

文章编号: 1005-9865(2001)02-0056-05

# 水动力作用下管道稳定性的试验研究

高福平, 顾小芸, 浦 群

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘 要:**利用振荡流水槽在以下两种约束条件下,研究波浪作用下直接铺设于砂质海底的管道失稳临界条件:1)管道两端自由;2)管道可水平、垂直自由运动,但滚动受到限制。试验结果表明,管重无量纲数  $G$  与管道失稳的临界  $Fr$  数之间大致呈线性关系,而当  $G$  超过一定数值时,管道是侧向稳定的。管道的约束条件、砂床特性和加载速度对管道稳定性均有影响。

**关键词:**海底管道;管道失稳;波浪作用;砂质海底

**中图分类号:** TV139.2 **文献标识码:** A

## Experimental study on pipeline s on-bottom stability under hydrodynamic force

GAO Fur-ping, GU Xiao-yun, PU Qun

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** The critical instability conditions of pipeline directly installed on seabed have been investigated in a U-shape oscillating water tunnel. And two kinds of constraints are used: 1) The pipeline is free; 2) the motion of pipeline is free in horizontal and vertical directions, but its rolling is restricted. Test results show that the critical  $Fr$  inducing pipeline instability is linear with dimensionless pipeline weight parameter ( $G$ ), and that when  $G$  is bigger than a special value, the pipeline will be laterally stable and tend to be buried by sand. Furthermore, the constraint condition, sand property and loading velocity all affect the pipeline stability to a certain degree.

**Key words:** submarine pipeline; on-bottom stability; wave loading; sandy seabed

波浪作用下海底直铺管道的在位稳定性是“波-管-土”耦合问题。为了保证管道的稳定,海底土壤必须提供足够的阻力以平衡波浪荷载,否则,管道将产生较大的位移而失稳。管道的稳定性判据是管道水下重量设计的基础。目前,国内外的管道设计规范大都是以机械加载模拟波浪力的管道稳定性试验结果为依据的。然而,由于实际波浪荷载既作用在管道上同时又作用在海床上,冲蚀引起的海床形态改变又会影响管道两侧流场,进而影响管道受力。可见,与前人<sup>[1-5]</sup>的机械加载相比,水动力荷载更符合实际情况。文献<sup>[6]</sup>利用水动力进行了研究,但只研究了半埋管道的失稳问题。本文作者曾对管道的失稳过程进行了模拟,并初步得到了管道失稳的临界条件<sup>[7]</sup>。本文又进行了补充试验,并进一步研究了管道受滚动约束时的失稳条件以及加载速度对管道稳定性的影响。

## 1 试验方法

### 1.1 试验设备

对浅水重力波浪而言,接近海底处的水质点只沿水平方向作周期振荡。在波浪作用下,浅海底直铺管道主要受这种水平振荡的影响<sup>[8]</sup>。因此,通过振荡流的试验可以模拟管道在浅水海底的受力状况。

收稿日期: 2000-06-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19772057, 19772065); 中科院重大项目资助课题(KZ951-A1-405-01)

作者简介: 高福平(1973-),男,山东淄博人,硕士,从事岩土力学和海洋工程研究。

试验在 U 型振荡水槽中进行。该设备可产生均匀、高品质的振荡水流,利用调节阀调节气流量既可实现水体的等幅振荡,又可使水体振幅在 5~200 mm 内连续变化,振荡周期为 2.6 s。关于该设备的较详细的介绍可参见文献[7]。

振荡流水质点位移:  $A = A_0 \sin t$   
 振荡流水质点速度:  $\dot{A} = A_0 \cos t$

式中:  $A_0$  为振荡流的振幅;  $\omega$  为振荡流的角频率,  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ ,  $T$  为振荡流周期。振荡流中水质点的最大运动速度  $U_m$ :

$$U_m = A_0 \omega$$

U 型管底部中间部位有一长 0.60 m、宽 0.20 m、深 0.035 m 的砂槽。试验管道直接铺放在砂槽中的饱和砂床上,如图 1 所示。管道与两端的 U 型管侧壁之间保持约 0.005 m 距离,以免管道运动时与 U 型管管壁接触,影响其运动。

为了观测管道两侧砂粒启动和床面变化过程,试验中采用片光源和反射镜等进行砂粒流动显示。利用摄像机记录此过程,同时也记录了管道的失稳过程。另外,采用压力传感器测量振荡流的振幅变化,利用电压放大器、A/D 板和计算机进行数据采集。

### 1.2 砂样制备

试验采用两种砂:中砂和细砂。其基本参数见表 1,粒径级配曲线如图 2 所示。

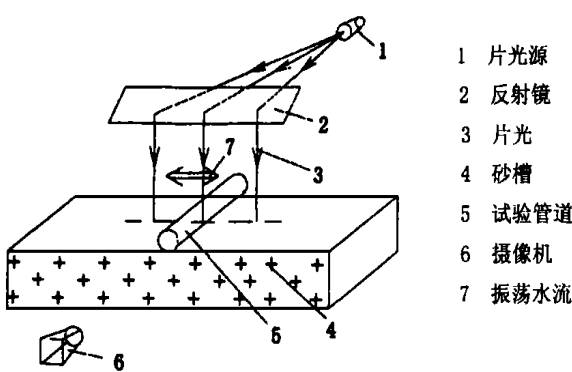


图 1 试验观测示意图

Fig.1 The sketch of test observation

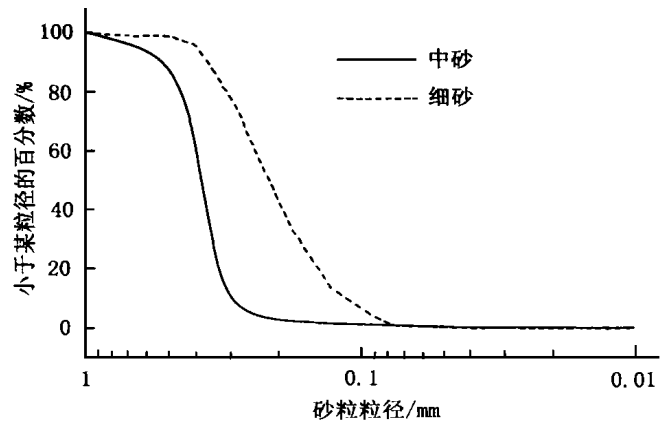


图 2 砂粒粒径级配曲线

Fig.2 Sand grain-size distribution curve

为了使砂样充分饱和,采用水下装砂法制备土样,试验用水为蒸馏水。为了使试验结果具有可比性,每次试验均严格控制砂的密实状态,试验所用中砂的湿砂总质量控制在  $7.30 \pm 0.03\text{kg}$ ,细砂的湿砂总质量控制在  $7.75 \pm 0.03\text{kg}$ ;并使试验槽中砂面水平,模拟水平海床。

表 1 试验砂的主要参数

Tab.1 Main physical parameters of sand

|    | $d_{50}/\text{mm}$ | $d_{10}/\text{mm}$ | $C_u$ | $\gamma' (\text{N m}^{-3})$ | $d' (\text{N m}^{-3})$ | $e_0$ | $D_r$ |
|----|--------------------|--------------------|-------|-----------------------------|------------------------|-------|-------|
| 中砂 | 0.38               | 0.30               | 1.4   | $1.90 \times 10^4$          | $1.48 \times 10^4$     | 0.73  | 0.37  |
| 细砂 | 0.21               | 0.11               | 2.0   | $2.11 \times 10^4$          | $1.75 \times 10^4$     | 0.56  | 0.60  |

### 1.3 试验管道及其约束条件

为了探索管重对管道稳定性的影响规律,按照管道水下重量的无量纲参数  $G(= \frac{G_p}{D^2})$  设计试验管道参数。其中,  $G_p$  为单位长度管道水下重量;  $D$  为管道外径;  $\gamma'$  为砂的浮容重,  $\gamma' = -1 \times 10^4 (\text{N/m}^3)$ 。在同一种加载速度下,对以下两种极限边界条件的管道失稳进行了研究:

#### 1) 管道自由放置

对  $D = 0.030\text{ m}$ 、 $0.020\text{ m}$  和  $0.014\text{ m}$ ，长度均为  $0.190\text{ m}$  的模型铝管（共 29 根）分别进行振荡流加载试验。各管道的水下重量均不相同，分别模拟不同水下重量的实际管道。试验时，管道直接放置于水平砂床上，模拟二维平面应变状态。试验砂分中砂和细砂两种，以研究不同砂样对管道稳定性的影响，见表 2。

#### 2) 管道可水平、垂直自由运动，但滚动受限制

本试验中，设计制作了防止管道滚动的双平行四边形机构（如图 3）。该机构使管道在运动过程中，只能水平和垂直平动，而不产生滚动。对  $D = 0.030\text{ m}$  和  $D = 0.020\text{ m}$  的 8 根重量各异的管道分别进行了试验，试验砂均为中砂。

以上 37 次试验的管道参数见表 2。

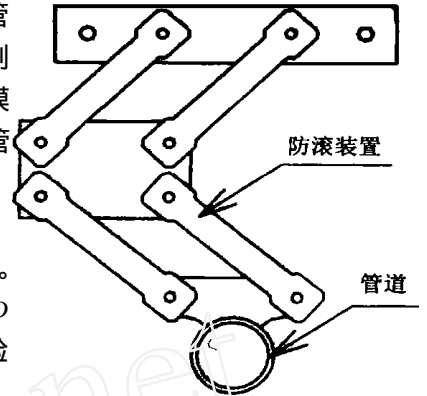


图 3 管道防滚装置示意

Fig. 3 The mechanism for restricting pipe's rolling

表 2 试验管道参数

Tab. 2 Parameters of test pipes

| $D/\text{m}$ | $W_s/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$ | $D/\text{m}$ | $W_s/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$ | $D/\text{m}$ | $W_s/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$ | $D/\text{m}$ | $W_s/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$ |
|--------------|------------------------------------|--------------|------------------------------------|--------------|------------------------------------|--------------|------------------------------------|
| 0.030        | 1.52                               | 0.020        | 1.09                               | 0.030*       | 2.00                               | 0.030**      | 2.04                               |
| 0.030        | 2.00                               | 0.020        | 1.35                               | 0.030*       | 2.40                               | 0.030**      | 2.59                               |
| 0.030        | 2.40                               | 0.020        | 1.54                               | 0.030*       | 3.12                               | 0.030**      | 2.94                               |
| 0.030        | 3.12                               | 0.020        | 1.72                               | 0.030*       | 3.53                               | 0.020**      | 0.78                               |
| 0.030        | 3.53                               | 0.020        | 1.97                               | 0.030*       | 3.93                               | 0.020**      | 0.98                               |
| 0.030        | 3.93                               | 0.014        | 0.78                               | 0.030*       | 4.22                               | 0.020**      | 1.12                               |
| 0.030        | 4.22                               | 0.014        | 0.89                               | 0.030*       | 4.50                               | 0.020**      | 1.29                               |
| 0.030        | 4.40                               | 0.014        | 1.05                               | 0.030*       | 5.00                               |              |                                    |
| 0.030        | 5.00                               | 0.014        | 1.21                               | 0.030*       | 5.29                               |              |                                    |
| 0.030        | 5.24                               | 0.030*       | 1.61                               | 0.030**      | 1.51                               |              |                                    |

注：\*管道自由，细砂；\*\*管道防滚，中砂；其余：管道自由，中砂。

需要说明的是，由于实际管道本身的抗扭刚度不可能无限大，并受到立管和压块等约束，其失稳时的运动状态不可能为完全的平移，也不可能为两端完全自由的滚动。到底哪种情况更符合实际，要视管道铺设长度、压块等约束设施之间的距离以及其余约束力的情况而定。

#### 1.4 加载过程

为模拟迅速增长的风暴对不同水下重量的管道的稳定性影响，首先在一个加载速度下进行试验。以上 37 组试验中振荡流幅值上升加载速度均为  $A_0 = \frac{dA}{dt} = 9 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 。然后又初步研究了加载速度对管道失稳的影响。

### 2 试验结果分析

#### 2.1 量纲分析

量纲分析发现，对管道失稳产生影响的主要量纲一的量为<sup>[7]</sup>：

$$Q(F_r, G, R_e, KC, k, D_r, \dots) = 0$$

式中：

$$F_r = \frac{U_m}{\sqrt{gD}} \quad (1)$$

$$KC = \frac{U_m T}{D} \quad (2)$$

$$R_e = \frac{U_m D}{\nu} \quad (3)$$

$F_r$  数为流体中惯性力与重力的比值，它是重力起主要作用时的相似控制参数； $KC$  数是流体质点运动的特征

长度与受力物体特征长度的比值,它控制管道两侧涡旋的产生和发展; $Re$  为流体中惯性力与粘滞力的比值。 $k$  为管道表面相对粗糙度( $k = \frac{\Delta}{D}$ ,  $\Delta$  为管道表面突起的平均高度),本文仅研究光滑管道,即  $k = 0$ ;  $D_r$  为饱和砂的相对密度;  $\nu$  为表征加载历史的无量纲量,  $\nu$  为流体运动粘滞系数。

由式(1)~(3)可知,试验不能同时满足  $Fr$  数准则、 $KC$  数准则和  $Re$  数准则。鉴于浅水波浪运动是重力起主要作用的流动,管道的稳定性也与其重量相关,试验中认为  $Fr$  数是主要的条件准则数。本试验可同时保证  $Fr$  和  $KC$  准则。对风浪下的实际海底管道而言,  $Fr$  数在  $0 \sim 0.5$  范围内变化,与本试验的  $Fr$  相近;而  $KC$  数在  $0 \sim 20$  范围内变化,本试验过程中  $KC$  数可达到 30 左右,可认为接近实际管道情况。而实际  $Re$  在  $10^5$  左右,本试验的  $Re$  在  $10^3$  左右。由于对圆柱绕流来讲,当  $1.0 \times 10^3 < Re < 3.5 \times 10^5$ ,绕流阻力系数几乎不变,所以雷诺效应可忽略。

## 2.2 试验结果分析

### 2.2.1 两种约束条件下管道稳定性的比较

试验发现,管道失稳一般经历以下三个阶段:1)管道两侧砂粒启动,床面受到冲蚀。2)管道产生微小位移,即管道随尾迹流左右轻微运动。对自由管道而言,管道发生轻微晃动时其底部始终与砂床接触<sup>[7]</sup>。而对防滚管道来说,此时管道发生轻微的平移,水平位移量约在  $1\% \sim 3\%D$  之间不等,并伴有微小的沉降,沉降量小于  $1\%D$ 。3)在管道持续微小位移一段时间后,管道几乎突然产生较大位移而失稳。两端自由的管道发生离合运动<sup>[7]</sup>,防滚管道则突然发生  $20\% \sim 30\%D$  的水平位移,如图 4 所示。

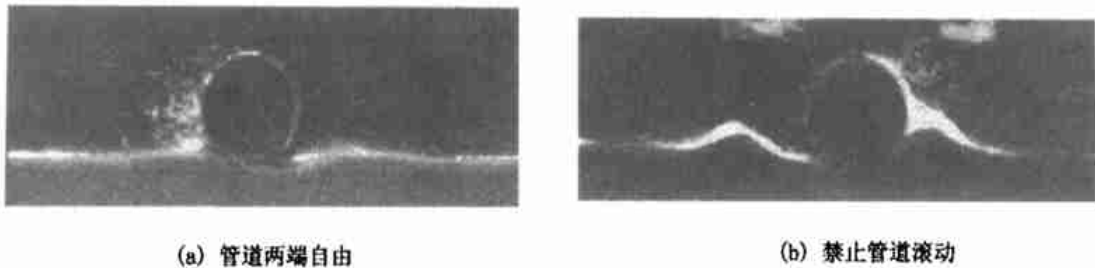


图 4 不同约束条件下管道的失稳形态

Fig. 4 The pattern of pipe s losing stability with different constraints

对试验结果进行无量纲分析发现,管道失稳的临界  $Fr$  数与管重量纲一的量  $G$  之间呈线性关系,见图 5。在同一无量纲管重  $G$  下,管道受约束时失稳的临界  $Fr$  数高于管道自由时的临界  $Fr$  数。并且在两种约束条件下, $G$  与  $Fr$  之间关系曲线的斜率亦不同。在砂床性质相同的情况下,管道受滚动约束时的斜率高于管道自由时的斜率。

另外,不同粒径的砂床,管道的稳定性也不同,这与砂的有效粒径  $d_{10}$  有一定关系。这是因为试验发现在相同条件下细砂较中砂更容易启动,床面更易遭冲蚀,砂粒在管道两侧的堆积提高了管道的稳定程度。

而当  $G$  超过临界值  $G_c$  时,管道是侧向稳定的,随着振荡流幅值的影响,管道有自埋的趋势,而不发生侧向失稳。图 5 所示三种情况的  $G_c$  值约分别为 0.70、0.53 和 0.40。

### 2.2.2 加载速度对管道稳定性影响

实际风暴的发展速度是多变的。为了研究不同加载速度对管道稳定性的影响,本文以铺设在中砂上的  $D = 0.03m$  和  $G_p = 4.22N/m$  的管道为例,初步研究了加载速度对管道稳定性的影响。

试验结果(见图 6)表明,加载速度的变化对砂粒的启动临界值影响不大,但对管道稳定性却有较大影

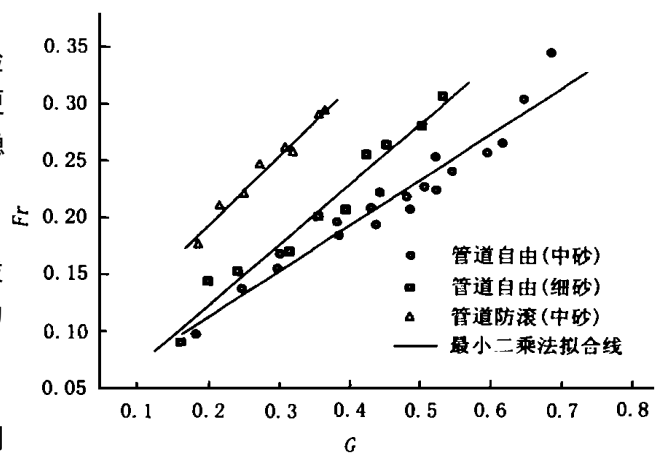


图 5  $G - Fr$  关系曲线

Fig. 5  $G - Fr$  curve

响:加载速度越快,则管道两侧砂粒运动形成的砂波高度越小,砂床对管道的阻力越小,此时管道越容易失去稳定。

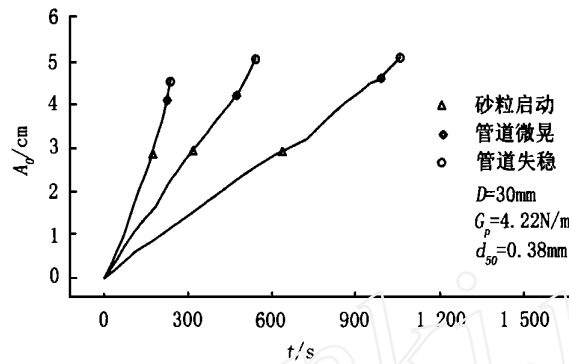


图 6 加载速度对管道稳定性的影响

Fig. 6 The effect of loading velocity on pipe stability

### 3 结 语

1) 利用振荡流水槽可以近似模拟波浪作用下海底管道失稳的“波-管-土”三者耦合效应,而前人的机械加载方法却不能。

2) 管道在两端自由和滚动受约束两种情况下的失稳过程,一般包括管道两侧砂粒启动、管道的轻微位移和管道失稳三个阶段。但在两种情况下第二、三阶段管道的运动形态不同。

3) 管道失稳的临界  $F_r$  数与管重量纲一的数量  $G$  之间大致呈线性关系,即同样直径的管道若水下重量不同,其抵御风暴的能力不同。管道的约束条件和海床性质对管道稳定性有一定影响。

4) 对同一水下重量的管道而言,振荡流幅值的增加速度越快,管道越容易失去稳定。加载历史对管道稳定性的影响不可忽视。

5) 本文研究了两种边界条件下的管道失稳条件。哪一种边界条件更接近实际,要参考管道的实际安装状态。

### 参考文献:

- [1] C G Lyons. Soil resistance to lateral sliding of marine pipelines[A]. Proceedings, Fifth Annual Offshore Technology Conference[C]. Paper OTC 1876, 1973, 479-484.
- [2] H Brennodden, O Sveggren, D A Wagner, et al. Full-scale pipe-soil interaction tests[A]. Proceedings, Eighteenth Annual Offshore Technology Conference[C]. Paper OTC 5338, 1986, 433-440.
- [3] D A Wagner, J D Muff, H. Brennodden, et al. Pipe-soil interaction model[A]. Proceedings, Nineteenth Annual Offshore Technology Conference[C], Paper OTC 5504, 1987, 181-190.
- [4] A C Palmer, J S Steenfelt, V Jacobsen. Lateral resistance of marine pipelines on sand[A]. Proceedings, 20<sup>th</sup> Annual Offshore Technology Conference[C]. Paper OTC 5853, 1988, 399-408.
- [5] 阎澍旺. 砂土对管道约束力的模型试验研究[J]. 海洋工程, 1996, 14(1): 62-72.
- [6] M A Foda, et al. Wave induced breakout of half-burial marine pipes[J]. J. Waterway, Port, Coast and Oc. Engrg., ASCE 1990, 116(2): 267-285.
- [7] 高福平, 顾小芸, 浦群. 海底管道失稳过程的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 304-308.
- [8] 竺艳蓉. 海洋工程波浪力学[M]. 天津大学出版社, 1991.