

# 付属資料編

## A1 架設時の風の影響

### (1) 架設設計に考慮すべき風速

通常の構造物の架設においては、設計風荷重は完成構造物の設計風荷重の半分程度をとれば十分と考えられる。しかし、風荷重が架設設計に大きく影響を及ぼす場合には、合理的な設計風速の推定が必要となる。

構造物の架設設計に考慮すべき風速の決定に際しては、対象とする構造物の重要性、所要の安全性等に関する評価も必要となるが、それは主任技術者の判断にゆだねることとし、ここでは、主として強風の予測に必要な風の一般的特性とその評価方法について概要を述べることにする。

風速の変動は、季節単位のもの、月単位のものなど、比較的長期のものと、短時間のうちの変動に分けられる。長期の変動は1年で繰り返される性質が強く認められるため、再現期間の単位として「年」が用いられている。

設計には、10分間平均風速値を用いることが多いが、瞬間風速値を用いることもある。構造物の振動の影響などを考慮する場合には、これらとは異なる評価時間が使われる。たとえば、ごく狭い範囲の風速変動の影響が大きいような、小規模な壁や金具の設計では1秒程度の平均化時間の1秒ガスト（英語でGust、突風の意味）、固有周期が長い吊橋では3分を平均化時間とした3分ガストが使われた例もある。以前の道路橋示方書をはじめ本州四国連絡橋公団の古い規定では、構造物振動の影響を含む等価な最大瞬間風速を用いていたが、現在は荷重補正での表現に変更されている。

通常、設計風速は次の手順にそって求められる。

- ①所定の再現期間に対する基本風速の推算
- ②地形、高度、季節等による基本風速の補正
- ③最大瞬間風速の推算
- ④構造物の規模、振動特性等による補正

以下、この順に従ってその概略を示す。

### (2) 風速の再現期間の推算方法と風荷重の推定

風速  $V_T$  以上の強風が平均して  $T$  年に1度の割合で起こると期待されるとき、 $T$  年を風速  $V_T$  の再現期間という。一般に、 $V_T$  が、架設期間  $n$  年間に  $V_T$  以上の強風を受けない確率（非超過確率）を  $\alpha$  とすれば、 $\alpha$  は次式で表される。

$$\alpha = \{1 - (1/T)\}^n \quad \dots\dots\dots (A1.1)$$

同じ関係式ではあるが、非超過確率と架設期間  $n$  を用いた再現期間は次のようになる。

$$T = \frac{1}{1 - \alpha^{1/n}} \quad \dots\dots\dots (A1.2)$$

この関係を図示すると図 A1.1 のようになる。

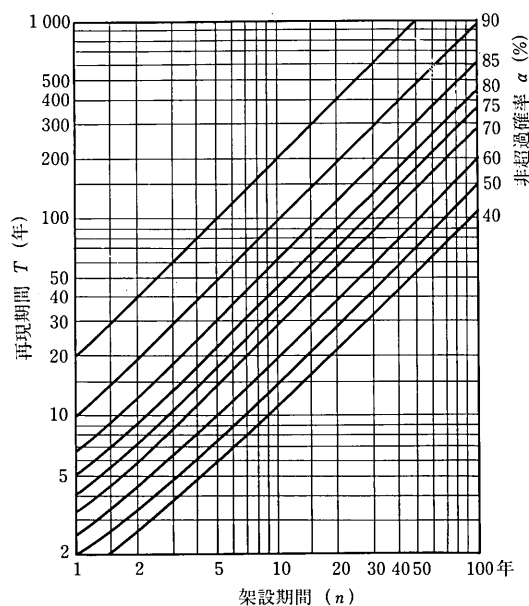


図 A1.1

採用すべき非超過確率は、構造物の崩壊による直接的な損害のほか、間接的損害、人命等を、総合的に評価して決める必要がある。

### (3) 再現期待値としての基本風速の推算

再現期間  $T$  と風速  $V_T$  の関係は次式で表される。

$$T = 1/\{1 - F(V_T)\} \quad \dots\dots\dots (A1.3)$$

ここで、関数  $F$  は年最大風速の確率分布関数であるが、これには次の 2 重指数分布がよく適合することが一般に知られている。

$$F(V) = \exp(-e^{-y}), \quad y = a(V - b) \quad \dots\dots\dots (A1.4)$$

ここで、 $a, b$  は風の観測地点ごとに定まる定数である。

この関係を表現するには、2 重指数確率紙が便利であり、通常よく用いられる。全国の代表的気象官署で得られた年最大 10 分間平均風速記録を基に、2 重指数確率紙上に再現期間  $T$  年と最大風速  $V_T$  (10 分間平均値) を図 A1.2 に示す。一方、道路橋耐風設計便覧では、全国を平均して再現期間  $T$  に関する代表的な関係を式 (A1.5) のような関数として提案している。

$$V_E = V \left[ 0.61 - 0.10 \ln \left\{ \ln \left( \frac{T}{T-1} \right) \right\} \right] / 1.07 \quad \dots\dots\dots (A1.5)$$

ここで、 $V$  は計算の基礎となる完成時設計風速 (耐風設計便覧では道路橋示方書と同じく 50 年間で非超過確率 0.6 を想定している)、 $T$  は架設期間  $n$  年と非超過確率  $\alpha$  から得られる架設に対する再現期間である。下添え字の  $E$  は架設時の値であることを示す。

橋梁の架設工事で風荷重を完成構造物の半分にとっている例が多いが、これは次のような考え方によっている。

図 A1.1 あるいは式 (A1.2) により、架設期間 1 年、非超過確率 0.6 とすると再現期間 2.5 年、同じく架設期間 1 年、非超過確率 0.9 とすると再現期間 10 年となる。これらに、式 (A1.5) を適用すると、 $V_E/V$  は、それぞれ 0.63 あるいは 0.78 となる。

なお、風荷重と風速は以下のような関係にある。

$$p = \frac{1}{2} \rho C_D V_D^2 G \quad \dots\dots\dots (A1.6)$$

ここで、 $p$  は単位面積あたりに作用する風荷重、 $\rho$  は空気密度、 $C_D$  は抗力係数、 $V_D$  は設計基準風速、 $G$  はガスト応答係数である。ガスト応答係数は架設時と完成時で大きくは変わらないとすると、架設時の風荷重  $p_E$  と完成時の風荷重の比をとることにより次の関係式を導くことができる。

$$\frac{p_E}{p} = \frac{\frac{1}{2} \rho C_D V_{DE}^2 G}{\frac{1}{2} \rho C_D V_D^2 G} = \left( \frac{V_{DE}}{V_D} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (A1.7)$$

先の設計風速比を考えると、 $p_E/p$  はそれぞれ 40% と 60% となり、架設時風荷重は完成時の風荷重のおおむね半分となる。

一方、鋼道路橋施工便覧 (日本道路協会編、丸善) ではより短期の架設期間の場合について

① 短期間 (1 カ月以下) の架設工事 ..... 風速 20 m/s を想定し、風荷重 392 N/m<sup>2</sup>

② 通常の架設工事 ..... 風速 30 m/s を想定し、風荷重 882 N/m<sup>2</sup>

③ 台風期を含む長期間 (6 カ月以上) で大規模な架設工事 .... 風速 40 m/s を想定し、風荷重 1568 N/m<sup>2</sup>

を、過去の経験や事例から定めている。

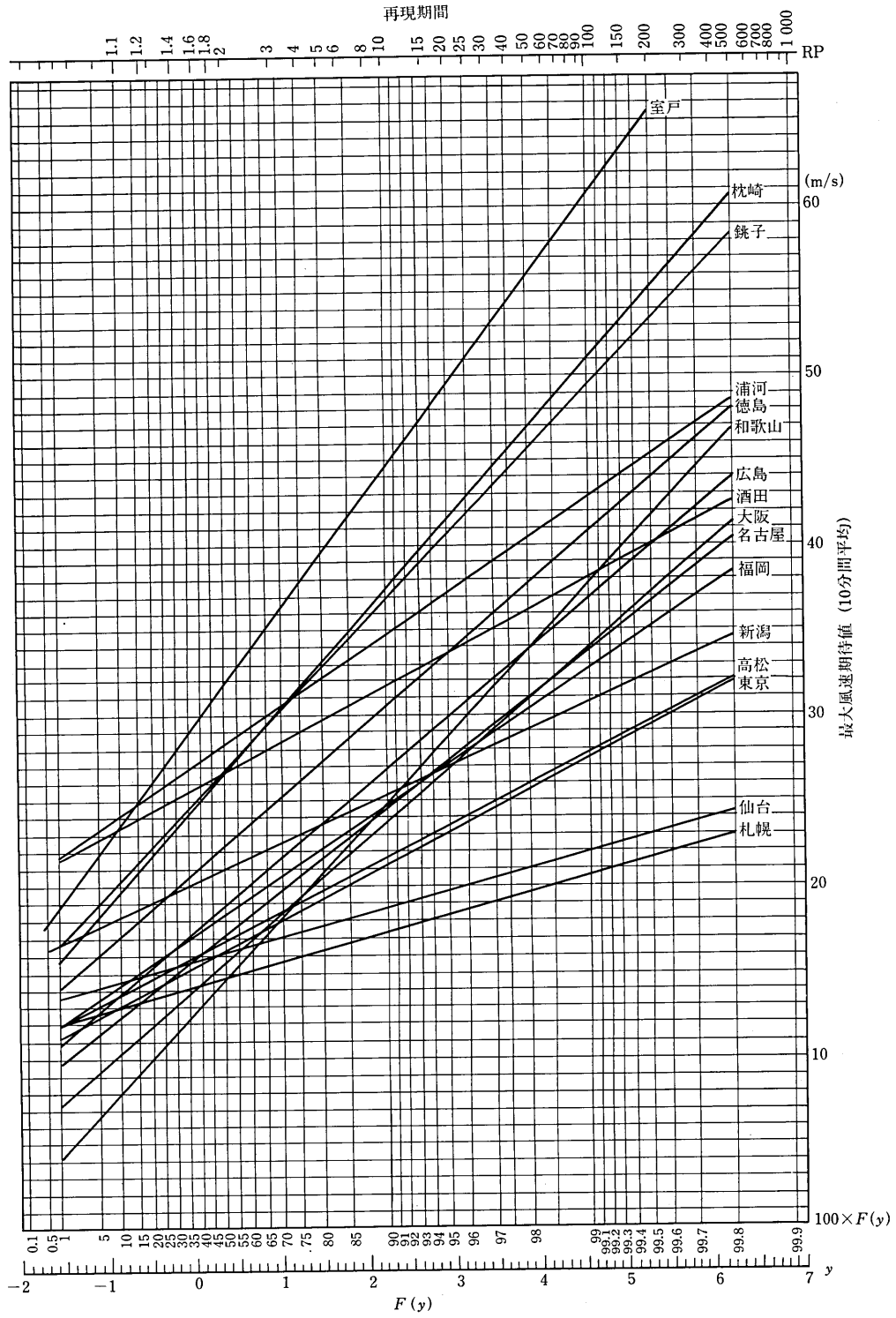


図 A1.2

(4) 高度, 地形, 季節等による基本風速の補正

1) 高度による補正 (風速の鉛直分布)

通常, 構造物の架設で問題となるのは地上から 200~300m までであるが, この範囲では風速は一般に地表面の摩擦の影響を受けて高さ方向に変化し, 高くなるほど風速は強くなる. この風速の高さ方向の変化率を表すものとしては, 次式で表されるべき法則が多く用いられる.

$$V_Z = V_{10}(Z/10)^\gamma \dots\dots\dots (A1.8)$$

ここで,  $V_Z, V_{10}$  は高度  $Z$  m および 10m における 10 分間平均風速,  $\gamma$  は地物の状況に関する定数で, 道路橋耐風設計便覧ではべき指数部を高度に関する補正係数  $E_1$  として式 (A1.8) を書き換え次の関係として, 表 A1.1, 表 A1.2 の関係を与えている.

$$V_Z = V_{10}E_1 \dots\dots\dots (A1.9)$$

2) 地形の影響

風は局地的な地形によっても著しく影響を受ける. 地形により風が鉛直あるいは水平方向に収束した場合, 一般に風速は増大するが, このような現象の例としては次のようなものがある.

表 A1.1 地表粗度区分と地表の状況

地表粗度区分	地表状況	粗度
I	海上, 海岸	粗度が小さい
II	農地, 田圃, 開けた土地 樹木や低層建築物が散在している地域	
III	樹木や低層建築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	↓
IV	中高層建築物が密集している地域 起伏の大きい丘陵地	粗度が大きい

表 A1.2 風速の高度による補正係数  $E_1$

高度 (m)	地表粗度区分				高度 (m)	地表粗度区分			
	I	II	III	IV		I	II	III	IV
$0 < z \leq 5$	1.11	1.00	0.83	0.77	$80 < z \leq 90$	1.55	1.41	1.22	1.04
$5 < z \leq 10$	1.16	1.00	0.83	0.77	$90 < z \leq 100$	1.57	1.43	1.25	1.08
$10 < z \leq 15$	1.24	1.04	0.83	0.77	$100 < z \leq 110$	1.59	1.46	1.27	1.11
$15 < z \leq 20$	1.29	1.09	0.85	0.77	$110 < z \leq 120$	1.61	1.48	1.30	1.14
$20 < z \leq 25$	1.33	1.14	0.90	0.77	$120 < z \leq 130$	1.62	1.50	1.32	1.16
$25 < z \leq 30$	1.36	1.18	0.94	0.77	$130 < z \leq 140$	1.64	1.52	1.35	1.19
$30 < z \leq 35$	1.39	1.21	0.98	0.79	$140 < z \leq 150$	1.65	1.53	1.37	1.22
$35 < z \leq 40$	1.41	1.24	1.01	0.82	$150 < z \leq 160$	1.67	1.55	1.39	1.24
$40 < z \leq 45$	1.43	1.26	1.04	0.85	$160 < z \leq 170$	1.68	1.57	1.41	1.26
$45 < z \leq 50$	1.45	1.28	1.07	0.88	$170 < z \leq 180$	1.69	1.58	1.43	1.28
$50 < z \leq 60$	1.47	1.31	1.11	0.92	$180 < z \leq 190$	1.70	1.60	1.44	1.31
$60 < z \leq 70$	1.50	1.35	1.15	0.96	$190 < z \leq 200$	1.71	1.61	1.46	1.33
$70 < z \leq 80$	1.53	1.38	1.18	1.00					

(a) 稜線や山頂を越える風

稜線や山頂を越える風は図 A1.3 のように鉛直方向に収束し、風速を増す。そのため、山頂での風速の鉛直分布は地表に近い部分の方が高いところより高風速となる場合がある。このような現象は、築堤や崖の角などでも実際に見られているので注意する必要がある。

(b) 傾斜地を越える風

傾斜地については系統的な実験から、次式によって風速の割増し係数を予測できる（参考文献：建築物荷重指針・同解説、日本建築学会）。

$$E_g = E_a \left\{ E_c \left( \frac{Z}{D} - E_b \right) + 1 \right\} \exp \left\{ -E_c \left( \frac{Z}{D} - E_b \right) \right\} + 1 \dots\dots\dots (A1.10)$$

ここに、 $D$  は図 A1.4 に示す傾斜地の高低差、 $E_a, E_b, E_c$  は表 A1.3 に示す係数である。ただし、風速の割増し係数  $E_g$  は傾斜角  $5^\circ$  以上の場合に与えられる。地形の影響による地上  $Z$  (m) 高さの風速  $V_z$  は平坦地における地上  $Z$  (m) 高さの風速  $V_0$  に風速の割増し係数を乗じることにより求める。

(c) 谷や海峡を通る風

峡谷や海峡がある場合、風の流は図 A1.5 のように谷線にそって集中し、言い換えれば水平方向に収束して、風速が増大することになる。

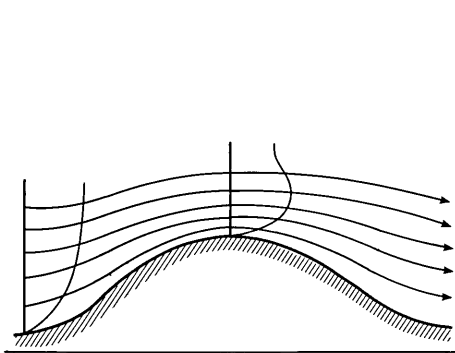


図 A1.3 山頂を越える風

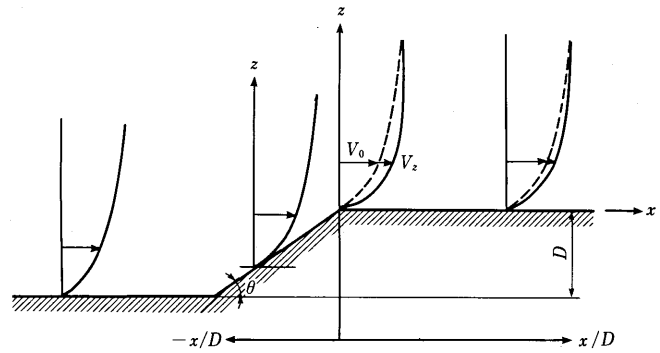


図 A1.4 傾斜地を越える風

表 A1.3

傾斜からの距離	傾斜角	$E_a$	$E_b$	$E_c$
$-3.0 \leq X/D < 0$	$\theta = 5^\circ$	0	0.2	2.0
	$\theta = 15^\circ$	$0.20(X/D) + 0.6$		
	$\theta \geq 25^\circ$	0		
$0 \leq X/D < 3.0$	$\theta = 5^\circ$	0	$0.08(X/D) + 0.2$	$-0.07(X/D) + 2.0$
	$\theta = 15^\circ$	$-0.12(X/D) + 0.6$	$0.30(X/D) + 0.2$	$-0.36(X/D) + 2.0$
	$\theta = 90^\circ$		0.26	0.92
$3.0 \leq X/D < 5.0$	$\theta = 5^\circ$	0	$0.08(X/D) + 0.2$	$-0.07(X/D) + 2.0$
	$\theta = 15^\circ$	0.26	1.10	0.92
	$\theta = 90^\circ$		1.10	0.92
$5.0 \leq X/D < 9.0$	$\theta = 5^\circ$	0	0.60	1.65
	$\theta = 15^\circ$	0.26	1.10	0.92
	$\theta = 90^\circ$		1.10	0.92

[注]  $X < 0$  の区域では傾斜角が  $5^\circ \sim 15^\circ$  および  $15^\circ \sim 25^\circ$  の場合、 $X \geq 0$  の区域では傾斜角が  $5^\circ \sim 15^\circ$  および  $15^\circ \sim 90^\circ$  の場合、角度に対して直線補完より推定することができる。

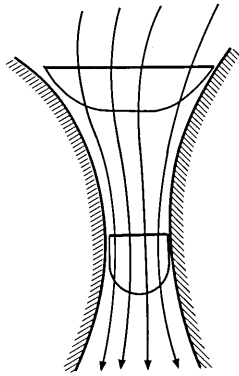
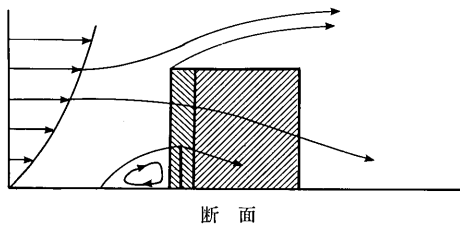


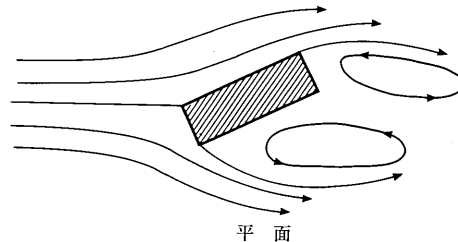
図 A1.5 峡谷や海峡を通る風



図 A1.6 おろし風



断面



平面

図 A1.7 単独高層ビル周辺における風の流れ (Baines)

このほかに、リアス式の海岸のように奥まった湾に風が吹き込む場合に収束して、湾奥で風速が増大することもある。

#### (d) 山脈の風下側に吹きおろす風

山脈に直角に風が吹くとき、普通は風下側の斜面では風速が落ちるが、場合によりおろし風と呼ばれる山越しの気流が山麓に強く吹きおろすことがある (図 A1.6)。

#### (e) 高層ビル周辺の風

最近、高層ビルの周辺で強風が吹き、問題が生じている例が少なくない。

この強風の機構は周辺地物の影響を受けて複雑なものとなっており、現在各所で観測・研究がなされているが、単独の高層ビル周りの風は図 A1.7 のように流れるといわれている。基本的形状の建物については数多くの風洞実験が行われ、風速増加領域が求められている。それらのうちの代表的なものについては風速増速領域図集として文献に掲載されている (新・ビル風の知識, 風工学研究所編, 鹿島出版会)。

### 3) 季節による補正

強風の原因としては、夏から秋にかけての台風によるものと、冬から春にかけての季節風によるものがほとんどである。どちらが卓越するかは地域により異なり、たとえば北海道、東北地方の日本海側の諸地点では季節風が、また、南西諸島、九州、四国地方では台風が強風速を生む主要因となっている。架設する期間が短期であり、かつ強風期を避けることが可能な場合には、適宜、基本風速を低減してよいと思われるが、その際には、近隣の気象官署の記録などを参考にして十分検討する必要がある。

#### (5) 最大瞬間風速としての設計風速の推算

前項までの議論はすべて平均風速についてであるが、実際の構造物の設計には、これに突風率の補正を施した最大風速を考慮しなければならない。突風率  $g$  は、平均風速と最大瞬間風速との比で

$$g = V_{\max} / \bar{V} \dots\dots\dots (A1.11)$$

表 A1.4 台風 5915 号での各地の風速と突風率

観測所	風向	最大瞬間風速 $V_{max}$	最大 10 分間 平均風速 $V_{10max}$	$g = \frac{V_{max}}{V_{10max}}$	観測所の高さ	観測塔の高さ
室戸岬	NNE	41.1 m/s	27.7 m/s	1.48	184.8 m	13.7 m
徳島	N	36.3	26.4	1.38	24.0	16.8
洲本	NNW	49.2	42.3	1.16	112.4	11.0
神戸	NNE	34.8	29.3	1.19	59.5	26.8
彦根	ENE	36.0	21.9	1.65	88.5	18.3
春照	ESE	39.1	25.5	1.53	30.4	13.7
尾鷲	SE	51.5	28.1	1.83	15.8	16.1
津	ESE	51.3	36.8	1.39	4.3	16.0
亀山	SE	41.6	28.4	1.47	70.7	12.4

(館知之：台風に関する二、三の統計的調査，天気，Vol.8，No.10，1961)

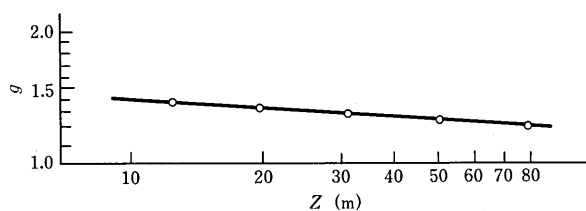


図 A1.8 突風率（平均値）の高度分布

で定義されるが、 $\bar{V}$  の評価時間（日本では 10 分が用いられる）、周辺地形、高度、 $V_{max}$  の評価時間、風速などにより影響を受ける。

1) 平地における突風率

最大瞬間風速の評価時間を 2~5 秒とした場合、平地における  $g$  の値は一般には 1.2~1.6 程度と考えられている。表 A1.4 に暴風の観測記録の一例を示すが、これによると 1.6 を超えている場合もある。

2) 突風率の高度変化

一般に、突風率は高度が高まるにつれて小さくなる。垂水観測塔（明石海峡）による強風時の 14 回の観測例から、突風率の平均的な傾向として

$$g_z = g_{10}(Z/10)^{-0.052} \dots\dots\dots (A1.12)$$

の関係が得られている。この関係を図示すると図 A1.8 のようになる。

(6) その他、構造物の規模、振動特性等による補正

自然風は時間的にも空間的にも変動している。風速の時間的変動は構造物に不規則強制振動を生ぜしめるため、たとえば吊橋のように可撓性に富むものを架設する場合には、その静的応答に何がしかの増幅を考慮しなければならない。一方、風速の空間的変動は、構造物の全長にわたって同じ大きさの風速が同時に作用することはないという理由から、たとえば長大な構造物を架設するような場合、等分布風速に置き換えて設計するにはやはり補正するのが合理的である。なお、詳細については関連の文献〔たとえば本州四国連絡橋耐風設計基準（1976）〕を参照されたい。



## 付録 1. 構造物の架設設計に考慮すべき振動

最近、可撓性が大きく、しかも減衰性の小さい構造物が多く出現するに至っているが、このような構造物を架設する場合、風による構造物の振動現象はかなり複雑で、振動の分類についても判然としない部分があるが、その発生機構に着目して区分するならば次のようになる。

- ① 渦による振動
- ② 空気力による自励振動
- ③ 風の乱れによる強制振動

なお、詳細については関連の文献〔たとえば道路橋耐風設計便覧〕を参照されたい。

以上のような風による振動について架設時の耐風安定性を検討した一例を要約する。

### ■四国縦貫自動車道宿茂橋での検討例

本橋は四国縦貫道伊予 IC～内子・五十崎 IC 間に位置する、中央 2 径間が径間長 85 m の 4 径間、2 主桁、桁と RC 橋脚を剛結した複合ラーメン橋である。

ジャッキアップ回転工法 (図 A1.9) で主桁部のみが直立した形になり、また、構造特性上、弱軸方向の変形がおきやすく、また架設桁の形状から風による振動の発生が予想されたため、吊橋、斜張橋のタワーに準じる検討を、風洞試験を含め実施した。

#### (1) 設計風速と風荷重

桁のジャッキアップ時の横倒れ座屈と回転ピンの設計に、架設手順、状況を考慮してそれぞれ別の風荷重を設定した。

##### 1) 桁ジャッキアップ時の横倒れ座屈検討のための風荷重

道路橋耐風設計便覧によれば、架設地点の基本風速は  $V = 30 \text{ m/s}$  である。高度補正は塔の規定を準用し、高度 105 m に対し、山間地であるために粗度区分 IV を想定 (適用) して、 $E_1 = 1.11$  となる。また、架設期間を 1 年とし、非超過確率 0.6 とすると、再現期間は  $T = 2.5$  年となる。

これに、基本風速の変換式 (式 (A1.5)) を適用すると、

$$V_E = V \left[ 0.61 - 0.10 \ln \left\{ \ln \left( \frac{T}{T-1} \right) \right\} \right] / 1.07 = 0.63V$$

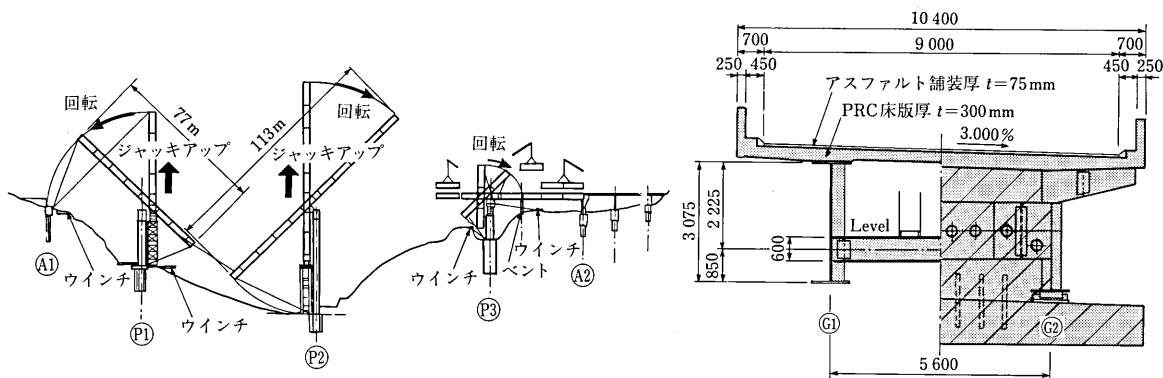


図 A1.9 架設工法の概要と桁断面 (床版は架設後打設)

架設時の設計基準風速は高度補正を考慮して、

$$V_{DE} = 0.63 \times 1.11 \times 30 = 21 \text{ m/s}$$

道路橋示方書の風荷重  $p = 2940 \text{ N/m}^2$  を基本とし、式 (A1.7) を適用すると、

$$p_E = \left( \frac{21 \text{ m/s}}{40 \text{ m/s}} \right)^2 2940 \text{ N/m}^2 \approx 810 \text{ N/m}^2$$

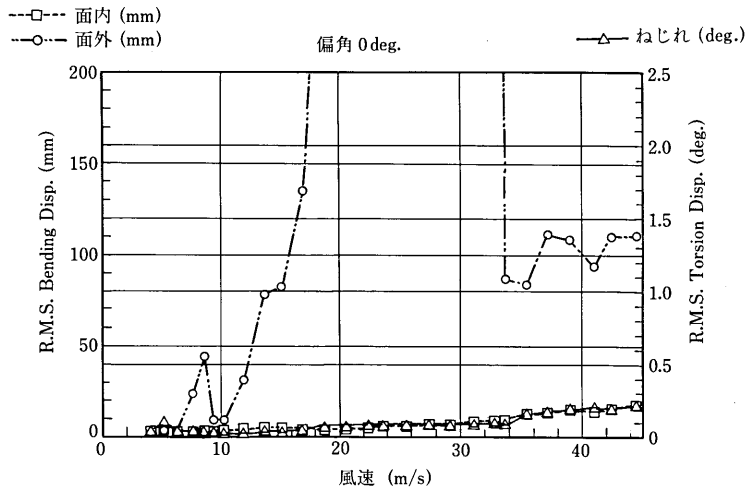
となるが、架設手順などを考慮し、 $980 \text{ N/m}^2$  を風荷重とした。

2) 回転ピン設計用の風荷重

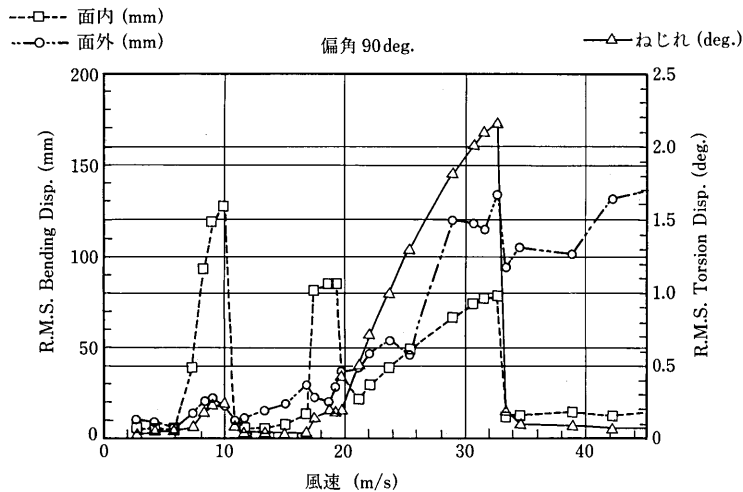
架設手順を考慮すると回転ピンにはクレーン架設で用いられる設計風速  $16 \text{ m/s}$  を適用するのが妥当であると考えられた。これを用い、抗力係数  $2.1$ 、ガスト応答係数  $1.9$  として、式 (A1.6) を適用し、 $p_E = 625.24 \text{ N/m}^2$  を適用した。

(2) 風による振動

桁を直立させる架設方法であるために、全風向を考慮し、安全であることを確かめる必要がある。風洞実験を実施し、対風応答を調べ、その結果、架設時の構造系にもよるが、完成時橋軸と直角方向の風により橋



(a) 橋軸方向の風による振動



(b) 橋軸直角方向の風による振動

図 A1.10 風速と振動振幅の関係

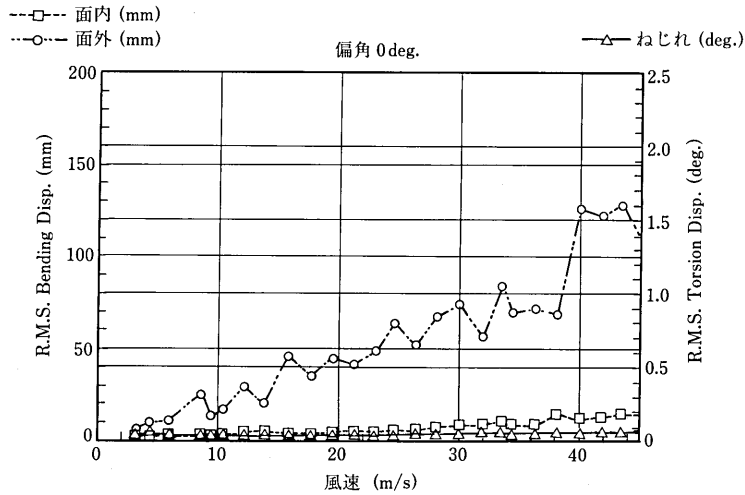


図 A1.11 主桁先端にネットを取り付けた場合の風速と振動の関係（橋軸風向の場合）

軸方向の、橋軸方向の風により橋軸直角方向の振動が発生することが判明した（図 A1.10）。橋軸直角方向の風による振動では、10 m/s 付近の風速から橋軸方向の限定振動が発生し、風速が高まるとたわみ、ねじれの振動が発生する。橋軸方向の風の場合にも、同様に 15 m/s を超えると、橋軸直角方向の大きな振動が発生している。前者の架設時設計風速の範囲の限定振動については、工法によるワイヤリングが制振作用として期待できること、後者については主桁先端部に落下物防止ネット程度のネットを取り付けることにより制振できることが判明した（図 A1.11）。

### (3) 現地での応答

最大張出し架設の時の 1999 年 9 月 24 日に、きわめて大きな被害を各所にもたらした台風 9918 号がごく近くを通過した。最接近時で、ほぼ半径 150 km の暴風域に入り、中心気圧 950 hPa、中心付近最大風速約 40 m/s であった。橋脚天端に設置した風速計で、最大瞬間風速 26.4 m/s を記録した。現地で観測された 10 分間の平均風速としては 10 m/s 程度であるが、瞬間風速から判断される架設系として評価すべき風速は、風洞実験で対応策を施した風速域に及んでいた。しかし、卓越風向の関係もあり、特に支障となるような変形や、有害な振動の発生は記録されなかった（巴コーポレーション技報, No.13, 平成 12 年）。

## 付録 2. 完成構造物の耐風設計基準例

本指針と関連のある完成構造物の耐風設計基準例としては次のようなものがある。

- 1) 道路橋示方書・同解説, 日本道路協会, 平成 8 年
- 2) 道路橋耐風設計便覧, 日本道路協会, 平成 3 年
- 3) クレーン構造規格, 厚生労働省, 平成 13 年
- 4) 本州四国連絡橋耐風設計基準・同解説, 本州四国連絡橋公団, 昭和 51 年
- 5) 明石海峡大橋設計要領・同解説, 本州四国連絡橋公団, 平成 2 年
- 6) 尾道今治ルート設計基準・同解説, 本州四国連絡橋公団, 平成 6 年
- 7) 建築基準法施行令, 告示, 2000.
- 8) 高層建築技術指針, 日本建築学会, 昭和 49 年
- 9) 鉄塔構造計算規準・同解説, 日本建築学会, 昭和 37 年
- 10) 容器構造設計規準, 日本建築学会, 昭和 44 年
- 11) 建築物荷重指針・同解説, 日本建築学会, 1993.
- 12) 塔状鋼構造設計指針・同解説, 日本建築学会, 1980.
- 13) 建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説, 日本建築学会, 1991.
- 14) 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 日本鋼構造協会, 1993.
- 15) 実務者のための建築物風洞実験ガイドブック, 日本建築センター, 1994.
- 16) 煙突構造設計施工指針, 日本建築センター, 1982.
- 17) 畜舎設計規準・同解説, 日本畜産施設機械協会, 1997.
- 18) 改訂 風荷重に対する足場の安全技術指針, 仮設工業会, 1999.
- 19) 鋼板製屋根構法標準, 亜鉛鉄板会, 1977.
- 20) 電気規格調査会標準規格 電力無線通信アンテナ支持物設計標準 JEC-144-1980, 電気学会, 1980.