

试验研究

# 海底管道牵引铺设过程中 管壁与基土间摩阻力试验研究

马 良 郭承侃 郑传平  
(大连大学) (大连理工大学)

## 一、试验仪器及土料制备

### 1. 试验槽

用钢筋混凝土的钢筋张拉台座作为试验槽,并分隔成二段,每段长4.5 m、宽0.7 m、深0.4m,铺试验用土厚25 cm。

### 2. 模型

为模拟海底管道外包混凝土加重层与基土间摩阻力试验,试验模型用钢筋混凝土制作,与土接触的混凝土面平整光滑。为了便于试验时方便,模型制成弓形。模型两端伸出钢筋钩与牵引钢丝绳索相连接。模型在半径方向的尺寸与原型相同,其几何尺寸及重量如下:

模型几何尺寸及重量表

表 1

管 径 (mm)	模型长度 (cm)	模型外圆半径* (cm)	弦 高 (cm)	重 量 (kg)
φ325	150	18.75	10.5	81.45
φ529	150	29.45	13.5	111.30
φ720	150	39.50	13.5	122.25

\*模型外圆半径已考虑了加重层厚度,φ325为2.5cm,φ529为3.0cm,φ720为3.5cm。

### 3. 加力设备

用张拉钢筋的人力绞车施加牵引力。

### 4. 牵引力测量

用三轴剪力仪的测力钢环,量程1 000kg,其率定系数与气温有关。根据试验时大连气温:10、11月率定系数为3.26kg/0.01mm;12月率定系数为3.284kg/0.01mm。

### 5. 牵引力水平位移测量

用磁性表座将百分表固定在试验槽侧壁顶面,百分表触头顶在模型尾端的立板上,可随时读出模型牵引时的水平位移量。

## 6. 下沉深度量测

将测针底座亦固定在试验槽侧壁面上, 测针顶在模型中部肋板顶面测定牵引各阶段的下沉量。

## 7. 土料制备

试验用土料有细砂、轻亚粘土和海淤泥三种。

(1) 细砂 取自某建筑工地的砂料, 过 1 mm 筛子筛除大颗粒, 所得细砂根据筛分分析符合细砂范围标准。

(2) 轻亚粘土 根据资料黄河口表层轻亚粘土的塑性指数为 5.9~8.5 之间。用大连黄海岸边采挖的粉土与淤泥交互层的土料, 经风干、捣碎和过筛, 再充分拌匀后的土料, 经测量其塑性指数为 7.7, 在黄河口轻亚粘土的实测值范围内, 可作为试验用土。

(3) 海淤泥 根据 1987 年年底辽河口海滩钻探资料, 表层淤泥塑性指数在 14~21 之间。用大连黄海淤泥, 其塑性指数为 18.1, 在辽河口淤泥的实测范围内。又考虑到淤泥的强度可在较大范围内变化, 试验以三种不同强度的淤泥进行试验。

以上三种土料的主要物理力学指标见表 2:

三种土料主要物理力学指标

表 2

土料 名称	天然状态的基本物理性指标						流限 $w_L$ (%)	塑限 $w_p$ (%)	塑性 指数 $w_p$	压缩 系数 $a_{1-2}$ (kPa <sup>-1</sup> )	抗 剪 强 度			
	含水量 $w$ (%)	容 重		孔隙比 $e$	比重 $\rho_s$	稠度 $B$					快剪试		固快试	
		湿 $\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	干 $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )								凝聚力 $C_u$ (kPa)	内摩擦 角 $\varphi_u$ (°)	凝聚力 $C_{cu}$ (kPa)	内摩擦 角 $\varphi_{cu}$ (°)
细砂			1.6	0.68	2.668					0	41.3			
轻亚粘土	22.99	1.94		0.71	2.69	0.30	28.39	20.69	7.7	0.5099	2.452	37.5		
淤泥	37.62	1.80		1.072	2.71	0.79	41.44	23.34	18.1	0.1758	9.316		18.829 24.7	

## 二、试验及其结果

### 1. 细砂

(1) 摩阻力 为反映海滩退潮后的干涸状态, 试验时将细砂铺在试验槽内并达到试验要求的厚度, 灌水浸透和用锹撼实整平, 而后从下方排水孔将水排出。这样制备的细砂, 经测定其相对密实度  $D_r = 0.71$ 。再将管道模型放在约 25cm 厚的砂土面上, 安装测力钢环和测位移百分表, 用较慢速度牵引模型。在移动时牵引力的峰值即为静摩阻力。随后牵引力很快下降到一相对稳定值, 即为动摩阻力。试验结果见表 3 和图 1。

细砂摩阻力试验结果

表 3

项目	模型	第 一 组			第 二 组			第 三 组			备注
		$\phi 325$	$\phi 529$	$\phi 720$	$\phi 325$	$\phi 529$	$\phi 720$	$\phi 325$	$\phi 529$	$\phi 720$	
模型 + 砝码	$W$ (kg)	81.45	111.30	122.25	153.45	272.75	353.50	208.40	401.30	561.75	表中 9 个 $\bar{P}_r / \bar{P}_{max}$ 的平均值 为 0.948
峰值摩阻力平均值	$\bar{P}_{max}$ (kg)	41.56	58.82	69.72	81.10	151.64	202.07	113.90	224.51	321.35	
稳定摩阻力平均值	$\bar{P}_r$ (kg)	38.50	55.12	65.36	77.59	144.77	191.18	109.90	215.03	307.19	
	$\bar{P}_r / \bar{P}_{max}$	0.96	0.937	0.937	0.957	0.955	0.946	0.965	0.958	0.956	
次数	$n$	8	6	3	7	5	3	7	5	3	

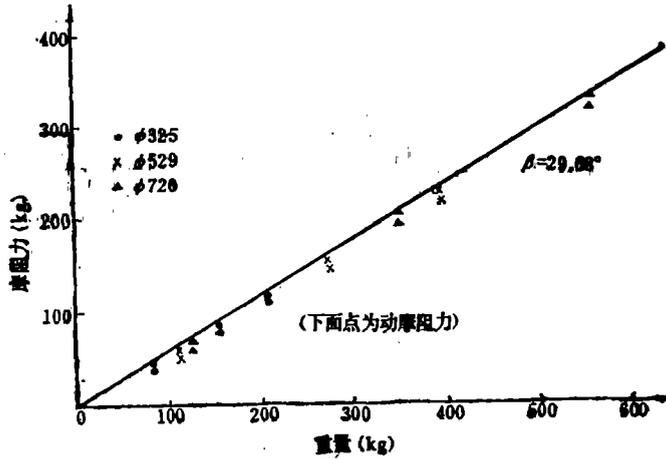


图 1 细砂摩阻力与重量关系

(2) 下沉深度 海底管道牵引铺设时的基土下沉过程可分为两个部分：一部分是管端头到达时的啃土作用引起的；另一部分是管体牵引移动时对土体拖挤作用造成的。在相当长的海底管道牵引移动过程中，前一部分是一次性的，而后一部分对基土的一个确定位置来说，是牵引过去的管道重复作用积累的，但最终也是达到某一稳定值。因此，在消除前一部分（啃土作用引起的部分）后，利用模型中部的 1 m 长度，反复牵引模拟并测量其下沉深度，最后得到图 2 所示的下沉深度与牵引距离的关系。

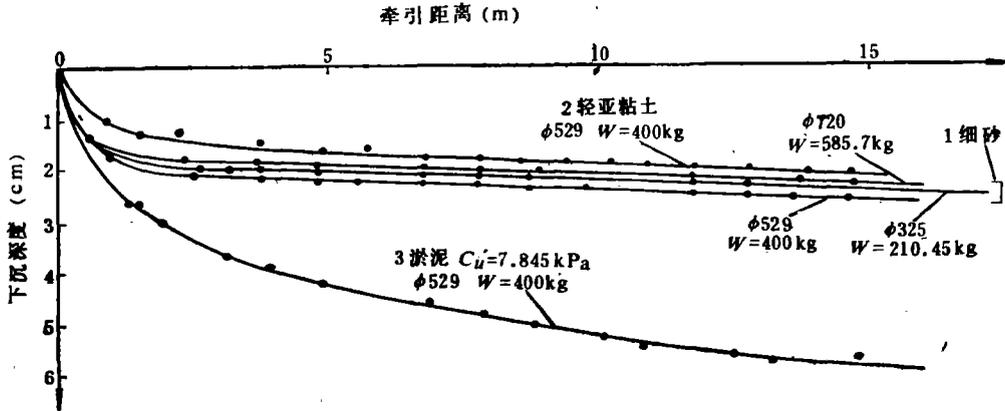


图 2 下沉深度与牵引距离关系

## 2. 轻亚粘土

(1) 摩阻力 在槽内充水，再把经过筛选并充分拌匀的轻亚粘土的土料撒入水中制成土浆。为加速固结，在轻亚粘土上下各铺一薄层砂土，并盖上布隔开，然后在其上加荷，以便水较快地排出使土体固结。停置 4 天后排水基本结束，去除面层砂土和布，经平整后进行试验。试验方法同细砂，试验结果见表 4 及图 3。

(2) 下沉深度 只用 $\phi 529$ 管模型试验, 总重  $W = 400\text{kg}$ 。试验方法同细砂, 试验结果见图 2

轻亚粘土摩阻力试验结果

表 4

项目	模型	第一组			第二组			第三组		
		$\phi 325$	$\phi 529$	$\phi 720$	$\phi 325$	$\phi 529$	$\phi 720$	$\phi 325$	$\phi 529$	$\phi 720$
模型+砝码重	$W$ (kg)	81.45	111.30	122.25	153.45	272.75	353.50	208.50	401.30	568.35
峰值摩阻力平均值	$\bar{P}_{max}$ (kg)	70.80	95.40	83.30	121.73	198.27	200.30	162.58	261.30	423.60
稳定摩阻力平均值	$\bar{P}_r$ (kg)	63.92	87.71	72.98	121.73	168.85	200.30	162.58	261.30	423.60
	$\bar{P}_r / \bar{P}_{max}$	0.903	0.920	0.880	1.00	1.85	1.00	1.00	1.00	1.00
次 数	$n$	3	5	3	2	3	2	2	2	2

说明: 表中  $\bar{P}_r / \bar{P}_{max}$  的 9 个值平均为 0.95。其中有 5 组摩阻力无降低趋势, 取  $\bar{P}_r = \bar{P}_{max}$ 。

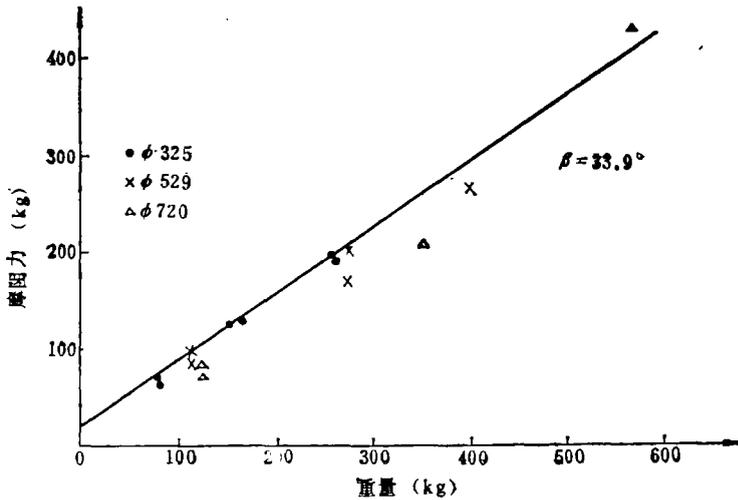


图 3 轻亚粘土摩阻力与重量关系

### 3. 海淤泥

(1) 摩阻力 把制备的淤泥土放入试验槽内, 加水浸透并拌匀, 置放 10 天使其达到预期的强度后开始试验。试验前先用室内小型十字板测定淤泥土的不排剪强度  $C_u$ 。(一般测 8~12 点平均), 为反映感潮段淤泥土的特性, 在泥面上加 2~3 cm 厚一层水, 试验方法同前。试验结果见表 5 及图 4。其中  $C_u = 5.786\text{kPa}$  的一组, 由于强度低, 摩阻力受模型停放时间的影响较大, 所以只测定 1 次。

在淤泥土面上牵引管模型时, 随变形增长牵引力不断加大, 逐渐达到某一稳定值。此后牵引力并不下降, 即动摩阻力与静摩阻力基本相同 ( $P_{max} = P_r$ )。

(2) 下沉深度 用  $\phi 529$  管模型, 总重  $W = 400\text{kg}$  时进行测定。试验方法同细砂, 试验结果见图 2。

必须指出, 以上各项试验管模型重量  $W$  是用对应不同充水深度管道的负浮力 ( $\text{kg}/\text{m}$ ) 折算确定的。

海淤泥摩阻力试验数据

表 5

不排水剪强度 $C_u$ (kPa)	管 外 径 (mm)	总 重 $W$ (kg)	摩阻力 $P_{m, \max}$ (kg)	试验次数 $n$
5.786	325	210.45	44.12	1
	529	398.30	91.50	1
	720	585.25	133.99	1
7.845	529	111.30	37.77	3
	529	279.30	91.20	3
	529	398.30	112.50	3
9.316	325	81.45	42.69	3
	529	273.00	72.58	3
	720	353.95	134.20	3

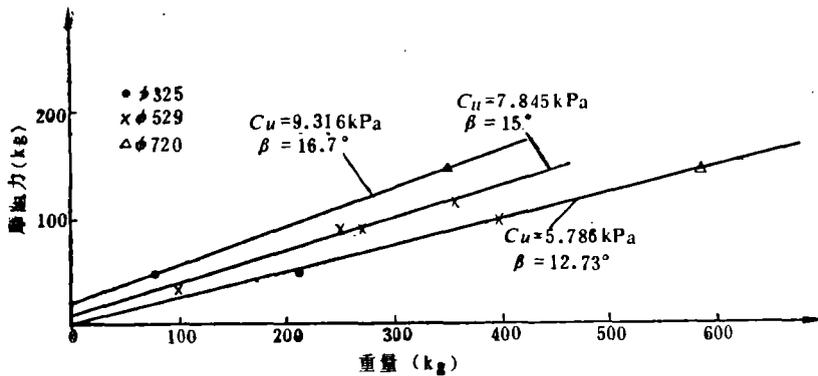


图 4 淤泥摩阻力与重量关系

### 三、结 论

1. 海底管道外包混凝土加重层表面与基土间的摩阻力特性可由  $\alpha$ 、 $\beta$  表示。图 1、图 3、图 4 所给出的结果, 是由 1 : 1 的模型试验测定的数值, 是可以信赖的。也为条件类同的管道牵引铺设时的摩阻力, 可在海底管道工程设计、施工中作为参考的重要依据。所选用的三种土料, 在国内各海区沿岸感潮段具有代表性的。摩阻力  $T$  应按库伦定律的形式表示:

$$T = \alpha + W \operatorname{tg} \beta$$

式中  $T$ ——摩阻力,  $\text{kg}/\text{m}$ ;  
 $\alpha$ ——初始摩阻力,  $\text{kg}/\text{m}$ ;  
 $W$ ——单位长度管负浮力,  $\text{kg}/\text{m}$ ;  
 $\beta$ ——外摩擦角,  $^\circ$ ;

当  $\alpha = 0$  时,  $\operatorname{tg} \beta$  为通称的摩擦系数。

2.  $\alpha$ 、 $\beta$  与管径无关。

3. 动摩阻力与静摩阻力的比值, 对试验所用的三种土料, 细砂土为0.948、轻亚粘土为0.95、淤泥土为1.0。考虑到人工制备土样结构性较弱, 可以估计到对具有一定天然结构的粘性土, 该比值会比上述测定值低些。而天然细砂与颗粒组成相同的人工制备细砂是相一致的。

4. 将三种土料测定的内摩擦力角 $\varphi$ 与管壁、土之间的外摩擦角 $\beta$ 相比较, 详见表6。

三种土料的内、外摩擦角

表6

摩擦角	土料	细砂	轻亚粘土	淤泥	备注
内摩擦角 $\varphi$		41.30°	37.50°	24.7°	淤泥土外摩擦角 与其不排水剪强度有关
外摩擦角 $\beta$		29.68°	33.9°	12.73° 15.00° 16.70°	

从表6可见, 轻亚粘土的外摩擦角最高, 已接近内摩擦角度。细砂较差, 仅占内摩擦角度70%左右。淤泥则与其不排水剪强度有关, 强度愈高发挥程度愈好。这些结果完全符合通常的工程经验和可信度。

5. 下沉深度, 管道牵引铺设过程中的基土下沉, 是管端头的啃土作用和管体拖挤作用两者造成的。管端头的啃土作用引起的那一部分, 可以用适当形式的拖管头使之减至最小限度。而管体拖挤作用引起的部分, 在达到稳定值以前与牵引过去的管长有关, 直至达到稳定值。从三种代表性的土料试验结果(图2)看出, 下沉量随牵引过去的管长先增加较快, 逐渐增加缓慢, 牵引过去的管长达到相当长时, 可望达到与土质相应的稳定值。这个稳定值大小与土质和管道单位长度负浮力有关。

6. 以上试验结果, 均系在管轴线方向牵引中得到的。如需要与垂直管轴方向侧移的摩阻力和下沉深度, 由于受着不同下沉深度(管窝)引起的阻抗, 侧移时因被动土压力的存在, 上述试验结果情况不符, 所以不适用。显然, 这时的侧移摩阻力由于受到侧移动时被动土压力的影响必然增大。根据在细砂中少量试验得知, 也将比纵向牵引摩阻力增大30%~40%以上, 一般摩擦系数可达0.7~0.75左右。

(收稿日期: 1989年12月25日)

(上接第6页)

### 参 考 文 献

- [1] 陈家琅:《石油气液两相管流》, 石油工业出版社, 1989
- [2] D. 巴特沃思, G. F. 休伊特:《两相流与传热》, 原子能出版社, 1985
- [3] 陈家琅:石油气液多相管流研究展望,《油田地面工程》, 1989年, 第5期, 第1~4页
- [4] Г. С. 卢托什金:《油气水的收集与处理》, 石油工业出版社, 1987

(收稿日期: 1990年7月11日)