

耐風設計技術

久保 喜延*

1. まえがき

プレストレストコンクリート（以下、PCと略す）で造られた構造物の中で、風の影響を考慮する必要のあるものとして考えられるものは、吊り構造としての斜張橋やエクストラードード橋などの長径間橋梁や、振動しやすい吊床版橋、長径間桁橋の架設時、シェル構造の冷却塔やサイロなどがある。ここでは、土木構造物としてのPC斜張橋を例にとって話を進める。著者は、これまでにわが国のPC斜張橋として最長径間長250 mを有していた呼子大橋（佐賀県）、現在も最長径間長260 mである伊唐大橋（鹿児島県）、プレキャストPC桁を用いた大芝大橋（広島県）、天建寺橋（佐賀県）の耐風性能試験を行ってきた。これらの経験をもとに、PC橋の耐風設計の進め方について述べる。

なお、橋梁の耐風設計には、静的耐風設計と動的耐風設計とがある。静的耐風設計は、「道路橋示方書」に示されているとおりの風荷重に関する設計である。このことは、示方書に示されているとおりであるため、ここでは、動的耐風設計を対象として話を進める。動的耐風設計の基本的なプロセスは以下のとおりである。

- ① 橋梁の架設地点における風況調査による基本風速、乱れ強さの決定。設計基準風速の決定
- ② 橋梁の桁や塔の断面形状の仮定
- ③ 仮定された断面をもつ桁や塔の風による振動の可能性の検討

振動の可能性がないと判断された場合は、仮定された断面が用いられるが、そうでない場合は、次の検討がなされる。

- ④ 風洞実験において風による応答特性を検討し、桁や塔の断面形状の決定
- ⑤ 実橋での応答予測

以下において、下記の内容で解説を行う。

2. 風の性質と設計基準風速, 3. 風による橋梁の挙動, 4. PC橋の耐風設計, 5. 耐風設計上の留意点, 6. あとがき

2. 風の性質と設計基準風速

自然の風は図-1のように、時間的にも空間的にも風速が変動している乱流である。この風を評価するパラメーターとして、平均風速 (\bar{U})、瞬間最大風速 (U_{max})、ガストファクター（突風率）(G)、乱れ強さ (I)、乱れスケール (L) などが用いられる。耐風設計の導入部にあたるそれぞれの項目について、簡単に説明を行う。

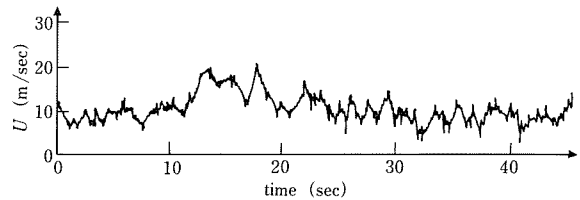


図-1 自然風の観測例

2.1 平均風速 \bar{U}

日本では、気象庁が10分間平均風速を用いているため、平均風速という場合には10分間の平均風速を意味している。平均風速の用途や対象とする現象に応じて平均化時間は異なる。たとえば、航空管制用にはもっと短い平均化時間が用いられている。

2.2 瞬間最大風速 U_{max}

瞬間的に現れる最大風速である。とくに、平均風速を算出する評価時間内での瞬間的な最大風速は、式(1)で示されるガストファクター（突風率） G の定義に用いられる。

$$G = \frac{U_{max}}{\bar{U}} \dots\dots\dots (1)$$

通常 G は1.2~1.5程度であるが、台風時は2.0よりも大きくなることもある（図-2）。

2.3 乱れ強さ I

図-1に示された自然風の観測例を見ても理解できるよ

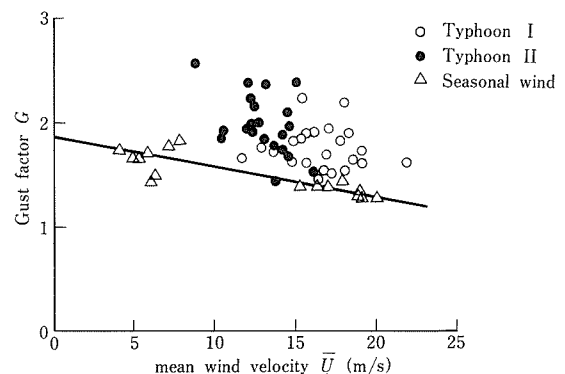
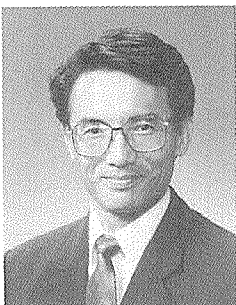


図-2 自然風の平均風速に対するガストファクター



* Yoshinobu KUBO

九州工業大学
工学部建設社会工学科 教授

うに、時間的に変動している自然風は式(2)のように表すことができる。

$$U(t) = \bar{U} + u(t) \dots\dots\dots (2)$$

すなわち、時間的に変動する風速 $U(t)$ は、平均風速 \bar{U} と変動成分 $u(t)$ との和として表される。乱れ強さは、平均風速に対する u のR.M.S.値の比で表わされる。

$$I = \frac{\sqrt{u^2}}{\bar{U}} \times 100 \text{ (\%)} \dots\dots\dots (3)$$

通常の風では8%~12%程度であるが、台風時は20%~30%程度になる(図-3)。

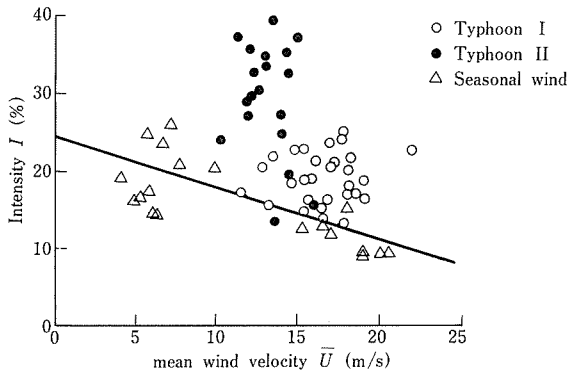


図-3 平均風速に対する乱れ強さ (Intensity)

2.4 乱れスケール L

自然風の乱流構造を表すパラメーターである。簡単に言えば、自然風がある大きさをもった塊の集団であると考え、風速変動の相関が1になっている領域の大きさを示した統計量である。すなわち、乱れスケール L で表された領域では、風速変動は同時に同程度の変動で起こっていると見なされるということである。ちなみに、自然風の風向方向の乱れスケールは、50m~200m程度と言われている。乱れ強さが高い場合には乱れスケールは小さく、乱れ強さが低い場合は、乱れスケールが大きい。この乱れスケールと構造物の大きさとが幾何学的に相似になるように風洞実験を行うことが望ましい。

2.5 自然風の高度方向風速分布

自然風は、地表面粗度のために、境界層を形成し、図-4のように高さ方向に風速が変化している。すなわち、地表面では、風速がゼロで、高さとともに風速が高くなっている。この風速の高さ方向の分布は、べき法則と言われ、式(4)で示されるものである。

$$\frac{V_z}{V_0} = \left(\frac{Z}{Z_0}\right)^\alpha \dots\dots\dots (4)$$

- ここで、 V_z : 高度 Z m での風速
- V_0 : 基準高度での風速
- Z : 地上高度 (m)
- Z_0 : 基準地上高度で、通常 10 m
- α : べき指数で表面粗度の程度

を表す。地表面粗度が大きくなると、境界層が厚くなり、 α が大きくなることを意味する。すなわち、地表面粗度が大きい都市部では α が大きな値をとり、比較的地表面粗度が小さい草原や海上部では、 α は小さな値をとる。これま

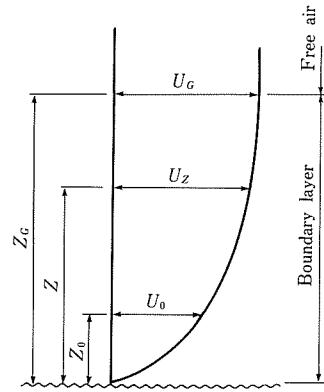


図-4 自然風の高度方向の風速分布

でに測定された結果によると、海上部では $\alpha = 1/10 \sim 1/7$ 、郊外で $\alpha = 1/6 \sim 1/4$ 、市街地や森林で $\alpha = 1/4 \sim 1/2$ 程度となっている。

2.6 基本風速 U_{10} と設計基準風速 U_d

橋梁の耐風設計を考える場合に、まず設定しなければならないのが、橋梁に対する設計基準風速 U_d の設定である。その場合、橋梁の架設地点における基本風速 U_{10} を知らなければならない。基本風速とは、統計的に算出された架橋地点の地上高度10mでの風速である。これについては、全国の気象官署のデータをもとに全国マップが作られているので、架橋地点周辺の概略値を知ることができる。しかしながら、風による振動が問題になりやすい長大橋を対象とする場合は、地形の影響等による詳しいデータを得るために、現地での風速測定を何年間かにわたって実施し、基本風速を決定することがよく行われる。

設計基準風速 U_d は、基本風速に地表面粗度による境界層の影響を考慮して、橋梁の桁位置での風速の高度補正を行った風速である。

$$U_d = E_1 \times U_{10} \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 E_1 : 高度補正係数

「道路橋示方書」では、対象とする橋梁に及ぼす風荷重の影響がそれほど大きくないことを想定して、一部の強風地域を除いて全国の高度10mにおいて50年間にその風速を超えない確率が0.6以上となるように、40m/sを設計基準風速としている。

3. 風による橋梁の挙動

振動しやすい橋梁が風の中でどのような力を受けて、どのような挙動をするのかを見てみる。図-5に示すように、物体に働く風による力は、3つに分けられる。これを空気力の三分力という。風向方向に働く力を抗力 D (Drag)、風向に垂直に働く力を揚力 L (Lift)、回転させようとする力を空力モーメント M (Aerodynamic moment) という。また、地形による効果や、気圧傾度等が原因となって、自然風には傾斜角が発生する。これまでの観測から、 $-7^\circ \sim +7^\circ$ 程度の範囲で生じるとされている。このことを橋桁の方から見た場合の風向として、迎角(むかえかく) (Angle of attack) という用語を用いる。橋梁はこれらの力により、変形したり、振動したりする。

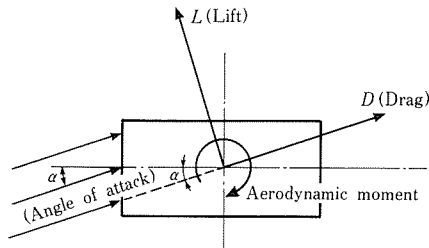


図-5 空気力の三分力と迎角

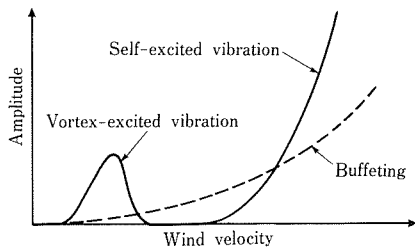


図-6 空力弾性振動の種類

静的変形に関する空気力の三分力は次式で表される。

$$D = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 C_D A \quad \dots\dots\dots (6)-1$$

$$L = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 C_L A \quad \dots\dots\dots (6)-2$$

$$M = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 C_M B A \quad \dots\dots\dots (6)-3$$

- ただし、 ρ : 空気密度
 C_D : 抗力係数
 C_L : 揚力係数
 C_M : 空力モーメント係数
 A : 風向方向の投影面積
 B : 桁幅

ちなみに、「道路橋示方書」の風荷重は次式で与えられている。

$$P = \frac{1}{2} \rho U_d^2 C_d A G \quad \dots\dots\dots (7)$$

上式中の G は、風の変動性を考慮して導入されたガスト応答係数で、次式で定義されるものである。

$$G = (\text{最大応答値}) / (\text{平均抗力による応答値}) \dots (8)$$

これは、海上風を想定し、およそ1.9を標準的な値としている。田園地帯、住宅地や大都市では、海上に比べ風の乱れ強さが大きくなるため、 G は大きくなるが、風速は海上に比べて小さくなるため、風荷重としては補い合うものと考えられた。

これら3つの力が、振動成分をもったときに空気力による振動が発生する。それらの振動には、たわみ振動とねじり振動とがあるが、流体の挙動との関係で渦励振 (Vortex-excited vibration)、自励振動 (Self-excited vibration)、パフティング (Buffeting) とに大別される (図-6)。とくに、自励振動の中で、たわみ振動の自励振動をギャロッピング (Galloping)、ねじれ振動の自励振動をフラッターと呼んでいる。動的耐風設計を理解するためには、これらの振動現象について概略を知っておく必要があるため、以下

に簡単な説明を行う。

3.1 渦励振

図-7に示すように流れの中に置かれた物体の背後には、周期的な渦が物体側面から放出される。物体背後の流れを後流 (wake) といい、後流渦をカルマン渦という。この渦の形成と同時に物体の上下側面には交互に圧力変動が発生し、物体には上下方向の力が正弦波的に発生する。この渦の振動数と物体の形状および流速の間には、特定の関係がある。これが発見者の名にちなんでつけられたストローハル数 S_i である。

$$S_i = \frac{f_v d}{U} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 f_v : 後流渦の振動数 (1/s)

d : 物体の代表長 (m)

U : 平均流速 (m/s)

このストローハル数の定義式が意味することは、後流渦の振動数は流速に比例し、ストローハル数は、物体によって特定の値をもつということである。ちなみに、円柱は $S_i = 0.2$ 、正方形角柱は $S_i = 0.12$ である。

図-8のように、物体がばねなどで支えられている場合は、その系固有の振動数 f_0 で物体は振動する。ばねで支えられている物体が流体中にある場合、物体の後流渦の振動数が系の固有振動数に近い領域で物体は振動する。風による振動 (空力弾性振動) のうち、このように物体の後流渦の振動数と物体が有する固有振動数とが近い状態で発生する振動を渦励振と呼んでいる。後流渦と物体とが同期して振動している領域を locking-in 領域という。

図-8に示されている渦励振の発生風速 U_{cr} は、ストロー

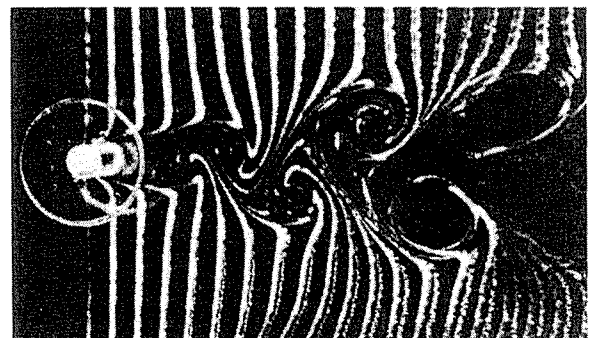


図-7 円柱の周りの流れ (流れは左から右へ)

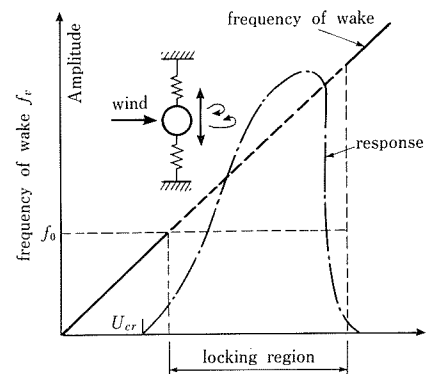


図-8 円柱の渦励振応答と後流渦の振動数

ハル数が分かっている場合には、次式によって推定可能である。

$$U_{cr} = \frac{f_0 d}{S_t} \dots\dots\dots (10)$$

したがって、渦励振の推定発生風速が設計基準風速より低ければ、渦励振に対する検討が必要になる。

3.2 自励振動

自励振動は、物体が振動することにより、新たな力が発生して、さらに物体を振動させるというループを繰り返すことにより振動振幅が増大する発散現象である。これは、地震などによる構造物の振動とは大きく異なっている。なぜなら、構造物の振動によって外力としての地震力が変わることはなく、地震による構造物の振動は、地震力によって強制的に振動させられている強制振動である。

耐風設計における基本的な考え方は、「設計基準風速内で発散振動である自励振動は発生させてはならない」ということであり、橋梁桁断面として、自励振動が発生する構造断面を採用してはならない。

3.3 バフエッティング (Buffeting)

自然風は図-1に示すように、不規則な風速変動を生じる。この不規則な風速変動に応じて不規則な応答振幅が現れる。これをバフエッティングという。バフエッティングが問題になるのは、長大径間長を有する橋梁の部材の疲労や、振動しやすい架設系における局部応力の発生や作業性が問題となる場合である。

4. PC橋の耐風設計

上述したように、PC橋のうち耐風設計が必要となるのは、吊り形式橋梁である斜張橋、エクストラード橋、吊床版橋や長径間桁橋の架設系などである。耐風設計の検討過程を日本道路協会の「道路橋耐風設計便覧」に基づいて示す。

4.1 動的耐風設計の必要性の判定

下記の条件を満たす場合は、概略であるが、それぞれの空力弾性振動が発生する可能性がある。

ただし、 L ：主径間長 (m)

U_d ：設計基準風速 (m/s)

B ：総桁幅 (m)

I_u ：主流方向の気流の乱れ強さ

(1) 開断面充腹桁の場合

$L \times U_d / B > 350$ ：ねじれの発散振動

$L \times U_d / B > 200$ かつ $I_u < 20\%$ ：渦励振

(2) 閉断面充腹桁の場合

$L \times U_d / B > 520$ ：ねじれの発散振動

$L \times U_d / B > 200$ かつ $I_u < 20\%$ ：渦励振

4.2 動的耐風設計に必要な諸量の計算

上述の判定で動的耐風設計が必要であると判定された場合、動的耐風設計に必要な諸量は以下のものである。

(1) 照査風速 U_r (m/s)

① ねじれ発散振動の照査風速 U_{rf}

$$U_{rf} = 1.2 E_{r1} \times U_d$$

E_{r1} は粗度が大きいほど大きな値をとり、粗度区分によ

り、1.1～1.25の値をとる。

② たわみ発散振動の照査風速 U_{rg}

$$U_{rg} = 1.2 U_d$$

(2) 構造減衰率 δ

空力弾性振動においては、振動特性が構造減衰に強く依存するため、安全側の構造減衰率として、斜張橋形式に対して $\delta = 0.02$ (対数構造減衰率) としている。

(3) 固有振動数

① 最低次たわみ振動数 f_h

概略値として

$$f_h = \frac{100}{L} \text{ (Hz)}$$

は有用である。しかしながら、固有値解析等で解析値が得られていれば、それを用いればよい。

② 最低次ねじれ振動数 f_θ

解析値が得られていない場合は、次式を用いる。

$$f_\theta = 2 f_h \text{ (開断面充腹桁)}, f_\theta = 3 f_h \text{ (閉断面充腹桁)}$$

(4) 単位長さあたり桁質量 m (kg/m) および極慣性モーメント I_p (kgm)

これらの諸量も計算値として求められていれば、それを用いることができるが、得られていない場合は次式で推定する。

$$I_p = (0.3 B)^2 m$$

4.3 振動の照査

動的耐風設計が必要と判断された振動現象に関して、以下に示す照査式が満たされれば、十分な動的耐風性を有すると判断してよい。

(1) 発散振動 (ねじれ)

PC橋の場合は、発散振動のうち、たわみの発散振動は考えにくいため、ねじれの発散振動のみを照査する。

$$\text{振動発現風速 } U_{cf} > \text{照査風速 } U_{rf}$$

ただし、 $U_{cf} = 2.5 f_\theta B$

(2) 渦励振 (たわみ)

渦励振は振幅も風速もある範囲に限定されているため、風速に対する制限か、応答振幅に対する制限かで規定しているが、PC橋の場合は風速による制限を適用してきた。

$$\text{振動発現風速 } U_{cvh} > \text{設計基準風速 } U_d$$

ただし、 $U_{cvh} = 2.0 f_h B$

(3) 渦励振 (ねじれ)

$$\text{振動発現風速 } U_{cv\theta} > \text{設計基準風速 } U_d$$

ただし、 $U_{cv\theta} = 1.33 f_\theta B$

4.4 動的耐風設計が十分と判断されない場合の方針

4.3の振動の照査の推定式により動的耐風性が良好でないと判定された場合は、次の手順により動的耐風設計を続ける。

Step 1：検討橋梁と類似の形状を有する橋梁に対して実施された風洞試験結果を参照するか、風洞試験を行うなど、より精度の高い推定方法に基づく動的耐風性の検討を行うかどうかを判断する。

Step 2：より精度の高い推定を行わない場合は、設計の方針や橋梁の諸元の見直しによって、4.3の振動の照査の照査式が満たされるか否かを検討する。この検討によって有

効な改良ができないと判断された場合は、(1)の方法によって動的耐風性を評価する。

Step 3：より精度の高い推定法に基づいても動的耐風性が不十分と判断される場合は、断面形状の工夫あるいは耐風制振用部材の設置等の設計変更を風洞実験によって調査する。ただし、渦励振のように振幅が限定されていて、構造物に損傷が直ちに発生しない現象に対しては、発生する振動の危険性を吟味したうえで、完成後の振動の発生状況に応じて何らかの対策を講ずることとしてもよい。

Step 4：細長比の大きい部材などの動的耐風設計

PC橋の場合、桁以外の部材で問題となるのは、斜張橋やエクストラードズド橋のケーブル、照明柱などの細長比の大きな橋梁付属物である。これらに関する振動問題は、多様性に富んでおり、橋桁の振動ほど一般性や規則性を見つけにくいので、個々の問題として扱われてきている。

Step 5：架設時の動的耐風設計

橋梁の架設時について、主に次に示すような場合に完成時とは異なる条件で動的耐風設計を行う必要がある。

- 斜張橋やエクストラードズド橋、長大径間桁橋が支間中央で閉合される直前
- 橋桁の断面形状が架設手順の都合などにより完成時と異なる場合

なお、架設期間は、供用期間に比べるとかなり短期間であり、設計基準風速を低減してよい。

5. 耐風設計上の留意点

数橋のPC斜張橋の建設に関係してきた経験の中から、PC斜張橋に特有の耐風設計に関係する部分について紹介する。

5.1 橋桁の耐風性と施工性

PC橋の桁断面は、同規模の鋼桁に比べて一般に2倍～3倍程度重いので、空気力の作用も相対的に小さくなり、風の作用に対しても振動振幅が小さくなる。しかしながら、風による振動は、強制振動的である渦励振でも自励的な要素を有しているため、構造減衰率が低い構造系では、振動が発生しやすい。PC橋は、かなりのたわみやすさを有しているものの、鋼橋ほどのじん性がないため、引張りが生じる箇所ではひび割れが入りやすく、たわみを鋼橋ほど許容できない。したがって、風による振動は、できる限り抑制することが望ましい。

鋼橋の場合、耐風性能を向上する目的で、桁端に先端が鋭角であるフェアリングが用いられることが多い。これをそのままPC桁に適用すると、死荷重が増えることと、先端が鋭角であることによる施工性の悪さ、さらに先端形状を長年保持することの困難さなどが生じる。その意味では、PC桁にフェアリングを用いて耐風性能を向上させる場合には、死荷重を減らせる小さめのフェアリングにし、施工性の向上とフェアリング形状を長期間保持できる形状である鋭角をもたないフェアリングとすることが重要である。著者は、呼子大橋、伊唐大橋、大芝大橋の桁断面の選定にあたって、これらのことを検討対象として、従来鋼橋に用いられてきた先端が鋭角であるフェアリングを改良して、先

端を切り落とした形状のプラントフェアリングを開発した。このフェアリングを用いることで、断面積を小さくでき、死荷重の低減を可能にし、施工性を向上させることができた。この開発経緯については、参考文献¹⁾、³⁾およびその中の文献に詳しく述べている。

また、一般に耐風性を向上させるためには、桁高を低くすることも重要な要素である。しかしながら、閉断面箱桁の場合は、桁内部での型枠の設置および除去等の作業があることや完成後の点検用に桁内部が利用されるため、作業員の行動に支障が生じないように、桁内部の高さを人の背丈程度に保持しておくことが必要である。

5.2 架設時の動的耐風設計

PC斜張橋のように張出し架設を行う場合、張出し長さに応じて構造系の固有振動数が増えるため、桁に渦励振が発生する可能性がある場合は、架設長に応じて渦励振が発生する風速が増えることになる。張出し桁が長くなればなるほど固有振動数が低くなるため、渦励振の発現風速も低風速側に移る。

また、桁が長くなるに伴って、10 m/s 程度の風でもバフティング振動の振幅が大きくなり、作業員の船酔い現象が現れて作業性も悪くなる。張出し架設時の橋梁は、橋梁基部ですべての挙動が支えられているため、とくに台風時に最大張出し長さにならないように施工計画を念入りに立てる必要がある。台風時のバフティングによる検討は、バフティング時の最大応答振幅発生時に、塔基部（橋脚基部の場合もある）の応力が許容応力度内にあるかどうかの推定を行うことである。そのためには、3次元モデルを用いた風洞実験によるバフティング振動時の振幅推定を行う必要がある。施工計画、最も留意すべきは、中央径間閉合直前が台風時期に合致させない施工計画を立てることである。施工計画が悪い場合には、補強工事が必要になる場合がある。これまでに著者が関与した橋梁では、幸いにも台風時に閉合直前となることを避けることができ、これらの問題は生じなかった。

5.3 ケーブルの耐風設計

斜張橋やエクストラードズド橋では、桁以外の重要な部材であるケーブルの耐風性の検討が重要な項目となる。ケーブルの振動としては、渦励振、レインバイブレーション、1 定着点に複数本のケーブルを用いた場合のウエイクギャロッピングがある。いずれの振動も抑制しなければ、ケーブル定着部でケーブル被覆管の破損、あるいはケーブル定着部の疲労などの問題が発生する。このことは、PC斜張橋のみならず、斜張橋全般に関係する問題である。

渦励振：斜張橋のケーブルは、円形をしているため、円柱の渦励振と同じ発生機構で振動が発生する。ケーブルは種々の長さを有しているため、種々の風速で渦励振が観察されることになる。また、同一のケーブルでも種々の振動モードで渦励振が発生する。すなわち、1 次の振動モードで渦励振が発生した場合、その倍の風速あたりで次の高次である 2 次の振動モードの渦励振が発生するという具合に、渦励振はどの風速域でも発生する可能性がある。これに対して現在とられている方法は、ケーブルの桁側定着部に粘性

ダンパーなどの減衰器を取り付けて減衰を構造的に増加する方法である。また、ケーブルどうしを連結することにより、互いのケーブルの振動を抑制させる方法も採用されている。空力対策も種々試みられているが、十分な解決策は開発されていないのが現状である。

レインバイブレーション：これは、風速が12 m/s, 13 m/s程度以上の小雨状態で、ケーブル表面上に水路が形成される状況のときに、大振幅の振動が発生するものである。この現象については、その発生メカニズムも解明されている⁴⁾。その結果、空気力としてはあまり大きな発散力ではないため、ケーブルの対数構造減衰率を $\sigma > 0.02$ 程度にすることで、構造的に制振できるとされている。しかしながら、長大斜張橋になると、ケーブルが長くなるため、ケーブルの構造減衰率は非常に小さくなると同時に、現在行われているケーブル端部での構造減衰付加は有効ではなくなる。そこで、空力的な対策が必要となる。現在のところ、レインバイブレーションの空力的振動抑制には、ケーブル表面を自由に水路が動けないようにするための水路形成を固定する溝をつけることが有効であるとされている⁵⁾。ケーブル表面にU字形溝をつけたタイプ、逆に平行突起をつけたタイプ、ゴルフボールのようなくぼみ(凹)をつけたインデントケーブルなどが提案され、それぞれ実橋に適用されている。

ウェイクギャロッピング：斜張橋ケーブルが1定着点に複数本を用いられることは、小容量のケーブルを使うことができるため、経済性の観点からは好ましいことである。しかしながら、2本のケーブルが流れ方向に並列に並べられることになり、新たに複雑な空力問題を提起することになった。すなわち、上流側ケーブルからの剥離流が、下流側ケーブルの振動を誘起するもので、しかもその発散力はかなり大きく、上述の現象と比較すると、減衰付加による振動抑制も十分にその効果が発揮されないほどである。空力的な対策として、ケーブル間隔を離すことにより、発散空気力を小さくはできるが、減衰付加で対応できる程度までにはならない。また、ケーブルを近接させることにより、空気力を小さくすることも試みられ、空気力を小さくすることはできたが、これも十分ではなかった。並列ケーブル方式は、かなりの斜張橋で用いられてきたが、その制振対策としては、ケーブルを相互に連結する方法が最も有効な方法のようである。しかしながら、後流側ケーブルの励振力が大きいため、連結しているワイヤーが部分的に破断しており、定期的に点検を行いながら、維持補修を続け

ざるを得ないのが現状である。このような状況を考えると、今後の斜張橋のケーブルとしては、1定着点に複数本のケーブルを用いる方法は採用しないことが肝要であり、設計者が並列ケーブルの空気力がかなり大きいことを十分に理解しておく必要がある。

6. あとがき

PC橋の耐風設計に関する話題として、耐風設計の手順および留意点について述べた。しかしながら、耐風設計そのものが、他の設計手法等と基本的に異なっている点がある。それは、他の設計手法のように応力レベルでの議論ができにくい点である。それは、空力弾性振動が、構造物の形状に依存した現象であること、その現象が非線形であること、空気力が形状に依存しているために、定量的把握を一般化しにくく、応力評価に結び付けにくい点にある。少なくとも、振動が発生するか否かを正確に判定するためには、対象となった構造物に働く空気力を風洞実験で測定する必要がある。現象の推定制度を確固たるものにするためには、空気力を十分な精度で測定しなければならないが、現象を説明できる精度で空気力を測定する手法も、いまだ十分とは言えない状況である。

耐風設計としての手順は、説明したとおりであるが、その中身の充実、これからの研究に待たざるを得ない。現在進められている数値流体解析の実用化がなされれば、現在風洞実験を主体としている耐風設計法もかなり変わるものと考えられる。

本稿を通して、耐風設計にご関心をお持ちいただいた方には、より詳細をご理解いただくために、参考文献^{1), 2)}のご一読をお勧めする。

最後に、耐風設計の現状が、少しでも多くの方々にご理解いただけることを切に望んでおり、ついでにご質問など遠慮なくお寄せいただきたい。

なお、本稿を掲載する機会を与えていただいた本誌編集委員会に心から感謝申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会 編：構造物の耐風構造，東京電機大学出版局，1998
- 2) 日本道路協会：道路橋耐風設計便覧，1991
- 3) 久保：PC斜張橋の耐風性能試験，プレストレストコンクリート，Vol.39，No.3，pp.92～99，1997
- 4) 樋上：斜張橋ケーブルのRain Vibration，日本風工学会誌，第27号，pp.17～28，1986
- 5) 宮崎：斜張橋ケーブルの空気力不安定振動と制振対策，第10回風工学シンポジウム論文集，pp.145～150，1988

【2001年2月1日受付】