

撓性構造物のガスト応答と信頼性について

大阪大学工学部 正員 小松 定夫
 広島工業大学工学部 正員 ○ 中山 隆弘

1. まえがき 本文は、その安全性上、外力の動的効果を無視できない撓性構造物の、ガストに対する信頼性を論じようとするものである。応答解析が比較的簡単であり、それについて本研究の目的から外れないとの理由により、吊橋主塔に代表される塔状構造物を解析の対象に選び、現時点で考えられる最適な手法^(1,2,3)によってガスト応答解析を行う。そしていわゆる初通過破壊確率⁽⁴⁾によって塔の信頼性を評価する。ただし文献(1,2)ではいずれも塔の基準振動形として直線近似の方法を用いているのに対し、本研究ではスプライン関数による近似を試みたので、両方法による解析精度についても検討する。さらに信頼性工学的手法⁽⁵⁾によってガスト応答倍率を決定し、構造物の安全性レベルとガスト応答倍率との関係を、より論理的に明快にするための資料を提示したい。

2. 塔状構造物のガスト応答 モーダルアナリシスによれば、ガストによる塔の曲げモーメントのパワースペクトル密度関数 $S_{MM}(Z, f)$ は次式で与えられる。

$$S_{MM}(Z, f) = 4 |X_0(f)|^2 \sum_r [EI(Z)]^2 \left[\frac{d^2 \varphi_r(Z)}{dZ^2} \right] \left[\frac{d^2 \varphi_r(Z)}{dZ^2} \right] H_{\varphi_r}^*(f) H_{\varphi_r}(f) \times \\ \int_0^H \int_0^H \varphi_g(Z_1) \varphi_r(Z_2) \frac{\bar{p}(Z_1)}{\bar{V}(Z_1)} \frac{\bar{p}(Z_2)}{\bar{V}(Z_2)} R_v(Z_1, Z_2, f) \sqrt{S_{vv}(Z_1, f)} \sqrt{S_{vv}(Z_2, f)} dZ_1 dZ_2 \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 Z : 高度、 f : 周波数、 $|X_0(f)|^2$: 空力アドミッタンス、 g, r : それぞれ基準振動形の次数、 $EI(Z)$: 高度 Z における塔の曲げ剛性、 $\varphi_g(Z)$, $\varphi_r(Z)$: それぞれ g 次および r 次の正規基準振動形、 $H_{\varphi_r}^*(f)$, $H_{\varphi_r}(f)$: それぞれ g 次および r 次の振動形に対する周波数応答関数、 H : 塔の高さ、 $\bar{p}(Z)$: 高度 Z における塔単位長当りの平均風圧、 $\bar{V}(Z)$: 高度 Z における平均風速、 $R_v(Z_1, Z_2, f)$: 風速の空間相関係数、 $S_{vv}(Z, f)$: 高度 Z における変動風速のパワースペクトル密度関数である。本研究では、空力アドミッタンスについては Vickery の式⁽⁶⁾を、空間相関係数については指数関数表示式⁽⁷⁾を、変動風速のパワースペクトル密度関数としては日野の式⁽⁸⁾を、変動風速の分散については Davenport の式⁽⁹⁾をそれぞれ用いている。

高度 Z における塔断面の引張縁および圧縮縁に対する断面係数を共に $W(Z)$ とすれば、ガストによる縁応力 $S(Z)$ およびその瞬間的導関数 $\dot{S}(Z)$ の分散 $\sigma_S^2(Z)$, $\sigma_{\dot{S}}^2(Z)$ は、

$$\sigma_S^2(Z) = \int_0^\infty S_{MM}(Z, f) df / W^2(Z) \quad \text{----- (2)} \quad \sigma_{\dot{S}}^2(Z) = \int_0^\infty f^2 S_{MM}(Z, f) df / W^2(Z) \quad \text{----- (3)}$$

平均応答による曲げモーメント $\bar{M}(Z)$ および縁応力 $\bar{S}(Z)$ については g 次の固有振動数 f_g を用いて、

$$\bar{M}(Z) = -EI(Z) \sum_g \frac{d^2 \varphi_g(Z)}{dZ^2} \int_0^H \bar{p}(Z) \varphi_g(Z) dZ / 4\pi^2 f_g^2 \quad \text{----- (4)} \quad \bar{S}(Z) = \bar{M}(Z) / W(Z) \quad \text{----- (5)}$$

3. 断面の破壊確率とガスト応答倍率 縁応力が降伏点に達するときを断面の破壊と定義すれば、ある限定時間 t_d にわたりガストの作用を受ける塔断面の初通過破壊確率 $P_f(t_d)$ は、降伏点の平均値 $\bar{\sigma}_y$ と $\sigma_S(Z)$ との比 $\bar{\sigma}_y / \sigma_S(Z)$ と $\bar{\sigma}_y$ との比 π 、降伏点の変動係数 δ_s および $\sigma_{\dot{S}}(Z)$ と $\sigma_S(Z)$ との比 $\sigma_{\dot{S}}(Z) / \sigma_S(Z)$ によって近似的に与えられる⁽⁵⁾。すなわち $P_f(t_d) = f(\bar{m}, \pi, \delta_s, \sigma_{\dot{S}}(Z) / \sigma_S(Z))$ ----- (6) 一方上述の定義により、

$$1 / \bar{m} \pi = \sigma_S(Z) / \bar{S}(Z) \quad \text{----- (7)} \quad \text{が成立する。さらに風荷重に比べて死荷重の影響が無視できるように}$$

荷重状態を想定すれば、文献(5)で示したように、Davenport とは別の立場から、ガスト応答倍率 $G(Z)$ を $G(Z) = \phi \delta_s / \delta_w \pi$ ----- (8) と定義できる。ここに ϕ , δ_w , δ_s はそれぞれ強度低減係数、荷重係数および強度（ここでは降伏点）の公称値と平均値との比である。したがって ϕ , δ_w , δ_s を決定する問題と、 $G(Z)$

を算定する問題を切離して考えることにすれば、ガスト応答解析によって $\sigma_s(z)$, $\sigma_b(z)$, $\bar{s}(z)$ を求めることにより、ある許容破壊確率に応じたガスト応答倍率を、式(6), (7) および式(8)によって算定することができる。ただし方法としては図式的方法に頼らざるを得ない。

4. 数値計算例 式(1)に含まれる厳密な基準振動形の近似式として、直線^{1),2)}やスプライン関数を用いるのが妥当であるかどうかを照査するためには、あらかじめその厳密な表示式がわかっている等断面の塔を数値計算の対象とするのが望ましい。したがって本研究では図-1に示すような横断面をもつ、高さ100mの鋼製薄肉等断面の塔を解析モデルとした。その固有振動数は、 $f_1 = 0.488 \text{ Hz}$, $f_2 = 3.058 \text{ Hz}$, $f_3 = 8.561 \text{ Hz}$ である。なお補剛材の影響については、質量および曲げ剛性に対して共に無視している。高度10mにおける10分間平均風速 $\bar{V}_{10}$ を 40 m/s 、抗力係数を2.2、風速の鉛直分布を与えるべき指数を0.2、風速の空間相関を表す係数を8、空気密度を 0.0012 t/m^3 とし、各モード間に連成がないとして求めた基部断面の縁応力の平均値 $\bar{s}(0)$ と $r.m.s.$ 値 $\sigma_s(0)$ 等を表-1に示す。表中 K_R は地表粗度に関する定数、 n は1次の基準振動形に対する構造減衰定数である。また表の最右欄の $P_F(600)$ は、風の評価時間を10分、降伏点の平均値を 3678.3 kgf/cm^2 ¹⁰⁾、その分布形および変動係数をそれぞれ正規分布および0.1として、応答過程による方法⁹⁾によって求めた基部断面の破壊確率である。1次の振動形のみを考慮して $P_F(600)$ を計算したのは、振動形を直線で近似する方法の精度を検討するためである。表より直線による近似法^{注)}は実際より大きい応答量を、スプライン関数による近似法は小さい応答量を与えることがわかる。ただし後者において、塔を8要素に等分割した場合には、近似による $\sigma_s(0)$ の誤差は約1%と非常に小さい。さらに表より、ガストに対する塔の信頼度と地表の粗度状態が大きく影響しているのに対し、構造減衰の影響は非常に小さいことが理解できる。

次に同一条件のもと、1次の基準振動形のみを考慮して、3.で述べた方法によって算出した基部断面の縁応力に対するガスト応答倍率を表-2に示す。なお図-2は、 K_R を0.003、 n を0.004としたときの、式(6)および式(7)の関係式を与えるものである。実線が式(6)を、破線が式(7)を表している。表-2より、地表粗度の状態とガスト応答倍率との関係、あるいは破壊確率とそれらの関係を理解することができる。注) $d^2 \phi_s(z)/dz^2$ の値については、厳密な基準振動形を表わす関数を用いて計算した。

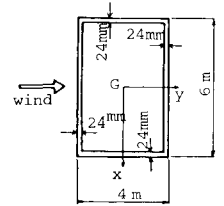


図-1 解析モデルの横断面

表-1 ガスト応答による塔基部の縁応力

h_1	K_R	基準振動形	$\bar{s}(0)$	$\sigma_s(0)$	$P_F(600)$
0.004	0.003	厳密式	1780.2	306.5	1.54×10^{-4}
		SP 4要素	1733.5	297.0	0.48×10^{-4}
		SP 8要素	1777.0	302.8	1.16×10^{-4}
		ST	1886.6	317.9	1.66×10^{-3}
0.006	0.004	厳密式	1780.2	354.7	2.34×10^{-3}
	0.005	厳密式	1780.2	397.7	1.47×10^{-2}
	0.010	厳密式	1780.2	303.5	1.24×10^{-4}
0.010	0.003	厳密式	1780.2	298.1	0.83×10^{-4}

SP: スプライン関数近似

(unit: kgf/cm²)

ST: 直線近似

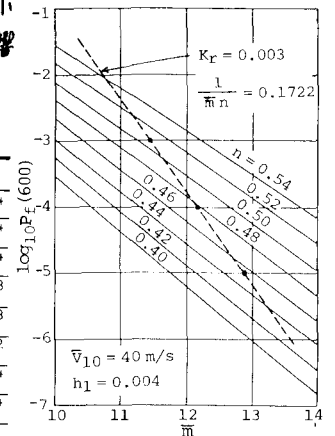


図-2 $\bar{m} \sim n \sim P_F(t_d)$ 曲線

表-2 ガスト応答倍率

		$\phi=1.0, \beta_w=1.0, k_s=0.865$			$\phi=0.9, \beta_w=1.1, k_s=0.865$		
P_F	K_T	0.003	0.004	0.005	0.003	0.004	0.005
	10^{-3}	1.705	1.835	1.942	1.395	1.501	1.589
	10^{-4}	1.810	1.947	2.087	1.480	1.593	1.707
	10^{-5}	1.914	2.076	2.223	1.566	1.699	1.818
by Davenport		1.674	1.780	1.870	1.674	1.780	1.870

<参考文献> 1) Miyata: Calculation of ..., Ann. Report Eng. Res. Inst., Fac. Eng., Univ. of Tokyo, Vol. 31, 1972, pp. 69-78. 2) Simiu and Scanlan: Wind Effects on Structures, John Wiley & Sons, 1978. 3) 本四技術調査委員会: 本州四国連絡橋耐風設計指針(1976)同解説, 土木学会 4) 小松・中山: 材料強度の..., 土木学会論文報告集, 第250号, 1976, pp. 25-36. 5) 小松・中山: 構造物の..., 土木学会中・四支部年講概要集, 1983, pp. 20-21. 6) Vickery: Load Fluctuations ..., Proc. ASCE, EM1, 1968, pp. 31-46. 7) 岡内・伊藤・宮田: 耐風構造, 丸善, 1977. 8) 日野: 瞬間最大値と..., 土木学会論文集, 第117号, 1965, pp. 23-33. 9) Davenport: The Spectrum ..., Q. J. Roy. Met. Soc., Vol. 87, 1961, pp. 194-211. 10) 西村: 鋼材の..., JSSC, Vol. 5, No. 48, 1969, pp. 68-74.