

# 強風の予測と設計風速について

川田工業株式会社

枝元 勝哉

## 【風設計の2つのステップ】

### (1) 風荷重を基にした静的設計

風荷重は設計者の便を考慮して、一般的に適用出来る形で書かれている。(道路橋示方書、建築物荷重指針など)

### (2) 風による振動を検討する動的照査

まずは、動的照査の必要性を判断する必要がある。この作業は具体的には風による振動に対し安全な構造物を探すということになる。橋梁の場合には、以下の2つの考え方がある。

① 類似橋梁による前例から判断。経験値の集大成として便覧などがある。

② 風洞実験による詳細な検討。前例の無い長大構造では必要な場合が多い。

ただし、橋梁の場合には、多くの場合断面の部分的変更などで対処しているのが実状である。

## 【風によりどのような現象が生じるか】

- ・[風の条件] どのような風が吹くか。
  - ・[構造物の形状の条件] どのような形をしているか。
  - ・[構造物の力学的条件] 外力に対しどのように変形するか、振動するか。
- いずれの場合にも、入力となる風に関する情報が必要不可欠である。

## 【風による被害について】

過去には風による様々な被害が生じているが、強風の予測はこれらの事故が生じるリスクを予測する作業であるとも言える。

- ・[橋梁] ティ橋の落橋事故、旧タコマ吊橋の落橋事故が有名。
- ・[交通] 車両の横転事故、列車の墜落事故など。
- ・[自然] 倒木、農作物等の被害など。

## 【最大風速の考え方】

ある場所である構造物の耐風設計を行う際には、最大風速の予測が必要不可欠である。最大風速がどのように求められるのか、その手順についての解説を行い、確率統計的なものの考え方とリスクコミュニケーションの必要性を習得する。

- ・再現期間100年の意味。
- ・極値I型推定に基づく年最大風速の求め方。
- ・気象観測データの利用法。
- ・リスクコミュニケーションの必要性。

### 【風速分布の考え方】

ある場所の風速は、地表条件、高度、気象条件、地形など、さまざまな因子の影響を受ける。したがって、設計風速を定義するためには、これらの因子の影響を過去の経験から数値化し、設計に便利の良い形に置き換える必要がある。

### 【風の特徴を表すパラメータ】

風の特徴を表すには、風向、風速、気流傾斜角、乱れ強さ、ガスト係数など、いくつかのパラメータがある。これらのパラメータの組合せにより、風によって生じる構造物の振動応答は左右される。

### 【設計への反映】

予測した風速をもとに構造物の安全性を照査する基本的な考え方を概説する。

- ・ 構造物の照査方法の基本的な考え方.
- ・ 安全性照査の考え方.

### 【参考文献】

#### ● 読み物として

- ・ 川田忠樹：だれがタコマを墜としたか，建設図書（1975.8）
- ・ 川田忠樹：ボーモンの卵，建設図書（1987.8）
- ・ 山田 均：耐風工学アプローチ，建設図書（1995.9）
- ・ 荒川正一：局地風のいろいろ，成山堂書店（2000.9）

#### ● 参考書として

- ・ 日本鋼構造協会編：構造物の耐風工学，東京電機大学出版局（1997.11）
- ・ 真木太一：風害と防風施設，文永堂出版（1987.3）
- ・ 塩谷正雄：強風の性質，開発社（1992.10）
- ・ 大熊武司，神田 順，田村幸雄：建築物の耐風設計，鹿島出版会（1996.3）

#### ● 各種指針，基準類

- ・ 日本道路協会：道路橋耐風設計便覧（1991.7）
- ・ 本州四国連絡橋公団：本州四国連絡橋耐風設計基準（2001）・同解説（2001.8）
- ・ 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編（2002.3）
- ・ 土木学会：鋼構造架設設計施工指針（2002.3）
- ・ 土木学会：橋梁の耐風設計（2003.3）
- ・ 日本鋼構造協会：構造物の耐風設計の現状と展望（2004.6）
- ・ 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説（2004.9）

#### ● 使用限界状態について

- ・ 例えば，土木学会：コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕（2002）

土木学会 構造工学委員会「耐風工学連絡小委員会」  
鋼構造委員会「鋼構造継続教育推進小委員会」

土木学会「実務者のための耐風設計入門」  
強風の予測と設計風速について

川田工業株式会社  
枝元 勝哉

## 耐風設計の2つのステップ

1. 風荷重を基にした静的設計
  - 1) 風荷重は一般的に適用出来る形で書かれている。  
(道路橋示方書、建築物荷重指針、etc)
2. 風による振動を検討する動的照査
  - 1) 動的照査の必要性をまず判断。  
(道路橋耐風設計便覧、建築物荷重指針、etc)
  - 2) 風による振動に対し安全な構造物を探す。
    - ① 類似構造物による前例から判断。
    - ② 風洞実験による詳細な検討。
    - ③ 必要に応じ空気力学的対策、構造力学的対策。

## 風によりどのような現象が生じるか

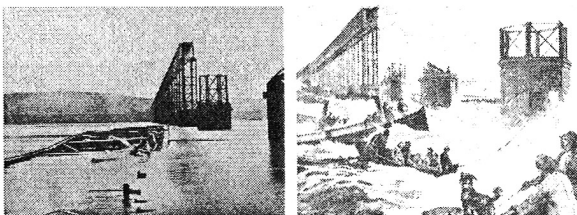
1. 風の条件  
どのような風が吹くか。
2. 構造物の形状の条件  
どのような形をしているか。
3. 構造物の力学的条件  
外力に対しどのように変形するか、振動するか。

入力となる風に関する情報は必要不可欠。

## 強風による被害について

1. 構造物  
橋梁の落橋事故  
建築物の倒壊、屋根の飛散
2. 交通  
車両の横転事故  
列車の脱線、墜落事故
3. 自然  
山林での倒木  
農作物被害や農業施設(ハウス等)の被害

## テイ橋の落橋(英 1879.12.28)



事故後のテイ橋

当時の画家の描いたテイ橋の惨事

- 延長3.2km、単線の鉄道橋として当時世界一を誇る。
- 風の影響を軽視、粗悪な品質の鑄鉄製橋脚、ずさんな管理。
- 事故後のフォース鉄道橋は鋼鉄製で強風の影響も考慮。

## 旧タコマ・ナローズ橋の悲劇(米 1940.11.7)

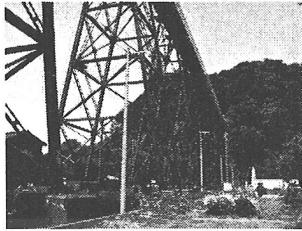


崩壊の瞬間

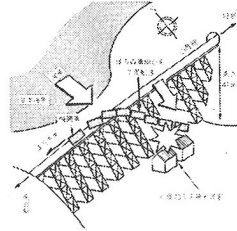
事故後の旧タコマ吊橋

- 世界で初めてのフラッターによる落橋事故。
- 静的風荷重のみに基づいた設計の限界。
- 風(渦)により引き起こされる振動の存在を認識。
- 現象の直接検証方法として風洞試験の利用が加速。

### 余部鉄橋での列車転落(1986.12.28)



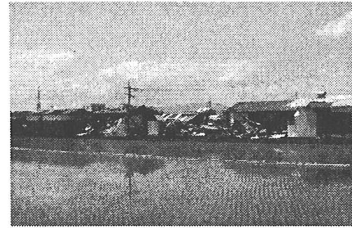
現在の余部鉄橋



事故状況(日経新聞1986.12.29)

- 旧国鉄山陰線「鎧～余部」間の余部鉄橋上にて発生。
- 8両編成中7両が突風にあおられて約40m下に転落。
- 転落下にあった工場従業員5名と車掌1名が死亡。

### 竜巻による被害(佐賀市 2004.6.27)



家屋の崩壊



樹木や標識照明柱の倒壊

- 長さ約8キロ、幅約300メートルの範囲にわたり竜巻が発生。
- 家屋全壊13戸、農業施設倒壊49棟、ほか破損、損傷多数。
- 日曜日の朝であったため人的被害は軽傷者15名。

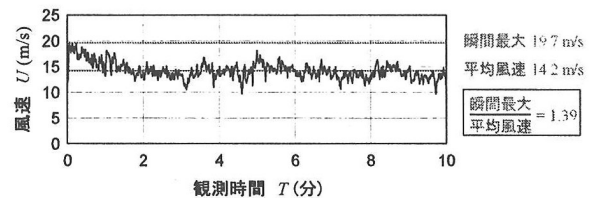
### 強風による被害対策について

1. 経験的予測可能 — 季節風、局地風、台風など
  - 設計風速による考慮
  - 構造強化、断面改良、制振装置
  - リスク保有、低減
2. 経験的予測困難 — 竜巻、ダウンバーストなど
  - 交通規制、緊急避難、復旧ネットワークの準備
  - 保険による被害補償
  - リスク回避、移転

リスクコミュニケーションの必要性

### 最大風速の考え方

- 最大風速と最大瞬間風速がある。
- 最大風速は一般に10分間平均風速に基づき、1日の最大を日最大風速、1年の最大を年最大風速と呼ぶ。



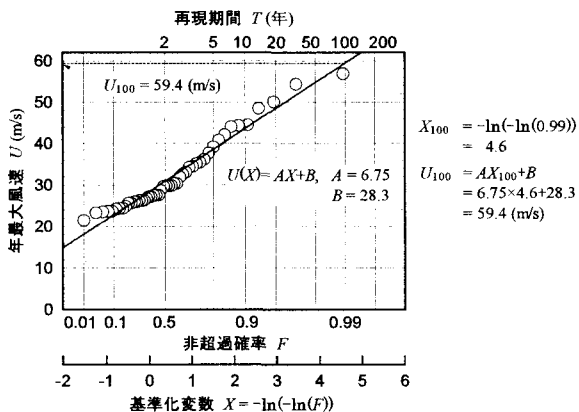
### 強風の統計的評価(Ⅰ)

- 毎年の年最大風速 $U$ を独立事象(変数)と考える。(周期的な再現性は無いと仮定する)
- $U$ はある確率分布に従って発生するものと仮定する。(ここでは極値分布の一つグンベル分布を仮定する)
- $N$ 年分の年最大風速データを大きい順に並べると
 
$$U_1, U_2, \dots, U_i, \dots, U_N \quad (U_i \geq U_{i+1}) \quad (1)$$
 のように表せる。

### 強風の統計的評価(Ⅱ)

- このとき風速 $U$ が $U_i$ を超えない確率 $F_i$ を経験的に
 
$$F_i = \frac{N-i+1/2}{N} \quad (2)$$
 と表すものとする。
- 二重指数で表されるグンベル分布の特性を活かし、横軸を二重指数にとった確率紙上に、
 
$$(X_i, U_i), \text{ ただし } i=1 \sim N, X_i = -\ln(-\ln(F_i)) \quad (3)$$
 の各点をプロットする。
- これらの点を近似する直線 $U(X)=AX+B$ を求める。

### ゲンベル確率紙のプロット例



### 再現期間と $T$ 年再現期待値 (I)

- ある風速  $U$  以上の強風が発生する超過確率  $P$ は、
$$P = 1 - F(U) \quad (4)$$
で表すことができる。

- 再現期間  $T$  年と超過確率  $P$  の関係は、
$$T = 1/P \quad (5)$$
となる。

- 再現期間100年に対応する風速  $U_{100}$  は?  
$$P_{100} = 1/100, F(U_{100}) = 1 - P_{100} = 0.99 \quad (6)$$
このときの風速  $U_{100}$  を100年再現期待値と呼ぶ。

### 再現期間と $T$ 年再現期待値 (II)

- $R$  年間に渡り一度もある風速  $U$  を超えない確率  $Q$  は、
$$Q_R = \{F(U)\}^R = \{1 - P\}^R \quad (7)$$
で表すことができる。

- 再現期間100年の風速が50年間にわたり一度も生じない確率は?  
$$Q_{50} = \{1 - P_{100}\}^{50} = 0.99^{50} = 0.6 \quad (8)$$

すなわち、五分五分より少し分がある程度。

- リスクコミュニケーションの必要性。

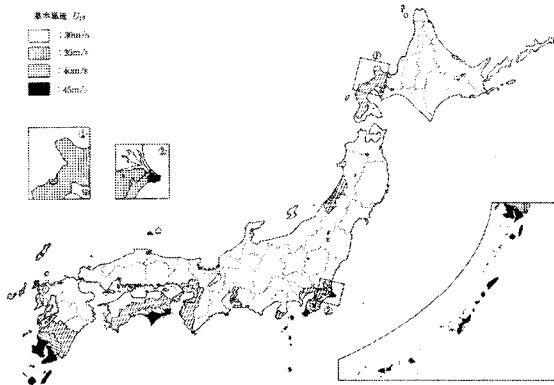
### 基本風速と設計基準風速

- 全国各地に点在する気象官署の10分間平均風速データをもとに100年再現期待値  $U_{100}$  を算定。
- この  $U_{100}$  を、地表粗度区分 II (後述)、地上10mにおける値に換算したものを基本風速  $U_{10}$  と呼ぶ。
- 設計基準風速  $U_d$  は基本風速  $U_{10}$  に高度および地表粗度に関する補正係数  $E_1$  を乗じたものになる。

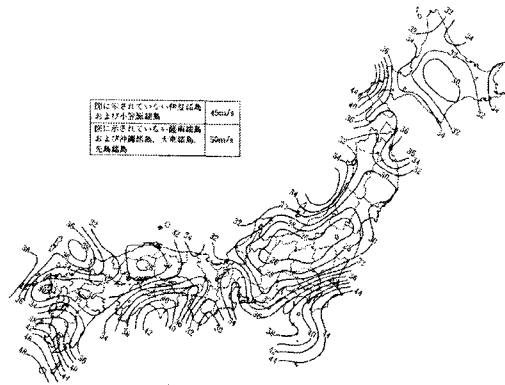
[耐風設計便覧]  $U_d = U_{10} \times E_1 \quad (9)$

[建築物荷重指針]  $U_H = U_0 \times E_H \times R \quad (10)$

### 基本風速 $U_{10}$ の取扱い (耐風設計便覧)

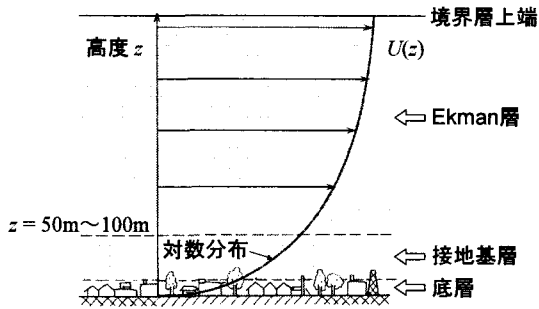


### 基本風速 $U_0$ の取扱い (建築物荷重指針)



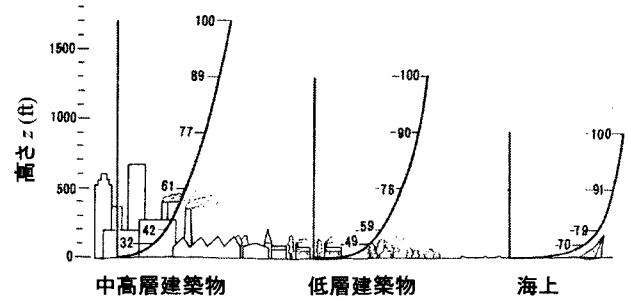
### 地表上の風速分布

- 地表面上には大気境界層が存在する。



### 地表粗度と風速分布

- 地表面の凹凸に応じて上空の風速分布は変わる。



### 地表状況と粗度区分(耐風設計便覧)

地表粗度区分	地表状況	べき指数 $\alpha$	粗度	地表形状
I	海上、海岸	0.12	粗度小 ↑ ↓ 粗度大	
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	0.16		
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	0.22		
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	0.29		

### 粗度・高度に応じた風速補正(I)

- 耐風設計便覧の基本風速マップを利用する場合

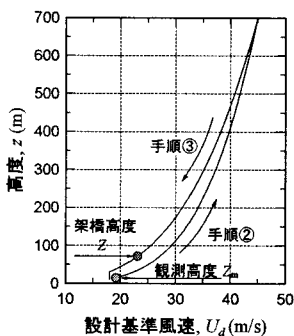
$$U_d = U_{10} \times \left( \frac{Z_{GI}}{10} \right)^{\alpha I} \times \left( \frac{Z}{Z_G} \right)^{\alpha} \quad (11)$$

- 気流特性を決定するための仮定値

項目	粗度区分	I	II	III	IV
底層の代表高さ $Z_b$		5	10	15	30
べき指数 $\alpha$		0.12	0.16	0.22	0.29
上空境界層高さ $Z_G$		500	600	700	700

### 粗度・高度に応じた風速補正(II)

- 観測データに基づく場合



手順① 最寄りの気象官署における年最大風速データをもとに再現期間100年の風速期待値  $U_{100}$  を求める。

手順② 気象官署の粗度区分Aを仮定して、境界層上端での風速  $U_G$  を求める。

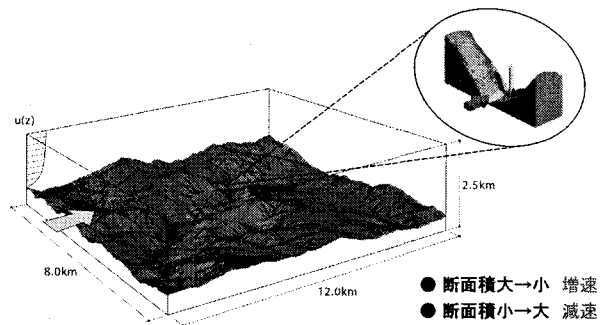
$$U_G = U_{100} \times \left( \frac{Z_{GI}}{Z_m} \right)^{\alpha A}$$

手順③ 架橋地点の粗度区分Bを仮定して、設計基準風速  $U_d$  を求める。

$$U_d = U_G \times \left( \frac{Z}{Z_{GB}} \right)^{\alpha B}$$

### 局地風の影響(I)

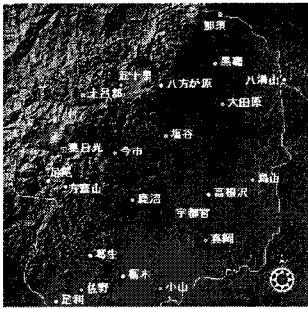
- 峡谷などでは風速が増す可能性がある。



- 断面積大→小 増速
- 断面積小→大 減速

## 局地風の影響(Ⅱ)

- おろし風や地峡風など地域固有の風。

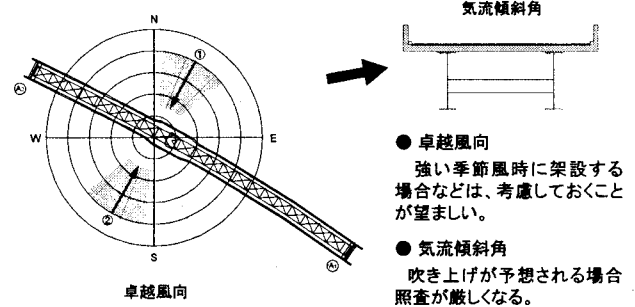


ポイント	最大風速	風速出現頻度
那須	29.0m/s	過去25年で25m/s以上5回
宇都宮	22.0m/s	過去15年で20m/s以上1回
黒磯	16.0m/s	過去25年で20m/s以上0回
大田原	18.0m/s	"
小山	13.0m/s	"

- 同一県内でも大きな風速差。
- 架設時など注意を要す場合も。

## 風の特徴を表すパラメータ(Ⅰ)

- 卓越風向、気流傾斜角(迎角)



- 卓越風向  
強い季節風時に架設する場合などは、考慮しておくことが望ましい。
- 気流傾斜角  
吹き上げが予想される場合照査が厳しくなる。

## 風の特徴を表すパラメータ(Ⅱ)

- 平均風速、瞬間風速、ガスト係数

・N個の風速値の平均:  $\bar{U} = \frac{1}{N} \sum u_i$

・N個の風速値の最大:  $U_{max}$

・風速の突風率(ガスト係数):  $G = \frac{U_{max}}{\bar{U}}$

※ガスト「応答」係数は、風荷重の補正係数。

## 風の特徴を表すパラメータ(Ⅲ)

- 標準偏差、乱れ強さ

・風速の標準偏差:  $\sigma_u = \frac{1}{N} \sqrt{\sum (u_i - \bar{U})^2}$

・風速の乱れ強さ:  $I_u = \frac{\sigma_u}{\bar{U}}$

※乱れ強さが大 → ガスト「応答」係数も大  
※乱れ強さの大小で風による振動応答は変化する。

- パラメータは推定値を準用するか現地で直接観測。

## 風による(振動)照査の方法

- 静的変形・発生応力による照査(静的風荷重)

$$\sigma_p < \sigma_a$$

- 振動振幅による照査(限定振動)

$$h_c < h_a$$

- 振動発現風速による照査(発散振動、限定振動)

$$U_c > U_r$$

$$U_r = 1.2 \times E_{r1} \times U_d \quad \text{※} E_{r1} \text{はフラッターで考慮}$$

## 風による(振動)照査の考え方

- 風による安全評価には次の3つの考え方がある。

- 1) 初通過破壊 — 道路橋示方書の風荷重
- 2) 疲労破壊 — 道路橋耐風設計便覧の許容振幅
- 3) 使用性 — 利用者自身の安全性、不快感

- 合理化を図った構造物、従来とは異なる形状を持つ構造物などは、スペックを満たす以外にも総合的判断から照査を行うことが必要。

### 初通過破壊

- 風による静的変形や振動において、一度でもその振幅に達した場合、構造に深刻な破壊を生じる応力または振幅を基準とし許容振幅を定める方法。
- 風による初通過破壊を対象とする場合には、発生する応力が部材の許容応力内に収まるよう許容変位もしくは振動振幅を設定することが望ましい。
- 道路橋示方書では、ガスト応答係数により静的風荷重を考慮している(振動は便覧で補足)。建築物荷重指針も同様だが、振動時も等価な静的風荷重に置き換えて照査を行えるよう配慮されている。

### 疲労破壊

- 風による振動で生じる繰り返し応力が、別に疲労設計から定められる許容応力範囲を超えかつ一定期間累積した場合、橋梁の特定部位に疲労破壊を生じる恐れがある。
- 本照査では応力振幅の大きさと、発生頻度をもとに許容振幅を設定することになる。
- 道路橋耐風設計便覧などでは、簡便な照査振幅算定式が提示されている。

### 使用性

- 道路利用者に不快感を与えず、また、車両の走行安全性なども損ねない程度の振動振幅を基準として許容振幅を定める方法である。
- 使用性に基づく許容振幅は振動に対する使用限界状態に対応するものとなる。
- 強風による車両通行止めや列車の運行停止なども経済損失の観点から使用性の一種と考えることが出来る。

### 使用限界状態の例

状態	内容
1) ひび割れの使用限界状態	ひび割れにより美観を害するか、耐久性または水密製や気密性を損ねるかする状態。
2) 変形の使用限界状態	変形が構造物の正常な使用状態に対して過大となる状態。
3) 変位の使用限界状態	安定、平衡を失うまでには至らないが、正常な状態で使用するには変異が過大となる状態。
4) 損傷の使用限界状態	構造物に各種の原因による損傷が生じ、そのまま使用するのが不適当となる状態。
5) 振動の使用限界状態	振動が過大となり、正常な状態で使用できないか、不安の念を抱かせるかする状態。
6) 有害振動発生の使用限界状態	地盤等を通じて周辺構造物に有害振動を伝播し、不快感を抱かせる状態。

### 参考文献(Ⅰ)

- 読み物として
  - ・川田忠樹: だれがタコマを墜としたか, 建設図書(1975.8)
  - ・川田忠樹: ポーモンの卵, 建設図書(1987.8)
  - ・山田 均: 耐風工学アプローチ, 建設図書(1995.9)
  - ・荒川正一: 局地風のいろいろ, 成山堂書店(2000.9)
- 参考書として
  - ・日本鋼構造協会編: 構造物の耐風工学, 東京電機大学出版局(1997.11)
  - ・真木太一: 風害と防風施設, 文永堂出版(1987.3)
  - ・塩谷正雄: 強風の性質, 開発社(1992.10)
  - ・大熊武司, 神田 順, 田村幸雄: 建築物の耐風設計, 鹿島出版会(1996.3)

### 参考文献(Ⅱ)

- 各種指針、基準類
  - ・日本道路協会: 道路橋耐風設計便覧(1991.7)
  - ・本州四国連絡橋公団: 本州四国連絡橋耐風設計基準(2001)・同解説(2001.8)
  - ・日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編(2002.3)
  - ・土木学会: 鋼構造架設設計施工指針(2002.3)
  - ・土木学会: 橋梁の耐風設計(2003.3)
  - ・日本鋼構造協会: 構造物の耐風設計の現状と展望(2004.6)
  - ・日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説(2004.9)
- 使用限界状態について
  - ・例えば、土木学会: コンクリート標準示方書[構造性能照査編](2002)