

# 浅埋矩形顶管始发渗流 - 应力耦合数值模拟与监测

刘伯成<sup>1</sup>, 叶文龙<sup>1</sup>, 梁恒辉<sup>1</sup>, 张旭东<sup>2</sup>, 陈冉<sup>2</sup>

<sup>1</sup>无锡地铁集团有限公司, 江苏 无锡

<sup>2</sup>河海大学, 江苏 南京

Email: 1183003767@qq.com

收稿日期: 2021年2月1日; 录用日期: 2021年3月4日; 发布日期: 2021年3月11日

## 摘要

矩形顶管广泛应用于城市短距离地下工程, 顶管始发加固方案关系着工程的施工安全。依托无锡地铁4号线青石路站1号出入口顶管工程, 针对富水条件下超浅埋顶管始发过程中可能存在的洞门涌水灾害进行模拟, 得到了发生渗透时的地表变形及洞门变化规律。结果表明, 出现洞门漏水灾害时围护结构和开挖面处土体均呈现向始发井基坑变形趋势, 地表最大沉降量明显增大, 始发井安全性降低。

## 关键词

顶管始发, 渗透变形, 数值分析

# Initial Seepage Stress Coupling of Shallow Buried Rectangular Pipe Jacking Numerical Simulation and Monitoring

Bocheng Liu<sup>1</sup>, Wenlong Ye<sup>1</sup>, Henghui Liang<sup>1</sup>, Xudong Zhang<sup>2</sup>, Ran Chen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Wuxi Metro Group Co., Ltd., Wuxi Jiangsu

<sup>2</sup>Hohai University, Nanjing Jiangsu

Email: 1183003767@qq.com

Received: Feb. 1<sup>st</sup>, 2021; accepted: Mar. 4<sup>th</sup>, 2021; published: Mar. 11<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Rectangular pipe jacking is widely used in urban short distance underground engineering. The reinforcement scheme of pipe jacking initiation is related to the construction safety of the project. Based on the pipe jacking project at the No. 1 entrance and exit of Qingshi Road Station of Wuxi

文章引用: 刘伯成, 叶文龙, 梁恒辉, 张旭东, 陈冉. 浅埋矩形顶管始发渗流 - 应力耦合数值模拟与监测[J]. 应用物理, 2021, 11(3): 139-145. DOI: 10.12677/app.2021.113016

**Metro Line 4, the possible water inrush disaster in the launching process of ultra shallow buried pipe jacking under the condition of rich water is simulated, and the surface deformation and portal change law when seepage occurs are obtained. The results show that the retaining structure and the soil at the excavation face tend to deform towards the foundation pit of the launching shaft when the tunnel portal leakage disaster occurs, the maximum surface settlement increases significantly, and the safety of the launching well is reduced.**

## Keywords

Pipe Jacking Initiation, Seepage Deformation, Numerical Analysis

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

矩形断面结构形式可以有效提高地下空间利用率,降低掘进、开挖面积。因此,土压平衡矩形顶管技术被广泛应用于城市地下通道或地铁车站出入口工程。地层中含有地下水,且覆土较浅条件下,在城市繁华区进行短距离地下空间开挖,顶管法更能体现其优越性。顶管、盾构始发或接收在整个工序中处于关键位置,该环节是施工中最主要的风险节点。

本工程顶管位于无锡地区,跨越粉质黏土、粘质粉土及杂填土层,土层较为松散,埋深仅4米,属于超浅埋顶管。目前,针对超浅埋矩形顶管始发加固方面的研究较少[1][2][3]。当前研究主要关注顶进区间沉降控制下穿其它构筑物。为降低对周边管线、构筑物的影响,李洪运[4]提出采用MJS工法对进出洞口区域进行水平向加固,该工法可大大降低对施工操作空间的需求。李金辉[5]针对顶管施工法,对于土质较差且渗流量大的情况,分析了掘进时进行基础加固的方法。王凯[6]对富水环境下地铁出入口矩形顶管施工加固方案进行了探究,讨论了工作井、接收井及区间加固方案,针对相关方案开展了数值分析。邓长茂[7]等以上海三个不同实例为研究背景,总结出大尺寸矩形顶管施工时地面土体的一般变形特征,得出一般在距始发工作井5m至10m沉降位移最大。

## 2. 工程难点分析

无锡地铁4号线青石路站1号出入口设置于凤翔路北侧(凤翔小游园内),横穿马路向南。采用土压平衡矩形顶管法施工,顶管总长约42.65m。顶管覆土约4.045m。顶管外径尺寸为 $7 \times 4.3$  m,内径为 $6 \times 3.3$  mm,壁厚0.5 m。出入口通道段所处地层主要为穿越③1层黏土、③1层粉黏夹黏粉、④1层黏质粉土,土层较为松散,分布有承压水、微承压水。

工程难点描述如下:1)顶管穿越土层复杂多样,地下水丰富,透水性较好;2)青石路站所处的凤翔路交通繁忙,侧穿凤翔路高架,地质条件不佳,承载力较低;3)矩形顶管为超浅埋,覆土较浅,易于对地表产生较大变形。鉴于上述难点,开展顶管始发过程中防渗失效工况下,始发区地表沉降及洞门变形分析,开展工程安全评估。

## 3. 数值分析模型

### 3.1. 加固技术方案

如图1所示本出入口处顶管始发加固通过基坑降水、水平旋喷桩加固土层、SMW工法桩实现。始发

井尺寸：14 m × 8.6 m × 11 m (长 × 宽 × 高)；SMW 工法桩总长度 19 m，嵌入基坑以下土体长度 8 m；加固土尺寸为 13 m × 3 m × 11.4 m (长 × 宽 × 深)，加固土埋深 1 m；顶进上边线埋深 4 m；基坑内地表以下 1.5 m 及 6 m 位置布设两道钢支撑。水平向打设旋喷桩，加固范围 3 m，加固深度 11.4 m；围护结构采用 SMW 工法结合 2 道 Φ609 钢支撑，桩长 19 米。

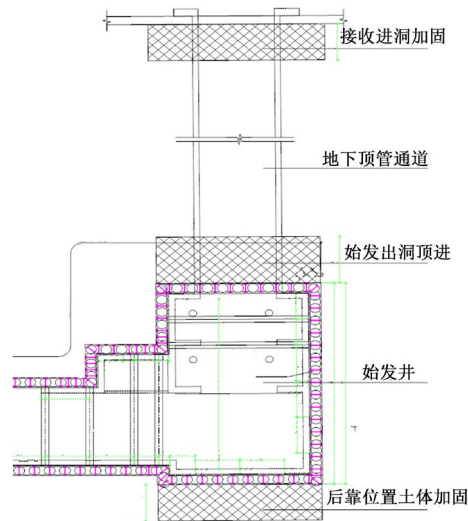


Figure 1. Enclosure structure of pipe jacking launching well  
图 1. 顶管始发井围护结构

### 3.2. 数值模拟

采用 MIDAS/GTS 软件建立模型并进行分析计算处理，物理模拟中土层及结构体力学参数见表 1。

Table 1. Physical and mechanical parameters of the model  
表 1. 模型物理力学参数

土层编号	土层名称	$\Gamma/\text{KN}/\text{M}^3$	E (kPa)	$\mu$	$\varphi /(^{\circ})$	C (kPa)
1	杂填土	18.5	7.5	0.3	12	5
2	黏土	20.2	24.93	0.34	13.4	59.3
3	粉质粘土	19.8	21.87	0.34	12.6	38
4	黏质粉土	19	30.99	0.31	29.4	8.6
5	黏质粉土夹粉砂	19.1	34.08	0.31	30.2	6.5
6	黏土	20.2	26.46	0.31	13.3	62.8
7	黏土	20.2	22.2	0.32	11.1	51.5
8	加固土	21	200	0.28	32	100
9	顶管机	78	250,000	0.2		弹性本构
10	SMW 工法桩	25	34,500	0.2		弹性本构
11	注浆层	22.5	10,000	0.3		弹性本构
12	管节	5.3	34,500	0.2		弹性本构

顶管机模拟通过对开挖土周边进行单元析取实现，顶进期间，将预设薄单元属性调整为注浆层；基坑内部钢支撑采用梁单元进行模拟，直径为 609 mm；通过界面接触单元模拟止水帷幕，界面单元非线性

接触类型为 M-C，法向刚度模量为  $5,585,937 \text{ kN/m}^3$ ，剪切刚度模量为  $507,812 \text{ kN/m}^3$ ，粘聚力  $65 \text{ kN/m}^2$ ，摩擦角为  $22.1^\circ$ 。模型如图 2 所示。

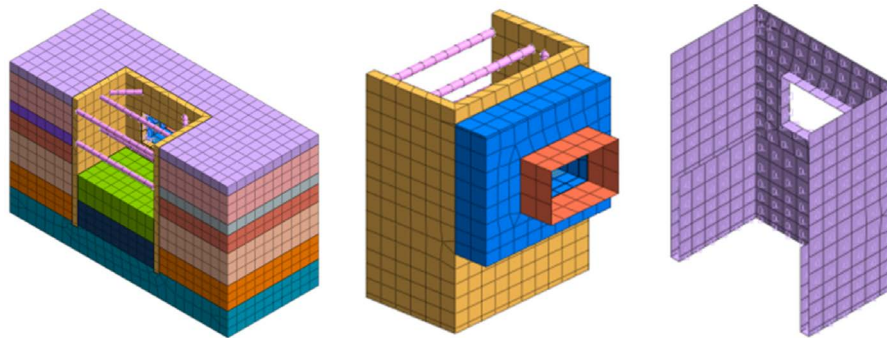


Figure 2. Schematic diagram of calculation model  
图 2. 计算模型示意图

### 3.3. 施工阶段模拟

施工阶段采用应力 - 渗流 - 边坡分析方式，共分为 15 个施工阶段如图 3 所示。始发前，激活所有土体单元、SMW 工法桩单元、钢支撑、止水帷幕单元，赋以边界水头、坑内水头，选择稳态渗流模式。进行初始应力设置，激活边界条件、自重荷载。

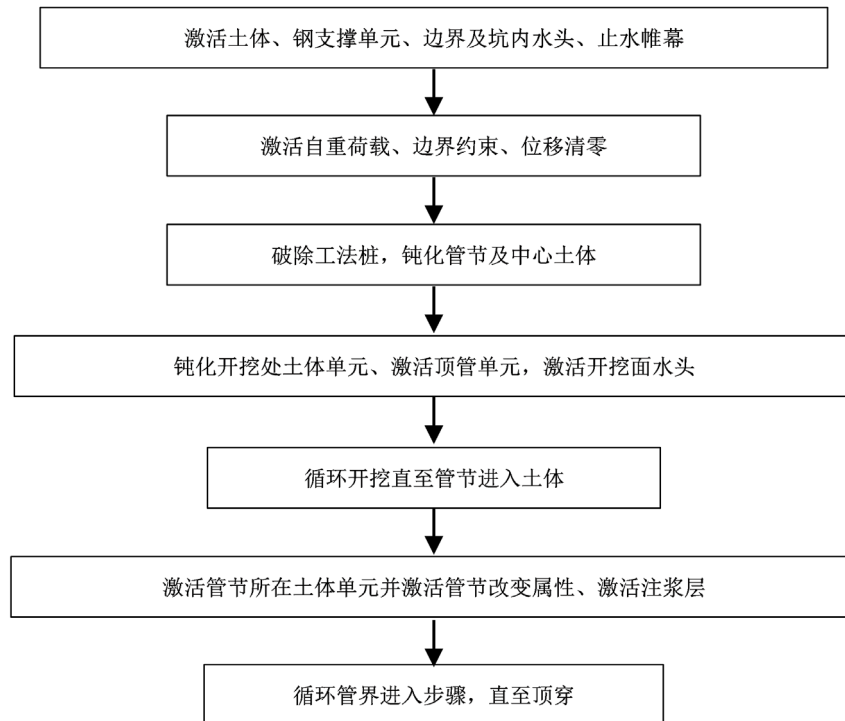
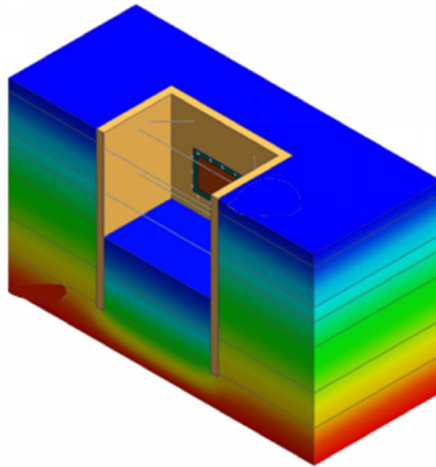


Figure 3. Excavation flow chart of construction stage  
图 3. 施工阶段开挖流程图

模拟破除 SMW 工法桩时洞门出现涌水情况时，将洞门处节点水头设置为 0。具体开挖步骤如图 3 所示，模型初始压力水头分布如图 4 所示。



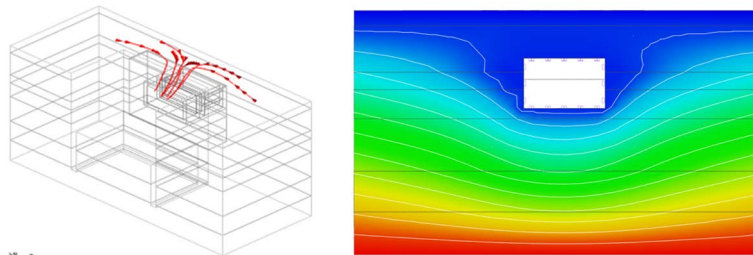
**Figure 4.** Initial pressure head distribution  
**图 4.** 初始压力水头分布图

顶进过程中，将顶进机穿越段土体钝化，激活相应位置顶管机单元，赋以后方顶管外径单元管节属性，析取顶管外径处单元，定义其厚度为 0.1 m，以模拟外壁与土层间隙，并将其更新为注浆层属性。

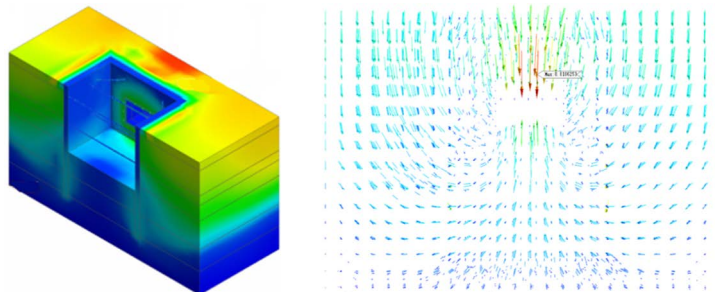
### 3.4. 洞门破除出现涌水

#### 3.4.1. 地表变形

考虑洞门破除出现涌水这一不利工况，洞门上方地下水大量涌入洞门形成渗流通道，地下水渗流路径及洞口水头分布如图 5 所示，渗流作用下土体纵向最大变形量为 36.72 mm，土体易随地下水流出产生流沙管涌灾害，存在塌方隐患。相应地，顶管中线上方地表最大变形达 47.49 mm，同时由于土体开挖，荷载释放，隧道底部土体回弹，最大隆起量 5.91 mm，具体见图 6 所示。



**Figure 5.** Model flow field distribution  
**图 5.** 模型流场分布图



**Figure 6.** Overall deformation nephogram of the model  
**图 6.** 模型整体变形云图

### 3.4.2. 工法桩变形

发生洞门涌水后, 基坑围护结构相应发生较大变形, 对工法桩整体 Y 方向变形情况进行统计, 由图 7 可知, 洞门破除后, 未发生渗透作用下, 由于破除作用, 桩体向顶进方向变形, 发生渗漏导致出现涌水后, 工法桩反向往始发井内变形, 危险系数增加, 最大变形量达 2.25 mm, 出现在洞门上方位置, 变形量大小与距洞门距离成正相关关系。

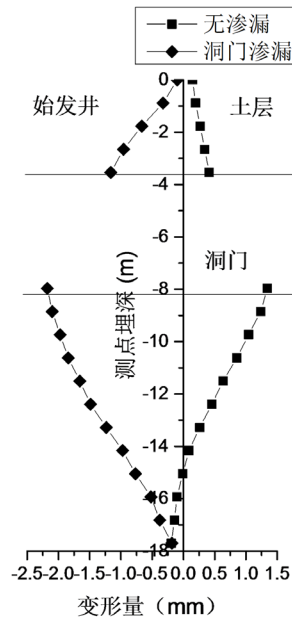


Figure 7. Y-direction deformation of SMW pile at each monitoring point  
图 7. 各监测点位 SMW 工法桩 Y 方向变形

显然, 当洞门涌水灾害发生时, 由于渗流-应力相互作用, 开挖面处土体向始发井坑内流动, 同时围护结构发生向始发井内变形, 并导致地表沉降量增大, 影响工程及周边环境安全。出现洞门涌水时, 地表最大沉降量增加至 47.49 mm。

## 4. 结论

顶管始发段洞门涌水灾害将造成地表沉降量增加、围护结构破坏等风险。本浅埋顶管工程中出现渗流破坏时, 隧道上方地表沉降量明显增大; 由于地下水的排出, 周边土体下沉明显; 工法桩出现向始发井坑内倾倒趋势, 危险系数增加。针对风险问题, 需采取降低地下水水位、完善洞门防水措施及加固支撑体系等方法保证顶管始发段整体安全, 降低对周围地层的扰动。

## 基金项目

国家自然科学基金重点项目(41830110); 国家自然科学基金(51779083); 国家重点研发计划项目(2017YFC1502602)。

## 参考文献

- [1] 魏纲, 郭志威, 魏新江, 陈伟军. 软土隧道盾构出洞灾害的渗流应力耦合分析[J]. 岩土力学, 2010(A1): 383-387.
- [2] 王克忠, 唐雨蕾, 李伟平, 孔令民, 秦绍坤. 渗流-应力耦合下深埋引水隧洞变形稳定性分析[J]. 浙江工业大学学报, 2016, 44(2): 207-211.

- 
- [3] 王洪刚. 盾构隧道不同渗漏条件对地层及隧道的影晌研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2018.
  - [4] 李洪运. 城市复杂环境超大直径钢顶管施工技术[J]. 施工技术, 2017, 46(11): 86-89.
  - [5] 李金辉. 钢筋混凝土管的注浆加固顶管施工[J]. 中国给水排水, 2005, 21(7): 98-100.
  - [6] 王凯, 张晓川, 徐昕, 陈保国, 王程鹏. 富水环境地铁站出入口矩形顶管施工加固方案[J]. 土工基础, 2019, 33(5): 541-543.
  - [7] 邓长茂, 彭基敏, 沈国红. 软土地区矩形顶管施工地表变形控制措施探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(4): 1002-1007.