

# 玻璃钢夹砂管管土摩擦系数室内模型试验研究

叶朝良, 高新强, 宋鹤

(石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

**摘要:**通过顶管法室内模型试验,研究了玻璃钢夹砂管与回填中砂之间的摩擦系数。分析了埋深、管径和压实度对管土摩擦系数的影响。试验结果表明:(1)松砂条件下,管身摩阻力随顶进位移的增大呈线性增长,当顶进位移增大到 2~3 时,管身摩阻力达到峰值,最后趋于稳定;随着埋深的增大,摩擦系数逐渐增大,但增量逐渐变小,其值在 0.26~0.28 之间。(2)管径的变化基本上不会对玻璃钢管道与砂土之间的摩擦系数产生影响。在管径不变的情况下,随着埋深的增加,管身摩阻力也随之增加。(3)随着压实度的增大,摩擦系数也随之增大,压实度从 75% 增至 95% 时,摩擦系数从 0.26 增至 0.32,说明压实度的变化对玻璃钢管道与砂土之间的摩擦系数的影响很大。

**关键词:**管土摩擦;摩擦系数;模型试验

**中图分类号:**TU43 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2015)03-0030-06

## 0 引言

在我国东北、华北、西北等地区,直埋热力管道遍布广泛。直埋敷设供热管道的受力计算主要是计算补偿器的弹性力、管道受到的摩擦力以及由于不平衡内压力产生的水平推力。在受力计算中,最关键的就是确定管道与回填土的轴向摩擦力。

关于管土摩擦室内模型试验方面,前人进行了研究。1985 年,K. F. Lambrakos<sup>[1]</sup>在墨西哥湾在水深分别为 18.3 m 和 9.15 m 处测试了管道侧面土壤摩擦阻力,利用测试数据推导得到管侧砂和粘土的滑动摩擦系数库仑模型,数据分析认为在汽车运动的瞬间最大的土抗力,为最大的摩擦系数是 0.45。张胜旺<sup>[2]</sup>(1995)、陈育志<sup>[3]</sup>(2002)针对管线在深埋松砂土层中,在上举倾斜方向运动下,所受土壤上举力之行为做了探讨。研究了管线、埋深和管线倾斜角 3 个因素对上举力的影响。用 3 种不同管径之管线,研究了在不同埋入比(H/D)及倾斜角度下,探讨浅埋条件下管线在松砂及密砂两种状态砂土中,所受轴向土壤摩擦力与侧向土壤阻力之行为,并以一种平面理论及两种对数螺旋破坏理论分析了试验结果。2005 年,肖世国等<sup>[4]</sup>采用室内试验的方法研究了混凝土与配制的 5 种由膨润土触变泥浆和实际工程中的粘性土形成的浆土混合物之间以及混凝土与钢管之间的摩擦系数,研究结果表明,随着触变泥浆与粘性土的质量比的增大,摩擦系数则逐渐减小,在纯触变泥浆时摩擦系数则达到或接近最小值。

2006 年,卢廷浩等<sup>[5]</sup>将常规直剪仪改装解决了剪切过程中实际剪切面积不断减小,上、下盒边缘处的应力集中明显等问题,试验得到了不同含水率、不同正应力下土与不同结构接触界面的剪切应力-应变曲线,并研究了含水率对黏土与混凝土和黏土与砖接触界面的抗剪强度参数影响。2007 年,黄吉龙<sup>[6]</sup>通过对玻璃钢夹砂顶管进行摩阻力特性整管试验,得到了玻璃钢夹砂管外壁、混凝土与上海地区典型土层间的摩擦系数。2008 年,蔡洁茵<sup>[7]</sup>采用重塑土进行了玻璃钢夹砂顶管与土体摩阻力特性整管试验,得到玻璃钢夹砂顶管外壁与上海地区典型土层间的摩擦系数,并分析了顶管外壁摩阻力发展特性。

2011 年,赵志刚等<sup>[8]</sup>认为在计算摩擦力时,由于当前许多供热工程的直埋供热管道已突破 DN500

mm,超出了《规程》的限制。土壤的消力拱作用需要根据不同管径和土质情况进行土壤力学分析,以判断管顶覆土深度为何值时出现消力拱作用,最后还应通过试验进一步验证。

文献调查结果表明,目前玻璃钢管土摩擦系数的研究较少,尤其是大直径玻璃钢管的管土摩擦模型试验未见报道。本次模型试验研究依托石家庄华电供热集团有限公司供热工程。该工程由两根高温水管道与已设计蒸汽管道 DN700 共同敷设,高温水管道管径为 DN1 400,管网单线全长约 5.8 km。为了研究直埋供热管与回填砂土的摩擦系数变化规律,通过室内模型实验测试了 DN200、DN400、DN500 等 3 种规格玻璃钢直埋供热管道和回填砂的摩擦系数。

## 1 模型试验方案

所谓摩擦就是两个相互接触的表面发生相对运动或具有相对运动趋势时,在接触表面间产生的阻止相对运动或相对运动趋势的现象。试验的研究对象为玻璃钢管道与砂土之间的摩擦系数。试验主要研究管土界面的摩擦系数以及管径、埋深和压实度对摩擦系数的影响。

### 1.1 试验材料选择

#### 1.1.1 回填土

试验所用回填材料为中粗砂,取自石家庄南三环管道施工现场,土样的松散密度  $\rho = 1.52 \text{ g/cm}^3$ ,经过室内击实试验可得出土样的最大干密度  $\rho_d = 2.02 \text{ g/cm}^3$ ,详见图 1。

#### 1.1.2 试验管材

试验所用管道为玻璃钢管,管内径分别为 200 mm、400 mm 和 500 mm,管壁厚度为 10~13 mm 不等,表面较为光滑但不平整。如图 2 所示。

#### 1.1.3 实验仪器设备

试验中管土之间的运动采用顶管法。

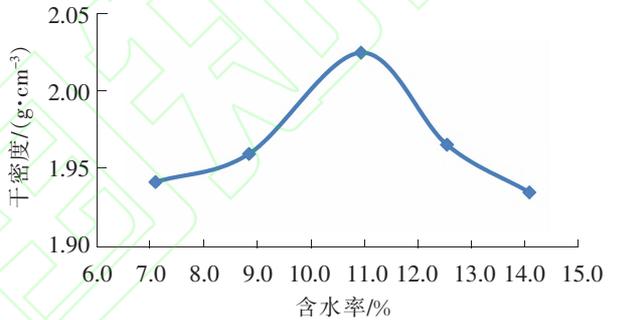


图 1 含水率与干密度关系曲线



图 2 玻璃钢管试件



图 3 模型箱



图 4 EV2 静态变形模量仪

顶管试验过程,在模型箱内完成,模型箱的长宽高分别为 300 cm、100 cm 和 200 cm(如图 3)。模型箱两端支护挡板,将玻璃钢管置于其中,摩擦长度设为 100 cm,向模型箱内回填中粗砂,利用千斤顶通过反力墙施加反力,顶进玻璃钢管,利用仪器读取位移和顶进力等相关数据。

测试管端水平顶力值采用 Ev2 静态变形模量仪(如图 4)。LUKAS 公司全套液压系统,包括高压软管(2 m)、压力缸(压力 100 kN、冲程 150 mm)、液压泵(50 MPa)、压力缸延长装置(可插拔,6 件)、压力板(带磁铁和万向头)承载板以及带有手柄和可调节的盒式水准器(直径:300 mm,厚度:25 mm)、电子力传感器(50 kN,精度 0.000 1 MPa,包括压力盒和连接装置)、电子测量表(测量范围 25 mm,精度 0.01 mm,数字显示)。

## 1.2 试验方案简介

(1)对管内径为 200 mm 的玻璃钢管进行试验,回填土为松砂,埋深分别为 200 mm、500 mm 和 1 000 mm,通过埋深的不同可以对比出在松砂条件下埋深对管身摩阻力以及管土摩擦系数的影响。

(2)采用不同的压实方法对松砂进行压实,压实度分别为 75%、85%、90% 和 95%,埋深均为 200 mm。通过本组试验可以分析出在相同埋深条件下,不同压实度对管身摩阻力以及管土摩擦系数的影响。

(3)更换内径为 400 mm 和 500 mm 的玻璃钢管再次进行试验,土样采用松砂,埋深分别为 200 mm、500 mm 和 1 000 mm。通过本组试验可以得出大管径玻璃钢管在不同埋深条件下,管身摩阻力以及管土摩擦系数的变化。同第一组松砂试验进行对比得出在相同埋深条件下,管径大小对管身摩阻力以及管土摩擦系数的影响。

## 2 试验数据分析

采用顶管法试验,故摩擦系数依据文献[9]中的理论公式(1)进行计算

$$P = f\gamma D_1 [2H + (2H + D_1)\tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2} + \frac{\omega}{\gamma D_1})]L + P_F \quad (1)$$

式中, $P$  为计算的总顶力(kN); $\gamma$  为管道所处土层的重力密度(kN/m<sup>3</sup>); $D_1$  为管道的外径(m); $H$  为管道顶部以上覆盖土层的厚度(m); $\varphi$  为管道所处土层的内摩擦角(°); $\omega$  为管道单位长度的自重(kN/m); $L$  为管道的计算顶进长度(m); $f$  为顶进时,管道表面与其周围土层之间的摩擦系数; $P_F$  为顶进时,工具管的迎面阻力(kN)。

试验中,由于玻璃钢管置于模型箱中,两端裸露,故在利用上式进行计算时,应令  $P_F = 0$ 。其他数值均由试验直接测得或间接计算所得。

### 2.1 埋深对管身摩擦力的影响

表 1 为松砂条件下不同管径在不同埋深情况下的管身摩阻力值。表 1 中的管端顶力稳定值与图 5 相对应,以管径 200 mm 为例,试验中玻璃钢管与砂土接触长度为 1 m,玻璃钢管的外径为 0.21 m,因此玻璃钢管与砂土的接触面积为 0.659 4 m<sup>2</sup>,根据公式(2)可计算出管身摩阻力,其他两组的计算方法与此相同,具体数值如表 1 所示。

$$f = FA/S \quad (2)$$

式中, $f$  为管身摩阻力(kPa); $F$  为管端顶力稳定值(kPa); $A$  为载荷板面积(m<sup>2</sup>); $S$  为玻璃钢管与砂土的接触面积(m<sup>2</sup>)。

表 1 不同管径在不同埋深情况下的管身摩阻力

管内径/mm	埋深/mm	管端顶力稳定值/kPa	管身摩阻力/kPa
200	200	18	1.91
	500	24	2.55
	1 000	30.4	3.23
400	200	21	9.77
	500	28	13.02
	1 000	34.4	16
500	200	20.6	12.56
	500	34	20.72
	1 000	47	28.65

图 5 为松砂条件下管径为 200 mm 的玻璃钢管顶进试验的管端顶力与顶进位移的变化曲线。由图 5 可见,顶管开始顶进时,管身摩阻力随顶进位移的增大呈线性增长,当顶进位移增大到 2 mm 左右时,管身摩阻力达到峰值,随着管身继续顶进,管身摩阻力稍微减小,最后趋于稳定。当管径为 400 mm 和 500 mm 时,管端顶力与顶进位移的变化曲线的变化规律和管径为 200 mm 的基本一致。

由表 1、图 5 可见,在管径不变的情况下,随着埋深的增加,管身摩阻力也随之增加,而在埋深不变的情况下,改变玻璃钢管与砂土的接触面积,也会使管身摩阻力增大。

## 2.2 压实度对管身摩擦力的影响

表2为相同管径不同压实度条件下的管身摩阻力值。表2中的管端顶力稳定值与图6相对应,管身摩阻力仍由公式(2)计算得出。由表2可见,在相同管径同一埋深条件下,随着压实度的增大,管身摩阻力也随之增大。

表2 不同压实度情况下的管身摩阻力

埋深/mm	压实度/%	管端顶力稳定值/kPa	管身摩阻力/kPa
200	75	18.0	1.91
	85	29.6	22.55
	90	37.5	28.57

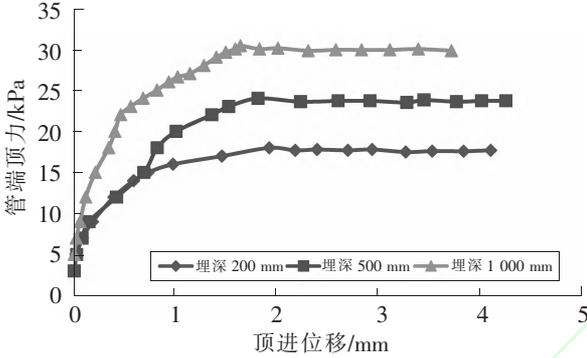


图5 不同埋深下的管端顶力与顶进位移的变化曲线

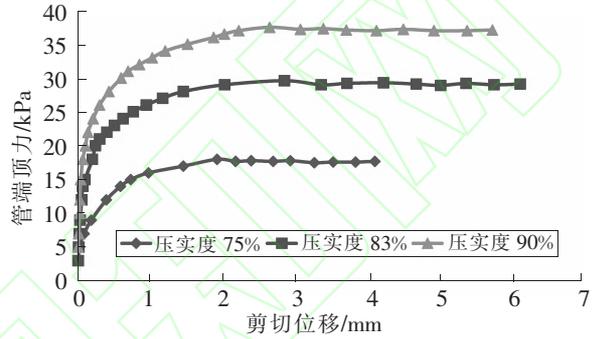


图6 不同压实度情况下的管端顶力与顶进位移的变化曲线

图6为管径为200 mm的玻璃钢管在不同压实度条件下顶进试验的管端顶力与顶进位移的变化曲线。可见,顶管开始顶进时,管身摩阻力随顶进位移的增大呈线性增长,当顶进位移增大到2~3 mm左右时,管身摩阻力达到峰值,随着管身继续顶进,管身摩阻力稍微减小,最后趋于稳定。由于压实度的不同,当管端顶力达到峰值时,剪切变形的大小也不相同,随着压实度的增大,剪切位移略有增大。

## 2.3 埋深及管径对摩擦系数的影响

松砂状态下玻璃钢管道与砂土之间的摩擦系数如表3所示,是松砂条件下不同管径的玻璃钢管在不同埋深情况下摩擦系数的对比。可见,在管径不变的条件下,随着埋深的增加,摩擦系数有增大的趋势,但增大的幅度很小,基本保持在0.26~0.28之间。而各管径玻璃钢管在埋深相同的情况下,摩擦系数变化不大在0.276~0.281之间变化,较为稳定,详见表3和图7。

此条件下,管径的变化基本不会影响玻璃钢管道与砂土之间的摩擦系数,而随着埋深的增大,玻璃钢管道与砂土之间的摩擦系数逐渐增大,但增量逐渐变小。

## 2.4 压实度对摩擦系数的影响

试验仅对管内径为200 mm的玻璃钢管进行了不同压实度情况下摩擦系数的测定。如表4所示,为内径为200 mm,埋深为200 mm条件下,不同压实度对。由表4和图8可见,随着压实度的增大,摩擦系数有所增大,且增大的幅度较大,多项式拟合关系良好,与压实度的平方项、一次项有关,当压实度达到100%时( $x=1$ 时),摩擦系数可达到0.329。

表3 松砂条件下不同管径在不同埋深情况下的摩擦系数

管内径/mm	埋深/mm		
	200	500	1000
200	0.263 7	0.271 5	0.279 8
400	0.265 3	0.274 4	0.281 5
500	0.262 7	0.270 9	0.276 2

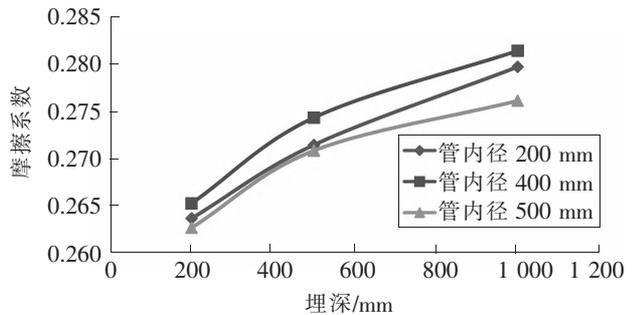


图7 不同管径情况下埋深与摩擦系数的关系曲线

表 4 同一埋深不同压实度情况下的摩擦系数

管内径/mm	压实度			
	75%	85%	90%	95%
200	0.263 7	0.305 9	0.318 9	0.326 4

试验结果说明,在现场埋管填筑过程中,严格控制回填土的压实度极为关键,玻璃钢管与回填中砂之间的摩擦系数,满足规范压实要求的条件下,均可达到 0.30 以上,95%的压实度摩擦系数可达 0.33。

### 3 结论

通过对玻璃钢管的顶进试验,得到了玻璃钢管外壁与砂土之间的摩擦系数,研究了玻璃钢管外壁的摩阻力变化特点,分析了影响摩擦系数与摩阻力的影响因素,可得到如下结论:

(1)松砂条件(压实度在 75%)下,顶管开始顶进时,管身摩阻力随顶进位移的增大呈线性增长,当顶进位移增大到 2~3 mm 时,管身摩阻力达到峰值,随着管身继续顶进,管身摩阻力稍微减小,最后趋于稳定。随着埋深的增大,玻璃钢管道与砂土之间的摩擦系数逐渐增大,但增量逐渐变小,其范围值在 0.26~0.28 之间。

(2)管径的变化基本上不会对玻璃钢管道与砂土之间的摩擦系数产生影响。在管径不变的情况下,随着埋深的增加,管身摩阻力也随之增加。

(3)随着压实度的增大,摩擦系数也随之增大,压实度从 75%增至 95%时,摩擦系数从 0.26 增至 0.32。玻璃钢管与回填中砂之间的摩擦系数,满足规范压实要求的条件下,均可达到 0.30 以上,95%的压实度摩擦系数可达 0.329。从而表明压实度的变化对玻璃钢管道与砂土之间的摩擦系数的影响很大。

### 参 考 文 献

- [1]K. F. LAMBRAKOS. Marine pipeline soil friction coefficients from in-situ testing[J]. Ocean Engineering, 1985(12): 131-150.
- [2]张胜旺. 管线在深层松砂中倾斜拉力之行为[D]. 台湾:国立中兴大学,1995.
- [3]陈育志. 倾斜管线在砂土中摩擦及曳阻力之研究[D]. 台湾:国立中兴大学,2002.
- [4]肖世国. 管幕内顶进箱涵时外表面摩擦系数的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(15):2746-2750
- [5]卢廷浩,王伟. 土与结构接触界面改进直剪试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2006,22(1):82-85.
- [6]黄吉龙. 大口径玻璃钢夹砂顶管室内试验与数值分析[D]. 上海:上海交通大学,2007.
- [7]蔡洁茵. 大口径玻璃钢夹砂顶管试验与应用[J]. 中国市政工程,2008(B12):72-75.
- [8]赵志刚,门亚琨,杨宝锐. 直埋热水供热管道摩擦力计算探讨[J]. 煤气与热力,2011,31(9):15-17.
- [9]北京市市政工程局. 给水排水管道工程施工及验收规范[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1998.

## Research on Pipe-soil Friction Coefficient of FRPM Pipe by Laboratory Model Test

Ye Chaoliang, Gao Xinqiang, Song He

(School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** Through laboratory model tests of the pipe jacking method, the friction coefficient between FRPM pipe and backfilled sand is studied. Effects of burying depth, pipe diameter and compaction degree

(下转第 39 页)

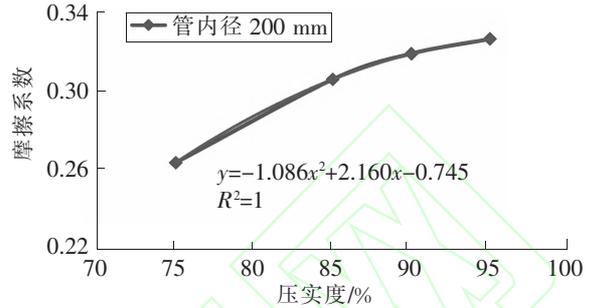


图 8 压实度与摩擦系数的关系曲线

## 4 结论与展望

- (1) 由于粗骨料反射波的影响,与粗骨料直径相似的空洞不易被检测出来。
- (2) 空洞的直径越大,越容易被检测出来。
- (3) 浅层探测应选择高频天线,深层探测应选择低频天线。

## 参 考 文 献

- [1] 赵百杰. 探地雷达检测高速公路路基工程量[J]. 石家庄铁道学院学报:自然科学版,2008,21(4):84-88.
- [2] 于海兵,王少钦,王天亮. 探地雷达技术在探测墩下隐伏岩溶中的应用[J]. 石家庄铁道学院学报,2007,20(2):69-72.
- [3] 李卓球,方玺,水中和. 混凝土检测中雷达和超声波成像效果比较[J]. 华中科技大学学报:城市科学版,2005,22(4):1-3.
- [4] 徐莹,徐宏武. 探地雷达和超声波法在混凝土结构检测中的应用[J]. 土木工程与管理学报,2012(1):97-101.
- [5] 汪贵春. 挡墙质量无损检测技术应用研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2009.
- [6] 徐茂辉,谢慧才. 混凝土密实度的雷达检测方法[J]. 四川建筑科学研究,2005(8):100-103.

## Applied research of Ground Penetrating Radar Technology in Concrete Cavity Detection

Zhao Dejie<sup>1</sup>, Zhang Yongtao<sup>2</sup>, Guo Zhuohao<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. China State Construction International Investments(China) Limited, Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** Nowadays, the ground penetrating Radar technology is widely used in concrete cavity detection. However, it is pretty hard to recognize inanity due to the influence of steel mesh. Tests on concrete holes are carried out under various circumstances, and there are detailed introductions about modeling, parameter setting, line layout, and data processing. The tests demonstrate that the ground penetrating radar can clearly identify the holes of concrete.

**Key words:** inanity; reinforced concrete; image analyzing; ground penetrating Radar

(上接第34页)

on pipe-soil friction coefficient are analyzed. Results from model tests show that: (1) Pipe friction force increases linearly with the increasing of jacking displacement in the condition of loose sand. It will reach to the maximum value and then tend to be stable under test conditions when jacking displacements reach about 2~3 mm; Friction coefficient increases gradually with the increasing of burying depth, but its increment which is 0.26~0.28 reduces gradually. (2) The friction coefficient of FRPM pipe and sandy soil will not be influence by pipe diameter on the whole. Pipe friction force increases with the increasing of burying depth in the condition of constant pipe diameter. (3) Increment of compaction degree will lead to the increment of friction coefficient. When compaction degree increases from 75% to 95%, friction coefficient increases from 0.26 to 0.32. It shows that compaction degree influences the friction coefficient of FRPM pipe and sandy soil greatly.

**Key words:** pipe-soil friction; friction coefficient; model test