

風作用

1. 概説

ここでは、風作用に関して説明する。

構造物に対する風の作用は、風荷重(静的作用)に伴う変形、応力に加えて、変動(動的)作用に伴う不安定現象や振動現象を引き起こす。特に、変動作用に関しては、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、ここでは、これらの変動作用についても考慮して風作用を規定する。

また、作用(モデル)を規定する作用因子として、基本風速を取り上げるが、これは空間的、時間的に変動する確率変量であり、その設定にあたっては確率的な処理が必要となる。その設定にあたっての確率的取扱い法についても述べる。

適用範囲

用語と記号

2. 風作用による現象(効果)

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、多種多様な現れ方をする。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、設計での取扱い法を定めている。

以下に、風の作用の分類を示す。

- 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

風作用での作用因子としては、高度 10m、標準粗度における 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。

また、次に示す風の基本的特性についても、特に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

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。

(風速の確率分布特性, 極値統計解析手法, 地形因子解析手法, 台風シミュレーション手法について説明する)

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, それを設置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。いずれの場合にも設置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。

3) 風の特性値

風の作用(モデル)を規定するためには, 以下の風の特性値に関する情報が必要となる。

- 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

4. 作用(モデル)

1) 風荷重 (これは, 道示, 便覧にもある通常の風荷重(作用)の規定)

風の作用のうち, もっとも直接的でかつ重要なものが風軸方向に作用する風荷重(抗力)である。その作用(モデル)は, 以下のように表される。

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

ここで, P : 風荷重(N), ρ : 空気密度(1.2 kg/m^3), U_d : 設計基準風速(m/s), A_n : 投影面積(m^2), C_D : 抗力係数, G : ガスト応答係数である。

風速 U_d について

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 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規定される。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。

ガスト応答係数 G について

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。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ある。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。

風向, 頻度分布

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。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風荷重としている。

また、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。

2) 静的空気力 (定常空気力) (以下は、動的作用を考えた時の作用モデルである)

風の3次元的作用を考えた時の静的空気力モデルは以下のように表される。

$$D_m = \frac{1}{2} \rho U_d^2 B C_D$$

$$L_m = \frac{1}{2} \rho U_d^2 B C_L$$

$$M_m = \frac{1}{2} \rho U_d^2 B^2 C_M$$

ここで、 B は代表長、 C_D 、 C_L 、 C_M はそれぞれ抗力係数、揚力係数、空力モーメント係数である。

C_D 、 C_L 、 C_M について

C_D 、 C_L 、 C_M は、それぞれ抗力係数、揚力係数、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。空気力は、風軸を基準として定義され、風軸方向に抗力、風軸直角方向に揚力と横力、それぞれの軸まわりにローリングモーメント、ヨーイングモーメント、ピッチングモーメントと呼ばれる。このうち、橋桁のように水平方向に長い構造の場合は、風軸方向の抗力、風軸直角鉛直方向の揚力、風軸直角水平軸まわりの空力(ピッチング)モーメントが重要となる。

3) 変動空気力

風の時間変動作用に起因する変動空気力(ガスト空気力)モデルは以下のように表される。

$$D_b = \frac{1}{2} \rho U_d B \left[2C_D \chi_D^u u + C_D' \chi_D^w w \right]$$

$$L_b = \frac{1}{2} \rho U_d B \left[2C_L \chi_L^u u + (C_L' + C_D) \chi_L^w w \right]$$

$$M_b = \frac{1}{2} \rho U_d B^2 \left[2C_M \chi_M^u u + (C_M' + C_D) \chi_M^w w \right]$$

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。 χ_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。

風の作用の1つとして、構造物からの流れの剥離の結果、発現風速と発現振幅が共に限定的な限定振動あるいは渦励振を引き起こす。渦励振は、非線形性の強い振動であり、また自励的な振動でもあるため、作用モデルの構築は難しいが、定常空気力の表記にならって以下のような作用モデルがある。

渦励振空気力

$$L_v = \frac{1}{2} \rho U_{cr}^2 B C_{ldyn}$$

ここで、 U_{cr} は共振風速、 C_{ldyn} は動的揚力係数である。

鉛直たわみ渦励振

$$U_{cvh} = 2.0 f_h B$$

$$h_c = \frac{E_h E_{th}}{m_r \delta_h} B$$

ねじれ渦励振

$$U_{cv\theta} = 1.33 f_\theta B$$

$$\theta_c = \frac{E_\theta E_{t\theta}}{I_{pr} \delta_\theta}$$

ここで, (未完成)

4) 非定常(あるいは自励)空気力

風の作用の1つに, 構造物の運動に伴って生じる自励的作用がある. この自励的作用を表すモデルに非定常空気力があり, 以下のように表される.

$$D_m = \frac{1}{2} \rho U_d^2 B \left[KP_1^* \frac{\dot{p}}{U} + KP_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 P_3^* \alpha + K^2 P_4^* \frac{p}{B} + KP_5^* \frac{\dot{h}}{U} + K^2 P_6^* \frac{h}{B} \right]$$

$$L_m = \frac{1}{2} \rho U_d^2 B \left[KH_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KH_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 H_3^* \alpha + K^2 H_4^* \frac{h}{B} + KH_5^* \frac{\dot{p}}{U} + K^2 H_6^* \frac{p}{B} \right]$$

$$M_m = \frac{1}{2} \rho U_d^2 B^2 \left[KA_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KA_2^* \frac{B\dot{\alpha}}{U} + K^2 A_3^* \alpha + K^2 A_4^* \frac{h}{B} + KA_5^* \frac{\dot{p}}{U} + K^2 A_6^* \frac{p}{B} \right]$$

ここで, $K (= \omega B/U)$ は換算振動数, ω は構造の円振動数, p, h, α はそれぞれ構造の水平, 鉛直, ねじれ変位, $(\dot{\cdot})$ は時間微分を表す. また, $P_i^*, H_i^*, A_i^* (i = 1 - 6)$ 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.

5) 発散振動

風の作用の1つに発散的な振動(フラッター, ギャロッピング)を生じさせるものがある. これは, 渦励振と同様に構造との相互作用(自励作用)によるものであり, 構造特性と密接に関連するものであるが, 風の作用の代表的なものとして, 以下のような現象を予測するものとしての作用モデルがある.

フラッター

$$U_{cf} = 2.5 f_\theta B$$

ここで, U_{cf} はフラッター発現風速 (m/s), f_θ はねじれ1次固有振動数 (Hz)

ギャロッピング

$$U_{cg} = 8 f_h B \quad (\text{地形が平坦な場合})$$

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

ここで, U_{cg} はギャロッピング発現風速 (m/s), f_h は鉛直たわみ1次固有振動数 (Hz)

準定常理論に基づく説明(未完成)

5. 作用効果

- 1, 2 に対して: 変形, 応力, 静的不安定現象
- 3, 4 に対して: 変形, 応力, 振動, 疲労