I-224 格子乱流による風洞実験について

東京大学 正員 宮田 利雄
建設省 正員 ○ 中島 威夫

自然風の乱れによる構造物の変動空気力とこれに基づく振動応答の問題は，大気拡散，地物の起伏に原因する局地風の問題とならんで，乱れた気流の一般流としての構造と物体の存在にともなう変曲のメカニズムの理解を不可欠にする。ここでは，風洞においてしばしば用いられる格子背後に発生する乱流，いわゆる格子乱流の特性に関する若干の review とこれに関連した変動空気力の自然風中の振舞に関して1，2述べてみることにする。

大気乱流に相似した乱流の風洞内における発生については，境界層風洞による方法と格子乱流による方法が一般的であるが，いずれにせよ，流速の統計的特性値，なかでも乱れの強さ，パワースペクトル，二次の相関係数をその特性を記述する変数として問題にする。まず，風洞内に縦横に配列した矩形板から成る格子背後の乱流の平均流方向の変動成分 u のパワースペクトル $S_u(f)$ についてみると，実測値* は高波数側で f の $-5/3$ 乗に比例し，$f\to 0$ では一定値に近ずくという傾向を持つが，結局，正規化スペクトルを

$$\frac{fS_u(f)}{\overline{u^2}}=A\frac{Lf/U}{\{1+(Lf/U)^2\}^{5/6}}, \quad -\infty<f<\infty \quad (1)$$

のように関数近似できる。この形は，自然風について Harns，日野が導いた式と基本的には同じであり，定数Aと長さの単位をもつLという2つの未知数を含んでいる。しかし，これらの量も，(1)式の最大値を与える波数を $(f/U)_p$ とするとき，

$$L=\sqrt{1.5}/(f/U)_p \quad (2)$$

さらに，$\int_{-\infty}^{\infty}S_u(f)df/\overline{u^2}=1$ であるから，

$$A=1\Big/\int_{-\infty}^{\infty}(1+\xi)^{-5/6}d\xi=0.238 \quad (3)$$

のように定まる。このとき，(1)式の最大値は0.135となり，実測データに対して(1)式をあてはめるとき，正規化パワースペクトルの最大値に対する波数が知られさえすれば定まることになる。

ところで，(1)式中のLといわゆる乱れの平均スケール L_x^u との関係は，Taylor の乱流の凍結に関する仮設にしたがって求められる。すなわち，乱れのスケールは自己相関係数 $\tilde{R}(\tau)$ を用いて

$$L_x^u=U\int_0^{\infty}\tilde{R}(\tau)d\tau \quad (4)$$

と定義されるが，パワースペクトルの $f=0$ における値

$$S_u(0)=2\overline{u^2}\int_0^{\infty}\tilde{R}(\tau)d\tau$$

を用い，(1)式から

$$L_x^u=US_u(0)/2\overline{u^2}=\frac{AL}{2}=\frac{L}{8.4} \text{ 又は } \left(\frac{U}{f}\right)_p/6.9 \quad (5)$$

となる。これは，パワースペクトルの最大値を与える波数 $(f/U)_p$ を知ることによって，乱れの平均スケールを与えることができることを示している。乱流の相似性を考えるとき，パワースペクトルの波数，あるいはその逆数の波長に対するエネルギー分布の状態のみならず，波長と幾何学的縮尺率との関係づけが問題となるが，上の関係から乱れの平均スケールと物体の大きさの関連が一つの意味をもつ指標となることが知られる。

この関係は，乱流中の物体に作用する変動空気力を変動流速と結びつけて考えるときに定義される空力アドミッタンスを論議する際にも現われる。Vickery[1] は，平均流方向に直角におかれたラティス構造の平板 $(D\times D)$ に作用する変動抗力を考えて，次のような空力アドミッタンスを導いた。すなわち，

$$\chi^2(f)=\left\{1+\frac{4\pi^2C_M^2}{C_D^2}\left(\frac{fD}{U}\right)^2\right\}\frac{1}{A^2}\int^A\!\!\int^A R_{AB}^u(f)dA_A dA_B \quad (6)$$

---

* 板幅 6 cm，板中心間隔 24 cm，格子背後 174 cm

$\sqrt{\overline{u^2}}/U:\sqrt{\overline{w^2}}/U=8.9\%:7.2\%\approx 1:0.8$

$L_x^u:L_x^w=5.8^{cm}:2.9^{cm}=2:1$

ここで，カッコ内の第2項は質量力による項であるが，ふつうの構造断面系では無視できると考えられ，空力アドミッタンスとしては二重積分の項のみ扱うことが一般的である。(6)式の正規化クロススペクトル $R^u_{AB}(f)$ は，等方性乱流理論から導かれる理論式と格子乱流についての実測値に基づいて

$$R^u_{AB}(f) = e^{-7.5(\theta/2\pi)}\cdot\cos[1.4(\theta/2\pi)] \quad (7)$$

のように与えている。ただし，

$$\theta = \frac{r_{AB}}{L^u_x}\left[1+\left(\frac{\omega L^u_x}{U}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}, \quad \omega = 2\pi f \quad (8)$$

上式の θ について，乱れの平均スケール L^u_x，波数 f/U との関係を見るとき，これらの量と(6)式の空力アドミッタンスの関連を吟味することになる。すなわち，

(i) 小波長，たとえば $2\pi f L^u_x/U > 3$ のとき，$\theta \approx \omega r_{AB}/U$。よって，空力アドミッタンスは fD/U と物体の形状に依存する。他方，

(ii) 大波長，たとえば $2\pi f L^u_x < \frac{1}{3}$ のとき，$\theta \approx r_{AB}/L^u_x$。よって空力アドミッタンスは fD/U と D/L^u_x の関数となる。

これから，波数 f/U が $1/6\pi L^u_x \approx \frac{1}{3}(f/U)_p$，すなわち，正規化スペクトルが最大値をとる波数の約1/3以下では乱れの平均スケールと物体の大きさの比が空力アドミッタンスに大きく影響するが，逆に，$f/U > \frac{3}{2\pi L^u_x} \approx 3.5(f/U)_p$ では平均スケールには無関係であると理解される。(7)式のような変動風速の空間相関は，実際的には，2点のコヒレンス関数から近似的に

$$R^u_{AB}(f) = \exp\left(-k\frac{f r_{AB}}{U}\right) \quad (9)$$

の形で与えられることが多い。これは，乱れの平均スケールを含まない表現であるが，上述のような相対的に大きい波数領域に対し，あるいは L^u_x/D が少なくとも4〜5以上であれば，(6)式の空力アドミッタンスを求めるのに用いて比較的よい結果を与えると言うことができる。

ときに，本州四国連絡橋公団は，自然風による吊橋吊構造部の変動空気力の測定，応答の観測を行なう目的で部分実験橋計画[2]を実施したが，多くの貴重なデータが得られている。データ解析が現在行なわれている段階なので早急な判断は差し控えたいが，上述の考え方にしたがって，変動抗力と変動風速の平均流方向成分の関係を考慮してみると，(9)式の形で風速変動の空間相関が求まっていれば，空力アドミッタンスは(6)式の二重積分にならって十分表わし得るものと思われる。すなわち，3座標成分の相関を夫々考えた

$$\chi^2(f) = \prod_{i=1,2,3}\left[\frac{1}{D_i^2}\int_0^{D_i}\int_0^{D_i}\exp\left(-k_i\frac{f r^i}{U}\right)dx_1^i\,dx_2^i\right] \quad (10)$$

の形であり，ここで k_i 値として現場実測値を用いるのである。

部分実験橋の大きさは，長さ8m，トラス部分の断面は $1.43^m \times 3.42^m$ であり，地上から約6m高さにセットされている。変動風速の相関は模型軸方向，すなわち指数 k_2 を測定している。ある1つの例では，$U = 7.4$ m/s，$L^u_x = 67$m であるが，このとき $L^u_x/D_2 \approx 8$ のように乱れのスケールが大きいばかりでなく，少なくとも $f/U > \frac{3}{2\pi \times 67} \approx 7\times 10^{-3}$ $(1/m)$ において平均スケールに無関係となるはずである。k_2 以外の相関指数については，等方性乱流を仮定すれば $k_1 = k_2/2$ となるが，実際には $L^x_u \approx (3\sim4)L^y_u$ であるから，ほぼ $k_1 \approx k_2/3$ となる。k_3 は k_2 と等しくとってよいであろう。この例では $k_2 = 20$ であったが，これは比較的地表に近い場合であることを考えるとおかしくない値である。

1) Vickery, B.J. , On the Flow behind a Coarse Grid and its Use as a Model of Atomospheric Turbulence in Studies related to Wind Loads on Structures , NPL Aero Report 1143, March 1965

2) 土木学会・本州四国連絡橋耐風研究小委員会，本州四国連絡橋の耐風に関する調査研究報告書，昭和49年，50年