展 望・解 説

大スパン建築物の屋根面まわりの流れの可視化*

上 田 宏**

Flow Visualization on Long-Span Roofs

Hiroshi UEDA

1. はじめに

最近、建築界では、イベントホールや大型の工場棟のような大スパン建築物が多く建設されるようになった。特に、この種の屋根は、軽量で剛性が小さいために耐風性能が重要である¹⁾。大スパン屋根に作用する風圧力は、地表面付近の複雑な気流の影響を強く受け、空間的にも時間的にも複雑な性状を示す。このような風圧性状の複雑さは、屋根面まわりの流れと深い関わりをもっている。このため流れの可視化技術によって、屋根面まわりの流れを可視化し、流れと作用風圧力との関係を把握することは、大スパン屋根の耐風設計のために重要である。ここでは、大スパン建築物の屋根面まわりの流れを油膜法で可視化し、作用風圧力との関係を考察した一例を紹介する。

2. 可視化実験

可視化実験には、清水建設㈱技術研究所の耐風実験用風洞装置²⁾を用いた。図1は、風洞装置の平面図である。この風洞の測定部は、幅が2.6m、測定部の入口からターンテーブル中心までの長さが15.0m、天井の高さは、2.1m～2.4mまで連続に変えられる。強風時の大気境界層を風洞で相似させる方法がいくつか考案されているが本実験では、風洞の測定部の長さ等を勘案し、スパイヤとフェンス、ラフネスブロック、それにカーペッドを組み合わせた方法を採用した。この方法で作

成した気流は、平坦地域と市街地域を想定した縮尺率が1:400と1:250の4種類の気流である。測定部の床から30cmの高さに地面板を設置し一様流を作成した。この地面板の境界層厚さは、模型の取り付け位置で約2.0cmである。作成した各気流の模型高さ相当の気流特性を表1に示す。実験に用いた模型の寸法は、表2に示す。可視化に用いた油剤は、酸化チタン、オレイン酸、流動

表1 気流特性および再付着距離

Flow	Model	$T.I.(%)$	$L_{ux}(cm)$	X_R/h	X_R/Z_0	α
1	A	17.3	32	2.37	740.6	1/6.2
	B	14.8	37	2.26	1412.5	
	C	12.7	46	2.17	2712.5	
2	A	27.8	22	1.36	17.0	1/4.0
	B	24.9	34	1.18	29.5	
	C	20.7	41	1.40	70.0	
3	A	24.8	45	1.45	290.0	1/6.2
	B	21.3	61	1.41	564.0	
	C	20.1	65	1.36	1088.0	
4	A	32.4	30	1.20	10.0	1/4.0
	B	30.3	50	1.00	16.7	
	C	26.0	60	0.88	29.3	
5	A	1.7	—	3.21	—	—
	B	0.5	—	4.57	—	
	C	0.5	—	—	—	

$T.I.$: 乱れの強さ, L_{ux} : 乱れのスケール, α : ベキ指数, h : 模型高さ, Z_0 : 粗度長, X_R : 再付着距離

表2 模型の寸法

Model	Height(cm)	Width(cm)	Depth(cm)
A	2.5	25.0	25.0
B	5.0	50.0	50.0
G	10.0	100.0	100.0

* 原稿受付 1989年10月20日

** 清水建設㈱技術研究所

INDUSTRIAL AERODYNAMICS WIND TUNNEL

PLAN

図1 風洞装置平面図

大スパン建築物の屋根面まわりの流れの可視化

パラフィンを、それぞれ1:1:4の割合で混合したものを使用した。模型に油剤を塗り付ける時には、模型表面に油膜を均一な厚さに塗るために塗装用のスプレーガンを用いた。

3. 屋根表面流の可視化

大スパン建築物の形状は、建物の高さに比べて建物の幅が広く水平的な広がりを持っている。写真1は、大スパン建築物模型の時間平均的な屋根表面流れを油膜法で可視化した例である。この写真には、屋根の前縁で剥離した剥離せん断層の再付着領域 P_R (写真2参照) が確認できる。前縁の中央付近では、再付着領域が前縁に平行になっている。前縁の直後には、油剤の溜る部分 P_2 が見られる。そして、この P_2 よりも前縁側に油剤が P_2 の方向へ移流する狭い層 P_1 が見られる。写真2は、風上の角部分を拡大した写真である。角部分の表面流は、たいへん複雑である。約 $0.1W$ 以内 (W : 模型の幅) の角部分の再付着領域は、前縁の方向へ接近している。そして、この剥離流の再付着は、角部分に近づくにつれて早まる傾向が見られる。再付着領域より風下の流れは、ほぼ気流に平行になっている。この結果からこの屋根面まわりの流れは、時間平均的に見れば、前縁から剥離した剥離せん断層が P_R 付近で再付着し、

P_R と P_2 の範囲で剥離泡を形成するような剥離・再付着型の流れであることがわかる。また、角部分の剥離泡は、角を頂点とする円錐状になっている。前述のように、大スパン屋根に作用する風圧力は、気流の乱れの特性や速度分布の影響を顕著に受けると考えられる。写真3は、乱れの強さの小さい気流 (Flow 5) の場合の屋根面のオイル

Model [A], 風向角 0° , Flow 1

写真2 角部分のオイルフロー

Model [A], 風向角 0° , Flow 1

写真1 屋根表面のオイルフロー

Model [A], 風向角 0° , Flow 5

写真3 屋根表面のオイルフロー

図2 再付着距離と気流特性との関係

フローである。気流の乱れ強さが小さい場合の剥離流の再付着は風下へ移動し、前縁に平行になる部分が狭くなり、角部分の円錐状の剥離泡の領域が広がっている。特に、角部分の再付着領域は、流れとほぼ平行になっている。このように気流の乱れは、屋根表面の流れの性状を大きく変化させることが、この可視化の結果に顕著に現われている。図2は、気流の特性と前縁から再付着領域までの距離との関係を示した図である。図の横軸は、1971年に P. W. Bearman³⁾ が提案した Turbulence Parameter であり、縦軸は、オイルフローパターンから求めた前縁から再付着領域までの距離 X_R を、境界層の粗度長 Z_0 で無次元化した値である。表1には、模型中央の再付着距離を模型の高さ h と気流の粗度長 Z_0 との二つの長さで無次元化した結果も示す。これらの結果から気流の乱れ強さや乱れスケールは、屋根面まわりの流れに大きな影響を及ぼすことが明らかである。特に乱れの強さの影響は、乱れのスケールよりも顕著である(表1参照)。

4. 屋根面まわりの流れと作用風圧力との関係

図3は、4種類の気流(Flow 1~4)に対する模型中央の流れ方向の平均風圧分布図である。図の縦軸は、自由流の速度圧に対する風圧係数であり、横軸は、前縁から各測点までの距離 X を模型の高さ h で無次元化した値である。各気流に対

Model [B], Flow 1~Flow 4

図3 各気流の平均風圧係数分布

する風圧係数の分布は、類似した分布形を示している。模型の前縁近傍で強い負圧が発生し、流れ方向に圧力が急速に回復している。ここで屋根面まわりの流れの可視化結果とこの分布とを対比させてみると(写真2参照)、前縁の強い負圧や流れ方向の圧力の急速な回復は、剥離せん断層が屋根面に再付着することによって生じる剥離泡が原因と考えられる。前縁の最大負圧は、前縁から少し下流に離れた位置で生じ、前縁直後で圧力の回復が見られる。この圧力回復は、オイルフローに見られた領域 P_1 や領域 P_2 を生じさせる流れに関係していると推察される。屋根面まわりの流れは、風向によっても大きく変化する。写真4は、風向角が 45° の場合のオイルフローパターンである。このパターンには、角部分を頂点とする一対の円錐状の剥離泡の存在が認められる。この円錐状の剥離泡は、風向角 0° の場合に角部分で見られた円錐状の剥離泡が成長したものと考えられる。また、一対の再付着領域が放射状に走っているのが明確に確認できる。図4は、この時の風圧係数分布図である。この風圧係数は、建物高さ相当の速度圧を基準速度圧としている。圧力は、風上の角部近傍で負圧が強くなっている。この位置は、オイルが流されている領域に相当している。再付着領域よりも内側の領域における圧力は、急速に回復している。このような現象は、風向角 0°

Model [A], 風向角 0° , Flow 1写真4 風向角 45° の場合の屋根表面のオイルフロー

の場合と同じである。本剛ら⁴⁾が指摘しているような2次元渦の存在を予想させるオイルフローが、両側の前縁近傍で見られる。この部分では、圧力が回復する傾向が見られる。本剛らの指摘とオイルフローパターンに見られた領域 P_1 とを勘案すれば、風向角 0° の場合に前縁直後で見られた圧力の回復(図3)は、2次剝離泡に関係があると推察される。

5. あとがき

地上構造物である建築物は、大気境界層という空間的かつ時間的に変動する流れの中に存在している。このような流れの中にある建築物まわりの流れを風洞実験などによって可視化する場合は、多くの困難を伴うことも事実である。最近では、建築物に作用する変動風圧力の可視化が可能になり、耐風設計に対して有益な情報を提供できるようになった^{5~7)}。ここでは、大スパン屋根面まわりの時間平均的な流れを油膜法を用いて可視化

基準速度圧：軒高さ

図4 風向角 45° の平均風圧係数分布

し、屋根面まわりの流れと、その時の作用平均風圧力との関係について述べた。

参 考 文 献

- 1) 田村・渡辺・上田・藤井：幕張メッセ・日本コンベンションセンタの耐風設計，日本風工学会誌，第40号，1989年7月。
- 2) 藤井・上田・佐藤：耐風実験用風洞の基本設計と建設について，日本風工学会誌，第13号，昭和57年。
- 3) P. W. Bearman: An investigation of the forces on flat plates normal to a turbulent flow, J. Fluid Mech., 1971, Vol. 46, pp. 177-198.
- 4) 本剛・石川：砂の飛散から何がわかるか—建築における砂の飛散実験，流れの可視化，Vol. 3 No. 11, 1983年。
- 5) 藤井・日比・上田：多点圧力同時測定システムを用いた角柱表面の変動圧の可視化，流れの可視化，Vol. 7, No. 26, 1987年7月。
- 6) 藤井・日比・上田：多点圧力同時測定システムによる角柱表面の変動圧の可視化，流れの可視化，Vol. 8, No. 30, 1988年7月。
- 7) Hibi K.・Fujii, K.・Ueda, H.・Shimada, K.: Visualization of fluctuating surface pressure distribution on bluff body using Electronically Scanning Pressure Sensors, 5th International symposium on flow visualization, 21-25, August 1989.