

塔状構造物のギャロッピング特性と防振対策

白石 成人・松本 勝・石崎 浩
白土 博通・長田 信

ON THE AERODYNAMIC IMPROVEMENT OF GALLOPING OSCILLATION OF TOWER LIKE STRUCTURES

By *Naruhito SHIRAISHI, Masaru MATSUMOTO, Hiroshi ISHIZAKI,*
Hiromichi SHIRATO and Makoto OSADA

Synopsis

This study aims to clarify the aerodynamic effects of the "corner cut" for the sake of the mitigation of aerodynamic instability of the tower like structure. Two-dimensional rectangular cylinders with various cutting of their corners were tested in a wind tunnel, and their response, stationary pressure and stationary aerostatic force were measured in smooth flow. Besides flow visualization in water flume was carried out in order to visualize the effect of "corner cut" to the flow pattern.

Finally, the optimum size of corner cut was discussed by use of the elastic full scale model of tower of a long spanned cable-stayed bridge.

1. ま え が き

斜張橋は他の形式に比べ軽量構造設計が可能であり、その合理性、軽快ですっきりとした外観から建設が盛んとなっている。こうした動きとともに、現代技術の進歩・新材料の開発・さらには経済性の面からの要請などによって橋梁の大規模化、長径間化が促進され、たとえばスペインのルナ橋（中央支間長 440 m）やカナダのアナシス橋（同 465 m）のような長大斜張橋も建造されている。一方、橋梁のデザインも多種多様である。塔の形状だけを取りあげても、名港西大橋のようなA型、秩父橋のような逆Y型、アダミヤ橋や新淀川橋梁に見られる単独柱形式、計画中の東神戸水路橋ではH型が用いられ、各橋とも独自の外観を構成している。これらは橋梁が単に交通路として機能するだけでなく、自然の中に調和し、あるいは都市景観における一種のモニュメントとなるなどその外観がなす役割への配慮の表れといえる。

このような技術面やデザイン面での革新の結果、美観に優れた長径間斜張橋が建設されることとなったが、反面これに伴って構造減衰および固有振動数が低下し、空力不安定現象の生じる可能性も増大してきた。このため桁部はもちろんのこと、塔部やケーブル部においても空力応答特性を把握し、耐風安定化対策を進める必要があらう。

橋梁の架設段階および完成時における各種空力不安定現象の制振対策にはメカニカルなものと空力的なものがある。メカニカルな対策としては、相互連結方式、油圧ダンピング方式、Tuned Mass Damping¹⁾方式などが挙げられるが、しかしこれらの形態は架設状態においてのみ設置が許される場合もあり、また美観、施工、維持などの面で問題となることが多い。これに対し空力制振対策は断面ごとに対策が異なることや、

気流の乱れ、風の傾斜角等によって制振効果に変化するためその選定は容易でないものの、空力不安定現象を根本から抑制することが可能となる。最適な空力制振対策の選定は各種空力現象の発生機構の解明と関連しており、今後の発展が期待されるところである。

本研究ではこのような現状を踏まえ、長大斜張橋主塔部のギャロッピングに対し、主塔断面に隅切りを施設することによって空力的な安定化対策を試みた。この断面に関し、空力応答特性、定常圧力および定常空気力特性を把握するとともに可視化によって断面周りの流れの状態を明らかにする。さらに三次元空力弾性全体模型を用いることで、実構造物への適用性についても検討を加えた。

2. 風洞実験および水槽実験

2.1 はじめに

本研究で対象とした長大斜張橋塔部の全体図と実橋値を Fig. 1 に示す。並列矩形断面を有するこの形式は他の斜張橋に見られない独特の外観を呈し、優れた美観を構成している。しかし主塔先端部が水平材や斜材等で連結されていないため、極めて振動応答感度の高い構造系であると考えられる。とくに橋軸方向の風に対しギャロッピングの発生が予想され、完成系においてケーブルによる構造減衰の増大や乱れの効果がどの程度期待し得るか不明であることから、何らかの制振対策が要求される。

さて、ギャロッピングについては、Den Hartog が風の作用により負の減衰力を受けることと関連づけて以来多くの研究がなされている。剝離流フラッタの中でもギャロッピングは理論的に予知可能な唯一の例であって、定常空気力特性に基づく準定常理論によってリミットサイクルの振幅等の非線形振動特性まで求めることができる。さらに自然風の持つ乱れを考慮した乱流中でのギャロピック特性についても定常空気力特性から予知できることが Parkinson²⁾、Novak³⁾ らによって示されている。

矩形断面のギャロッピングの発生機構は準定常的に次のような説明がなされている。Fig. 2 に示すように物体の振動によって流れが非対称となると、下面では剝離せん断層が trailing edge に接近し物体背面の wake 領域からの流体補給が十分行われず、その結果内部循環流が形成され圧力低下を招く。一方上面では剝離せん断層が trailing edge より離れるために流体補給が行われ圧力回復がなされる。この圧力低下・圧力回復による上下面の圧力差が振動を助長する力となって物体に作用する。ギャロッピングの特性には、このような断面上面の剝離せん断層と下面の剝離せん断層が相互に密切に関連している。

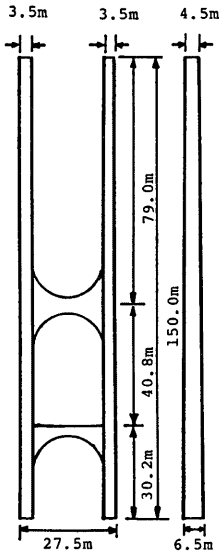


Fig. 1 Shape of pylon.

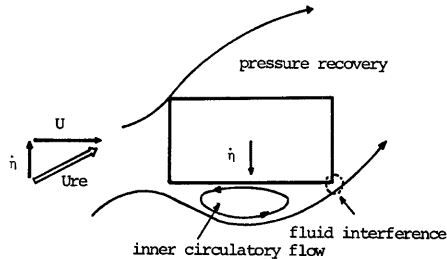


Fig. 2 Mechanism of exciting force due to body movement.

矩形断面柱は実際の構造物としてよく用いられるため、Parkinson 以来多くの人々による研究がなされてきた。Bearman & Trueman⁴⁾ は臨界断面比付近では背面の近くで形成されていた渦が、断面比の増加に伴い trailing edge の影響を受けて下流側に移動し、この結果背圧係数が回復することを示した。また Lane-vill & Young⁵⁾ はカルマン渦の位置に着目した流れの可視化によって、時間平均流の流れのパターンは断面比に応じて4つの段階に分類できると仮定した。

一方、空力不安定現象の防振対策については主に箱桁を対象として研究されている。その一例として、門崎高架橋ではギャロッピングの制振を目的に、その高欄部に2枚のフラップを、さらにウェブ部分に下部デフレクタをそれぞれ断続的に設けている。このような attachment を付設することにより優れた防振効果が得られるが、これは上面および下面において剝離せん断層の再付着が促進されるためである。また、これらは前縁での剝離角にも影響し、これに伴って後流渦形成位置や抗力が変化することも知られている。Roshko & Kenig は矩形物体の前面部に物体から離れてある大きさの平板を設置し、その距離と抗力の関係について研究した。その結果ある最適な間隔のとき剝離せん断層は物体側面に付着しやすくなり、抗力が著しく減少することを見出している。この研究は空力不安定現象の抑制を目的としたものではないが、再付着を促進させる方法として有効であると考えられる。本研究で用いた隅切りはこの特性を考慮したもので、その大きさを調節することで前縁での剝離を抑え、剝離せん断層の再付着によるギャロッピングの抑制を試みた。

2.2 実験目的

本研究では、まず各隅切り断面の空力応答特性、断面周りの圧力特性および流れの状態などを明らかにする目的で、二次元剛体模型を対象に、(a)応答振幅測定実験、(b)定常空気力測定実験、(c)定常圧力測定実験を実施した。また水槽実験による流れの可視化観察を行い、風洞実験との比較を行う。これら二次元模型による実験結果を踏まえ、実構造物における隅切りの効果について三次元空力弾性全体模型を対象とし応答振幅測定実験を通して検討する。

(a)、(c)および三次元模型に関する実験には京都大学工学部土木工学教室内に設置された吸込式エッフェル型風洞を用いた。この風洞は高さ1.5 m、幅2.5 m、長さ8 mであって、風速は約0.7 m/s～20 m/sの範囲で連続的に制御することができる。また(a)(c)の二次元剛体模型による実験に際しては、模型支持ターンテーブル、模型支持アームなどによる攪乱を防止するために測定部側面に導風壁を設けている。(b)に使用した風洞は、同教室内に設置された吹き出し式エッフェル型風洞(高さ1.0 m、幅0.7 m、長さ5 m)であり、先ほどと同様に気流攪乱防止用の導風壁を設けている。風速は0～15 m/sの範囲で制御可能である。また風洞内平均風速はNPL型ピトー管を風洞内に置き、総圧と静圧の差をデジタルマノメータ(DP20-A型、林製作所)によって測定した。

一連の実験はいずれも橋軸方向の風を対象としているが、これは前述したように、この方向の風に対しギャロッピングが予想され制振対策が不可欠なためである。

2.3 実験概要

(1) 二次元剛体模型実験

二次元剛体模型は塔基部より塔高の70%高さの位置の断面を使用し、隅切りの大きさを種々変化した。模型の形状および圧力孔の位置をFig. 3に示す。模型No. 1～No. 6は正方形、No. 7～No. 9は直角二等辺三角形の隅切りが設けてある。基本断面(No. 0)の橋軸方向の長さを B 、同直角方向の長さを D とし、隅切りの大きさを D を用いて表した。また(a)、(c)で用いた模型の縮尺は実橋の1/35、(b)は同1/80である。

(a)応答振幅測定実験……模型は風洞内に鉛直に曲げ1自由度支持され、8本のコイルスプリングにより剛性を与えられている。振動変位はスプリング端に取り付けられたコの字型エレメントに貼り付けた歪ゲージの抵抗値の変化として検出し、ホイストンブリッジ(新興通信工業社製)、動歪計(6008F型、新興通信工業社製)、ローパスフィルタ(E3201型、NF回路設計ブロック社製)を通じた後、ペン書きレコーダ(WTR 281型、渡辺測器製作所KK製)に波形を記録した。Table 1に模型の実験条件および物理諸元を示す。

Table 1 Test conditions of two-dimensional models.

	Section	f (Hz)	m ($\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}^2$)	δ (20 mm)	δ (15 mm)	δ (10 mm)	δ (5 mm)
0	original section	2.9297	0.5994	0.01180	0.01103	0.01019	0.00939
1	corner cut $D/18$	2.9578	0.6124	0.01116	0.01067	0.01011	0.00829
2	corner cut $2D/18$	2.9365	0.5960	0.01421	0.01079	0.01018	0.00916
3	corner cut $3D/18$	2.9286	0.6037	0.01008	0.00967	0.00921	0.00827
4	corner cut $4D/18$	2.9524	0.6134	0.01360	0.01347	0.01329	0.01250
5	corner cut $5D/18$	2.9303	0.6094	0.01346	0.01217	0.01152	0.01001
6	corner cut $6D/18$	2.9920	0.5945	0.01153	0.01059	0.00964	0.00823
7	corner triangular cut $2D/18$	2.9001	0.6148	0.01080	0.01040	0.01030	0.00820
8	corner triangular cut $4D/18$	2.9241	0.6063	0.01080	0.01020	0.00980	0.00930
9	corner triangular cut $6D/18$	3.0121	0.5989	0.01066	0.01021	0.00962	0.00921

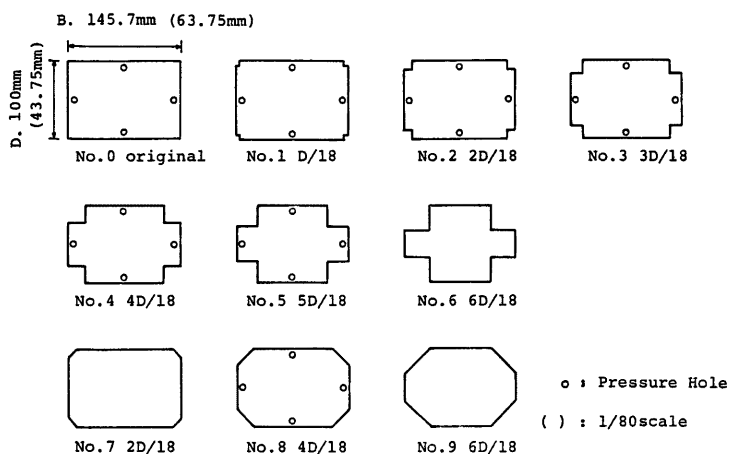


Fig. 3 Section of 2-dimensional models.

(b)定常空気力測定実験……模型を2台のロードセル型AC天秤(LMC 3501-05, 日章電気株式会社)により水平に支持し, 定常空気力を電氣的に検出する。この信号を動歪計(前出), ローパスフィルタ(前出)を通じた後, マルチコーダ(MC 6612-6H, グラフテック社製)に記録した。測定時の平均風速は4 m/sであり, 空気力係数の算出は次式を用いた。

$$C_D = \frac{F_X}{\frac{1}{2}\rho U^2 DL} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$C_L = \frac{F_Y}{\frac{1}{2}\rho U^2 DL} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし, (F_X : 抗力, F_Y : 法線力, ρ : 空気密度, L : 模型スパン長(600 mm), U : 平均風速)

また, F_X , F_Y および迎角 β は Fig. 4 に示すとおりであり, 測定は $\beta = 0^\circ \sim 20^\circ$ の範囲で行った。

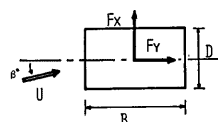


Fig. 4 Definition of aerostatic force.

(c) 定常圧力測定実験……ターンテーブル上に二次元剛体模型を設置し、各迎角に対する模型表面の平均圧力を測定する。模型の各面の中心に設けた圧力孔はアルミニウム製導管により端板まで導かれ、ここからビニール製（一部シリコン製）導管を経て差圧型圧力変換器（DD101K, 豊田工機製）に入力した。

また差圧計の他方にはピトー管静圧を導き両者の差圧を検出し、直流アンプ（AA 2300, 豊田工機製）、ローパスフィルタ（前出）を介して平均圧力をフォトコーダ（2932 型, 横河電気）によって記録した。測定は 0° から 20° の範囲で実施し、定常圧力係数の算出は次式に拠った。

$$C_p = \frac{\bar{P} - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (3)$$

ただし、 $\bar{P}$: 模型圧力孔の動圧, P_∞ : 風洞内静圧

(2) 水槽実験概要

水槽実験用模型は実橋の $1/65$ とし、メタクリル酸樹脂製である。使用した水槽は、京都大学工学部土木工学教室に設置された回流式水槽で、その概略を Fig. 5 に示す。模型は水槽内に鉛直片持ち支持され、上流側タンクに整水板、および水路部にハニカム・金属メッシュを設けることにより整流がなされている。水槽両壁面からのスリット光線により水中に光平面を作り、水素気泡発生装置（SCR-PG, 開発電子測器研究所）によって白金線からこの平面内に水素気泡を発生させ可視化を行う。流れの様子は水槽底面のアクリル板を通して 35 mm カメラによって撮影した。実験での流速は 20 cm/s とし、その設定は直径 48 mm の円柱を測定部に設置し、後流に生成されるカルマン渦の放出周波数を熱線流速計（CTA 1011, LINEARIZER 1013, VOLMETER 1008, 日本科学工業社）で求め、ストローハル数からの逆算に拠った。この流速でのレイノルズ数 $Re = UD/\nu$ は 1.08×10^4 である（ただし、 $D = 0.054 \text{ m}$, $\nu \approx 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ とした）。

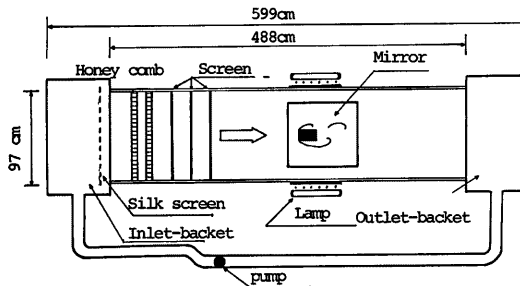


Fig. 5 Water tunnel configuration.

Table 2 Test conditions of three-dimensional models.

	Section (corner cut)	B/D (70% H)	B/D (100% H)	f (in-phase) Hz	f (out- phase) Hz	δ (5 mm) (in-phase)	δ (5 mm) (out- phase)
10	Original section	1.46	1.29	5.0000	6.2069	0.01023	0.01000
11	1.6 D/18	1.19	1.05	4.8724	5.6973	0.01105	0.00537
12	1.6 D/18 with 3.3 D/18 plate	1.19	1.05	4.8363	5.6534	0.01171	0.00681
13	Top 9% - 2 D/18 rest - 1.6 D/18	1.19	1.51	5.0656	6.0096	0.01300	0.00693
14	2 D/18	1.68	1.51	5.3571	6.2791	0.01523 (10 mm)	0.00892 (10 mm)

(3) 三次元空力弾性全体模型実験

三次元空力弾性全体模型は実橋の 1/130 縮尺とした。この模型を原型とし、これに長方形プレートを追加することで隅切りを与える。主塔は D が一定であるのに対し B は高さ方向によって異なるが、隅切りの寸法は一定とした。Table 2 に今回の実験断面形状および物理諸元を示す。模型は主柱および水平材内部にリ年青銅の心材を配して所要の剛性を確保し、外形材は全体を小さなブロックに分割してそれぞれピンで心材と剛結している。振動変位は模型塔頂部に設置された豆球を光学式変位計 (OP-EYE, UDT 社) で検出し、増幅器 (301 B/AC, UTD 社), 演算器 (試作品) を通じた後、ペン書きレコーダ (前出) に記録した。

3. 実験結果

3.1 二次元剛体模型実験結果

3.1 (1) 応答特性 Fig. 6 から Fig. 10 に各隅切り断面の迎角 0° における応答図を示す。原型断面 (No. 0) では無次元風速 $V_r \approx 9$ からギャロッピングが発現している。これに対し、 $D/18$ (No. 1), $2D/18$ (No. 2) 隅切り断面については低風速域での渦励振が見られるもののギャロッピングの発現は認められず、No. 0 に比べ安定した結果となった。また、この断面では $\beta = 2^\circ, 4^\circ, 9^\circ$ として実験を行ったが、いずれの場

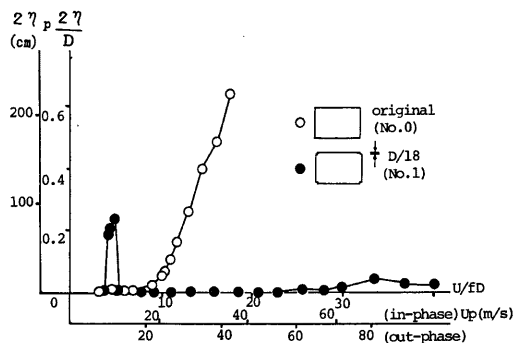


Fig. 6 Deflectional amplitude (No. 0, No. 1).

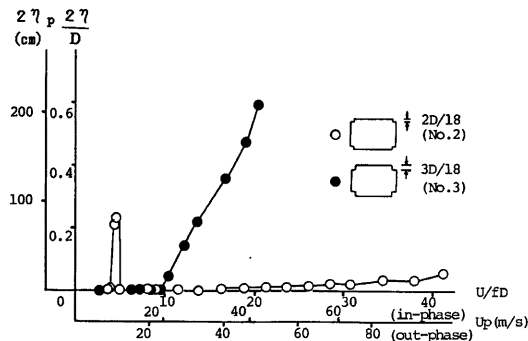


Fig. 7 Deflectional amplitude (No. 2, No. 3).

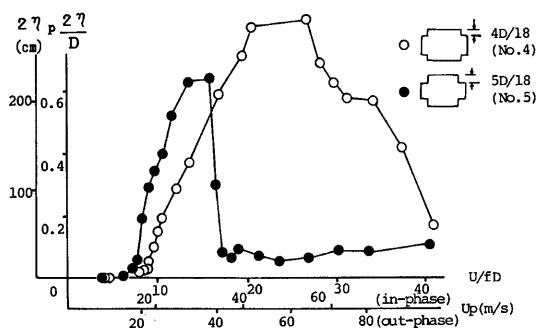


Fig. 8 Deflectional amplitude (No. 4, No. 5).

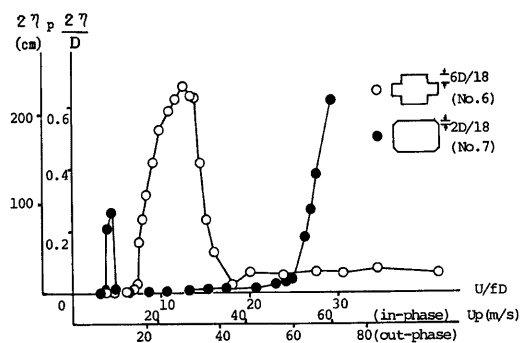


Fig. 9 Deflectional amplitude (No. 6, No. 7).

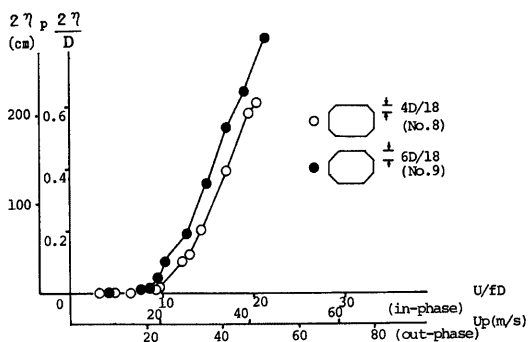


Fig. 10 Deflectional amplitude (No. 8, No. 9).

合もギャロッピングは発生していない。ところが、3 D/18 (No. 3) では再び No. 0 と同様 $V_r \approx 10$ からギャロッピングが生じている。さらに 5 D/18 (No. 5), 6 D/18 (No. 6) に至ると、渦励振と思われる極めて大きな振動がそれぞれ $V_r \approx 15$, $V_r \approx 12$ をピークとして発現している。次に三角隅切りを施した場合であるが、どの断面でもギャロッピングが発生している。ことに No. 7 は No. 2 と同じ 2 D/18 隅切りであるのに抑制効果が劣る結果となり、形状の相異による影響が大きいことをうかがわせる。各断面の比較から、D/18 および 2 D/18 の正方形隅切りに優れた防振効果が認められた。

3.1 (2) 定常空気力特性 Fig. 11 と Fig. 12 に各断面の定常空気力特性を示す。まず抗力係数 C_D であるが、 $\beta = 0^\circ$ の値について原型断面からモデル番号順に比較すると、2 D/18 断面ではほぼ原型断面の半分の値にまで低下し極小となっていることがわかる。これは前縁での剝離が抑えられ、Wake の幅が狭まったためと考えられる。次に揚力係数 C_L であるが、原型断面では $\beta = 9^\circ \sim 10^\circ$ でピークを迎える鋭い Negative slope を呈しており、準定常的にギャロッピングが発生することに対応している。これに対し 2 D/18 断面では他の断面に比べ最も緩やかな勾配を示し、 $\beta = 4^\circ$ でピークを抑え、 $\beta = 8^\circ$ では正直に転じている。down lift の値も極端に小さくギャロッピングに対して安定であることがうかがえる。この効果は Roshko らが指摘したように、wake の幅が小さくなることで物体後縁付近での再付着が促進されたためと判断される。一方、2 D/18 断面とともに応答振幅実験で安定であった D/18 断面では、ピーク値が原型に比べ若干小さいものの明確な Negative slope を示している。またギャロッピングの発現した 3 D/18 断面については 2 D/18 断面と非常に類似した特性が得られており、概ね C_L 値の特性とギャロッピングを結び付けるのは難かしいと考えられる。

3.1 (3) 定常圧力特性 Fig. 13 から Fig. 18 に各断面の静的圧力と迎角 β の関係を示す。原型断面について $\beta = 4^\circ$ から迎角の増加に伴い上面の圧力は回復、下面の圧力は低下し、 $\beta = 12^\circ$ で圧力差が最大となっている。これは、先に定常空気力特性において down lift のピーク値が $\beta = 10^\circ$ であったこととずれを生じているが、定常圧力測定実験では各面中点の圧力を計測したために圧力分布の非一様性が十分に反映できなかったものと思われる。各断面における上下面の圧力差の最大値を比較すると、2 D/18 断面でとくに小さな値となっている。また、その時の迎角は $\beta = 3^\circ$ であって、これも他のどの断面より小さな値である。このことは揚力係数 C_L の特性を裏付けるものであり、圧力差が小さいために物体を振動させるに十分な力が得られないと判断される。

次に上下面の圧力が逆転する迎角について考えると、原型断面では、 $\beta = 17^\circ$ と非常に大きな値であるが、D/18 断面では $\beta \approx 10^\circ$, 2 D/18 断面では $\beta \approx 8^\circ$ と減少している。しかしこの場合も、ここから増加に転じ、3 D/18, 4 D/18 断面ではそれぞれ $\beta = 10^\circ$, $\beta = 17^\circ$ を示している。準定常理論に従うと、小迎角での圧力逆転は、物体の変位速度が低いところでの再付着による振動の抑制を意味し、振動が発達する前にこれを抑える力が働きやすい。この観点からも 2 D/18 隅切りによる優れた防振効果が示される。

最後に、 $\beta = 0^\circ$ の模型側面の C_p 値を各断面について比較すると、2 D/18 および D/18 断面でおよそ $C_p = -0.65$ とかなり低下している。これは、剝離せん断層が物体側面に接近していることを示しており、この結果、後縁での再付着が容易となり、前述のように振動を発達しにくくと考えられる。またこのことは抗力係数 C_D の特性とも対応し、隅切りを設けることで前縁での剝離を抑え、後縁での再付着を促進させることが可能であると判断される。

3.2 水槽実験結果

各断面の迎角 0° における流体パターンを Photo. 1 から Photo. 10 に示す。原型断面から D/18, 2 D/18 と隅切りを大きくするに従って、前縁での剝離が抑制され、剝離せん断層が物体側面に接近していることが確認できる。これらの特性は、前述した定常圧力特性における D/18, 2 D/18 断面の側面圧力係数が低下していたこと、および、定常空気力特性での C_D 値が、原型断面に比べ極端に小さくなったことを裏付けている。これに対し、No. 3 では wake の幅がわずかではあるが広がる傾向をみせ、次の No. 4 では明確に拡大

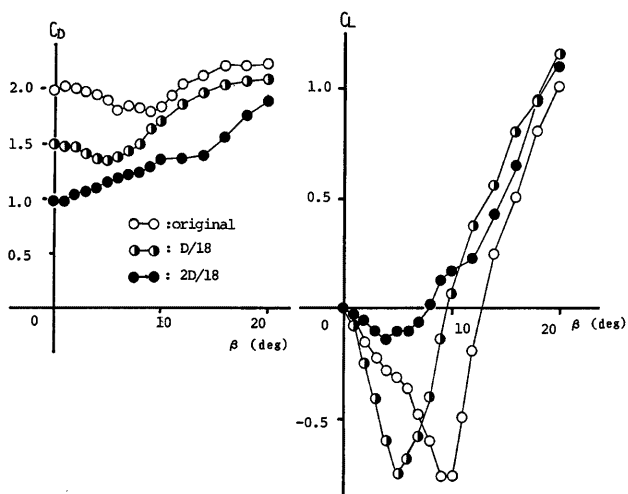


Fig. 11 Aerostatic force coefficient curve (No. 0, No. 1, No. 2).

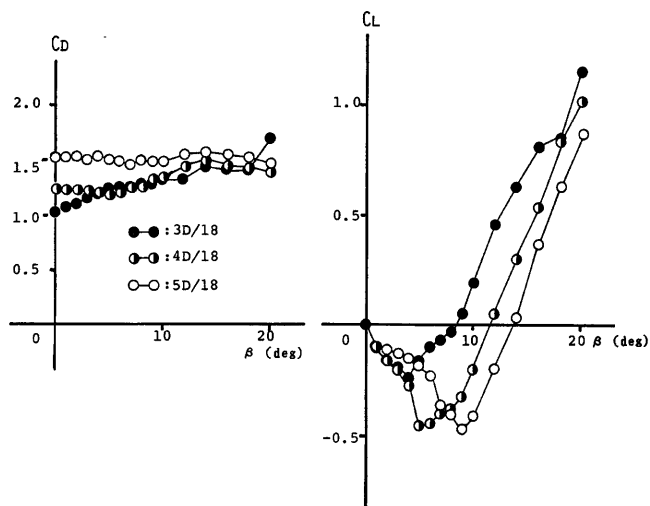


Fig. 12 Aerostatic force coefficient curve (No. 3, No. 4, No. 5).

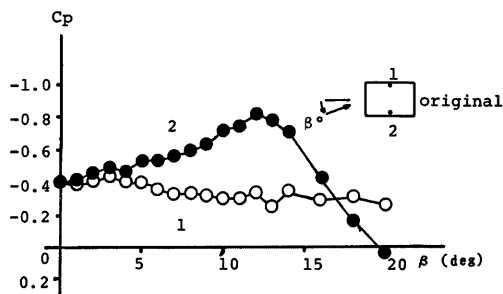


Fig. 13 Static pressure v.s. pitching angle (No. 0).

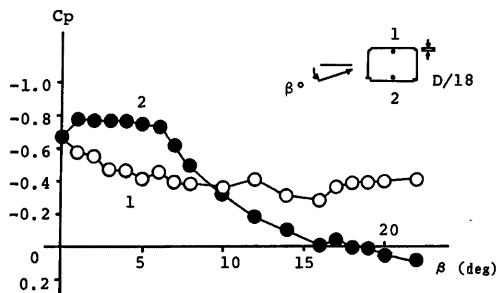


Fig. 14 Static pressure v.s. pitching angle (No. 1).

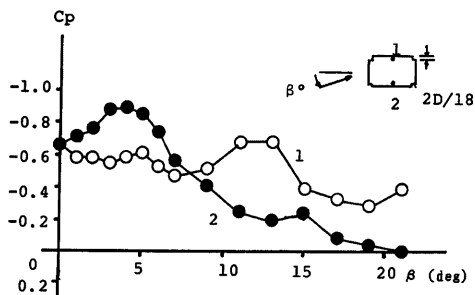


Fig. 15 Static pressure v.s. pitching angle (No. 2).

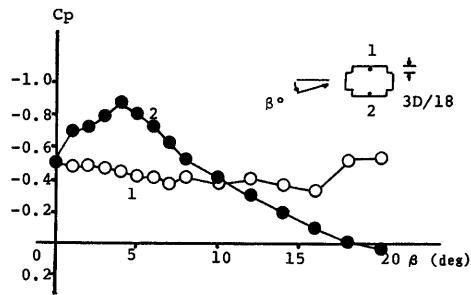


Fig. 16 Static pressure v.s. pitching angle (No. 3).

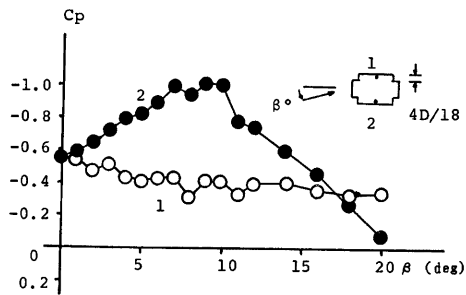


Fig. 17 Static pressure v.s. pitching angle (No. 4).

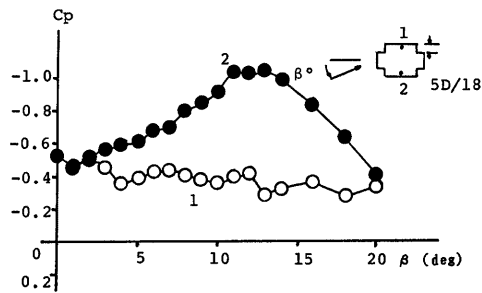


Fig. 18 Static pressure v.s. pitching angle (No. 5).

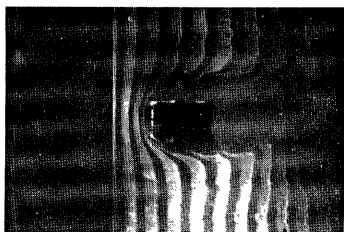


Photo. 1 Flow pattern (No. 0).

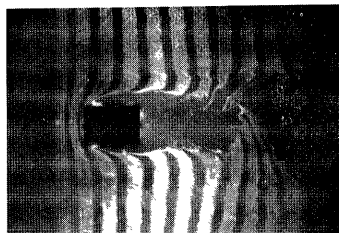


Photo. 2 Flow pattern (No. 1).

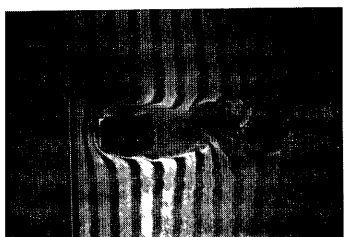


Photo. 3 Flow pattern (No. 2).

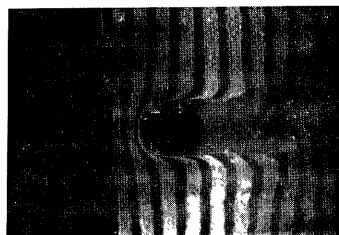


Photo. 4 Flow pattern (No. 3).

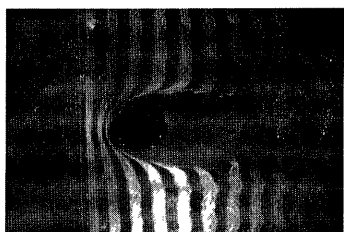


Photo. 5 Flow pattern (No. 4).

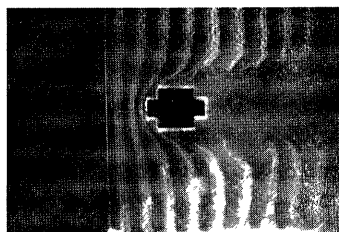


Photo. 6 Flow pattern (No. 5).



Photo. 7 Flow pattern (No. 6).

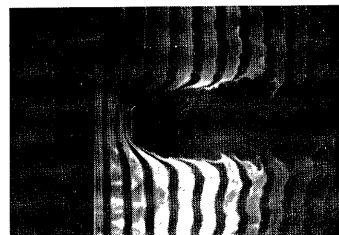


Photo. 8 Flow pattern (No. 7).



Photo. 9 Flow pattern (No. 8).

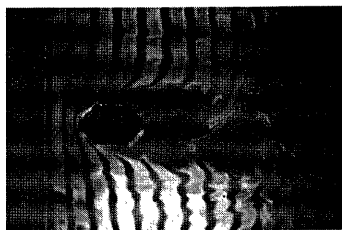


Photo. 10 Flow pattern (No. 9).

している。この状況も先ほど同様、 C_p 値、 C_D 値が $2D/18$ 断面に比べ増加していることに対応するものである。また、さらに隅切りを大きくした No. 5, No. 6 では **Photo. 6** と **Photo. 7** で明らかなように、前縁で一旦剥離した流れが隅切りの面に衝突し、もう一方の edge から再び剥離を起こしている。つまり No. 3 および No. 4 も含め、 C_p 値あるいは C_D 値が増加した原因はこのような隅切りによる再度の剥離のためと考えられ、隅切りが大きくなるとともに剥離角（剥離点における物体表面と剥離流れとのなす角）が拡大するものと思われる。今回 $B/D=1.46$ の矩形断面に正方形および直角二等辺三角形の隅切りを設けたが、正方形隅切りについては $2D/18$ 前後のある値において前縁での剥離が最も抑制されると思われる。この値よりも小さな隅切りでは十分な剥離抑制の効果は期待できず、またこれより大きな隅切りでは前述したように、隅切りによって出来た一方の edge から再び剥離が起るため抑制効果が失われると判断される。次に三角形隅切りについてであるが、**Photo. 8** から **Photo. 10** のようにいずれの断面でも十分な剥離の抑制はなされていない。この失敗では前縁での微細な流れの様子が把握できないため断定は避けねばならないが、leading edge が正方形隅切りと比べ鋭くないことから、前縁での剥離を不十分なものとし、隅切り面に沿う格好で流下した流れがもう一方の edge の影響を受けたものと考えられる。三角形隅切りの断面はいずれもギャロピングが発生しており、今回の場合に限れば有効な制振対策とは考えにくい。

3.3 三次元空力弾性全体模型実験結果

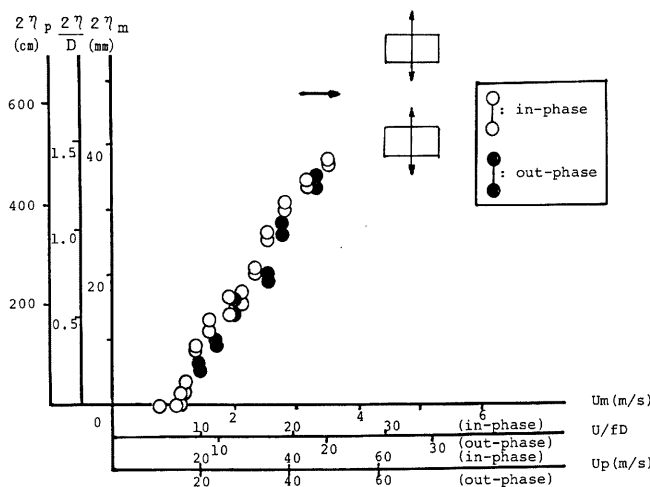


Fig. 19 Deflectional amplitude (No. 10).

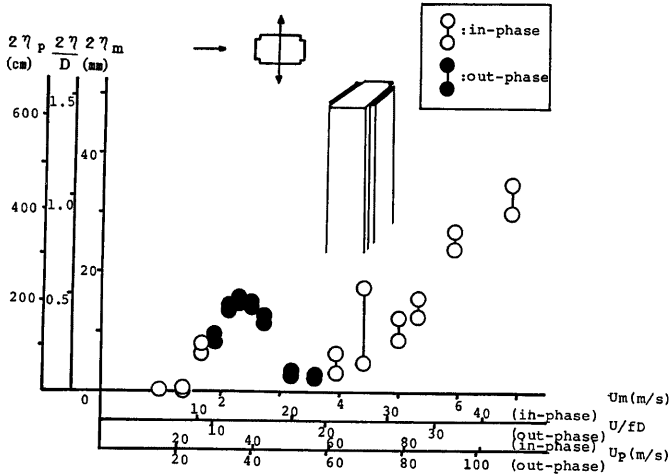


Fig. 20 Deflectional amplitude (No. 11).

二次元剛体模型の実験結果から $2D/18$ 程度の隅切り断面の空力安定性が結論づけられた。本研究では次に三次元空力弾性全体模型を用いて、実際の塔に隅切りを施した場合の安定化効果について検討を加えるため、応答振幅測定実験を行った。

Fig. 19 に original (No. 10) は断面の応答特性を示す。二次元模型の結果とはほぼ同様の $V_r \approx 8$ から同相のギャロッピングが発生している。なお図中同相とは二本柱が同方向に振動する場合、逆相は対称運動をする場合を指しており、このモデルでは、同風速において両モードはそれぞれ安定である。このモデルの側面（橋軸直角方向の面）にプレートが付設し、 $1.6D/18$ 隅切りとした場合の応答図を Fig. 20 に示す。 $V_r \approx 12$ をピークとする比較的大きな逆相の渦励振が生じており、これが一旦収束した後 $V_r \approx 25$ から同相のギャロッピングが発生している。No. 10 に比べギャロッピングの発現風速はかなり高まったものの、二次元実験で得られたような効果は認められなかった。この原因は次のように考えられる。主塔の断面比 B/D は上部ほど小さく塔頂では $B/D \approx 1.29$ となっている。このため 70% 高さでの断面 ($B/D \approx 1.46$) では、再付着がなされても、頂部付近では不十分となり制振効果が得られなかったと判断される。そこで Fig. 21 に示すような傾斜板を上部 10% に各面 5 枚ずつ付け、側面の気流を斜め方向に強制的に流し after body を伸ばす効果を与えた。結果は、Fig. 22 に示すようである。Fig. 20 と比較すれば明らかなように、ギャロッピングの発現は認められず、渦励振も小さくなっている。この結果を考慮し、塔頂付近での after body を確保するために頂部 9% については模型の前後（橋軸方向面）にプレートが付設し、隅切りを $2D/18$ 、塔頂での $B/D \approx 1.51$ の値として実験を行った。なお、他の部分での隅切り、断面比は同じである。Fig. 23 に示すように非常に安定した結果が得られている。またこのモデルについて偏角 $\beta = 2^\circ, 6^\circ, 10^\circ$ の風による実験も行ったが、この結果と同様にギャロッピングの発現は認められず安定していた。

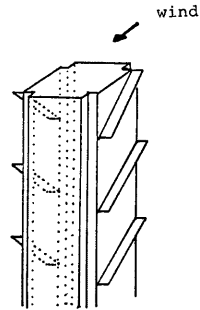


Fig. 21 View of strakes.

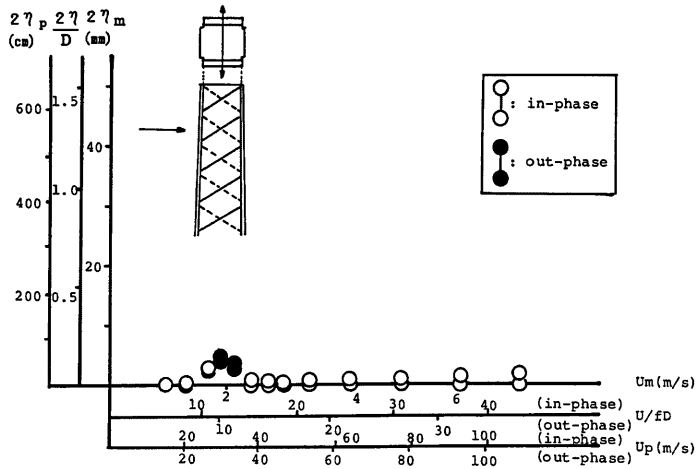


Fig. 22 Deflectional amplitude (No. 12).

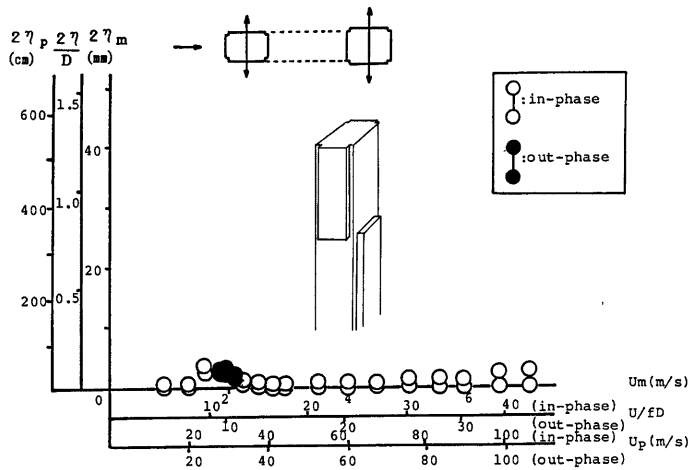


Fig. 23 Deflectional amplitude (No. 13).

最後に頂部9%以下の部分についても $2D/18$ 隅切りとし、 $\beta=0^\circ$ および 2° で測定した。Fig. 24に示すように $V_r \approx 11$ （逆相）の渦励振のみで迎角による変化は見られず、先ほどのNo. 13と特性はほぼ同じと考えられる。高風速域において同相および逆相の加振を行ったが、いずれもすぐに収束した。

このように三次元実験の結果からも隅切りはギャロッピングの対策として有効であることが示された。しかしこの制振効果には断面比が重要な因子となっているため制振対策を行う場合、この値に対しても十分な考慮が必要と思われる。

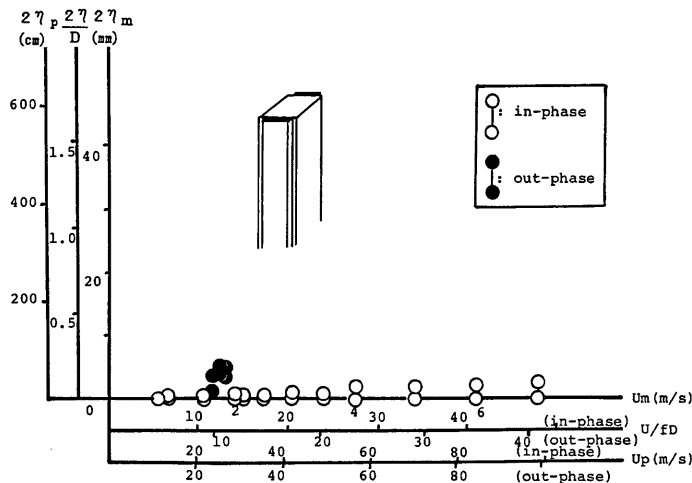


Fig. 24 Deflectional amplitude (No. 14).

4. む す び

本研究では、空力的なギャロッピングの安定化対策として隅切りを有する断面の空力特性を把握すること、および、この断面の実構造物への適用性について検討を加えた。これを通じ得られた結論をまとめると以下のようである。

(1) 二次元剛体模型実験で用いた $B/D=1.46$ 断面では、 $D/18$ 、および $2D/18$ の正方形隅切りによる制振効果が大きく、他の隅切りでは、ギャロッピングか、または大きな渦励振の発現が認められる。

(2) 各断面における定常空気力係数を比較した場合、とくに $2D/18$ 隅切り断面の抗力係数が小さいこと、および揚力係数の Negative slope が緩やかであることが示された。

(3) 定常圧力測定の結果、 $2D/18$ 、 $D/18$ 隅切りを有する断面は小迎角のもとで上下面の圧力差が僅かであること、および上下面の圧力が逆転する迎角も他と比べ小さいことが示され、振動が発達しにくいと思われる。また $\beta=0^\circ$ での C_p 値がこの断面で低いことから、剥離せん断層が物体側面に接近していると判断される。

(4) 水槽での可視化観察からも、 $2D/18$ 断面での前縁では剥離が抑えられ、Wake の幅の狭小ことが示された。このように適度な大きさの隅切りは剥離を抑制し後縁での再付着を促進させる効果を有する。隅切りが小さいと剥離を十分に抑えることはできず、また大きいと $6D/18$ 断面に見られるように、隅切り面に流れが衝突し、新たに生じた edge から再び剥離を起すため制振効果を失うことになる。

(5) 三次元空力弾性全体模型実験の結果より隅切りの制振効果は有効であり、実橋への適用性も十分であると判断される。しかしこの制振効果は断面の Bluffness に依存するものであって、とくに Bluff な断面では剥離せん断層の再付着が不十分となり、ギャロッピングの発現する可能性がある。このため、断面比を考慮した上で、その断面に最適の隅切りを見出す必要があろう。

最後に、本研究を遂行するにあたり風洞実験・データ整理等に多大な御協力を得た、リクルート・松井俊彦氏ならびに京都大学工学部橋梁工学研究室の方々にご心より感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 辻 松雄：構造力学的耐風制振対策，日本風工学会誌，20号，1984.
- 2) Parkinson, G.V. : Aerodynamic Galloping in one Degree of Freedom, Proc. Int. Conf. Wind Effects on Building and Structures, 1963.
- 3) Novak, M. : Galloping Oscillations of Prismatic Structures, Proc. ASCE, Vol. 98, No. EM 1, 1972.
- 4) Bearman, P.W., D.M. Trueman : An Investigation of the Flow around Rectangular Cylinders, Aeronautical Quarterly, August 1972.
- 5) Laneville, A., Lu Zhi Young : MEAN FLOW PATTERNS AROUND TWO-DIMENSIONAL RECTANGULAR CYLINDERS AND THEIR INTERPETATION, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic Vol. 14, 1983, pp. 384-398.
- 6) Roshko, Koenig : Interaction Effects on the Drag of Bluff Bodies in Tandem, AERODYNAMIC DRAG MECHANISMS of Bluff Bodies and road vehicles, symposium held at the general mortors research laboratories.