



鋼管部材の簡易な疲労損傷評価方法

大熊 武司*

安井 八紀**

Simple Method for Evaluating Fatigue damage of Pipe Members

Takeshi OHKUMA*

Hachinori YASUI**

1. はじめに

通信鉄塔、煙突の支持鉄塔および送電鉄塔等のトラス鉄塔においては、設計風速に対する安全性の他、疲労損傷に対する安全性も重要な要件である。しかしながら、現状後者については丁寧かつ簡易な検討方法が確立されているとは言い難く、設計者においてもこの問題への関心が低いのが実情である。

疲労損傷の要因としては、地震や風による鉄塔全体の応答に伴うもの、個材の風方向の振動に伴うもの、個材の風直交方向の振動、いわゆる渦励振によるものが考えられる。特に、斜材、水平材および水平ブレース、さらには応力材を補剛する補剛材は、比較的曲げ剛性が低いいため、設計風速以下での渦励振の発生も考えられる。また、大型の鉄塔においては、これらの部材に種々の継手を持つ鋼管部材が用いられる場合が多い。

本報は、風による個材振動を起因とする鋼管部材の疲労損傷に着目し、その簡易な評価法について報告するものである。

風による個材振動を起因とする疲労損傷を評価する場合には、次のような項目が明らかになっている必要がある。

- ① 継手を考慮した部材の振動特性の算定法
- ② ホットスポット応力の算定法
- ③ 照査期間における風速の累積作用時間の算定法
- ④ 風荷重および応答値の算定法
- ⑤ 疲労曲線および疲労損傷度の算定法

本報では、これらの5つの項目を順次取り上げてそれぞれの算定法を示し、最後に具体的な評価事例を示す。

項目①については、継手の影響を無視し、端部ピンとして部材の固有振動数および振動モードを評価される場合が多い。また、照査部位も部材中央とし、継手の安全性の検討が無視される場合が多い。しかしながら、継手の影響によって固有振動数や固有振動モードが両端ピンの場合と異なること、さらには、継手の安全性も重要な照査項目となることが考えられる。本報では、通信鉄塔等に多く採用されているCTによる管通し継手のFEM解析結果に基づいて、継手の影響を考慮した部材の振動特性の簡易な評価法⁽¹⁾⁽²⁾を示す。

項目②については、現状、一般論として算定法を提示することは困難であるため、項目①で用いる解析モデルの中から1例を取り上げ、ホットスポット応力の算定事例を示す。

項目③については、幾つかの方法が提案⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾されているが、近年では、その暴風の発生要因を台風と非台風に区分して評価する方法がしばしば用いられている⁽⁶⁾。暴風については、筆者等が前報において示した荷重指針⁽⁷⁾から暴風の累積作用時間を簡易に評価する方法⁽⁸⁾を用いることとし、本報では詳細については触れない。暴風以外については、近隣の気象官署の観測データを Weibull 分布に当てはめ、その結果から算定する方法を算定事例において示す。

項目④については、文献⁽⁷⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾等を参考に、項目①、②の結果を考慮して風方向および風直交方向の荷重、加えて、ホットスポット応力の算定法を示す。

項目⑤については、文献⁽¹²⁾に準じて算定方法を示す。

2. 継手を考慮した部材の振動性状

筆者等は、部材および継手の有限要素モデルによる固有値解析を行い、その結果に基づいて固有振動数および

* 名誉教授 工学研究所客員教授

* Professor Emeritus

** (株)泉創建エンジニアリング 都市環境技術研究所

** Izumi Sohken Engineering Co., Ltd.

固有振動モードを簡易に評価する方法を提案している⁽¹⁾⁽²⁾。本報では、その概要を示す。

2.1 有限要素法による固有値解析

(1) 有限要素モデル

検討対象は表 2-1 および図 2-1 に示すような 366 種類の鋼管部材とした。ここでの部材長 l はボルト重心間距離とする。検討長さの下限値 l_{min} は両端ピン⁽¹³⁾として荷重指針⁽⁷⁾における判定式より導かれる下式より算定した。

検討風速 U_H の上限値(90.7m/s)は、荷重指針⁽⁷⁾の再現期間 500 年の風速で最も高い値(=58m/s)、地表面粗度区分を II、地上からの高さを 200m として定めた。検討長さの上限値 l_{max} は、両端ピンとした細長比の上限が概ね 200 となるように 10m とした。因みに、ここでの検討部材長は、せん断変形を無視している Bernoulli-Euler の曲げ梁公式より得られる曲げ振動解⁽¹³⁾の適用範囲内である。

$$l_{min} = \max \left\{ \left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \frac{0.83D}{U_H S_t} \right)^{1/2}, 15D \right\} \quad (2.1)$$

ここに、 ρ 、 E 、 D 、 A および I は、それぞれ部材の密度、ヤング率、鋼管外径、断面積、断面 2 次モーメント、 S_t はストローハル数で 0.2 としている。

解析モデルの一例を図 2-2 に示す。

本研究では、MSC.MARC の 4 節点厚肉シェル要素を用い、板厚方向は 5 層とした。要素分割規則は以下のようなものである。

割込溶接区間での軸方向の要素長さは、端部から $5t$ (t : 鋼管板厚、図 2-1 参照)の範囲では鋼管板厚と一致させ、それらの内側については CT フランジ板厚 t_f と同程度とした。鋼管の円周方向の要素長さは、鋼管の板厚 t と概ね一致⁽¹²⁾させた。鋼管軸方向の要素長さは、継手端部

から中央側の $5t$ 区間では鋼管板厚 t と一致させ、同様に l_w 区間(l_w : 割込み溶接区間の長さ、図 2-1 参照)では等比分割(10 要素)、中央部では、鋼管のみの予備固有値解析結果から部材長の 1/20 以下であれば十分な精度が得られることを確認し、約 100mm とした。

CT の要素長さはそれぞれの板厚(t_w, t_f)と同程度とした。

質量は密度として与え、CT フランジのボルト孔の外周節点(各 1 本に付 8 節点)において並進変位を、部材中央では対称条件として軸方向変位と全回転角を拘束した。

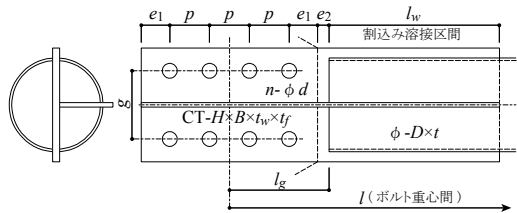


図 2-1 管通しガセットプレートの形状寸法

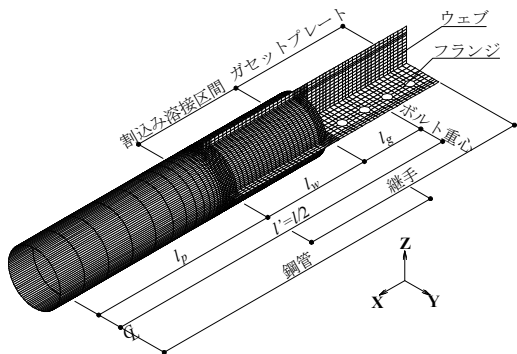


図 2-2 解析モデルの事例(165-CT8_020)

表 2-1 解析モデル一覧

名称※	鋼管 (mm)		CT形鋼 (mm)				ボルト本数	ボルト孔径・ピッチ・ゲージ等 (mm)					長さ				
	D	t	H	B	t _w	t _f		n	d	g	p	e ₁	e ₂	l _w (mm)	l (m)		
															△l	l _{min}	l _{max}
165-CTn_l	165.2	4.5	100	200	8	12	4,6,8	26	120	70	50	20	300	0.5	2.0	10.0	
139-CTn_l	139.8	4.0	87.5	175	7.5	11	4,6,8	24	105	60	45	20	280	0.5	2.0	10.0	
114-CTn_l	114.3	3.5	87.5	175	7.5	11	4,6,8	24	105	60	40	20	160	0.5	1.0	10.0	
101-CTn_l	101.6	3.2	75	150	7	10	4,6,8	24	90	60	40	20	140	0.5	1.0	10.0	
089-CTn_l	89.1	3.2	75	150	7	10	4,6,8	24	90	60	40	20	100	0.5	1.0	10.0	
076-CTn_l	76.3	3.2	75	150	7	10	4,6,8	24	90	60	40	20	100	0.5	1.0	10.0	

※ 名称中の n はボルト本数、l は部材の長さを示し、2.0mの場合には020と表記

(2) 強(Y)軸方向の固有振動数と振動モード

強(Y)軸方向の固有一次振動数および振動モードについてFEM解析結果とBernoulli-Eulerの曲げ梁公式より導かれる一様な部材の曲げ振動解¹³⁾(以降、理論解と呼ぶ)を比較して図2-3に示す。

同図に示すように強(Y)軸方向の固有振動数および振動モードは、部材が変断面であることによって振動モードが曲折する点を除けば、両端固定とした場合と良く対応する。FEMによる固有振動数ならびに振動モードがやや硬めになっているのは、継手の長さが有限であるため、実質的な部材長が短くなるためである。以上の結果は、平鋼、U字継手および溝形継手の強軸方向や十字継手においても同様な傾向を示すと考えられる。

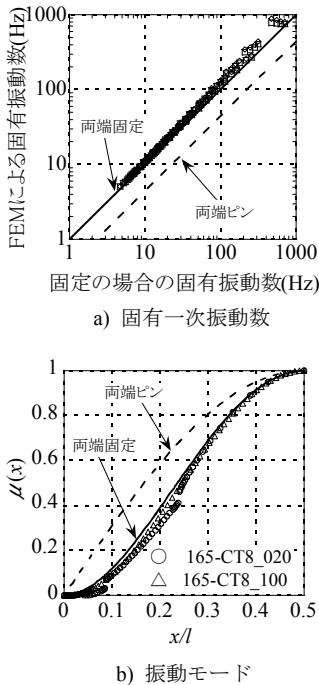


図2-3 強(Y)軸方向の固有振動数と振動モード

(3) 弱(Z)軸方向の固有振動数と振動モード

強軸と同様に弱軸の固有振動数と固有振動モードをFEM解析結果と理論解を比較して図2-4に示す。

同図に示すように、弱軸方向の固有振動数および振動モードは、半固定状態の振動数および振動モードとなり、部材長が長い程、固定度が高い。

(4) 弱(Z)軸方向モード時の支持部近傍の変位分布

図2-5に部材長が3mと等しく、支持ボルト本数がそれぞれ4本と6本の場合について支持部近傍のCTウェ

ブの軸方向変位モード値分布を示す。なお、同図は部材中央における弱(Z)軸方向変位モード値が一致するように規準化している。

同図から明らかのように、支持ボルト本数が少ない程、CTのウェブのモード値が大きく、ボルト重心を中心に反時計回りに回転したような変位モードとなっている。ウェブも拘束された固定支持と比較して考えると、ボルト本数が少ないほど固定度が小さく、CTのウェブが有効に機能していないと見ることができる。

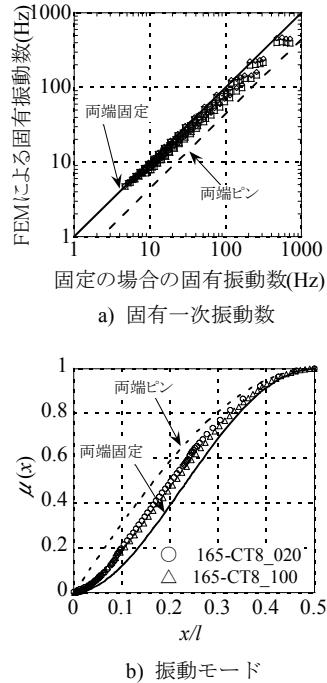


図2-4 弱(Z)軸方向の固有振動数と振動モード

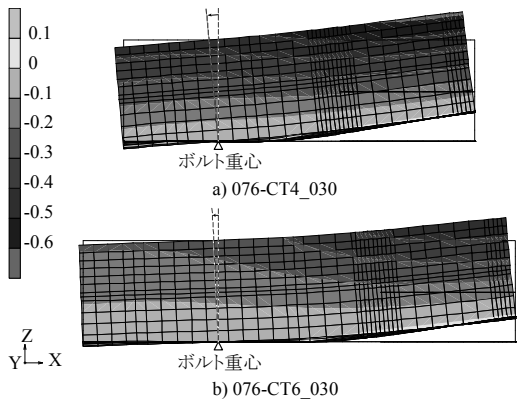


図2-5 支持ボルト本数の違いによるCTウェブの支持部近傍における軸(X)方向変位モードの差異

2.2 振動特性の簡易評価法

(1) 一様な部材の固有振動数と振動モード

Bemoulli-Euler の曲げ梁公式より導かれる一様な部材の曲げ振動の一般解は、次のように表わされる⁽¹³⁾。

$$\mu'(x) = A_1 \cos \gamma x + A_2 \sin \gamma x + A_3 \cosh \gamma x + A_4 \sinh \gamma x \quad (2.2)$$

$$\omega = (c_k/l)^2 \sqrt{EI/\rho A} \quad (2.3)$$

$$c_k = \gamma l \quad (2.4)$$

ここに、 $\mu'(x)$ 、 ω および γ は振動モード、固有円振動数および波動伝播定数、 $A_1 \sim A_4$ は積分定数である。また、 c_k は材端の固定度によって定まる係数で、1次振動に限定すると、両端ピン、両端固定の場合には、それぞれ、 $c_k = \pi$ 、 $c_k \approx 4.73004$ である。ここで、両端部の固定度を表わす係数 k_f (固定:1, ピン:0)を導入すると、図2-6に示すように c_k は(2.5)式で近似できる。

$$c_k = \pi + (4.73004 - \pi) \left\{ 1 - (1 - k_f)^{1.1145} \right\}^{0.78956} \quad (2.5)$$

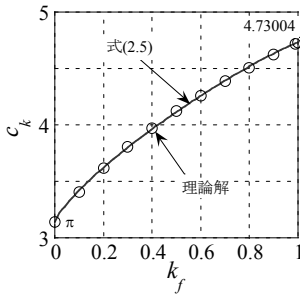


図2-6 k_f と c_k の関係

ここで、部材中央の変位片振幅を1とすると、その振動モード、曲げモーメント $M(x)$ および単位長さ当たりの静的分布荷重 $w(x)$ は以下のように表わされる。

$$\mu(x) = \mu'(x)/\mu'(l/2) = A_1 \cos \gamma x + A_2 \sin \gamma x + A_3 \cosh \gamma x + A_4 \sinh \gamma x \quad (2.6)$$

$$M(x) = -EI\gamma^2 (A_1 \cos \gamma x + A_2 \sin \gamma x - A_3 \cosh \gamma x - A_4 \sinh \gamma x) \quad (2.7)$$

$$w(x) = EI\gamma^4 \cdot \mu(x) \quad (2.8)$$

ここに、 $A_1 \sim A_4$ は部材中央の変位片振幅が1の場合の積分定数で、以下のように近似できる。(資料未補足1参照)

$$A_1 = -1.2834k_f + 1.0817k_f^2 - 0.43021k_f^3 \quad (2.9)$$

$$A_2 = 1 - 0.52654k_f + 0.26441k_f^2 - 0.1199k_f^3 \quad (2.10)$$

$$A_3 = -A_1 \quad (2.11)$$

$$A_4 = -1.206k_f + 0.95116k_f^2 - 0.36565k_f^3 \quad (2.12)$$

また、図2-7に示すように、振動モードを示す(2.6)式は、両端ピンの変位モード $\mu_{pin}(x)$ と両端固定の変位モード $\mu_{fix}(x)$ の一次結合によって下式のようにも近似できる。

$$\mu(x) = (1 - k_f)\mu_{pin}(x) + k_f\mu_{fix}(x) \quad (2.13)$$

$$\mu_{pin}(x) = \sin(\pi x/l) \quad (2.14)$$

$$\mu_{fix}(x) = B_1(\cos \gamma_f x - \cosh \gamma_f x) + B_2(\sin \gamma_f x - \sinh \gamma_f x) \quad (2.15)$$

$$B_1 \approx -0.629665 \quad (2.16)$$

$$B_2 \approx 0.618647 \quad (2.17)$$

$$\gamma_f l \approx 4.73004 \quad (2.18)$$

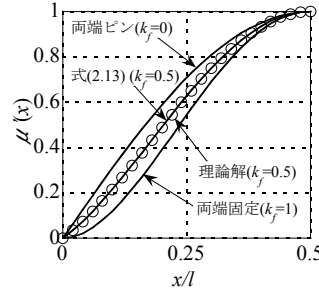


図2-7 振動モードの比較

(2) ウェブの拘束度

一様な部材の中央に集中荷重 P が作用する場合、部材中央変位に対する材端から1/4の位置における変位の比は、両端ピンの場合11/16、両端固定の場合には1/2となる。

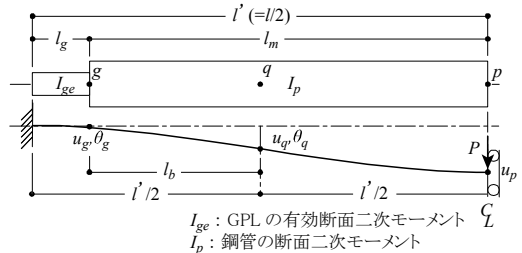


図2-8 端部固定度を簡易評価するためのモデル

一方、図2-8に示すように、割込溶接区間の剛性増加分を無視して部材をガセットと鋼管で構成された変断面と見なすと、部材中央点 p の変位 u_p および点 q の変位 u_q はそれぞれ以下のように算定できる。

$$u_p = \frac{\lambda}{12I_p I_{ge}(I_p l_g + I_{ge} l_m)} \frac{P}{E} \quad (2.19)$$

$$\lambda = I_p^2 l_g^4 + I_{ge}^2 l_m^4 + I_p I_{ge} l_g l_m (4l_g^2 + 6l_g l_m + 4l_m^2) \quad (2.20)$$

$$u_q = \left\{ 1 - \left(\frac{2l_b^3}{l_g^3} + \frac{3l_b^2}{l_g^2} \right) \frac{I_{ge}}{I_p} \right\} u_g + l_b \left\{ 1 + \left(\frac{l_b^2}{l_g^2} + \frac{2l_b}{l_g} \right) \frac{I_{ge}}{I_p} \right\} \theta_g \quad (2.21)$$

$$u_g = \frac{(I_p l_g^2 + 4I_{ge} l_g l_m + 3I_{ge} l_m^2) \theta_g^2}{12I_{ge}(I_p l_g + I_{ge} l_m)} \frac{P}{E} \quad (2.22)$$

$$\theta_g = \frac{(l_g + l_m) l_m}{2(I_p l_g + I_{ge} l_m)} \frac{P}{E} \quad (2.23)$$

ここに、CTのウェブ突出部の有効率 α_e を下式のようにウェブ突出高さ $H - t_f$ (H :ウェブ高さ、 t_f :フランジ厚)に対する有効高さ h_e の比として定義し、 I_{ge} はこれに対応するガセットプレートの有効断面二次モーメントとする。

$$h_e = \alpha_e (H - t_f) \quad (2.24)$$

FEM解析結果と理論解から以下のような手順でウェブの有効率 α_e を逆算する。

まず、FEM解析結果の振動モードに式(2.13)を当てはめて固定度 k_f を、 k_f を下式に代入して得られる変位の比 u_q/u_p を算定する。

$$u_q/u_p = \frac{11}{16}(1 - k_f) + \frac{1}{2}k_f \quad (2.25)$$

この変位の比 u_q/u_p を満足する I_{ge} を式(2.19)~(2.23)より収斂計算によって算定し、ウェブの有効率 α_e を求める。

以上の手順により逆算したウェブの有効率 α_e を図2-9に示す。同図に示すように、ボルトの本数 $n=4$ の場合には概ね $\alpha_e=0.5$ 、 $n=6$ の場合には概ね $\alpha_e=0.75$ 、 $n=8$ の場合には概ね $\alpha_e=1$ が下限値である。 α_e が1を超えるのは割込溶接区間の剛性の割増を考慮していないことが最も大きな要因である。

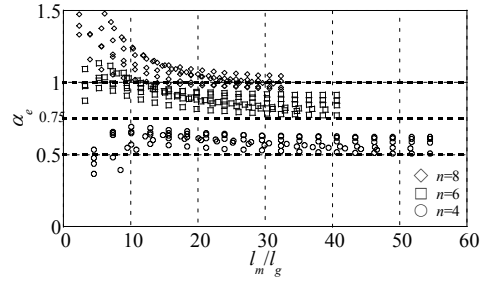


図2-9 ウェブ突出部の有効率 α_e

(3) 振動数および振動モードの簡易評価法

まず、端部ボルトの本数 n に基づいて式(2.26)よりウェブの有効率 α_e を求め、これに基づいてガセットプレート断面二次モーメントを算定する。

$$\alpha_e = \min(n/8, 1.0) \quad n \geq 4 \quad (2.26)$$

続いて、式(2.19)~(2.23)を用いて部材中央変位 u_p と端部から1/4の点 q の変位 u_q を求め、式(2.25)を書き換えて得られる下式より固定度 k_f を算定する。

$$k_f = (11 - 16u_q/u_p)/3 \quad (2.27)$$

ただし、 $k_f > 1$ の場合は $k_f = 1$ 、 $k_f < 0$ の場合は $k_f = 0$ とする。

さらに、固定度 k_f を式(2.5)に代入して c_k を、 c_k を式(2.3)に代入して固有一次円振動数 ω を、さらに k_f を式(2.6)、(2.9)~(2.12)あるいは(2.13)に代入して振動モード $\mu(x)$ を得ることができる。

以上の手順で算定した簡易法とFEMによる固定度 k_f 、固有一次振動数 f_1 を全モデルについて、振動モード $\mu(x)$ については代表事例を図2-10に比較して示す。同図から、簡易法による固定度 k_f および固有一次振動数 f_1 は概ね10%の誤差の範囲で推定でき、振動モード $\mu(x)$ も概ね良い対応を示す。本方法が有効であることが解る。

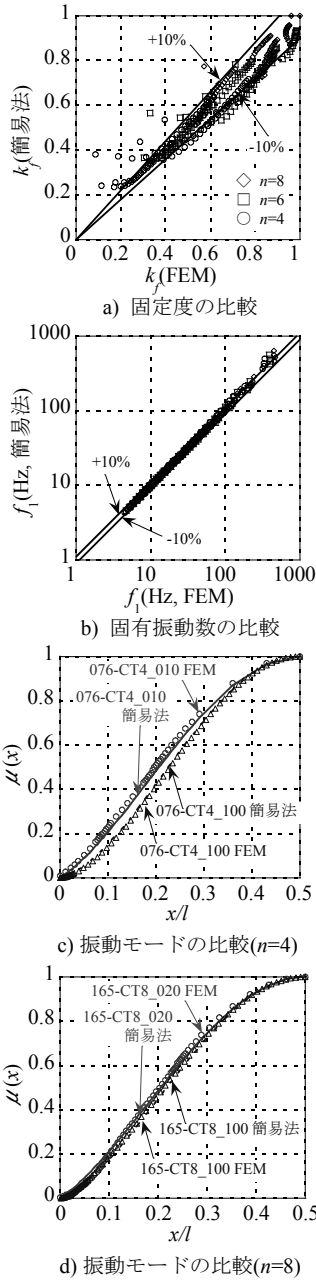


図2-10 簡易法とFEMの比較

3. ホットスポット応力の算定法

3.1 算定法

疲労設計指針⁽¹²⁾では、「FEMによってホットスポット応力を算定する場合には、ソリッド要素を用い、溶接ビードもモデル化することが望ましい」としている。しかしながら、ここで対象とする母材が薄肉の鋼管で材軸方向に長くモデル化しなければならないことから、前章の

FEM解析では3次元のシェル要素を用い、溶接ビードはモデル化していない。また、同指針では、このようなシェル要素を用いた場合のホットスポット応力の算定例として、図3-1に示すような国際船級協会連合の事例を取り上げている。本報ではこの方法を採用する。

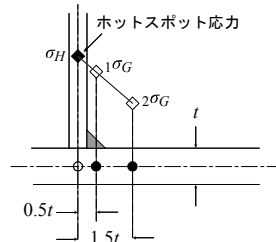


図3-1 ホットスポット応力の求め方の例⁽¹⁰⁾

具体的には、まず、ホットスポット応力は板表面の応力度でなければならないので、板厚の最外縁層の Gauss の積分点応力度 $\sigma_{j,o}$ と最内縁層の Gauss の積分点応力度 $\sigma_{j,i}$ より、表面の応力度を下式で算定する。

$$k\sigma_j = k\sigma_{j,o} + (k\sigma_{j,o} - k\sigma_{j,i}) / (2n_L - 2) \quad (3.1)$$

ここに、 k は要素の番号、 n_L は要素の板厚方向の層数、 j は Gauss の積分点の番号で、ここでは I, II, III, IV と表わす。

図3-1においての◇の応力度が重心位置での応力度 $k\sigma_G$ であるので、鋼管の円周方向の全ての要素長さが鋼管板厚と概ね一致すれば、ホットスポット応力度 $\sigma_{H,A}$ は以下のように算定できる。

$$\sigma_{H,A} = 1\sigma_G + (1\sigma_G - 2\sigma_G) / 2 \quad (3.2)$$

$$k\sigma_G = \sum_{j=I}^{IV} k\sigma_j / 4 \quad (3.3)$$

3.2 ホットスポット応力算定例

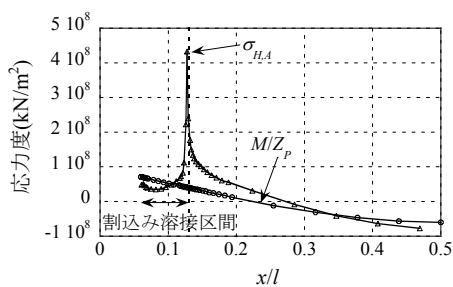
076_CT4_015 ($D=76.3\text{mm}$, $n=4$, $l=1.5\text{m}$, 表2-1参照)を事例に、強軸方向振動時および弱軸方向振動時において部材中央での変位片振幅が1mとなる場合について検討する。

(1) 強軸方向振動時

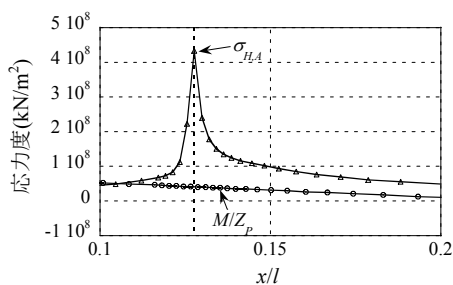
算定結果を図3-2に示す。なお、図中の割込み溶接区間より部材中央側の応力度は鋼管の縁応力に相当する。また、 M/Z_p は簡易法によって求めた曲げモーメント M を全区間に渡って鋼管の断面係数 Z_p で除して求めた縁応力である。

簡易法による縁応力は、FEM解析よりやや小さめである。これは、簡易法によるこの方向の振動数および振動モードがやや柔らかめに評価されることに起因する。

割込み溶接区間の部材中央側端部での応力集中は顕著で、この位置におけるホットスポット応力 $\sigma_{H,A} = 4.440 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ が疲労検討用の応力で、応力集中係数は10程度と大きな値である。



a) 全体



b) 割込み溶接区間の部材中央側端部近傍

図3-2 強軸振動時の応力分布の算定例

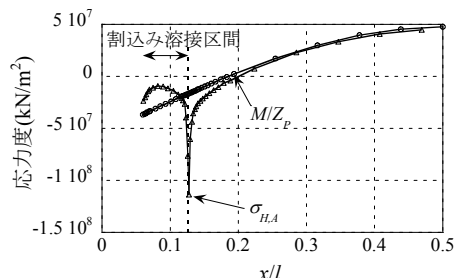
(2) 弱軸方向振動時

算定結果を図3-3に示す。

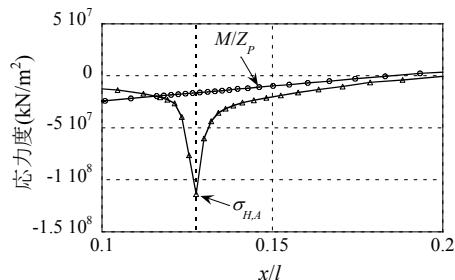
同図に示すように部材中央側においては、簡易法により求めた縁応力 M/Z_p はFEMによる解析結果に良く対応しており、簡易法によって算定される曲げモーメントはこの区間では妥当に評価されていることが解る。

一方、部材端部から割込み溶接区間の約2倍の範囲では、ホットスポット応力と縁応力 M/Z_p の差異は大きく、特に、割込み溶接区間の部材中央側端部での応力集中は顕著である。因みに $\sigma_{H,A} = 1.140 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ で、応力集中係数は7程度と大きな値である。

なお、このモデルでホットスポット応力が最大となるのは、割込み溶接区間の部材中央側端部においてであるが、部材によっては逆側端部の場合もあるので注意が必要である。



a) 全体



b) 割込み溶接区間の部材中央側端部近傍

図3-3 弱軸振動時の応力分布の算定例

4. 風速の累積作用時間の簡易評価方法

筆者等は、暴風による風速の累積作用時間の簡易評価方法を前報において提案し、その妥当性を示している⁸⁾。この簡易法で用いられている算定式とその概要を以下に示す。

まず、照査期間 N 年において i 番目に大きな暴風の最大風速 U_r は下式で算定する。

$$U_r = U_0 k_{r,W} \quad (4.1)$$

$$k_{r,W} = 0.63(\lambda_U - 1) \ln r - 2.9\lambda_U + 3.9 \quad (4.2)$$

$$\lambda_U = U_{500}/U_0 \quad (4.3)$$

$$r_i = N/(i - 0.5) \quad (i = 1, \dots, mN) \quad (4.4)$$

ここに、 U_0 、 U_{500} および $k_{r,W}$ は、荷重指針¹⁷⁾における基本風速、再現期間500年の風速および再現期間換算係数で、 r_i および m は i 番目に大きな暴風の再現期間および年平均の暴風数である。因みに、式(4.1)～式(4.3)は荷重指針¹⁷⁾を転用したものである。

それぞれの暴風の最大風速に対する風速の比の24時間に渡る時間変化は、式(4.5)または式(4.6)で算定する。

$$r_U(t) = (1 + C_1 t) / \exp(C_2 t^{0.70}) \quad (4.5)$$

$$r_U(t) = (1 + C_3 t^{2.2}) / \exp(C_4 t^{1.2}) \quad (4.6)$$

$$C_1 = \min(-0.532 + 0.0192\theta_N, 0.217) \quad (4.7)$$

$$C_2 = \min(-0.444 + 0.0210\theta_N, 0.375) \quad (4.8)$$

$$C_3 = \min(-0.0565 + 0.00201\theta_N, 0.0199) \quad (4.9)$$

$$C_4 = \min(-0.196 + 0.00870\theta_N, 0.135) \quad (4.10)$$

ここに、 t は時間(単位:hr)で0~24の値、 θ_N は対象地点の緯度(単位:°)である。なお、式(4.5)は式(4.6)に比較して安全側の値を与える。

以上によって算定される照査期間の暴風の風速を風速毎に整理することで、暴風による風速の累積作用時間は算定できる。

5. 風荷重および応答値の算定法

5.1 風方向の風荷重と応答値

ここでは、安全側の評価として、部材の各部に作用する変動風力が部材中央高さ Z での変動風速に比例するものとする。すなわち、部材に作用する風圧力は空間的に完全相関とする。この場合、平均風力係数を C_D 、風方向の1次振動モードを $\mu_D(x)$ とすると、風方向の一般化風力 $S_F(f)$ は以下のように表わされる。因みに、平均風力係数は荷重指針⁷⁾に準ずると、 $C_D = 1.2$ とできる。

$$S_F(f) = 4(q_Z C_D D l)^2 I_Z^2 \frac{S_u(Z, f)}{\sigma_{uz}^2} \Phi^2 \quad (5.1)$$

$$\Phi^2 = \int_0^l \int_0^l \mu_D(x') \mu_D(x'') dx' dx'' \quad (5.2)$$

$$x' = x/l \quad (5.3)$$

$$q_Z = \rho_a U_Z^2 / 2 \quad (5.4)$$

$$U_Z = U_0 K_D E_Z k_{rW} \quad (5.5)$$

$$E_Z = E_r E_g \quad (5.6)$$

$$E_r = \begin{cases} 1.7(Z/Z_G)^\alpha & Z_b < Z \leq Z_G \\ 1.7(Z_b/Z_G)^\alpha & Z \leq Z_b \end{cases} \quad (5.7)$$

$$I_Z = I_{rZ} E_{gI} \quad (5.8)$$

$$I_{rZ} = \begin{cases} 0.1(Z/Z_G)^{-\alpha-0.05} & Z_b < Z \leq Z_G \\ 0.1(Z_b/Z_G)^{-\alpha-0.05} & Z \leq Z_b \end{cases} \quad (5.9)$$

$$S_u(Z, f) = \frac{4\sigma_{uz}^2 (L_Z/U_Z)}{\{1 + 70.8(fL_Z/U_Z)^2\}^{5/6}} \quad (5.10)$$

$$L_Z = \begin{cases} 100(Z/30)^{0.5} & 30\text{m} < Z \leq Z_G \\ 100 & Z \leq 30\text{m} \end{cases} \quad (5.11)$$

ここに、 ρ_a 、 U_0 、 q_Z 、 U_Z 、 I_Z 、 $S_u(Z, f)$ 、 σ_{uz} および L_Z は、空気密度、基本風速、部材中央高さ Z での

の平均速度圧、平均風速、乱れ強さ、変動風速のパワー・スペクトル密度、同標準偏差および乱れのスケールで、 f は周波数である。また、 k_{rW} は(4.2)式に示す再現期間換算係数、 K_D は風向係数でここでは1とする。さらに、 E_g および E_{gI} は小地形による平均風速および乱れ強さの補正係数、 α 、 Z_G および Z_b は風速の鉛直分布を定めるパラメータであり、詳細は荷重指針⁷⁾を参照されたい。

一般化変位の分散 σ_q^2 は下式で表わされる。

$$\begin{aligned} \sigma_q^2 &= \frac{1}{\tilde{K}_D^2} \left[\int_0^\infty S_F(f) df + \frac{\pi}{4\zeta_D} f_D S_F(f_D) \right] \\ &= 4 \left(\frac{q_Z C_D D l}{\tilde{K}_D} \right)^2 I_Z^2 \Phi^2 \\ &\quad \times \left[\int_0^\infty \frac{S_u(Z, f)}{\sigma_{uz}^2} df + \frac{\pi}{4\zeta_D} \frac{f_D S_u(Z, f_D)}{\sigma_{uz}^2} \right] \end{aligned} \quad (5.12)$$

$$\tilde{K}_D = (2\pi f_D)^2 \tilde{M}_D \quad (5.13)$$

ここに、 f_D 、 ζ_D 、 \tilde{K}_D および \tilde{M}_D は風方向の1次振動に対する固有振動数、減衰定数、一般化剛性および一般化質量である。

さらに、

$$B_D = \int_0^\infty \frac{S_u(Z, f)}{\sigma_{uz}^2} df = 1 \quad (5.14)$$

なので、

$$F = \frac{f_D S_u(Z, f_D)}{\sigma_{uz}^2} \quad (5.15)$$

$$R_D = \frac{\pi}{4\zeta_D} F \quad (5.16)$$

なる係数を導入すれば、一般化変位の標準偏差 σ_q は以下のように表わされる。

$$\sigma_q = 2 \left(\frac{q_Z C_D D l}{\tilde{K}_D} \right) I_Z \Phi \sqrt{1 + R_D} \quad (5.17)$$

また、変動変位の最大値の部材軸方向分布 $y_{D, \max}(x)$ は、ピークファクター g_D を考慮して次のように表わされる。

$$y_{D, \max}(x) = g_D \sigma_q \mu_D(x) \quad (5.18)$$

$$g_D = \sqrt{2 \ln(600\nu_D)} + \frac{0.577}{\sqrt{2 \ln(600\nu_D)}} \quad (5.19)$$

$$\nu_D = f_D \sqrt{R_D / (1 + R_D)} \quad (5.20)$$

なお、 ν_D は風方向のレベルクロスング数である。

ここで、簡単のため平均風速に対する平均変位も1次振動モードに比例すると仮定すれば、一般化平均風力 \bar{F} および平均変位の軸方向分布 $\bar{Y}_D(x)$ は以下のように表わされる。

$$\bar{F} = q_Z C_D D l \Phi \quad (5.21)$$

$$\bar{Y}_D(x) = \frac{q_Z C_D D l}{\tilde{K}_D} \Phi \mu_D(x) \quad (5.22)$$

$$\Phi = \int_0^1 \mu_D(x') dx' \quad (5.23)$$

なお、風方向の1次振動数を f_D とすれば、この方向の固定度 $k_{f,D}$ を考慮して、1次振動の一般化質量 \tilde{M}_D および Φ は以下のように近似できる。(資料未補足2参照)

$$\tilde{M}_D = \rho A l \cdot \left\{ \frac{1}{2} (1 - k_{f,D})^2 + 0.396478 k_{f,D}^2 + 0.878228 (1 - k_{f,D}) k_{f,D} \right\} \quad (5.24)$$

$$\Phi = 0.636619 (1 - k_{f,D}) + 0.523164 k_{f,D} \quad (5.25)$$

さらに、平均風速に対する平均変位も1次振動モードに比例すると仮定しているため、平均曲げモーメントの軸方向分布 $\bar{M}_D(x)$ は以下のように表わされる。

$$\begin{aligned} \bar{M}_D(x) = & -EI_D \gamma_D^2 \frac{q_Z C_D D l}{\tilde{K}_D} \Phi \\ & \times (A_{1,D} \cos \gamma_D x + A_{2,D} \sin \gamma_D x \\ & - A_{3,D} \cosh \gamma_D x - A_{4,D} \sinh \gamma_D x) \end{aligned} \quad (5.26)$$

なお、 I_D 、 γ_D および $A_{1,D} \sim A_{4,D}$ は、風方向に関する断面2次モーメント、固定度 $k_{f,D}$ を考慮した波動伝播定数および積分定数である。

また、部材中央における変位片振幅が1である場合のホットスポット応力が σ_H として得られている場合には、平均風力によるホットスポット応力 $\bar{\sigma}_{HD}$ は以下のように表わされる。

$$\bar{\sigma}_{HD} = \frac{q_Z C_D D l}{\tilde{K}_D} \Phi \cdot \sigma_H \quad (5.27)$$

ガスト影響係数 G_D は以下のように定義されるので、

$$G_D = 1 + \frac{y_{D,\max}(x)}{\bar{Y}_D(x)} \quad (5.28)$$

であり、式(5.18)および式(5.22)を考慮して以下のように表わされる。

$$G_D = 1 + 2g_D I_Z \sqrt{1 + R_D} \quad (5.29)$$

したがって、単位長さ当たりの変動最大荷重 $\hat{w}_D(x)$ 、変動最大曲げモーメントの軸方向分布 $\hat{M}_D(x)$ および最

大の変動ホットスポット応力 $\hat{\sigma}_{HD}$ は以下のように表わされる。

$$\hat{w}_D(x) = q_Z C_D D \cdot (G_D - 1) \quad (5.30)$$

$$\hat{M}_D(x) = \bar{M}_D(x) \cdot (G_D - 1) \quad (5.31)$$

$$\hat{\sigma}_{HD} = \bar{\sigma}_{HD} \cdot (G_D - 1) \quad (5.32)$$

5.2 風直交方向の風荷重と応答値

2章において、部材中央の変位片振幅が1となる場合の静的分布荷重 $w(x)$ は式(2.8)で表わされることを示した。この式に式(2.3)を考慮すると以下のように書き換えられる。

$$w(x) = \omega^2 \rho A \cdot \mu(x) \quad (5.33)$$

この式と荷重指針⁽⁷⁾の円形断面をもつ部材の渦励振による荷重を考慮すると、風直交方向の1次振動の固有振動数を f_L 、振動モードを $\mu_L(x)$ とすると、渦励振による単位長さ当たりの最大風荷重 $\hat{w}_L(x)$ は以下のように表わされる。

$$\begin{aligned} \hat{w}_L(x) = & (2\pi f_L)^2 \rho A \cdot Y_L \cdot \mu_L(x) \\ = & (2\pi f_L)^2 \frac{M}{L} \cdot Y_L \cdot \mu_L(x) \end{aligned} \quad (5.34)$$

$$Y_L = \frac{0.26 U_r^*}{0.75 \delta^{1.1} + 0.36 U_r^*} D \quad (5.35)$$

$$U_r^* = 5 + 3/\delta \quad (5.36)$$

$$\delta = \frac{4\pi \zeta_L M}{\rho_a D^2 l} \quad (5.37)$$

ここで、 Y_L 、 M 、 U_r^* 、 δ および ζ_L は、部材中央の変位、部材の全質量、無次元共振風速、質量減衰パラメータおよび風直交方向の1次振動の減衰定数である。

さらに、この荷重による最大曲げモーメントの分布 $\hat{M}_L(x)$ およびホットスポット応力 $\hat{\sigma}_{HL}$ は以下のように表わされる。

$$\begin{aligned} \hat{M}_L(x) = & -EI_L \gamma_L^2 Y_L \\ & \times (A_{1,L} \cos \gamma_L x + A_{2,L} \sin \gamma_L x \\ & - A_{3,L} \cosh \gamma_L x - A_{4,L} \sinh \gamma_L x) \end{aligned} \quad (5.38)$$

$$\hat{\sigma}_{HL} = Y_L \sigma_H \quad (5.39)$$

なお、 I_L 、 γ_L および $A_{1,L} \sim A_{4,L}$ は、この方向に関する断面2次モーメント、固定度 $k_{f,L}$ を考慮した波動伝播定数および積分定数である。

6. 疲労損傷評価方法

6.1 応答振幅と繰返し回数の評価

風速 U_{Zk} に対する疲労検討用のホットスポット応力振幅 $\Delta\sigma_k$ は両振幅なので、以下のように算定できる。

$$\Delta\sigma_k = 2\hat{\sigma}_{HK} \quad (6.1)$$

この応答振幅の繰返し回数を評価する上で、安全側に以下のように仮定する。

- ① 風向は部材に正対する。
- ② 各風速での最大応答が固有振動数で累積作用時間に渡って繰返される。

これらの仮定により、風方向の場合の繰返し回数 n_k は、この風速の累積作用時間 T_k と風方向の固有振動数 f_D を考慮して以下のように算定できる。

$$n_k = T_k f_D \quad (6.2)$$

また、風直交方向に対する円形断面部材の渦励振については次のように考える。

荷重指針⁷⁾では、渦励振が発生する下界の風速 $U_{r\min}$ をストローハル数 $S_t = 0.2$ および安全率=1.2 を考慮して以下のように定めている。

$$U_Z \geq U_{r\min} = 4.2 f_L D \approx f_L D / 1.2 S_t \quad (6.3)$$

本報では下式のように、渦励振が発生する風速域の上界 $U_{r\max}$ に対しても安全率 1.2 を考慮することとする。

$$U_{r\min} \leq U_Z \leq U_{r\max} \quad (6.4)$$

$$U_{r\min} = 4.2 f_L D \quad (6.5)$$

$$U_{r\max} = 6.0 f_L D = 1.2 f_L D / S_t \quad (6.6)$$

この風速域の累積作用時間を T_r とすると、風直交方向の固有振動数 f_L を考慮して以下のように算定できる。

$$n_r = T_r f_L \quad (6.7)$$

6.2 累積疲労損傷度の評価方法

次章計算例にて示す。

7. 疲労損傷評価事例

7.1 算定条件

建設地および地表面粗度区分、基本風速 U_0 および再現期間 500 年の風速 U_{500} 、部材中央位置の地上からの高さ Z 、部材および継手、照査期間 N を以下とし、レベル 2 の風速を再現期間 500 年の風速とする。

建設地：東京(北緯 35.6 度)

基本風速 U_0 ⁽⁷⁾ : 38m/s

再現期間 500 年の風速 U_{500} ⁽⁷⁾ : 42m/s

地表面粗度区分⁽⁷⁾ : III の平坦地

地上からの高さ : 100m

部材・継手 : 076_CT4_015(表 2-1 参照)

照査期間 N : 100 年

減衰定数 : 0.5%

7.2 固有値の評価

部材・継手諸元並びに簡易法による固有値算定結果を表 7-1 に示す。なお、表中の σ_{HS} および σ_{HW} は、各方向の変位片振幅が 1m の場合のホットスポット応力であり、この項目については FEM による値である。

表 7-1 部材・継手諸元

部材	鋼材	E	2.050E+08 kN/m ²
			ρ
長さ		l	1.5 m
	鋼管	D	0.0763 m
t		0.0032 m	
A_p		7.349E-04 m ²	
I_p		4.918E-07 m ⁴	
H		0.0750 m	
CT	B	0.1500 m	
	t_w	0.0070 m	
	t_f	0.0100 m	
	h_e	0.0325 m	
	I_{gc}	1.217E-07 m ⁴	
構成	n	4 本	
	α_e	0.500	
	p	0.0600 m	
	e_1	0.0400 m	
	e_2	0.0200 m	
	l_g	0.0900 m	
	l_m	0.6600 m	
	l_b	0.2850 m	
	l_w	0.1000 m	
	強軸	k_f	1.0000
c_k		4.7300	
ω_S		1314.55 rad/s	
f_S		209.22 Hz	
σ_{HS}		4.440E+08 kN/m ²	
固定度及び固有値	$u_p/(P/E)$	1.163E+05 /m	
	$u_g/(P/E)$	8.544E+03 /m	
	$\theta_g/(P/E)$	1.788E+05 /m ²	
	$u_q/(P/E)$	6.790E+04 /m	
	u_q/u_p	0.5841	
	k_f	0.5517	
	c_k	4.1902	
	ω_w	1031.64 rad/s	
	f_w	164.19 Hz	
	σ_{HW}	1.140E+08 kN/m ²	

7.3 風速の累積作用時間の算定

式(4.4)に示すように、照査期間 N 年における 1 番目に大きな最大風速の経験的再現期間は $2N$ 年に相当し、本例題の場合には 200 年ということになる。いわゆるレベル 2 の風速が再現期間 500 年の風速に概ね相当する「極めて稀に発生する暴風」や「通信鉄塔設計要領・同解説⁽⁴⁵⁾」の再現期間 300 年の風速である場合、これらの風速は含まれないことになり、これらの風速に対する安全性の検証と疲労損傷に対する安全性の検証に不整合が生じることになる。

しかしながら、設計の観点からみるとこのような場合であっても、照査期間に発生する全暴風に加えて、少なくとも 1 つのレベル 2 の暴風による累積疲労損傷度に対する安全性が担保されなければならない。

そこで、ここで評価する累積作用時間は、照査期間 N 年に発生する上位 N 個の暴風に加えて 1 つのレベル 2 の暴風を加えた累積作用時間とする。

(1) 暴風の最大風速の算定と時間変化

照査期間年中の地上高さ Z における i 番目に大きな暴風の最大風速 U_{zi} は、式(4.4)および荷重指針⁽⁷⁾による

式(4.1)~(4.3)および式(5.5)~(5.7)により順次算定できる。例えば、1 番目に大きな最大風速は以下のように算定できる。

$$r_i = N / (i - 0.5) = 100 / (1 - 0.5) = 200 \text{ 年}$$

$$\lambda_U = 42 / 38 = 1.105$$

$$k_{rw} = 0.63(\lambda_U - 1) \ln r_i - 2.9\lambda_U + 3.9 = 1.046$$

$$E_z = 1.7 \times (Z/Z_G)^\alpha = 1.7 \times (100/450)^{0.2} = 1.258$$

$$U_{ri} = U_0 k_{rw} = 38 \times 1.046 = 39.8 \text{ m/s}$$

$$U_{zi} = U_{ri} E_z = 50.0 \text{ m/s}$$

続いて、暴風の時間変化を表わす式として式(4.5)を用いる。建設地の緯度 $\theta_N (=35.6^\circ)$ より暴風の最大風速に対する風速比は以下のように表わされる。全暴風の最大風速および時間変化の算定結果を表 7-2 に示す。

$$C_1 = \min(-0.532 + 0.0192\theta_N, 0.217) = 0.152$$

$$C_2 = \min(-0.444 + 0.0210\theta_N, 0.375) = 0.304$$

$$r_U(t) = (1 + 0.152t) / \exp(0.304t^{0.70})$$

$$U_Z(t) = U_{zi} r_U(t)$$

表 7-2 暴風の最大風速と時間変化

i	r_i (year)	k_{rw}	U_{ri} (m/s)	U_{zi} (m/s)	t (h)						
					0	0.167	0.333	0.500	0.667	...	23.833
					U_Z (m/s)						
U_{500}	500.0	1.105	42.0	52.9	52.9	49.7	48.2	47.2	46.3	...	14.9
1	200.0	1.046	39.8	50.0	50.0	47.0	45.7	44.6	43.8	...	14.1
2	66.7	0.973	37.0	46.5	46.5	43.8	42.5	41.5	40.8	...	13.1
3	40.0	0.939	35.7	44.9	44.9	42.2	41.0	40.1	39.4	...	12.7
4	28.6	0.917	34.8	43.9	43.9	41.2	40.0	39.1	38.4	...	12.4
5	22.2	0.900	34.2	43.1	43.1	40.5	39.3	38.4	37.7	...	12.1
6	18.2	0.887	33.7	42.4	42.4	39.9	38.7	37.9	37.2	...	12.0
7	15.4	0.876	33.3	41.9	41.9	39.4	38.2	37.4	36.7	...	11.8
8	13.3	0.867	32.9	41.4	41.4	39.0	37.8	37.0	36.3	...	11.7
9	11.8	0.858	32.6	41.0	41.0	38.6	37.5	36.6	36.0	...	11.6
10	10.5	0.851	32.3	40.7	40.7	38.3	37.1	36.3	35.6	...	11.5
11	9.5	0.844	32.1	40.4	40.4	38.0	36.8	36.0	35.4	...	11.4
12	8.7	0.838	31.9	40.1	40.1	37.7	36.6	35.8	35.1	...	11.3
13	8.0	0.833	31.6	39.8	39.8	37.4	36.3	35.5	34.9	...	11.2
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	...	:
100	1.0	0.695	26.4	33.2	33.2	31.2	30.3	29.7	29.1	...	9.4

(2) 暴風の累積作用時間

風方向の疲労損傷評価では、風速のビンを 1m/s として暴風の累積作用時間を算定する。風速の中央値を U_{zk} とすると、累積作用時間 $T_{Storm,k}$ は $U_{zk} - 0.5$ m/s 以上かつ $U_{zk} + 0.5$ m/s 未満の風速となる時間の合計となる。例えば表 7-2 のように暴風の時間変化が得られている場合に

は、 $U_{zk} - 0.5$ m/s 以上の風速の個数から $U_{zk} + 0.5$ m/s 以上の風速の個数を引いて 10 倍すれば、風速 U_{zk} に対する累積作用時間が分単位の値として得られることになる。暴風の累積作用時間の算定結果を表 7-3 に示す。

風直交方向については、渦励振の発生する風速領域として表 7-4 のように算定できる。

表 7-3 暴風の累積作用時間(風方向用)

U_z (m/s)			累積作用時間 $T_{Storm,k}$ (min)								
			レベル2暴風			レベル2暴風以外の暴風			合計		
53	35	17	10	40	70	0	720	7,390	10	760	7,460
52	34	16	0	40	80	0	1,050	7,870	0	1,090	7,950
51	33	15	0	40	50	0	1,240	8,280	0	1,280	8,330
50	32	14	10	40	0	10	1,720	8,860	20	1,760	8,860
49	31	13	0	40	0	0	2,190	9,250	0	2,230	9,250
48	30	12	10	40	0	0	2,770	9,710	10	2,810	9,710
47	29	11	10	50	0	20	3,280	9,290	30	3,330	9,290
46	28	10	20	40	0	10	3,890	6,130	30	3,930	6,130
45	27	9	10	50	0	20	4,420	200	30	4,470	200
44	26	8	20	50	0	30	4,870	0	50	4,920	0
43	25	7	20	50	0	30	5,210	0	50	5,260	0
42	24	6	30	50	0	60	5,530	0	90	5,580	0
41	23	5	30	60	0	90	5,800	0	120	5,860	0
40	22	4	30	50	0	120	6,020	0	150	6,070	0
39	21	3	30	60	0	180	6,260	0	210	6,320	0
38	20	2	40	70	0	240	6,470	0	280	6,540	0
37	19	1	30	60	0	380	6,780	0	410	6,840	0
36	18	0	40	70	0	520	7,090	0	560	7,160	0
合計									T_{Storm}	145,440	

表 7-4 暴風の累積作用時間(風直交方向用)

	f_L (Hz)	U_{rmin} (m/s)	U_{rmax} (m/s)	$T_{Storm,r}$ (min)
強軸	209.22	66.5	95.8	0
弱軸	164.19	52.2	75.2	10

(3) 暴風以外の累積作用時間

東京管区気象台(地表面粗度区分 IV, 観測高さ $H_m = 35.1\text{m}$)における 2008 年 1 月~2012 年 12 月までの毎 10 分の観測データ⁽⁶⁾から以下の手順により暴風以外の風速の作用時間を算定する。なお、観測データには前述の暴風に相当する風速も含まれているが、その影響は小さいと考えられるため、観測データから暴風のデータを取り除く等の特別な処理は行わない。

まず、観測データをそのまま用いて Weibull 近似を行う。すなわち、下式を観測データに対して近似し、東京管区気象台における Weibull 係数 C_m および k_m を算定する。

$$F_m(U) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{U}{C_m}\right)^{k_m}\right\} \quad (7.1)$$

続いて、建設地および気象官署の地表面粗度区分を考慮して、Weibull 分布に基づいた建設地の検討高さ Z における非超過確率を下式で算定する。

$$F_{Daily}(U) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{U}{C}\right)^k\right\} \quad (7.2)$$

$$k = k_m \quad (7.3)$$

$$C = \left(\frac{Z_{GIV}}{H_m}\right)^{\alpha_{IV}} \left(\frac{H}{Z_{GIII}}\right)^{\alpha_{III}} C_m = 1.556C_m \quad (7.4)$$

以上によって求めた Weibull 係数は以下のような値である。

$$k = 1.94, \quad C = 3.73 \quad (7.5)$$

照査期間 N (=100 年)、暴風の累積作用時間において算定した風方向用の累積作用時間の合計 T_{Storm} (=145,440min)を考慮して、各風速に対する暴風以外の累積作用時間を風方向に対して以下のように算定する。

$$T_{Daily,k} = T_{Daily} \times \{F_{Daily}(U_k + 0.5) - F_{Daily}(U_k - 0.5)\} \quad (7.6)$$

$$T_{Daily} = 60 \times 24 \times 365.2422 \times N - T_{Storm} \quad (7.7)$$

また、風直交方向に対しては、以下のように算定する。

$$T_{Daily,r} = T_{Daily} \times \{F_{Daily}(U_{rmax}) - F_{Daily}(U_{rmin})\} \quad (7.8)$$

暴風以外による累積作用時間の算定結果を表 7-5 および表 7-6 に示す。

表7-5 暴風以外の累積作用時間(風方向用)

U_{zk} (m/s)	暴風以外の 風の頻度	暴風以外による 累積作用時間 $T_{Daily,k}$ (min)	U_{zk} (m/s)	暴風以外の 風の頻度	暴風以外による 累積作用時間 $T_{Daily,k}$ (min)	U_{zk} (m/s)	暴風以外の 風の頻度	暴風以外による 累積作用時間 $T_{Daily,k}$ (min)
53	6.816E-32	0	35	1.361E-14	0	17	3.034E-04	15,907
52	9.379E-31	0	34	7.842E-14	0	16	6.970E-04	36,543
51	1.231E-29	0	33	4.301E-13	0	15	1.516E-03	79,503
50	1.539E-28	0	32	2.245E-12	0	14	3.122E-03	163,688
49	1.836E-27	0	31	1.115E-11	0	13	6.078E-03	318,676
48	2.087E-26	0	30	5.268E-11	0	12	1.118E-02	586,065
47	2.261E-25	0	29	2.368E-10	0	11	1.940E-02	1,016,895
46	2.334E-24	0	28	1.012E-09	0	10	3.170E-02	1,662,190
45	2.297E-23	0	27	4.117E-09	0	9	4.872E-02	2,554,556
44	2.155E-22	0	26	1.591E-08	1	8	7.023E-02	3,681,864
43	1.925E-21	0	25	5.848E-08	3	7	9.459E-02	4,959,268
42	1.639E-20	0	24	2.042E-07	11	6	1.185E-01	6,211,408
41	1.330E-19	0	23	6.776E-07	36	5	1.369E-01	7,179,325
40	1.027E-18	0	22	2.135E-06	112	4	1.442E-01	7,562,550
39	7.562E-18	0	21	6.391E-06	335	3	1.353E-01	7,094,490
38	5.301E-17	0	20	1.816E-05	952	2	1.074E-01	5,631,280
37	3.539E-16	0	19	4.894E-05	2,566	1	6.132E-02	3,214,802
36	2.249E-15	0	18	1.252E-04	6,561	0	8.560E-03	448,812
Σ							1.000E+00	52,428,399

表7-6 暴風以外の累積作用時間(風直交方向用)

	f_L (Hz)	U_{rmin} (m/s)	U_{rmax} (m/s)	$T_{Daily,r}$ (min)
強軸	209.22	66.5	95.8	0
弱軸	164.19	52.2	75.2	0

7.4 風応答と疲労損傷評価

(1) 疲労損傷評価方法

疲労設計指針⁽¹²⁾における疲労曲線は、次式のような Miner 則に従ったものとなっており、種々の継手形式について示されている。しかしながら、本報のような曲げ応力に対する疲労損傷評価に適用できる疲労曲線は同指針にも掲載されていない。

$$D = \sum \frac{n_k}{N_f} \quad (7.9)$$

$$N_f = \begin{cases} 2 \times 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma_f}{\Delta\sigma_k} \right)^{m_S} & \Delta\sigma_k > \Delta\sigma_e \\ \infty & \Delta\sigma_k \leq \Delta\sigma_e \end{cases} \quad (7.10)$$

ここに、 N_f は破断が生じる繰返し回数、 n_k は応力振幅 $\Delta\sigma_k$ の繰返し回数、 $\Delta\sigma_f$ は 2×10^6 回基本疲労強度、 $\Delta\sigma_e$ は打ち切り限界応力、 m_S は疲労延性指数である。

疲労設計便覧⁽¹⁷⁾によると、曲げ応力に対する打ち切り限界応力は直応力に対するそれより小さいとある。すなわち、継手が同じである場合に、直応力の疲労曲線をそのまま曲げ応力に適用すれば安全側の評価になると考えられる。

本報では、便宜上、継手のカテゴリーを疲労設計指針⁽¹²⁾における「c) 縦方向溶接継手 3. 隅肉溶接継手」として強度等級 $D (=100\text{N/mm}^2)$ とし、疲労延性指数 m_S は $m_S = 3$ とする。また、疲労損傷評価では安全側の評価として打ち切り限界応力 $\Delta\sigma_e$ を無視し、修正 Miner 則によって評価する。

(2) 風方向荷重による疲労損傷度

風方向の各風速における応答は、式(5.4)により q_Z を、式(5.15)、(5.16)、(5.20)、(5.19)および式(5.29)により F 、 R_D 、 v_D 、 g_D および G_D を、さらに、式(5.27)および式(5.32)により平均ホットスポット応力 $\bar{\sigma}_{HD}$ および最大変動ホットスポット応力 $\hat{\sigma}_{HD}$ が得られる。疲労検討用のホットスポット応力振幅 $\Delta\sigma_k$ は式(6.1)に示すようにこの応力 $\hat{\sigma}_{HD}$ の2倍の値である。また、この $\Delta\sigma_k$ の繰返し回数は式(6.2)で算定できる。各風速におけるこれらの諸数値、ホットスポット応力の最大値、繰返し回数、疲労損傷度を強軸について表7-7に、弱軸について表7-8に示す。

強軸方向および弱軸方向共に累積疲労損傷度 D 値は1を下回る値で、強軸方向の方が大きい。これは、端部の

固定度を考慮したことによって、強軸方向の固有振動数が弱軸方向のそれに対し1.27倍程度と差異が大きくないこと、単位変位振幅時の強軸方向のホットスポット応力が弱軸方向のそれに対し2.57倍と大きいことによる。

因みに、疲労設計指針⁽¹²⁾において強度等級がDの場合、打ち切り限界応力 $\Delta\sigma_e$ は変動振幅応力の場合で 39N/mm²

である。強軸および弱軸共に最大の変動応力振幅でこの値を下回っており、打ち切り限界応力を考慮して Miner 則で疲労損傷度を評価した場合に、両方向共に D 値は 0 と評価されることになる。

表 7-7 風方向の疲労損傷評価結果 (その1 強軸の場合)

U_{zk} (m/s)	T_k (s)	q_{zk} (kN/m ²)	F	R_D	v_D	g_D	G_D	$\bar{\sigma}_{HD,k}$ (kN/m ²)	$\hat{\sigma}_{HD,k}$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_k$ (N/mm ²)	N_f	n_k	D_k
53	6.0E+02	1.713	1.4E-03	0.225	89.59	4.791	2.544	9220	14.24	28.48	8.7E+07	1.3E+05	1.4E-03
52	0.0E+00	1.649	1.4E-03	0.222	89.13	4.790	2.542	8875	13.69	27.37	9.7E+07	0.0E+00	0.0E+00
51	0.0E+00	1.587	1.4E-03	0.219	88.66	4.789	2.540	8537	13.15	26.30	1.1E+08	0.0E+00	0.0E+00
50	1.2E+03	1.525	1.4E-03	0.216	88.18	4.788	2.538	8206	12.62	25.24	1.2E+08	2.5E+05	2.0E-03
49	0.0E+00	1.465	1.4E-03	0.213	87.69	4.787	2.536	7881	12.10	24.20	1.4E+08	0.0E+00	0.0E+00
48	6.0E+02	1.405	1.3E-03	0.210	87.19	4.785	2.533	7562	11.60	23.19	1.6E+08	1.3E+05	7.8E-04
47	1.8E+03	1.347	1.3E-03	0.207	86.69	4.784	2.531	7250	11.10	22.20	1.8E+08	3.8E+05	2.1E-03
46	1.8E+03	1.291	1.3E-03	0.204	86.17	4.783	2.529	6945	10.62	21.24	2.1E+08	3.8E+05	1.8E-03
45	1.8E+03	1.235	1.3E-03	0.201	85.65	4.782	2.527	6647	10.15	20.29	2.4E+08	3.8E+05	1.6E-03
44	3.0E+03	1.181	1.3E-03	0.198	85.12	4.780	2.524	6354	9.69	19.37	2.8E+08	6.3E+05	2.3E-03
43	3.0E+03	1.128	1.2E-03	0.195	84.57	4.779	2.522	6069	9.24	18.47	3.2E+08	6.3E+05	2.0E-03
42	5.4E+03	1.076	1.2E-03	0.192	84.02	4.778	2.520	5790	8.80	17.60	3.7E+08	1.1E+06	3.1E-03
41	7.2E+03	1.025	1.2E-03	0.189	83.46	4.776	2.517	5517	8.37	16.74	4.3E+08	1.5E+06	3.5E-03
40	9.0E+03	0.976	1.2E-03	0.186	82.88	4.775	2.515	5252	7.95	15.91	5.0E+08	1.9E+06	3.8E-03
39	1.3E+04	0.928	1.2E-03	0.183	82.29	4.773	2.512	4992	7.55	15.10	5.8E+08	2.6E+06	4.5E-03
38	1.7E+04	0.881	1.1E-03	0.180	81.69	4.772	2.510	4740	7.16	14.31	6.8E+08	3.5E+06	5.2E-03
37	2.5E+04	0.835	1.1E-03	0.177	81.08	4.770	2.507	4493	6.77	13.55	8.0E+08	5.1E+06	6.4E-03
36	3.4E+04	0.791	1.1E-03	0.174	80.45	4.768	2.505	4254	6.40	12.80	9.5E+08	7.0E+06	7.4E-03
35	4.6E+04	0.747	1.1E-03	0.170	79.81	4.767	2.502	4021	6.04	12.08	1.1E+09	9.5E+06	8.4E-03
34	6.5E+04	0.705	1.1E-03	0.167	79.15	4.765	2.499	3794	5.69	11.38	1.4E+09	1.5E+07	1.0E-02
33	7.7E+04	0.664	1.0E-03	0.164	78.48	4.763	2.497	3574	5.35	10.70	1.6E+09	1.6E+07	9.8E-03
32	1.1E+05	0.625	1.0E-03	0.160	77.79	4.761	2.494	3361	5.02	10.04	2.0E+09	2.2E+07	1.1E-02
31	1.3E+05	0.586	1.0E-03	0.157	77.08	4.760	2.491	3154	4.70	9.41	2.4E+09	2.8E+07	1.2E-02
30	1.7E+05	0.549	9.8E-04	0.154	76.35	4.758	2.489	2954	4.40	8.79	2.9E+09	3.5E+07	1.2E-02
29	2.0E+05	0.513	9.6E-04	0.150	75.61	4.755	2.486	2760	4.10	8.20	3.6E+09	4.2E+07	1.2E-02
28	2.4E+05	0.478	9.3E-04	0.147	74.84	4.753	2.483	2573	3.82	7.63	4.5E+09	4.9E+07	1.1E-02
27	2.7E+05	0.445	9.1E-04	0.143	74.05	4.751	2.480	2393	3.54	7.08	5.6E+09	5.6E+07	1.0E-02
26	3.0E+05	0.412	8.9E-04	0.140	73.24	4.749	2.477	2219	3.28	6.55	7.1E+09	6.2E+07	8.7E-03
25	3.2E+05	0.381	8.7E-04	0.136	72.41	4.746	2.474	2051	3.02	6.05	9.0E+09	6.6E+07	7.3E-03
24	3.4E+05	0.351	8.4E-04	0.132	71.54	4.744	2.471	1891	2.78	5.56	1.2E+10	7.0E+07	6.0E-03
23	3.5E+05	0.323	8.2E-04	0.129	70.65	4.741	2.467	1736	2.55	5.10	1.5E+10	7.4E+07	4.9E-03
22	3.7E+05	0.295	8.0E-04	0.125	69.73	4.738	2.464	1589	2.33	4.65	2.0E+10	7.8E+07	3.9E-03
21	4.0E+05	0.269	7.7E-04	0.121	68.77	4.736	2.461	1447	2.11	4.23	2.6E+10	8.4E+07	3.2E-03
20	4.5E+05	0.244	7.5E-04	0.117	67.78	4.732	2.457	1313	1.91	3.83	3.6E+10	9.4E+07	2.6E-03
19	5.6E+05	0.220	7.2E-04	0.113	66.75	4.729	2.454	1185	1.72	3.44	4.9E+10	1.2E+08	2.4E-03
18	8.2E+05	0.198	7.0E-04	0.109	65.67	4.726	2.450	1063	1.54	3.08	6.8E+10	1.7E+08	2.5E-03
17	1.4E+06	0.176	6.7E-04	0.105	64.55	4.722	2.446	949	1.37	2.74	9.7E+10	2.9E+08	3.0E-03
16	2.7E+06	0.156	6.4E-04	0.101	63.38	4.718	2.442	840	1.21	2.42	1.4E+11	5.6E+08	4.0E-03
15	5.3E+06	0.137	6.2E-04	0.097	62.15	4.714	2.438	739	1.06	2.12	2.1E+11	1.1E+09	5.3E-03
14	1.0E+07	0.120	5.9E-04	0.092	60.86	4.710	2.434	643	0.92	1.84	3.2E+11	2.2E+09	6.8E-03
13	2.0E+07	0.103	5.6E-04	0.088	59.50	4.705	2.430	555	0.79	1.59	5.0E+11	4.1E+09	8.2E-03
12	3.6E+07	0.088	5.3E-04	0.083	58.05	4.700	2.425	473	0.67	1.35	8.2E+11	7.5E+09	9.1E-03
11	6.2E+07	0.074	5.0E-04	0.079	56.52	4.694	2.420	397	0.56	1.13	1.4E+12	1.3E+10	9.2E-03
10	1.0E+08	0.061	4.7E-04	0.074	54.87	4.688	2.415	328	0.46	0.93	2.5E+12	2.1E+10	8.4E-03
9	1.5E+08	0.049	4.4E-04	0.069	53.10	4.681	2.410	266	0.37	0.75	4.7E+12	3.2E+10	6.8E-03
8	2.2E+08	0.039	4.1E-04	0.064	51.18	4.673	2.404	210	0.29	0.59	9.7E+12	4.6E+10	4.7E-03
7	3.0E+08	0.030	3.7E-04	0.058	49.08	4.664	2.398	161	0.22	0.45	2.2E+13	6.2E+10	2.8E-03
6	3.7E+08	0.022	3.3E-04	0.053	46.75	4.653	2.391	118	0.16	0.33	5.6E+13	7.8E+10	1.4E-03
5	4.3E+08	0.015	3.0E-04	0.047	44.12	4.641	2.383	82	0.11	0.23	1.7E+14	9.0E+10	5.3E-04
4	4.5E+08	0.010	2.6E-04	0.040	41.08	4.626	2.374	53	0.07	0.14	6.7E+14	9.5E+10	1.4E-04
3	4.3E+08	0.005	2.1E-04	0.033	37.45	4.605	2.364	30	0.04	0.08	3.8E+15	8.9E+10	2.3E-05
2	3.4E+08	0.002	1.6E-04	0.025	32.84	4.577	2.350	13	0.02	0.04	4.5E+16	7.1E+10	1.6E-06
1	1.9E+08	0.001	1.0E-04	0.016	26.19	4.527	2.329	3	0.00	0.01	3.0E+18	4.0E+10	1.3E-08
												ΣD_k	2.55E-01

表7-8 風方向の疲労損傷評価結果 (その2 弱軸の場合)

U_{zk} (m/s)	T_k (s)	q_{zk} (kN/m ²)	F	R_D	v_D	g_D	G_D	$\bar{\sigma}_{HD,k}$ (kN/m ²)	$\hat{\sigma}_{HD,k}$ (N/mm ²)	$\Delta\sigma_k$ (N/mm ²)	N_f	n_k	D_k
53	6.0E+02	1.713	1.7E-03	0.264	75.03	4.754	2.557	3102	4.83	9.66	2.2E+09	9.9E+04	4.4E-05
52	0.0E+00	1.649	1.7E-03	0.261	74.65	4.753	2.554	2986	4.64	9.28	2.5E+09	0.0E+00	0.0E+00
51	0.0E+00	1.587	1.6E-03	0.257	74.27	4.752	2.552	2872	4.46	8.92	2.8E+09	0.0E+00	0.0E+00
50	1.2E+03	1.525	1.6E-03	0.254	73.88	4.751	2.550	2761	4.28	8.56	3.2E+09	2.0E+05	6.2E-05
49	0.0E+00	1.465	1.6E-03	0.250	73.48	4.749	2.547	2651	4.10	8.20	3.6E+09	0.0E+00	0.0E+00
48	6.0E+02	1.405	1.6E-03	0.247	73.08	4.748	2.545	2544	3.93	7.86	4.1E+09	9.9E+04	2.4E-05
47	1.8E+03	1.347	1.6E-03	0.244	72.67	4.747	2.542	2439	3.76	7.52	4.7E+09	3.0E+05	6.3E-05
46	1.8E+03	1.291	1.5E-03	0.240	72.25	4.746	2.540	2337	3.60	7.19	5.4E+09	3.0E+05	5.5E-05
45	1.8E+03	1.235	1.5E-03	0.237	71.83	4.745	2.537	2236	3.44	6.87	6.2E+09	3.0E+05	4.8E-05
44	3.0E+03	1.181	1.5E-03	0.233	71.39	4.743	2.534	2138	3.28	6.56	7.1E+09	4.9E+05	7.0E-05
43	3.0E+03	1.128	1.5E-03	0.230	70.95	4.742	2.532	2042	3.13	6.25	8.2E+09	4.9E+05	6.0E-05
42	5.4E+03	1.076	1.4E-03	0.226	70.50	4.741	2.529	1948	2.98	5.96	9.5E+09	9.4E+05	9.4E-05
41	7.2E+03	1.025	1.4E-03	0.222	70.03	4.739	2.526	1856	2.83	5.67	1.1E+10	1.2E+06	1.1E-04
40	9.0E+03	0.976	1.4E-03	0.219	69.56	4.738	2.524	1767	2.69	5.38	1.3E+10	1.5E+06	1.2E-04
39	1.3E+04	0.928	1.4E-03	0.215	69.08	4.736	2.521	1680	2.55	5.11	1.5E+10	2.1E+06	1.4E-04
38	1.7E+04	0.881	1.3E-03	0.211	68.59	4.735	2.518	1595	2.42	4.84	1.8E+10	2.8E+06	1.6E-04
37	2.5E+04	0.835	1.3E-03	0.208	68.09	4.733	2.515	1512	2.29	4.58	2.1E+10	4.0E+06	1.9E-04
36	3.4E+04	0.791	1.3E-03	0.204	67.58	4.732	2.512	1431	2.16	4.33	2.5E+10	5.5E+06	2.2E-04
35	4.6E+04	0.747	1.3E-03	0.200	67.05	4.730	2.509	1353	2.04	4.08	2.9E+10	7.5E+06	2.5E-04
34	6.5E+04	0.705	1.2E-03	0.196	66.51	4.728	2.507	1276	1.92	3.85	3.5E+10	1.1E+07	3.1E-04
33	7.7E+04	0.664	1.2E-03	0.192	65.96	4.727	2.504	1203	1.81	3.62	4.2E+10	1.3E+07	3.0E-04
32	1.1E+05	0.625	1.2E-03	0.189	65.39	4.725	2.500	1131	1.70	3.39	5.1E+10	1.7E+07	3.4E-04
31	1.3E+05	0.586	1.2E-03	0.185	64.81	4.723	2.497	1061	1.59	3.18	6.2E+10	2.2E+07	3.5E-04
30	1.7E+05	0.549	1.1E-03	0.181	64.22	4.721	2.494	994	1.48	2.97	7.6E+10	2.8E+07	3.6E-04
29	2.0E+05	0.513	1.1E-03	0.177	63.60	4.719	2.491	929	1.38	2.77	9.4E+10	3.3E+07	3.5E-04
28	2.4E+05	0.478	1.1E-03	0.172	62.97	4.717	2.488	866	1.29	2.58	1.2E+11	3.9E+07	3.3E-04
27	2.7E+05	0.445	1.1E-03	0.168	62.33	4.715	2.484	805	1.19	2.39	1.5E+11	4.4E+07	3.0E-04
26	3.0E+05	0.412	1.0E-03	0.164	61.66	4.712	2.481	746	1.11	2.21	1.9E+11	4.8E+07	2.6E-04
25	3.2E+05	0.381	1.0E-03	0.160	60.97	4.710	2.478	690	1.02	2.04	2.4E+11	5.2E+07	2.2E-04
24	3.4E+05	0.351	9.9E-04	0.156	60.25	4.708	2.474	636	0.94	1.88	3.0E+11	5.5E+07	1.8E-04
23	3.5E+05	0.323	9.6E-04	0.151	59.52	4.705	2.471	584	0.86	1.72	3.9E+11	5.8E+07	1.5E-04
22	3.7E+05	0.295	9.3E-04	0.147	58.76	4.702	2.467	534	0.78	1.57	5.2E+11	6.1E+07	1.2E-04
21	4.0E+05	0.269	9.1E-04	0.142	57.96	4.699	2.463	487	0.71	1.42	6.9E+11	6.6E+07	9.5E-05
20	4.5E+05	0.244	8.8E-04	0.138	57.14	4.696	2.459	442	0.64	1.29	9.3E+11	7.4E+07	7.9E-05
19	5.6E+05	0.220	8.5E-04	0.133	56.29	4.693	2.455	399	0.58	1.16	1.3E+12	9.3E+07	7.2E-05
18	8.2E+05	0.198	8.2E-04	0.128	55.40	4.690	2.451	358	0.52	1.04	1.8E+12	1.4E+08	7.6E-05
17	1.4E+06	0.176	7.9E-04	0.124	54.47	4.686	2.447	319	0.46	0.92	2.5E+12	2.3E+08	9.1E-05
16	2.7E+06	0.156	7.6E-04	0.119	53.50	4.682	2.443	283	0.41	0.82	3.7E+12	4.4E+08	1.2E-04
15	5.3E+06	0.137	7.2E-04	0.114	52.48	4.678	2.438	248	0.36	0.71	5.5E+12	8.7E+08	1.6E-04
14	1.0E+07	0.120	6.9E-04	0.109	51.40	4.674	2.433	216	0.31	0.62	8.4E+12	1.7E+09	2.0E-04
13	2.0E+07	0.103	6.6E-04	0.103	50.27	4.669	2.429	187	0.27	0.53	1.3E+13	3.2E+09	2.4E-04
12	3.6E+07	0.088	6.2E-04	0.098	49.06	4.664	2.424	159	0.23	0.45	2.2E+13	5.9E+09	2.7E-04
11	6.2E+07	0.074	5.9E-04	0.093	47.78	4.658	2.418	134	0.19	0.38	3.7E+13	1.0E+10	2.8E-04
10	1.0E+08	0.061	5.5E-04	0.087	46.41	4.652	2.413	110	0.16	0.31	6.6E+13	1.6E+10	2.5E-04
9	1.5E+08	0.049	5.2E-04	0.081	44.93	4.645	2.407	89	0.13	0.25	1.3E+14	2.5E+10	2.0E-04
8	2.2E+08	0.039	4.8E-04	0.075	43.32	4.637	2.400	71	0.10	0.20	2.6E+14	3.6E+10	1.4E-04
7	3.0E+08	0.030	4.4E-04	0.068	41.56	4.628	2.393	54	0.08	0.15	5.8E+14	4.9E+10	8.4E-05
6	3.7E+08	0.022	3.9E-04	0.062	39.60	4.618	2.386	40	0.06	0.11	1.5E+15	6.1E+10	4.1E-05
5	4.3E+08	0.015	3.5E-04	0.055	37.39	4.605	2.378	28	0.04	0.08	4.5E+15	7.1E+10	1.6E-05
4	4.5E+08	0.010	3.0E-04	0.047	34.83	4.590	2.368	18	0.02	0.05	1.8E+16	7.5E+10	4.2E-06
3	4.3E+08	0.005	2.5E-04	0.039	31.77	4.570	2.357	10	0.01	0.03	1.0E+17	7.0E+10	6.9E-07
2	3.4E+08	0.002	1.9E-04	0.030	27.88	4.541	2.342	4	0.01	0.01	1.2E+18	5.5E+10	4.6E-08
1	1.9E+08	0.001	1.2E-04	0.019	22.25	4.491	2.320	1	0.00	0.00	8.1E+19	3.2E+10	3.9E-10
ΣD_k													7.70E-03

(3) 風直交方向荷重による疲労損傷度

風直交方向の応答は、式(5.35)～式(5.37)により部材中央の変位を、式(5.39)により最大変動ホットスポット応力 $\hat{\sigma}_{HL}$ が得られる。疲労検討用のホットスポット応力振幅 $\Delta\sigma_r$ は、風方向と同様に応力 $\hat{\sigma}_{HL}$ の2倍の値である。また、この $\Delta\sigma_r$ の繰返し回数は式(6.7)で算定できる。風直交方向の評価結果を表7-9に示す。

同表に示すように、強軸方向については発振風速が再現期間500年の風速を上回っているため、疲労に対しては安全であるとの結果になっている。一方、弱軸については、僅か10分間の累積作用時間であるが、変位振幅およびホットスポット応力が大きいため、D値は2.3と1を超えている。

以上を踏まえると、風方向の疲労損傷に対して十分に安全であっても、一度渦励振が発生すると致命的な疲労損傷になる可能性があると言える。

表 7-9 風直交方向の応答と疲労損傷度

		強軸	弱軸
空気	ρ_a (kg/m ³)	1.22	
	ρ (t/m ³)	7.850	
部材	D (m)	0.0763	
	t (m)	0.0032	
	l (m)	1.5	
	A_p (m ²)	7.349E-04	
	M (t)	8.653E-03	
	k_f	1.0000	0.5517
振動特性	f_L (Hz)	209.22	164.19
	σ_H (kN/m ²)	4.440E+08	1.140E+08
	ζ	0.005	
疲労特性	等級	D	
	疲労限	無	
	$\Delta\sigma_f$ (N/mm ²)	100	
	$\Delta\sigma_e$ (N/mm ²)	0	
	m_s	3	
渦励振の応答評価	l/D	19.7	
	$U_{z,r=\max}$ ※ (m/s)	52.9	
	$U_{r,\min}$ (m/s)	66.5	52.2
	$U_{r,\max}$ (m/s)	95.8	75.2
	T_r (min)	0.0	10.0
	照査の要否	否	要
	δ	51.03	
	U_r^*	5.06	
	Y_L (m)	0.00171	
	$\hat{\sigma}_{HL}$ (kN/mm ²)	1.954E+05	
疲労損傷評価	n_r	98514.2	
	$\Delta\sigma_r$ (N/mm ²)	390.7	
	N_f	43589.1	
	D 値	2.3	

※印:最大の照査風速

8. おわりに

ここでの検討と提案を事例に適用することで解ったことをまとめると次のようになる。

まず、継手の影響を考慮した鋼管の振動性状の簡易な評価法では、

- ① 端部ボルトの本数が少ない程固定度は小さくなり、ウェブの端部回転拘束力が小さくなる。本報では、このウェブの拘束効果を端部ボルトの本数と関連付けてウェブ有効率を定義した。
- ② 部材中央および1/4の位置での変位振幅を参照し、固定度を算定する方法を提案した。さらに、固定度を基に固有振動数を算定する方法を示し、その有効性を示した。

- ③ 得られた固定度を考慮して、固有振動モードを算定する方法を示し、その有効性を示した。
- ④ 曲げモーメントの算定式、静的分布荷重の算定式、一般化質量の算定式を示した。

FEMによるホットスポット応力算定では、

- ⑤ ホットスポット応力の応力集中係数は10を超えるような値になる場合もある。

評価事例では、

- ⑥ 風方向に対するD値が1を下回る小さな値であっても、風直交方向、いわゆる渦励振が発生する場合にはD値が1を超えるような値となる場合がある。

また、以下のような項目が今後の課題である。

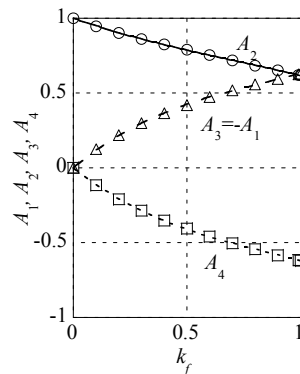
- ① CT以外の継手の場合の簡易な振動性状評価方法の確立。
- ② ホットスポット応力の簡易な評価方法の確立。
- ③ 曲げ応力に対応した疲労実験と疲労曲線
- ④ ボルト周辺の応力集中の評価

最後に、本報では個材の風による疲労損傷を簡易に評価する方法を示したが、本報での提案(1章の項目①～③、⑤)を転用し、荷重については荷重指針⁷⁾を用いれば、風による鉄塔全体の応答による疲労損傷も評価できる。

補足

(1) 積分定数積分定数 $A_1 \sim A_4$ の近似精度

下図に、積分定数 $A_1 \sim A_4$ の理論値(図中○△□)および近似式(2.9)～(2.12)を比較して示す。同図②示すように提案式は良く近似している。



(2) 一般化質量 \tilde{M} および ϕ の近似式

前述したように、部材中央の変位片振幅が1で、端部固定度が k_f の場合の変位モード $\mu(x)$ を、以下のように両端ピンの変位モード $\mu_{pin}(x)$ と両端固定の変位モード $\mu_{fix}(x)$ の一次結合によって表わされることを示した。

$$\mu(x) = (1 - k_f)\mu_{pin}(x) + k_f\mu_{fix}(x) \quad (2.13) \text{再掲}$$

$$\mu_{pin}(x) = \sin(\pi x/l) \quad (2.14) \text{再掲}$$

$$\mu_{fix}(x) = B_1(\cos \gamma_f x - \cosh \gamma_f x) + B_2(\sin \gamma_f x - \sinh \gamma_f x) \quad (2.15) \text{再掲}$$

$$B_1 \approx -0.629665 \quad (2.16) \text{再掲}$$

$$B_2 \approx 0.618647 \quad (2.17) \text{再掲}$$

$$\gamma_f l \approx 4.73004 \quad (2.18) \text{再掲}$$

この近似式を用い、一般化質量 \tilde{M} およびモードの積分値 Φ はそれぞれ以下のように表わすことができ、それぞれ整理すると式(5.24)、式(2.25)に一致する。

$$\begin{aligned} \tilde{M} = & \rho A l \\ & \times \left[(1 - k_f)^2 \int_0^1 \mu_{pin}^2(x') dx' \right. \\ & + k_f^2 \int_0^1 \mu_{fix}^2(x') dx' \\ & \left. + 2(1 - k_f)k_f \int_0^1 \mu_{pin}\mu_{fix}(x') dx' \right] \quad (A.1) \end{aligned}$$

$$\Phi = (1 - k_f) \int_0^1 \mu_{pin}(x') dx' + k_f \int_0^1 \mu_{fix}(x') dx' \quad (A.2)$$

$$x' = x/l \quad (5.3) \text{再掲}$$

$$\int_0^1 \mu_{pin}^2(x') dx' = 0.5 \quad (A.3)$$

$$\int_0^1 \mu_{fix}^2(x') dx' = 0.396478 \quad (A.4)$$

$$\int_0^1 \mu_{pin}\mu_{fix}(x') dx' = 0.878228 \quad (A.5)$$

$$\int_0^1 \mu_{pin}(x') dx' = 0.636619 \quad (A.6)$$

$$\int_0^1 \mu_{fix}(x') dx' = 0.523164 \quad (A.7)$$

参考文献

- (1) 島岡俊輔, 大熊武司, 鶴見俊雄, 安井八紀: 継手を考慮した鋼管部材の簡易な振動性評価に関する研究, その1. 有限要素法による固有値解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造I, No.20110, 2013.8,

- (2) 安井八紀, 大熊武司, 鶴見俊雄, 島岡俊輔: 継手を考慮した鋼管部材の簡易な振動性評価に関する研究, その2. 固有振動数および振動モードの簡易評価法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造I, No.20111, 2013.8,
- (3) 大熊武司, 中込忠男, 丸川比佐夫: 強風による鋼構造骨組の累積疲労損傷 その1, その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.75-78, 1988
- (4) 成原弘之, 泉満, 浅見豊: 風荷重に対する高層鋼構造骨組の疲労設計, 日本建築学会構造系論文集, 第465号, pp.129-137, 1994.11
- (5) 安井八紀, 大熊武司, 廣川雅一, 吉江慶祐, 丸川比佐夫: 高層建築物の疲労損傷評価に与える強風特性のモデル化の影響に関する研究, その1 強風特性のモデル化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.185-186, 2001.9
- (6) 日本建築学会: 風と地震による繰返し荷重効果と疲労損傷, シンポジウム資料, 2003
- (7) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説(2004)
- (8) 大熊武司, 安井八紀, 吉江慶祐: 疲労損傷評価のための暴風の累積作用時間の簡易評価方法, 神奈川大学工学研究所 所報, 第35号, pp.30-36, 2012
- (9) 田村幸雄: 円筒の渦励振に関する研究, その2 渦励振現象のモデル化, 日本建築学会論文報告集, 280, pp.67-77, 1979
- (10) 田村幸雄, 大野昌彦: 円筒の渦励振に関する研究, その3 連続体の渦励振モデル, 日本建築学会論文報告集, 337, pp.65-72, 1984
- (11) 大熊武司, 神田順, 田村幸雄: 建築物の耐風設計, 鹿島出版会, 2004
- (12) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 2012
- (13) 田矢虎男: 振動・衝撃の基礎理論とラプラス変換<上>, 学会出版センター, 1984
- (14) 松井正宏, 大熊武司, 田村幸雄, 飯場正紀, 竹中康雄, 吉江慶祐: 耐風設計で累積的荷重効果を評価するための強風イベントの等価継続時間, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B, pp.85-86, 2011.8
- (15) 建設電気技術協会: 通信鉄塔設計要領・同解説, 2003
- (16) 気象庁 HP
- (17) 日本材料学会: 疲労設計便覧, 1995