

構造物周りの風速計位置が観測値に 及ぼす影響の評価

荒木 啓司* 今井 俊昭*
種本 勝二** 鈴木 実**

Evaluation of Influence of Anemometer Position around Railway Structures on Observation Data of Wind

Keiji ARAKI Toshiaki IMAI
Katsuji TANEMOTO Minoru SUZUKI

Anemometers for operation control are mostly installed close to the railway structures. Therefore, the railway structures might influence wind velocity data measured with the anemometer. The authors investigated the influence of the anemometer position around typical railway structures on the wind velocity by the wind-tunnel test and the field observation of wind. In the case of single track embankment with the height of 6.5m from the ground surface, the wind velocities on the leeward side increase more than those on the windward side of the railway structures, at the level up to 4m above the rail level, as the wind direction approaches to 90 degrees to the longitudinal direction of the railway structure.

キーワード：規制用風速計，取り付け位置，構造物影響，風洞試験，現地観測

1. はじめに

強風に対する列車の安全を確保するために、現在、鉄道沿線には規制用風速計が設置され、風速の観測値に基づき列車の運転を抑止する、あるいは走行速度を制限するといった運転規制が行われている。その際、橋梁など線路構造物の近傍に取り付けられた風速計で観測される風速値に対する線路構造物の影響については、定量的に評価されることはなかった。また、鉄道強風対策協議会がとりまとめた風観測の手引き¹⁾でも、風速観測値に対する線路構造物の影響については必ずしも定量的に記載されていない。しかし、過去の観測²⁾から、橋梁上に取り付けられた風速計による風速の観測値が構造物の影響を受ける場合があり、より合理的な運転規制のためには、構造物周りの風速計の位置の違いが風速の観測値に及ぼす影響を定量的に把握したうえで、より適切な箇所に風速計を取り付ける必要がある。

本稿では、適切な風速計の取り付け位置の検討に際しての基礎資料とすべく、橋梁や盛土周りの風速特性を風洞試験と現地観測により調べ、風速計位置の違いによる風速の観測値が構造物から受ける影響について検討した結果を報告する。

* 防災技術研究部 気象防災研究室

** 環境工学研究部 車両空力特性研究室

2. 風速観測値に対する構造物影響の評価の概要

本研究では、在来線の代表的な線路構造物である単線橋梁、複線高架橋および単線盛土の3種類を対象に、風速計の位置の違いによって風速の観測値が構造物から受ける影響を、風洞試験と現地観測の結果に基づき把握した。単線橋梁と複線高架橋については2種類の桁高(1m, 3.5m)に対して3種類の断面形状(標準形, 最大幅形, 桁幅形)の計6種類, 単線盛土については1種類(高さ6.5m)の合計7種類の線路構造物形状を設定した(図1~3)。なお、風洞試験で用いた縮尺1/40の単線盛土模型の断面形状(図3, 図5右)は、現地観測を行った実物大の単線盛土の断面形状(図9)と幾何学的に相似である。

まず、風洞試験(縮尺1/40)より7種類の線路構造物周りの測定点における風速を把握し、線路構造物の影響を受けない風上側の車体中心高さの位置における風速と比較することとした。なお、これ以降、線路構造物の影響を受けない風上側の車体中心高さの位置を、風速を評価する基準位置とし、その高さはレールレベル(R.L.)から2.5mの高さとする。

ところで、風洞試験の結果として一般的に示されている測定風速は、一測定時間の平均風速である。一方、実際の強風時運転規制では、風速計で観測された瞬間風速に基づきその判断が行われている。したがって、本研究

特集：防災技術

で評価すべき風速観測値に対する構造物の影響は、瞬間風速で表現する必要があると考えた。そこで、単線盛土を対象とした風向風速の現地観測を行い、この結果から、平均風速と最大瞬間風速を関係づける指標の一つであるピークファクター k を求めた（ピークファクター k の定義については4.2節に後述する）。そして、風洞試験で得た各測定点の平均風速とその標準偏差、現地観測で得たピークファクターを用いて、線路構造物周りの各点および基準位置での最大瞬間風速を推定した。さらに、各点での最大瞬間風速を基準位置での最大瞬間風速で除した最大瞬間風速比 R_i を求めることで、風速計位置の違いが最大瞬間風速に及ぼす影響を定量的に把握した。

風洞試験および現地観測により、単線橋梁、複線高架橋ならびに単線盛土の各線路構造物周りの各点での最大瞬間風速比 R_i の算出フローを図4に示す。

3. 風洞試験による線路構造物周りの風速測定

3.1 風洞試験の概要

単線橋梁、複線高架橋および単線盛土を模擬した線路構造物模型を用いて、風洞試験により各々の線路構造物周りで風速を測定した。線路構造物別の風洞試験条件を表1に、風速測定点を図5に示す。熱線風速計のプロープには、流れの主流方向成分と鉛直方向成分の2次元風速を測定できるX型プロープを使用したが、次節以降で述べる風洞試験結果では、主流方向成分のみを扱う。また、鉄道沿線での代表的な強風地である田園地域を想定し、風洞気流は当該地域の地表面付近の自然風の鉛直分布を模擬した乱流境界層とした。べき指数 α については、日本建築学会建築物荷重指針・同解説³⁾ による分類に従い、田園地域が該当する地表面粗度区分IIでのべき指数である0.15に近い $\alpha = 0.14$ を採用した。以下、この

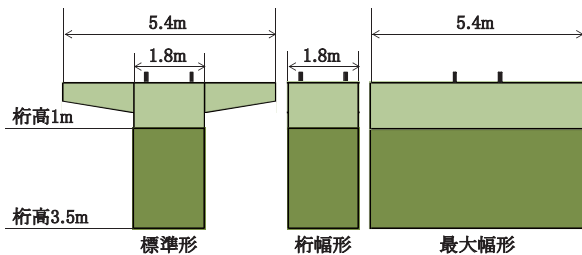


図1 線路構造物形状（単線橋梁）

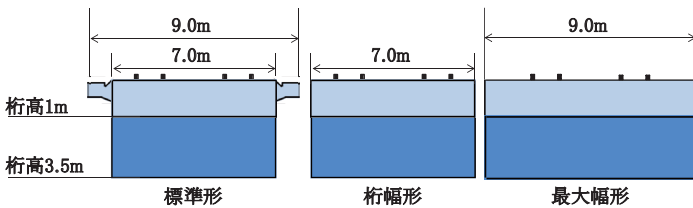


図2 線路構造物形状（複線高架橋）

気流をべき指数 1/7 と呼ぶことにする。図6に、風洞試験で再現した乱流境界層（べき指数1/7）の主流方向の平均風速および乱れの強さ（風速の標準偏差 σ / 平均風速 U ）の鉛直分布を単線橋梁および複線高架橋の例で示す。図6に示したのは、線路構造物模型が設定されていない状況下でターンテーブル上における主流方向の風速比（平均風速 U / 試験風速 U_0 ）と乱れの強さである。これ以降、線路構造物模型が設定されていない場合のターンテーブル上における主流方向の平均風速分布を「接近

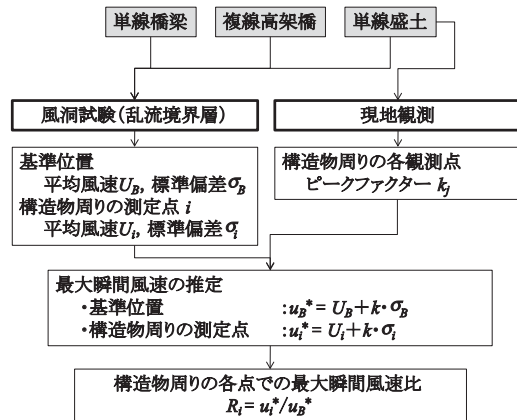


図4 構造物周りの各点における最大瞬間風速比 R_i の算出フロー

表1 風洞試験条件一覧（寸法：模型寸法）

線路構造物	単線橋梁	複線高架橋	単線盛土
使用風洞	(株)IHI 大型大気乱流風洞 (幅 6m × 高さ 3m × 長さ 24m)		鉄道総研米原大型低騒音風洞 (幅 5m × 高さ 3m × 長さ 20m)
熱線風速計	KANOMAX 社製, IHW-100 (プロープ: 1241-20)		KANOMAX 社製, SYSTEM7000 (プロープ: 1241-20)
模型縮尺	1/40		
試験風速	設定値	8m/s	20m/s
	測定値 U_0	・ターンテーブル中心から 15.6m 上流 ・風洞中心 ・風洞床面から高さ 2.74m の位置に設置した超音波風向風速計により計測された風速	・ターンテーブル中心から 5m 上流 ・風洞中心から 1.5m 離れ ・風洞床面から高さ 1.8m の位置に設置したピトー管により計測された風速
気流条件	風速分布	乱流境界層 $U(Z)/U_0 = (Z/Z_0)^\alpha$, べき指数 $\alpha = 1/7$ $U(Z)$: 地表面からの高さ Z における風洞気流の平均風速 Z : 地表面からの高さ, U_0 : 試験風速 (測定値) Z_0 : 乱流境界層の高さ	
	乱れの強さ	約 15% (R.L. 高さ, 主流方向)	約 17% (R.L. 高さ, 主流方向)
風向角 (線路方位を 0 度として)	90 度, 67.5 度, 45 度, 22.5 度		90 度, 70 度, 50 度, 30 度
測定点数	23 点	27 点	16 点
測定項目	2 次元風速 (主流方向, 鉛直方向)		
収録	サンプリング周波数 1kHz, 約 40sec サンプリング / 測定点		

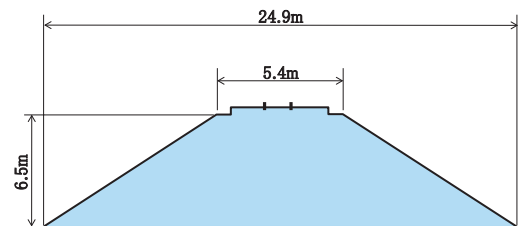


図3 線路構造物形状（単線盛土）

（図1～3の図中の数値はいずれも実寸長さを表す）

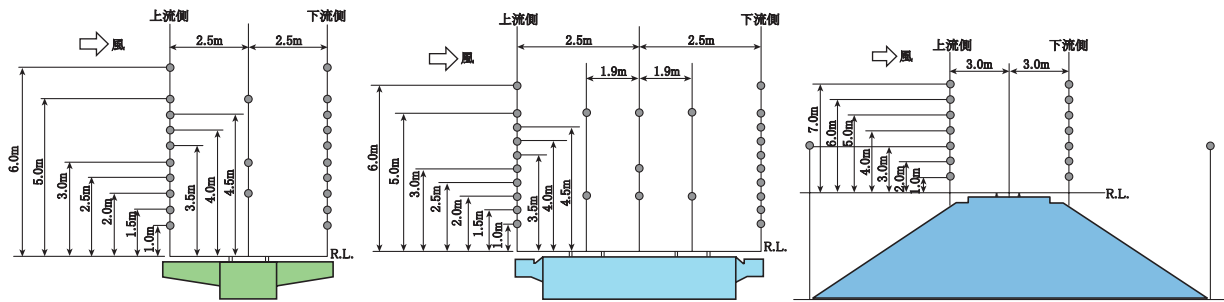


図5 風洞試験における線路構造物周りの風速測定点（左：単線橋梁，中：複線高架橋，右：単線盛土）
（図中の数値はいずれも実寸長さを表す）

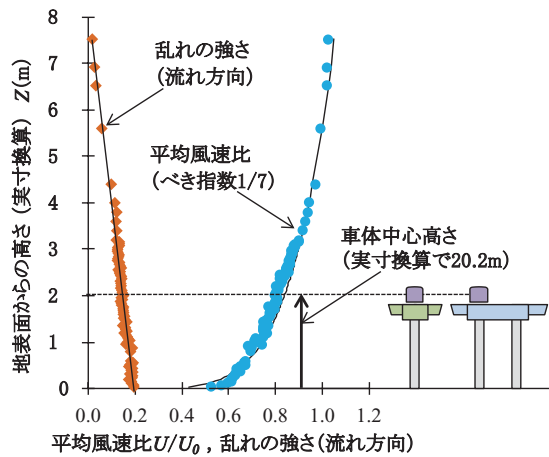


図6 接近流の鉛直分布
（単線橋梁および複線高架橋の例，模型縮尺 1/40）

流」と呼ぶことにする。つまり、風洞試験における基準位置での平均風速 U_B とは、R.L. から 2.5m の高さにおける接近流風速を意味する。本研究で実施した風洞試験における基準位置（R.L. から 2.5m の高さ、実寸換算で単線橋梁および複線高架橋のケースでは地上 20.2m、単線盛土のケースでは地上 10m の高さに相当）での平均風速 U_B および乱れの強さ σ_i/U_B は、単線橋梁および複線高架橋の試験ではそれぞれ 6.6m/s および 0.14、単線盛土の試験ではそれぞれ 15.0m/s および 0.17 であった。なお、表 1 では、単線橋梁、複線高架橋と単線盛土では異なる風洞を用いた試験条件となっているが、二つの風洞にて同一の単線橋梁模型および複線高架橋模型を用いた予備試験を実施し、それぞれについて、風洞の違いによる風速測定結果の違いが小さいことを確認している。

3.2 風洞試験結果

3.2.1 平均風速と乱れの強さの断面形状による違い

実在する橋梁や高架橋の断面形状は、同じ桁高でも多岐にわたる。そのため、断面形状の違いが構造物周りの風速分布に強く影響する場合には、形状毎に基準位置での風速と比較する必要がある。そこで、一般的な形状である標準形周りの風速分布に対して、桁幅形や最大幅形（図 1, 2）の断面周りの風速分布がどの程度異なるかを

調べた。図 7 に、桁高 3.5m の複線高架橋を対象とした、風向角 90 度での風洞試験から求めた、断面形状別の平均風速比（各測定点での平均風速 U_i / 基準位置での平均風速 U_B ）と乱れの強さ（各測定点での平均風速 U_i からの標準偏差 σ_i / 各測定点での平均風速 U_i ）を例示する。ここで、図 7 の平均風速比の図中に示した点線は、接近流風速を基準位置（R.L. から 2.5m の高さ）での平均風速 U_B で除した接近流の風速比を示している。本研究で実施した風洞試験における接近流風速は、図 6 に示したように鉛直分布をもつため、高さ方向に風速が異なり、基準位置よりも高い（低い）位置での接近流風速は基準位置でのそれより大きい（小さい）。そのため、構造物周りの各測定点での平均風速 U_i を基準位置での平均風速 U_B で除した平均風速比には、構造物の影響による増速あるいは減速の効果に加えて、接近流の鉛直分布に基づく高さ方向の接近流風速の違いによる影響の両方が含まれていることになる。そこで、各測定点高さにおいて、平均風速比（図 7 の黒、赤および緑色のプロット）から接近流の風速比（図 7 の点線のプロット）を差し引いて構造物の影響のみを取り出した。これ以降で述べる平均風速比および最大瞬間風速比の結果は、いずれも上記の処理を行って構造物の影響のみを取り出した結果である。

図 7 より、平均風速比の断面形状による違いは、下流側よりも上流側で大きく、さらに R.L. からの高さが低い測定点ほど顕著であることが分かる。R.L. からの高さが 1m の上流側測定点での平均風速比は、1.13（標準形）、1.14（最大幅形）、0.92（桁幅形）で標準形と最大幅形との差は 1%、桁幅形との差は 21% であった。下流側では、標準形の平均風速比に対する残りの 2 種類の断面形状の平均風速比の差異は R.L. からの高さ方向に 1 ~ 11% であった。また、図 7 より乱れの強さの断面形状の違いによる差異は小さいことがわかった。標準形の乱れの強さは高さ方向に 0.12 ~ 0.13（上流側）、0.11 ~ 0.37（下流側）であったが、標準形に対する最大幅形の乱れの強さの違いは上流側、下流側ともに高さ方向に最大で 2%、桁幅形では高さ方向に最大で 2%（上流側）、9%（下流側）であった。なお、図 7 に示した以外の試験ケースの結果

特集：防災技術

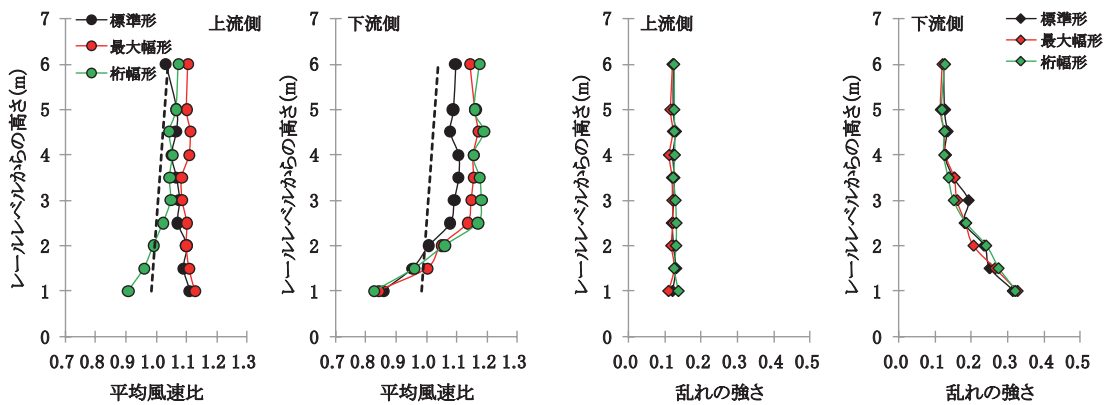


図7 断面形状別の平均風速比と乱れの強さ（複線高架橋，桁高3.5m，風向角90度）

（平均風速比の図中の点線は，基準位置（R.L.から2.5mの高さ）の風速 U_B で無次元化した接近流の鉛直分布を表す）

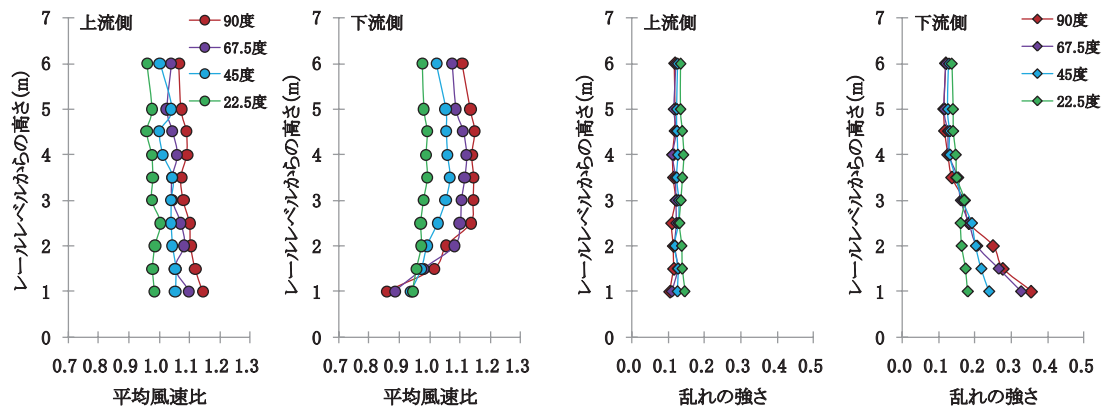


図8 風向角別の平均風速比と乱れの強さ（複線高架橋，最大幅形，桁高3.5m）

においても，風向角の違いや桁高の違いによらず，標準形と最大幅形の平均風速比が互いに近い鉛直分布をもつこと，乱れの強さは断面形状の違いに大きく依存しないことを確認した。

以上の結果に基づき，後述する単線橋梁および複線高架橋の最大瞬間風速比の算出においては，3種類の断面形状を用いた風洞試験結果のうち，最大幅形の結果を採用することとした。これにより，実在する単線橋梁や複線高架橋を対象に，風観測値に対する構造物影響を検討する場面において，構造物の断面形状が本研究で用いた標準形の断面形状と若干異なっても，その縦横寸法が同様とみなせれば，最大幅形で求めた最大瞬間風速比の適用が可能となる。

3.2.2 構造物周りの平均風速と乱れの強さ

風洞試験から求めた風向角別の平均風速比と乱れの強さについて，複線高架橋（桁高3.5m）の例を図8に示す。

上流側の測定点では，風向角が大きいほど，平均風速比が大きい傾向がみられたが，いずれの風向角でも，平均風速比はR.L.からの高さ方向には大きく変わらなかった。上流側の乱れの強さは，風向角の違いやR.L.からの高さの違いによらず0.10～0.15の範囲にあった。下流側の測定点では，風向角によって平均風速比の鉛直分布に大きな違いがみられた。R.L.から2m以上の測定点では，

風向角が大きいほど平均風速比が大きい傾向がみられたが，R.L.から1.5mの高さでは，4つの風向角の平均風速比はほぼ同程度，R.L.から1.0mの高さでは風向角90度と67.5度での平均風速比が45度および22.5度のそれよりも小さかった。下流側の乱れの強さは，R.L.からの高さが2m以下で風向角による違いが大きく，風向角が大きいほど乱れが強い結果となった。

4. 現地観測による単線盛土周りの風向風速観測

4.1 現地観測の概要

平均風速から瞬間風速を推定する際に用いるピークファクターの算出を目的として，実在の単線盛土周りで風向風速の現地観測を行った。観測点の配置を図9に示す。観測期間は2009年2月14日から2010年2月28日までの380日間である。風速計には，プロペラ型（R.M.YOUNG社製CYG-5103），風杯型（㈱ホリ一製02-2E）および超音波型（㈱ソニック製SAT-540）の3種類を使用した。プロペラ型を全観測点に配置し，さらに観測点BおよびC1には風杯型と超音波型を併設した。観測項目は風向と風速（風杯型は風速のみ，超音波型は水平2成分に加え鉛直成分の風速も観測）で，サンプリング周期は1秒とした。

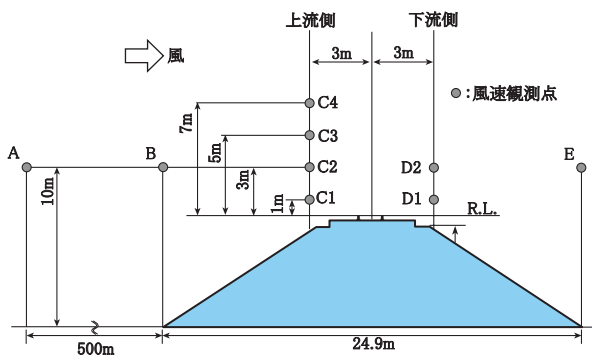


図9 現地観測による単線盛土周りの風速観測点の配置

4.2 現地観測結果から求めたピークファクター

単線盛土周りの9観測点で得られた風速データを用いて、各観測点*j*におけるピークファクター k_j を求めた。ここで、ピークファクター k_j とは、観測点*j*の最大瞬間風速 v_{maxj} から平均風速 V_j を引いた値を平均風速 V_j からの標準偏差 σ_j で除したものであり、式(1)で表される。

$$k_j = \frac{v_{maxj} - V_j}{\sigma_j} \quad (1)$$

9観測点に配置されたプロペラ型風向風速計で得られた風向風速データを用いて、1分代表値を作成したうえで、B観測点を基準点として、当該風速計で1分間平均風速10m/s以上が観測された同時刻の全9台分の1分代表値を強風事例として抽出した。抽出した強風事例のそれぞれについて、式(1)を用いて、ピークファクター k_j を求めた。図10に9観測点のピークファクター k_j の相対出現度数を示す。ここで、相対出現度数とは、各ピークファクターの階級に属する観測度数をデータ総数で除したものであり、ピークファクターの階級幅は0.2刻みとした。単線盛土周りの各観測点の1分代表値から求めたピークファクターの分布は、観測点の位置に関わらず $2.0 \leq k_j < 2.2$ の範囲に最頻値をとることが分かった。また、図は省略するが、上記の結果は強風時の風向にも依存しないことを確認した。さらに、風杯型風速計や超音波型風向風速計で得られたデータを用いて同様にピークファクターを求めた場合でも、最頻値の階級は同じ $2.0 \leq k_j < 2.2$ であり、風速計の種類にも依存しないことが分かった。これらの結果から、ピークファクター k_j は定数として扱うことが可能であると判断した。なお、後述する最大瞬間風速比の算出に際しては、 k に2.0を使用することとした。

5. 構造物周りの測定点における最大瞬間風速比

風洞試験により求めた各線路構造物周りの風速測定点での平均風速 U_i とその標準偏差 σ_i 、基準位置での平均風速 U_B とその標準偏差 σ_B ならびに現地観測により求めたピークファクターである $k=2.0$ を用いて、各線路構造物回りの風速測定点および基準位置での最大瞬間風

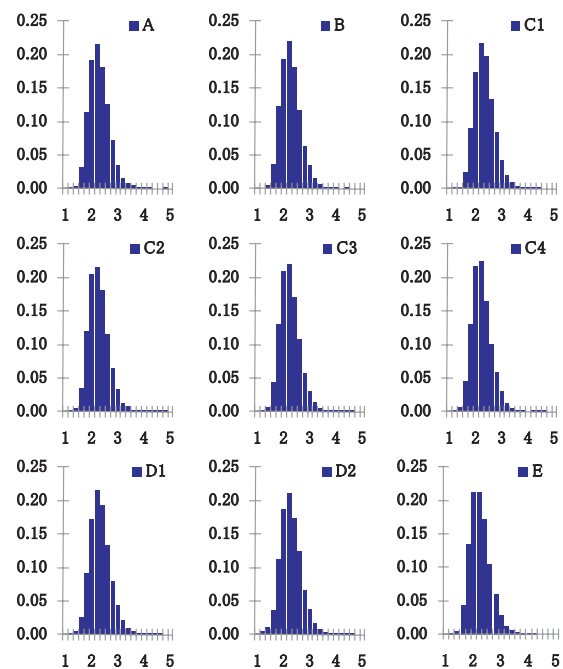


図10 現地観測結果(プロペラ型)から求めた各観測点のピークファクターの相対出現度数(横軸：ピークファクター、縦軸：ピークファクターの階級幅を0.2とした相対出現度数)

速 u_i^* および u_B^* をそれぞれ式(2)および式(3)により算出した。そして、 u_i^* を u_B^* で除することで、各線路構造物回りの風速測定点における最大瞬間風速比 R_i を求めた。

$$u_i^* = U_i + k \times \sigma_i \quad (2)$$

$$u_B^* = U_B + k \times \sigma_B \quad (3)$$

$$R_i = \frac{u_i^*}{u_B^*} \quad (4)$$

図11～13に単線橋梁、複線高架橋(共に桁高3.5m)および単線盛土を例にとり、各線路構造物周りの風速測定点での最大瞬間風速比 R_i を風向角別に示す。

図11～13より、構造物の種類や測定点の上流側、下流側に関わらず、風向角が大きいほど、また測定点の高さが低いほど最大瞬間風速比が大きい傾向がみられ、この傾向は特に下流側で顕著であった。逆に、構造物の種類や測定点の上流側、下流側に関わらず、風向角が線路に対して浅くなるほど、測定点の高さが高くなるほど、風向角の違いや測定点の高さの違いによる最大瞬間風速比の差異が小さくなる傾向が確認された。

下流側の測定点で、風向角別にみて最も大きな最大瞬間風速比となる風向角90度のケースで示すと、最大瞬間風速比はR.L.からの高さ方向に1.10～1.39(単線橋梁)、1.08～1.23(複線高架橋)、1.09～1.13(単線盛土)であった。最大瞬間風速比のR.L.からの高さ方向の変化量は、単線橋梁と複線高架橋でそれぞれ29%、15%、単線盛土では9%であった。基準位置での最大瞬間風速と比較して増速率の大きい測定点の範囲は、増速率20%を基

特集：防災技術

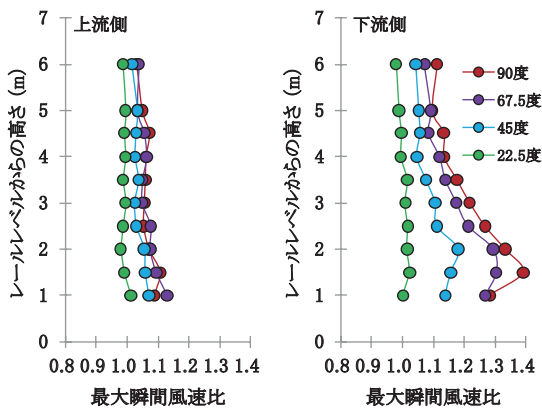


図 11 単線橋梁周りの最大瞬間風速比 (桁高 3.5m)

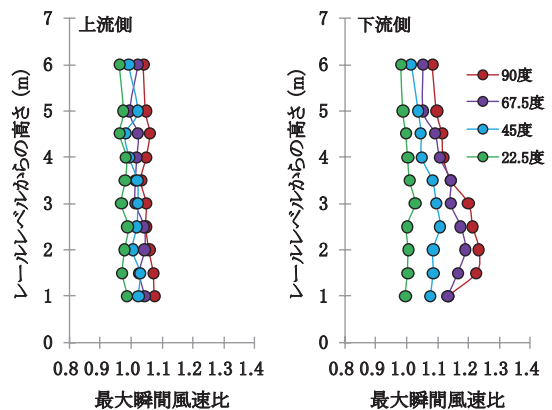


図 12 複線高架橋周りの最大瞬間風速比 (桁高 3.5m)

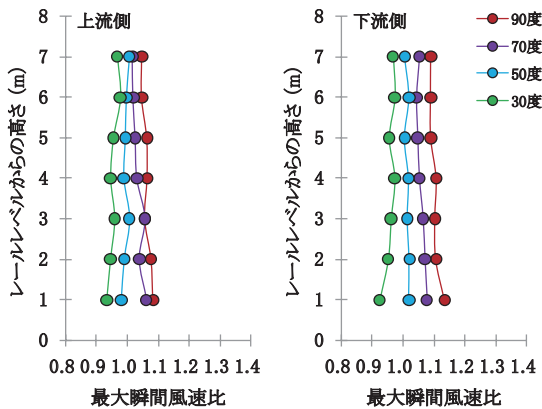


図 13 単線盛土周りの最大瞬間風速比 (高さ 6.5m)

準とした場合、単線橋梁ではR.L.から3m以下、複線高架橋ではR.L.から1.5～3mの範囲がそれぞれ該当した。さらに、単線橋梁のR.L.から1.5～2.0mの測定点高さでは、30%以上の増速率であった。単線盛土では増速率が20%以上となる測定点高さはなく、R.L.から4m以下で10%以上であった。

上流側の測定点での最大瞬間風速比は、下流側の測定点でのそれと比較すると、風向角による違い、R.L.からの高さによる違いは小さかった。風向角90度の場合、各線路構造物周りの上流側の測定点での最大瞬間風速比は、R.L.からの高さ方向に1.03～1.11(単線橋梁)、1.03～1.08(複線高架橋)、1.05～1.08(単線盛土)で、どの測定点高さでも増速傾向にあるものの、下流側の測定点でみられたような10%以上の増速率は確認されず、また高さ方向の変化量も下流側に比較して小さかった。

6. まとめ

本研究では、風速計の位置の違いによって風速観測値が構造物から受ける影響について、3種類の線路構造物(単線橋梁、複線高架橋および単線盛土)を対象に、風洞試験および現地観測により検討した。以下に、その結果についてまとめる。

(1) 線路構造物の種別によらず、風向角が90度(線路に

直交)に近づくほど、構造物の上流側よりも下流側の風速計位置で、最大瞬間風速が基準位置(線路構造物の影響を受けない風上側の車体中心高さ(R.L.から2.5mの高さ)の位置)でのそれに対して増速する傾向が認められた。

(2) 構造物の種別や測定点の上流側、下流側に関わらず、風向角が線路に対して浅くなるほど、また測定点の高さが高くなるほど、風向角の違いや測定点高さの違いによる最大瞬間風速比の差異が小さくなる傾向が認められた。

(3) 単線橋梁および複線高架橋(共に桁高3.5m)では、特に下流側のR.L.からの高さが3m以下の位置での増速傾向が顕著で、基準位置での最大瞬間風速に対して風向角90度で最大30%以上(単線橋梁)、20%以上(複線高架橋)の増速率となった。

(4) 単線盛土(高さ6.5m)では、下流側のR.L.からの高さが4m以下の位置での増速率が大きく、風向角90度で最大10%以上の増速となった。

本研究では単線橋梁や複線高架橋については3種類の形状、2種類の桁高を対象に検討したが、これらの構造物周りの現地観測は行っていない。そのため、単線盛土周りの現地観測結果から求めたピークファクターを、橋梁や高架橋周りの最大瞬間風速の推定に適用することの妥当性を検証するためには、橋梁や高架橋周りの現地観測が必要と考えている。また、盛土については、今回1種類の形状のみの検討となった。今後、盛土の形状や大きさのパターンを増やした検討を行い、成果の一般化を進めていきたい。

文献

- 1) 鉄道強風対策協議会：風観測の手引き，2006
- 2) 今井俊昭，藤井俊茂，種本勝二，島村泰介，松田洋一：風速分布の局所性に関する観測事例，鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，pp.639-642，1998
- 3) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説(2004)，pp.21-22，pp.344-349，2004