

## 横向振动方柱波动升力实验研究\*

呼和敖德 孟向阳

(中国科学院力学研究所, 北京, 100080)

**摘要** 本文对均匀流中静止方柱和横向强迫振动的方柱进行了实验研究。实验雷诺数范围为  $3 \times 10^3 \sim 10^4$ , 振幅与柱截面宽度之比  $A/D$  达到 0.7, 实验折合速度范围为  $4.5 \leq V_r \leq 12$ 。文章重点研究了较高振幅振动柱的锁定现象、波动升力与柱位移之间的相位变化, 讨论了方柱涡激振荡、驰振和气动稳定性问题。对流场进行的流动显示, 清晰地显示出锁定区涡脱落过程、近尾迹流场随振动频率和振幅的演化规律; 从而对振动柱波动升力与相位变化的物理机制获得进一步认识。

**关键词** 振荡柱, 波动升力, 涡脱落, 尾迹, 锁定现象

### 一、引言

流动诱发结构物振荡是工程实际中普遍存在的现象, 如高层建筑物、海洋工程桩柱、输油管道等在流体作用下物体下游形成非对称脱落涡, 涡诱导的侧向波动力就会激发物体横向振动。当振荡物体的激振频率  $f$  接近物体静止时涡脱落频率  $f_v$ , 此时将会出现锁定现象, 物体会受到较强的横向激振力作用。因此对锁定区激振力的研究具有重要意义。现发表的众多研究成果主要针对圆柱流动, 对此 Sarpkaya<sup>[1]</sup> 给予详细评述。关于非圆截面柱绕流问题的研究还很缺乏, 许多问题有待深入研究<sup>[2]</sup>。其中关于方柱体流动诱导振荡问题的研究不论对流体力学理论的发展以及对工程实际应用方面均具有重要意义。

方柱绕流问题最近开始引起学术界的关注<sup>[3]</sup>。Bearman 和 Obasaju<sup>[4]</sup>, Bearman 和 Luo<sup>[5]</sup>, Nakamura 和 Mizota<sup>[6]</sup>, Obasaju<sup>[7]</sup>, Otsuki 等<sup>[8]</sup>作了较深入的研究工作, 针对与来流垂直方向强迫振动方柱开展了低速风洞的实验研究。测量了柱体表面平均和波动压力以及波动力与柱位移之间的相位变化。这些研究发现相位角通过锁定区发生大的变化, 并在共振锁定点附近相位从负变为正值。当前对出现这种现象的物理机制以及所涉及空气动力稳定性问题的研究还有待深入进行。

本文主要研究雷诺数低于  $10^4$ , 振幅从小到  $0.7D$  高值情况下横向强迫振动方柱所经受的侧向波动升力以及与柱位移之间的相位变化特性。研究的速度范围主要限于锁定区, 取折合速度  $V_r = 4.5 \sim 12$  ( $V_r = u/f_c \cdot D$ , 其中  $u$  为均匀流速度,  $f_c$  为柱振动频率)。并通过对方柱两侧涡脱落及近尾迹流场经过锁定区时随振幅比和折合速度的改变而发生的演化过程的流场显示进一步探索上述诸现象的物理机制。文中同时给出静止柱涡脱落频率随雷诺数的变化和波动升力系数的实验结果。在几何相似、雷诺数、振幅比和折合速

\* 本课题得到国家自然科学基金重大项目“海洋工程中力学问题”资助。  
本文于 1990 年 3 月 13 日收到, 1990 年 10 月 20 日收到修改稿。

度相同情况下,强迫振动柱实验结果与自由振荡情况基本一致。

## 二、实验设备及方法

本实验在拖动水槽中进行,槽高0.5米,宽0.4米,长5.5米。槽体由有机玻璃制成。拖车由调速器控制匀速行驶。

方柱模型长36厘米,方截面侧宽3.3厘米。为消除水面和槽体底面对实验结果的三维影响,模型沿长度分为三段组成,两端为虚柱部分,中间为实测柱,长为12厘米。应变式测力小天平安装在上端虚柱体内,天平直接与中间实测柱固结,下端虚柱直接与上端柱联结。天平上贴四片电阻应变片,并具有较好防水层。模型上端垂直安装在振动机构上,而振动机构再固定在拖车上。振动机构强迫模型作往复运动。实验中力和位移信号要求同步记录,该信号经放大、低通滤波、A/D变换用微机采集和处理。在进行振动柱动载荷量测过程中要同步测量振动模型在静止空气中的惯性力,两个力信号相减得到最终真正的流体动载荷。在动载荷测量中固定振动柱频率 $f_c$ ,然后通过调节车速,改变折合速度。本文中雷诺数与折合速度之比 $f_c D^2/\nu$ ( $\nu$ —动粘性系数)为810。

涡脱落频率用自制热线探头测定。探头置于柱后下游适当位置,使能感受从柱体两侧脱落涡的信号。

涡脱落过程和近尾迹流场的显示采用了电解沉淀法。为清楚显示物面分离和再附现象,除采用梳状阳极之外,还同时将阳极材料嵌入柱体中心截面很窄一段。

显示用1000W缝隙光源,光源架于拖车侧架随车同步运行。照片从顶部拍取,相机固定在拖车上。为研究涡脱落相位变化,所有照片均取在柱移动最大负位移瞬间(取向上为正)。

## 三、实验结果

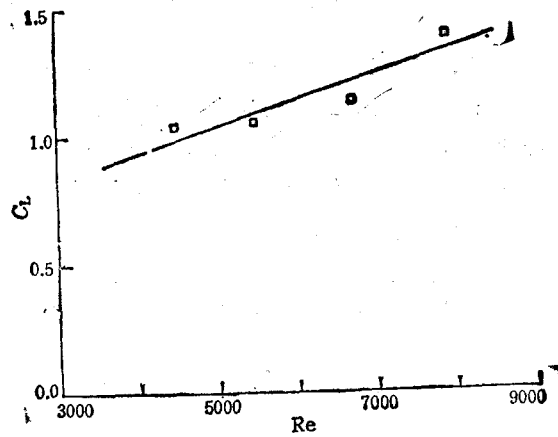
### 1. 静止方柱

为研究振动柱锁定现象和涡诱导激振力,首先要了解静止方柱在均匀流中涡脱落频率、波动升力和阻力系数随雷诺数的变化规律。当前,许多实验工作是在风洞中进行的,其雷诺数稍高于本文范围。因此,本文对稍低雷诺数范围内上述诸参数进行了测量。

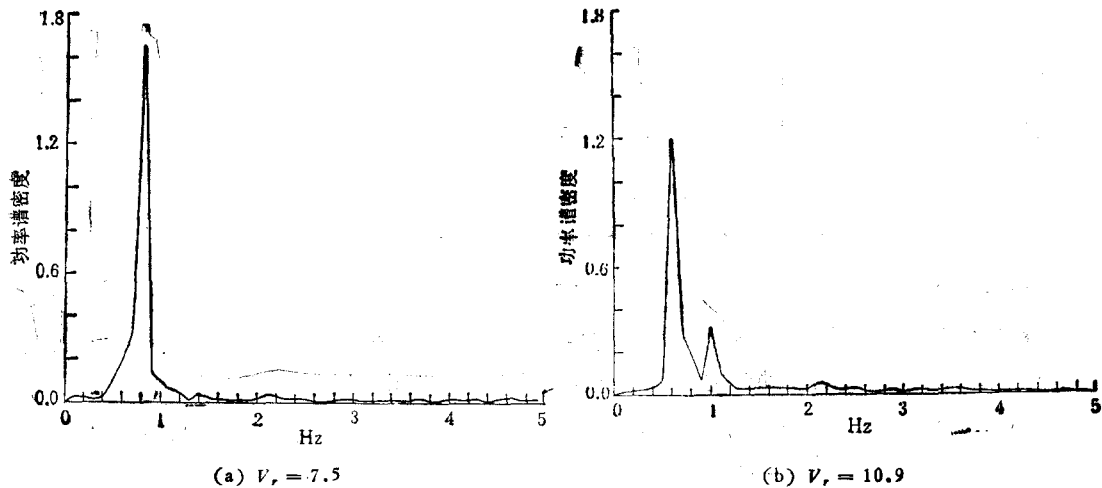
均匀流中静止方柱涡脱落频率以 Strouhal 数  $S_{Vs} = f_{Vs} \cdot D/u$  表示。对于低雷诺数  $150 < Re < 300$ , 参数  $S_{Vs}$  实验结果约为 0.148, 在稍高雷诺数范围:  $300 < Re < 5000$ , 该值约为 0.135。这说明低雷诺数对涡脱落的影响。雷诺数对均匀流中静止方柱波动升力也有一定的影响,图1给出本文实验结果。结果说明波动升力随雷诺数近似线性增长。本文结果与文献[4]高雷诺数条件下给出的结果衔接的非常好。

### 2. 锁定区的测定

当振荡柱体的振动频率 $f_v$ 接近静止柱涡脱落频率 $f_{Vs}$ 时,柱体的振动频率将捕获住涡脱落频率,即 $f_v/f_c \approx 1.0$ ,这称为锁定现象。锁定所对应的折合速度范围称为锁定区。本文主要给出较低雷诺数( $Re < 3000$ )情况下锁定区范围,实验结果说明锁定区范围受振幅比和雷诺数的影响。雷诺数的影响主要体现在低雷诺数情况下,随 $Re$ 减小锁定区稍有缩小。振幅影响明显,随振幅增高,锁定区扩大。本文热线测量结果,当 $Re = 3000$ ,

图 1 静止方柱扰动升力  $C_L \sim Re$ 

$A/D = 0.13$ , 锁定区为  $6.7 \leq V_r \leq 8.4$ 。若振幅为  $A/D = 0.25$ , 锁定区为  $5.5 \leq V_r \leq 8.7$ 。在振幅  $0.25D$  情况下得到的上临界值低于根据脉动压力功率谱推断得到的结果, 根据功率谱推断结果高端折合速度为 12。产生差别的原因大抵有两方面: 其一, 本文实验雷诺数偏低, 这将影响锁定区范围; 其二, 在高折合速度情况下, 热线测量的主涡脱落频率已经偏离了物体振动频率, 不满足锁定区定义,  $f_v/f_r = 1.0$ 。但波动力功率谱分析说明主峰值仍然受振动频率所控制 [见下节图 2(b)], 从而可认为是锁定。尤其在更高振幅情况下, 虽然主涡与物体振动频率之间解除了锁定, 但还会出现更高倍频多级锁定现象。因此, 从这个角度确定的锁定区其折合速度上临界值必然会比热线测量结果高。

图 2 波动升力功率谱 ( $A/D = 0.25$ )

### 3. 波动升力与气动稳定性

振动方柱波动升力实验结果表示为升力系数

$$C_L = F_{Lrms} / \left( \frac{1}{2} \rho u^2 D l \right),$$

$F_{Lrms}$  是波动升力的均方根值。振幅为  $A/D = 0.25$  的扰动升力功率谱示于图 2。谱分析说明升力有两个主要部分: 物体振动频率的响应部分  $C_{L_n}$  和涡脱落引起的升力部分  $C_{L_V}$ , 图 2(a) 给出折合速度  $V_r = 7.5$  的实验结果, 此时功率谱图上只出现一个高峰值。因为该速度值接近共振锁定点, 即处于脱落涡和物体振动频率完全锁定状态。然而一旦超出锁点区, 如图 2(b) 所示,  $V_r = 10.9$ , 功率谱上出现两个峰值, 其中高峰值对应物体振动频响部分, 较低峰值为涡脱落引起的波动升力。此结果说明在该折合速度条件下, 主峰值仍受振动频率控制。图 3 给出不同振幅情况下锁定点波动升力随折合速度从锁定点低端到高端变化规律的实验结果。本文与文献 [5] 风洞实验结果进行了比较。结果表明, 最大波动升力发生在折合速度约为 7.5 处。该值稍高于本文雷诺数范围测量得到的共振锁定点速度值 7.4。当振幅增高, 波动升力有明显增长。当振幅比为 0.7 时, 最大波动升力值约为 2.7。文献 [5] 的结果比本文稍有偏高, 且其峰值点位于折合速度  $V_r = 7.8$  处。这大概因为文献 [5] 实验雷诺数偏高的结果, 此时其共振锁定点折合速度值约为 7.7。

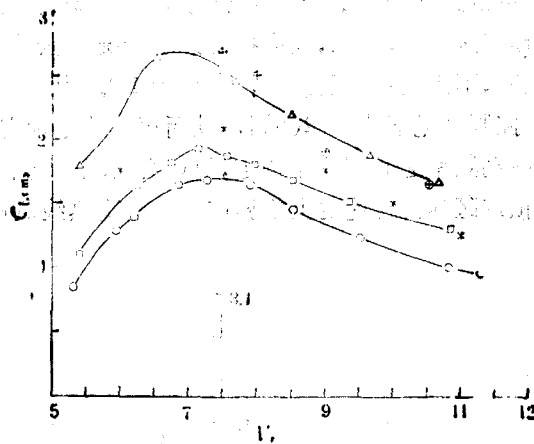


图 3 振动方柱波动升力均方根值

$A/D$ :  $\circ$ , 0.13;  $\square$ , 0.25;  $\triangle$ , 0.7;  $*$ ,  $0.25^{1.5}$ ;  $\oplus$ ,  $0.675^{1.5}$

根据本文对波动升力和振动柱位移的测量结果分析了振动方柱的气动稳定性。振动物体稳定性问题主要依赖于波动升力与物体运动速度频响分量。当柱以  $S(t) = A \cos \omega_n t$  规律运动时, 其相应的波动升力的频响分量为  $C_{L_n} = \text{Re}[(C_{L_nR} + iC_{L_nI})e^{i\omega_n t}]$ , 其中  $\omega_n = 2\pi f_n$ 。

根据实验结果通过上述计算给出波动升力与位移之相位变化, 其结果示于图 4, 相位角以  $\theta$  表示。从图上反映出相位角在锁定区的变化。在小折合速度范围内, 相位为负, 在小振幅振动情况下, 大约在共振锁定点附近该相角从负变到正。在整个锁定区范围相角约变化  $150^\circ$ 。这样明显的变化充分表明了涡脱落对波动升力的激发起着重要作用。这点将通过流动显示进一步说明。

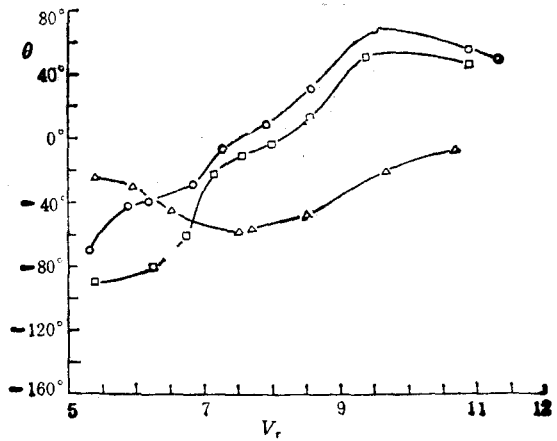
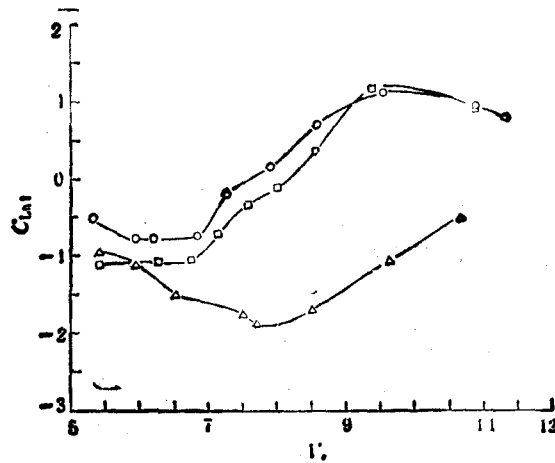
图 4 相角  $\theta$  随  $V_r$  变化A/D:  $\circ$ , 0.13;  $\square$ , 0.25;  $\triangle$ , 0.7图 5  $C_{L_{n1}} \sim V_r$  (A/D:  $\circ$ , 0.13;  $\square$ , 0.25;  $\triangle$ , 0.7)

图 5 给出波动升力频响分量虚部  $C_{L_{n1}}$ 。该参数在锁定区范围从负值变为正值,随折合速度继续增高,并保持其正值。这种变化受振幅影响。对于小振幅,参数  $C_{L_{n1}}$  约在共振锁定点附近从负变正。但对高振幅振动情况,  $C_{L_{n1}} = 0$  所对应的折合速度增高。例如,当  $A/D = 0.7$ , 在本文实验速度范围内,即  $V_r = 12$ ,  $C_{L_{n1}}$  和相位角  $\theta$  均未达到从负到正改变符号的速度值。因此,在  $V_r = 12$  之内均为负值。 $C_{L_{n1}}$  是确定气动稳定性的重要参数,当  $C_{L_{n1}} > 0$  (即  $\theta > 0$ ), 振动具有负阻尼性质,因此,将会出现涡激振荡。如图 5 所示,在涡诱导波动力最强的主要锁定区内,系数  $C_{L_{n1}}$  保持负值,而从共振锁定点之后系数  $C_{L_{n1}}$  才变为正值。当折合速度刚超过共振锁定点速度值,对于小振幅情况已达到系数  $C_{L_{n1}} > 0$ 。然而对高振幅情况,在同一速度值,其系数  $C_{L_{n1}} < 0$ , 又恢复到稳定,这正是方柱不同于圆柱之处。方柱是经受流动诱导的小的有限幅度振荡。因此,在本文研究折合速度范围,主要在锁定区,当  $f_{vs}/f_c \rightarrow 1$  的情况下涡脱落诱导力和弛振

相互共存。只有对高折合速度弛振起主导作用,但这已不是本文研究范围。

振幅对波动升力的影响示于图 6,这是锁定区波动升力均方根最大值。图上同时给出文献 [4] 和 [6] 实验结果。本文结果更接近于文献 [4],因本文实验雷诺数偏低,所得结果也稍有低下。当  $A/D$  增高后,本文结果稍有偏高,这很可能是水槽边壁的影响。

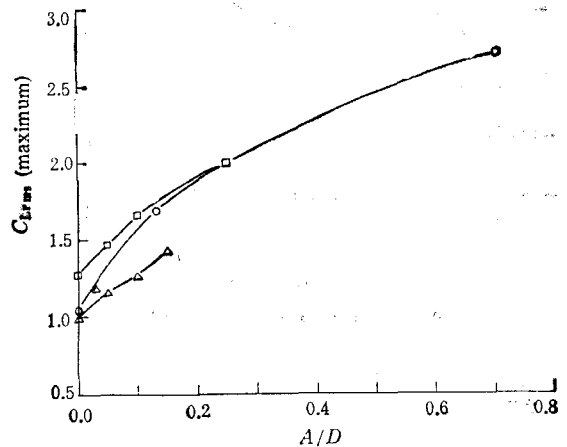


图 6 扰动升力系数  $C_{Lrms} \sim A/D$

○ 本文; □ 文献[4]; △ 文献[6]

#### 4. 振动方柱涡脱落特性及近尾迹流动显示

本文给出振动方柱绕流场部分流动显示结果。所有照片均拍取在每一振动周期柱体移动到最大负位移瞬间。为研究锁定区涡脱落特性,照片按振动柱涡脱落频率  $f_v$  与柱静止时涡脱落频率之比  $f_v/f_{vs}$  从小到大顺序排列,见图版 I 照片 1。从照片发现,从方柱前缘分离流越过侧壁,先在上侧壁下游脱落形成涡。涡形成区随频比增高而缩短,并逐渐向柱靠近,随频比继续升高将会出现脱落涡再附于上侧壁的现象(见图版 I 照片 1(e))。再观察下侧壁,当  $f_v/f_{vs} \rightarrow 1.0$ , 从下侧面脱落的反时针涡逐渐向底面倾斜再附,见图版 I 照片 1(b)。随频比不断增高,反时针涡先逐渐向下侧面后缘处退缩,在底面的再附区缩小(图版 I 照片 1(c))。然后,直到  $f_v/f_{vs}$  约为 1.38 时,反时针涡再附底面现象消失(图版 I 照片 1(d))。涡脱落共振锁定区附近出现的上述种种变化与前节讨论的波动升力与位移之间的相位及频响升力虚部  $C_{L,i}$  在共振锁定区附近发生的变化密切相关。这说明在锁定区,涡脱落特性对形成较高波动升力以及对导致柱体振荡起着重要作用。

图版 I 照片 1 给出振动柱近尾迹流场。当振幅为  $0.25D$ , 近尾迹在锁定区主要为 2S 型,这种尾迹由分布在柱体对称轴线上的正反时针旋转的对对涡组成(图版 I 照片 1(c))。当频比超过锁定区,尾迹由 2S 型过渡到卡门型(图版 I 照片 1(e))。在高频比情况,近尾迹由具有一定垂距的两排小涡列构成。图版 I 照片 1(f) 给出 3 倍频情况下尾迹流谱,此时小涡之间纵向距离缩短,而涡强增高。

随振幅变大,方柱涡脱落及近尾迹特性发生复杂的变化,如图版 I 照片 2 所示。为说明大振幅与小振幅之区别,这里只给出两张照片。在锁定区,近尾迹基本为“P+S”

型. 这是一种非对称类型涡街, 在一个振动周期内形成三个涡, 分布形式为一对涡在柱对称轴一侧, 另一单涡分布在另一侧, 如图版 I 照片 2(a). 在高频比情况下, 在柱上侧面出现正反时针两个涡. 一个顺时针涡是由柱前缘分离形成, 另一反时针涡从后缘分离形成, 如图版 I 照片 2(b). 这时的近尾迹类似于图版 I 照片 1(f), 只是两排涡列垂向距离更大. 大振幅情况下涡脱落过程的复杂变化直接关系到侧向扰动力和相位角的变化. 尤其在高倍频振动情况下, 侧壁脱落涡的出现及近尾迹特性与波动升力多级锁定峰值的出现密切相关.

#### 四、结 论

在振幅比高达 0.7, 折合速度在  $4.5 \leq V_r \leq 12$  范围, 本文对振动单方柱的波动升力及相应的涡脱落特性和近尾迹流场在水槽中作了实验研究, 得到以下结果:

均匀流中静止柱波动升力随雷诺数以线性增长, 其波动升力均方根值约为 1.0~1.35.

热线测定的锁定区范围大小随振幅和雷诺数增高而扩大. 振动柱波动升力在共振点附近达到最高值, 其折合速度约为 7.5. 随振幅增高波动升力显著提高. 当  $A/D = 0.7$  时, 其值约为静止柱的 2.7 倍. 波动升力与柱位移之间相位变化通过锁定区改变约  $150^\circ$ . 对于小振幅比情况, 波动升力频响分量的虚部  $C_{Lni}$  及其相位角在共振锁定区附近从负改变为正. 该两参量零值点所对应的折合速度值将随振幅比增高而增大. 在共振锁定区之前的锁定区内, 系数  $C_{Lni}$  和相位角  $\theta$  均为负值. 虽然在此速度范围涡诱导波动力最大, 但在此情况下弛振和涡激振荡是稳定状态. 在超过共振锁定区, 系数  $C_{Lni}$  和相角  $\theta$  变为正, 这将引起涡激振荡.

流场显示清晰地揭示了通过锁定区涡脱落过程和近尾迹发生的复杂变化, 在共振锁定区附近, 涡的脱落和再附规律发生的变化, 有助于了解波动升力及相位在此处出现的变化.

#### 参 考 文 献

- [1] Sarpkaya, T., *J. Applied Mechanics*, 1979, 46, 241—258.
- [2] Bearman, P. W., *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1983, 16: 195—222.
- [3] Parkinson, G. V., *J. Wind Eng. and Industrial Aerodynamics*, 1988, 28: 177—181.
- [4] Bearman, P. W. & Obasaju, E. D., *J. Fluid Mechanics*, 1982, 119: 297—321.
- [5] Bearman, P. W., & Luo, S. C., *J. Fluid and Structures*, 1988, 2: 161—176.
- [6] Nakamura, Y. & Mizota, T., *Proc. ASCE*, 1975, 101(EMb): 855—871.
- [7] Obasaju, E. D., *J. Wind Eng. and Industrial Aerodynamics*, 1983, 12: 313—327.
- [8] Otsuki, Y. & Washizu, K. et al., *J. Sound and Vibration*, 1974, 34(2): 233—248.

## AN EXPERIMENTAL STUDY OF FLUCTUATING LIFT ON A SQUARE-SECTION CYLINDER OSCILLATING TRANSVERSELY IN A UNIFORM STREAM

Huhe-Aode Meng Xiangyang

*(Institute of Mechanics, Academia Sinica China, Beijing 100080, China)*

**Abstract** Experiments on a square-section cylinder fixed and forced to oscillate transversely in uniform stream were conducted in a water tank. The Reynolds number of the experiments is in the range  $3 \cdot 10^3$  to  $10^4$ , the amplitude to side length ratio  $A/D$  is up to 0.7 and the range of reduced velocity  $4.5 \leq V_r \leq 12$ .

This study aims at investigating the lock-in phenomenon, fluctuating lift and the phase shift between fluctuating lift and displacement of the oscillating cylinder. The problems on the aeroelastic instability relating to present experimental results have been discussed. The flow visualization clearly shows that there are drastic changes of vortex-shedding from cylinder passing through the resonance point and the upper end of the lock-in range. The results of the flow visualization can help us understand the physical mechanism of the phase shift.

**Key words** oscillating cylinder, fluctuating force, vortex-shedding, near-wake, lock-in





(a)  $f_v/f_{v_s} = 0.833$



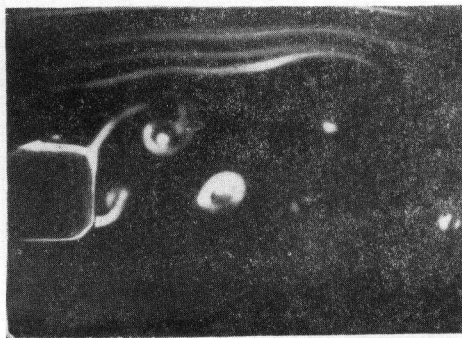
(b)  $f_v/f_{v_s} = 1.0$



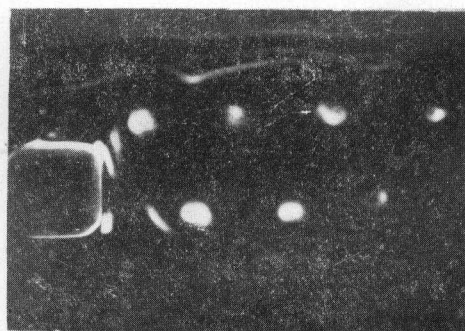
(c)  $f_v/f_{v_s} = 1.17$



(d)  $f_v/f_{v_s} = 1.33$



(e)  $f_v/f_{v_s} = 1.76$



(f)  $f_v/f_{v_s} = 3.0$

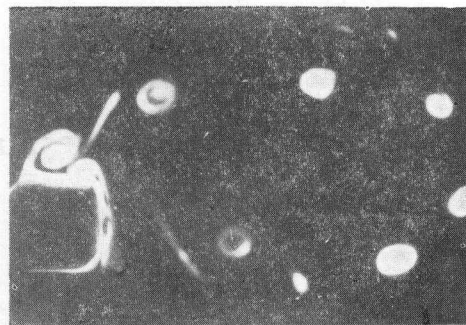
照片 1 振动方柱流场显示

$Re = 300$

$A/D = 0.25$



(a)  $f_v/f_{v_s} = 1.22$



(b)  $f_v/f_{v_s} = 2.0$

照片 2 振动方柱流场显示

$Re = 300$

$A/D = 0.7$