

## 架設系橋梁主塔の空力振動に及ぼす乱流効果に関する考察

## TURBULENCE EFFECT ON THE WIND-INDUCED VIBRATION OF FREE-STANDING BRIDGE TOWERS

武田勝昭\* 村上琢哉\*\*

By Katsuaki TAKEDA and Takuya MURAKAMI

Systematic wind tunnel tests were conducted in grid-generated or boundary layer turbulent flows as well as in a uniform flow to investigate the turbulence effect on the aerodynamic behaviour of bridge towers during construction. As the result, it was found that turbulence does not necessarily reduce the amplitude, but often amplifies the vibration. Thus, it seems that wind tunnel tests on bridge towers are to be conducted on the basis of turbulent flows rather than a uniform flow. It was also found that, in the wind tunnel test in turbulent flows, more emphasis should be placed on the simulation of turbulence intensity rather than vertical mean wind speed profile when it is difficult to simulate these parameters at the same time.

Key Words: bridge tower, wind-induced vibration, turbulence effect

## 1 まえがき

従来より、橋桁に生じる空力振動については数多くのデータが蓄積されており、特に、比較的低風速で頻繁に生じる渦励振については、バネ支持模型実験をベースにしたときの3次元性の補正方法、ならびに乱流効果に関する補正係数などが提案されるに至っている<sup>1)</sup>。一方、吊橋や斜張橋の主塔の耐風性検証は通常3次元弾性模型により行われるので振動モードなどの3次元性の補正を行う必要はないものの、大気境界層乱流の特性を考慮に入れて耐風性の評価を行う必要性が高いにも拘らず、乱流中の対風挙動に関するデータの蓄積が必ずしも充分でなく、乱流効果についても橋桁のように基準に明記されるに至っていない。また、その乱流中の風洞実験では乱れ強さなど、橋桁の場合に相似すべき乱流パラメータに加えて平均風速の高さ方向分布も同時に相似させる必要があり<sup>1)、2)</sup>、乱流生成・調整時に困難に遭遇するケースが少なくない。このような各々のパラメータが渦励振やギャロッピングにどの程度の影響を及ぼすのかということを明らかにすることが風洞実験の精度を向上させる上で重要であるにも拘らず、風洞実験においては乱流のパラメータを独立に制御することが容易でないため、研究例もないまま今日に至っているのが現状である。このため、本研究では以下のことを目的として実験的な考察を加えた。

(1) 代表的な塔の構造形式として一本柱形式、二本柱(ラーメン)形式を選定し、特に問題を多く生じる架

\* 工修 NKK基盤技術研究所 耐風構造研究室 室長 (〒210 川崎市川崎区南渡田町1番1号)

\*\* 工修 NKK基盤技術研究所 耐風構造研究室 (〒210 川崎市川崎区南渡田町1番1号)

設系free standing時の主塔を対象として、格子乱流および境界層乱流中で系統的な風洞実験を行うことにより乱流効果の一般的傾向を明らかにする。このとき、塔断面の高さ方向のテーパの有無や、代表的な制振対策である隅切りの有無によって乱流効果が如何に変化するかということについても考察を加える。

- (2)乱流パラメータの異なる4種類の乱流を生成してこれらに対する模型の応答の変化を詳細に調査することにより、各々のパラメータ、特に平均風速の高さ方向分布の影響度を抽出・評価する。

## 2 架設系主塔の空力振動に及ぼす気流の乱れ効果

### 2. 1 風洞実験の方法

代表的な塔の構造形式として一本柱形式、二本柱（ラーメン）形式を選定し、高さ方向のテーパの有無、制振対策としての隅切りの有無、ならびに二本柱の間隔をパラメータとして、表-1、図-1に示すような10種類のModelを供試模型とした。これらは弾性模型として設計されているので種々のモードの振動現象が生じるが、本研究においてはこれらのうち最も問題が大きいと考えられる架設系の（橋軸直角方向の風によって誘起される）橋軸方向曲げ1次振動に絞って詳細な検討を加えた。塔柱の断面形状は正方形とし、テーパは3.8%としている。また、隅切りは最適値と言われている<sup>3)</sup>2D/18に近い寸法のものとしたが、設置箇所については上流側の隅切りのみが塔の空力特性に支配的な影響を及ぼすものと考え、下流側の隅切りの設置を省略している。

表-1に示すように、一本柱模型の場合にはテーパや隅切りの有無によって実験条件はほとんど変化していないので実験データは無補正とした。一方、二本柱模型ではModelによって実験条件にバラツキが見られたため、渦励振の応答振幅に対してはスクルートン数  $[m\delta_0/(\rho D^2)]$  による補正が可能と考え、実験結果を  $m\delta_0/(\rho D^2)=9$  のときの値に補正して示した。なお、実験のレイノルズ数範囲は、 $Re(UD/\nu)=6,000\sim12,000$ 、風洞閉塞率は（幅4mの風洞を使用したため極めて小さく）約0.3%である。

表-1 実験ケースと実験条件

| 気 流（図-2.1, 2.2<br>表-2） |                     |                  |            |                                                                |            |                                            |          |            |              |   |   |
|------------------------|---------------------|------------------|------------|----------------------------------------------------------------|------------|--------------------------------------------|----------|------------|--------------|---|---|
| Model                  | テー<br>パ<br>の<br>有 無 | 隅 切<br>りの<br>有 無 | $r/D^{1)}$ | $m^{2)}$<br>( $\text{kgf} \cdot \text{s}^2$<br>$/\text{m}^2$ ) | $\delta_0$ | $\frac{m\delta_0}{\rho D^2}$ <sup>1)</sup> |          |            |              |   |   |
|                        |                     |                  |            |                                                                |            |                                            | 一 様<br>流 | 格 子<br>乱 流 | 境 界 層<br>乱 流 |   |   |
| 一<br>本<br>柱            | T1                  | ×                | ×          |                                                                | 0.1157     | 0.0029                                     | 2.98     | ○          | ○            | ○ |   |
|                        | T1t                 | ○                | ×          |                                                                | 0.1173     | 0.0033                                     | 3.68     |            | ×            |   |   |
|                        | T1c                 | ×                | ○          |                                                                | 0.1175     | 0.0035                                     | 3.91     |            |              |   |   |
|                        | T1tc                | ○                | ○          |                                                                | 0.1178     | 0.0034                                     | 3.80     |            |              |   |   |
| 二<br>本<br>柱            | T2-5                | ×                | ×          | 5                                                              | 0.2317     | 0.0044                                     | 9.68     |            | ○            |   | ○ |
|                        | T2-6                | ×                | ×          | 6                                                              | 0.2336     | 0.0046                                     | 10.20    |            |              |   | × |
|                        | T2t-6               | ○                | ×          |                                                                | 0.2340     | 0.0044                                     | 9.78     |            |              |   |   |
|                        | T2c-6               | ×                | ○          |                                                                | 0.2338     | 0.0054                                     | 11.99    |            |              |   |   |
|                        | T2tc-6              | ○                | ○          |                                                                | 0.2330     | 0.0052                                     | 11.51    |            |              |   |   |
|                        | T2-7                | ×                | ×          | 7                                                              | 0.2345     | 0.0035                                     | 7.79     |            |              |   | ○ |

1)テーパ付き模型のときにはDをD<sub>1</sub>とする。 2)塔模型の等価質量

これら10種類のModelの振動現象に対する気流の乱れ効果は、一様流中の応答振幅を境界層乱流中、あるいは格子乱流中のデータと比較することにより評価した。境界層乱流、格子乱流の生成法や特性については図-2.1、2.2、表-2、図-3に示すが、これらの詳細な説明は「3 気流パラメータの影響度」で行う。

## 2. 2 実験結果と考察

一本柱模型のうち、Model T1、Model T1t（テーパ付き断面）の実験結果を各々図-4、5に示す。図中、横軸は無次元風速 $U_1/(f_0 D)$ または $U_1/(f_0 D1)$  [ $U_1$ : 塔頂における風洞風速、 $f_0$ : 橋軸方向曲げ一次固有振動数、 $D, D1$ : 図-1参照]、縦軸は無次元応答振幅 $\eta/D$  [ $\eta$ : 橋軸方向曲げ一次振動の塔頂における平均応答振幅（片振幅）]である。これらの図より、一本柱模型の応答はギャロッピングの性質が強いこと、境界層乱流中、（セン断格子1による）格子乱流中のいずれの場合にも、一様流中と比べてより低い風速域での振動の発達傾向が見られることが分かる。従来、二次元正方形断面に生じるギャロッピングは乱流中で安定化、つまり発振風速が一様流中と比べて高くなることの多いことが知られており<sup>4)</sup>、本実験結果は例外的なものと言える。この原因は明らかでないが、従来データの中にもスクルートン数によっては全く逆の現象、つまり本実験結果と同様、乱流中で発振風速が低下するという現象が確認されていることから判断しても、橋桁のケース（ただし、六角形断面を除く）のように気流の乱流化による現象の安定化効果を一律に期待することは必ずしも妥当でないと考えられる。

図-6には二本柱間隔 $r/D=5$ である二本柱模型（Model T2-5）の風速一応答振幅図を示す。二本柱模型では渦励振を生じているが、このケースでも一様流中と比べて乱流中の応答振幅の方が大きくなっており、気流の乱流化による

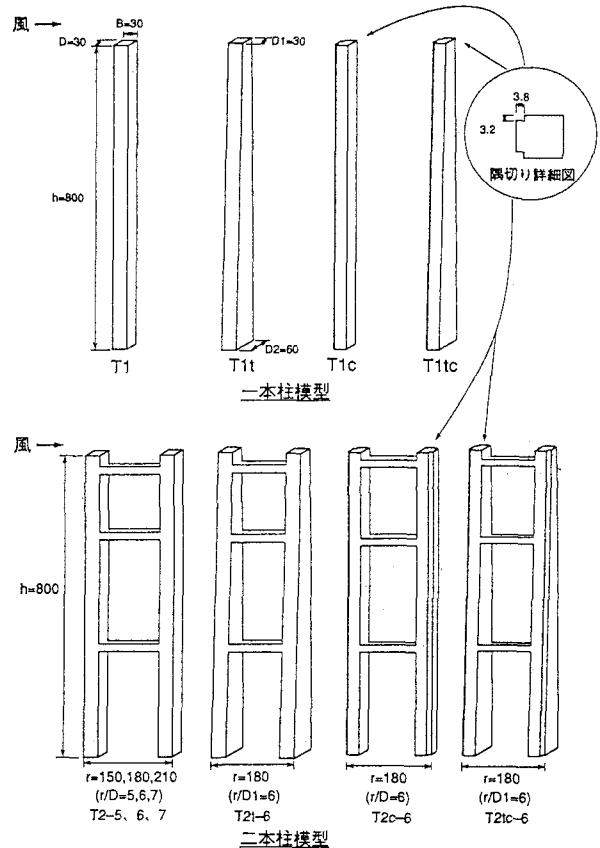


図-1 供試模型

| 種 類    | 概 略 図 | パイプサイズ<br>b | マッシュサイズ<br>M                                                       | 模型との距離<br>$X_0$ (m)                               | ベイズ指数<br>1/n |
|--------|-------|-------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------|
| 横格子    |       | 50          | 200                                                                | 10.0<br>8.0<br>5.0<br>3.64<br>2.86<br>2.35<br>2.0 | 1/∞          |
| セン断格子1 |       | 50          | 下から<br>120<br>140<br>160<br>180<br>200<br>220<br>240<br>260<br>280 | 8.0                                               | 1/7          |
| セン断格子2 |       | 50          | 下から<br>160<br>200<br>220<br>260<br>280<br>320<br>360               | 8.0                                               | 1/10         |

図-2.1 格子乱流の生成

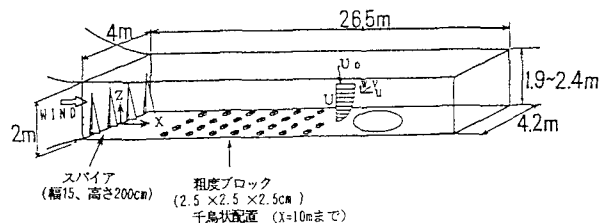
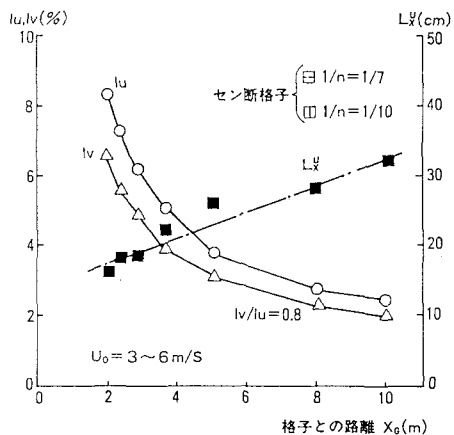


図-2.2 境界層乱流の生成

表-2 気流の特性

| 種 類                       | 格子<br>からの<br>距離<br>( $X_c$ )<br><br>または<br>使用部材 | 乱れ強さ( $\kappa$ ) <sup>1)</sup> |      |       |      | 乱れの<br>スケー<br>ル <sup>2)</sup><br>$L_w^*/D$<br>または<br>$L_w^*/D1$ | べき<br>指数<br>$1/n$ |
|---------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------|------|-------|------|-----------------------------------------------------------------|-------------------|
|                           |                                                 | $1u$                           |      | $1v$  |      |                                                                 |                   |
|                           |                                                 | $Z/h$                          |      | $Z/h$ |      |                                                                 |                   |
|                           |                                                 | 0.48                           | 0.94 | 0.48  | 0.94 |                                                                 |                   |
| 一様流                       | ——                                              | 0.4                            |      | 0.4   |      | ——                                                              | ——                |
| 横格子 <sup>3)</sup>         | $X_c(m)$                                        |                                |      |       |      |                                                                 | $1/\infty$        |
|                           | 10.0                                            | 2.4                            |      | 2.0   |      | 10.7                                                            |                   |
|                           | 8.0                                             | 2.8                            |      | 2.3   |      | 9.3                                                             |                   |
|                           | 5.0                                             | 3.8                            |      | 3.1   |      | 8.7                                                             |                   |
|                           | 3.64                                            | 5.1                            |      | 3.9   |      | 7.3                                                             |                   |
|                           | 2.86                                            | 6.2                            |      | 4.9   |      | 6.0                                                             |                   |
|                           | 2.35                                            | 7.3                            |      | 5.6   |      | 6.0                                                             |                   |
|                           | 2.0                                             | 8.3                            |      | 6.6   |      | 5.3                                                             |                   |
| セン断<br>格子 1 <sup>3)</sup> | 8.0                                             | 8.6                            | 5.2  | 6.0   | 3.8  | 15.3                                                            | 1/7               |
| セン断<br>格子 2 <sup>3)</sup> | 8.0                                             | 5.8                            | 3.5  | 4.6   | 2.9  | 12.0                                                            | 1/10              |
| 境界層<br>乱流 <sup>3)</sup>   | スパイア<br>+ 粗度<br>ブロック                            | 9.5                            | 6.8  | 6.3   | 4.8  | 29.3                                                            | 1/7               |



注) 境界層乱流の $L_x^* = 88\text{cm}$ ,  $lv/lv = 0.7$

図-3 格子乱流 (図-2.1) の性質

1) 図-2.1参照 2) 図-2.2参照 3) 風速3~6m/s の平均値 (風速依存性ほとんどなし) 4)  $Z/h=1$ における値 (風速5m/s)

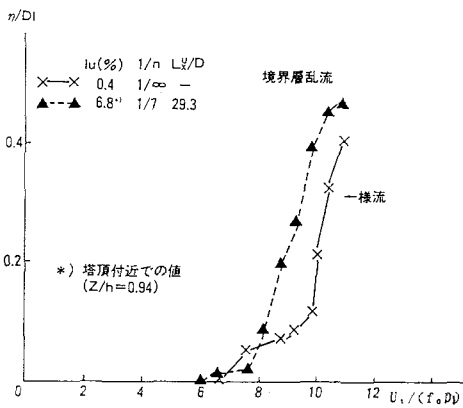
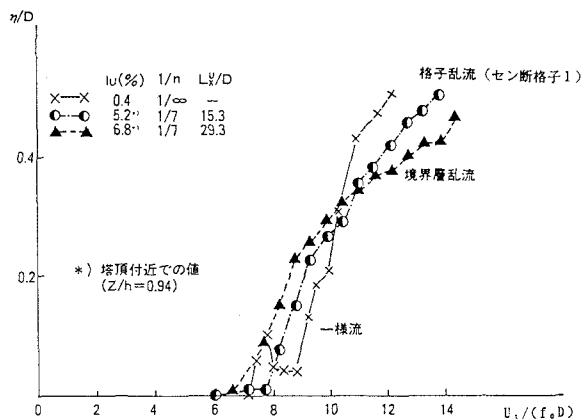


図-4 一本柱模型 (Model T1) の乱流中応答

図-5 テーパー付一本柱模型 (Model T1t) の乱流中応答

現象の不安定化傾向が認められる。このような風速－応答振幅図のデータを基に乱流効果に関する係数 $K_t$ （＝乱流中の最大応答振幅／一様流中の最大応答振幅）を求め、二本柱間隔 $r/D$ に対してこの $K_t$ の値がどのように変化するかを表したものを図-7に示す。この図より $K_t$ の値は概して1.0～1.2であり、他の二本柱模型の場合もModel T2-5と同様、乱流中で応答振幅が増大することの多いことが分かる。以上は二本柱模型に生じる渦励振に及ぼす乱流効果を評価するために、自然風の相似度が高いと考えられる境界層乱流中、あるいはセン断格子乱流中の応答振幅を一様流中の振幅と比較したものである。これに対し、平均風速が高さ方向に一樣な格子乱流（横格子と称する；図-2.1）を用いて乱れ強さ $I_u$ を詳細に変化させてその影響を調査した結果を図-8に示す。図中、 $I_u=2\sim3\%$ のデータに不連続性が見られるものの、全体的には図-7と同様な傾向が認められる。この図は多くの橋桁の場合、 $I_u$ の増大とともに $K_t$ の値が漸減し、 $I_u=8\%$ では $K_t=0.5$ 程度になる<sup>5)</sup>のとは対照的であり、2本の塔柱間のギャップが空力的に非常に大きな影響を及ぼしていることが想像される。

図-9は二本柱模型（Model T2-6）、および隅切り断面（Model T2c-6）の一樣流中、境界層乱流中の風速－応答振幅図を示したものである。これより、矩形断面（Model T2-6）の場合と異なり、隅切り断面では気流の乱れ効果が顕著であり、乱流中では一樣流中と比べて振幅が1/3程度になっており、しかも発振風速も変化していることが分かる。従来の研究<sup>6), 7)</sup>によれば、二本柱模型のようにタンデム配列されたブラフな角柱には5種類の異なったメカニズムによる渦励振が発生することが明らかにされており、この現象も気流の乱流化に伴う励振メカニズムの変化によるものと推測される。図-10はテーパ付き断面（Model T2t-6）について同様な比較を行ったものであり、このケースでも隅切りがないとき（Model T2t-6）には気流の乱流化により応答振幅が増大しているのに対して、これに隅切りを付けた断面（Model T2tc-6）では全く逆の傾向を示し、乱流中の振幅が一樣流中の約1/2に減少している。これは、隅切りを付けることによって剥離セン断層が物体に近接するような流れパターンに変化するため、乱流の再付着促進作用の影響を受け易くなることが原因と考えられる<sup>8)</sup>が詳細は明らかでない。

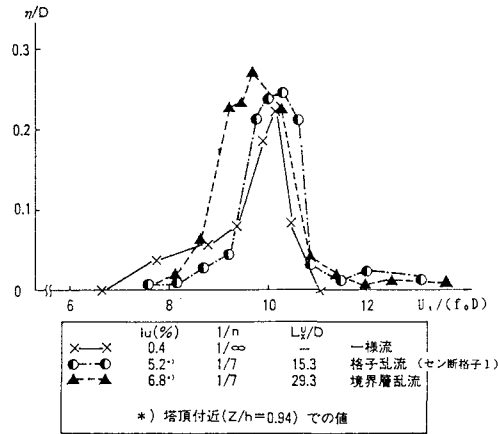


図-6 二本柱模型（Model T2-5）の乱流中応答

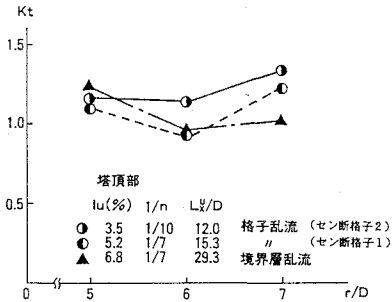


図-7 二本柱間隔の影響  
(Model T2-5, 6, 7)

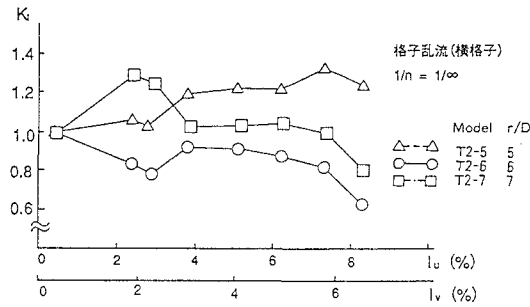


図-8 気流の乱れ強さ ( $I_u, I_v$ ) と渦励振の最大応答振幅比 ( $K_t$ )  
(二本柱模型；格子乱流)

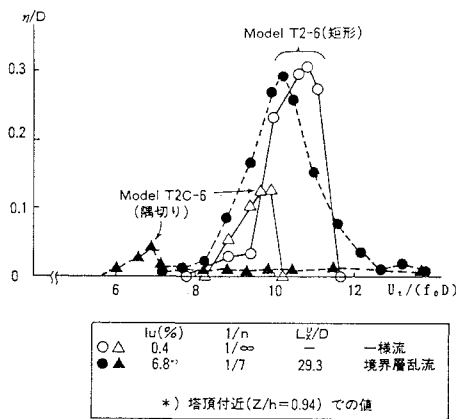


図-9 隅切りによる乱流効果の変化  
(二本柱模型；Model T2-6)

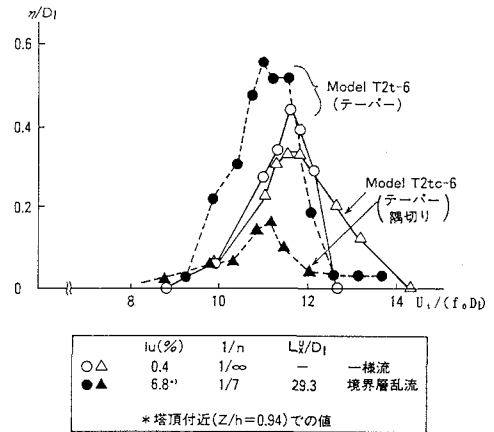


図-10 隅切りによる乱流効果の変化  
(二本柱テーパ付模型；Model T2t-6)

### 3 気流パラメータの影響度

#### 3.1 風洞実験の方法

架設系主塔の空力振動に対して支配的な影響を及ぼす気流パラメータの同定を目的とした検討は、図-2.1に示す横格子、セン断格子1、セン断格子2、ならびに図-2.2に示す境界層乱流（粗度ブロック敷設長 $X=10$  m）の4種類の乱流を用いて行った。これら4種類の乱流中で模型の応答振幅を計測し、データを比較検討することにより気流パラメータの影響度を明らかにすることを試みた。

各々の乱流の特性は表-2、図-3に示されている。横格子については模型との距離 $X_0$ を変化させることにより、7種類の乱れ強さの乱流を生成している。つまり、ベキ指数 $1/n=1/\infty$ の気流については主流方向乱れ強さ $I_u=2.4\sim 8.3\%$ の範囲の乱流が得られている。これに対し、セン断格子1、2および境界層乱流の場合には

べき指数が各々 $1/n=1/7, 1/10, 1/7$ であるが、乱れ強さも高さ方向に変化する気流となっており、横格子による乱流と直接的な比較が困難である。しかしながら、架設系主塔の曲げ一次振動を検討の対象とする限り、塔頂部に作用する気流の影響が支配的と考えられるので、これらの代表的乱れ強さを各々表中 $Z/h=0.94$  [h: 塔高] の値である $Iu=5.2, 3.5, 6.8\%$  (これらは横格子の $Iu=2.4\sim 8.3\%$ の範囲に入っている) と考えて差し支えないものと思われる。このような考えに基づけば、以上に述べた各種の乱流中で塔模型の応答振幅を計測・比較することにより、乱れ強さ $Iu$ がほぼ同一の条件下でべき指数のみが異なるとき、応答振幅にどのような変化が見られるかという点について考察が可能である。このようにして、乱れ強さのみならず、平均風速の高さ方向分布形状(べき指数)というパラメータの応答振幅に及ぼす影響度についても実験的に検討を加えることができる。なお、表-2、図-3によれば、横格子と模型との距離 $X_0$ が増大するとともに乱れのスケール $L_x^u$  が徐々に大きくなり、その値はセン断格子乱流の場合にはさらに大きいことが分かる。したがって、厳密にはこのパラメータも考慮に入れた上で実験結果の考察を行う必要があるが、橋桁の渦励振に及ぼす乱れのスケールの影響が大きくなかった<sup>5)</sup> ことから、塔断面についてもその影響は無視できるものと考えた。

### 3. 2 実験結果と考察

図-2.1、表-2に示す横格子、セン断格子1、セン断格子2によって得られた乱流中で一本柱模型(Model T1)の応答振幅を計測し、これらの結果を風速—

応答振幅図として同時に表したものが図-11である。この図より、 $Iu=3.8\%$  ;  $1/n=1/\infty$ のときと $Iu=3.5\%$  ;  $1/n=1/10$ のときの風速—応答振幅図が一部大振幅の領域を除いてほぼ一致していることが分かる。また、 $Iu=6.2\%$  ;  $1/n=1/\infty$ のときと $Iu=5.2\%$  ;  $1/n=1/7$ のときを比較しても、乱れ強さがほぼ同一で、平均風速の高さ方向分布特性を表すべき指数の値のみが異なるという条件下において、これらの風速—応答振幅図がほぼ一致していることが分かる。このようなことから、一本柱模型に生じる空力振動に対して、平均風速の高さ方向分布

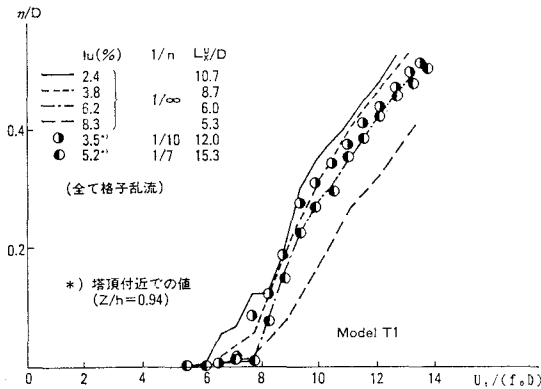


図-11 べき指数の影響 (一本柱模型)

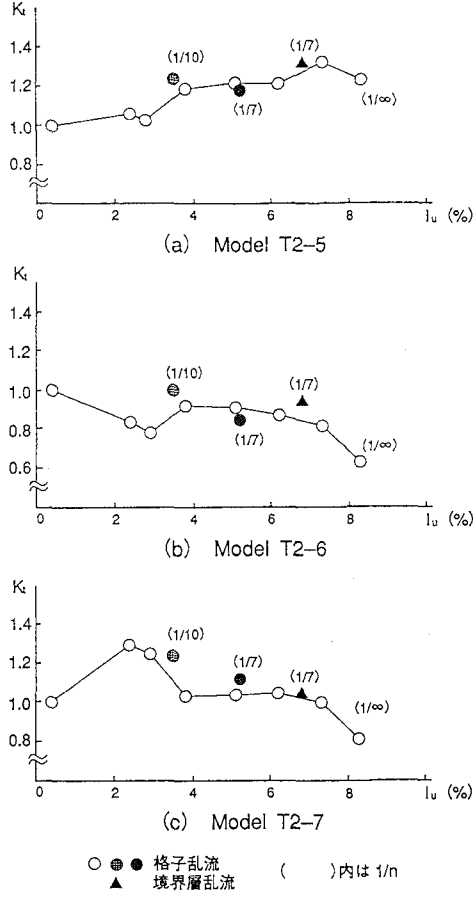


図-12 べき指数の影響 (二本柱模型)

形状というパラメータは大きな影響を及ぼしていないと判断される。図-12は、同様な考察を（境界層乱流中の結果も含めて）二本柱模型に対して行ったものである。ただし、二本柱模型の場合には渦励振が生じるので、乱流効果に関する係数 $K_t$ が乱れ強さ $I_u$ とべき指数 $1/n$ に対してどのように変化するかという視点から考察を加えた。この図より、乱れ強さ $I_u$ が同じでべき指数のみが異なるという条件下において、両者の応答振幅が一致したケースが6ケース、高さ方向の平均風速分布のある方が一様分布のときよりも応答振幅が大きくなるケースが3ケースあることが分かる。

従来、橋梁の塔の風洞実験においては平均風速の高さ方向分布を相似させることが極めて重要とされてきた<sup>2)</sup>が、本研究の結果によれば、その影響がほとんど現れないケースが多いことが明らかになった。したがって、橋梁主塔の乱流中の風洞実験においては、影響度が非常に大きいことが明らかにされている乱れ強さに重点を置いて風洞乱流を生成し、平均風速の高さ方向分布については、その相似性を緩和することが現段階では妥当と考えられる。

#### 4 まとめ

代表的な橋梁主塔の構造形式として一本柱形式、二本柱（ラーメン）形式を選定し、特に問題を多く生じる架設系free standing時の主塔を対象として、格子乱流および境界層乱流中で系統的な風洞実験を行うことにより、乱流効果の一般的な傾向を明らかにすることを試みた。また、乱流パラメータの異なる4種類の乱流を生成し、これらに対する模型の応答を詳細に調査することにより、各々のパラメータ、特に、平均風速の高さ方向分布の影響度を抽出・評価することを試みた。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 一本柱形式、二本柱形式主塔のいずれの場合も（橋桁の場合と大きく異なり）乱流による振動現象の安定化効果が必ずしも認められず、逆に乱流中で応答が大きくなるケースも珍しくない。ただし、隅切り断面では気流の乱流化に伴う応答振幅の低減傾向が見られる。
- (2) 従来より塔の実験時には平均風速の高さ方向分布を相似させることが極めて重要とされてきたが、その相違が応答に大きな影響を与えないケースが多い。

以上のことより、橋梁主塔の風洞実験においては橋桁の場合と比べて乱流中の風洞実験の必要性が高いと言える。つまり、橋桁の場合には乱流中で現象が安定化することが多いために、乱流中の風洞実験は最終確認的な位置付けで行われることが多いのに対し、主塔の場合には一様流中より応答振幅の大きくなることの多い乱流中の実験結果に基づいて最終的な断面形状や制振条件の決定を行うべきことを示唆している。また、主塔の乱流中の風洞実験において、現在相似させることが不可欠とされている平均風速の高さ方向分布と乱れ強さの両方を同時に合わせるができない場合には、影響度が非常に大きいことが明らかにされている乱れ強さを優先的に合わせ、平均風速の高さ方向分布についてはその相似性を緩和することが現段階では妥当と考えられる。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会、「道路橋耐風設計便覧」、1991.
- 2) 本州四国連絡橋公団、「本州四国連絡橋風洞試験要領(1980)・同解説」、1980.
- 3) 白石、松本、白土、石崎、長田、松井、「隅切りによる矩形断面の空力安定化効果」、第9回風工学シンポジウム、1986.
- 4) 松本、溝田、山田、久保、岡島、白土、「構造基本断面の空力特性(その2)」、日本風工学会誌第38号、1989.
- 5) 武田、園部、橋本、「渦励振応答振幅の推定に関する実験的考察」、第9回風工学シンポジウム、1986.
- 6) 武内、松本、白石、「タンデム配列ブラッフ角柱に発現する渦励振に関する研究」、第12回風工学シンポジウム、1992.
- 7) 武内、松本、白石、「タンデム配列角柱の空力応答特性と断面に作用する非定常圧力に関する基礎的研究」、構造工学論文集、Vol.38A, 1992.
- 8) 武田、「橋桁の渦励振応答に及ぼす乱流効果のメカニズムに関する考察」、日本風工学会誌第54号、1993.
- 9) 岡内、伊藤、宮田、「耐風構造」、丸善出版、1977.
- 10) 岡島、「種々な断面辺長比の矩形柱周りの流れ」、日本風工学会誌、第17号、1983.
- 11) 山田、宮田、伊藤、「たわみ振動する角柱の周辺圧力分布に関する一考察」、第6回風工学シンポジウム、1980.
- 12) Bearman, P. W. and Davies, M. E., "The Flow about Oscillating Bluff Structures", Proceedings of the Fourth International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, 1975.
- 13) 白石、松本、白土、佐川、「直列柱状構造物の空力特性に関する基礎的研究」、第7回風工学シンポジウム、1982.
- 14) 岡島、阿部、木綿、「直列2矩形柱の空力不安定振動」、構造工学論文集、Vol.36A, 1990.
- 15) 山口、伊藤、藤井、「吊橋主塔架設時の対風制振策」、第7回風工学シンポジウム、1982.
- 16) 白石、松本、武内、「ラーメン形式主塔の渦励振とその空力制振対策に関する基礎的研究」、第8回風工学シンポジウム、1984.
- 17) 武内、北原、「超長大橋主塔の渦励振の発現と空力制振法に関する基礎的研究」、第9回風工学シンポジウム、1986.
- 18) 森内、樋上、「斜張橋塔の形状と耐風性の関係」、第45回土木学会年次学術講演会、1990.

(1993年9月16日受付)