

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.120



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



矩形管廊上浮过程管土相互作用透明土模型 试验研究

吴禹含¹, 亓戈平¹, 汤宇腾²

(1. 重庆大学 土木工程学院; 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400450; 2. 湖南大学
土木工程学院 长沙 410082)

摘要: 矩形管廊作为地下综合管廊建设中的异形截面管廊, 其上浮过程对土体的影响相较于传统圆形管廊更为复杂, 但目前对矩形管廊上浮过程中管土相互作用的研究较少。针对该问题, 开展矩形管廊上浮过程管土相互作用透明土模型试验, 重点测量和研究管廊上浮过程中不同密度度及不同埋深状态下矩形管廊的 $p-y$ 曲线变化及管廊周围土体的位移场变化, 并深入分析管周土体的位移变化面夹角。研究结果表明: 不同密度度下不同矩形管廊埋深位置处的 $p-y$ 变化趋势相似, 都经历了线性上升、峰值变化、快速下降和缓慢下降阶段; 矩形管廊密度度及埋置深度越大, 其变化幅度及最大承载力值越大; 相同埋深处的矩形管廊在上升过程中不同阶段时的土体位移场变化类似, 且管周土体位移会随着阶段的递进从整体向上移动逐步转化为管廊上下部向上移动四周向下移动; 相同密度度下同埋深处的土体位移变化面夹角会随着上升高度的增加而增加。

关键词: 矩形管廊; 综合管廊; 管廊上浮; 透明土模型试验; 管土相互作用; 位移场

中图分类号: TU990.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-11

Experimental study of transparent soil modelling of pipe-soil interaction during uplift of rectangular pipe gallery

WU Yuhan¹, QI Geping¹, TANG Yuteng²

(1. School of Civil Engineering; Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China)

Abstract: As a type of non-circular section corridor in the construction of underground comprehensive pipe corridors, the uplift process of rectangular pipe corridors has a more complex impact on the surrounding soil compared to traditional circular corridors. However, there is currently limited research on the pipe-soil interaction during the uplift process of rectangular pipe corridors. To address this issue, a transparent soil model test was conducted to study the pipe-soil interaction during the uplift process of rectangular pipe corridors. The focus was on measuring and analyzing the changes in the $p-y$ curves of the rectangular pipe corridors at different

收稿日期: 2024-08-30

基金项目: 重庆杰出青年科学基金(cstc2021jcyj-jqX0017)

作者简介: 吴禹含(1999-), 男, 主要从事透明土研究, E-mail: wuyuhan1127@126.com。

亓戈平(通信作者), 男, 博士生, E-mail: 794178309@qq.com。

Received: 2024-08-30

Foundation item: Chongqing Outstanding Youth Science Foundation (No. cstc2021jcyj-jqX0017)

Author brief: WU Yuhan(1999-), main research interest: transparent soil, E-mail: wuyuhan1127@126.com.

QI Geping (corresponding author), PhD candidate, E-mail: 794178309@qq.com.

densities and burial depths, as well as the displacement field changes of the surrounding soil. The research findings indicate that the p - y curve trends at different burial depths of the rectangular pipe corridor exhibit similar characteristics under varying densities, going through phases of linear increase, peak variation, rapid decline, and gradual decrease. The greater the density and burial depth of the rectangular pipe corridor, the larger the amplitude of change and the maximum bearing capacity. The displacement field changes of the soil at the same burial depth during different stages of the uplift process are similar, with the surrounding soil displacement transitioning from an overall upward movement to localized upward movement at the upper and lower sections of the corridor while the surrounding areas move downward. Additionally, at the same density and burial depth, the angle of the displacement change surface of the soil increases with the height of uplift.

Keywords: rectangular pipe gallery; comprehensive pipe corridors; uplift of pipe gallery; transparent soil modelling tests; pipe-soil interaction; displacement field

随着城市建设的快速发展,地下综合管廊在市政管线建设中发挥着至关重要的作用,它成功解决了城市发展过程中各类管线的维修、扩容造成的“拉链路”和空中“蜘蛛网”的问题,对提升城市总体形象,创造城市和谐生态环境起到了积极推动作用。然而,近年来,地下管道灾害频发,地震液化、地下水上涨及地质变动等都会导致地下管道及结构发生破坏,使得地下结构发生上浮现象,最终导致地下管道发生破坏^[1]。

目前关于地下管廊与土相互作用的研究有很多。赵欢等^[2]通过建立合理的数学模型对回填土地基的不均匀沉降导致的管道力学性状的变化进行了分析,确定了应力集中的区域,为解决由于地基不均匀沉降引起的管道渗漏和爆管等问题提供了一定的理论依据。陈苏等^[3]开展了可液化场地上三拱立柱式地铁地下车站结构模型试验,分析了地铁车站结构周围模型地基土的液化机制及模型结构的变形机制,得出了地基孔压的变形特征和模型结构的地震反应特性。Maitra 等^[4]通过数值模拟和理论推导的方法研究了管道埋深、管-土接触面摩擦因数、单位土体重度和土体抗剪强度对承受竖直向上荷载作用的管道的影响,提出了在竖直向上荷载作用下管道极限承载力的计算方法。Aubeny 等^[5]基于有限元分析方法研究了二维平面应变条件下,圆形管道的水平极限承载与管道埋置深度的关系,并用经典塑性理论的上限解和下限解进行了验证。Bransby 等^[6]研究了近海液化黏土中圆形管道的竖直向上的极限承载力,得到了相应的极限承载力的经验方程和力-位移响应的规律,并运用大变形有限元分析方法研究了海底圆形管道-土体相互作用的耦合固结特性。Chatterjee 等^[7-8]利用有限元分析软件 ABAQUS,通过数值模拟的方法研究了深海中管道在大变形条件下管-土的相互作用。Chen 等^[9]通过一系列全尺寸试验研究了荷载作用下块状软

黏土中管道向上隆起屈曲时管-土的相互作用关系。Gong 等^[10]将土体中锚杆、管道和地基隆起的抗拔阻力及其相应的破坏机制用于隧道隆起研究。张鑫磊等^[11]提出一种用于控制地下管廊位移的控制装置,通过多组振动台模型试验研究,揭示了可液化土体中浅埋管廊的上浮机制。然而,目前关于管廊的研究大都停留在圆形截面管廊的研究中,针对矩形管廊下的研究较少。Tong 等^[12]通过二维有限元极限分析(FELA)研究了地下矩形管廊在不排水粘土中的极限阻力在纯水平和垂直载荷下的性能,为构建管道-土壤相互作用的 p - y 关系提供了基础。Keawsawasvong 等^[13]采用二维平面应变有限元来确定该问题的极限载荷,提出了一种关于黏土中矩形桩极限侧向承载力的新数值解。张治成等^[14]基于 Plaxis 3D 平台建立管-土相互作用的三维有限元模型,结合实测数据提出了适用于矩形管廊顶管施工特点的土体收缩率的确定方法。李怀翠^[15]通过数值模拟发现加固范围的增大对矩形管廊的内力与变形将不再有明显的影响。韩冰等^[16]利用有限元模拟方法模拟各个影响因素下对土体更直观准确的扰动分析,并对各个因素的敏感度做出分析。

综上所述,目前关于矩形管廊的研究大多局限于数值模拟,缺少模型试验研究。而透明土模型试验作为一种新型模型试验技术,能有效地观测管廊上浮过程中地位移场变化。因此,笔者基于新型透明土模型试验^[17-19],开展了矩形管廊上浮过程管土相互作用透明土模型试验研究,探究矩形管廊不同埋深在不同密实度砂土下上浮过程中的 p - y 曲线及位移场变化。

1 矩形管廊上浮透明土模型试验

1.1 管廊模型及模型槽

1.1.1 管廊模型

试验原型为沈阳一个综合管廊工程案例^[20],该

管廊设计为矩形截面,其实际尺寸为7 500 mm×4 500 mm。为了确保试验室模型能够准确反映实地情况,同时考虑到模型大小对试验结果可能产生的影响,选择1:150的几何缩放比例(参照地下开挖空间模型常用的缩放范围,通常介于1:20~1:200之间)。试验中选用的模型材料是PVE。

依据所选的缩放比例,试验模型采用了较为常见的矩形管廊模型,其截面长 $a=50$ mm、宽 $b=30$ mm,管廊壁厚度为3 mm。模型的总长度为145 mm,如图1所示。为了确保试验的顺利进行并防止泄漏,模型的矩形截面开口部分被密封起来;此外,在密封区域涂抹了凡士林,旨在降低表面摩擦力,从而提高试验数据的准确性与可靠性。

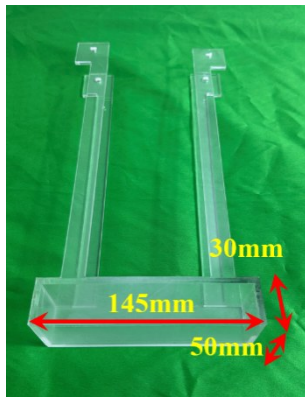


图1 矩形管廊模型

Fig.1 Rectangular pipe corridor model

1.1.2 模型槽

为确保实验过程中能有效地抽气减压和预加载荷,引入一块特制的加压顶板,如图2所示。顶板同样由透明有机玻璃制成,具备一定的孔隙度,其尺寸被精细调整为长499 mm、宽149 mm,稍小于模型容器的内部尺寸。这种微小的尺寸差异旨在减少顶板与容器内壁之间的接触摩擦,确保顶板在模型箱内可以顺畅地移动。

在试验布置时,考虑到管廊可能带来的扰动效

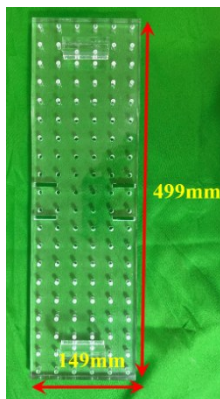


图2 加压板

Fig.2 Pressure plate

应,透明砂土中管廊的位置距离模型容器边缘的距离至少等于桩体中心点至容器边界的3.5倍边长距离。这一决策基于当前研究领域的共识,即管廊对周围土壤的扰动效应通常局限在管廊直径的3.5倍范围内^[21]。

为了满足试验条件,定制了一个由透明有机玻璃构成的立方体模型容器,其尺寸为长500 mm、宽150 mm、高300 mm,如图3所示。为了便于精确测量和调控透明土层的铺设厚度及桩基的定位,在模型容器的中心垂直处附着了透明的刻度标尺,这些标尺沿着容器的高度方向分布,提供了直观的参照。

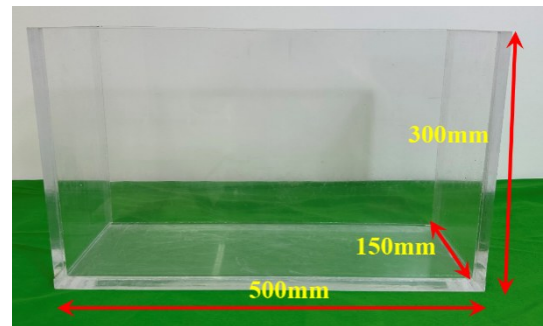


图3 模型槽

Fig.3 Model slot

1.2 透明土材料

试验采用熔融石英砂模拟现实土体颗粒。熔融石英砂不易与其他物质发生反应,具备很好的稳定性,能够满足透明土骨料颗粒的选材标准,矿物混合油采用正十二烷和白油。其中熔融石英砂采用0.5~1 mm的颗粒粒径,要求棱角分明,比重为2.186,摩擦角约为34°,弹性模量为30 MPa,最小孔隙比和最大孔隙比分别为0.659和0.94,与实际砂土具有相似的物理力学性质^[18-19]。矿物混合油为15号工业白油与正十二烷以质量比1:6的配比下混合制得,在该条件下混合油的折射率与熔融石英砂在20℃的折射率均为1.458 5,旨在达到透明效果。透明土土样如图4所示。

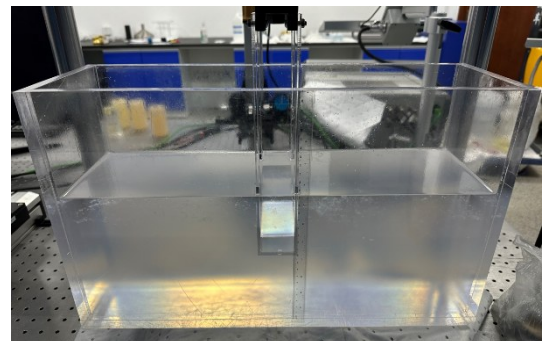


图4 透明土土样

Fig.4 Transparent soil samples

1.3 试验相关设备及试验工况

1.3.1 试验相关设备

透明土设备包含光学平台、“门形”加载框架、竖向加载的加载装置、CCD工业相机、半导体激光器、激光器移动轨道以及真空仪器,相关设备如图5所示。



图5 试验平台
Fig.5 Test platforms

光学台面设计有螺纹孔,便于设备的精准对位和固定。“门形”加载框架配备有可调节的横梁,允许调整加载的高度,以适应不同的试验需求。

加载系统具备垂直加载能力,旨在复现管廊上浮的承载特性。内置的力传感器能够实时监测管廊在承受压力(主要是提拉)过程中的顶部受力状况,确保数据的准确采集。CCD工业摄像机则被用来捕捉土体在管廊上浮过程中形态变化的瞬时图像,为分析土体动态变形提供直观证据。

半导体激光器产生的一束平面光源能够穿透土体,清晰地展现土体的剖面结构。激光移动轨道的设计使得激光源可以在预定路径上平稳滑动,从而在不同位置生成一系列散斑图案,形成多角度的土体剖面图像,有助于全面理解土体内部的位移分布和变形机制。采用商业软件PIVview2C进行图像后处理。

1.3.2 试验工况

为了解矩形管廊在上浮过程中不同埋置深度和土体相对密实度对实际工程的影响,开展了2种密实度条件下的等管廊尺寸对比试验,并考虑3种埋置深度条件下的试验工况,见表1。

1.4 模型相似比

考虑到模型试验尺寸与承载能力,采用由张敏政^[22]推导的一致相似率进行模型设计。以几何相似比 S_l 、弹性模量相似比 S_E 和质量密度相似比 S_ρ 作为可控相似参数。将几何相似比 S_l 初步确定为1/150(以地下洞室开挖平面模型为例,采用的几何比例一般为1/20~1/200)、弹性模量相似比 S_E 初步确定

表1 试验工况

Table 1 Test conditions

相对密实度 D_r	埋置深度 h/b	管廊尺寸 $a \times b$	编号
30%	1	3 cm × 5 cm	1
	2	3 cm × 5 cm	2
	3	3 cm × 5 cm	3
60%	1	3 cm × 5 cm	4
	2	3 cm × 5 cm	5
	3	3 cm × 5 cm	6

为1/66(模型材料选用PVC,其弹性模量为3 000 MPa)。以一致相似率表示的质量密度相似比 S_ρ 为

$$S_\rho = S_\rho = \frac{m_m + m_a}{S_l^3 m_p} \quad (1)$$

式中: m_m 为模型结构构件质量; m_a 为模型中设置的人工质量; m_p 为原型结构构件的质量; S_ρ 为等效质量密度相似比。

15 m长的管廊质量为43 050 kg,几何缩比后试验模型的质量为12.7 g,设置人工质量为0.3 g。通过式(1)计算可得质量密度相似比 $S_\rho=1:0.98$,具体模型相似比如表2所示。

表2 试验相似比

Table 2 Test similarity ratio

内容分类	物理量	相似关系	模型与原型比例
几何量	长度 S_l	S_l	1:150
	质量 S_z	S_z	1:150 ³
	重力加速度 S_g	S_g	1:1
材料性质	含水量	1	1:1
	密度 S_ρ	S_ρ	1:0.98
	内摩擦角	1	1:1
	孔隙比 e	1	1:1
	弹性模量 S_E	S_E	1:66
外部条件	应力 S_a	S_E, S_g	1:66
	应变 S_g	1	1:1

1.5 试验步骤

1.5.1 透明土制备

制备熔融石英砂透明土时应注意控制环境湿度,制备土样前,应烘干熔融石英砂,如有水滴进入透明土样则会影响透明土的透明程度。制备时先将正十二烷和15号白油按照质量比约为3:10进行混合,然后进行微调折射率至1.458 5;矿物混合油配置好并搅拌均匀至稳定后,将其倒入长、宽、高分别为500、150、300 mm的有机玻璃立方体模型槽中;将熔融石英颗粒用漏斗缓慢撒入槽中,目的是避免熔融石英砂颗粒间的空气进入油中,影响其透明程度,加入过程中伴随玻璃棒搅动,以达到熔融石英砂与矿物混合油均匀混合的效果;撒到指定位置时埋入矩形管廊模型;当透明土材料配置完成

后,采用真空仪器抽真空操作去除残余气泡并静置 3 d,使其抗剪强度逐渐发挥,如图 6 所示。

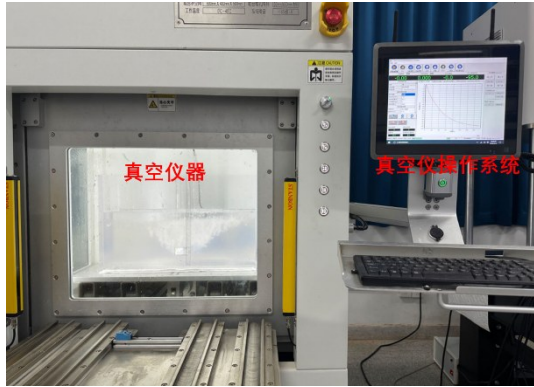


图 6 真空仪器

Fig.6 Vacuum Instruments

1.5.2 相对密度控制

为了更好地调制出相应的相对密度,用真空仪对已配置好的透明土预压到指定位置(位置由 V_z 确定,也即为所需的总的体积),根据计算公式可以得出孔隙比,同时得出所需的熔融石英砂质量,在配置透明土时通过控制熔融石英砂的质量控制相对密度。

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (2)$$

$$V_s = \frac{V_z}{1 + e} \quad (3)$$

$$m_s = \rho V_s \quad (4)$$

式中: D_r 为相对密度; $e_{\max}$ 和 $e_{\min}$ 分别为最大和最小孔隙比; e 为孔隙比; ρ 为透明砂土密度; V_s 为熔融石英砂体积; m_s 为熔融石英砂质量; V_z 为总透明砂土总体积。

1.5.3 矩形管廊上浮加载

将配置好的透明土放置于加载框架正下方,模型槽中心对准加载装置。在连接线顶部设置连接件固定于加载装置的下端,打开半导体激光器,照射透明土形成稳定的散斑场切面,通过轨道移动控制激光器确保激光切面能够正对螺旋桩中心轴线位置;打开 CCD 相机,确保 CCD 相机对准散斑场切面的中心。CCD 相机及激光发射器具体放置位置如图 5 所示。试验用到的作动器可以实现矩形综合管廊上拔时进行荷载-位移量测。既可以通过控制位移实现对上拔力的量测,也可以实现控制力对位移的量测。CCD 相机从正面拍摄管廊及桩周土的全局图,每秒拍摄一张照片。根据实际事故中的管廊上浮时间,上拔速度为 1 mm/min,总时间约为 30 min,上拔距离 3 cm。

试验过程中所有仪器均放置在光学平台上,可

充分保证各仪器与装置间的水平。其中,CCD 相机与计算机连接,并通过计算机控制器拍照,激光发射器通电放置在模型箱侧面。同时,试验全程尽量保证无其他无关人员进出暗室干扰室内光线。当加载试验进行以后,桩土相互作用使得土体产生变形,散斑场发生变化,故而通过 CCD 相机采集变化前后的散斑场图,并经过 PIV 后处理得到矩形管廊在上浮变形过程中的周围位移场分布情况。

2 试验结果分析

2.1 无量纲分析

为了能够准确清晰地分析相关参数,采用 π 定理进行无量纲分析。 π 定理又称 E. Buckingham 定理,是量纲分析法的一种,通过将问题相关的变量量纲分解为最基本的量纲系统如 M、T、L(质量、时间和长度),利用量纲的均衡性和齐次性,最终得到几组包含系统变量在内的无量纲式(无因次等式)。当一个现象由 n 个物理量的函数关系式表示,且这些物理量中含有 m 个基本量纲组成时,则能得到 $(n-m)$ 个相似关系量。根据量纲分析原理得到无量纲参数分析结果,如表 3 所示。

表 3 透明土模型试验无量纲参数

Table 3 Dimensionless parameters for transparent soil modelling tests

参数	量纲	无量纲率
荷载 p	$\frac{[M]}{[L][T]^2}$	$\frac{p}{\rho b g}$
竖向位移 y	$[L]$	$\frac{y}{b}$
熔融石英砂密度 ρ	$\frac{[M]}{[L]^3}$	
矩形管廊宽 b	$[L]$	
重力加速度 g	$\frac{[L]}{[T]^2}$	

2.2 矩形综合管廊上浮过程中 p - y 曲线分析

图 7 和图 8 分别为 30% 和 60% 密度度下不同埋深处的归一化 p - y 变化曲线。从图中可以看出,不同密度度下不同埋深位置处的 p - y 变化趋势一致,都经历了线性上升、峰值变化、快速下降和缓慢下降阶段。造成管廊在上浮过程中出现 4 种不同阶段的原因在于随着矩形管廊开始上浮,管廊受到上部土体重力以及四周土体压力的影响,其上部应力急剧增大,此时 p - y 曲线呈现出线性上升的趋势;当应力增大到一定值的时候,其上部应力与上部土体重力及四周土体压力产生的摩擦力达到平衡,此时应力处于一个相对稳定的范围;然而随着管廊上浮位移的增大,其四周的土体缓慢向下方移动,此时

四周土体的压力减少。因此,对应其上部应力也逐渐减少;随着上浮位移的继续增大,其四周土体的压力也会开始缓慢减少,此时管廊 p - y 曲线就进入了一个缓慢减少的阶段。

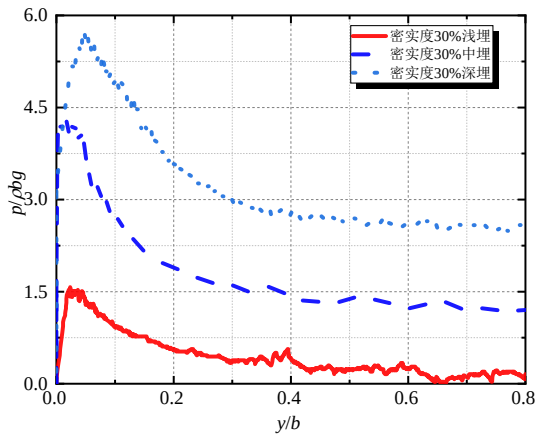


图7 30% 密实度不同埋深位置处 p - y 曲线变化

Fig.7 Variation of p - y curves at different burial depth locations for 30% densities

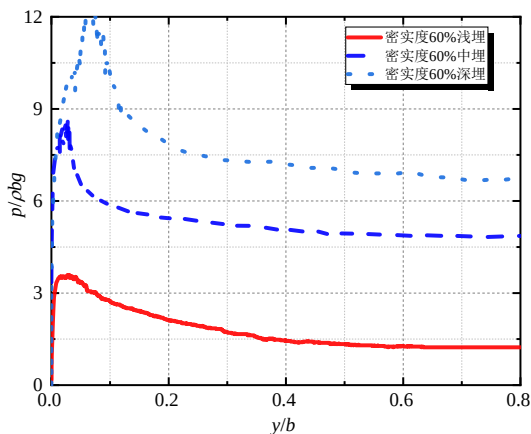


图8 60% 密实度不同埋深位置处 p - y 曲线变化

Fig.8 Variation of p - y curves at different burial depth locations for 60% densities

为进一步研究不同密实度及埋深位置下,管廊 p - y 曲线具体变化阶段随管廊上浮高度变化情况,将图7和图8进行总结,结果如表4所示。

从表4中可以看出,不同密实度条件下,随着管廊埋深的逐渐增大,其达到最大承载力的时间逐渐

表4 不同埋深及密实度下不同变化阶段上浮高度区间
Table 4 Height of uplift in different stages of change at different burial depths and densities

编号	线性上升阶段	峰值变化阶段	快速下降阶段	缓慢下降阶段
1	0~0.02	0.02~0.045	0.045~0.4	0.4~0.8
2	0~0.01	0.01~0.045	0.045~0.4	0.4~0.8
3	0~0.045	0.045~0.05	0.05~0.4	0.4~0.8
4	0~0.01	0.01~0.04	0.04~0.4	0.4~0.8
5	0~0.02	0.02~0.03	0.03~0.4	0.4~0.8
6	0~0.058	0.058~0.074	0.074~0.4	0.4~0.8

推后。这是由于随着埋深的增大,管廊顶部距砂土表面的距离增大,管廊上部土体的重力和四周的压力越大,导致管廊在上升过程中,对管廊上部土体的扰动随时间逐渐递增,因此会产生这种现象。

由图7和图8可以看出,在相同密实度条件下, p - y 曲线幅值会随着埋深的增加而逐渐增大;在相同埋深处时,随着密实度的增加,其 p - y 曲线的幅值会越来越大。造成这种现象的原因是随着埋深的增加,管廊上部的砂土越来越多,导致管廊在升浮过程中其承载砂土的重量也相较于埋深浅的大一些;同时由于密实度较大时,管廊上部土壤较为紧密,因此在密实度较小的 p - y 曲线的幅值要小于密实度高的。

图9为不同密实度条件下管廊最大承载力与管廊埋深关系,从图中可以看出,管廊上升时的最大承载力会随着埋深和砂土密实度的增加而增加,且管廊最大承载力的埋深 h/b 在1到2区间的增幅大于在2到3区间的增幅,造成这种现象的原因是当管廊靠近地表时,其在上浮过程中受上部土体和四周土体的扰动影响较大。

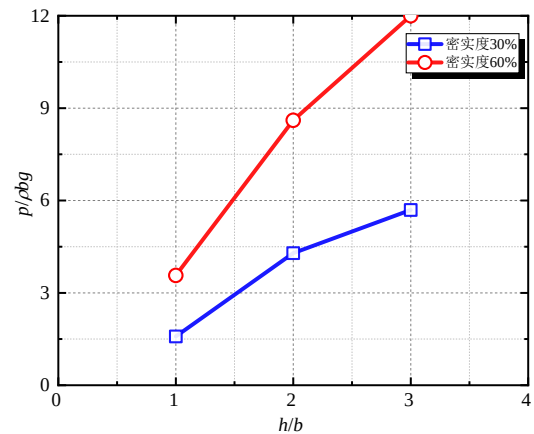


图9 最大承载力与管廊埋深关系

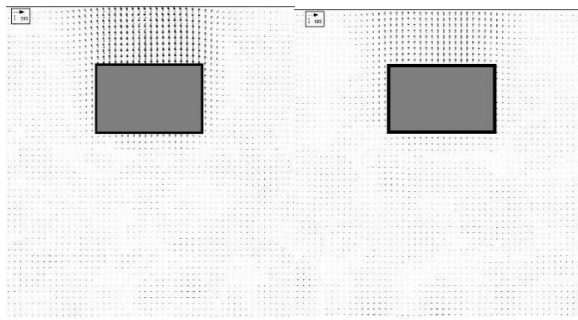
Fig.9 Relationship between maximum load carrying capacity and depth of pipe corridor

2.3 矩形综合管廊上浮过程中管廊周围土体位移场变化分析

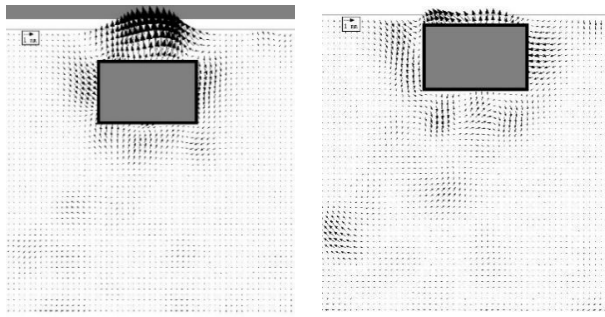
通过矩形管廊上浮过程 p - y 曲线可以看出矩形管廊承载力在不同位移时刻处的变化趋势,但无法对管廊周边的土体进行分析。因此,通过使用PIV View 2C图像处理软件,对试验中CCD相机拍摄的试验图片进行处理,以得到矩形综合管廊上浮过程中管廊周围土体位移场变化。根据 p - y 曲线中不同的变化趋势,将位移场变化图分为线性上升、峰值变化、快速下降和缓慢下降阶段4部分进行分析。

图10为矩形管廊在30%密实度浅埋条件下不同阶段时的位移场变化。从图10可以看出,当矩型

管廊处于线性上升期时,管廊顶部和底部的土体向上发生位移,四周土体会向上和外侧发生轻微位移;当矩型管廊处于峰值变化期时,周围土体的变化趋势不变,位移幅度较线性上升期放缓;当矩型管廊处于快速下降期时,管廊上部土体向上发生位移,而矩形管廊四周土体向下发生移动,矩形管廊下部土体向上变动。当矩型管廊处于缓慢下降期时,矩形管廊上部继续向上移动,四周土体向下移动,管廊下部两夹角土体处向下发生位移,而管廊正下方轻微上移。



(a) 线性上升期(0~0.02) (b) 峰值变化期(0.02~0.045)



(c) 快速下降期(0.045~0.4) (d) 缓慢下降期(0.4~0.8)

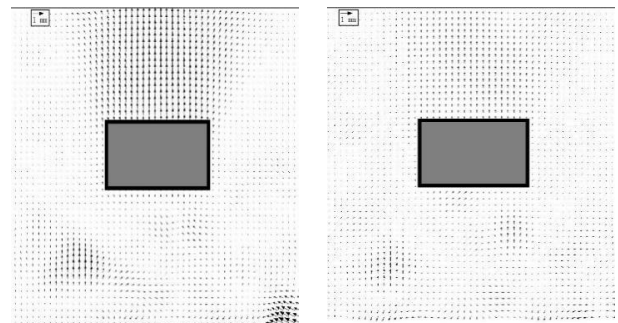
图 10 30% 密实度浅埋(管廊上浮区间)

Fig.10 Shallow burial at 30% densification (pipe gallery uplift interval)

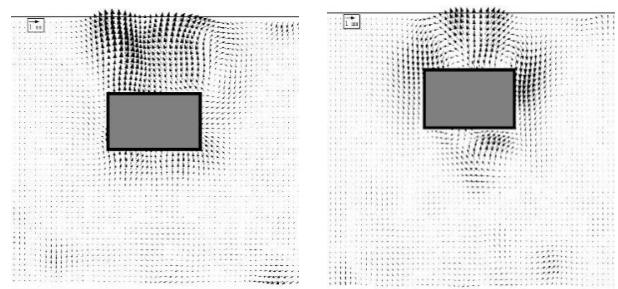
造成这种现象的原因是,当管廊处于线性上升期和峰值变化期时,此时管廊刚开始发生位移且上升幅度较小,因此,管廊上部和周围土体刚开始受到管廊的扰动,跟随管廊产生向上位移的趋势,而由于管廊上升产生的空隙导致管廊下部土体向上移动,此时管廊的上部应力会随上升位移的增加而增大直至最大值;但当处于快速下降阶段时,管廊上部土体受到管廊向上位移的影响会继续出现向上移动的趋势,此时由于管廊位移较大管廊上部土体会产生较为明显的位移变化面,而管廊四周土体由于受到管廊上升导致下部空隙的影响,在自身重力的影响下产生向下的位移在管廊下部的拐角处产生堆积,而管廊周围土体向下移动导致管廊四

周受到土体的压应力减小,管廊自身的负摩阻力减少,管廊正下部土体受到空隙的影响也产生向上位移,因此位于此阶段时,管廊的 p - y 曲线会发生急速下降;当管廊处于缓慢下降阶段时,矩形管廊持续向上发生位移,且随着管廊上浮位移的增大,上部土体会缓慢向四周分散,导致管廊上部土体质量缓慢减少,而且管廊四周土体持续向下移动,在管廊下部拐角处积累,且正下部土体缓慢向上部移动,此时管廊达到一个相对稳定的状态,其 p - y 曲线下降主要是由管廊上部土体减少导致。

图 11 图 12 分别为矩形管廊在 30% 密实度条件下,不同埋深条件下不同阶段时的位移场变化。从图中可知,不同埋深条件下矩形管廊周边土体的位移场在线性上升期和峰值变化期的位移场变化趋势一致,且埋置深度越低,对上方管廊土体的位移场的影响更大。这是由于此时管廊刚开始发生位移且上升幅度较小,管廊周围土体受到管廊的影响出现向上移动的趋势。



(a) 线性上升期(0~0.01) (b) 峰值变化期(0.01~0.045)



(c) 快速下降期(0.045~0.4) (d) 缓慢下降期(0.4~0.8)

图 12 30% 密实度中埋(管廊上浮区间)

Fig.11 Buried in 30% compactness (Tube corridor uplift range)

当管廊处于快速下降期时,其土体位移场变化趋势和浅埋时变化趋势一致;当处于缓慢下降期时,中埋深度处的管廊土体位移场与浅埋时类似,但深埋处处的管廊上部土体位移场会略微变化,这是由于深埋处的管廊距离土体表面较远,在处于缓慢下降期时,其上部土体已被破坏,且受到管廊周边土体向下位移的影响,在靠近管廊上部处会出现

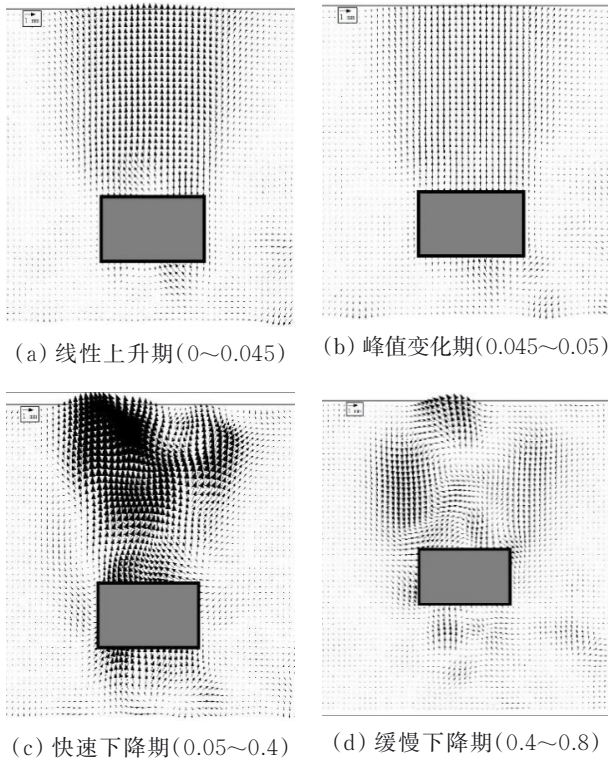


图 12 30% 密实度深埋(管廊上浮区间)

Fig.12 30% densification for deep burial (Tube corridor uplift range)

轻微的土体位移向下的趋势。

图 13~图 15 分别为矩形管廊在 60% 密实度条件下,不同埋深条件下不同阶段时的位移场变化。通过与 30% 密实度下矩形管廊在不同埋深条件下不同阶段时的位移场变化相对比可以看出,其土体位移场的变化趋势几乎一致,而土体位移场的位移量要略高于 30% 密实度条件下相同埋置深度处的位移量。这是由于随着矩形管廊上浮,密实度大的土体受到的扰动要大于密实度小的土体受到的扰动,因此导致出现这种现象。

2.4 矩形综合管廊上浮过程中土体位移变化面夹角分析

为了进一步研究在不同密实度条件下矩形管廊在不同埋深处土体位移场的变化,选取不同密实度条件下每种埋置深度处 4 种变化阶段作为研究对象。定义管廊上部土体位移场向上的边缘作为位移场变化面,以管廊上部两点作为基准,以经过两点处的位移变化面相交的夹角作为土体位移场的变化面夹角,反映管廊上部土体的位移变化趋势。以 30% 密实度条件下管廊浅埋为例,其土体的位移变化面夹角随管廊上升幅度的变化如图 16 所示。

将不同变化时期的土体位移变化面夹角进行总结,得到图 17~图 20。从图 17 可以看出,当矩形管廊 p - y 曲线处于线性上升期时,在相同密实度条

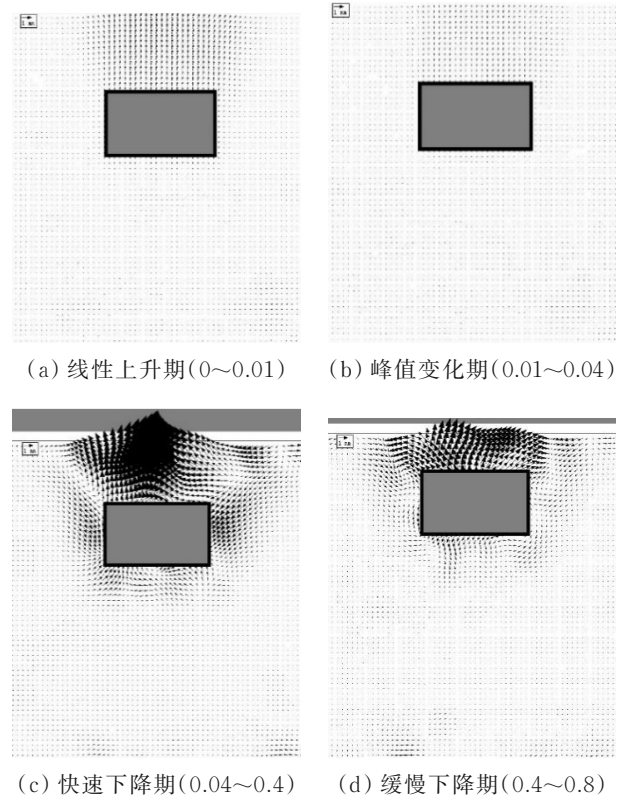


图 13 60% 密实度浅埋(管廊上浮区间)

Fig.14 Shallow burial at 60% density (Tube corridor uplift range)

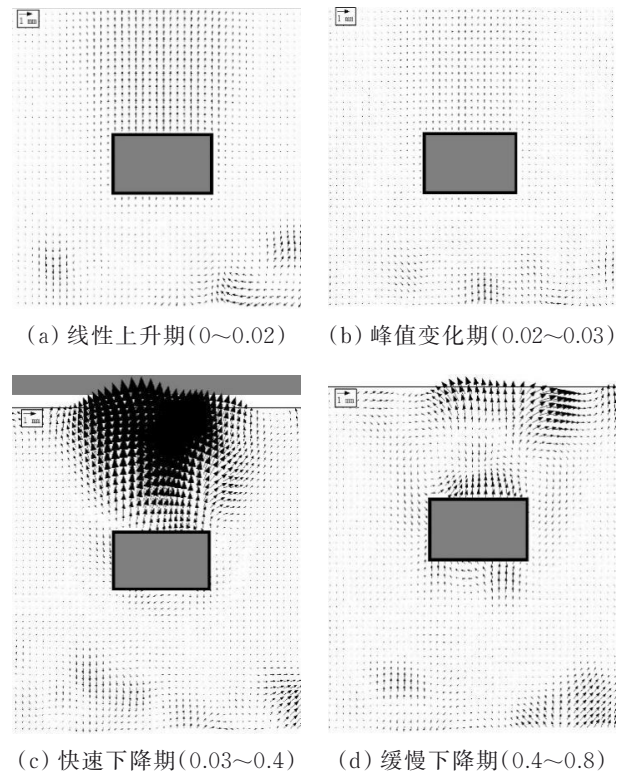


图 14 60% 密实度中埋(管廊上浮区间)

Fig.15 Buried in 60% compactness (Tube corridor uplift range)

件下,其位移变化面夹角较小且会随着埋深的增加而增加;当处于相同埋深位置处时,密实度越高,其

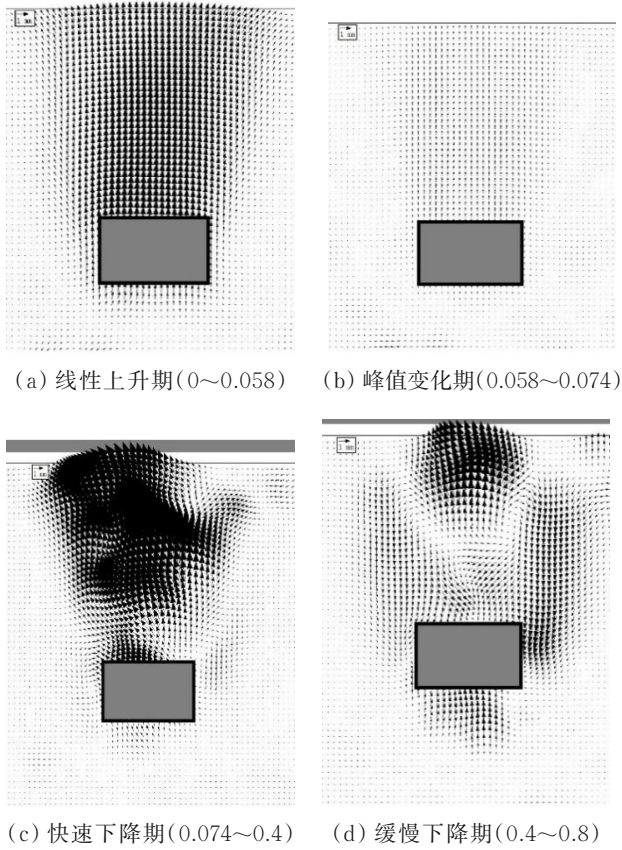


图 15 60% 密实度深埋(管廊上浮区间)

Fig.15 60% densification for deep burial (Tube corridor uplift range)

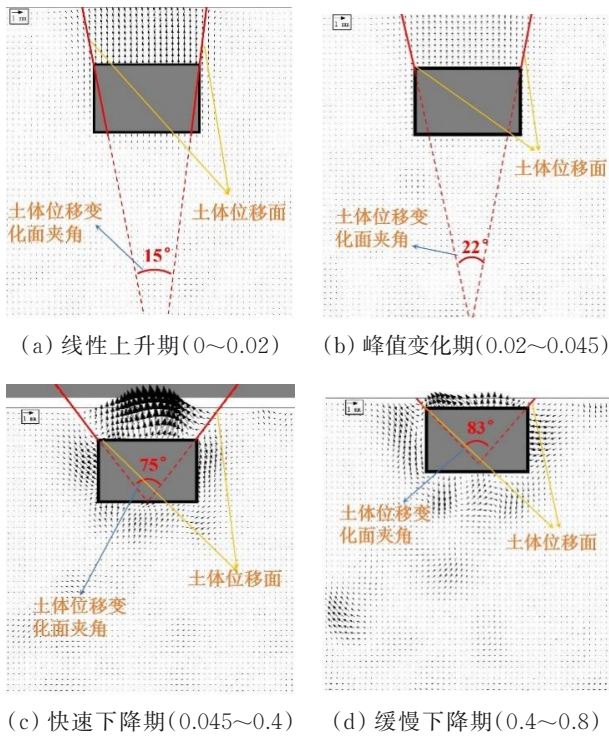


图 16 30% 密实度浅埋不同时期土体位移面

Fig. 16 Soil damage surfaces for different periods of shallow burial at 30% densities

位移变化面夹角会越大,当埋深逐渐增大时,其位移变化面夹角差值会越来越小,当矩形管廊埋深位置较深时,其位移变化面夹角几乎一致。

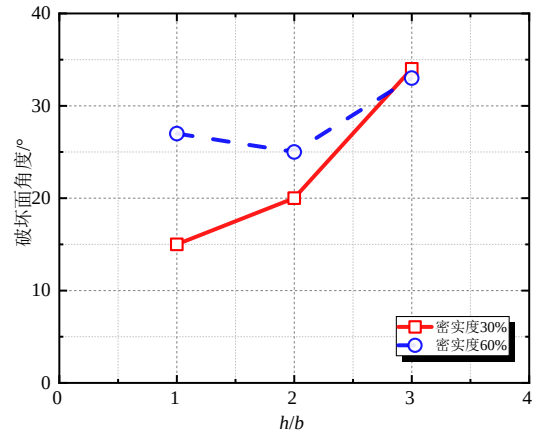


图 17 快速上升期土体位移变化面夹角变化

Fig. 17 Changes in the angle of clamping of the soil displacement change surface during the rapid ascent period

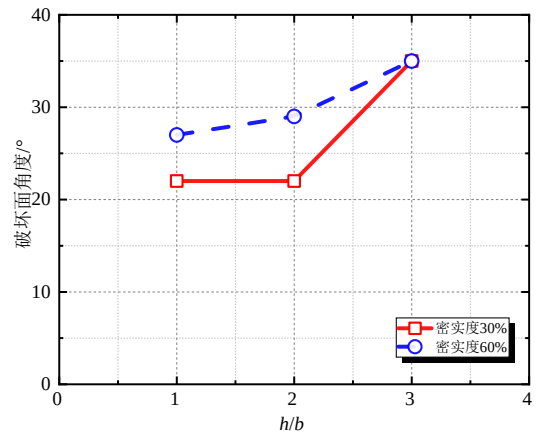


图 18 峰值变化期土体位移变化面夹角变化

Fig. 18 Soil displacement change surface pinch angle change during peak change period

从图 19 可以看出,当矩形管廊 $p-y$ 曲线处于峰值变化时,管廊周围土体的位移场变化趋势和快速上升期时类似。造成这种现象的原因是,管廊处于线性上升期和峰值变化期时,管廊刚开始发生位移且上升幅度较小,管廊上部土体开始发生位移变化,因此其位移变化面夹角较小;且通过对比可以看出当管廊位于这两个阶段时,密实度对位移变化面夹角的影响会随着埋置深度的增加而减少。

图 19 为矩形管廊在快速下降期的土体位移变化面夹角变化。从图 19 可以看出,不同密实度下的矩形管廊在快速下降阶段时,其位移变化面夹角会随着埋深的增大而减少,且相同埋深条件下的位移变化面夹角会随着密实度的增加而增大。这是由于当矩形管廊处于快速下降期时,其管廊四周的土体可能会由于管廊上升而引起管廊下方产生空

隙,进而导致向下滑落产生位移,随着埋置深度的增加,其四周上方处的土体越来越多,因此土体受到管廊四周土体下落的影响,其位移变化面夹角逐渐降低;由于密实度较高的土体在相同埋深情况下,其管廊上方的土体质量要略高于密实度较低的土体,因此其土体的位移变化面夹角也要略高于密实度较低的土体。

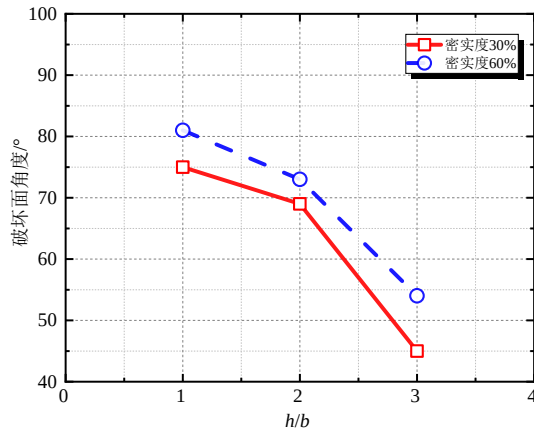


图 19 快速下降期土体位移变化面夹角变化

Fig. 19 Changes in the clamping angle of the soil displacement change surface during the rapid descent period

图 20 为矩形管廊在缓慢下降期的土体位移变化面夹角变化。从图 20 可以看出,不同密实度下的土体位移变化面夹角在缓慢下降阶段时的变化趋势与快速下降阶段时的趋势相似,也存在其位移变化面夹角会随着埋深的增大而减少,且相同埋深条件下的位移变化面夹角会随着密实度的增加而增大。

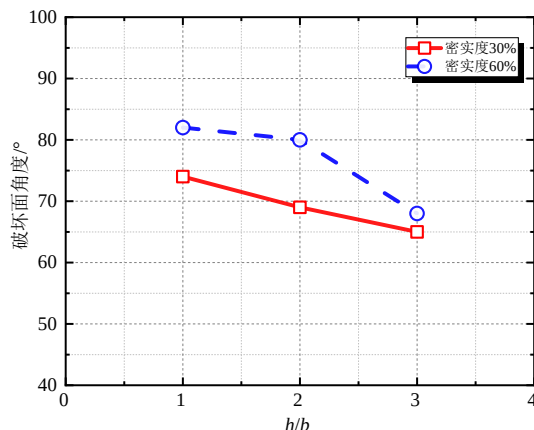


图 20 缓慢下降期土体位移变化面夹角变化

Fig. 20 Changes in the angle of clamping of the soil displacement change surface during the slow descent period

综合图 16~图 20 可知,相同密实度下同等埋深处的土体位移变化面夹角会随着上升高度的增加而增加。这是由于随着矩形管廊的升高,管廊上部及周围的土体都会随着位置的变化而变化,从最开

始快速上升期和峰值变化期时,处于顶部和四周土体会向上和外侧发生轻微位移;到处于快速下降期时,管廊上部土体向上发生位移,而矩形管廊四周土体向下发生移动,矩形管廊下部土体向上变动。最后到缓慢下降期时,矩形管廊上部继续向上移动,四周土体向下移动,管廊下部两转角土体处向下发生位移,而管廊正下方轻微上移。此过程管廊距土体表面越来越近,土体四周的影响越来越少,土体位移变化面继续发育,因此导致土体位移变化面夹角会随着上升高度的增加而增加。

3 结论

1)不同密实度下不同矩形管廊埋深位置处的 p - y 曲线变化趋势一致,都经历了线性上升、峰值变化、快速下降和缓慢下降 4 个阶段。随着埋深增加,管廊承载力逐渐增大且达到最大承载力时的位移逐渐推后。相同密实度条件下, p - y 曲线幅值随埋深增加而增大,极限承载力随埋深和土体密实度增加而提升。

2)不同密实度条件下,相同埋深处的矩形管廊位移场变化趋势相似。在线性上升和峰值变化期,管廊顶部和底部土体向上位移,周围土体轻微向上和外侧位移;在快速下降期,管廊顶部土体向上,周围土体向下移动;在缓慢下降期,管廊上部持续向上,周围土体向下移动,且下部土体向下位移。土体位移幅度随密实度增加而增大。

3)在 p - y 曲线的线性上升和峰值变化期,位移变化面夹角较小并随埋深的增加而增大;在快速和缓慢下降期,夹角随埋深增加而减少,相同埋深条件下,夹角随密实度增加而增大。此外,相同密实度下的土体位移变化面夹角随着上升高度的增加而增加。

参考文献

- [1] 李金奎, 汪洋. 地下综合管廊地震响应研究进展[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(9): 3428-3445.
LI J K, WANG Y. Research progress of seismic response of underground utility tunnel [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(9): 3428-3445. (in Chinese)
- [2] 赵欢, 邓荣贵, 高阳. 回填土不均匀沉降引起管道力学性状变化的分析[J]. 路基工程, 2014(1): 69-72.
ZHAO H, DENG R G, GAO Y. Analysis on changes in mechanical properties of pipeline caused by uneven settlement of backfill [J]. Subgrade Engineering, 2014 (1): 69-72. (in Chinese)
- [3] 陈苏, 陈国兴, 戚承志, 等. 可液化场地上三拱立柱式

- 地铁地下车站结构地震反应特性振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(7): 1899-1914.
- CHEN S, CHEN G X, QI C Z, et al. A shaking table-based experimental study of seismic response of three-arch type's underground subway station in liquefiable ground [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(7): 1899-1914. (in Chinese)
- [4] MAITRA S, CHATTERJEE S, CHOUDHURY D. Generalized framework to predict undrained uplift capacity of buried offshore pipelines [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(11): 1841-1852.
- [5] AUBENY C P, SHI H, MURFF J D. Collapse loads for a cylinder embedded in trench in cohesive soil [J]. International Journal of Geomechanics, 2005, 5(4): 320-325.
- [6] BRANSBY M F, NEWSON T, BRUNNING P. The upheaval capacity of pipelines in jetted clay backfill [J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2002, 12(4): 280-287.
- [7] CHATTERJEE S. Numerical modelling of pipe-soil interactions [D]. Perth, Australia: The University of Western Australia, 2012.
- [8] CHATTERJEE S, WHITE D J, RANDOLPH M F. Coupled consolidation analysis of pipe-soil interactions [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(6): 609-619.
- [9] CHEN R P, ZHU B, NI W J. Uplift tests on full-scale pipe segment in lumpy soft clay backfill [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(4): 578-588.
- [10] GONG Q M, ZHAO Y, ZHOU J H, et al. Uplift resistance and progressive failure mechanisms of metro shield tunnel in soft clay [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 82: 222-234.
- [11] 张鑫磊, 纪展鹏, 黄凯, 等. 可液化土体中浅埋管廊上浮机制和抗浮措施研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(2): 510-520.
- ZHANG X L, JI Z P, HUANG K, et al. Study on uplift mechanism and anti-uplift measures of shallow-buried utility tunnels in liquefiable soils [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(2): 510-520. (in Chinese)
- [12] TONG L Y, ZHOU H, LIU H L, et al. Failure envelope of an underground rectangular pipe gallery in clay under pipe - soil interactions [J]. International Journal of Geomechanics, 2023, 23(1): 1943-5622.
- [13] KEAWSAWASVONG S, UKRITCHON B. Ultimate lateral capacity of two dimensional plane strain rectangular pile in clay [J]. Geomechanics and Engineering, 2016, 11(2): 235-252.
- [14] 张治成, 林思, 王金昌, 等. 矩形管廊顶管施工对邻近管线的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(Sup2): 244-249.
- ZHANG Z C, LIN S, WANG J C, et al. Study on the influence of rectangular pipe gallery pipe jacking construction on adjacent pipelines [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(Sup2): 244-249. (in Chinese)
- [15] 李怀翠. 地基加固对地下矩形综合管廊受力性能的影响研究[J]. 建筑施工, 2018, 40(6): 986-988.
- LI H C. Study on effect of foundation reinforcement on mechanical behavior of underground rectangular utility tunnel [J]. Building Construction, 2018, 40(6): 986-988. (in Chinese)
- [16] 韩冰, 张丙吉, 王述红, 等. 矩形顶管周围土体扰动及混凝土裂缝 多因素影响分析[J]. 混凝土, 2019(3): 143-146, 152.
- HAN B, ZHANG B, WANG S, et al. Multi-factor analysis of soil disturbing and concrete cracking of rectangular pipe-jacking [J]. Concrete, 2019(3): 143-146, 152. (in Chinese)
- [17] 刘汉龙, 钟海怡, 顾鑫, 等. 平行隧道开挖引起场地沉降的透明土模型试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(1): 1-10.
- LIU H L, ZHONG H Y, GU X, et al. Experimental study on site settlement caused by parallel tunnel excavation by transparent soil model [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(1): 1-10. (in Chinese)
- [18] 邓泽之, 吉恩跃, 王刚. 波动水力条件下土体内侵蚀特性的透明土试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(10): 2726-2734.
- DENG Z Z, JI E Y, WANG G. Experimental study on internal erosion behaviors under fluctuating hydraulic condition using transparent soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(10): 2726-2734. (in Chinese)
- [19] ZHOU H, LIU H L, RANDOLPH M F, et al. Experimental and analytical study of X-section cast-in-place concrete pile installation effect [J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2017, 17(2): 103-121.
- [20] 于春明. 地下综合管廊上浮事故案例分析[J]. 区域治理, 2018(38): 244-245.
- YU C M. Case analysis of floating accident in underground utility tunnel [J]. Regional Governance, 2018(38): 244-245. (in Chinese)
- [21] 贺鹏. 矩形顶管施工过程管周砂土扰动规律模型试验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2020.
- HE P. Model test study on disturbance law of sand around rectangular pipe jacking construction process [D]. Shenyang: Northeastern University, 2020. (in Chinese)
- [22] 张敏政. 地震模拟实验中相似律应用的若干问题[J]. 地震工程与工程振动, 1997, 17(2): 52-58.
- ZHANG M Z. Study on similitude laws for shaking table tests [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 1997, 17(2): 52-58. (in Chinese)