11. クーリングタワーの風圧力

本間 義教*

Yoshinori HOMMA

11.1 はじめに

ここでは、鹿児島大学立川教授の論文 [1] を抜粋引用させて頂くとともに、当技研内で行ったHPシェル構造物の実測結果 [2] を合せて記す。なお、最近の資料については、収集していないため、データが多少古いことをお断りする。

11.2 Throatの風圧分布

円周方向の風圧係数分布は、図11-2-2に示すように円柱のそれに類似している。ただし、高さ直径比が小さいから、負圧の値は2次元円柱の場合とはやや異なる。クーリングタワーは、形状が個々に異なるが、形状の風圧分布への影響は比較的小さい。風圧分布は、円柱と同様にRe数および表面の粗さと気流の乱れにより変化する。クーリングタワーのRe数は、 10^8 のorderであるが、実際では、一般の風洞で 10^5 のorder、大型の高压風洞でも 10^7 程度が限度であり、分布の推定の困難さがここに生ずる。

ここでは、図11-2-3のように分布を展開し、Niemannの方法 [3] に従って C_{pmax} , C_{pmin} , C_{pb} , ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 の6個のパラメーターを用て整理した (詳細は文献 [1] 参照)。

図11-2-1 クーリングタワーの形状・名称

図11-2-2 Throat部の平均風圧係数分布

* 株大林組技術研究所

Technical Research Institute of Ohbayashi Corporation

C_{pmax} : 一様流中で0.9~1.0と考えてよい。風速プロファイルのある場合はやや異なった値をもつ。

C_{pmix} : 最も重要なパラメーターで、これにより風圧分布がほぼ決まる。既往の実験値を Re 数に対してプロットすると図11-2-4のようになる。

C_{pb} : 図11-2-5にみられるように高さ直径比が小さいため、2次元円柱のような Re 数による大きな変化はない。full scale で $C_{pb} = -0.4$ 前後と考えられる。ただし、風速プロファイルをもつ風洞実験で塔頂の速度圧を用いた場合の C_{pb} は、一様流中のそれより絶対値が低い。

ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 : 図11-2-6は、一様流の場合であるが、乱流はくり状態に近いものを図11-2-4と同じ記号で、他を×印で区別して表示した。また、図11-2-7は、[4]、[5]、[6]の実験値により、風速のプロファイルの影響を調べたものである。いずれもNiemannの曲線の下にバラつくが、 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 共に、風速のプロファイルのある方が一様流よりもやや高い値をとるのが認められる。

図11-2-3 水平断面上の風圧分布

図11-2-4 Re 数による C_{pmin} の変化 [1]

K : 表面粗さ直径または高さ

D : Niemannは平均直径, CEGB, Davenportはのど部直径, その他は頂部直径

図11-2-5 Re数による C_{pb} の変化 [1] (記号は図11-2-4参照)

図11-2-6 ϕ と C_{pmin} , C_{pb} との関係 [1]
(記号は図11-2-4参照)
X : Re数の比較的小さいデータ
 $K_4 \sim K_7$: Niemannの標準曲線 [3]

図11-2-7 一様流中とプロフィールのある気流中の
 ϕ の比較 [1] (記号は図11-2-4参照)

11.3 高さ方向の風圧分布

図11-3-1は、一様流中の実験結果から、 C_{pmax} , C_{pmin} , C_{pb} について、乱流剥離状態に近いものの垂直方向の分布を示した。 C_{pmax} は上端および中央で、 C_{pb} は下部で絶対値がやや低くなるが、バラツキは比較的小さい(図11-3-1(a),(b))。 C_{pmin} の値はRe数、粗さ、乱れの影響が大きく、それぞれの実験で異なるが、throat部分の値を基準に無次元化すると、ほぼ1本の曲線で代表できる(図11-3-1(c))。絶対値はthroat部分で最大となる。

図11-3-1 風圧の垂直方向分布、一様流中の場合 [1]

図11-3-2 風圧の垂直方向分布、プロフィールのある気流中の場合 [1]

図11-3-2は、[4]、[5]、[6]の風速のプロフィールのある実験結果を示した。実線は塔頂の速度圧 q_{top} を基準とした場合、点線はその高さの速度圧 q_h を基準とした場合である。分岐点圧力は速度圧のプロフィールと一致せず、図11-3-2(a)のように q_h を基準とした C_{pmax} は下部で大きな値を示す。

ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 について、それぞれthroat部分の値との差を、図11-3-3, 11-3-4に示した。高さ方向の変化には、一様流中とプロフィールのある場合で、いちじるしい差はみられない。

図11-3-3 ϕ の垂直分布、一様流中の場合 [1] (記号は図11-3-1参照)

図11-3-4 ϕ の垂直分布、プロフィールのある気流中の場合 [1]

11.4. 群塔の風圧分布

図11-4-1は、Ferrybridge の単独塔と、群モデル中の1A塔の崩壊時予想される風向に対する風圧分布の比較である（[7]，風向，配置等図11-6-1参照）。

図11-4-2にはthroat部分について、群域は付近構造物の影響のある場合とない場合の風圧係数の差 C_{p-dif} の概略を示した。つまり、周辺の塔又は構造物により、単独塔の風圧に、このような分布の風圧が付加される場合があるということである。

図11-4-1 単独塔と群塔の風圧分布の比較，Ferrybridge 模型の場合 [7]

図11-4-2 群塔或は周囲構造物により付加される風圧 [1] (Throat部分)

11.5 変動風圧分布

風圧変動量について、単独塔の一樣流中と境界層風洞中および実測との比較を図11-5-1に示した。4つの風洞実験結果は、すべて Re 数が 10^5 の order のもので、この領域では、特に整流中の場合、 C_{prms} 分布は表面粗さの影響を強くうける。図中4のDevenportの実験値は、前面および側面で高い C_{prms} の値を示し、一樣流中の分布ときわだった違いを示している。Ruscheweyのfull scaleの値を5に示したが、これは4の境界層風洞実験値と驚くほどよく似ている。

図11-5-2(1)は、[2] の実測結果を示した。 C_{prms} は、図11-5-1の4、5と比較すると、約2倍の値となっている。これは、風圧変動が、風速の変動に影響されるためである。図11-5-2(2)は、風速の変動を考慮して、 C_{prms} を風速の乱れ強さでnormalizeしたもので、Devenportの境界層風洞実験値と類似した結果となった。

図11-5-1 Throat部の変動風圧係数分布 [1]

図11-5-2(1) Throat部の変動風圧係数分布 [2]

図11-5-2(2) 風の乱れ強さで一般化した
変動風圧係数分布 [2]

図11-6-1 Ferrybridge各塔の変動風圧分布 [7] (Throat部)

11.6 群塔の変動風圧

風圧変動量について、単独塔と群配置の場合の比較を図11-6-1に示した ([7])。throat部分の変動風圧係数の平均両振幅 $2\Delta C_p$ が示されている。風上構造物の影響のある1A、2A、3A塔、特に前列のクーリングタワーの間から流入した風を受ける1A塔の変動風圧はいちじるしく大きい。CEGBの計算によれば1A塔の変動風圧による風上最大引張応力は、単独塔の静的風力によるその20%に及ぶ。計算上の仮定に問題があるとしても、これは設計上無視できない値である。

11.7 スペクトル

Hashish [8] の境界層風洞実験結果によると、分岐点からはく離点にかけてのパワースペクトルは、周波数の $-2.0 \sim -2.5$ 乗で低減し、背面のスペクトルには、後流による幅の広いピークがみられる。また分岐点 ($\phi = 0^\circ$) と側面 ($\phi = 90^\circ$) の圧力は、大きな負のcospectrumと小さなquadratureをもつことなども示されている。ただし、以上は Re 数 $= 1.8 \times 10^5$ の、特定の風速プロフィールについての実験結果である。

図11-7-1は、[2] の実測結果である。図11-7-2は、[6] の境界層風洞実験結果である。パワースペクトルは、風上面から側面にかけての範囲では、周波数の $-7/3$ 乗で、背面では周波数の $-5/3$ 乗で低減する傾向にあった。これらの結果は、Hashish等の結果と比較的一致している。

図11-7-1 パワースペクトル [2] (実測)

図11-7-2 パワースペクトル [6] (風洞実験)

図11-8-1 Throat部の相互相関係数分布 [2]

図11-9-1 ルートコヒーレンス [2]

11.8 相互相関係数

図11-8-1 [2] は、円周方向の風圧力の相互相関係数 $R(\tau=0)$ である。風上面では正の相関を示し、 $\theta = 35^\circ$ 付近を境に負の相関に移行し、peak-suctionを示す位置付近で $R(\tau) = -0.7 \sim -0.9$ と高い負の相関を示す。背面では、 $R(\tau) = -0.3$ 前後と相関性は低い。

11.9 ルートコヒーレンス

図11-9-1 [2] は、風上面と側面および風上面と背面のルートコヒーレンスである。風上面と側面の相関は、比較的高い。風上と背面の相関は、無次元周波数が $0.2 \sim 0.3$ でピークを示した。これらは、大旨、近似式ルートコヒーレンス $= \exp(-KnL/U)$ において $K=4$ ないし 8 で近似できそうである。

11.10 風圧／風速アドミッタンス

図11-10-1 [2] は、風圧／風速アドミッタンスである。風圧／風速アドミッタンスは、風上面と側面では無次元周波数が 0.2 以下で 1 と見なせ、無次元周波数が 0.2 以上では無次元周波数の $-1/2$ で減少した。背面

図11-10-1 風圧／風速アドミッタンス [2]

では、無次元周波数が0.4程度までは1と見なせるものの、それ以上の周波数域ではwakeの渦の高周波成分が風圧変動に伝達されるため、増大する傾向を示した。

参考文献

- [1] 立川正夫, クーリングタワーの風荷重, 鹿児島大学工学部研究報告, 第17号, 昭和50年
- [2] 中川恭次他, 回転HPシェル構造物に作用する変動風圧測定と解析 (その1) (その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和49年
本間義教他, 回転HPシェル構造物に作用する変動風圧測定と解析 (その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和53年
同題 (その4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和58年
本間義教他, 回転HPシェル構造物に作用する変動風圧力, 構造物の耐風性に関するシンポジウム 1978
- [3] H. J. Niemann, Stationary wind load on hyperbolic cooling towers, Proc. Seminar on Wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo, 1971
- [4] A. G. Davenport, N. Isyumov, The dynamic and static action of wind on hyperbolic cooling towers, BLWT-1-66, Univ. Western Ontario, 1966
- [5] C. F. Cowdrey, P. G. G. O'Neill, Report of tests on a model cooling tower for the C. E. A., Pressure measurements at high Reynolds numbers, NPL Aero., 316a, 1956
- [6] 塩尻引雄他, 自然通風冷却塔に作用する風荷重に関する実験的研究 - 第一報 -, 電力中央研究所報告, 研究報告: 378013, 昭和53年
- [7] Central Electricity Generating Board, Report of the Committee of Inquiry into Collapse of Cooling Towers at Ferrybridge Monday 1 November 1965, Her Majesty's Stationary Office, London, 1966
- [8] M. Hashish, S. H. Abu-Sitta, Response of hyperbolic cooling towers to turbulent wind, Proc. ASCE, ST-5, May, 1974

- [9] H. J. Niemann, H. Pr pper, Some properties of unsteady wind pressures on a natural draught cooling tower, Symposium on Full Scale Measurements, Canada, 1974
- [10] H. Ruscheweyh, Wind loading on hyperbolic natural draught cooling towers, Symposium on Full Scale Measurements, Canada, 1974
- [11] J. Armitt, The effect of surface roughness and free stream turbulence on the flow around a model cooling tower at critical Reynolds numbers, Proc. Symposium on WEBS, Loughborough, 1968
- [12] J. Armitt, Wind load on cooling towers, Proc. ASCE, ST-3, March, 1980
- [13] M. Pirner, Wind pressure fluctuations on a cooling tower, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 10 1982
- [13] 中江新太郎他, 冷却塔に作用する風圧力 (第 3 報), 奥村組技術研究年報, No. 8, 1982
- [14] 石岡仁 他, 自然通風式冷却塔の構造 - 第 3 報 -, 石川島播磨技報, 第 17 卷第 1 号, 1977