\_lee}$  より大きい場合、片切片盛地形の空気力係数として横力係数を  $kC_{S\_emb}$ 、揚力係数を  $C_{L\_emb}$  およびモーメント係数を  $C_{M\_emb}$  としても、車両転覆の観点から問題ないことを意味する。定数  $k$  を変化させながらこの比較を行い、安全側となる適切な定数  $k$  を求めていく。

求め方の例について述べる。図 13 に中間車、風向角  $\beta=90$  度、 $A=6\text{m}$ 、 $A_E=2.84\text{m}$  の条件下で、切取高さ  $H_C$  が変化した場合の風下レール周りのモーメント係数比を示す。風下レール周りのモーメント係数比とは、「片切片盛の風下レール周りのモーメント係数  $C_{M\_lee}$ 」を「同じ車両条件、同じ風向角条件、同じ縮尺の単線盛土の風下レール周りのモーメント係数（すなわち  $C_{M\_lee}'(1.0)$ ）」で除したものである。なお、図 13 には中間車、風向角  $\beta=90$  度の単線盛土の空気力係数から算出された  $C_{M\_lee}'(1.0)$ 、 $C_{M\_lee}'(1.2)$  および  $C_{M\_lee}'(1.4)$  それぞれを  $C_{M\_lee}'(1.0)$  で除した風下レール周りのモーメント係数比も示した。

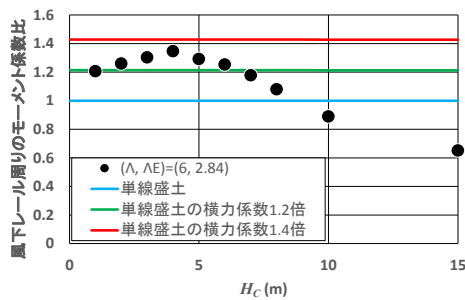


図 13 定数  $k$  の計算例（中間車、風向角  $\beta=90^\circ$ ）

まず、定数  $k$  を 1.0 にすると  $C_{M\_lee}'(1.0)$  は切取高さ  $H_C=10, 15\text{m}$  での  $C_{M\_lee}$  を上回ることがわかる。従って、切取高さ  $H_C$  が  $10\text{m}$  以上では、中間車、風向角  $\beta=90$  度の単線盛土の空気力係数を適用しても良いと判断できる。一方、切取高さ  $H_C$  が  $10\text{m}$  未満に対しては、 $C_{M\_lee}$  の方が大きいため、中間車、風向角  $\beta=90$  度の単線盛土の空気力係数を適用出来ず、定数  $k$  を再度検討する必要がある。

次に、定数  $k$  を 1.2 にすると  $C_{M\_lee}'(1.2)$  は切取高さ  $H_C=1\text{m}$  および  $H_C=7, 8, 10, 15\text{m}$  での  $C_{M\_lee}$  を上回ることがわかる。従って、これらの  $H_C$  では、中間車、風向角  $\beta=90$  度の単線盛土の空気力係数で、横力係数のみ 1.2 倍したものを、この条件の空気力係数として適用して良いと判断することができる。

最後に、定数  $k$  を 1.4 にすると  $C_{M\_lee}'(1.4)$  は全ての切取高さ  $H_C$  での  $C_{M\_lee}$  を上回る。そのため、これらの切取高さ  $H_C$  では、中間車、風向角  $\beta=90$  度の単線盛土の空気力係数で、横力係数のみ 1.4 倍したものを、この条

件の空気力係数として適用しても良いと判断できる。

全ての切取高さ  $H_C$  に対して定数  $k$  を 1.4 にすることは安全側の評価ではあるが、過剰な安全を見込んでいる条件も存在するため、パラメータによって場合分けを行い、それぞれに応じて適切な定数  $k$  を決定することが望ましい。

## 5. まとめ

本研究では、片切片盛地形上の R5000 車両（先頭車、中間車）に対して、切取高さ  $H_C$ 、盛土端と軌道中心の距離  $A_E$ 、盛土端と切取端の距離  $A$  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「同じ車両条件、同じ風向角条件、同じ縮尺の単線盛土上の R5000 車両に対して得られた空気力係数」で除した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) 測定車及び風向角によらず  $H_C$  が  $1\text{m}$  から  $3\sim 5\text{m}$  程度に増加した時には横力係数比は概ね増加傾向か変化なし、 $H_C$  が  $3\sim 5\text{m}$  程度から  $15\text{m}$  に増加した時には横力係数比は減少傾向となった。
- (2) 測定車及び風向角によらず  $A_E$  が増加した時には横力係数比は減少傾向となった。
- (3)  $A$  が増加した時の横力係数比の増減傾向は測定車及び風向角によって異なった。
- (4) 全ての測定車および風向角条件で単線盛土よりも横力係数が大きい ( $H_C, A, A_E$ ) の条件が存在することが分かった。
- (5) 片切片盛地形の空気力係数の代わりに、単線盛土における横力係数を定数倍して適用する方法を提案した。

## 謝 辞

実験に協力いただいた株式会社テスの種本勝二氏、加藤健氏に感謝する。

## 文 献

- 1) 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
- 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) 井澤信明、鈴木実、大山安紀子、鈴木貞治、三須弥生：海岸地形上の鉄道車両に作用する空気力の検討、日本機械学会 2015 年度年次大会、G0500703, 2015
- 4) 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