九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

ある箱型構造物の空力弾性的特性について

中村，泰治
九州大学応用力学研究所 ： 教授

溝田，武人
九州大学応用力学研究所 ： 助手

https://doi.org/10.15017/4743490

出版情報：應用力學研究所所報. 39, pp.37-46, 1973-03. 九州大学応用力学研究所
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

ある箱型構造物の空力弾性的特性について*

中　村　泰　治**
溝　田　武　人***

概　　要

一様な風洞気流中に断面比 1：2 の矩形断面を有する箱型構造物模型をおき，静的三分力特性，中央高さ断面における周辺流れの煙による観察，曲げおよび捩りフラッタなどに関する実験を行なったので，その結果について述べる．

1. まえがき

最近，土木，建築構造物の長大化，高層化の傾向が著しいが，それらの傾向は工法進歩にともなう構造減衰の低下と相俟って，構造物の耐風安定性の重要性を一層高めている．すでにいくつかの例により[1]，高層建築物においても剛性が低下すればフラッタなどの危険な状態が充分出現し得ることが指摘されている．

本論文は，断面比 1：2 の矩形断面をもつ箱型構造物模型について，一様気流中における静的ならびに動的特性に関する風洞実験の結果を示す．はじめに，風洞天秤による静的三分力特性の計測と中央高さ断面における周辺流れの煙による観察について述べる．ついで，流れに直角に振動し得るばね支持模型により種々の迎角におけるギャロッピングとうず励振について記す．最後に，捩り振動模型による捩りフラッタの実験結果を述べる．捩りフラッタの実験結果以外の詳細については，文献2)，3）を参照されたい．

2. 風洞と模型

用いた風洞は，九州大学応用力学研究所大型風洞である．風洞測定部は横型カート（高さ×幅×長さ＝2×4×6 m）と縦型カート（高さ×幅×長さ＝4×2×6 m）の2種類であり，静的実験には横型カートを用い，動的実験には主として縦型カートを用いた．測定部の気流特性は良好で，乱れ度は約0.1％である．

模型は，断面が 15×30 cm，高さが 77 cm の矩形柱である．（図1）天秤測定には高風速で使用するために木製模型を，動的実験には軽い発泡スチロール製の同一寸法模型を用いた．模型下部には直径56 cm の円形地面板を取りつけた．動的実験では模型を支持するばね装置が下部につき，このため測定部下壁に比較的大きい穴があく，地面板をつけた理由は，この穴を通過する気流の模型振動への影響をで

* 構造物の耐風性に関する第2回シンポジウム論文集（東京，昭和47年）に掲載
** 九州大学教授，応用力学研究所
*** 九州大学助手，応用力学研究所

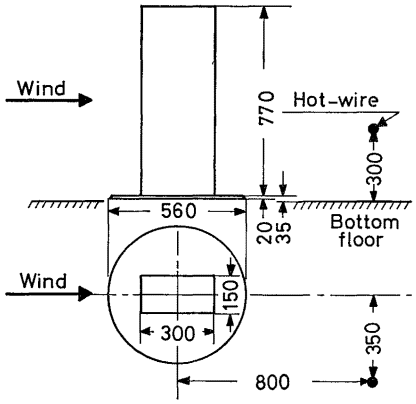
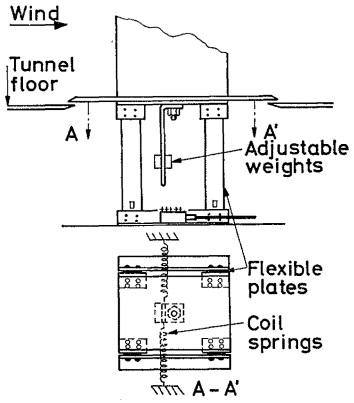
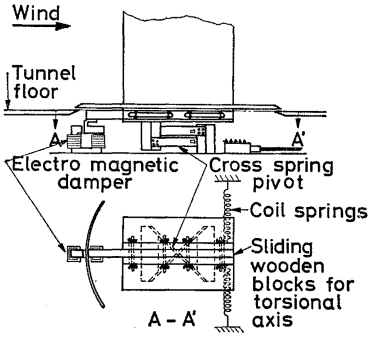


図　1　　箱型構造物模型



(a)　曲げ振動用



(b)　捩り振動用

図　2　　模型支持装置

きるだけ小さくするためである．風洞壁境界層の厚さは約 10 *cm* であり，このため，模型高さの約 10 %程度は境界層の中にあることになる．動的実験では，模型はそれぞれ図 2 (a)，(b)に示すような板ばねにより支持された．このようなばね機構により，流れに直角方向の並進（以下，簡単のためこれを曲げと称する）あるいはある軸まわりの捩りの一自由度振動が可能になった．ともに構造減衰はきわめて小さい．模型の変位は，板ばねに貼ったストレンゲージにより検出された．

迎角は適宜，0～90°の範囲でかえた．ここに迎角 0 °とは断面短辺が流れに垂直になる方向を示す．また，実験中，熱線プローブにより後流の速度変動を同時に記録した．プローブ位置は風速により若干異なるが，図 1 に示されている．

3. 静的三分力特性と煙による流れの観察

図 3 は，風洞天秤によって測定した模型の静的三分力特性である．ただし，

$$C_L=\frac{L}{1/2\rho V^2(2h)l}, \tag{1}$$

$$C_D=\frac{D}{1/2\rho V^2(2h)l}, \tag{2}$$

$$C_M=\frac{M}{1/2\rho V^2(2h)^2l}. \tag{3}$$

ここに，

L: 揚力　$2h$: 模型断面の長辺（=30*cm*）　ρ: 空気密度　D: 抗力

l: 模型の高さ（=77*cm*）　M: 断面中心におけるピッチング・モーメント（頭上げ正）

である．試験風速は，6.9，15.5 および 20.0 *m/s* であり，模型の断面長辺を基準とする R 数はそれぞれ 1.42，3.20，4.12×10^5 となる．図 3 によれば，実験した範囲で R 数の影響はほとんどみられない．

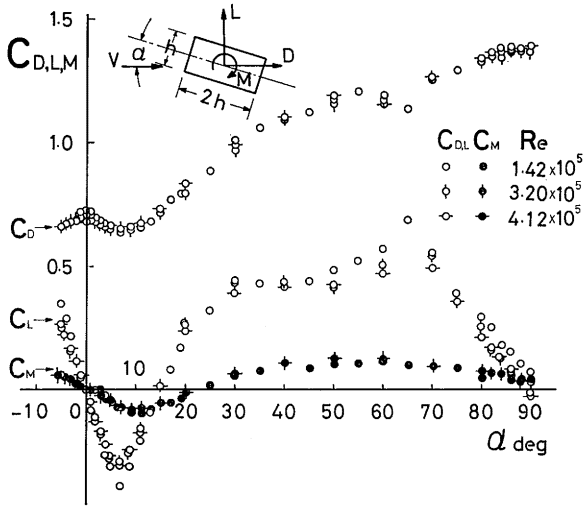


図　3　空力三分力特性

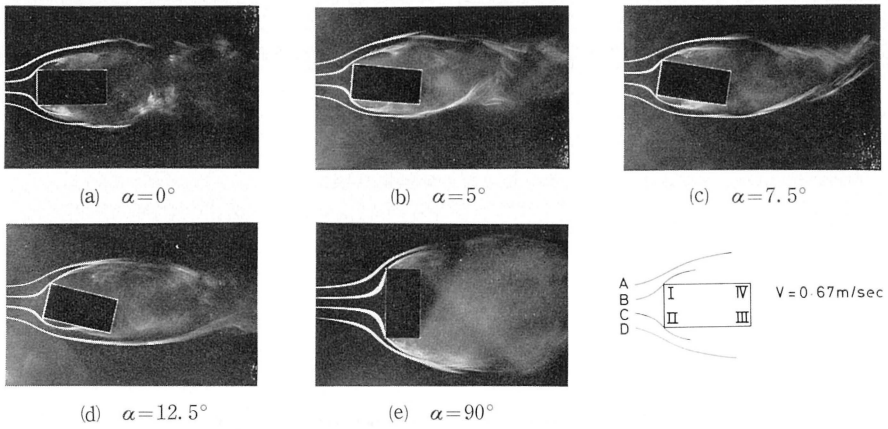


図　4　　中央高さ断面における模型周辺の流れ

静的三分力特性の特徴として迎角 0° および 90° 付近における負の揚力傾斜を挙げることができる．Parkinson[4] が二次元模型の研究で指摘したように，このような負の揚力傾斜の存在は，前縁の角部における流れのはく離と側面における再付着に関係する．このことを確かめるために，中央断面における周辺流れの煙による観察を試みた．図 4 に示すように，$\alpha=0\sim5°$ 付近では角 I における shear layer の曲率よりも，角 II におけるそれの方がはるかに大きく，このため上面よりもむしろ下面の圧力が低下するように考えられる．（負の揚力の発生）また，$\alpha=7.5°$ において角 III で流れが再付着することと図 3 における揚力傾斜の符号の逆転とが対応している．図 5 はストローハル数 $S(=fh/V)$ の測定結果であるが，流れの再付着によってストローハル数が急に増していることがわかる．負の揚力傾斜の存在はギャロッピングの可能性を示す．Den Hartog の判別基準を本模型に適用すると，

$$0\leq\alpha\leq75°,$$

または

$$65\sim70\leq\alpha\leq90°,$$

で，

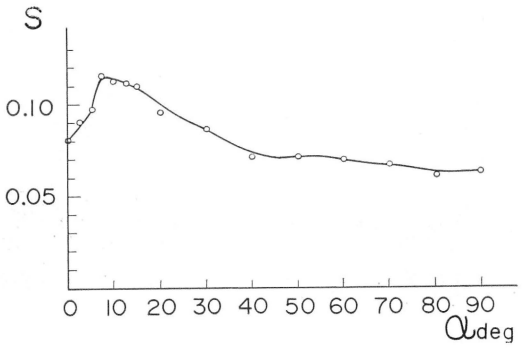


図　5　　ストローハル数の変化

$$C_{L\alpha}+C_D\leq 0, \tag{4}$$

であり，この迎角範囲でギャロッピングを生ずることが予想される．

4. ギャロッピングとうず励振

流れに直角に振動し得る模型につき（図2(a)），迎角を種々かえてその振動応答を測定した．とくに，ギャロッピングに対する線型準定常理論の適用範囲の検討を試み，自由振動法により非定常揚力の空力ダンピングを測定し，理論との比較を行なった．本節はそれらの結果について述べる．

無次元風速を $\overline{V}=V/fh$ で定義すると，高い $\overline{V}$ におけるギャロッピングについては，準定常理論がよく妥当する[4]．しかし，準定常理論は，仮定により運動の履歴の影響を無視しているので，流れの遅れによる効果が大きい低風速では適用できないであろう．また，うずによる励振も低風速において生ずる．したがって，準定常理論がどの程度の低風速まで適用できるか検討することは興味深い．Parkinsonは，非線型振動論の手法を用いてギャロッピングにおけるリミット・サイクルの振幅の推定を行なったが，本論文ではより直接的に，微小振幅における線型準定常理論を検討することにした．また，自由振動法によれば，必ずしも発振する場合のみならず，減衰振動における理論の検討も可能である．

はじめに模型を 0° に固定し，模型質量の調整および補助コイルばねの付加により，固有振動数を $f_0=0.5\sim4\ Hz$ にかえて，発振時のリミット・サイクルの振幅 η_L の測定が行なわれた．風速は $0.5\sim10\ m/s$ であった．($R=1\times10^4\sim2\times10^5$) つぎに，振動数をほぼ $f_0=1.40\ Hz$ または $0.69\ Hz$ に固定し，迎角を $0\sim90°$ の範囲でかえて実験を行ない，非定常揚力の空力ダンピングの自由振動法による測定が行なわれた．図6はリミット・サイクルの振幅 η_L の無次元風速 $\overline{V}$ に対する変化を示す．迎角は 0° である．図6において，自励振動の発生は第一と第二の領域にわかれる．うずとの共振風速を $\overline{V}_{cr}$ ($=1/S=12.5$) とすると，第一の発振は $\overline{V}_{cr}$ よりもはるかに低い風速で生じ，ほぼ $\frac{1}{2}\overline{V}_{cr}$ の付近にある．第二の発振はほぼ $\overline{V}_{cr}$ に始まり，風速の増加とともに振動は次第に烈しくなり，η_L がます．これらの結果は二次元模型に関する結果[5]とよく対応する．

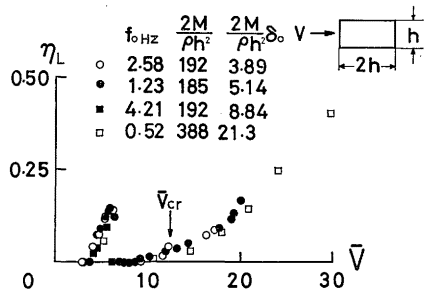


図　6　　曲げフラッタにおけるリミット・サイクルの振幅

図7は迎角をかえたときの振動応答の代表例である．図8はそれらをまとめた安定限界図であり，斜線に囲まれた範囲が不安定領域で，2重斜線は不安定なリミット・サイクルの存在を示す．迎角が 0° より少しましても応答にはあまり変化がなく，第一と第二の発振域がやはり存在する．第一の発振の存

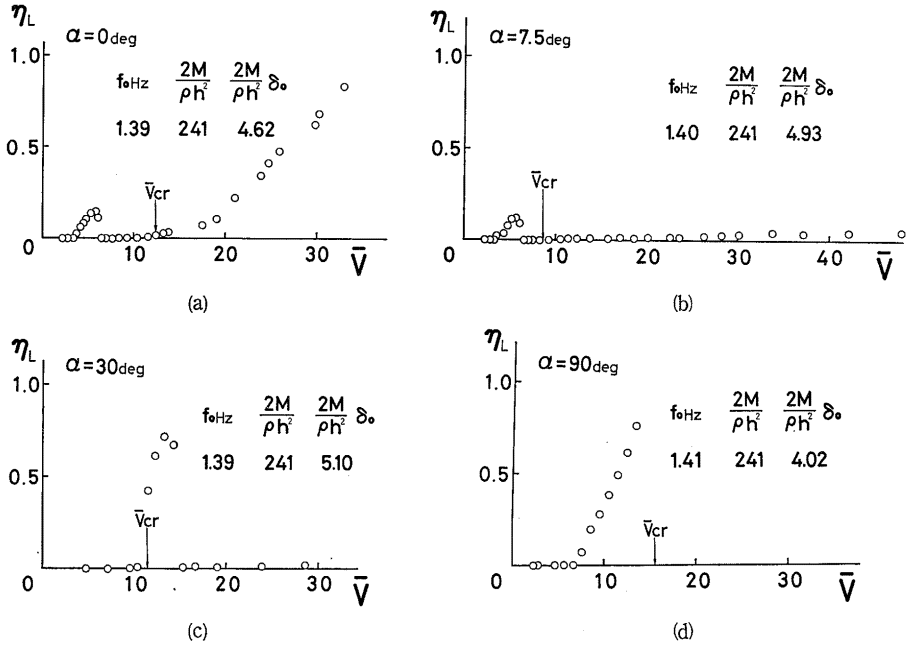


図　7　　種々の平均迎角におけるリミット・サイクルの振幅

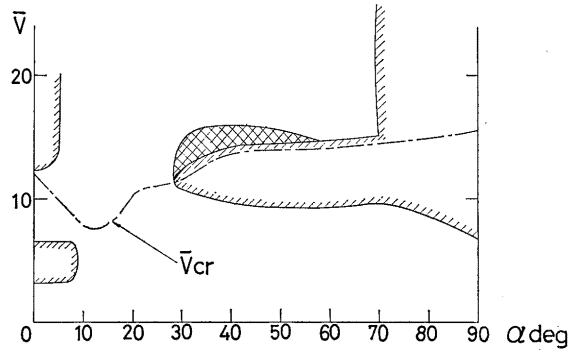


図　8　　曲げフラッタの安定限界図

在は，二次元模型に関し文献 5) に記されたのが最初のようで，Parkinson の報告[4] にはない．最近，Novak も三次元模型につき同様な不安定現象の存在を指摘している[6]．ただし，発振の機構は明らかでない．$10<\alpha<30°$ の範囲では，実験したすべての風速範囲で，振動は強く減衰した．静止模型に対する後流変動の記録は，カルマン渦の存在を明瞭に示しているにもかかわらず，うずによる励振がないことは興味深い．$30<\alpha<65\sim70°$ の範囲の励振は，$\overline{V}_{cr}$ の前後で生じているのでうずによる励振と考えられる．$0<\alpha<7.5°$ および $65\sim70<\alpha<90°$ の範囲で生ずる高風速域の自励振動は(4)と対応し，ギャロッピングと考えられる．

つぎに，微小振幅における非定常揚力の空力ダンピングの測定結果について述べる．単位高さ当りの

揚力をLとし，無次元化した空力ダンピングを k_a とすれば，k_a は次式で与えられる．

$$L=L_y y+L_{\dot{y}}\dot{y}, \tag{5}$$

$$k_a=-\frac{L_{\dot{y}}}{\rho f h^2}=\frac{2M}{\rho h^2}\delta_a, \tag{6}$$

$$\delta_a=\delta-\delta_0. \tag{7}$$

ただし

M: 単位高さ当りの模型質量

δ: 対数減衰率

δ_0: 静止空気中の対数減衰率

図9に代表的な迎角に対する k_a の測定結果を示す．実線は線型準定常理論の値，

$$k_a=(C_{La}+C_D)\overline{V}, \tag{8}$$

である．k_a の値は一般に振動振幅 $\eta(=y/h)$ により異なるが，ここでは $\eta=0.10$ における値である．実験結果によれば，一般に $\overline{V}\simeq\overline{V}_{cr}$ において振幅の影響は著しい．とくに $\alpha=0°$ においてそうであった．しかし，$\overline{V}\simeq\overline{V}_{cr}$ を除く低風速および高風速域では，その影響は小さく無視し得る程度であった．

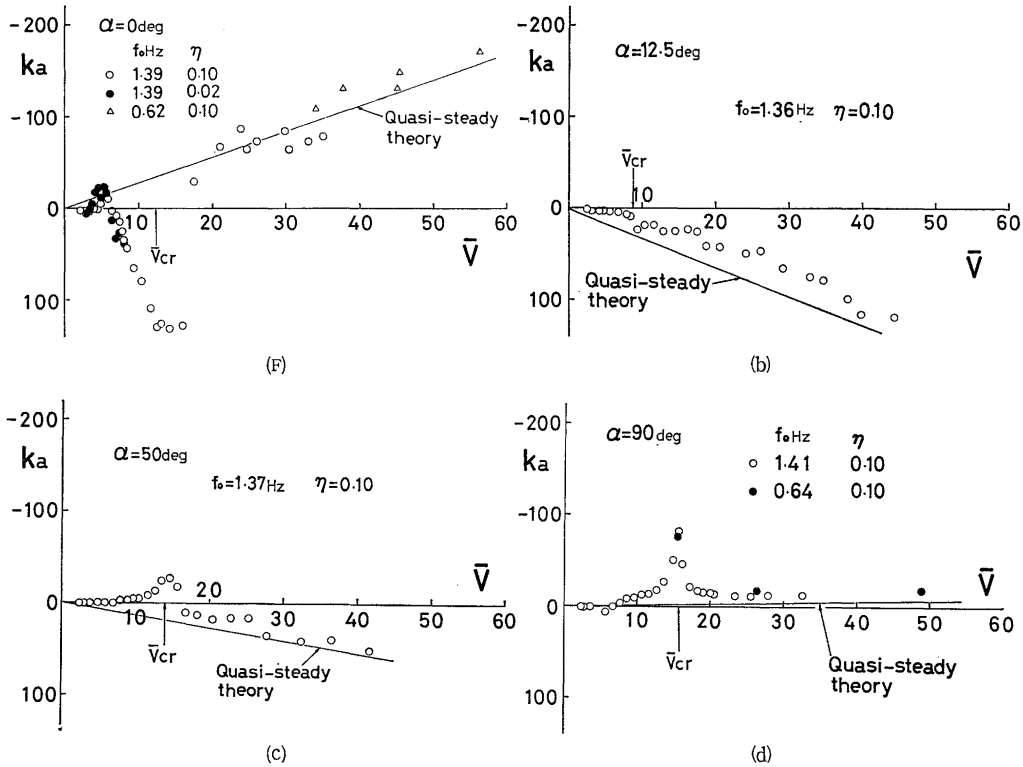


図　9　　自由振動法により求めた非定常揚力の空力ダンピング

図9によれば，高風速において準定常理論は比較的よく実験値と一致する．このことは発散する場合も減衰する場合もそうである．風速が低くなり $\overline{V}_{cr}$ に近づくにしたがい，実験値とのずれが大きくなるが，これはうずの影響と考えられる．その限界はおよそ $\overline{V}=2\overline{V}_{cr}$ 程度である．図7によると，$\alpha=90°$ では $\overline{V}_{cr}$ よりもはるかに低い風速で自励振動が発生し，その振幅は風速とともに単調に増大するようであるが，k_a の数値は $\overline{V}=\overline{V}_{cr}$ においてピークを示すことは興味深い．

5. 捩りフラッタ

図2(b)のように，模型を十字板ばねで支持し，捩りフラッタに関する実験を行なった．平均迎角は0°である．はく離流における捩りフラッタの発生機構は明らかでない．この発生機構を調べる一つの試みとして，模型の捩り軸を断面対称軸に沿って前縁（$x_p=-1$）より後縁（$x_p=1$）までかえ，捩りフラッタと捩り軸位置の関係をみた．模型の固有振動数はほぼ $f_0=1\,Hz$ で，風速は $V=0.5\sim4\,m/s$ ($R=1\sim8\times10^4$) であった．曲げ振動の場合と同様に，自由振動法で非定常空力モーメントの減衰項 k_a を求めた．ここに k_a は，

$$M=M_\theta\theta+M_{\dot\theta}\dot\theta, \tag{9}$$

$$k_a=-\frac{M_{\dot\theta}}{\rho f h^4}=\frac{2I}{\rho h^4}\delta_a, \tag{10}$$

$$\delta_a=\delta-\delta_0.$$

M: 単位高さ当りの空力捩りモーメント

I: 単位高さ当りの模型の慣性モーメント

図10は，捩り軸が断面中央（$x_p=0$）にある場合の k_a の値を示す．発振風速近傍のリミット・サイクルの振幅 θ_{max} もあわせて記す．曲げ振動と同様に k_a の値は振動振幅によるが，この場合，基準振幅は±2°である．例外を除き（$x_p=0\sim-0.5$，$\overline{V}\simeq\overline{V}_{cr}$），2°以下に不安定なリミット・サイクルはなく，$k_a$ に対する振幅の影響は比較的小さかった．

捩り振幅においても，第一と第二の発振が存在すること，第一の発振が $\overline{V}=5\sim8$ にあることおよび第二の発振がほぼ $\overline{V}_{cr}$ で始まることなどは曲げ振動と同様であった．また，以上のことは二次元模型の場合ともよく対応する.[5] 一方，高風速では，二次元模型は2°以下の振幅で減衰振動を呈するのに

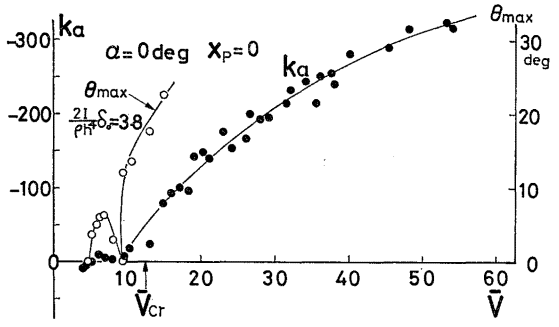


図　10　　捩りフラッタにおけるリミット・サイクルの振幅と非定常空力モーメントの空力ダンピング

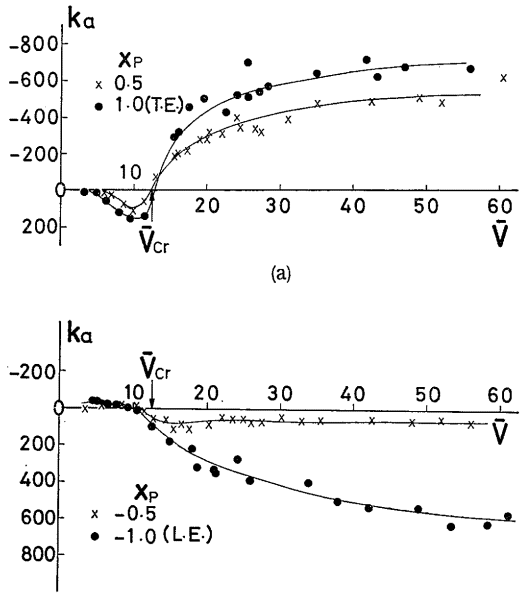


図　11　　種々の振り軸位置における非定常空力モーメントの空力ダンピング

対して[5),7)]，本実験では振動は自然に発散した．これは本模型の三次元性，とくに上端付近における shear layer の再付着の促進に関係があると思われるが，正確な理由は明らかでない．図 11 は振り軸をかえた場合の実験結果である．高風速では，振り軸が中央より後縁に向って後退すればより烈しい発振を生じ，軸位置が前進すれば減衰側に移行する．これらの変化に対する議論については文献 7）を参照されたい．一方，低風速における第一の発振をみると傾向は逆で，振り軸がむしろ前縁に近いとき存在し，軸が後退すれば消失した．また，第一の発振のピークは軸位置によらずほぼ $\overline{V}=5\sim6$ にあり，第二の発振の始まりは $\overline{V}_{cr}$ に近いことも注目に値する．

6. 結　　論

実験結果を要約するとつぎのとおりである．

1）静的三分力特性を特徴づけるものは $\alpha=0°$ および 90° 付近における負の揚力傾斜であり，このことは，模型下面における shear layer のはく離と再付着に関係する．

2）曲げおよび捩り振動のいずれの場合も，自励振動は第一と第二の発振域にわかれる．第一の発振は曲げと捩り振動のいずれの場合も $\overline{V}=1/2\overline{V}_{cr}$ を含む狭い範囲にある．第二の発振はほぼ $\overline{V}_{cr}$ に始まる．

3）曲げ振動では，高風速において，den Hartog の判別基準を満足する迎角範囲でギャロッピングを生じた．線型準定常理論は，発散振動，減衰振動いずれの場合でも実験結果とよく一致する．低風速においてはうずの影響により実験値とのずれが大きくなる．その限界はおよそ $\overline{V}=2\overline{V}_{cr}$ である．

4）うず励振では，負減衰空気力は $\overline{V}=\overline{V}_{cr}$ で極大となる．ある迎角範囲では，うずが存在しているにもかかわらず，うずによる励振がなく振動は強く減衰した．

5）捩り振動において，捩り軸位置を物体中央より前縁方向に移動すると，第一の発振は存在するが第二の発振が消えた．軸位置を後縁方向に移動すると第一の発振が消え，第二の発振がより烈しく存続した．

あ と が き

本研究は，深町信尊，渡辺公彦，福崎テルヨ，杉谷賢一郎の各氏の協力による．原稿の浄書は安藤薫嬢によった．ここに記して謝意を表する．

文　　献

1) 例えば，Otsuki, Y., Washizu, K. and others: Wind excited vibrations of a tower of nearly square cross section, The Third Int. Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo, 1971, p. 853.
2) Nakamura, Y. and Mizota, T.: Aerodynamic characteristics and flow patterns of a rectangular block, Rep. R. I. A. M., Kyushu University, Vol. XIX, No. 65, 1972, p. 289.
3) Nakamura, Y. and Mizota, T.: Galloping and vortex excitation of a rectangular block, Rep. R. I. A. M. Kyushu University, Vol. XIX, No. 64, 1972, p. 225.
4) Parkinson, G. V.: Aeroelastic galloping in one degree of freedom, Int. Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures, England, Vol. II, H. M. S. O., 1965, p. 582.
5) Otsuki, Y., Washizu, K. and others: Experiments on the aeroelastic instability of prismatic bars with rectangular sections, The Third Int. Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo, 1971, p. 891.
6) Novak, M.: Galloping and vortex induced oscillations of structures, ibid., p. 799.
7) 中村泰治・溝田武人：矩形断面の捩りフラッタについて，構造物の耐風性に関する第 2 回シンポジウム論文集，東京，1972.

(昭和 47 年 10 月 31 日　受理)