

長大トラス橋の耐風応答特性に関する実験的研究

小西一郎・白石成人・松本 勝・小前 繁・竹居重男

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS ON AEROELASTIC RESPONSE CHARACTERISTICS OF LONG-SPANDED TRUSS BRIDGES

By *Ichiro KONISHI, Naruhito SHIRAISHI, Masaru MATSUMOTO, Shigeru KOMAE, and Shigeo TAKEI*

Synopsis

Experimental investigations are performed by wind tunnel tests on aeroelastic characteristics of long-spanned truss bridge in connection with the design of the Nanko Bridge in Osaka, Japan. Based on previous contributions by number of former researchers a few cases of shear flows are simulated so that the variation of wind profile may be taken into an account in model tests. Results indicate that, though the bridge is aerodynamically stiff enough, the induced drag and side forces depend remarkably on the solidity ratio and the angel of yaw and experimental results on these take an important role on design of this kind of structures.

1. ま え が き

長大橋梁は、最近の経済的社会的要請から、数多く計画され、逐次建設されつつあるが、就中わが国においては本州四国連絡橋の実現のため各方面から長大橋梁の特性が考究されている。長径間橋梁形式としては吊橋、斜張橋、アーチ橋、カンチレバー・トラス橋などが考えられるが、吊橋、斜張橋は可撓性の大きいかつ振動し易い形式であるのに対して、アーチ橋、カンチレバー・トラス橋などは比較的剛な構造形式であり、構造設計の上からもそれぞれの特性に合った合理的な設計法が考えられなければならないのは当然である。本四連絡橋の建設においても主要な構造形式としては1500m程度の中央径間をもつ吊橋であるが、その全体計画の中で吊橋以外の比較的剛なトラス橋の建設計画も含まれている。現在大阪湾南港に架設されつつある南港連絡橋はケベック橋、フォース鉄道橋に次ぐ世界3位の長大ゲルバー・トラス形式の橋梁であり、この建設計画の成否は本四連絡橋の計画の上からも極めて重要な意味をもつものと思われる。南港連絡橋は中央径間510m、全長980mであり、スパン中央部はOP+82.3mの高さになり、このような長大高層橋梁がどのような外力を受けるかは重要な設計上の問題である。本研究ではこのような考えから、南港連絡橋の計画諸元を対象に、その耐風性について実験的考察を行ったので、その結果の概要を報告したい。まず2.では長大トラス橋の耐風性に関する従来の研究成果とその設計上の問題点について考察し、3.では今回の研究での実験の内容とそれに対する考察をのべ、4.では本研究の総括を行いたい。

2. 長大トラス橋の耐風性に関する従来の研究と問題点

長大橋梁の設計においては地震、台風などのいわゆる自然外力の影響が交通活荷重に比較してはるかに大きくなることは死荷重の割合がスパン長の増大とともに増加することからも当然と考えられる。しかしながら土木建築構造物を対象とした流体力学的研究は気象学的特性の把握と構造断面の多くが非流線型であるという点から困難な問題を克服しなければならないという側面を有している。従来長大橋梁の耐風性の問題は、Tacoma旧橋の落橋以来、吊橋などの可撓構造物で強調されてきたが、風の静的作用による落橋事故も報告

されており、その代表的な例が1879年の Tay 橋の落橋と1944年の Chester 橋の落橋である。この2つの橋梁はいずれもトラス橋であり、Tay 橋の場合は風圧に対する抵抗力が十分でなかったために落橋し、Chester 橋の場合には風による抗力、揚力、あるいはピッチング・モーメントという流体力の評価と構造物の転倒に対する安全率が著しく不足したために落橋したといわれている。吊橋、斜張橋等の可撓構造物の耐風性が動的な問題であるのに対して、長大トラス橋のような剛構造物の耐風性は著しく趣を異にするものと思われる。すなわちトラス橋ではたわみ剛性、ねじれ剛性が大きく、また質量、質量慣性も大きいことから振動しにくく、動的な安全性は高いことになる。しかしその反面部材断面が大きくかつ部材数も多くなるため、受風面積も大きくなり静的空気力は吊橋、斜張橋より大きくなり、この点についての安全性の検討が重要なものになるといえることができる。これをまとめれば Table 1 のようになると考えられる。ここにのべた比較は相対的なものであり、これによってトラス橋の耐風性の検討が静的な流体力のみを対象とすべきであるということとはできない。

Table 1 Comparison of wind-resistance between long-span truss bridge and suspended bridge.

item	long-span truss bridge	suspended bridge
number of members	many	few
dimension of member	large	small
rigidity	rigid	flexible
stability for vibration	insensitive	sensitive
check board of safety	static air force	dynamic response

さて長大トラス橋の耐風性に関する研究の大部分は静的な空気力特に抗力を対象としたもので、動的挙動について触れたものは極めて少い。橋梁構造の耐風性に関する諸研究を総合したものとして米国土木学会風力委員会の報告¹⁾があるが、この中でべられているトラス橋の耐風性に関する諸特性は次のようなものである。すなわちトラス橋として最も重要な流体力である抗力について、

1. トラス橋全体としての Aspect Ratio よりも各部材独自の Aspect Ratio が重要な影響を与える。
2. 一般に、トラス橋の各部材は鋭い角部を有するため、他の橋梁形式に比べて Reynolds 数の影響が小さい。
3. 充実率（実質面積と外形面積の比）は大きな影響をおよぼす。
4. 上流側トラスによる流れの攪乱が下流側トラスに影響するが、これは抗力の変化特性に重要な関係をもっている。
5. 2面トラス間の距離はトラス全体に作用する抗力の重要なパラメータである。
6. 水平迎え角 (Angle of Yaw) および迎え角 (Angle of Attack) が0°のとき、上流トラス部材は下流トラス部材を遮蔽するが、これらの迎え角がある角度をもつと、この遮蔽効果は小さくなる。すなわち上流トラスの下流トラスに対する遮蔽効果は充実率と密接な関係にある。
7. トラス橋の場合、他のプレート・ガーダー橋等と異なり、それに作用する静的空気力は床板形式よりむしろ各部材の断面寸法に支配される。

等の諸特性が考えられる。

一般のトラス橋は2面のトラスを主構として橋梁を構成しているものが多いが、この場合抗力係数 C_D は W.W. Pagon によれば、

$$C_D = \sqrt{\frac{1.7}{\phi}} + \log \frac{s}{h} \dots\dots\dots (2.1)$$

のように関係付けられている。²⁾ここに ϕ は充実率、 s は2面トラスの間隔、 h はトラス高さである。

この式(2.1)は風が橋軸直角方向から作用する場合の抗力係数を考える場合に有効であるが、Biggs¹⁾の実験によれば橋軸に斜めに風が作用する場合に大きな抗力が現われおり、最も危険な水平迎え角は 20° 付近になっている。

このような、長大トラス橋の従来の耐風性に関する研究成果を基礎に、本研究では南港連絡橋を対象に、耐風上の問題点について考察した。すなわち安全性を確保する上から解明しなければならない点を列挙すれば次のようである。(i) 設計風速の算定、(ii) 静的空気力と水平迎え角の関係、(iii) 静的空気力と充実率の関係、(iv) 上下流トラスの受けもつ抗内の分担率、(v) 建設地点における風速の鉛直分布と乱れの強さの鉛直分布、(vi) 静的空気力と迎え角の関係、(vii) 南港連絡橋全体の動的安定性、(viii) 各部材の動的特性、(iv) 建設地点での自然風の空間的特性。

これらの諸問題のうち、架橋地点の風の特性については直接計測結果がないため、再現期間計算法による推定を行ったが、諸計算法の結果再現期間100年に対して43~52 m/secの風速が求められ、設計基本風速として50 m/secが採用された。また高度分布は巾法則における指数 $1/7 \sim 1/8$ が海上風として考えられ、鉛直水平方向の補正は本四連絡橋耐風設計指針解説²⁾に準じて行われた。このように設計風速については従来の方法がとられたが、設計荷重を決定するための耐風工学上の諸係数は風洞実験によらざるをえないため、本研究では、高度分布を風洞内でシュミレートし、これを用いて流体力および動的応答について考察した。

3. 風 洞 実 験

3.1 実験装置および測定器具

本研究において用いられた実験装置および測定器は次のようなものである。

1. 風 洞

京都大学工学部に設置されているエッフェル型(NPL形式)風洞で、測定断面は 1.5×2.5 m、風速は0~22 m/secまで連続的に変化しうる。

2. 模 型

南港連絡橋1/500全径間模型(メタ・アクリル酸樹脂製)

南港連絡橋1/200橋脚塔部部分模型(同上)

南港連絡橋1/200吊部部分模型(同上)

3. 風 速 測 定

(i) NPL型ピトー管およびベッツ型マノメータ(理化精機工業製)

(ii) 多点ピトー管(試作品)およびロータリー・コック

(iii) 熱線風速計、日本科学工業製IAM-60/28-111 2台、FLA-60/28-1111 2台および演算器1台、同Model 21型2台と演算器1台

4. 静 的 実 験

(i) 水平迎え角可変ターン・テーブル(試作品)

(ii) 境界層発生装置(試作品、後述)

(iii) 静的空気力測定

A. 小型3分力天秤(島津製作所製3CB-11A型)

B. デジタル・ボルト・メータ(日本電波製)

C. 6分力天秤(島津製作所製6CB-2A型)

5. 動 的 実 験

(i) 動歪計(新興通信製DS 6/MTY型)

(ii) ローパス・フィルター(新興通信製LFT型)

- (iii) 直流増幅器 (三栄測器製 6L5 型)
- (iv) データ・レコーダー (ティアック製 351F 型および 351FH 型)
- (v) ペン書きレコーダー (渡辺測器製 WTR 211-4C 型)
- (vi) シンクロスコープ (岩崎通信製 SS-4200M 型)

3・2 乱流境界層発生装置および境界層特性

自然風の高度分布を風洞内にシミュレートする研究は 1950 年頃から活発に行われている。³⁾ これまでの方法を大別すると (1) Gauges あるいは Honeycombs を使用方法で Winternitz, Ramsay (1957), Elder (1959), および Baines (1963) 等の研究がある。(2) Rods を使用方法で Livesey, Turner (1964), Cowdrey (1967) 等の研究がこれに属する。わが国の勝田, 村上等の応用例^{4), 5)} もこの範疇に属すると考えられる。(3) 平板を用いる方法で, いろいろな工夫が行われているが, 代表的なものとしては Lloyd の研究 (1967) がある。⁶⁾ (4) 障害物を設ける方法で, Counihan⁷⁾ (1969), Standen⁸⁾ (1971), Davenport⁹⁾ (1971), Sadeh¹⁰⁾ (1971) 等の研究にも見られるように各種の境界層の発生方法が考えられている。(5) その他の方法としてはジェットを応用した Etkins, Teunissen¹¹⁾ (1972) 等の研究もある。

このように乱流境界層の発生方法には数多くの提案がなされているが, 本研究では風洞断面および模型寸法より独自の模擬方法を考えた。すなわち A. Lloyd の誘導した, 2 枚の平板の流れに生ずる境界層に関する平均流量は, Fig. 1-1 より,

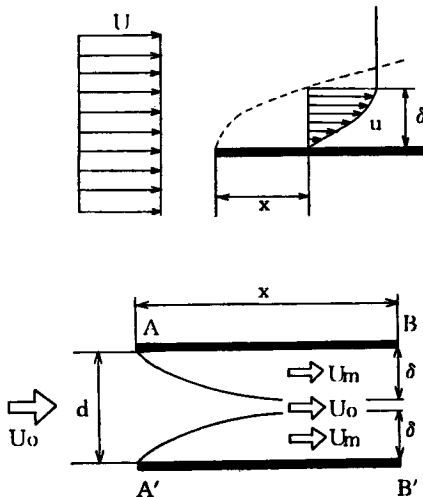


Fig. 1-1

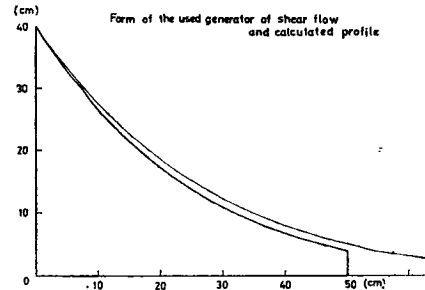


Fig. 1-2

$$Ud = (d - 2\delta) U_0 + 2\delta U_m \quad \dots \dots \dots (3.1)$$

のように与えられる。ただし,

A, A': 平板の leading edge

B, B': 平板の trailing edge

U: 断面 BB' における平均風速

U_0 : 断面 AA' における一様風速

U_m : 断面 BB' における境界層内の平均風速

d: 2 平板間の距離

δ : 断面 BB' での境界層厚さ

x: 平板の流れ方向の長さ

である。一方平板上に発達する境界層厚さ δ は、近似的に次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \delta &= 0.366 R_e^{-0.2} x \\ R_e &= \frac{Ux}{\nu} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.2)$$

ここに R_e はレイノルズ数であり、 ν は流体の動粘性係数である。また、 BB' における境界層内の平均風速 U_m は、速度分布が $1/7$ 乗法則に従うとすれば、

$$U_m = \frac{1}{\delta} \int_0^\delta U_0 \left(\frac{y}{\delta} \right)^{\frac{1}{7}} dy = \frac{7}{8} U_0 \dots\dots\dots (3.3)$$

となる。式(3.2)、(3.3)を式(3.1)に代入して、速度分布が $1/7$ 乗則に従うよう整理すれば、

$$x = \left(\frac{4d}{0.366} \right)^{\frac{5}{4}} \left(\frac{U_0}{\nu} \right)^{\frac{1}{4}} \left\{ 1 - \left(\frac{z}{\delta} \right)^{\frac{1}{7}} \right\}^{\frac{5}{4}} \dots\dots\dots (3.4)$$

をうる。Lloyd は式(3.1)、(3.2)、(3.3)を用いて、任意の速度勾配をうるために、平板間隔 d を変化させる方法を提案した。すなわち床面近くでの密な間隔から次第に粗い間隔に平板を置いたが、本研究の場合、間隔が余りにも密になり実用的でないため、間隔を一定にし、平板を流れ方向に鉛直に立て、境界層の発達長さをコントロールする方法をとった。このような場合の計算例として、 $\delta=40\text{cm}$ 、 $d=2\text{cm}$ としたときの平板の形状を風速をパラメータとして示せば、Fig. 2 のようになる。(なお、本研究に用いられた平板の形状を Fig. 1-2 に示す。)

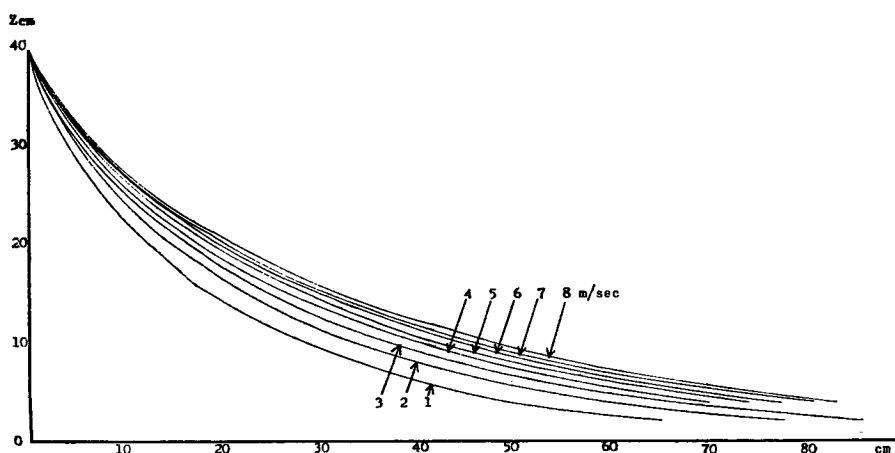


Fig. 2 The calculated profile of the generator of shear flow.

一方このような平板による速度勾配を求める方法では、速度勾配が急な場合平板の長さが長くなり、実用的でないため、速度分布が $1/4 \sim 1/3$ 乗則に従う境界層を対象に風洞床面に障害物を置く方法をとった。各種の方法を比較検討した結果、Fig. 3 に示すような円錐を配列したものが安定した境界層を作ることを確めた。円錐は床面の直径を 10cm とし高さを Table 2 に示すように変化させ、配列形式としては C1~C4 までの4種類について予備実験を行ったが、この結果 C4 のタイプがほぼ $1/3$ 乗の速度分布を与え、乱れ強さは $16 \sim 18\%$ となり、都市近郊の自然風の特徴を表わし、上記の平板は $1/7$ 乗則を満足し、乱れ強さ $11 \sim 14\%$ となるため、海上の自然風の特徴を示す一つとモデルと考えられる。これらの風速分布、乱れ強さの結果は Figs. 4~6 に示すようである。

本研究では設計上考慮された風速の高度分布を境界層を用いて実験的に再現し、このような状態で構造物に作用する空気を計測することを考えた。このため、前述の代表的と思われる2種類の境界層を、風洞の床面上 50cm の所に設けた床組みの上に設け、便宜上次のように表わすこととする。

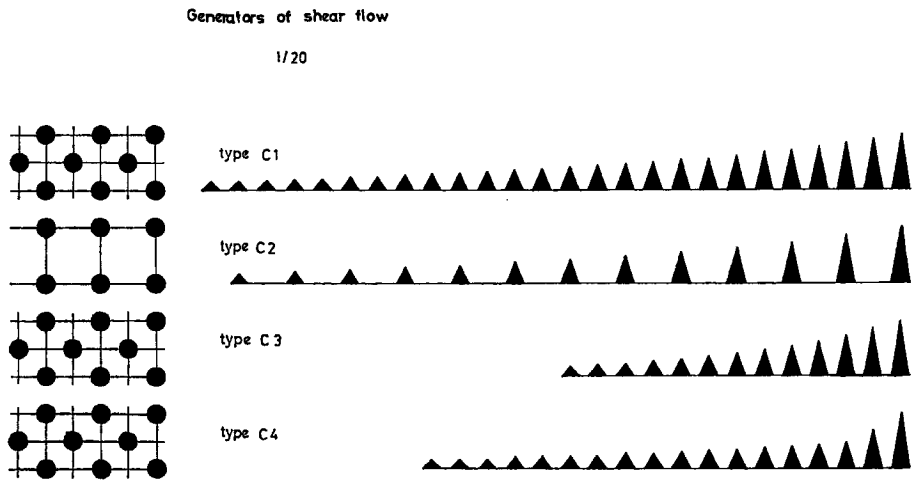


Fig. 3 Generators of shear flow.

Table 2

cone number	height (cm)	cone number	height (cm)	cone number	height (cm)
0	30	9	15.75	18	8.25
1	27.96	10	14.67	19	7.65
2	26.07	11	13.59	20	7.17
3	24.33	12	12.69	21	6.69
4	22.56	13	11.85	22	6.18
5	20.94	14	11.04	23	5.79
6	19.53	15	10.26	24	53.7
7	18.21	16	9.53	25	5.00
8	16.98	17	8.85		

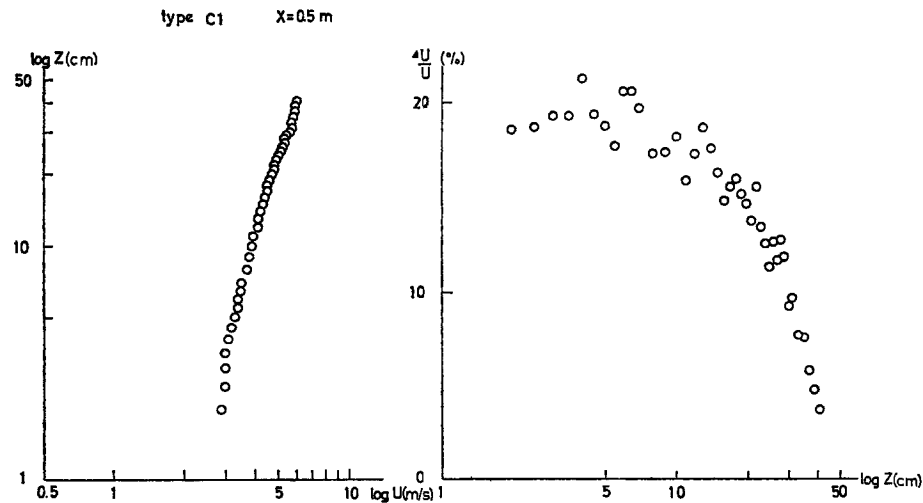


Fig. 4 Wind velocity-height

Intensity of turbulence-height.

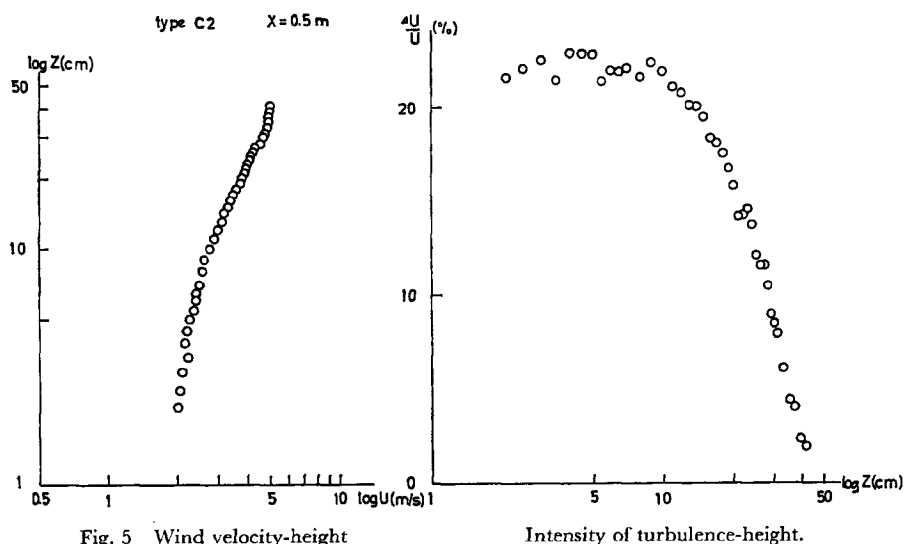


Fig. 5 Wind velocity-height

Intensity of turbulence-height.

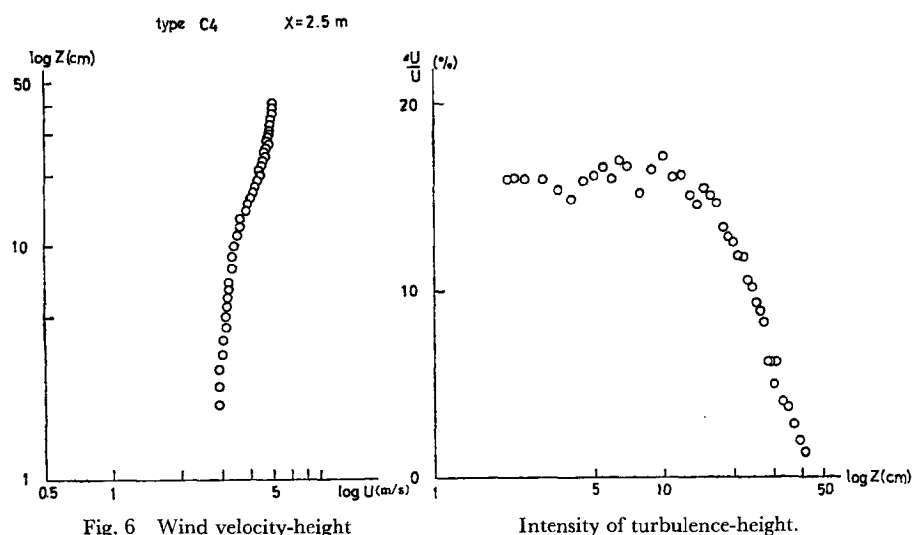


Fig. 6 Wind velocity-height

Intensity of turbulence-height.

境界層A：床組の上に C-4 タイプの発生装置を設けたときの境界層

境界層B：床組の上に平板形式の発生装置を設けたときの境界層

以下に簡単にこの研究で用いた境界層についての特性をのべる。

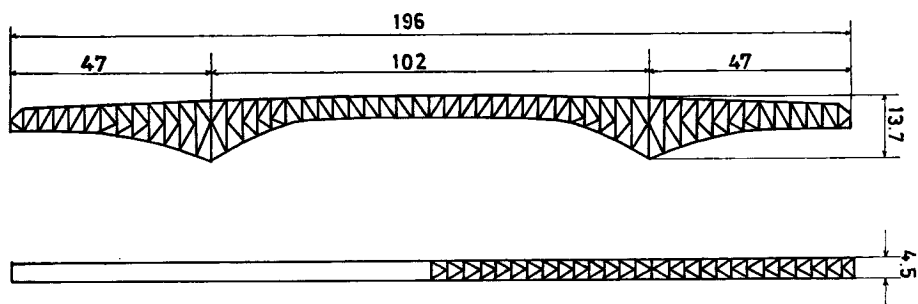
(1) 境界層 A の特性

この境界層は円錐を前述のように配置したものであるが、境界層厚さはほぼ 40cm となる。境界層外の風速を 2, 5, 8m/sec に変化させるとき、風速の高度分布の指数はそれぞれ $1/1.6(1/5.4)$, $1/2.4(1.82)$, $1/2.9(1/13)$ となった。括弧内の値は速度分布が一様とならないため、境界層下層部における指数を示めたものである。一方乱れ強さについては境界層外の風速を 2, 5, 8m/sec としたとき、床組上 1cm 付近で 18, 16, 16% となり、高さが 10cm を越えると次第に減少し、境界層厚さ 40cm 付近では約 1% となった。この

種の境界層については境界層厚さはほぼ同じになるが、速度勾配は境界層外の設定風速と発生装置からの距離により変化するため、予めこれらの特性を知っておく必要がある。今回の測定では乱れ強さは余り変化せず、ほぼ17%の値が求められた。これらの結果を総合して、境界層 A は、風速の鉛直分布、乱れ強さについては、市街地における自然風の1つのモデルを表わしうるものと考えられる。

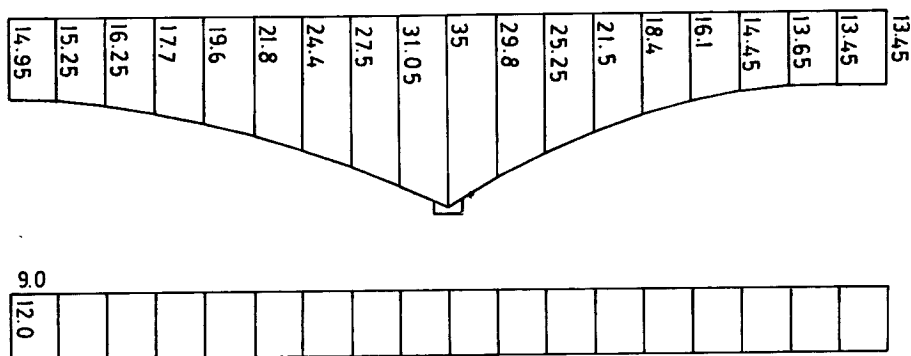
(2) 境界層 B の特性

境界層 B は平板間の境界層を利用したものであるが、境界層外風速を 2, 5, 8 m/sec とした時、風速分布

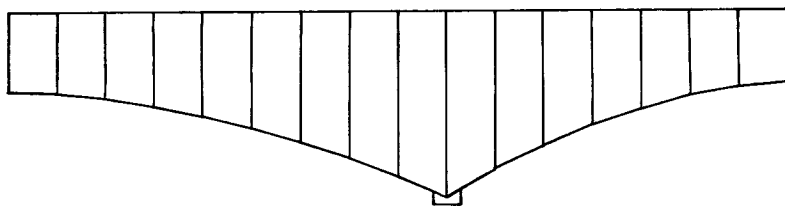


Full Scale Model (1/500, cm)

Fig. 7



$9P_9$ Model (1/200, cm)



$7P_9$ Model

Fig. 8

の巾法則の指数は 1/7.04, 1/7.57, 1/7.83 となり、この場合、境界層 A にみられるような高さによる特性の変化はなく、境界層厚さの中で様な値と考えられる。この場合、計算で平板の形状を決定しているが、高さ 5cm 以上では計算値と実験値はよく一致している。高さ 5cm 以下でこれらが一致していないのは乱れの影響と、平板がこの部分では計算値と一致させていないためと思われる。乱れ強さについては、床組表面付近で、設定風速を 2.5 m/sec とした場合それぞれ 14, 11, 11% で床組上高さ 10 cm までは徐々に減少し、それ以上の高さになれば急激に減少し、高さ 20 cm で約 1% となる。これらの特性より境界層 B は、風速の鉛直分布、乱れ強さについてみると、海上における自然風の 1 つのモデルを表わしうるものと考えられる。

3・3 模 型

本研究に用いた模型は全径間模型 1 基、部分模型 2 基であり、簡単に説明すれば次のようである。

全径間模型

縮尺 1/500 の模型で主塔部分 2 基、吊部 1 基よりなり、それぞれに作用する静的空気力を測定することを目的とする。また床板部分は取りはずし可能であり、模型の材質はメタアクリル酸樹脂である。(Fig. 7)

部分模型

部分模型は 1/200 縮尺の主塔部付近左右 9 パネルずつ張り出したものと、1/200 吊径間部の 2 種類である。前者の部分模型は各パネルを自由に取はずし可能である。左右 9 パネルずつ張り出した形式を ${}_9P_9$ 記号で示し、吊部側に 7 パネル、反対側に 9 パネル張り出した形式を ${}_7P_9$ 記号で示す。以上 2 基の模型の材質はいずれもメタアクリル酸樹脂である。(Fig. 8)

3・4 静的空気力の計測

すでにのべたように比較的剛なカンティレバー・トラス形式の橋梁においては静的空気力が重要な意味をもっている。3次元における空気力としては揚力、抗力、横力、ピッチング・モーメント、ローリング・モーメント、ヨーイング・モーメントの 6 成分であるが、このうち揚力、抗力、横力、およびピッチング・モーメントの 4 成分が実際に注目すべき空気力となり、2 成分のモーメントは他の大きさに比較して極めて小さい。したがって、ここでは揚力、抗力、横力、ピッチング・モーメントの 4 成分についてその特性をのべたい。

(1) 充 実 率

一般に、2 面トラス橋梁に作用する空気力は充実率により大きく影響されることは Pagon によって指摘されている所である。¹⁾ 本研究で対象とする南港連絡橋について充実率を求めれば、Table 3 に示すようである。ただし

$$\phi(\alpha) = \frac{S_R(\alpha)}{S_T(0)}, \quad \phi^*(\alpha) = \frac{S_R(\alpha)}{S_T(\alpha)} \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

であり、ここに

α : 水平迎え角, $\phi(\alpha), \phi^*(\alpha)$: 水平迎え角 α に対する充実率

$S_R(\alpha)$: 水平迎え角 α に対する模型の実質投影面積

$S_T(\alpha)$: 水平迎え角 α に対する模型の外形投影面積

$S_T(0)$: 水平迎え角 0° に対する模型の外形投影面積

また、横軸に水平迎え角をとり、縦軸に充実率をとれば、Figs. 9 and 10 ようになる。

充実率を $\phi(\alpha)$ のように定義すれば、水平迎え角 0° から $\phi(\alpha)$ は次第に増加し、約 20° 付近で最大となり、以後は水平迎え角の増加とともに減少する。一方 $\phi^*(\alpha)$ は水平迎え角 0° から大体において増大することを示している。構造物の耐風設計上からは充実率としては $\phi(\alpha)$ を考えるのが、空気力との対応を考える上から合理的のように思われる。

(2) 抗力係数

前述のように、自然風は地表付近の障害物のため、速度欠損を生じ、風速は鉛直方向にある分布をしてい

Table 3
sectional model ${}_3P_9$

angle of attack $\alpha (^{\circ})$	total elevation area $S_T (\text{cm}^2)$	solid elevation area $S_R (\text{cm}^2)$	$\phi = S_R/S_T$ (%)	
			$\phi(\alpha)$	$\phi^*(\alpha)$
0	3382	830	24.5	24.5
10	3403	2025	48.5	47.7
20	3418	1802	53.3	52.7
30	3430	1580	46.7	46.1
40	2909	1432	42.3	49.2
50	2722	1546	45.7	56.2
60	2002	1161	34.3	57.9
70	1519	972	28.7	63.7
80	1000	758	22.4	75.8
90	422	246	7.3	58.2

sectional model ${}_7P_9$

angle of attack $\alpha (^{\circ})$	total elevation area $S_T (\text{cm}^2)$	solid elevation area $S_R (\text{cm}^2)$	$\phi = S_R/S_T$ (%)	
			$\phi(\alpha)$	$\phi^*(\alpha)$
0	3105	762	24.5	24.5
10	3157	1596	48.5	47.7
20	3202	1688	54.3	52.7
30	3245	1496	48.2	46.1
40	2731	1344	43.3	49.2
50	2575	1447	46.6	56.2
60	1887	1093	35.2	57.9
70	1458	932	30.0	63.7
80	969	735	23.7	75.8
90	422	246	7.9	58.2

full scale model

angle of attack $\alpha (^{\circ})$	total elevation area $S_T (\text{cm}^2)$	solid elevation area $S_R (\text{cm}^2)$	$\phi = S_R/S_T$ (%)	
			$\phi(\alpha)$	$\phi^*(\alpha)$
0	1362	423	31.0	31.0
10	1375	741	54.4	53.9
20	1385	812	59.6	59.8
30	1393	717	52.6	51.5
40	1187	662	48.6	55.8
50	1113	689	50.6	61.9
60	815	520	38.2	63.8
70	597	427	31.4	71.5
80	404	327	24.0	80.9
90	135	93	6.8	69.0

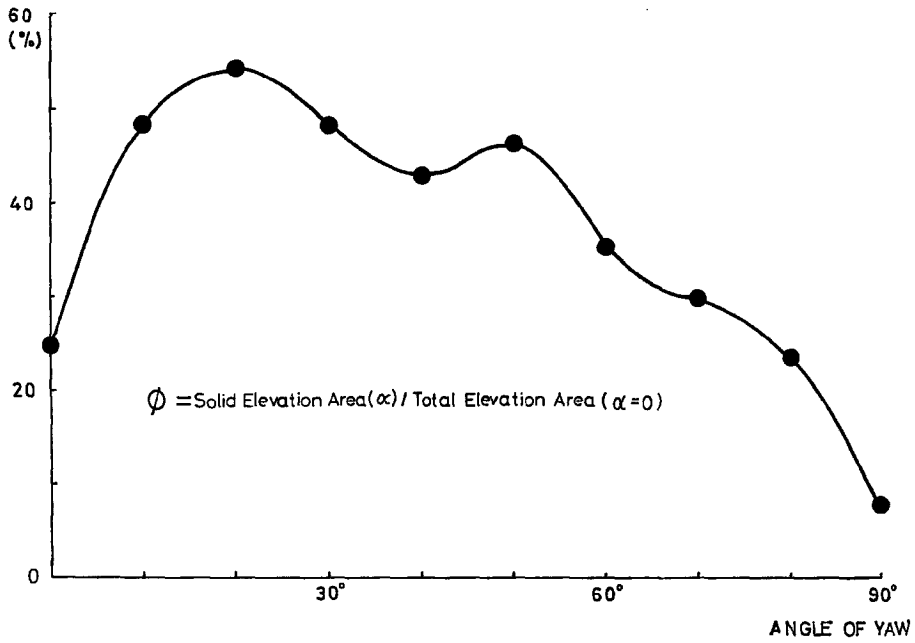


Fig. 9 ϕ -angle of yaw ($7P_9$ model)

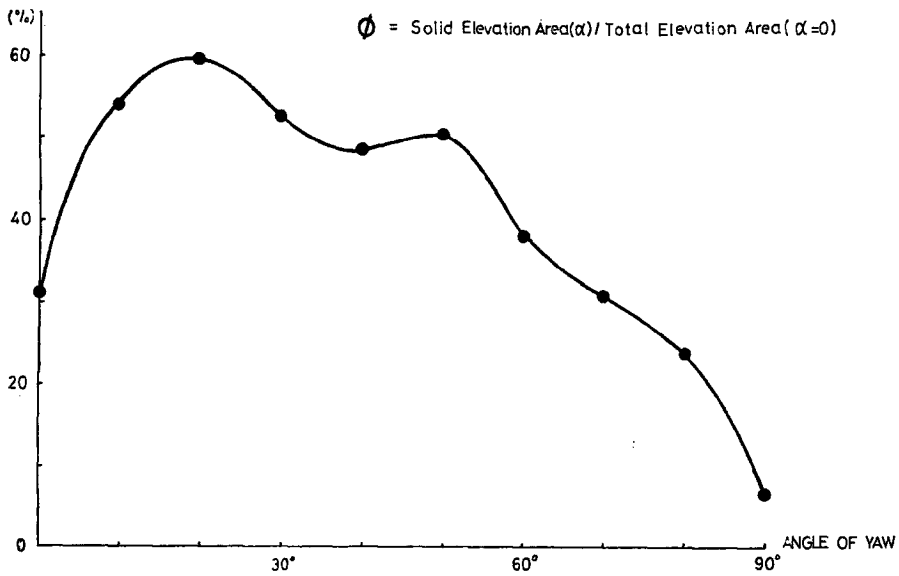


Fig. 10 ϕ -angle of yaw (full scale model)

る。南港連絡橋の上弦材は海面上約 80m であり、各部材には異った風速が作用することになる。この影響を実験的に知るために各種境界層発生装置によるせん断流れをシュミレートし、その中に模型をおいて 3 分力天秤によって抗力を測定した。いま Fig. 11 のように、床面からの高さを z 、高さ z における模型の長さを $l(z)$ 、充実率を $\phi(z)$ 、抗力係数を $\overline{C_D}(z)$ 、風速を $V(z)$ 、とし、さらに空気密度を ρ 、抗力を D とすれば、

$$D = \frac{1}{2} \rho \int_z \overline{C_D}(z) U^2(z) l(z) \phi(z) dz \dots \dots \dots (3.6)$$

が成立し、なお、

$$\left. \begin{aligned} \int_z l(z) dz &= \text{外形投影面積} \\ \int_z \phi(z) l(z) dz &= \text{実質投影面積} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3.7)$$

となる。

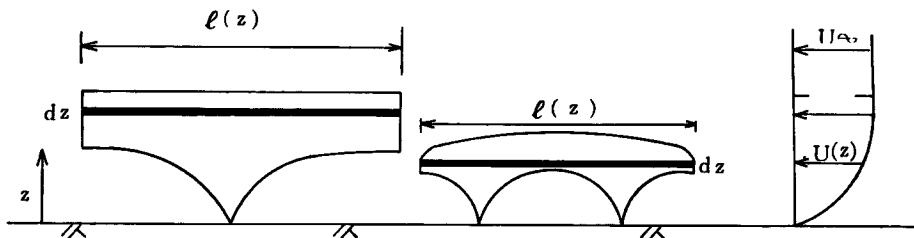


Fig. 11

抗力係数 $\overline{C_D}$ は南港連絡橋模型のように部材の配置が複雑な組合せとなる場合、これを単一の数値で与えることはできない。このため本研究では次のような 2 種類の抗力係数を定義する。

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A \phi_0} \dots \dots \dots (3.8)$$

$$C_D^* = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho \phi_0 \int U^2(z) l(z) dz} \dots \dots \dots (3.9)$$

ここに、 D は計測された抗力、 ρ は空気密度 ϕ_0 は全体としての平均充実率、 A は模型の外形面積、 U_∞ は境界層外の一様風速、 $U(z)$ 、 $l(z)$ は式(3.6)、(3.7)で定義した諸量である。 C_D の決定は実験的には極めて簡単であり、この場合、模型の形状と風速の高度分布の影響が C_D に表われるが、この結果を設計上での

Table 4

model	boundary layer	ratio of drag coefficients C_D^*/C_D				
		wind speed (m/sec)				mean value
		3	4	5	6	
sectional model gP_9	A	(1.0181)	1.4450	1.3791	1.3682	1.3838
	B	1.1209	1.1227	1.1139	1.1139	1.1182
full scale model	A	(3.0788)	2.7581	2.4925	2.3496	2.5334
	B	(1.3872)	1.3784	1.3711	1.3574	1.3690

ように用いるかについては難点が多い。 C_D^* はこれを改良した修正係数ともいうべき係数であり、風速の高度分布の影響をある程度平均化したもので、設計上高度分布をある程度任意に選定しうる利点があると思われる。境界層 A, B における部分模型および全体模型についての抗力係数比 C_D/C_D^* を示せば、Table 4 のようになり、図に示せば Fig. 12 のようになる。

計測の状態を Photos. 1 and 2 に示すが、部分模型は 1 点支持とし、全体模型は 2 点支持として計測した。これらの実験結果を総合すれば、Table 5 のような結果となる。

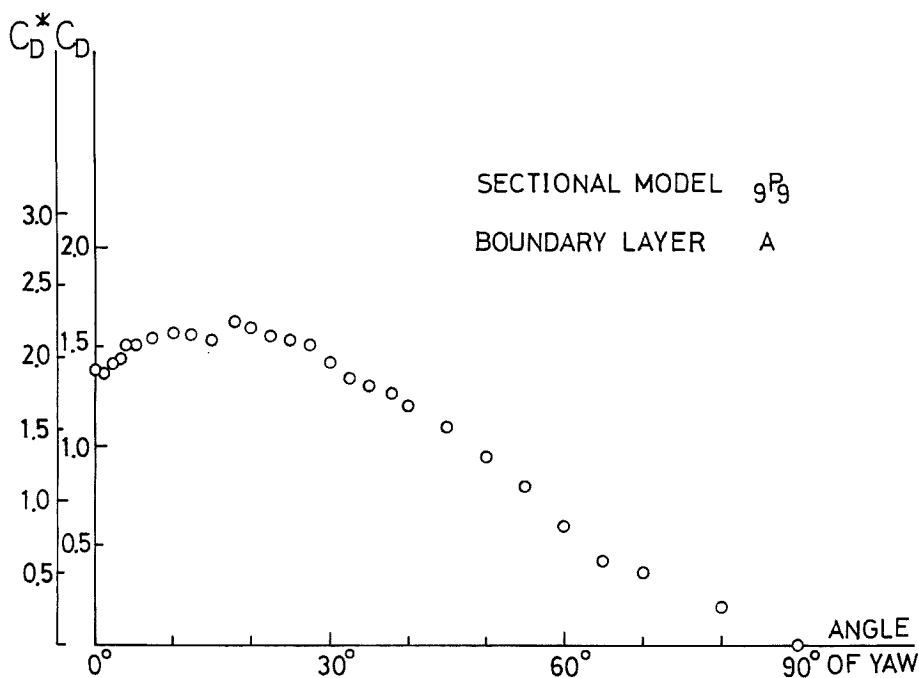


Fig. 12

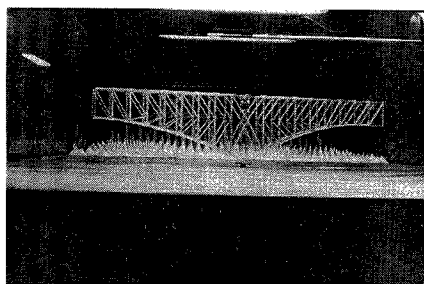


Photo. 1

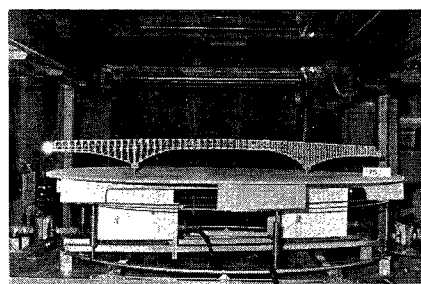


Photo. 2

Table 5

model		air flow	drag coefficient C_D, C_D^*						
			$\alpha=0^\circ$		maximum value			$\alpha=90^\circ$	
			C_D^*	C_D	α	C_D^*	C_D	C_D^*	C_D
sectional model ${}_9P_9$		boundary layer A	1.9	1.4	$20^\circ \sim 30^\circ$	2.3	1.7	0	0
		boundary layer B	2.0	1.8	$10^\circ \sim 15^\circ$	2.5	2.2	0	0
sectional model ${}_7P_9$		boundary layer B	2.0	1.75	$15^\circ \sim 20^\circ$	2.4	2.0	0	0
full scale model	windward measuring point	uniform	2.0	2.0	0°	2.0	2.0	0	0
		boundary layer A	3.0	1.2	$0^\circ \sim 30^\circ$	3.0	1.2	0	0
		boundary layer B	1.7~2.5	1.25~1.8	25°	2.6~2.8	1.9~2.2	0	0
	leeward measuring point	uniform	2.0~2.1	2.0 ~2.1	0°	2.0~2.1	2.0~2.1	0	0
		boundary layer A	3.0	1.2	$10^\circ \sim 20^\circ$	3.5	1.4	0	0
		boundary layer B	2.2	1.65	$10^\circ \sim 30^\circ$	2.2~2.5	1.7~1.9	0	0

(3) 横力係数

本研究の対象であるトラス模型については、抗力は橋軸直角方向に作用する水平流体力であるが、橋軸方向に作用する水平流体力を横力と呼ぶことにする。抗力係数の場合と同様に、横力係数を決定する場合も対象風速ならびに対象面積が問題となるので、次の2種類のケースを考慮した。

- (i) 境界層内での鉛直速度分布ならびに模型面積の鉛直分布を考慮する場合
 - (ii) 境界層外の一様風速ならびに模型全体の面積を考慮する場合
- (i), (ii)の場合に定義される係数は、それぞれ次のようになる。

$$C_{s^*} = \frac{S}{\frac{1}{2} \rho \phi_0 \sum_{i=1}^n U_i^2(z) l_i(z) \Delta Z_i} \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

$$C_s = \frac{S}{\frac{1}{2} \rho \phi_0 A U_\infty^2} \quad \dots\dots\dots (3.11)$$

ただし、 ρ : 空気密度、 S : 横力

ϕ_0 : 模型全体の充実率

Table 6

model	boundary layer	ratio of side force coefficients C_{s^*}/C_s				
		wind speed (m/sec)				
		3	4	5	6	mean value
sectional model ${}_9P_9$	A	(1.0181)	1.4450	1.3791	1.3682	1.3838
	B	1.1209	1.1227	1.1154	1.1139	1.1182
full scale model	A	(3.0788)	2.7581	2.4925	2.3496	2.5334
	B	(1.3872)	1.3784	1.3711	1.3574	1.3690

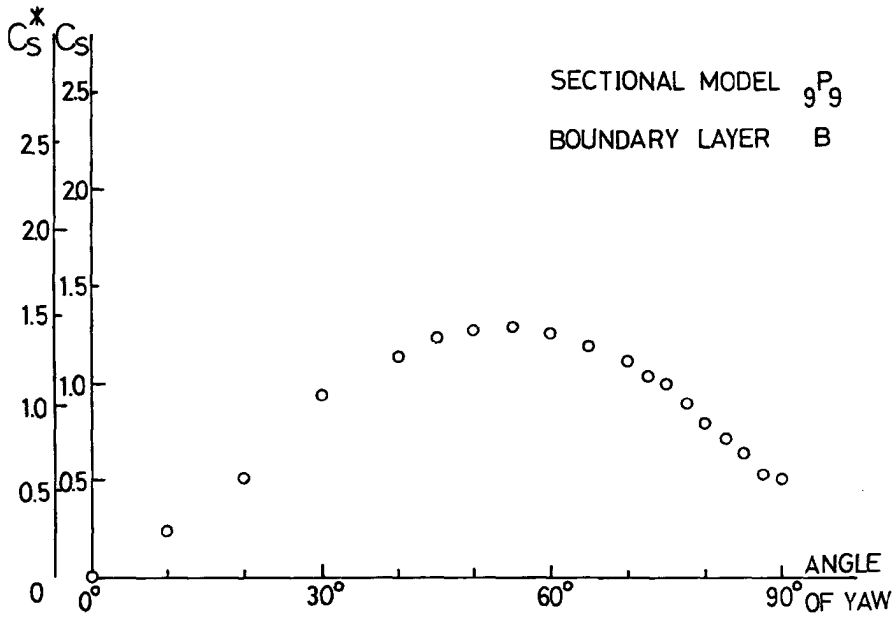


Fig. 13

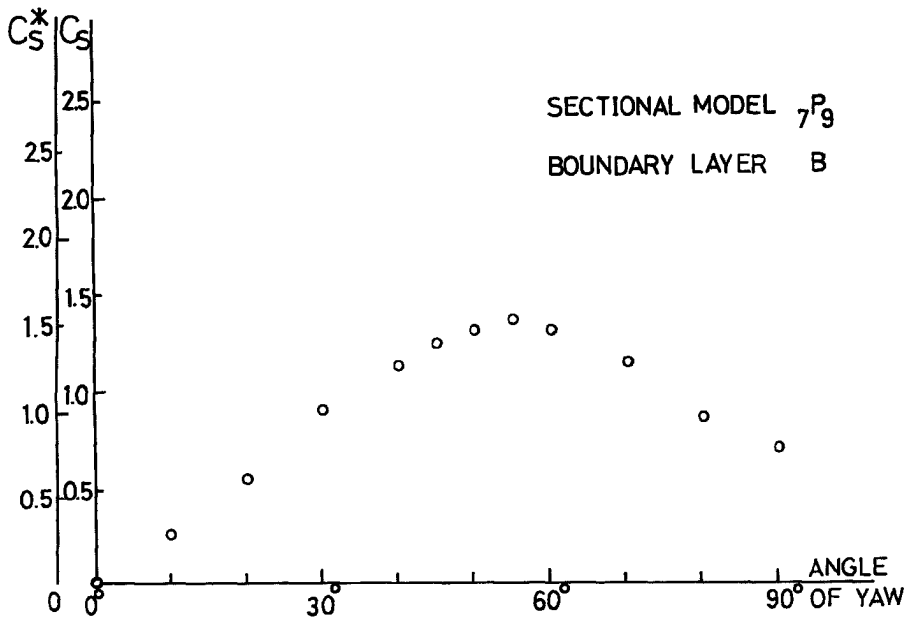


Fig. 14

$U_i(z)$: 高さ $z, z + \Delta z$ 区間における平均風速

U_∞ : 境界層外風速

A : 模型の外表面積

$l_i(z)$: 高さ $z, z + \Delta z$ 区間の模型の平均長さ

C_{S^*}, C_S : 横力係数

境界層 A, B における部分模型および全径間模型に対する横力係数比 C_{S^*}/C_S を実験結果より, 式(3・10), 式(3・11)より求めれば次の Table 6 のようになる。

なお, 実験結果を2, 3示せば Figs. 13 and 14 のようであり, これを表に整理すれば, Table 7 のようになる。

Table 7

model	air flow	side force coefficient C_S, C_{S^*}						
		$\alpha = 0^\circ$		maximum value			$\alpha = 90^\circ$	
		C_{S^*}	C_S	α	C_{S^*}	C_S	C_{S^*}	C_S
sectional model P_g	boundary layer B	0	0	55°	1.45	1.30	0.55	0.50
sectional model P_g	boundary layer B	0	0	55°	1.55	1.40	0.75	0.70
full scale model	windward measuring point	uniform	0	0	45°	1.25	1.25	0~0.2
		boundary layer A	-0.5	-0.2	30°	1.8~2.3	0.75~1.0	-2.8~-4.0
		boundary layer B	0	0	$55^\circ \sim 60^\circ$	1.1	0.8	0.2
	leeward measuring point	uniform	0	0	60°	2.1	2.1	0.9~1.2
		boundary layer A	0.8 ~ 1.3	0.3~0.5	45°	5.2~5.6	2.15~2.30	2.10
		boundary layer B	0.35~0.6	0.25~0.4	45°	2.9~3.1	2.1 ~ 2.2	1.2

(4) 空気流れ方向の空気力係数

Fig. 15 に示すように, 模型に作用する風方向の空気力を F とし, 抗力係数, 横力係数を定義した場合

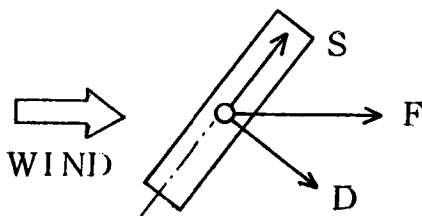


Fig. 15

と同様の2つのケースを考慮すれば, 空気力係数として, それぞれ次の2種類が考えられる。すなわち,

$$C_{F^*} = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho \phi_0 \left\{ \sum_{i=1}^n U_i^2(z) l_i(z) \Delta z \right\}} \quad \dots \dots \dots (3.12)$$

$$C_F = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho \phi_0 A U_\infty^2} \quad \dots \dots \dots (3.13)$$

である。一方ベクトル和として、

$$F = D \cos \alpha + S \sin \alpha$$

で与えられるから、例えば、式 (3・8), (3・11), (3・13) より

$$C_F = C_D \cos \alpha + C_S \sin \alpha \quad \dots\dots\dots (3.14)$$

となる。式(3・12), (3・13)の特性を示せば、Table 8 のようになり、式(3・14)の関係を表で示せば、Table 9 のようであり、2, 3の例について図示すれば、Fig. 16 and 17 のようになる。

Table 8

model			Sectional model ${}_9P_9$		sectional model ${}_7P_9$	
air flow			uniform flow	boundary layer B	uniform flow	boundary layer B
aerostatic force coefficient $C_F^* \cdot C_F$	$\alpha = -90^\circ$	C_F^*	0.5	0.6	0.6	0.6
		C_F	0.5	0.55	0.6	0.55
	maxium value	α	$-15^\circ \sim -20^\circ$	$-20^\circ \sim -40^\circ$	-20°	$-20^\circ \sim -30^\circ$
		C_F^*	2.2	2.2	2.25	2.3
		C_F	2.2	2.0	2.25	2.1
	$\alpha = -0^\circ$	C_F^*	1.75	2.05	1.8	1.9
		C_F	1.75	1.8	1.8	1.7
	$\alpha = +0^\circ$	C_F^*	1.75	1.85	1.8	1.9
		C_F	1.75	1.7	1.8	1.7
	maxium value	α	$15^\circ \sim 25^\circ$	25°	20°	$20^\circ \sim 30^\circ$
		C_F^*	2.2	2.5	2.25	2.3
		C_F	2.2	2.25	2.25	2.1
	$\alpha = 90^\circ$	C_F^*	0.5	0.6	0.6	0.6
		C_F	0.5	0.55	0.6	0.55

Table 9 Sectional model ${}_9P_9$, boundary layer B

angle of attack α	drag coefficient C_D	ratio of side force coefficient C_S	aerostatic force coefficient	
			\tilde{C}_F (calculated)	C_F (experimented)
0°	1.79	0.00	1.79	1.85
10°	2.18	0.24	2.19	2.06
20°	2.00	0.52	2.06	2.22
30°	1.80	0.94	2.03	2.19
40°	1.51	1.14	1.89	2.13
50°	1.23	1.28	1.77	1.97
60°	0.80	1.26	1.49	1.68
70°	0.42	1.12	1.20	1.35
80°	0.15	0.81	0.82	0.92
90°	0.00	0.52	0.52	0.54

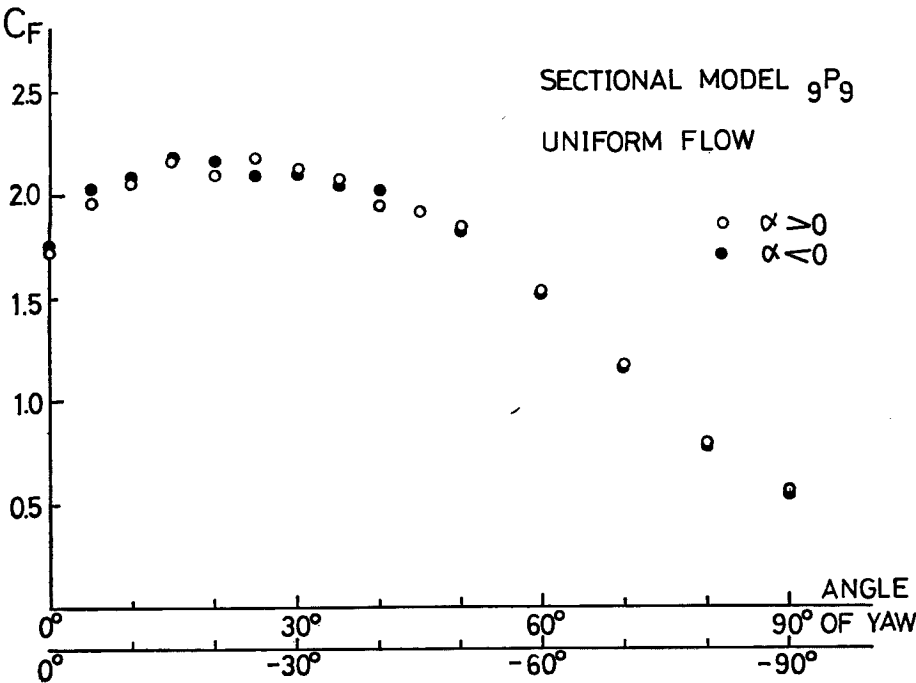


Fig. 16

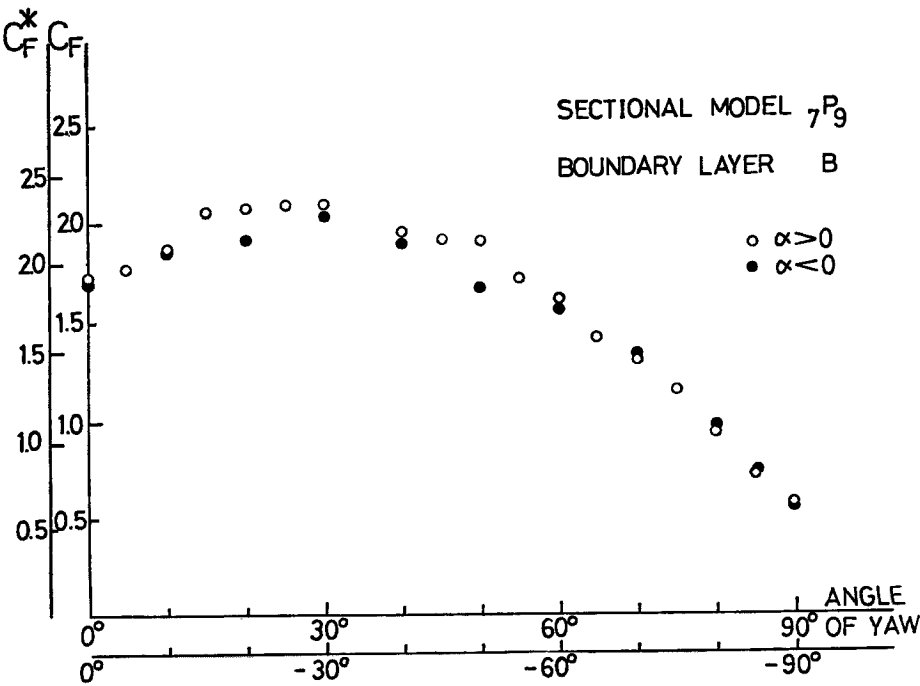


Fig. 17

(5) 吊部部分模型に作用する静的空気力と迎え角 (*angle of attack*)

これまでの考察は水平迎え角 (*angle of yaw*) に対する各静的空気力係数の諸特性について行ったものであるが、南港連絡橋の吊部は水面上約 80m の位置にあるため、いわゆる迎え角に対する静的空気力の計測を行った。水平迎え角 0° の状態での各空気力係数は次式より求めた。

$$\text{揚力係数 } C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U^2 B l} \quad (3.15)$$

$$\text{抗力係数 } C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U^2 A \phi_0} \quad (3.18)$$

$$\text{ピッチング・モーメント係数 } C_M = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho U^2 B^2 l} \quad (3.17)$$

ただし、 ρ : 空気密度、 U : 一様風速、 B : 床板の幅、 l : 模型のスパン長、 A : 模型前面外形面積
 ϕ_0 : 模型前面の充実率

本研究に用いた吊部部分模型の各寸法諸量は次のようである。

$$B=0.091\text{m}, l=0.935\text{m}, A=0.1244\text{m}^2, \phi_0=0.310$$

風速は 5.00m/sec, 10.10m/sec, 15.15m/sec, 18.58m/sec 4 種類を設定したが、これらの結果より求められる平均的空気力係数は Table 10 に示すようである。

Table 10

angle of attack	Aeroelastic Force Coefficients		
	C_L	C_D	C_M
30°	1.1213	3.382	4.609
25°	1.045	3.180	2.775
20°	1.041	3.164	1.671
15°	0.881	3.027	0.863
10°	0.710	2.676	0.466
5°	0.429	2.343	-0.459
0	-0.081	2.258	-1.770
-5°	-0.403	2.316	-2.509
-10°	-0.552	2.480	-3.535
-15°	-0.652	2.731	-4.031
-20°	-0.759	2.982	-4.523
-25°	-0.837	3.236	-5.308
-30°	-0.859	3.405	-5.700

3.5 動的応答実験

南港連絡橋の静的空気力係数の諸特性については前述のようであるが、動的問題については、次のテーマについて実験的考察を行った。すなわち、

- (i) 吊部の動的不安定の検討
 - (ii) 各部材の跳躍振動に関する検討
 - (iii) 各部材の渦励振動に関する検討
- である。

まず吊部の動的不安定性については、その振動特性を明らかにしなければならないが、本構造物の場合、下部構造の支持条件により、振動数、振動形、および減衰特性がかなり変化する。特に、減衰性については

正確にこれを類推することは困難であるため、安全をみて、減衰比0.002~0.003を対象として検討した。この結果曲げ振れフラッター限界風速は100m/secを超え、ほとんど問題とならない。また跳躍振動、渦励振動ともに危険となる可能性はほとんどないと考えられる。

3・6 実験結果に対する考察

これまでの解析より、南港連絡橋の耐風性については次のように評価できる。

1. 静的空気力に関して

(i) 静的空気力と水平迎え角

従来、長大トラス橋に作用する空気力としては、抗力が中心課題とされてきたが、本研究の結果、横力(橋軸方向の空気力)もかなり大きな値を示し、静的空気力としては横力も抗力と併せて考慮しなければならない。これらの抗力および横力は水平迎え角(橋軸直角方向を 0° とする)とともに変化し、その特性は次のようである。主塔の左右に9パネルづつ張り出している状態および中央吊部に7パネル、反対側に9パネル張り出しているいわゆる架設時の状態では、橋軸と $70^\circ\sim 80^\circ$ の角度で風をうける場合が最も大きな抗力を与え、また橋軸と $30^\circ\sim 45^\circ$ の斜風をうける場合が最も大きな横力を与える。完成時には抗力、横力の水平迎え角に対する特性は上記の架設時の場合とほぼ同じ傾向を示すが、ただ抗力が最大となる風方向の橋軸となす角度が $70^\circ\sim 90^\circ$ と少し広範囲となっている。このような水平迎え角に対する抗力、横力の特性は、一様流、せん断流を受けた場合共に、同じ傾向を示す。一方、揚力については水平迎え角が $0^\circ\sim 90^\circ$ の範囲にわたって負となるが、その大きさは抗力、横力に比べて極めて小さい。

(ii) 充実率と抗力

水平迎え角が 0° のとき、充実率(実質面積/外形面積)は、 P_0 模型に対して24.5%であり、水平迎え角に対する充実率の変化特性は、抗力のそれによく似ており、充実率と抗力係数の間にはかなり高い相関があると考えられる。

(iii) 抗力の分担率

抗力がどのように分担されるかについて、水平迎え角 $0^\circ\sim 35^\circ$ の範囲で検討した。これは Parkinsonの研究¹²⁾に基いて考察したものであるが、その結果上流側トラスの方が下流側トラスより大きな抗力を受け持つとは限らず、水平迎え角が $12^\circ\sim 28^\circ$ の範囲では下流側トラスの方が大きな抗力を受け持つことが求められた。

(iv) 静的空気力に与える床板の影響

橋軸直角方向の水平な風による静的空気力に関して、床板はほとんど影響せず、揚力の絶対値がやや大きくなる程度である。一方迎え角(angle of attack)に対する南港連絡橋吊部断面に作用する静的空気力は平板断面の特性に似た傾向を示しており、この場合、2枚の床板が大きく貢献しているものと思われる。また迎え角が $0^\circ\sim 30^\circ$ の間では揚力係数の負勾配は見られず、これによる動的不安現象は起りえないと考えられる。

(v) 抗力横力の作用点

南港連絡橋に作用する抗力および横力の作用点は、支点まわりの転倒モーメントを計測した結果、ほぼ主塔部下支承上68mの位置にあり、各断面でほとんど変化していない。

2. 動的安定性について

(i) 南港連絡橋の各部材に対する動的耐風性についてはそのメンバー断面が正方形断面に近いため、風琴振動と跳躍振動について解析を行った。その結果、耐風安定上、最も不利と考えられる斜材(1400×1300)について、風琴振動による振幅は極めて小さく(0.8mm以下)、まず安全である。また跳躍振動の限界風速は極めて大きな値となり、現実に起りうるものではない。

(ii) 南港連絡橋全体としての動的挙動は、水平な風が対象になると考えられ、この場合、吊部の曲げ振れ2自由度連成フラッターの不安定現象が実験的に求められた。しかし、たわみ・ねじれ振動の各種のモードの組合せに対して、このフラッター限界風速はおよそ170m/secを超え、現実の風速では起りえない

い。

4. む す び

本研究は南港連絡橋を対象に、長大トラス橋の耐風性について2, 3の基礎的特性を明らかにした。すなわち、静的空気力特性および動的安定性について実験的に考察したが、動的にはなんら問題はないのに対して、静的空気力特に抗力および横力はかなり大きくなるため、設計上十分に留意する必要があるといえる。このような構造物に関する空気力特性は、なお未解決の問題は残されているが、実験的に検討せざるをえず、今後ともこの種の構造物についての研究が必要である。

本研究では一様風の下での耐風性という従来の研究法に加えて、境界層実験により、せん断流れをシュミレートする試みを行った。これは構造物が長大であるのみならず高層構造物であることを考慮したものであるが、この結果空気力係数も必ずしも一意的に決定されず、設計上合理的な係数が定義されなければならないことが明らかとなった。

しかしながら自然風は風洞内空気流とは自ら異ったものであり、特に乱れた空気流がどのような効果を与えるかについては十分な考察が行われなかった。今後現地測定により、こうした自然風の特性をより合理的に考慮する方法が研究されなければならないであろう。

本研究を遂行するにあたり、京都大学工学部土木工学教室梁研究室の各位の多大の御協力をいただいたことに感謝の意を表するものである。また阪神高速道路公団南理事、同南港建設部笹戸部長を始め公団関係者の御協力に合せて感謝の意を表するものである。

参 考 文 献

- 1) Task Committee on Wind Forces of the Committee on Loads and Stresses of the Strstructural Division: Wind Forces on Structures, Paper No. 3269, Trans. ASCE, Vol. 126, Part II, 1961, pp. 1124-1198.
- 2) 土木学会：本州四国連絡橋技術調査報告付属資料，耐風設計指針解説。(1964)
- 3) Lawson, T.V.: Method of Producing Velocity Profiles in Wind Tunnels, Atmospheric Environment, Pergamon Press, Vol. 2, 1968, pp. 73-76.
- 4) 勝田・土屋・村上：建物列による風の遮蔽に関する風洞模型実験，日本建築学会論文報告集第155号，1969，pp. 41-47. および同第156号，1969，pp. 51-58.
- 5) 勝田・村上・正田：建物周囲気流に関する実験的研究(I)および(IV)，日本建築学会論文報告集第177号，1970，pp. 89-93 および同第180号，1971，pp. 29-37.
- 6) Lloyd, A.: The Generation of Shear Flow in Wind Tunnel, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 93, 1967, pp. 79-96.
- 7) Counihan, J.: An Improved Method of Simulating an Atmospheric Boundary Layer in a Wind Tunnel, Atmospheric Environment, Pergamon Press, Vol. 3, 1969, pp. 197-214.
- 8) Standen, N.M., Dalglish, W.A. and Templin, R.J.: A Wind Tunnel and Full-Scale Study of Turbulent Wind Pressures on a Tall Building International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo, 1971, pp. 199-210.
- 9) Davenport, A.G. and Dalglish, W.A.: A Preliminary Appraisal of Wind Loading Concepts of the 1970 Canadian National Building Code, International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo, 1971, pp. 441-450.
- 10) Cermak, J.E. and Sadeh, W.Z.: Pressure Fluctuations on Buildings, International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo, 1971, pp. 189-198.
- 11) Teunissen, T.: Doctoral Dissertation to University of Toronto, 1972.
- 12) Laneville, A. and G.V. Parkinson, Effects of Turbulence on Galloping of Bluff Cylinder, International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo, 1971, pp. 61-72.