

建設省土木研究所 正員 佐藤弘史
 建設省土木研究所 正員 横山功一
 建設省土木研究所 東久保正徳

1. まえがき

乱流中の構造物では接近流の乱れに起因するガスト応答が発現するとともに、フラッターなどの自励振動も乱れのほとんどない一様気流中におけるものとは特性が異なって発現するようになる。乱流中の対風応答を、ガスト応答成分と自励振動成分とに分離することは必ずしも容易ではないが、ここではガスト応答推定計算値と計測された対風応答との差は自励空気力の作用に起因するものと考え、乱流中における構造物の振動について考察を加えた。

2. 対風応答の計測

対象とした構造物はトラス補剛桁（トラス充実率約38%）であり、この2次元剛体模型を鉛直たわみ・ねじれ2自由度で支持した。使用した気流はスパイアー等で発生させた境界層乱流であり、乱れ強さ I_w が約7%、乱れのスケール L_w はトラス主構間隔の約0.4倍であった。得られた応答の標準偏差を図-1に示す。図には、変動風速の鉛直方向成分のみを考慮した準定常理論にもとづく推定値（ただし、ねじれ成分の空力減衰は0とする）もあわせて示しているが、鉛直たわみ振動については推定値が計測値より大きめであるのに対し、ねじれ振動についてはわずかながら計測値の方が準定常理論にもとづく推定値より大きい。両者の差の主要な原因の1つとしては、準定常理論より推定される強制的な変動空気力と、模型に実際に作用する変動空気力との差が考えられる。

3. 強制的な変動空気力の計測

強制的な変動空気力のパワースペクトル密度関数PSDF（ S_{CL} ；揚力、 S_{CM} ；空力モーメント）とそれに対するバネ支持模型の振動変位のPSDF（ $S_{\eta r}$ ；鉛直たわみ、 S_{θ} ；ねじれ）との関係は次のとおりである。

$$S_{\eta r}(f) = |H_{\eta}(f)|^2 S_{CL}(f) / (\sigma \cdot 8\pi^2 \cdot f r \eta)^2$$

$$S_{\theta}(f) = |H_{\theta}(f)|^2 S_{CM}(f) / (\gamma \cdot 8\pi^2 \cdot f r \theta)^2$$

ここに、 ηr ；無次元鉛直たわみ変位（ $\equiv \eta/B$ 、 η ；鉛直たわみ変位、 B ；トラス主構間隔）、 σ ；無次元質量（ $\equiv m/\rho B^2$ 、 m ；単位長さあたりの模型質量、 ρ ；空気密度）、 $f r \eta$ ；無次元鉛直たわみ振動数（ $\equiv f \eta B/U$ 、 $f \eta$ ；鉛直たわみ固有振動数、 U ；平均風速）、 $|H_{\eta}(f)|^2 \equiv [\{ 1 - (f/f_{\eta})^2 \}^2 + \{ (\delta \eta + \delta a \eta) (f/f_{\eta})/\pi \}^2]^{-1}$ 、 f ；振動数、 $\delta \eta$ ；無風時鉛直たわみ対数減衰率、 $\delta a \eta$ ；鉛直たわみの空力減衰、 γ ；無次元極慣性モーメント（ $\equiv I_{\theta}/\rho B^4$ 、 I_{θ} ；単位長さあたりの模型極慣性モーメント）、 $f r \theta$ ；無次元ねじれ振動数（ $\equiv f \theta B/U$ 、 $f \theta$ ；ねじれ固有振動数）、 $|H_{\theta}(f)|^2 \equiv [\{ 1 - (f/f_{\theta})^2 \}^2 + \{ (\delta \theta + \delta a \theta) (f/f_{\theta})/\pi \}^2]^{-1}$ 、 $\delta \theta$ ；無風時ねじれ対数減衰率、 $\delta a \theta$ ；ねじれの空力減衰。

これらの関係を用いれば、振動変位のPSDFより強制空気力のPSDFを推定することは可能である。ガスト応答推定にあたり最も重要な強制空気力のPSDFは、推定すべき振動系の固有振動数に対応する成分（ $f = f r \eta U/B$ あるいは $f = f r \theta U/B$ に対応する成分）であるが、同一の振動系を用い空気力のPSDFを推定しようとする、 $|H_{\eta}(f)|^2$ あるいは $|H_{\theta}(f)|^2$ の固有振動数付近の値を精度よく求める必要がある。固有振動数付近では $|H_{\eta}(f)|^2$ あるいは $|H_{\theta}(f)|^2$ は減衰の値に非常に敏感であるが、空力減衰を精度よく求めることは容易でない。このため、空気力のPSDFの推定にあたっては、対風

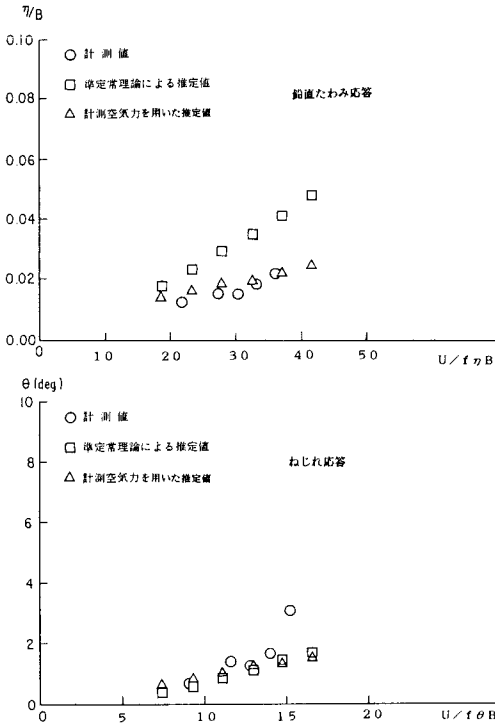


図-1 乱流中の振動変位の標準偏差

応答計測で用いた支持系に比べ剛な支持系を用いた。

計測した強制空気力のPSDFを図-2に示す。図中には、準定常理論による推定値、Sears関数をLiepmann近似して用いた推定値も併せて示した。推定値は以下の式により計算した。

$$SCL(f) = (dCF/d\alpha)^2 |X(f)|^2 |J(f)|^2 S_w(f) / U^2$$

$$SCM(f) = (dCM/d\alpha)^2 |X(f)|^2 |J(f)|^2 S_w(f) / U^2$$

ここに、 $dCF/d\alpha$ ；揚力傾斜、 $|X(f)|^2$ ；空力アドミッタンス（準定常理論では1.0、Sears関数では $(1 + 2\pi^2 fB/U)^{-1}$ ）、 $S_w(f)$ ；鉛直方向変動風速のPSDF、 $|J(f)|^2$ ；ジョイントアクセプタンス関数（ $\equiv \int_0^1 \int_0^1 \exp(-8f\ell|t_1 - t_2|/U) dt_1 dt_2$ 、 ℓ ；模型長）、 $dCM/d\alpha$ ；空力モーメント傾斜。

図-2によれば計測された空気力のPSDFと推定値とは必ずしも一致しない。この差は図-1に示した応答の大小関係と概ね対応している。

上記のように求めた空気力のPSDFを用いて、ガスト応答の標準偏差を計算した結果を図-1に併せて示す。当然のことながら、計測した空気力を用いた計算値の方が準定常理論による推定値と比べ対風応答計測値との対応が良好である。計測した空気力を用いて推定したガスト応答値と、計測した対風応答値との間に顕著な差が見られるのは、無次元風速が約1.4以上のねじれ振動である。ガスト応答計算ではねじれモードの空力減衰を0と仮定しているが、推定値より計測値が顕著に大きいことは、これらの風速において負の空力減衰が作用しているものと推察される。換言すれば、無次元風速およそ1.4以上ではガスト応答の他に、フラッターの影響が現われているものとみることができる。

4. まとめ

強制的な変動空気力を計測し、これを用いてガスト応答計算を行い、乱流中での対風応答計測値と比較すれば、乱流中の応答に及ぼす自励的な空気力の影響をある程度推定できることが明らかとなった。

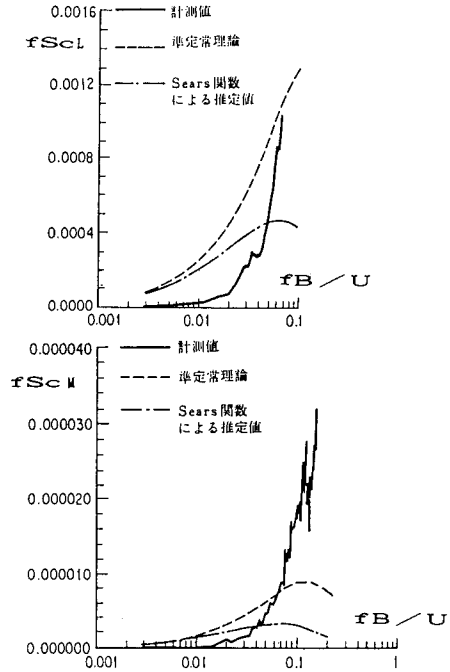


図-2 強制的な変動空気力のPSDF