

風洞実験による乱流境界層下の盛土上の 風速分布特性

斎藤 寛之* 井門 敦志*
種本 勝二* 鈴木 実*

Characteristics of Wind Velocity Distribution over Embankment in Turbulent Boundary Layer Obtained by Wind Tunnel Experiment

Hiroyuki SAITOU Atsushi IDO
Katsuji TANEMOTO Minoru SUZUKI

To investigate the safety of railway vehicles running under windy conditions, it is important to evaluate the relationship between the velocity of the wind over the railway structures and the velocity of upstream wind undisturbed by them. Therefore, the authors carried out the measurement of the wind velocity distribution over a single track embankment by 1/40th scale wind tunnel experiments where the embankment heights and the wind directions were varied. The ratio of mean velocity over the embankment of 8-m height to the velocity of upstream wind undisturbed at the level of center of a vehicle body reached a maximum value of about 1.25 at the wind direction angle of 70 degree.

キーワード：風洞実験，強風，盛土，風速，乱流境界層

1. はじめに

利便性の高い効率的な鉄道を目指して、鉄道車両の高速化、軽量化が進められてきた。高速化、軽量化は強風時の鉄道車両の走行安全性を低下させる要因となる可能性があるため、安全輸送を確保する際の検討の重要性は、以前より増していると言える。

強風時の車両の走行安全性を検討するためには、風速と車両に働く空気力の関係を明らかにすることが重要である。風速と車両に働く空気力の関係を調べる方法として、風洞を使用して車両に働く空気力を評価する方法がある。通常、風洞実験は空間的に一様な風（一様流）を用いることが多いが、現実の自然風は地表面に近いほど風速が遅く、時間的な変動成分を持っている（乱流境界層）。そこで鉄道総研では、強風時に車両に働く空気力の推定精度向上を目的として、自然風を模擬した乱流境界層中の風洞実験を実施し、車両形状と線路構造物形状を組み合わせた車両に働く空気力の評価方法を検討している。

風洞実験では、車両に働く空気力を評価するために、風洞内の基準点の基準風速と車両に働く空気力を測定し両者の関係を求めるが、基準点は構造物模型の影響を受けない上流側の平坦な地面上のある高さの点としている。

一方、実際の現地において風速を観測する場合、この基準風速に相当する位置で風速を測定することが困難なことが多い。むしろ構造物の影響により、基準風速と比べて平均風速が増減する位置や、風速変動が含まれる位置において測定せざるを得ない場合が多いと考えられる。そこで、風洞実験により乱流境界層下の構造物まわりの風速を測定し、空気力を評価する際の基準風速と観測風速の関係を明らかにしておくことが、適切な観測用風速計の位置と風速の評価法を検討する上で不可欠である。

ここでは、線路構造物の中で、地表面付近の自然風の影響が最も大きく現れると予想される単線の盛土を対象に、乱流境界層下の盛土上の風速を、盛土高さと同風向角をパラメータにした風洞実験により測定した。本報告では盛土のり肩上の風速分布の測定結果について報告する。

2. 風洞実験の概要

2.1 風洞設備

風洞実験は鉄道総研大型低騒音風洞の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である。風洞実験の様子を図1に示す。風洞吹き出し口より下流16.8mの位置に、ターンテーブルが設置されており、盛土模型はターンテーブル上に固定される。風洞の基準風速は、ターンテーブル中心から5m上流、風洞

* 環境工学研究部（空気力学）

特集：環境技術

中心線より1.5m離れ、風洞床面より高さ1.8m（実寸換算で72m）の位置に設置したピトー管の風速 U_0 とした。試験風速は30m/sである。

図1に示すようにバリア、スパイア、ラフネスブロック等の乱流境界層生成装置の各部品をターンテーブルの上流側に設置することにより、自然風の境界層を模擬した気流を再現する¹⁾。

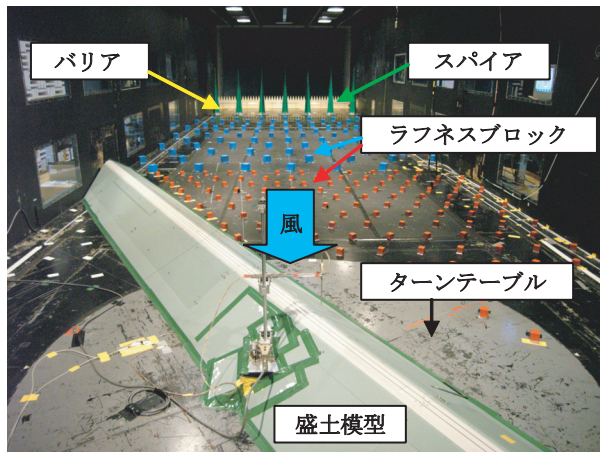


図1 風洞実験の様子

2.2 実験方法

2.2.1 気流特性

一般に、大気の下層領域では地表面の影響による境界層が生成されている。自然風の性質は極めて複雑であるが、接地境界層内の風速の鉛直分布は観測結果や理論からべき法則あるいは対数法則に従うとされている²⁾。

$$\frac{U(Z)}{U_0} = \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^a \quad (1)$$

自然風の時間平均風速 $U(Z)$ の鉛直分布は、地表からの高さ Z が大きくなるにつれて増加し、べき法則を用いる場合、べき指数 a は地表面の状態により定まり、日本建築学会建築物荷重指針・解説³⁾ による分類では、例えば、中層市街地での平均風速の鉛直分布のべき指数 a は0.27となっている。今回の風洞実験では、それに近い

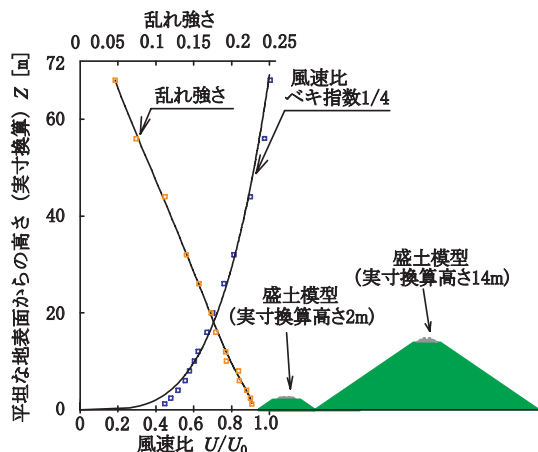


図2 風洞気流の鉛直分布（模型縮尺1/40）

べき指数0.26の気流を再現した。以下、この気流をべき指数1/4と呼ぶことにする。模型縮尺は1/40である。図2に、乱流境界層（べき指数1/4）の平均風速の鉛直分布と乱れ強さを示す。ここでは、測定部内に模型が設置されていない場合のターンテーブル上における風速比 U/U_0 （平均風速 U /基準風速 U_0 ）と乱れ強さ（実効値 σ_u /平均風速 U ）である。風洞床面からの高さ0.5m（実寸換算20m）の主流方向の乱れ強さ σ_u/U が0.17、乱れスケール L_u^x （気流の乱れの空間的広がりを表す長さの尺度）が0.88mである。 U が主流方向の風速の時間平均、 σ_u が主流方向の風速変動の実効値である。風速測定方法については、2.2.4で述べる。以下、模型が設置されていない場合のターンテーブル中心上の平均風速を上流から接近する流れとみなして「接近流」と呼ぶことにする。

2.2.2 風洞実験模型

盛土は、鉄道における一般的な単線盛土の形状を想定し、のり面こう配1:1.5（角度33.7度）、施工基面幅5.68m（実寸簡算）とした。施工基面からレールレベルまでの高さは0.72m（実寸換算）である。単線盛土模型の縮尺は実物の1/40とした。単線盛土模型の断面形状を図3に、諸元を表1に示す。以下では、寸法を実寸換算で表す。盛土の高さの影響を検討するため、盛土模型を高さ2mから14mまで3m刻みで作成した。ここで、盛土高さは地表面から施工基面までの高さとした（図3）。比較のために今回の風洞実験で使用した最小の盛土高さ（2m）の模型と最大の盛土高さ（14m）の模型を図2に示す。

2.2.3 実験条件

風洞実験は試験風速30m/sで実施した。風洞実験では盛土高さ h を2mから14mまで3m刻みで5段階に変化させた。盛土模型は風洞のターンテーブル上に固定し、ターンテーブルを回転させることにより、盛土に当たる風の風向角 α を変化させ90度、70度、50度、30度の4風向の場合について測定を行った。ここで、風向角90度を盛土に対して真横から風が吹く場合と定義した。

風洞測定部内に盛土模型を再現する際、流れの2次元性を確保するために風洞壁まで盛土模型を配置した。盛土模型の平面図を図4に示す。風向角 α によって盛土のり面の見かけ上の傾斜角が異なる。風向角が90度の場合、図4のA-A断面の斜面の傾斜となり傾斜角が33.7度となるが、風向角が0度に近づくにつれて傾斜角が緩やかになる。また、のり肩の上流側と下流側測定点の距離については、風向角が90度の場合は6mであるが、図4に示すとおり風向角が減少するにつれて見かけの距離が長くなり、風向角が30度の場合、2倍の12mになる。

図5に、盛土上の風速測定点を示す。実際の観測用風速計は盛土上のり肩に設置されている場合が多い。軌道中心から3m離れた上流側および下流側を想定し、測定点は、鉛直上方にレールレベル（R.L.）からの高さ1mか

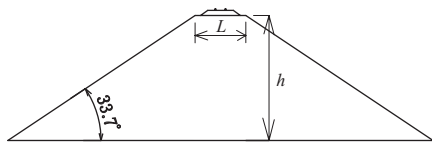


図3 単線盛土模型の断面形状

表1 単線盛土模型諸元(実寸換算寸法)

のり面勾配	施工基面幅 L (m)	盛土高さ h (m)
1:1.5 (33.7°)	5.68	2,5,8,11,14

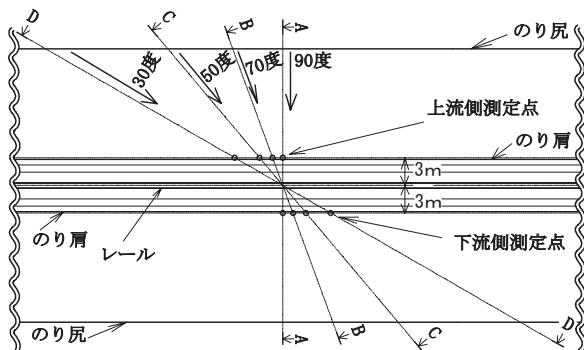


図4 盛土模型平面図と風向角 α

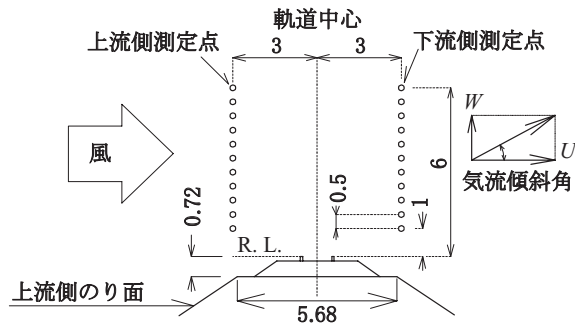


図5 風速測定点(実寸換算寸法, 単位:m)

ら6mまでの範囲で、 $h=2m, 8m, 14m$ の場合は0.5m間隔、 $h=5m, 11m$ の場合は1m間隔とした(図5)。現地の観測用風速計は線路両側に設置されているとは限らず、片側の場合には風向によって下流側になる場合があるため、風があらゆる方向から吹く場合を想定し、下流側の風速も測定した。

2.2.4 風速測定方法

風速測定には熱線風速計(Dantec社製, StreamLine)を使用した。センサーには主流方向成分 U と鉛直方向成分 W の2次元風速(図5)を測定できるX型プローブ55P63を使用した。センサーはトラバース装置で支持し、鉛直方向に移動させることにより鉛直分布を測定した。熱線風速計の較正に際しては、乱流境界層生成装置の一部を撤去した。計測系については、ローパスフィルター300Hz、サンプリングレート1,000Hzの設定とした。測定データはサンプリング時間が約16秒間の測定(16,384点のデータ収録)を各測定点で2回ずつ実施し、主流方

向成分 U と鉛直方向成分 W の平均値と標準偏差をそれぞれ算出し、2回の平均値を各測定点の平均風速と風速変動(実効値)とした。本報告中、以下では平均値を測定風速とし、風速の主流方向成分を水平風速、鉛直方向成分を鉛直風速と呼ぶ。ここで、鉛直成分の符号は下から上に吹く風を正とした。

3. 風速測定結果

3.1 盛土上の風速ベクトルと鉛直分布

盛土上の風の状態を見るために、盛土上測定点の風速ベクトルを図6に示す。図6は代表例として $h=8m$ 、風向角 $\alpha=90$ 度の風速ベクトルである。ここで、矢印の大きさは風速の大きさを示す。同図には風速の大きさを比較するために風速30m/sの風速ベクトルも示す。図6より、上流側測定点では盛土の影響により吹き上げの風となり、レールレベルに近いほど傾斜角が大きくなっている。下流側では上流側より傾斜角が小さく、流れが水平に近づく傾向が見られる。また、下流側R.L.1mの測定点では、R.L.2m以上の風速と比較して小さくなっていることが分かる。

盛土に対して真横の風の場合と斜め前方から吹く風では、盛土上の風速が変化する。図7に、風速比 U/U_0 の鉛直分布の風向角による比較を示す。ここで、風速比 U/U_0 は基準風速 U_0 (実寸換算高さ72mの位置で風速30m/sに相当)で割った値、盛土高さは $h=8m$ の例を示す。盛土高さ8mの場合、レールレベル高さの接近流の水平風速は17.6m/sであり、風速比 U/U_0 は0.59となる。盛土の上流側では風向角30度(△印)の場合には接近流の風速比に近づき、風向角50度ではそれよりも大きくなり、風向角70度の場合に最も風速比が大きくなっている。また、風速比 U/U_0 の鉛直分布について見ると、レールレベルからの高さによらずほぼ一定となる傾向が見られる。一方、下流側では上流側の風速比 U/U_0 よりも大きい傾向を示し、鉛直分布の風速比 U/U_0 がR.L.2m以上で一定となる傾向が見られる。ただし、R.L.2mから低い測定点では風速比 U/U_0 が一定の領域と比べて減速する傾向が見られる。

3.2 盛土高さの影響

乱流境界層下の水平風速は、前述したように地表面付近では低く上空ほど高い。したがって、盛土上の風速も盛土高さが高くなるほど風速が高いと予想される。風向角 $\alpha=90$ 度の場合の盛土上の水平風速と盛土高さの関係を図8に示す。図8(a)より、上流側について見ると、レールレベル高さの接近流の風速が盛土高さ $h=8m$ の場合には17.6m/sであるが、どの測定点高さでも約21m/sとなっている。また、盛土高さが高くなるにつれて水平風速が一定の増加傾向となるのが分かる。この傾向はレールレ

特集：環境技術

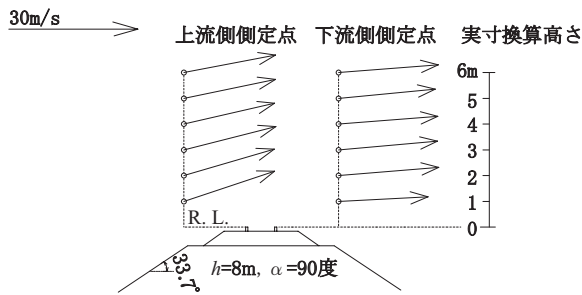


図6 風速ベクトルの例 ($h=8\text{m}$, $\alpha=90\text{度}$)

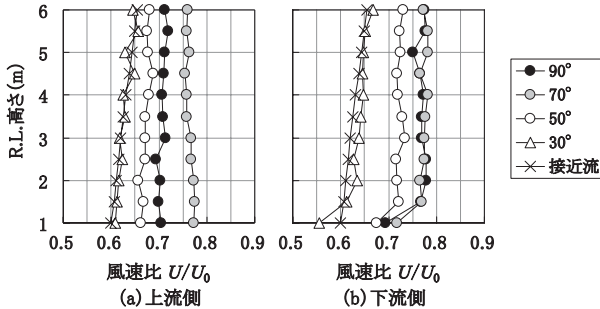


図7 水平風速の鉛直分布 ($h=8\text{m}$)

ベルからの高さによらないが、盛土高さ $h=2\text{m}$ および $h=5\text{m}$ の R.L.2m 以下では増加傾向が異なっている。図8(b) の下流側について見ると、水平風速が測定点 R.L.2m 以上の範囲では、盛土が高くなるにつれて増加し、水平風速が盛土表面からの測定高さによらず一定となる傾向が見られる。また、上流側よりも水平風速が高い。下流側測定点 R.L.1m の水平風速は盛土高さ $h=11\text{m}$ までは盛土高さが高くなるにつれて増加する傾向を示すが、水平風速の大きさと増加量が小さく、盛土高さ $h=14\text{m}$ では $h=11\text{m}$ より減少する傾向を示す。このことから下流側測定点 R.L.1m では盛土上の流れの状態が他の測定点と異なることが分かる。

図6の風速ベクトルで示したように、盛土上では吹き上げの風になる傾向が見られる。図9に盛土上の鉛直風速と盛土高さの関係を示す。風向角は図8の条件と同様に真横の風（風向角 90度 ）である。図9(a)より上流側について見ると、盛土高さが高くなるにつれて鉛直風速が増加する傾向が見られる。この増加率は測定高さによらずほぼ一定であり、盛土高さ $h=2\text{m}$ から $h=14\text{m}$ に 12m 高くなると鉛直風速は約 5m/s 増加する。測定点の高さについてみると、盛土表面に近づくほど、鉛直風速が大きくなる傾向が見られ、測定点 R.L.6m の鉛直風速よりも R.L.1m の測定点は約 3m/s 大きい。図9(b)より、下流側について見ると、盛土が高くなるにつれて、鉛直風速が増加し、測定点が R.L.2m 以上で鉛直風速が測定点高さによらず一定となる傾向が見られる（上流側と増加率があまり変わらず、盛土高さ h の増加量 12m に対して鉛直風速の増加量が約 5m/s ）。しかし、測定点が R.L.1m の場合、R.L.2m 以上の鉛直風速の増加率よりも小さくなっている。また、測定点高さによらず、盛土高さ $h=2\text{m}$ の場合には、

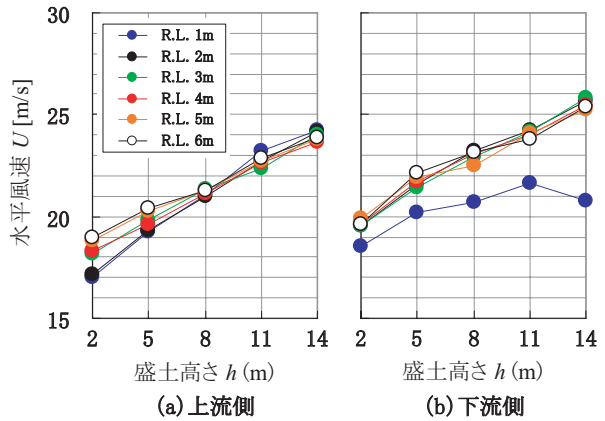


図8 水平風速と盛土高さの関係 ($\alpha=90\text{度}$)

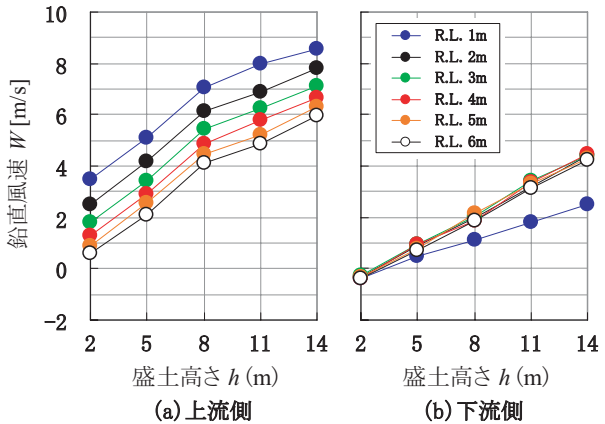


図9 鉛直風速と盛土高さの関係 ($\alpha=90\text{度}$)

鉛直方向の風速成分がほぼ 0 になることが分かる。

3.3 風向角の影響

盛土高さ $h=8\text{m}$ の場合の水平風速と風向角の関係を図10に示す。図10(a)より、上流側測定点について見ると、水平風速は測定点高さによらず同じ値となる傾向が風向角 $\alpha=90\text{度}$ から 50度 において見られる。風向角特性については、風向角 $\alpha=70\text{度}$ の時に水平風速が最大になる傾向が見られる。図10(b)より、下流側について見ると、水平風速は R.L. 高さ 1m の測定点を除き、測定点高さによらず同じ値となる傾向が風向角 $\alpha=90\text{度}$ から 50度 において見られる。測定点 R.L.1m では、R.L.2m 以上の測定点よりも水平風速が約 2m/s 小さくなる傾向が全風向角で見られる。風向角特性については、風向角 $\alpha=90\text{度}$ または 70度 の時に水平風速が最大になる傾向が R.L.1m から 6m の測定点で見られる。浅い風向角の $\alpha=30\text{度}$ において、上流側および下流側測定点の水平風速が盛土表面に近づくほど小さくなる。これは風向角が小さいほど、盛土の斜面に沿って流れる風の増速する効果が弱まり、接近流の風速の特性に近づくためと推測される。

次に、鉛直風速と風向角の関係について図11に示す。図11(a), (b)より、鉛直風速は上流側と下流側で風向角特性と風速が大きく異なることが分かる。図11(a)より、

上流側について見ると、レールレベルからの高さにより鉛直風速の大きさが異なり、風向角 90 度あるいは 70 度で最大となり、風向角が小さくなるにつれて鉛直風速が小さくなる傾向が見られる。また、測定点が低くなるほど鉛直風速が大きくなる傾向が見られる。図 11(b)より、下流側の鉛直風速は上流側よりも著しく小さくなる傾向が見られる。また、風向角特性については風向角 70 度において鉛直風速が最大となり、風向角 30 度から 90 度の 60 度の変化に対して差が 2m/s 程度となり風向角による風速差が小さい傾向が R.L.1m から 6m の測定点で見られる。R.L.2m 以上の測定点では鉛直風速は測定点高さによらず一定となる傾向がいずれの風向角においても見られる。

4. 車両高さの接近流と盛土上の風速の関係

4.1 盛土上の水平風速

強風時の車両の走行安全性を検討する場合、車両に働く空気力（横力： S 、揚力： L 、ローリングモーメント： RM ）と観測する風速の関係が重要となる。一般に風速は観測位置で異なり、実際に設置されている風速計の位置もそれぞれ違っている。そのため、接近流の車両高さの風速 U_V を車両に働く空気力を評価する上での基準風速とし、その風速と盛土上の水平風速 U との関係を示す。

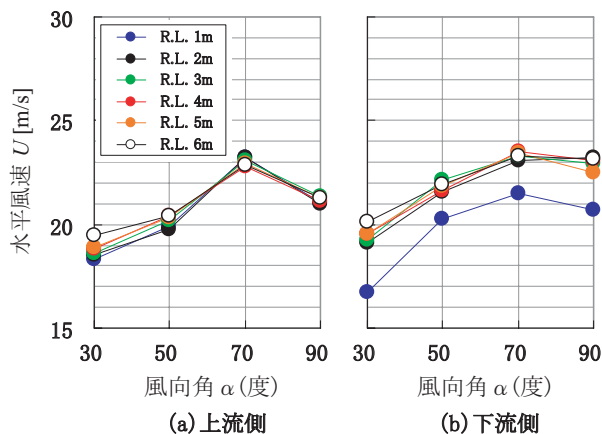


図 10 水平風速と風向角の関係 ($h=8m$)

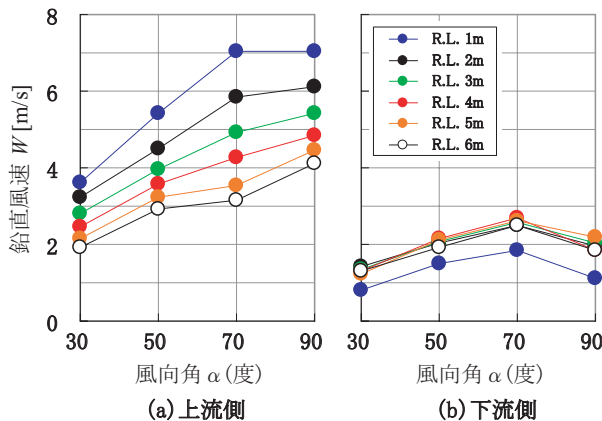


図 11 鉛直風速と風向角の関係 ($h=8m$)

にしておくことが、実際の盛土上に設置されている風速計で観測されている風速から運転規制値を判断する場合に有効と考えられる（図 12）。車両高さの接近流風速 U_V を、平坦な地表面からの高さ H_V での接近流の風速とすると、基準高さ H_V は例えば盛土高さ 8m の場合、施工基面からレールレベルまでの高さ 0.72m と車体中心高さ 2.36m を盛土高さ 8m に足した 11.08m となる。

図 13 に、風向角 $\alpha=90$ 度の時の車両高さの接近流の平均風速 U_V に対する、盛土上の風速比 U/U_V と盛土高さの関係を示す。これにより盛土上の測定点では車両高さの接近流に対し、どれだけ風速が変化しているかが分かる。図 13(a)より、上流側の風速比 U/U_V は $h=5m$ 以上の場合、測定点 R.L.3m 以上で 1.13 から 1.17 の範囲となっている。測定点 R.L.2m 以下の風速比 U/U_V は盛土高さ 2m と 5m の場合、R.L.3m 以上の値より小さい値となっている。図 13(b)より、下流側の風速比 U/U_V は測定点 R.L.2m 以上で 1.21 から 1.27 の範囲となっている。特に注目すべき点は測定点 R.L.1m の場合、盛土高さが高くなると風速比 U/U_V が減少する点である。

車両高さの接近流風速 U_V に対する高さ $h=8m$ の盛土上の風速比 U/U_V と風向角の関係を図 14 に示す。高さ $h=8m$ の場合、図 14 より、上流側は風向角 $\alpha=30$ 度から 70 度の場合、風向角が大きくなるにつれて風速比 U/U_V が増加し、風向角 70 度で約 1.25 の最大値となる。風向

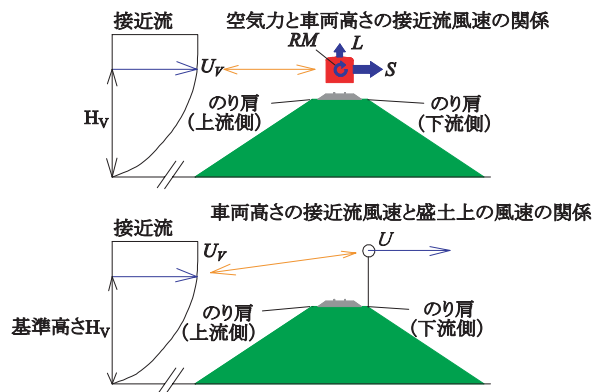


図 12 盛土上の風速と空気力の関係

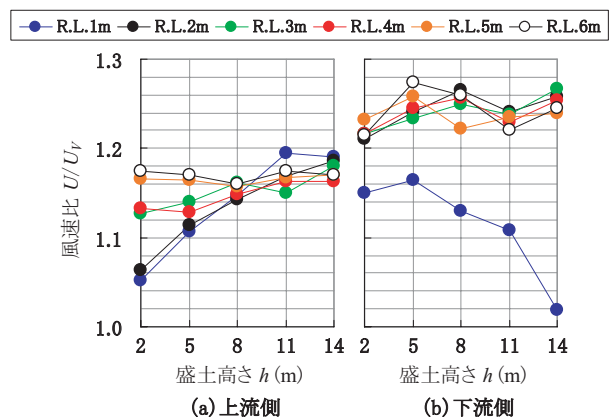


図 13 U/U_V と盛土高さの関係 ($\alpha=90$ 度)

特集：環境技術

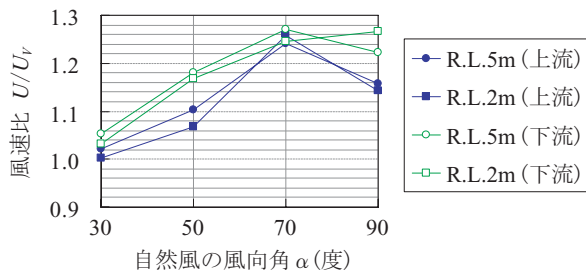


図14 U/U_v と自然風の風向角 α の関係 ($h=8m$)

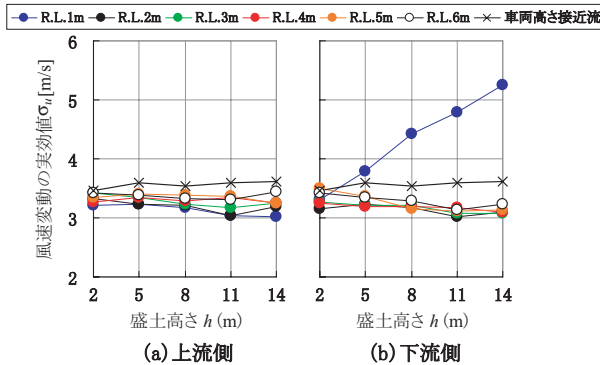


図15 風速変動(実効値)と盛土高さの関係 ($\alpha=90$ 度)

角 $\alpha=90$ 度では70度より小さくなる。それに対し下流側では、風速比 U/U_v が上流側より大きく、風向角 $\alpha=30$ 度から70度の場合、風向角が大きくなるにつれて風速比 U/U_v が増加し、風向角 $\alpha=90$ 度または70度で約1.25の最大値となる。この上流側と下流側の風向角特性の違いによる風速比 U/U_v の差が風向角 $\alpha=90$ 度で大きくなる。これらの風向角特性は測定点R.L.2mとR.L.5mでほぼ共通した傾向が見られ、その中間の高さでも同様であった。風向角 $\alpha=30$ 度の場合、上流側よりも下流側の方がやや大きい。以上のことから、上流側、下流側ともに風速比 U/U_v が1から1.3の間の値となり、盛土高さよりも主に風向角の影響を受けて変化することが分かる。したがって、観測風速の評価時に風向の影響について注意することが重要である。

4.2 盛土上の風速変動

盛土上の平均風速の測定結果から、盛土上のある範囲において盛土高さや幅などの形状によっては、主流が盛土表面から大きく剥がれ、剥離領域に入ると考えられる。そこで風速の変動成分について検討した。図15に風向角 $\alpha=90$ 度の場合の盛土上の風速変動(実効値)と盛土高さの関係を示す。図中に比較のために、車両高さの接近流の風速変動を示す。図15より下流側のR.L.1m点を除いて盛土高さによらず接近流の風速変動より小さくなること分かる。下流側測定点R.L.1mは、盛土高さ $h=2m$ の場合には接近流の風速変動より小さいが、盛土高さが高くなると風速変動が大きくなり、盛土高さが $h=2m$ から14mに高くなると風速変動(実効値)が約2m/s増加する。このことから下流側測定点R.L.2m未満では

盛土の影響により剥離領域内に入る可能性があり、風速計の設置には注意が必要である。

5. まとめ

鉄道構造物の中で単線盛土を対象にした風洞実験を実施し、適切な観測用風速計設置位置と運転規制の検討に資するため、強風時の車両に働く空気力を評価する際の基準風速と観測風速の関係を明らかにした。風洞実験では乱流境界層(べき指数1/4)の風洞気流を用いて、盛土高さと風向角をパラメータとして、単線盛土上の風速測定を実施した。以下に風洞実験で得た風速に関する知見をまとめる。

- (1) 盛土高さが高くなると盛土上の水平風速は速くなる。車両高さの接近流と上流側のり肩の測定点を比較すると、最大で約3割増速する傾向を示す。また、風向角が90度または70度のように直角に近い方が水平風速の増加が大きく、浅い角度になると風速は接近流に近くなる。
- (2) 盛土上の風は吹き上げとなり、上流側では吹き上げの傾斜角は盛土高さ8mのR.L.3m点で約14度となる。下流側では、吹き上げの傾斜角は上流側の傾斜角よりも小さく、逆に水平風速は測定点R.L.2m未満を除き上流側よりも速くなる傾向が見られる。
- (3) 盛土上のR.L.2m以上の測定点では、接近流の鉛直分布の影響と盛土の流れに対する影響を受けて、水平風速の鉛直分布が一定となる傾向がある。下流側測定点のR.L.2m未満の高さでは、盛土上の流れの剥離領域に入っていると考えられる。

6. おわりに

今回は中層市街地に相当する乱流境界層(べき指数1/4)の条件で風洞実験を行った。盛土上の風速分布は接近流の風速の鉛直分布と盛土の風の駆け上がりの影響を大きく受ける。今後、市街地だけでなく田園地帯の境界層分布(べき指数1/7)などの他の条件や橋梁等の構造物についても風洞実験を実施していく予定である。また、風洞実験による風速分布と現地試験による実際の風速の比較検証を行いたいと考えている。

文献

- 1) 鈴木実ほか：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
- 2) 塩谷正雄：強風の性質(三訂新版)，開発社，pp.35-46, 1992
- 3) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説(2004)，pp.21-22, pp.344-349