

辺長比の小さい矩形断面の変動空気力の空間相関特性

清水建設 正会員 ○伊藤 靖晃 京都大学大学院 正会員 白土 博通

清水建設 正会員 野澤剛二郎

1. はじめに

長大橋梁などの構造物の風による応答を予測するためには、変動空気力の空間相関を適切に評価することが重要となる。長大橋梁のガスト応答解析¹⁾では変動風速の空間相関と変動空気力の空間相関が等しいという仮定に基づいたガスト応答解析手法が提案されているが、Larose ら²⁾は扁平六角断面に作用する変動空気力の空間相関が変動風速の空間相関よりも高いことを明らかにした。空間相関を過小評価することはガスト応答の過小評価につながる可能性があり、各種断面形状の空間相関の定量評価および相関が定まるメカニズムの解明が必要である。そこで本研究では一様流および等方性乱流中の $B/D=1.0$ および 2.0 矩形断面を対象に LES を実施し、変動空気力の空間相関の評価、および相関を定める要因の検討を行った。

2. 解析概要

流れの支配方程式は非圧縮性の Navier-Stokes 方程式と連続式で、計算アルゴリズムは fractional step 法を用いた。時間積分は対流項に 2 次精度 Adams-Bashforth 法、粘性項に 2 次精度 Crank-Nicolson 法を用い、空間微分は 2 次精度の中心差分とした。乱流モデルは標準 Smagorinsky モデル($C_s=0.12$)とし、壁面近傍では van Driest の減衰関数による補正を行った。流入変動風は一様流または波数空間の 3 次元エネルギースペクトルに基づく手法³⁾により生成した変動風速の時刻歴を与え、流出境界条件は移流型境界条件、角柱表面は non-slip 条件、主流直角方向境界面は一様流中で周期境界条件、乱流中で slip 条件とした。変動風速の時刻歴は Vickery⁴⁾の実験で用いられた気流（乱れ強度 $I_u=10\%$ 、乱れのスケール $L_x=1.33D$ ）を対象とし、Karman 型 3 次元エネルギースペクトル³⁾により作成した。圧力は全ての境界面で勾配 0 の Neumann 境界条件とし、角柱中央から上下方向に $5D$ (D : 角柱高) 離れた点の空間平均により圧力の基準値を算出した。Re 数は 22,000、無次元時間刻み $U_0\Delta t/D$ は一様流中で $1.0e-3$ 、乱流中で $7.8e-4$ とし、十分な時間経過後の 300 無次元時間のデータを取得した。解析格子は直交格子、物理量はコロケート配置とし、解析領域は主流方向に $41.0D$ 、鉛直方向に $25.6D$ 、スパン方向に $12.8D$ 、角柱表面の最小格子幅は $250/D$ 、スパン方向の格子分割は $D/40$ とした。

3. 解析結果

1) 角柱に作用する空気力

Tab.1 Comparison of Wind Force Coefficients

B/D	Case	I_u	C_D	$\widetilde{C_D}$	$\widetilde{C_L}$	St 数
1.0	LES(smooth)	0%	2.38	0.25	1.56	0.129
	LES(turb.)	11%	1.83	0.30	0.83	0.126
	Exp.(smooth) ^{4~6)}	-	2.05 ~2.20	0.17 ~0.23	1.20 ~1.40	0.12
	Exp.(turb) ⁵⁾	12.5%	1.53	0.19	0.58	1.19
		8.0%	1.79	0.16	0.95	1.24
2.0	LES(smooth)	0%	1.57	0.05	0.39	0.087
	Exp.(smooth) ^{8,9)}	-	1.42 ~1.60	0.11 ~0.13	0.31 ~0.58	0.080 ~0.083

LES により算出した平均・変動風力係数および St 数を実験値^{4~9)}と合わせて Tab.1 に示す。また、澱み点から背面までの周長 s/D に対する角柱表面の平均および変動風圧係数分布を既往の実験結果^{5~9)}と合わせて Fig.1 に示す。
 $B/D=1.0$ では一様流中の変動抗力係数および St 数は概ね実験と同程度となったものの、抗力係数および変動揚力係数は過大評価となった。一様流中の表面圧力は Fig.1 に示すように実験毎にバラツキがあり、Bearman らの実験結果と比較すると平均風圧係数は良く一致しているものの、変動風圧係数は過大評価となり Pocha の実験結果と良く一致した。乱流中では変動抗力係数をやや過大評価しているものの、その他の統計量や平均および変動風圧係数分布は Lee の実験結果と概ね一致した。
 $B/D=2.0$ では変動抗力係数はやや過小評価となったが、その他の統計量は概ね実験値と同程度となった。表面圧力

は西村らの結果と比較して平均風圧係数で同程度、変動風圧係数で過小評価となった。

2) 変動揚力のスパン方向相関

$B/D=1.0$ の主流方向中央における上下面変動圧力差のスパン方向相関係数、および

$B/D=1.0, 2.0$ の変動揚力の相関係数を、Vickery の実験による $B/D=1.0$ の変動圧力差の相関係数と合わせて Fig.2 に示す。 $B/D=1.0$ の変動圧力差の相関係数は乱流中の離隔距離が小さい領域で若干過大評価、大きい領域で若干過小評価となったが実験値と概ね一致しており、変動圧力の空間相関を LES により適切に再現していることが確認できる。

Fig.1 に示したとおり背圧係数の絶対値は $B/D=1.0$ の方が非常に大きく、より強い渦が形成されている。強い渦が形成されれば渦の軸方向であるスパン方向の変動揚力の相関も高まると考えられるが、Fig.2 に示すとおり $B/D=2.0$ の変動揚力の相関は $B/D=1.0$ と比較して高く、相関係数の積分により算出した相関長は $B/D=1.0$ で $5.0D$ 、 $B/D=2.0$ で $11.2D$ であった。 $B/D=2.0$ の相関の方が高くなった要因として、カルマン渦のスケールの差異が考えられる。カルマン渦の主流方向のスケールは St 数の逆数にほぼ比例し、流入風速と St 数から算出した渦スケールは $B/D=1.0$ で $7.8D$ 、 $B/D=2.0$ で $11.5D$ となり、主流方向の渦スケールは $B/D=2.0$ の方が大きい。このことは Fig.3 に示した風速の絶対値のコンター図の比較でも確認できる。主流方向の渦スケールが大きくなればスパン方向の渦スケールも大きくなるため、 St 数の差異により $B/D=2.0$ の変動揚力の相関が高くなったと考えられる。このように辺長比の小さい矩形断面の変動揚力のスパン方向相関はカルマン渦の強度と St 数の2つの要因によって定まると考えられる。

4. まとめ

$B/D=1.0, 2.0$ 矩形断面を対象に LES により変動空気力の空間相関について検討した。結論を以下にまとめる。

- ・上下面変動圧力差の相関係数の解析結果は一様流中、乱流中ともに Vickery の実験結果と良く一致した。
- ・ $B/D=2.0$ 矩形断面の変動揚力のスパン方向相関は $B/D=1.0$ 矩形断面より高いことが確認された。
- ・辺長比の小さい矩形断面の変動揚力の相関はカルマン渦の強度と St 数の2つの要因によって定まると考えられる。

謝辞 本研究の一部は京都大学学術情報メディアセンターのスーパーコンピュータを利用して実施した。ここに記して謝意を表する。

参考文献 1) 土木学会: 橋梁の耐風設計—基準と最近の進歩—, 2003. 2) Larose et al.: Direct measurements of buffeting wind forces on bridge decks, *Jour. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 74-76, pp. 809–818, 1998. 3) 飯塚悟ほか: 波数空間の3次元エネルギースペクトルに基づく LES のための流入変動風の生成, 生産研究, Vol.49, No.1, pp.27-30, 1997. 4) Vickery, B.J.: Fluctuating lift and drag on a long cylinder of square cross-section in a smooth and in a turbulent stream, *Jour. of Fluid Mech.*, Vol.25, pp.481-494, 1966. 5) Lee, B. E. : Effect of turbulence on the surface pressure field of a square prism, *Jour. of Fluid Mech.*, Vol. 69, pp. 263-282, 1975. 6) Bearman, P. W., Obasaju, E. D. :An experimental study of pressure fluctuations on fixed and oscillating square-section cylinders. *Jour. of Fluid Mech.*, Vol. 112, pp. 297-321, 1982. 7) Pocha, J. J.: on unsteady flow past cylinders of square cross-section. Ph.D. Thesis, Department of Aeronautics, Queen Mary College, London, U.K., 1971. 8) 桂順治: 直方形建築物に加わる圧力に関する基礎的研究, 京都大学博士論文, 1977. 9) 西村宏昭, 谷池義人: 二次元長方形角柱の変動風圧特性, 日本建築学会構造系論文集, No. 538, pp. 49-55, 2000.

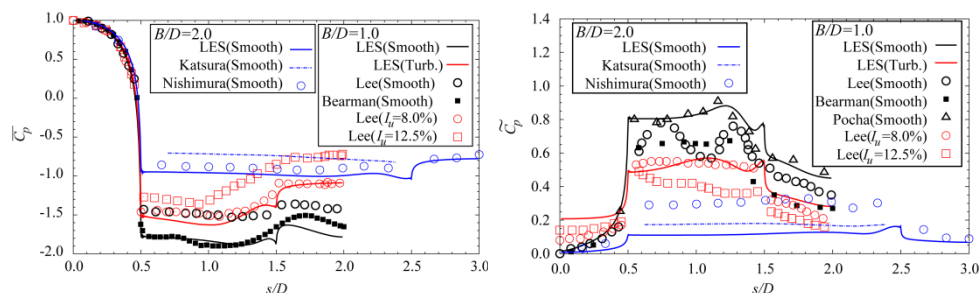


Fig.1 Comparison of Mean and Fluctuating Pressure Coefficients

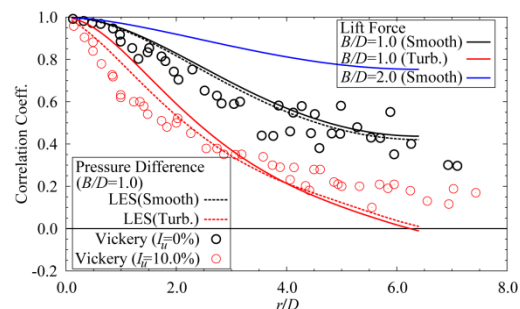


Fig.2 Spanwise Correlation Coefficients

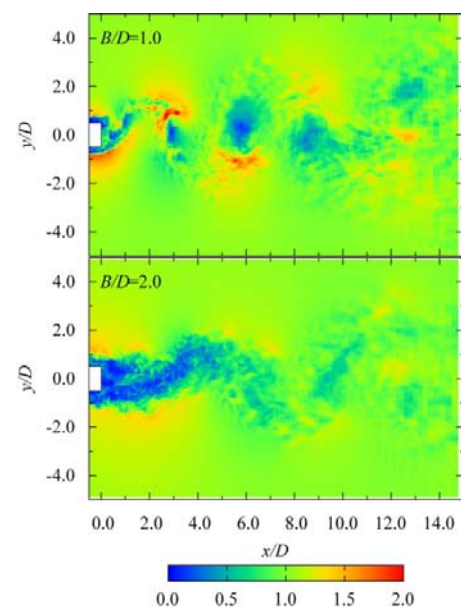


Fig.3 Contours of Velocity Magnitude