

## 風作用

### 1. 概説

風は、おもに気圧差によって生じる空気の流れである。自然風の風速、風向は時間的・空間的に変化する。また、「平均風速」と「最大瞬間風速」が使い分けられていることから、風の構造物に及ぼす作用は平均的な作用として時間的に変動しない静的作用として扱われる部分と、不規則に変動し振動問題となる動的な作用として扱われる部分とが同時に現れる。特に、動的な作用に関しては、風の変動特性のみならず、構造物の規模、構造・振動特性が関係する。

したがって、構造物の耐風設計においては、自然風の性質との関係、発生する風による作用との関係で、風荷重としての扱い、振動としての対処が適宜組み合わせられて行われる。すなわち、風による作用は、「静的な作用」と「動的な作用」に大分類し、自然風の特性和現象の発生する性状とに応じてさらに再分類して、取り扱うことが通常となっている。

### 適用範囲

ここでは、構造物への風の作用について述べるが、先に述べたように構造物への風の作用は風の特性的みならず、構造物の特性にも影響されるため、以下では橋梁を例として説明することとする。ただし、基本的な考え方は、その他の構造物においても同じである。

### 2. 風の作用と現象

風は、気象のおもに気圧差によって生じる空気の流れであり、その成因に応じて、季節風、台風、低気圧・前線性強風、竜巻、ダウンバーストなどがある。ただし、構造物の耐風設計体系においては、風の風速(あるいは平均風速)が指標となるため、風の成因については特に言及しないこととする。

風の作用は、空間的、時間的に変動し、また構造物の規模、特性にも影響され、多種多様な現象を構造物に引き起こす。通常、構造物の設計の便宜から、風の作用を現象毎に分類し、設計での対処法を定めている。

以下に、風の作用の分類と発現する現象を示す。

- 静的作用
  - ・風圧により生じる静的な変形
  - ・静的空気力による不安定現象(ダイバージェンス、横座屈)
- 動的作用
  - ・比較的低風速で発生する振幅の限定的な空力振動(渦励振)
  - ・高風速で発生し、風速の増加とともに急激に発達する空力振動(発散振動:ギャロッピング、フラッター)
  - ・風速の増加とともに徐々に発達する不規則な空力振動(ガスト応答)

### 3. 作用因子

#### 1) 作用因子と風の特性的値

風作用での作用因子としては、高度 10m、基準粗度における 10 分間平均風速として定義される基本風速:  $U_{10}$  (m/s)とする。

基本風速  $U_{10}$  は、確率変数であり、既往の観測値(年最大風速など)から極値統計手法や地形因子解析、あるいは台風シミュレーションなどの手法によって再現期待値として設定される。土木構造物では、設計風速の再現期間として、完成系に対して 50 ~ 150 年程度が、架設系に対して 1 ~ 10 年程度が使われる。道路橋耐風設計便覧においては、再現期間 100 年として、全国を 4 つの基本風速レベル(30, 35, 40, 45m/s)に区分している(図 1 参照)。ほかに、建築物に対しては建築物荷重指針において、風速マップを示している(図 2 参照)。

また、次に示す風の特性についても、基本風速と合わせて風の静的・動的作用のモデルを規定する。

- 風速の高さ方向分布
- 乱れ強さ
- 風速のパワースペクトル密度
- 風速の空間相関

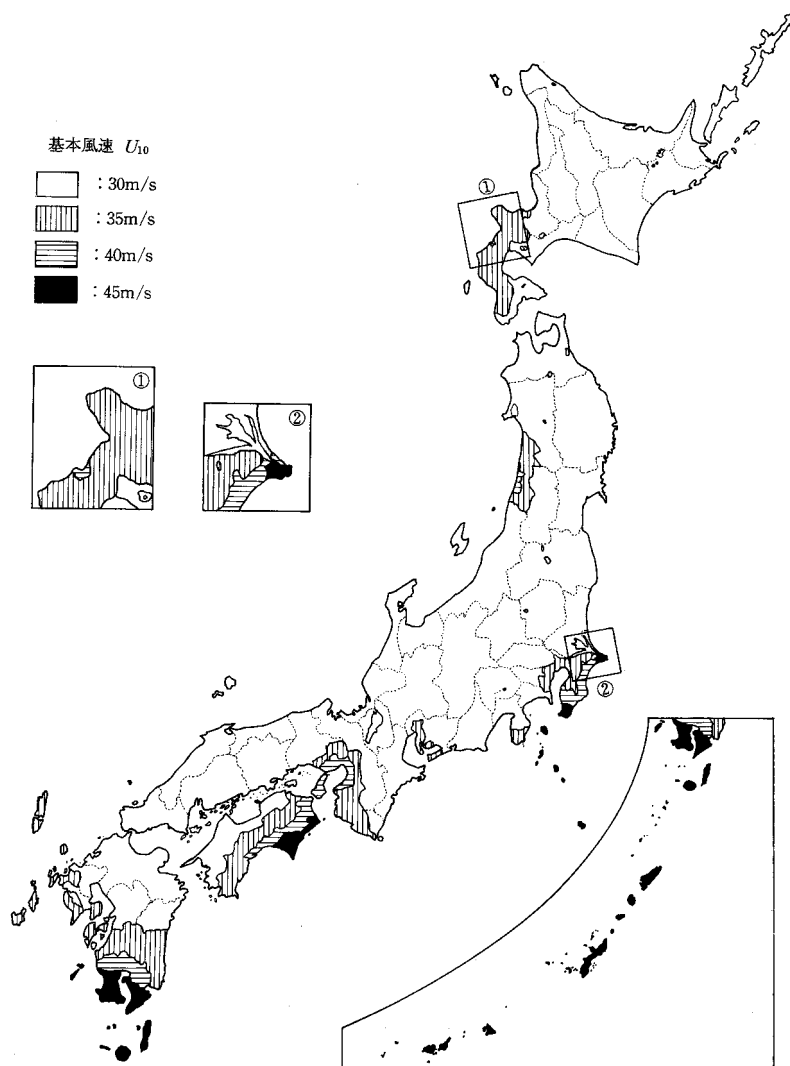


図1 基本風速  $U_{10}$  に対する風速マップ(道路橋耐風設計便覧)

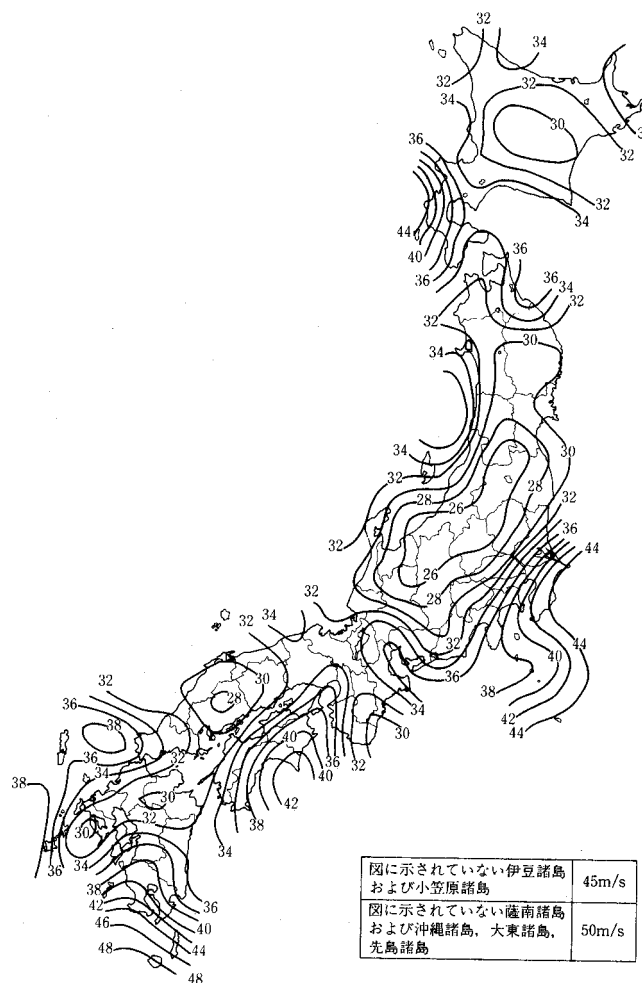


図2 基本風速  $U_{10}$  に対する風速マップ(建築物荷重指針)

## 2) 作用因子の設定法

風は、空間的、時間的に変動しており、構造物の設置地点、規模、供用年数などに応じて、適切な特性値を定める必要がある。作用因子である基本風速  $U_{10}$  を設定する際にも、空間的要素としての地形の影響、地表面粗度の影響、時間的要素としての再現期間(極値統計)の処理が必要となる。

基本風速  $U_{10}$  の設定方法としては、

過去の風速観測記録からの極値統計手法

地形因子解析手法

台風シミュレーション手法

が挙げられる。それぞれの手法の詳細については、Appendix A に示す。

過去の風速観測記録としては、気象官署、AMEDAS のデータが利用できる。ただし、観測位置、高度の変更や計器の変更があったり、観測地周辺の都市化に伴う風環境の変化などによって、長期間にわたっての均質なデータが得られないことに注意が必要である。その他に、国の行政機関、地方自治体、消防署、道路管理者、鉄道事業者、電力会社などによっても風観測が行われている。

構造物の設置地点での風の観測記録が無い場合、近隣の気象官署などでの記録から極値解析を行い、それを対象地点に変換する必要がある。また、台風シミュレーションでは、地表面の影響を受けない上空での風速が与えられるため、これを地上風速に変換する必要がある。いずれの場合にも対象地点周辺の地形の影響を適切に考慮する必要があるが、これらは周辺地形の縮尺模型を用いた風洞試験や数値流体解析によって検討が行われることがわかる。

### 3) 風の特性値

風の作用を規定するためには、平均風速に加えて風の変動特性に関する情報が必要となる。ここでは、風の変動特性に関するモデル、確率分布情報を与える。

#### ● 風速の高さ方向分布

風速は周辺の地表粗度や高度によって変化する。上空での風速は地表粗度によらず一定であるが、地表に近づくとつれて、地表粗度の影響を受け風速は減少する。このような風速の高度による変化特性は、次に示す対数則か、べき法則のどちらかで表される。対数則は理論的に導かれたものであるが、対数の取扱いが実務的でないこともあり、より簡便なべき法則が用いられることもある。日本においても土木構造物の耐風設計では、べき法則が一般に用いられている。

[対数則]

$$U_z = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (1)$$

ここで、 $U_z$  は高度  $z$  (m) での風速、 $u_*$  は摩擦速度、 $k$  ( $\cong 0.4$ ) はカルマン定数、 $z_0$  は粗度長である。

[べき法則]

$$U_z = U_{10} \times \left( \frac{z}{10} \right)^\alpha \quad (2)$$

ここで、 $\alpha$  はべき指数で高度による風速の変化率を表す。 $\alpha$  は地表面粗度に応じて平均的に次のような値を取るとされる。

平坦な地形の草原、海岸地帯	1/10 ~ 1/7
田園地帯	1/6 ~ 1/4
森林地帯、市街地	1/4 ~ 1/2

また、道路橋耐風設計便覧では、4つの粗度区分に分類し、べき法則でのパラメータを表1のように設定している。なお、地表面近くの地物の代表高さ  $z_b$  より低いところでは風の吹き方が複雑となり、べき法則に従わない傾向を示すことから、例えば、道路橋耐風設計便覧では  $z_b$  より低い地点では  $z_b$  での風速のままとするモデル化が行われている(図3参照)。

表1 道路橋耐風設計便覧におけるべき法則のパラメータ

地表粗度区分				
$z_b$ (m)	5	10	15	30
$\alpha$	0.12	0.16	0.22	0.29
$z_G$ (m)	500	600	700	700
$z_0$ (m)	0.01	0.05	0.3	1.0

- 粗度区分 : 海上、海岸  
 : 農地、田園、開けた土地、樹木や低層建物が散在している地域  
 : 樹木や低層建物が密集している地域、中高層建築物が散在している地域  
 なだらかな丘陵地  
 : 中高層建築物が密集している地域、起伏の大きい丘陵地

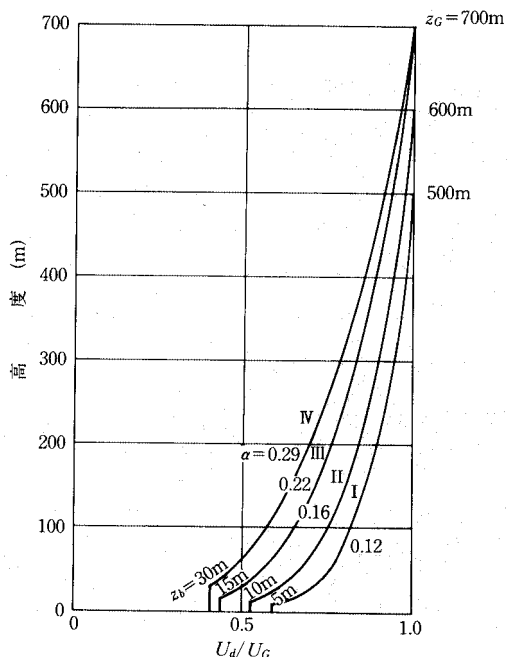


図3 道路橋耐風設計便覧における風速の高度分布のモデル化

● 乱れ強さ

空間上に風速を考えると、直交する3方向( $x, y, z$ )にそれぞれ平均風速と変動風速に分けることができ、それぞれ  $U, V, W$  と  $u, v, w$  と書くことにする。ここで、風向き方向を  $x$  とし、風速成分を  $U$  あるいは  $u$  とし、それに直交する水平方向と風速成分を  $y, V$  あるいは  $v$ 、同様に鉛直方向と風速成分を  $z, W$  あるいは  $w$  とする。通常は、水平、鉛直方向の平均風速成分  $V, W$  は0と見なせるので、変動する風速特性を表すには、 $U, u, v, w$  を用いればよいことになる。

各風速成分の変動の強さ、すなわち乱れ強さは次式で定義される。

$$I_u = \frac{\sigma_u}{U}, I_v = \frac{\sigma_v}{U}, I_w = \frac{\sigma_w}{U} \quad (3)$$

ここで、 $\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$  はそれぞれ  $u, v, w$  の標準偏差である。

● 風速のパワースペクトル密度

風速のパワースペクトル密度は、風速変動成分の振動数毎の寄与度を表すものであり、いくつかの提案式がある。一例として、比較的よく用いられる等方性乱流に対するカルマン(Karman)型スペクトルを以下に示す。

カルマン型スペクトル

[主流成分]

$$S_u(f) = \frac{\sigma_u^2}{f} \cdot \frac{4 \left( \frac{fL_u^x}{U} \right)}{\left[ 1 + 70.8 \left( \frac{fL_u^x}{U} \right)^2 \right]^{5/6}} \quad (4)$$

[鉛直成分]

$$S_w(f) = \frac{\sigma_w^2}{f} \cdot \frac{4 \left( \frac{fL_w^x}{U} \right) \left[ 1 + 755.2 \left( \frac{fL_w^x}{U} \right)^2 \right]}{\left[ 1 + 283.2 \left( \frac{fL_w^x}{U} \right)^2 \right]^{11/6}} \quad (5)$$

#### ● 風速の空間相関

風速変動の空間的な相関を表す式として、実務的には距離とともに指数的に減衰する空間相関関数式が多く用いられる。構造物への風の作用を考える際に風速の空間相関を必要とするのは、変動風速場での空間的な広がりを持つ構造物の風荷重評価を行う際である。これは、通常、ガスト応答解析を通じて行われるが、その際には次のように異なる2点間の風速変動のクロススペクトル密度関数をそれぞれの点でのパワースペクトル密度関数と指数関数によって表現している。

$$\frac{|S_{ij}(i, j, f)|}{\sqrt{S_i(i, f) \cdot S_j(j, f)}} = \exp\left(-k \frac{f \cdot \Delta x}{U}\right) \quad (6)$$

ここで、 $k$  はディケイファクターで 5~15 程度の値をとる。また、 $f$  は振動数、 $\Delta x$  は2点間の距離である。

また、低振動数領域での空間相関をより厳密に表現するために、ESDUにも規定されるカルマン型スペクトルの基づいた次の相関式が用いられることもある。

$$\frac{|S_{ij}(i, j, f)|}{\sqrt{S_i(i, f) \cdot S_j(j, f)}} = 0.994 \left[ \eta^{5/6} K_{5/6}(\eta) - \frac{\eta^{11/6}}{2} K_{11/6}(\eta) \right] \quad (7)$$

ここで、

$\eta = 0.747 \frac{\Delta x}{L} \sqrt{1 + 70.8 \left( \frac{fL}{U} \right)^2}$ 、 $L$ : 乱れスケール相当長さ、 $K_{5/6}$ 、 $K_{11/6}$ : 第2種変形ベッセル関数である。

## 4. 作用

### 1) 風荷重

空間上の構造物に風が作用すると、3次元的に風荷重が生じ、厳密には6分力として定義される。このうち、最も直接的でかつ支配的なものが風軸方向に作用する風荷重(抗力)であり、通常は風荷重として抗力のみを考える。その作用は、以下のように表される。

$$P = \frac{1}{2} \rho U_d^2 A_n C_D G \quad (8)$$

ここで、 $P$ : 風荷重(N)、 $\rho$ : 空気密度(道路橋示方書では  $1.23 \text{ kg/m}^3$ )、 $U_d$ : 設計基準風速(m/s)、 $A_n$ : 投影面積( $\text{m}^2$ )、 $C_D$ : 抗力係数、 $G$ : ガスト応答係数(道路橋示方書では 1.9)である。

### 設計基準風速 $U_d$

設計基準風速  $U_d$  は、風荷重を算出する対象とする部位の高度における10分間平均風速である。基本風速と設計基準風速との関係は、べき法則によれば次のように表される。

$$U_d = U_{10} \left( \frac{z}{10} \right)^\alpha \quad (9)$$

### 抗力係数

抗力係数は、構造物の幾何学的形状によって変化するほか、近接する構造物、気流の傾斜角あるいは水平偏角、構造物の表面粗度等の影響を受ける。特に、円形断面の場合には、レイノルズ数

の影響を大きく受ける。また、抗力係数は風の乱れや傾斜角によって変動するが、それらが特に大きくない場合は、一様流中の傾斜角0度での抗力係数が用いられる。

橋梁部材の代表的形状と考えられる角形、H形および円形断面の抗力係数について、形状あるいはレイノルズ数の影響を図4に示す。道路橋示方書では、角形断面と円形断面の抗力係数をそれぞれ1.6と0.8としているが、角形断面の1.6は $B/D$ が2程度の角形断面およびI形断面の抗力係数となっている。また、円形断面の0.8は、直径がおよそ15cm以上の表面が滑らかな円形断面で、レイノルズ数が超臨界域あるいは極超臨界域での上限的な値となっている。

橋梁上部構造の代表的な形式に対する抗力係数の規定を以下に示す。これは、これまでの試験値をもとに代表的な値として道路橋示方書に採用されているものである。

- プレートガーダー

充腹のI形断面、形断面および箱形断面の桁を主構造にもつ上部構造の抗力係数にはプレートガーダーの抗力係数を適用する。

$$C_d = \begin{cases} 2.1 - 0.1(B/D) & 1 \leq B/D < 8 \\ 1.3 & 8 \leq B/D \end{cases} \quad (10)$$

- 2主構トラス

トラスと橋床(防護柵、床版、床組)に分けて定められる。

$$\text{トラス } C_d = 1.35/\sqrt{\phi} \quad (\text{ただし, } 0.1 \leq \phi \leq 0.6) \quad (11)$$

$$\text{橋床 } C_d = 1.6$$

ここで、 $\phi$ はトラスの充実率。

- アーチ橋

アーチ部材、補剛桁、垂直材

角形断面 1.6(風上側部材)、0.8(風下側部材)

円形断面 0.8(風上側、風下側部材)

橋床

1.6

- 吊橋・斜張橋

橋桁部分に対しては、形状に応じてプレートガーダーあるいは2主構トラスの抗力係数を適用。

塔については、1.6(風上側部材)、0.8(風下側部材)、ケーブルについては、0.8(風上側、風下側部材とも)が適用される。

- 橋梁付属物

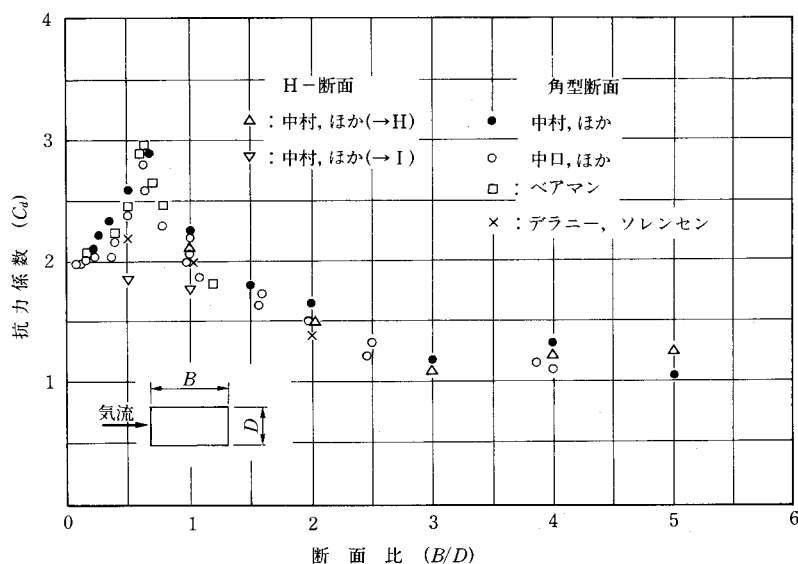
遮音壁、落下物防止柵を橋床の一部として、それに作用する風荷重を考慮する。

風上側にある橋梁付属物の抗力係数は、プレートガーダーの場合を除いて2主構トラスの橋床と同様に1.6としてよい。プレートガーダーの場合には、プレートガーダーの抗力係数と同一としてよい。

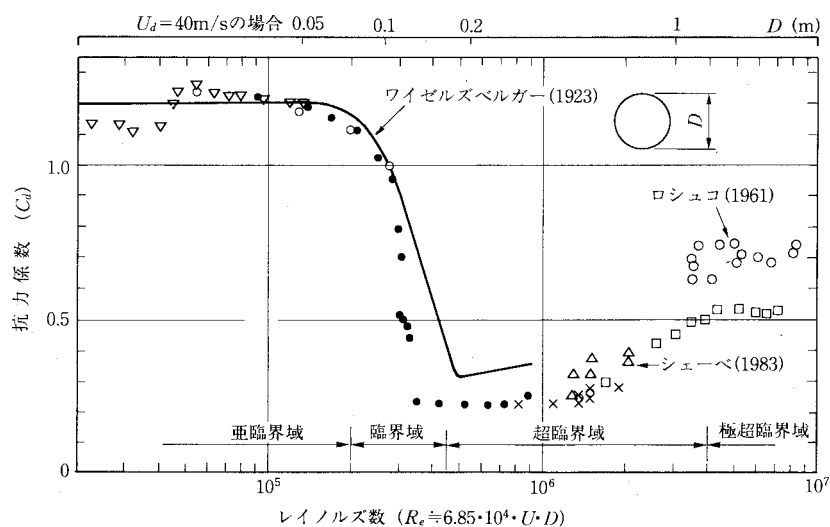
また、風下側にある遮音壁、落下物防止柵に作用する風荷重は無視してよい。

- 下部構造

円形および小判形の場合は0.8、角形の場合は1.6を適用する。



(1) 角形断面の抗力係数



(2) 円形断面の抗力係数

図4 角形, 円形断面の抗力係数(図 3.3(a), 3.3(b)便覧)

### 投影面積

正確には有効鉛直投影面積であり, 風荷重の作用方向に直角な鉛直面に対する構造物の構造実方向単位長さあたりの平均投影面積である。

橋梁の場合, 主桁, 縦桁, 床版, 地覆, 防護柵, 遮音壁および活荷重に対しては風上側側面の投影面積のみを考慮し, 中央分離帯部, 風下側の地覆, 防護柵は含めないほか, 路面, 床版の横断勾配の影響は含めない。また, アーチ橋のアーチ部材, 補剛桁, 吊材および支柱, 吊橋・斜張橋の塔およびケーブルなどで風下側にも部材が配置される場合には, 風下側部材の風上側側面の投影面積も考慮する必要がある。

### ガスト応答係数 $G$

ガスト応答係数  $G$  は風速の時間変動(乱れ)を考えた時の最大瞬間風荷重と時間平均風荷重との比として定義される。

$$\text{ガスト応答係数 } G = \text{最大応答値} / \text{平均抗力による応答値}$$



ガスト応答係数は、風の変動特性のみならず構造物の振動特性や着目する応答量によっても異なる。道路橋示方書で与えられる値(1.9)は、道路橋示方書が対象とするような風の作用が支配的とならない橋梁に対して、設計の便宜を図る目的で安全側の値を設定しているものである。構造の規模が大きくなり、風の作用が大きくなるような構造に対しては、個別に検討を行う必要が生じる。具体的には、変動風と構造とをモデル化し、変動風による構造の応答解析(ガスト応答解析)を実施し、着目する部位の断面力の最大瞬間値の期待値と時間平均値との比から  $G$  を求めることになる。

### 風荷重の載荷方法

風荷重を算定する際には、通常、構造物に直角な方向から風が吹くことを前提としている。これは、直角方向からの場合が最も風荷重が大きくなるためである。道路橋示方書においては、構造物の風上側の有効鉛直投影面積の図心位置に、考えている部材に最も不利な応力を生じさせるように単位長さあたりの風荷重を載荷する。単位長さあたりの風荷重を橋軸方向にどのように分布させるかについては、議論の余地があるが、道路橋示方書では、風荷重は橋梁の水平剛度の確保のために用いられることなどを考慮し、考えている部材に最も不利な応力を生じさせるように分布させることとしている。

ただし、規模の大きな橋梁の場合には、橋軸直角方向だけでなく、橋軸方向からの風荷重によっても応力、変位が生じることから、設計においては橋軸直角方向からの風荷重と橋軸方向からの風荷重を組み合わせ設計を行っている。

### 風速の頻度分布

風の動的作用によって渦励振が発生し、疲労が問題となる場合がある。この場合、疲労の照査を行うことになるが、くり返し回数を算定するために風速の頻度分布が必要となる。一般に、風速の頻度分布はワイブル分布でよく表せることが知られており、渦励振の発生する風速域とワイブル分布から求めた風速頻度、渦励振の周期から疲労の照査が行えることになる。

### 橋梁構造に対する風荷重値

単位面積あたりの風荷重もしくは単位長さあたりの風荷重の値が道路橋示方書に定められている。

#### ● プレートガーダー

[活荷重無載荷時]

$$P(kN/m) = \begin{cases} (4.0 - 0.2(B/D))D & 1 \leq B/D < 8 \\ 2.4D & 8 \leq B/D \end{cases} \quad (12)$$

ただし、最低値は 6 kN/m。

[活荷重載荷時]

活荷重無載荷時の 1/2 + 活荷重に作用する風荷重(1.5 kN/m)

#### ● 2主構トラス

[活荷重無載荷時]

$$\text{トラス } p(kN/m^2) = 2.5/\sqrt{\phi} \quad (13)$$

$$\text{橋床 } p(kN/m^2) = 3.0$$

ただし、最低値は 6 kN/m(載荷弦)、3 kN/m(無載荷弦)。

[活荷重載荷時]

活荷重無載荷時の 1/2 + 活荷重に作用する風荷重(1.5 kN/m)

#### ● その他の形式

桁の形状に応じてプレートガーダーあるいは2主構トラスの風荷重を適用。

アーチ橋のアーチ部材, 補剛桁, 吊材および支柱, あるいは吊橋・斜張橋の塔, ケーブルおよび吊材の風上側部材に作用する活荷重無載荷時の風荷重

角形断面  $p(kN/m^2) = 3.0$  (14)

円形断面  $p(kN/m^2) = 1.5$

なお, 風下側部材に作用する風荷重は, 角形断面では風上部材の  $1/2 (= 1.5 \text{ kN/m}^2)$ , 円形断面では風上部材と同じ値  $(= 1.5 \text{ kN/m}^2)$  とする。また, 活荷重載荷時の風荷重は, 活荷重無載荷時の  $1/2$  とする。

● 遮音壁を有する橋梁に作用する風荷重

遮音壁を有する橋梁で, 周囲に住宅が密集している場合には, 上部構造と下部構造に作用する風荷重を  $0.8$  倍に低減することができる。

● 並列する橋梁の風荷重

プレートガーダーが近接して並ぶ場合, 単独の場合の抗力と異なることが風洞試験で確認されている。道路橋示方書では, 並列の効果による上部構造に作用する風荷重の補正係数を表 2 のように定めている。

表 2 並列の効果による上部構造に作用する風荷重の補正係数

並列の効果による風荷重の補正係数		
上部構造の設計	1.3	
下部構造の設計	$S_h$ 風上側 風下側	
	$S_h \leq 0.5 B_1$ 1.3 1.3	
	$0.5 B_1 < S_h \leq 1.5 B_2$ 1.3	$S_v \leq 0.5 D_2$ 0.3
		$0.5 D_2 < S_v \leq 1.5 D_2$ 1.0
		$1.5 D_2 < S_v \leq 2.5 D_2$ 1.2
$1.5 B_2 < S_h \leq 1.5 B_1$ 1.3 1.0		

● 下部構造に作用する風荷重

橋軸直角方向および橋軸方向に作用する水平方向の荷重で, 同時に 2 方向には作用しないとす。風荷重は, 抗力係数を  $1.6$  と  $0.8$  として定められた値が適用され, 風向方向の有効鉛直投影面積にこの風荷重を作用させる (表 3 参照)。

表 3 下部構造に作用する風荷重 ( $kN/m^2$ )

躯体の断面形状		風荷重
円形 小判型	活荷重載荷時	0.75
	活荷重無載荷時	1.5
角形	活荷重載荷時	1.5
	活荷重無載荷時	3.0

2) 一般的な作用モデル

風による作用は, 風 (風速) に伴う空気力によって様々な現象を引き起こす。構造物の規模が比較的小さく, 剛な場合には, 風荷重による変形や応力を考慮することで十分であるが, 構造物の規模が大きくなり, 可撓性に富むようになると振動現象に対する考慮が必要となる。空気力は, 平均的な風速成分による静的空気力あるいは定常空気力, 時間的・空間的に風速が変動することによる変動空気力あるいはガスト空気力, 構造物の動きに伴って生じる自励空気力あるいは非定常空気力に大別される。このうち, 1) で述べた風荷重には, 定常空気力と変動空気力が簡便的に考慮されている。構造物の規模が大きくなり, 風の作用が支配的になる場合には, より精緻な方法によって風の作用を検討する必要があるが, 以下にその取扱い法について述べる。

いま, 構造物に変動風速  $U + u$  が作用する場合の風荷重を考える. この場合の風荷重は, 構造物の動きに対する相対風速を考えることで, 以下のように表される.

$$P = \frac{1}{2} \rho (U + u - \dot{x})^2 A_n C_D \quad (15)$$

ここで,  $\dot{x}$  は構造物変位の速度である.

上式を展開し, 微量量の 2 次項を省略することで, 以下のようになる.

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2} \rho (U^2 + u^2 + \dot{x}^2 + 2Uu - 2U\dot{x} - 2u\dot{x})^2 A_n C_D \cong \frac{1}{2} \rho (U^2 + 2Uu - 2U\dot{x}) A_n C_D \\ &= \frac{1}{2} \rho U^2 A_n C_D + \rho Uu A_n C_D - \rho U\dot{x} A_n C_D \end{aligned} \quad (16)$$

すなわち, 第 1 項が定常空気力, 第 2 項が変動空気力, 第 3 項が非定常空気力を表し, 構造物への作用, 風荷重(空気力)が近似的には定常空気力, 変動空気力, 非定常空気力の線形重ね合わせで表せることを示している. なお, 以上の展開は主流風速成分による 1 自由度系についてのものであるが, 鉛直および水平風速成分も考慮した多自由度系に対しても拡張できるものである. 以下に, 各空気力成分に対する具体の取扱い法について述べる.

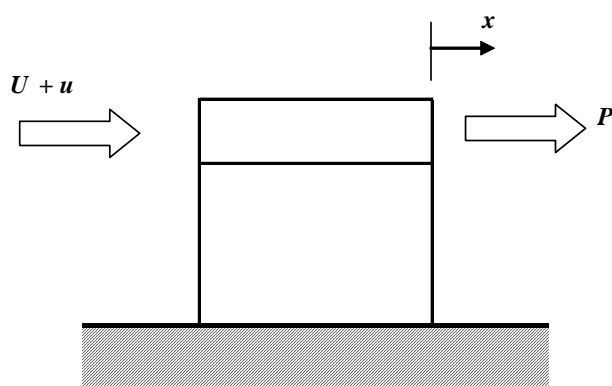


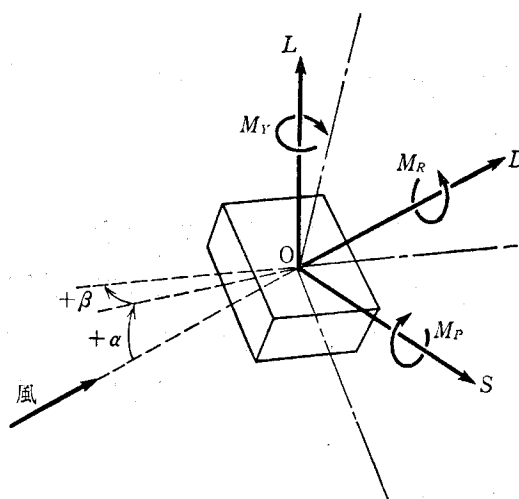
図 5 主流風速成分による構造物の空気力

### 3) 静的空気力 (定常空気力)

構造物に作用する空気力は 6 成分の各空気力 (6 分力) によって表現することができる. このうち, 最も支配的で重要なものが先に述べた抗力 (Drag) であり, それに加えて風直角鉛直方向の揚力 (Lift), 風直角水平方向の横力 (Side force), 風と直交する水平軸まわりの空力モーメント (Pitching moment) の 4 分力が, 土木構造物ではしばしば使われる.

$$\begin{aligned} D_m &= \frac{1}{2} \rho U_d^2 B C_D \\ L_m &= \frac{1}{2} \rho U_d^2 B C_L \\ S_m &= \frac{1}{2} \rho U_d^2 B C_S \\ M_m &= \frac{1}{2} \rho U_d^2 B^2 C_M \end{aligned} \quad (17a, b, c, d)$$

ここで,  $B$  は代表長,  $C_D, C_L, C_S, C_M$  はそれぞれ抗力係数, 揚力係数, 横力係数, 空力モーメント係数であり, 単位長さあたりの風荷重(空気力)と動圧との比として定義され, 通常, 風洞実験によって計測される.



(a) 風軸に関する風力成分

図6 6分力の定義

#### 4) 変動空気力 (ガスト空気力)

風の時間変動作用に起因する変動空気力(ガスト空気力)は以下のように表される。ガスト応答係数は、道路橋示方書では簡易的に 1.9 として与えられるが、構造物の規模が大きくなり可撓性に富むようになると、ガスト応答の影響をより精緻に評価する必要が生じる。その際には、風速の時間変動特性をより精緻に考慮して、ガスト応答係数を求める必要がある。この作業を通常ガスト応答解析といい、ガスト応答解析に用いられる変動空気力モデルを以下に示す。

$$\begin{aligned}
 D_b &= \frac{1}{2} \rho U_d B [2C_D \chi_D^u u + C'_D \chi_D^w w] \\
 L_b &= \frac{1}{2} \rho U_d B [2C_L \chi_L^u u + (C'_L + C_D) \chi_L^w w] \\
 M_b &= \frac{1}{2} \rho U_d B^2 [2C_M \chi_M^u u + C'_M \chi_M^w w]
 \end{aligned}
 \tag{18a, b, c, d}$$

ここで、(′)は風の迎角に対するそれぞれの係数の勾配であり、通常迎角が 0 度での値を用いる。 $\chi_F^r$  ( $F = D, L, \text{ or } M, r = u \text{ or } w$ )は空力アドミッタンスで、各風速成分の寄与する空気力成分ごとに定義される。また、 $u, w$ は風の主流、鉛直方向の変動風速である。

上式で示される変動空気力を用いてガスト応答解析を行う際には、変動風速場が定常不規則過程であると見なせることから、通常、振動数領域でのスペクトル解析手法が用いられることが多い。このとき、変動空気力は、変動風速  $u, w$  のパワースペクトル密度関数を用いて表現されることから、風の変動特性のパワースペクトル密度関数は風速変動特性を表す重要なパラメータとなる。さらに、構造物が空間的に大きな広がりを持つ場合、すなわち変動空気力が多点入力となる場合には、風速変動の空間的な広がりを考える空間相関関数が必要となる。

#### ガスト応答解析の説明(周波数領域)?

#### 5) 非定常(あるいは自励)空気力

構造物の規模がさらに大きくなり、風による発散的な振動作用を考慮する必要が生じるような場合がある。これは、構造物の動きに伴って新たな空気力が付加され、振動が自励的に大きくなる現象であり、次の非定常空気力として表される。

$$\begin{aligned}
 L_{ae} &= \pi \rho B^2 \omega^2 \left[ L_{yR} y + L_{yI} \frac{\dot{y}}{\omega} + L_{zR} z + L_{zI} \frac{\dot{z}}{\omega} + L_{\theta R} \theta + L_{\theta I} \frac{\dot{\theta}}{\omega} \right] \\
 M_{ae} &= \pi \rho B^4 \omega^2 \left[ M_{yR} y + M_{yI} \frac{\dot{y}}{\omega} + M_{zR} z + M_{zI} \frac{\dot{z}}{\omega} + M_{\theta R} \theta + M_{\theta I} \frac{\dot{\theta}}{\omega} \right] \\
 D_{ae} &= \pi \rho B^2 \omega^2 \left[ D_{yR} y + D_{yI} \frac{\dot{y}}{\omega} + D_{zR} z + D_{zI} \frac{\dot{z}}{\omega} + D_{\theta R} \theta + D_{\theta I} \frac{\dot{\theta}}{\omega} \right]
 \end{aligned} \tag{19a, b, c}$$

ここで、 $\omega$ は構造の円振動数、 $y, z, \theta$ はそれぞれ構造の鉛直、水平、ねじれ変位、 $(\cdot)$ は時間微分を表す。また、 $L_{yR}, L_{yI}, \dots, D_{\theta I}$ は、非定常空気力係数と呼ばれる無次元係数であり、構造の変位あるいは速度に比例して生じる非定常空気力の程度を表す。

また、Scanlan は、非定常空気力係数を Flutter Derivative と称し、以下のような定式化を使った。

$$\begin{aligned}
 L_{ae} &= \frac{1}{2} \rho U_d^2 B \left[ KH_1^* \frac{\dot{y}}{U} + KH_2^* \frac{B\dot{\theta}}{U} + K^2 H_3^* \theta + K^2 H_4^* \frac{y}{B} + KH_5^* \frac{\dot{z}}{U} + K^2 H_6^* \frac{z}{B} \right] \\
 M_{ae} &= \frac{1}{2} \rho U_d^2 B^2 \left[ KA_1^* \frac{\dot{y}}{U} + KA_2^* \frac{B\dot{\theta}}{U} + K^2 A_3^* \theta + K^2 A_4^* \frac{y}{B} + KA_5^* \frac{\dot{z}}{U} + K^2 A_6^* \frac{z}{B} \right] \\
 D_{ae} &= \frac{1}{2} \rho U_d^2 B \left[ KP_1^* \frac{\dot{y}}{U} + KP_2^* \frac{B\dot{\theta}}{U} + K^2 P_3^* \theta + K^2 P_4^* \frac{y}{B} + KP_5^* \frac{\dot{z}}{U} + K^2 P_6^* \frac{z}{B} \right]
 \end{aligned} \tag{20a, b, c}$$

ここで、 $K(= \omega B/U)$ は換算振動数、 $P_i^*, H_i^*, A_i^* (i = 1 - 6)$ は非定常空気力係数である。

### フラッター解析の説明

代表的な断面での空気力図を加える。

## 5 . 作用効果

風の作用は、既に述べたように空間的、時間的に変動し、また構造物の規模、特性にも影響され、多種多様な作用効果をもたらす。通常、構造物の設計の便宜から、風の作用を静的、動的現象に分類し、それぞれの作用効果に対して設計での対処法を定めている。

### 静的な変形、応力

風荷重を構造物に载荷して、解析的に求める(4.1)あるいは(4.2)、3)の規定による)。あるいは、風洞実験により求める。

### 動的な振動

風洞実験、あるいは風の作用モデルを用いて解析的に求める。解析的な手法としては、ガスト応答解析、フラッター解析などがある(4.4)、5)の規定による)。

ほかに、道路橋耐風設計便覧では、現象毎に以下の推定式を規定している。

### 渦励振

#### 鉛直たわみ渦励振

$$\text{発現風速(m/s): } U_{cvh} = 2.0 f_h B$$

$$\text{最大振幅 (m)}: h_c = \frac{E_h E_{th}}{m_r \delta_h} B$$

ねじれ渦励振

$$\text{発現風速 (m/s)}: U_{cv0} = 1.33 f_0 B$$

$$\text{最大振幅 (deg)}: \theta_c = \frac{E_0 E_{t0}}{I_{pr} \delta_0}$$

ここで、 $f_h, f_0$  はそれぞれたわみ、ねじれ固有振動数 (Hz)、 $B$  は桁幅 (m)、 $\rho$  は空気密度 ( $\text{kg/m}^3$ ) である。 $m_r, I_{pr}$  はそれぞれ無次元質量、無次元極慣性モーメントで以下のように与えられる。

$$m_r = m / (\rho B^2)$$

$$I_{pr} = I_p / (\rho B^4)$$

$m, I_p$  は橋の単位長さあたりの質量 ( $\text{kg/m}$ )、極慣性モーメント ( $\text{kg}\cdot\text{m}$ ) である。

また、補正係数として

$$E_h = \frac{0.065 \beta_{ds}}{(B/d)}, \quad E_0 = \frac{17.16 \beta_{ds}}{(B/d)^3}$$

である。 $d$  は橋桁の有効高 (m)、 $\beta_{ds}$  は橋桁の形状に関する補正係数であり、次のように与えられる。

$$\beta_{ds} = \begin{cases} 2 & (\text{ブラケット長が有効高 } d \text{ の } 1/4 \text{ 以下でウェブが垂直な場合}) \\ 1 & (\text{上記以外の場合}) \end{cases}$$

さらに、 $E_{th}, E_{t0}$  は、気流の乱れによる一様流中で観測された振動応答の低減係数であり、次のように与えられる。

$$E_{th} = 1 - 15 \times \beta_t (B/d)^{1/2} \times I_u^2 \geq 0$$

$$E_{t0} = 1 - 20 \times \beta_t (B/d)^{1/2} \times I_u^2 \geq 0$$

$\beta_t$  は橋桁の断面形状が六角形の場合には 0、その他の場合には 1 とする。

**フラッター**

$$\text{発現風速 (m/s)}: U_{cf} = 2.5 f_0 B$$

**ギャロッピング**

$$\text{発現風速 (m/s)}: U_{cg} = 8 f_h B \quad (\text{地形が平坦な場合})$$

$$U_{cg} = 4 f_h B \quad (\text{地形の影響により吹き上げ風が吹く場合})$$

**参考文献**