

## エッフェル型風洞の特性改善法に関する実験的考察

(昭和53年10月31日 原稿受付)

開発土木工学教室	加	藤	九州	男
開発土木工学教室(大学院)	重	広	正	治
開発土木工学教室(大学院)	浦	川	健	志
開発土木工学教室	久	保	喜	延

## Experimental Procedures to improve the Characteristics of Open Circuit Wind Tunnel

by Kusuo KATO  
Masaharu SHIGEHIRO  
Takeshi URAKAWA  
Yoshinobu KUBO

## Summary

The wind tunnel, which is used to investigate the aerodynamic characteristics of the flexible structures with non-aeronautical form, requires the larger size of test section than that of 1.5 m × 1.0 m because the measured aerodynamic forces are very small in comparison with the inertia force of the experimental model, and that the complexity of its form is forced not to use the model with larger ratio of the reduced scale.

The open circuit wind tunnel which has the larger test section requires the longer diffuser, but in the case of that the place where the wind tunnel is constructed is not sufficiently wide for the wind tunnel with large test section, the length of its diffuser is forced to be short. Adding this, the geometrical form about its air-inlet sometimes is not symmetry against to the axis of wind tunnel. Under these conditions, the intensity of turbulence and the distribution of wind velocity are not too enough to investigate the aerodynamic characteristics of the flexible structures because their responses sensitively change with the fluctuation of acting wind.

The aim of this paper is to report the effective procedures to improve the ununiformity of the distribution of wind velocity and to make small the large intensity of turbulence by arranging the damping grids in the diffuser of open circuit wind tunnel, which is the same as the turbulent grids used in the experiment of turbulence.

## 1. まえがき

構造物の耐風特性を調べるための風洞は、実験用模型が複雑であるために模型の縮尺率を大きくすることができないことや、測定空気が慣性力に比べるとかなり小さいことなどのために、測定断面を比較的大きなものにする必要がある。測定断面を大きくすると、拡散胴も相対的に長いものが必要となる。しかしながら、風洞を設置する場所に制約がある場合には、所定の長さを得るこ

とが出来ない上に、気流吸い込み口の周辺を対称にすることが困難な場合が生ずる。その結果、風洞内の風速分布および気流の乱れ強さが著しく悪くなり、このような風洞では風速変動に対して敏感に応答する構造物断面の耐風特性を正確に把握することが困難となる。

本報告は、九州工業大学開発土木工学科に1977年11月に設置されたエッフェル型風洞において行なわれた風洞特性の改善法について述べるものである。この風洞は、設置された場所が狭く、十分な長さの拡散胴を設けるこ

とができない上に、吸い込み口周辺の対称性を確保することが困難なために、初期の設計断面では、測定断面における風速分布および乱れ強さが著しく悪く、これらを改善する必要が生じた。そこで、その原因および対策法を検討し、種々の方法により改善を試みた。この風洞と同様の厳しい条件下で設置される風洞における特性改善の一助とすることを目的として、以下にその改善経過を述べる。

## 2. 風洞の諸元

この風洞は、図1（破線は設計当初の断面、実線は改善後の断面を示す）に示すような吹き出し式エッフェル型風洞であり、その配置図を図2に示す。特に吹き出し式を採用した理由は、将来計画として、乱流境界層の実験を行なう際に、測定部を長くする必要があり、そのとき増設が簡単に行なわれることを意図したことによる。風洞の製作においては、送風機（軸流送風機）および縮流胴を鋼板製、測定部をアクリル製とし、他は全て木製とした。このことにより、比較的廉価で製作された。また、測定部には構造物の空力弾性実験を行なうための自由振動実験装置が取り付けられている。以下に各部の簡単な説明を行なう。

① 送風機・駆動モーター（図1の①）：送風機は翼車内径1500mmをもつ単段16枚羽の軸流送風機で、風量 $1500\text{ m}^3/\text{min}$ 、静風圧 $40\text{ mmAq}$ の性能をもち、 $200\text{ V}$ 、 $30\text{ kW}$ 、3相誘導モーターによりVベルトを介して駆動される。その回転数はSCR（シリコン制御整流素子）方式によってコントロールされ、送風機の回転数は80

～ $800\text{ r.p.m.}$ の間で連続可変となっている。測定部における風速は、 $1\sim 17\text{ m/s}$ の範囲で連続的に変化させることができるように設計されている。なお、この送風機の吸い込み口周辺は、図2の配置に示されているように風洞中心線に対して幾何学的な対称性を確保していない。このことが、後に述べる風速分布および乱れ強さに大きな影響を与えているのである。

② 拡散胴（図1の②）：拡散胴は長さ $3.00\text{ m}$ で、設計当初の断面は送風機部の直径 $1.50\text{ m}$ の円形断面から1辺 $3.00\text{ m}$ の正方形断面に拡大している。この場合の面積増加は $2.4\text{ m}^2/\text{m}$ である。円形断面から正方形断面へ急拡大しているため、円形断面と正方形断面との連結部付近の四隅において大きな渦を発生した。その渦を消すため、図1に示されているように、円形部を漸拡し、正方形断面の隅角部に曲率を設けると同時に、拡散胴の下端を $2.70\text{ m}\times 2.70\text{ m}$ の正方形断面に縮小して、整流胴に連結した。その結果、拡散胴の面積増加は $1.84\text{ m}^2/\text{m}$ となった。また、後に述べる碎渦格子（乱流格子に類似のもの）およびスクリーン（14 mesh）を図のように配置している。

③ 整流胴（図1の③）：前述の通り・整流胴は $3.00\text{ m}\times 3.00\text{ m}$ の正方形断面を $2.70\text{ m}\times 2.70\text{ m}$ に縮小している。この中に設けられる整流格子は、単位の格子サイズを $5\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ の長方形とし、奥行 $10\text{ cm}$ をもつものを二段に配置し、前段を縦形、後段を横形とし、前後両段で $5\text{ cm}\times 5\text{ cm}$ の整流格子に代わるものとした。なお使用材料は $0.5\text{ mm}$ 厚の鉄板である。

④ 縮流胴（図1の④）：縮流胴は、二段の絞りになっ

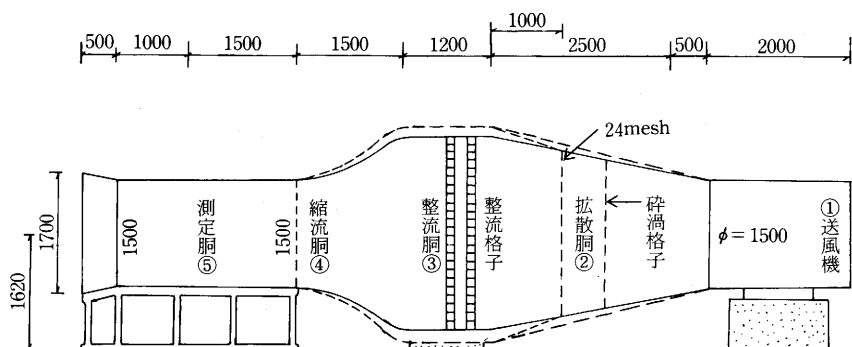


図1 風洞側面図

（破線は設計当初の断面、実線は改善後の断面を示す）

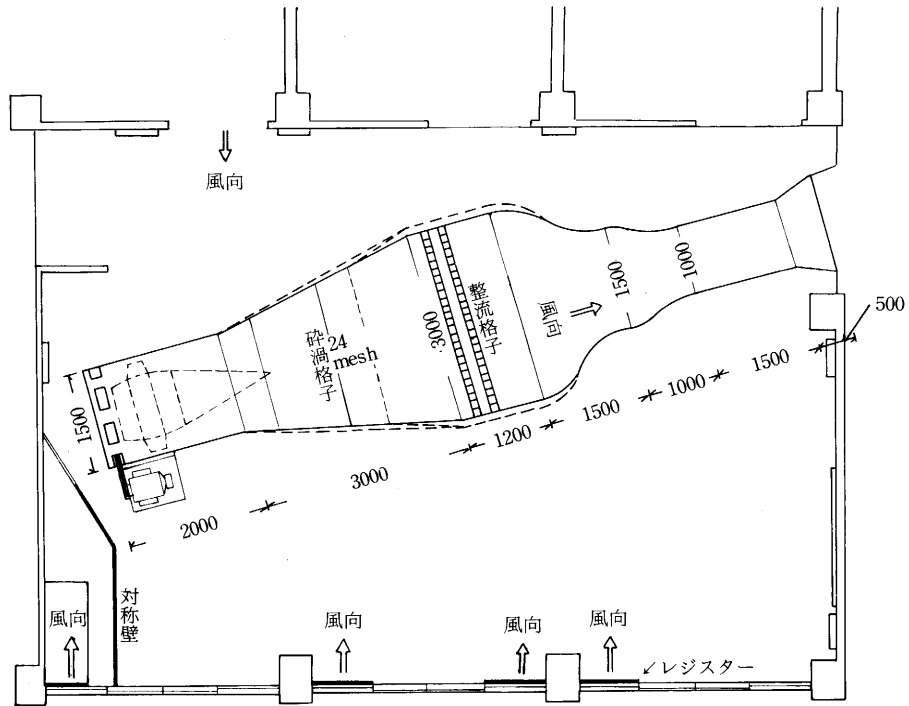


図2. 風洞配置図

ている。これは、二段目の縮流胴を縦形に使う場合は構造物の耐風実験に、横形に使う場合は地形模型等の実験にと多目的な用途を意図しているためである。一段目の長さは1.50 m×1.50 mの正方形に縮流している。その縮流比は3.24である。二段目の長さは1.0 mで、その断面を1.50 m×1.50 mの正方形から1.50 m×1.07 mの長方形に縮流し、その縮流比は1.4である。なお、一段と二段との連結部には整流胴を通過した渦をさらに小さく砕くために24 meshのスクリーンを入れている。

㉔ 測定胴(図1の⑤)：断面は高さ1.50 m×幅1.07 mの長方形で、実験模型の様子が外部から観察できるように、アクリルで作られており、この部分には自由振動実験用装置が取り付けられている。以下に述べる風速分布および乱れ強さは、全てこの部分で測定されたものである。

### 3. 風洞特性の改善

設計案による風洞(図1, 図2の破線の形状および格子を除いたもの)の完成後、測定胴において風速分布の

測定を行なった。その結果のうち、断面中央の水平方向の分布を示したものが図3-(a)である。これによると、断面中央部の流速が著しく低く、平均風速に対して7.4%も低い。また、右側面付近は逆に7%程度高くなっている。この結果は傾斜型マンオメーターによる風速測定であるため、乱れについての情報は得られていないが、このときの風速測定によると風速は、2～3 Hz程度の周期で、平均風速に対して±3.7%程度の大きさで変動していた。このような現象の発生は、構造物の耐風実験用風洞としては最も好ましくないものであり、何らかの対策によって、現象を抑制しなければならない。その発生原因を考えると、次の2つに大別されるであろう。

㉕ 気流吸い込みにおける影響(気流の流入量が充分であるか、気流吸い込み時における気流の流れはスムーズであるかなど)

㉖ 風洞の形状による影響(風洞内気流の動きに無理がないか、渦の発生はないかなど)

この2点に着目して、種々の改善を試みた。以下にその経過を改善段階毎に述べる。

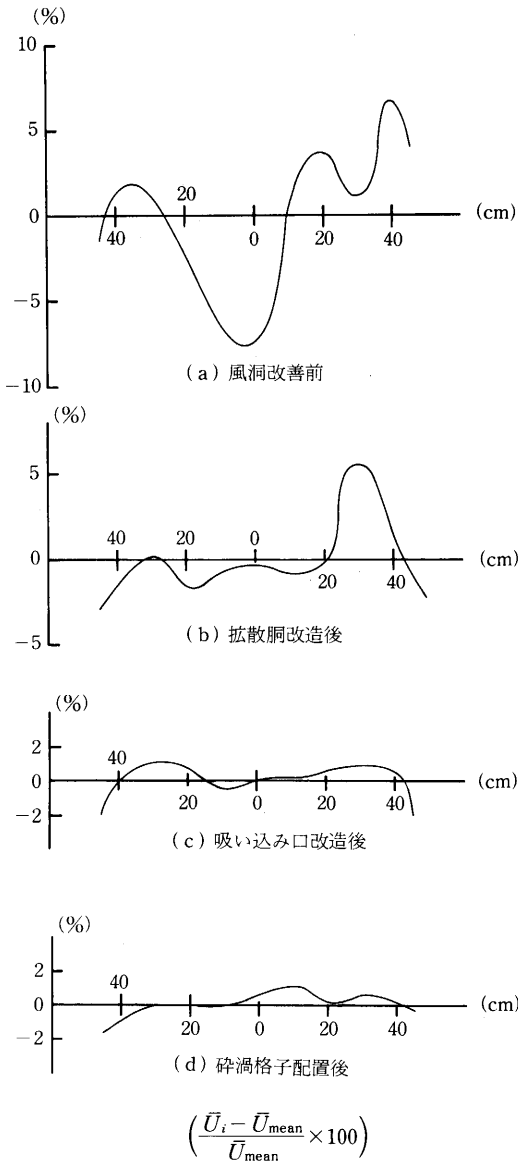


図3. 断面中央のマノメーターによる水平方向の風速分布

① 空気の流入量増加のための対策

まず設計当初の配置(図2)では流入口が壁面に近すぎるため、気流がスムーズに送風機に送り込まれておらず、送風機に負担がかかり過ぎ、回転数が一定でないため、送風機の流入口側面に穴を設け、流入量を増やすことにした。その結果、送風機の負担は減少し、回転数も一定になったが、分布の改善にはほとんど影響はなかった。

② 拡散胴の改善

次に設計当初から最も大きな懸念であった、拡散胴の長さが問題であると考えた。拡散胴の長さはこの風洞では8~10m程度必要であるのに対し、場所の関係から3m程度を得るのが限度であった。そこで、拡散胴内の流れの模様を知るために、送風機と拡散胴との連結部から50cm下流の位置に木綿糸で10cm間隔の格子を張り、各格子点に20cm程度の木綿糸を取り付けることにより、この断面における流速分布を観察した。(タフトグリッド法)<sup>1)</sup>その結果、拡散胴の四隅で大きな渦が発生していることがわかった。その原因は送風機の円形部から、拡散胴の正方形部への断面変化が急激であることによると考え、その渦を消すために円形断面から正方形断面への変化をさらに緩慢にし、拡散胴の隅角部に曲率を設けると同時に漸拡するための改造を行なった。(図1,図2)改造後に実施した断面中央における水平方向の風速分布が図3-(b)である。中央部の風速分布はかなり改善がなされたが、右側面近くにおける分布は平均風速に対して5.5%も高い。

③ 気流吸い込みに関する改善

この風洞は外気を吸い込み、外に吐き出すため、直接

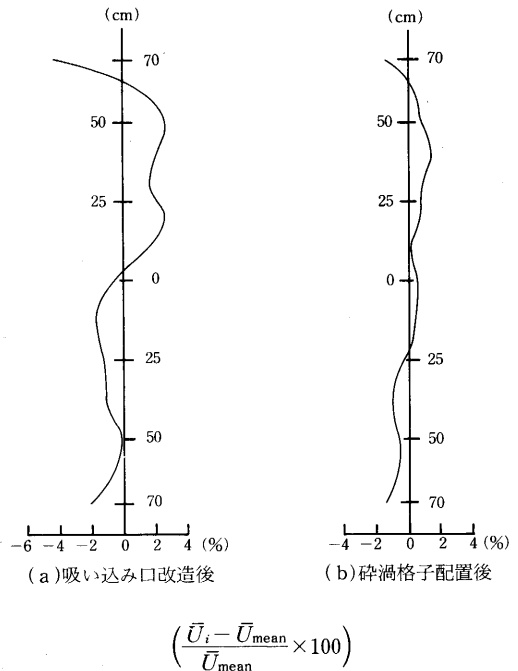
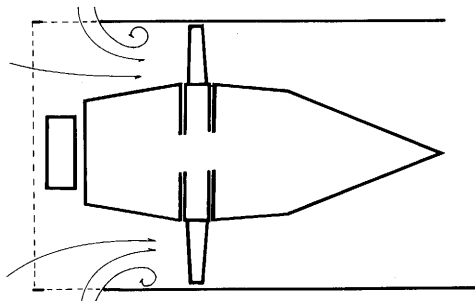


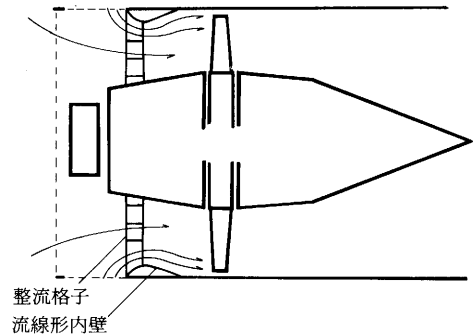
図4. 断面中央のマノメーターによる垂直方向の風速分布

外気の影響を受ける。そこで、まず、外気の影響をできるだけ抑制するように外気の流入する各窓に流入速度を一旦減速させるためのレジスター（抵抗柵）を取り付けた。次に吸い込み口周辺の形状を対称にするために図2に示すような対称壁を設けた。それによっても、風速分布の測定結果では下半分が極端に遅く、吸い込み口下部に空気を補給する必要が生じた。そこで、この対称壁の下部を切断し、対称壁内側の窓から吸い込み口下部に空気を補給した。また、図5-(a)のように送風機の吸い込み口に設けた各穴の部分で渦が発生し、それらが互いに干渉しあうことが木綿糸（タフト法）によって確認された



(a) 原断面における吸い込み口の流れの様子

ため、各穴から流入する気流を分離するためと渦の発生を防ぐために図5-(b)のように、各吸い込み口に整流格子を取り付けると同時に、吸い込み口内側に流線形の内壁を設けた。これらの改造により、水平方向の風速分布は非常に良くなり、平均風速に対して $\pm 2\%$ 以内にはなった。それが図3-(c)である。しかしながら、図4-(a)に示すように垂直分布は改善されていない。マンメーターで測定しているため、流速変動については正確な値ではないが、このときの流速変動は $3\sim 4\text{ Hz}$ 程度の周期で、平均風速に対して、 $\pm 1.1\%$ 程度のものであった。



(b) 流線形内壁と整流格子配置による流れの様子

図5. 吸い込み口の改造

#### ④ 整流胴および縮流胴の改善

上記の改造によっても、風速分布は満足すべきものではなかったため、さらに風洞内の形状に欠陥があると考え、整流胴内の気流の動きを木綿糸によって調べた結果、特に整流胴の壁面近くでは流速が遅い上に、不規則ではあるが、大きなスケールの弱い渦が発生していることが確認されたため、拡散胴と同様、図1および図2に示されている実線のように断面の縮小を行なった。その結果、壁面の流速は早くなり、渦の発生も木綿糸では確認されなかった。これにより流速変動は若干小さくなったが風速分布にはほとんど影響がなかった。

#### ⑤ 拡散胴における碎渦格子配置による改善

風洞の形状および外部の改造は、これ以上行なうことが困難となり、風洞内において風速分布および乱れ強さを強制的に抑制することを考えざる得なくなった。そこ

で、乱流を発生させる場合に使用される格子が有効であるとの情報を得たため、それを採用することにした。この場合の格子は送風機の回転翼から発生する渦の消去および格子配置による風速分布の修正を目的とする。この格子をここでは碎渦格子と呼ぶ。格子配置の手順は、発生する渦のスケールから格子幅および格子間隔を決め、格子を同一間隔に配置したのち、風速分布の測定結果から、流速の遅い部分に対応する格子を取り除く方法によった。本風洞では、格子を渦スケールが $20\sim 25\text{ cm}$ 程度であったこと（木綿糸による可視化から）と材料の関係から板厚 $1.5\text{ cm}$ 、格子幅を $5.0\text{ cm}$ とし、格子間隔を $15.0\text{ cm}$ と決め、図1に示すように拡散胴内にこの格子を設け、上述の方法で、十数回の風速分布の測定結果、図6のように配置を決めた。このときの風速分布を示したのが図3-(d)、図4-(b)である。断面中央に関する水平

分布, 垂直分布共に平均風速に対して±2%以内にあり, 本州四国連絡橋耐風設計指針案の風洞規準<sup>2)</sup>に定める「風速分布は平均風速に対して±2%以内とする」と言う規定に合致する程良いものになった。

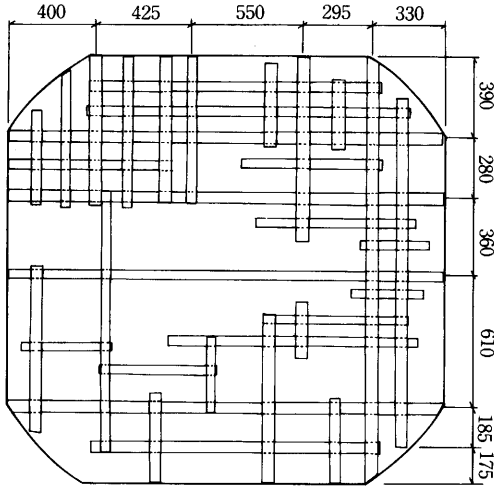


図6. 碎渦格子の配置

#### 4. 碎渦格子の効果

以上の検討は, 全て傾斜型マノメーターを用いて測定したため, 多少の変動が存在する場合には, 測定者の視差が入ることにより正確な情報とはなり得ない。そこで最終的な検討をするため, 測定にはDISAの熱線流速計を用い, 解析にはSORDのマイコンM-100を用いることにより精度の高い測定を行なうことにした。測定は最終的な断面において碎渦格子を取り付けた場合と, 除去した場合について実施し, これらの結果を比較することにより, 碎渦格子が風速分布および乱れ強さにどの程度の影響を与えるかを検討した。なお, 格子点*i*において熱線流速計で観測された流速を $U_i(t)$ , 測定時間を $T$ , 測定点を $n$ とすると, 各点の平均流速 $\bar{U}_i$ , 平均流速の平均 $\bar{U}_{\text{mean}}$ , 変動流速 $u_i$ および乱れ強さ $I_i$ , 乱れ強さの平均 $I_{\text{mean}}$ は次の式で定義される。

$$\bar{U}_i = \frac{1}{T} \int_0^T U_i(t) dt$$

$$u_i(t) = U_i(t) - \bar{U}_i$$

$$\bar{u}_i^2 = \frac{1}{T} \int_0^T u_i^2(t) dt$$

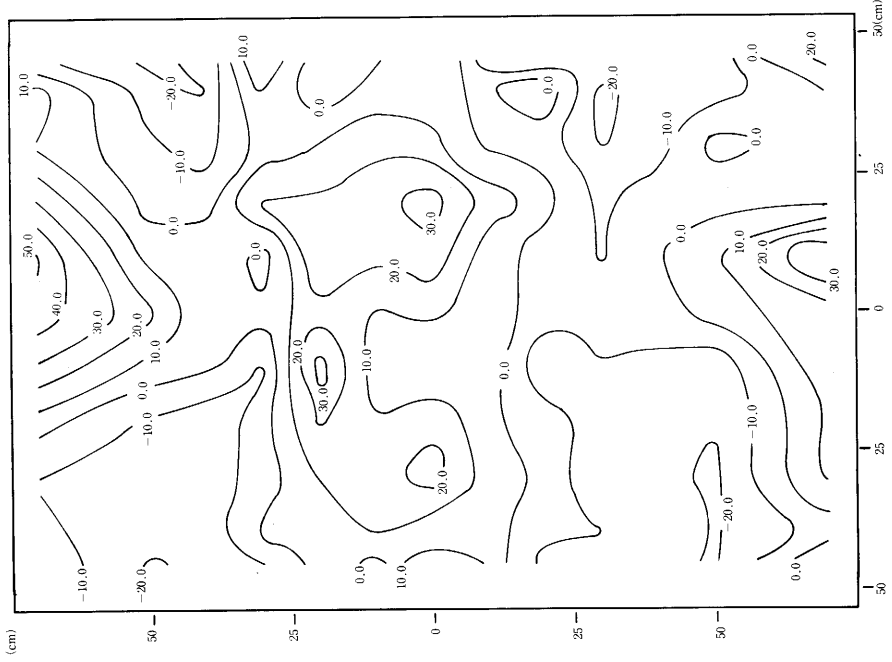
$$I_i = \frac{\sqrt{\bar{u}_i^2}}{\bar{U}_i} \times 100 \quad (\%)$$

$$\bar{U}_{\text{mean}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{U}_i$$

$$I_{\text{mean}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i$$

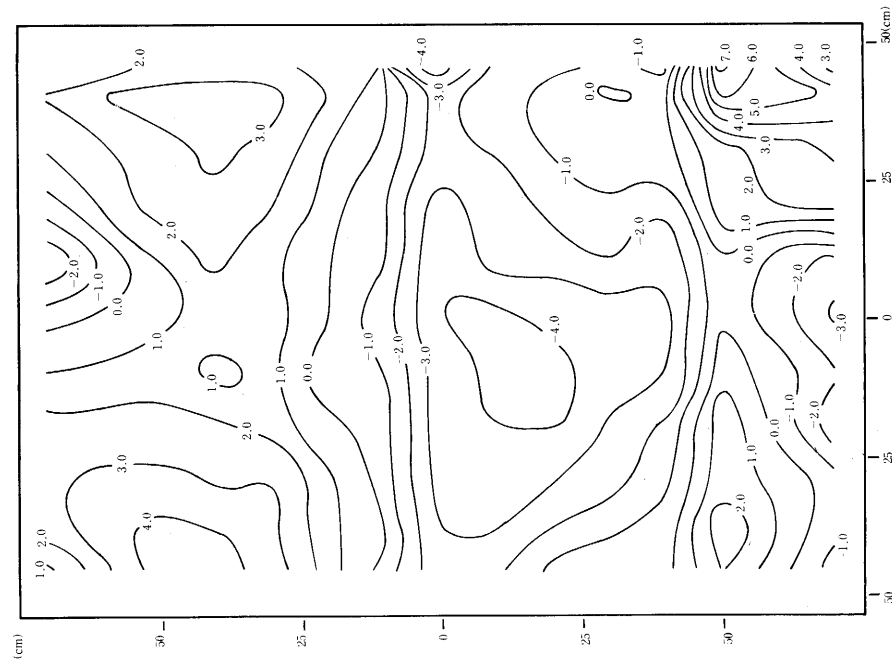
風速の分布(図7, 9)における表示は,  $(\bar{U}_i - \bar{U}_{\text{mean}}) / \bar{U}_{\text{mean}} \times 100 (\%)$ で, 乱れ強さの分布(図8, 10)におけるものは,  $(I_i - I_{\text{mean}}) / I_{\text{mean}} \times 100 (\%)$ で表示することにより, それぞれ平均値からの偏りで表現している。

測定は $U_{\text{mean}} = 8.2 \text{ m/s}$ の場合について行ない, 断面を水平方向に11分割, 垂直方向に13分割し, 全格子点143点で実施した。その結果が図7~10である。図7, 8は碎渦格子を取り付けない場合で平均風速に対する風速分布と $I_{\text{mean}} = 2.15\%$ に対する乱れ強さの分布を百分率で表示したものである。図9, 10は碎渦格子を取り付けた場合のもので, それぞれ $U_{\text{mean}} = 8.2 \text{ m/s}$ に対する風速分布と $I_{\text{mean}} = 1.79\%$ に対する乱れ強さの分布を同様の表示法で示したものである。風速分布についてみると, 碎渦格子を取り付けていない場合には, 右下, 左上の流速が平均風速に対して4~6%高く, 断面中央より10~20cm下では逆に4%程度低く, 全体的には断面中央を境にして, 上側は高く, 下側は低い流速分布をしている。これに対して, 碎渦格子を取り付けた場合には, 右上側面がわずかに高い流速を示しているだけで, 全体的には良好な結果を示している。次に乱れ強さの分布について考察する。碎渦格子を取り付けていない場合には, 平均乱れ強さは2.15%であり, 断面中央上側では平均乱れ強さに対して-20~+30%の広い範囲で分布しており, このときの乱れ強さは1.72~2.8%の範囲にある。一方, 碎渦格子を取り付けたものは平均乱れ強さ1.79%に対して, その分布は±8%内にあり, 乱れ強さにして1.64~1.93%の分布をしている。碎渦格子を取り付けた場合には, 風速分布, 乱れ強さ共にほぼ一樣な分布となっており, その効果の著しいことが知られる。この場合の風速変動をマノメーターから読むと, 平均風速に対して±0.6%程度であった。一方, 原断面でのマノメーターによる変動が±3.7%であったから, 原断面での乱れ強さをマノメーターの測定結果より類推すると, 4.7%程度はあったものと考えられる。以上の種々の方法により, 風洞特性は実験に支障のない程度まで改善することができた。



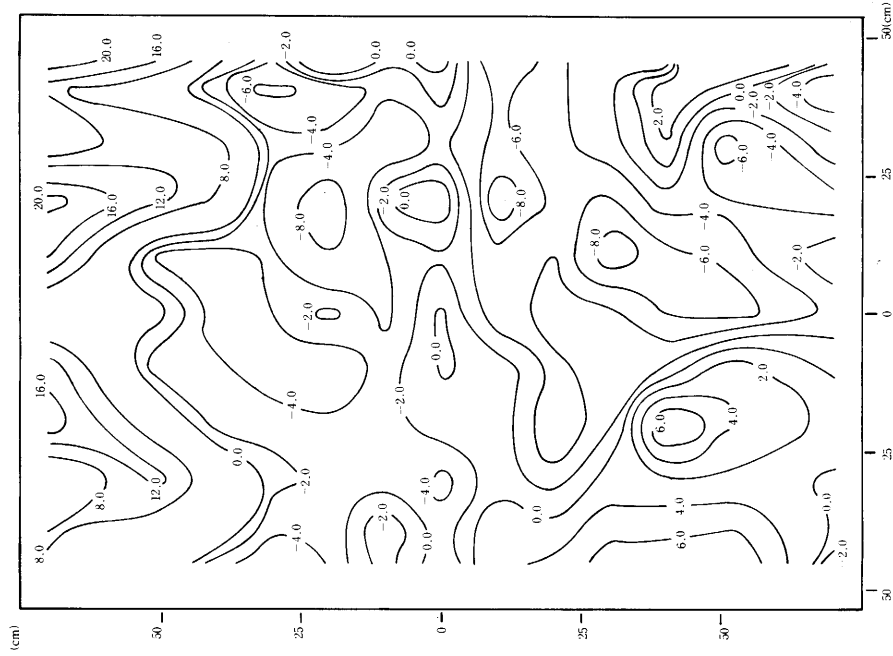
$$\left( \frac{\bar{U}_i - \bar{U}_{\text{mean}}}{\bar{U}_{\text{mean}}} \times 100, \bar{U}_{\text{mean}} = 8.2 \text{ m/sec} \right)$$

図7. 碎渦格子配置前の熱線流速計による風速分布



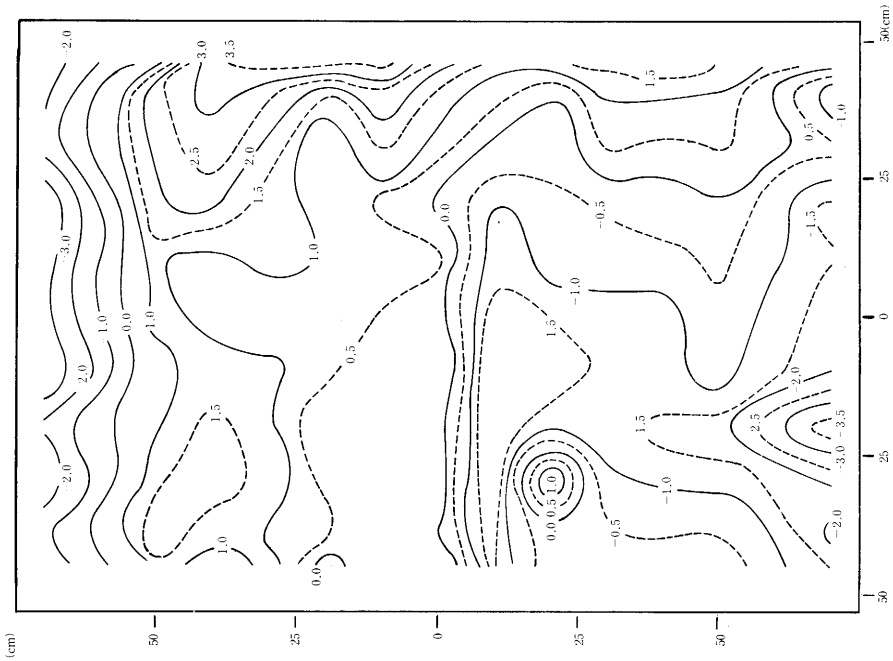
$$\left( \frac{T_i - T_{\text{mean}}}{T_{\text{mean}}} \times 100, T_{\text{mean}} = 2.15\%, \bar{U}_{\text{mean}} = 8.2 \text{ m/sec} \right)$$

図8. 碎渦格子配置前の熱線流速計による乱れ強さの分布



$$\left( \frac{\bar{U}_i - \bar{U}_{\text{mean}}}{\bar{U}_{\text{mean}}} \times 100, \bar{U}_{\text{mean}} = 8.2 \text{ m/sec} \right)$$

図9. 碎渦格子配置後の熱線流速計による風速分布



$$\left( \frac{I_i - I_{\text{mean}}}{I_{\text{mean}}} \times 100, I_{\text{mean}} = 1.7\%, \bar{U}_{\text{mean}} = 8.2 \text{ m/sec} \right)$$

図10. 碎渦格子配置後の熱線流速計による乱れ強さの分布



## 5. まとめ

設置場所に制約のあったエッフェル型風洞において生じた現象は、必ずしも本風洞特有のものではなく、場所に余裕のない風洞では多少の差こそあれ、生ずる問題であると考えられる。上述の如く、種々の方策を講じた結果、当初平均風速の分布において±7%程度もの広い範囲にあったものが、±2%程度になり、測定に必要な断面中央上下40cmの範囲では±1.5%以下まで低減した。これらの改善は簡単な流れの可視化(タフト法)と流速測定とを併用することで、比較的容易に行なわれる。特に碎渦格子は風速分布、乱れ強さの両方の改善に有効であった。以下にその要点をまとめ、この種の現象が生ずる風洞における特性改善の一助としたい。

- ① 気流の流入量を増加し、送風機の負担を軽減することで、送風機の回転数を一定に保つ。
- ② 吸い込み口周辺の対称性を確保することにより、吸い込み時における気流の振動を抑制する。
- ③ 気流の吸い込み部および拡散部での流れに無理がないか、を調べる。

この場合、特に渦が発生しているか否かを検討するわけであるが、流速計による測定では時間もかかり、大がかりになるため、簡単な方法で検証することが望ましい。その1つの方法として、木綿糸(タフト法)等による可

視化が有効である。これは手軽であると同時に現象を直接目で見るができるため、渦発生に関する情報を的確に把握することができる。

④ 碎渦格子による分布の修正、乱れ強さの低減は簡単で、かつ有効な手段である。特に拡散胴で十分な拡散、攪乱を行ない、渦のエネルギーを消去する場合には非常な威力を発揮するものであり、数段の格子を設けることにより、さらに性能を向上できるものと考えている。

本風洞の場合も図6に示す格子配置に対して、隣接させて二段目の格子を適当に配置している。

## 謝 辞

本風洞の建設にあたっては、開発土木工学科山本宏助教授および出光隆助教授から多大の援助を受け、また、風速分布改善にあたっては、建設省土木研究所の成田信之博士および九州大学応用力学研究所の溝田武人、友成義正両助手から有益な助言を得た。ここに記して、上記の方々へ深甚の謝意を表す。

## 参 考 文 献

- 1) 浅沼強編：流れの可視化ハンドブック，丸善，1977.
- 2) 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，土木学会，1975.