

静圧勾配のある乱流境界層中の角柱に加わる 風圧力について

桂 順治・谷池 義人・奥田 泰雄

WIND PRESSURES ON PRISM IN TURBULENT BOUNDARY LAYER WITH STATIC PRESSURE GRADIENT

By Junji KATSURA, Yoshihito TANIKE and Yasuo OKUDA

Synopsis

The wind pressures on a 3-dimensional square prism were measured in turbulent boundary layers with various pressure gradients along wind in order to calculate wind pressure coefficients.

Consequently, we find that the distributions of wind pressure coefficients have similar patterns, if dynamic and static pressures are estimated suitably in turbulent boundary layers.

1. ま え が き

乱流境界層中の物体に加わる風圧力を評価する場合、一般に風圧係数を用いる。これは一様流中の物体に加わる圧力係数¹⁾の考え方を利用したものである。一様流中の圧力係数の場合、基準となる速度圧と静圧は無限遠の位置でとる。しかし、乱流境界層中の風圧係数の場合、速度圧と静圧は物体から無限遠の位置で測定することはできないので、物体の上流で物体に影響のない位置で測定することになっている。このようにこれまで、基準の静圧と速度圧の測定位置について、例えば模型の高さ、境界層の外側、各測定点と同じ高さ等、高さ方向については明確な定義があったが、流れ方向の位置については明確な定義がなかった。ところが、流れに静圧勾配がある場合、あるいは、床面粗度の影響が大きい場合、流れ方向に静圧と速度圧が変化することになり風圧係数が定まらなくなると考えられる。

そこで、本報では乱流境界層中で風圧係数を求める際の問題点を調べ、このような問題点の補正方法について考察した。

2. 実 験 方 法

実験は京都大学防災研究所の境界層風洞で行った。床面に粗度として都市模型を約12mにわたって敷きつめ、天井をFig. 1に示す4種類のタイプに変えて静圧勾配をつけた。この4種類の流れに対しファンの回転数は一定にした。座標軸は風洞測定部の前端を中心にして流れ方向にX軸、横

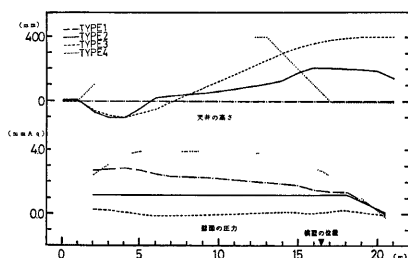


Fig. 1 Figure of ceiling and static pressure gradient.

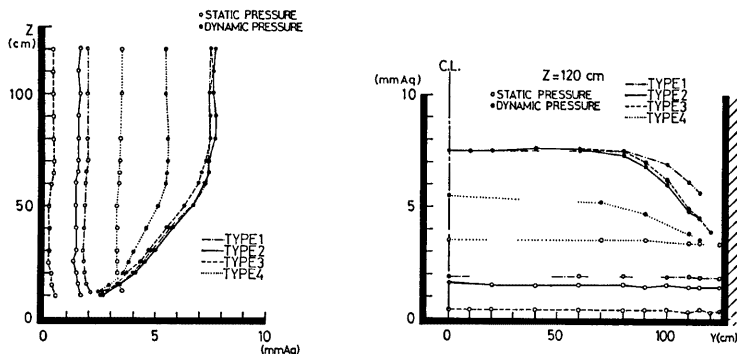


Fig. 2 Distribution in X-Y plane ($X=14700$ mm) of dynamic and static pressures of approaching flow.

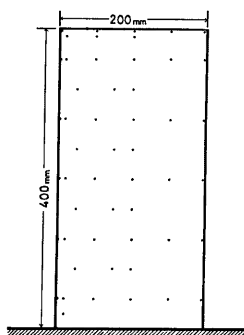


Fig. 3 Pressure taps.

方向にY軸，高さ方向にZ軸をとる。

Fig. 1 の下段の図に実験時の風洞内の壁面 ($Z=1200$ mm) と風洞外との圧力差を示す。Fig. 2 より静圧 (風洞内の圧力から風洞外の圧力を引いた値) はどのタイプも断面内にはほぼ一様であり，Fig. 1 の下段の壁面の圧力 ($X=14700$ mm) にはほぼ一致し，壁面の圧力は風洞内の静圧をほぼ代表していると考えられる。タイプ1は天井面を水平にした場合で，日本の風工学の分野で最も用いられている風洞のタイプである。風洞内上流部の静圧が高くX軸方向に減少しているが，模型のあるターンテーブル付近ではほとんど一定に近い。タイプ2はX軸方向に一定になるように天井の上下を調節した場合である。上流から模型の後方までは静圧が一定であるが，風洞の後端を絞っているために風洞内の静圧は約 1.2 mmAq あり，風洞の後端部で減少している。タイプ3は天井を連続的に上げた場合で，静圧は若干の上下はあるもののほぼ 0 mmAq になっている。以上の

3タイプではどれもターンテーブル付近でそれほど大きな静圧勾配を作り出すことができなかったため，タイプ4はターンテーブル付近 ($X=13000\sim 17000$ mm) で大きく天井を絞り静圧を急激に下げた。このため風洞内中央部の静圧は 3.0 mmAq 以上とかなり高くなる。

模型には高さ 400 mm，幅 200 mm のアクリル製の正方形断面柱を用いた。Fig. 3 に示すように角柱の側面に51点の測定点をもつけた。そこに直径 1 mm の穴をあけ真鍮パイプを介して外径 2 mm のビニールチューブをつなぎ，他端をリアクタンstype圧力変換器 (東京航空計器 KK 製) に接続した。圧力変換器は差圧型なので，一方に模型からのビニールチューブをつないで，他方を開放とし風洞外の圧力が加わるようにした。平均風圧力の測定にはその出力を 1 Hz のローパス・フィルターを通して約20秒間平均して読みとった。

3. 実験結果と考察

3.1 ビトー管で測定した速度圧と静圧

基準となる速度圧と静圧は，4種類の流れに対し，それぞれX軸方向に $X=14700$, 15400 , 16000 , 16600 mm の4点，Z軸方向に $Z=400$ mm (模型の高さ，境界層流中)， 1200 mm (境界層の外側) の2点の計8点

で、X軸に平行に置いたピトー管を用いて測定した。これを Fig. 4 に示す。

境界層の外側 ($Z=1200$ mm) では、タイプ 2 の流れの場合、速度圧と静圧は X 軸方向にほとんど変化せず、それぞれ約 6.9 mmAq と 約 1.1 mmAq である。それ以外の流れの場合、静圧が X 軸方向に変化するために速度圧も X 軸方向に変化している。また、静圧の X 軸方向の変化はほぼ Fig. 1 の下段の壁面の圧力の変化 ($X=14700\sim 16600$ mm) に等しくなっている。

境界層流中 ($Z=400$ mm) でも、静圧と速度圧が X 軸方向に変化している。静圧の変化について、境界層の外側の場合と境界層流中の場合の結果を比較すると、境界層流中の方が全体的に静圧の値が僅かに小さくなっている。また、静圧の変化の傾向はほぼ同じであるが、模型に近づくにつれて境界層流中の静圧は、境界層の外側の静圧よりもかなり小さくなるようである。

この原因は次のように考えられる。境界層流中に於いても、境界層の外側の場合と同様に静圧勾配の影響を受ける。さらに境界層の中では、床面に敷いた粗度や模型によって流線が変形され X 軸に平行でなくなることになる。このため、X 軸に平行に設置したピトー管との間にある迎角 α が生じることになり静圧が減少していると考えられる。Fig. 5 は一様流中に迎角 α をつけて置いたピトー管で測定した速度圧 q 、静圧 P_0 、及び総圧 $P_T (=q + P_0)$ である。ピトー管の先端が丸いために、先端で測定する総圧は迎角 α が 15° 程度まであまり大きく変化せず、 15° 以上になると急激に減少する。それに対し、静圧はピトー管の側面で測定するために、迎角 α が 5° 以上になると流れがピトー管から剝離し、実際の静圧の値よりも小さくなる。つまり、境界層の外側の流れが X 軸に対して平行であっても、境界層の中では床面粗度や模型によって流線がまげられ、X 軸に対する迎角 α が 5° 以上になる場合がある、と考えられる。

3.2 風圧係数 C_p

Fig. 4 の速度圧と静圧を基準にして、各測定点について (1) 式を用いて風圧係数 C_p を求めた。

$$C_p = \frac{P - P_0}{q} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 P は模型の各測定点での風圧力

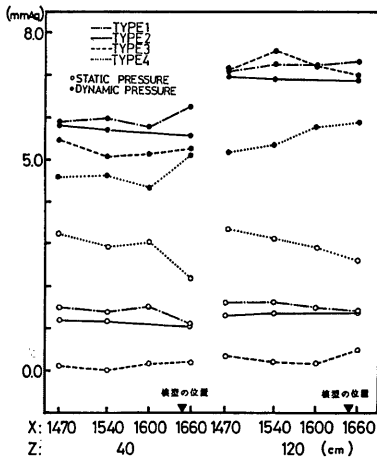


Fig. 4 Variation in X-direction of dynamic and static pressures of Pitot static tube.

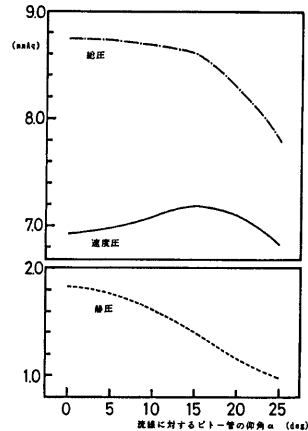


Fig. 5 Variation of dynamic and static pressures of Pitot static tube for wind direction α .

P_0 はピトー管の静圧

q はピトー管の速度圧

Fig. 6 は(1)式を用いて各面の中央点に加わる風圧力 P から求めた風圧係数 C_p で、上から正面、側面、背面の順である。縦軸は風圧係数 C_p で、横軸は基準として用いた速度圧と静圧を測定した位置である。尚、3.1節の議論から、境界層流中 ($Z=400$ mm) でピトー管で測定した速度圧と静圧は、実際の速度圧と静圧を測定していない恐れがあるが、参考データと考え Fig. 6 にその結果を入れた。各面に加わる風圧力の代表点として中央点を選んだが、他の測定点についてもほぼ同様の傾向を示していた。3.1節の結果からわかるように、タイプ2以外の流れでは1つの風圧力を評価していてもその基準とする速度圧と静圧がX軸方向に変化しているために、風圧係数 C_p の値はいろいろな値をとることになる。また、流れのタイプが異なると同じ位置で測定した速度圧と静圧を用いても、風圧係数 C_p の値にはかなりの差が生じる。

従って、(1)式によって風圧係数 C_p を求める場合、基準となる速度圧と静圧を測定するピトー管のX軸

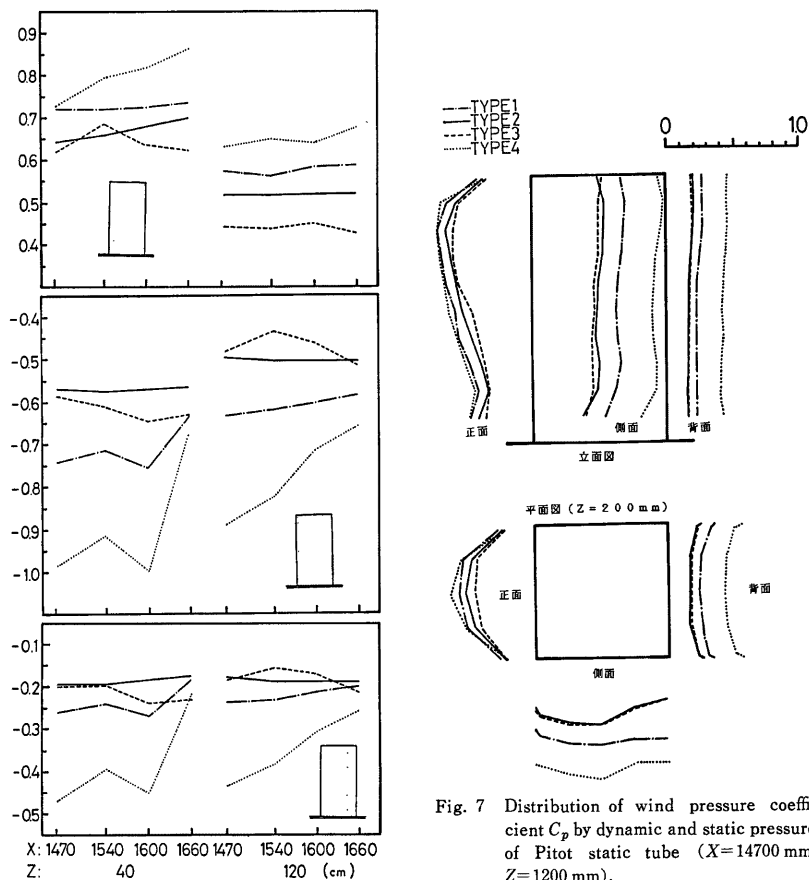


Fig. 7 Distribution of wind pressure coefficient C_p by dynamic and static pressure of Pitot static tube ($X=14700$ mm, $Z=1200$ mm).

方向の位置について明確な定義ができない現段階では、風圧係数 C_p がピトー管の X 軸方向の位置によらず一定にする必要がある。Fig. 6 の各面についてこの条件を満たしているのは、タイプ 2 の流れでかつピトー管を境界層の外 ($Z=1200$ mm) に置いた場合であった。

3.3 模型まわりの flow pattern

3.2 節で(1)式の定義による風圧係数 C_p の値は、流れのタイプによっても大きな差が生じており、この原因としては、(1)模型まわりの flow pattern が異なるため、(2)基準となる速度圧と静圧の値のとり方が悪いため、の 2 点が考えられる。そこで、まずこの模型まわりの flow pattern について考える。

今回の実験では、Fig. 2 より天井の形状を変えて静圧勾配をつけ、profile はタイプ 4 の流れを除きほとんど一致している。またタイプ 4 の流れも含めて 4 種類の profile を指数法則にあてはめると、ベキ指数 $\alpha \approx 0.3$ 程度ではほぼ同じ形をしている。乱れの強さの分布もほぼ同様の分布となっている。つまり、今回の結果では接近流の性質は静圧勾配によってそれほど変化していないことが予想される。

また、今回の実験で用いた模型のようにアスペクト比(高さ/幅)が 2 と小さい角柱では、接近流の影響を受けにくく、その角柱固有の flow pattern が形成されやすい²⁾。Fig. 7 はピトー管 ($X=14700$ mm, $Z=1200$ mm) の速度圧と静圧を基準とした風圧係数 C_p の分布である。流れのタイプによって風圧係数 C_p の値には大きな差が生じている。とくに、側面や背面ではその傾向が著しい。しかし、それぞれの流れのタイプでの風圧係数 C_p の分布の様子は、正面、側面、背面ともかなりよく似ている。それぞれの分布はその形状を変えずにそのまま平行移動した関係にあり、flow pattern がほぼ同じであることが推定できる。

以上のように、この模型まわりの flow pattern は 4 種類の流れに対しほぼ同じであることが予想される。従って、3.1 節の風圧係数 C_p が定まらないのは、基準となるべき速度圧と静圧のとり方が悪いためであると考えられる。

3.4 新しい風圧係数 $\tilde{C}_p$ の提案

3.3 節より模型のまわりの flow pattern はほぼ同じであることが推定できたので、“適当な”速度圧と静圧を基準にとれば風圧係数 C_p の分布がほぼ一致すると考えられる。“適当な”速度圧と静圧を求めるとは、実用性を考えあわせると実験の条件(例えば風洞、気流、模型等)によらず、常に定まった位置で基準となる速度圧と静圧を測定することである。

速度圧と静圧の測定位置を決める積極的な理由はないが、flow pattern がほぼ一致することが予想される流れではその結果として風圧係数が一致するはずであるので、ここでは、いろいろな位置で測定した速度圧と静圧から求めた風圧係数を比較することによって、基準となる速度圧と静圧を推定する。

尚、速度圧と静圧を測定する位置は同じ位置のほうが便利であるが、必ずしも同一地点で測定する必要はないので、ここでは速度圧と静圧を測定する位置について別々に吟味する。

3.4.1 速度圧の測定位置

式(1)の形からもわかるように、速度圧は任意の値でも風圧係数 C_p の符号は変わらず、風圧係数 C_p は各測定点に加わる風圧力の速度圧に対する割合を表わすことになる。従って、模型に加わる圧を代表する速度圧、言いかえると、実験の条件によらず、模型に加わる風圧力に比例する速度圧を求めることが必要である。

3.1 節で述べたように、ピトー管で測定した速度圧はタイプ 2 の流れを除き X 軸方向に変化している。また、この変化は 4 種類の流れに対し、それぞれ別々であり一定の傾向をもったものではない。そこで、速度圧の測定位置として、(1)模型の上流 ($X=14700$ mm, $Z=1200$ mm)、(2)模型の上方 ($X=16600$ mm, $Z=1200$ mm)、(3)模型の正面に加わる圧の中で最大値をとる位置、の 3 点についてそれぞれ風圧係数 C_p を計算し、Fig. 7～9 に示した。このときの静圧の測定位置は、Fig. 7 では $X=14700$ mm, $Z=1200$ mm, Fig. 8, Fig. 9 では $X=16600$ mm, $Z=1200$ mm である。

この中で風圧係数 C_p の分布が正面、側面、背面とも最もよく一致したのは、Fig. 9 の模型の正面に加わる最大圧力を基準とした風圧係数 C_p の分布である。とくに、タイプ 1 とタイプ 2 の流れでは、各面ともほ

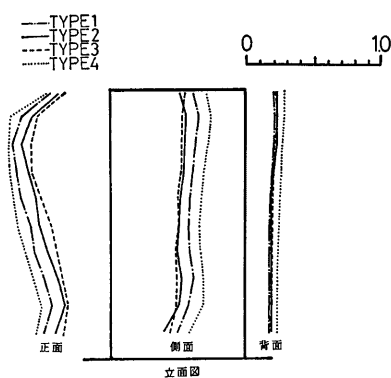


Fig. 8 Distribution of wind pressure coefficient C_p by dynamic and static pressure of Pitot tube ($X=16600$ mm, $Z=1200$ mm).

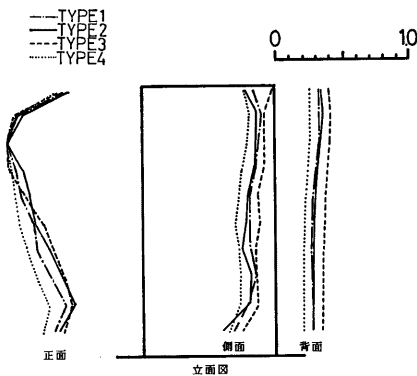


Fig. 9 Distribution of wind pressure coefficient C_p by maximum pressure in the front.

は一致している。これに対し Fig. 7 のように模型上流の速度圧と静圧を用いると、側面や背面の負圧になる面でかなり差が生じている。また、Fig. 8 の模型上方の速度圧と静圧を用いた場合、側面や背面の分布はほぼ一致しているが、正面の分布に差が生じている。とくに、タイプ1とタイプ2の分布を比較すると約0.1程度の差がある。

従って、速度圧は模型に加わる最大圧力を基準とするのがよいようであるが、このような形状の模型では正面の淀み点の圧に相当すると思われる。

3.4.2 静圧の測定位置

流れに静圧勾配がある場合、静圧を測定するピトー管を模型の上流に離して設置すると、模型に加わる静圧とピトー管で測定した静圧が異なることになる。このため風圧係数 C_p を求めるとピトー管の位置によって、いろいろな値になる。Fig. 6 で側面や背面の負圧になる面では、ピトー管が模型から離れていると4種類の流れでの風圧係数 C_p の間にかなり大きな差が生じているが、ピトー管と模型との距離が小さくなるにつれてこれが収束し、タイプ2の流れの風圧係数 C_p の値に近づく傾向がある。つまり、静圧を測定する位置は、模型から離すのではなく、模型に近い位置でかつ模型の影響の小さい位置がよいようである。従って、ここでは、模型の上方で境界層の外 ($X=16600$ mm, $Z=1200$ mm) の位置での静圧をとることとする。

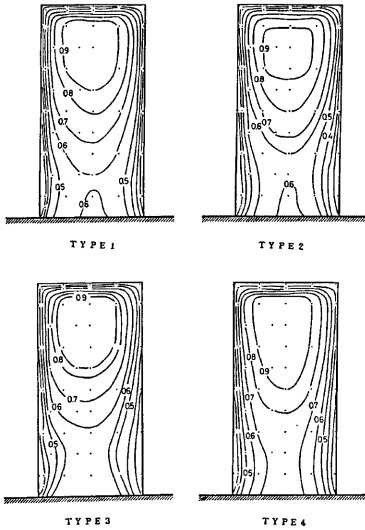


Fig. 10 Distribution of wind pressure coefficient C_p by maximum pressure in the front (front surface).

以上の結果より新しい風圧係数 $\tilde{C}_p$ を下式で定義する。

$$\tilde{C}_p = \frac{P - P_0'}{P_{\max} - P_0'} \quad (2)$$

ここに、 P は模型の各測定点での風圧力

P_0' は模型の上方 ($X=16600$ mm,

$Z=1200$ mm) での静圧

$P_{\max}$ は模型の正面に加わる最大圧力

Fig. 9 に風圧係数 $\tilde{C}_p$ の分布を示す。また、Fig. 10～12 にこの風圧係数 $\tilde{C}_p$ の分布図を示す。

3.5 新しい風圧係数 $\tilde{C}_p$ の実用化

この風圧係数 $\tilde{C}_p$ を用いて実際の耐風設計に用いる方法について考える。従来の風圧係数 C_p と同様風圧係数 $\tilde{C}_p$ の場合も、実験で用いた接近流の profile と速度圧の値から実際の構造物に加わる風圧力を推定することができる。

従来の風圧係数 C_p では、例えば模型の頂部の高さ H での速度圧を基準とする場合、接近流の profile から求めた高さ H での速度圧 q_H と 10 m の高さの速度圧 q_{10} 、及び、気象官署発表のその建設予定地での高さ 10 m での風速 $\bar{V}_{10}$ から求めた速度圧 $\bar{q}_{10}$

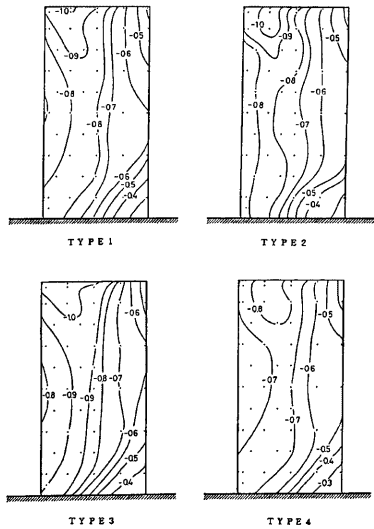


Fig. 11 Distribution of wind pressure coefficient C_p by maximum pressure in the front (side surface).

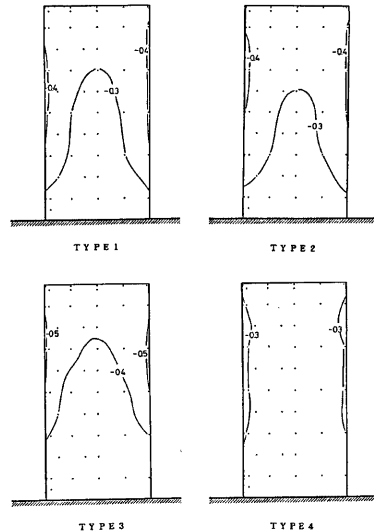


Fig. 12 Distribution of wind pressure coefficient C_p by maximum pressure in the front (back surface).

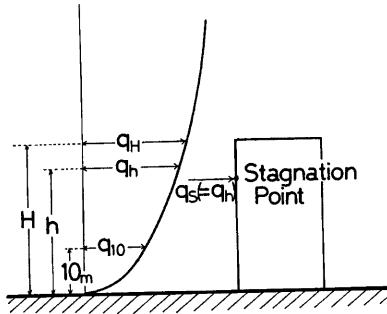


Fig. 13 Approaching dynamic pressure.

より、実際の基準とする速度圧 q_H' が下式より求まる (Fig. 13)。

$$q_H' = \left(\frac{q_H}{q_{10}} \right) \bar{q}_{10}, \quad \bar{q}_{10} = \frac{1}{2} \rho \bar{V}_{10}^2 \dots\dots (3)$$

ここに、 ρ は空気密度

この q_H' に風圧係数 C_p をかけて構造物に加わる風圧力を求める。

これと同様に、新しい風圧係数 $\tilde{C}_p$ の場合、接近流の profile の中に模型の淀み点に加わる速度圧 q_s に等しい速度圧 q_h が存在する。この速度圧 q_h と高さ 10 m での速度圧 q_{10} 及び $\bar{q}_{10}$ より下式で q_h' が求まる。

$$q_h' = \left(\frac{q_h}{q_{10}} \right) \bar{q}_{10}, \quad \bar{q}_{10} = \frac{1}{2} \rho \bar{V}_{10}^2 \dots\dots (4)$$

この q_h' に風圧係数 $\tilde{C}_p$ をかけて構造物に加わる風圧力を求めることができる。

4. ま と め

本研究では、静圧勾配のある乱流境界層中の角柱模型に加わる風圧力を評価する風圧係数について実験を行った。その結果、速度圧として淀み点に加わる圧、静圧として模型上方で境界層の外の静圧を採用すれば、流れに静圧勾配があっても、4 種類の流れに対しほぼ同じ風圧係数の分布が得られた。従って、静圧勾配があっても模型まわりの flow pattern がほぼ等しいと考えられる流れでは、基準となる速度圧と静圧の評価を間違えなければ、風圧係数の分布はほぼ一致することがわかった。

最後に、実験及び実験データの整理、図面の作製等、精力的に協力してくれた加古貴一郎君（建設省）に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 谷 一郎: 流れ学, 岩波全書, 1967, pp. 190.
- 2) 石崎源雄・桂 順治・谷池義人・奥田泰雄: 乱流境界層中の角柱に加わる風圧力について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1985, pp. 719.