

DOI: 10.11779/CJGE20220233

# 砂层矩形顶管施工中管周压力时空分布规律及预测模型

张云龙<sup>1</sup>, 张鹏<sup>\*1</sup>, 马保松<sup>2</sup>, 冯鑫<sup>1</sup>, 周浩<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中山大学土木工程学院, 广东 珠海 519082)

**摘要:** 顶管施工中的管周压力时空分布特征是研究顶进力、摩阻力、管节结构内力、泥浆渗透规律的基础, 但目前针对矩形顶管的相关研究较少。依托苏州矩形顶管工程, 首先基于原位监测结果分析施工时管节顶部、侧壁、底部的压力时空分布规律, 然后建立泥浆滤失过程中的管周压力预测模型, 基于矩形顶管管土接触状态及受力特点提出预测函数中相关参数的求解方法, 最后对比检验预测值与实测值。结果表明: 管周压力在注浆-滤失过程中随时间依次经历快速增长阶段、快速下降阶段和缓慢下降阶段; 管周同一深度的管周压力及变化速率基本一致, 而不同深度在各阶段的管周压力、压力稳定值、变化速率有所区别; 采用对数回归函数可较好拟合现场实测值, 相关参数的求解考虑了土体性质、覆土埋深、地下水压力、管节自重、泥浆浮力、实际注浆压力等工程参数, 适用于预测类似矩形顶管工程施工中的管周压力。

**关键词:** 矩形顶管; 管周压力; 泥浆压力; 时空分布规律; 预测模型

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)06-1171-09

**作者简介:** 张云龙(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事矩形顶管施工过程中的力学及土体变形研究。E-mail: zhangyunlong@cug.edu.cn。

## Temporal-spatial distribution characteristics and prediction model of pressures around rectangular pipe jacking in sand layer

ZHANG Yunlong<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>1</sup>, MA Baosong<sup>2</sup>, FENG Xin<sup>1</sup>, ZHOU Hao<sup>2</sup>

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 2. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China)

**Abstract:** The distribution characteristics of pressures around pipes are the basis for calculating the jacking force, friction resistance, internal force and mud permeability. However, there are few researches on rectangular pipe jacking. Based on a rectangular pipe jacking project, the pressure are monitored at different locations around the pipe during construction. The temporal and spatial variation characteristics of the pressures are analyzed, and the prediction model for the pressures in the process of permeability of mud is established. The method for calculating the related parameters is proposed based on the pipe-soil contact state and mechanical characteristics, and the predicted values by this model are compared with the measured ones. The results show that the pressures experience rapid growth stage, rapid decline stage and slow decline stage in the process of grouting-filtration. The pressures and change rates at the same depth are basically the same, but the pressures as well as their stability values and change rates at different depths are different. Meanwhile, the pressures at each location around the rectangular pipe conform to logarithmic regression function at mud filtration cycle. The calculation of the relevant parameters takes into account the engineering parameters such as soil properties, buried depth, groundwater pressure, pipe weight, mud buoyancy and actual grouting pressure. It is suitable for predicting the contact pressures of similar rectangular pipe jacking projects.

**Key words:** rectangular pipe jacking; pressure around pipe; mud pressure; temporal-spatial distribution; prediction model

## 0 引言

矩形顶管法是利用掘进机切削岩土体形成隧洞, 并借助主顶油缸及中继间装置将预制矩形管节同步推进, 从而形成地下结构的非开挖法施工技术。因其具有“绿色、节约、环保、安全”的优势, 且利用率比圆形顶管高, 近几年在中国砂土地层的综合管廊、地

铁车站、地下通道等地下基础设施建设中运用逐渐增多<sup>[1-2]</sup>。由于矩形顶管施工过程中管节外壁受到的压力直接影响着顶进力估算、土体扰动变形、注浆减阻工

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金项目(52008383); 中央高校基本科研业务费专项(CUG190605)

**收稿日期:** 2022-03-07

**\*通信作者** (E-mail: cupengzhang@163.com)

艺及管节结构安全, 准确掌握其分布特征及变化规律对科学指导施工具有重要意义。

顶管施工过程中管节外壁受到土压力、地下水压力和触变泥浆压力共同作用, 管壁实际受到的总压力被称为管周压力<sup>[3]</sup>。其中, 土压力可采用土柱理论、普氏卸载拱理论、Marston 土压力理论、Marston-Spangler 理论、Terzaghi 松动土压力理论计算<sup>[4-6]</sup>, 国内外顶管规范根据顶管施工特点对 Terzaghi 松动土压力理论的影响宽度、土压力系数、内摩擦角、滑移角等参数进行了适当修改<sup>[7]</sup>。同时, 为查明施工中地下水压力和触变泥浆压力对管周压力的影响, 国内外学者开展了大量原位监测研究, 包括混凝土圆形顶管<sup>[8-13]</sup>、曲线钢顶管<sup>[3]</sup>、混凝土矩形顶管<sup>[14]</sup>, 结果均表明施工过程中管周压力并不等于土压力, 在触变泥浆压力影响下呈波动变化, 并且管周不同位置压力的大小有所差异。

然而, 目前土压力计算理论忽略了触变泥浆压力的影响, 计算结果与实际施工过程中的管周受力差异较大, 仅适用于计算施工结束后管节静置状态下的管周压力。同时, 现有原位监测研究多针对圆形顶管, 其结构类型、尺寸大小与矩形管节不同, 施工中管周压力受触变泥浆影响的程度必然有所区别。由于对矩形顶管施工中管周压力的认识不足, 导致矩形顶管顶进力、摩阻力、泥浆渗透等理论模型难以在实际运用中取得较好的预测效果。

鉴于此, 本文依托苏州某砂土地层矩形顶管工程, 开展施工过程中的压力原位监测, 分析不同位置的管周压力受泥浆调控的空间分布特征, 并讨论注浆—滤失过程中管周各位置压力变化速率随时间的演化规律, 然后建立泥浆滤失过程中的管周压力预测模型, 基于矩形顶管管土接触状态及受力特点提出预测函数中相关参数的求解方法, 最后对比检验了预测值与实测值。研究结论揭示了矩形顶管管周压力在注浆—滤失过程中的变化规律, 具有较好的工程应用价值。

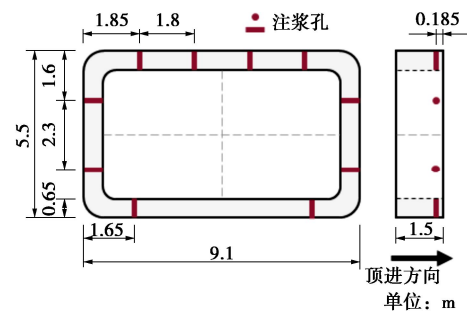
## 1 原位监测方案

### 1.1 工程概况

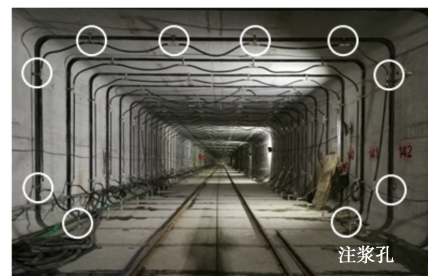
江苏某矩形顶管工程, 采用外宽 9.1 m、外高 5.5

m、长 1.5 m、壁厚 0.65 m 的预制钢筋混凝土矩形管节, 管节混凝土强度为 C50, 抗渗等级为 P8, 顶进总里程 233.6 m, 管节平均覆土厚度为 9 m。施工时每根管节都通过 10 个注浆孔向管周注入触变泥浆, 其中顶部 4 个, 左、右侧壁各 2 个, 底部 2 个, 如图 1。

由图 2 及表 1 所示, 顶管主要穿越的粉砂夹粉土⑥-1、粉砂⑥-2 内摩擦角大、黏聚力小、渗透系数高, 触变泥浆在该地层条件下极易漏失。而管节上覆黏土④、粉质黏土夹粉土⑤和下伏粉质黏土⑦渗透系数较低, 作为不透水层可有效隔绝上部潜水的渗入和触变泥浆扩散。此外, 现场勘测发现粉砂夹粉土⑥-1、粉砂⑥-2 中存有微承压水, 土壤饱和含水率分别为 30.2%, 28.9%。



(a) 管节断面



(b) 现场布置

图 1 矩形管节结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of rectangular pipe

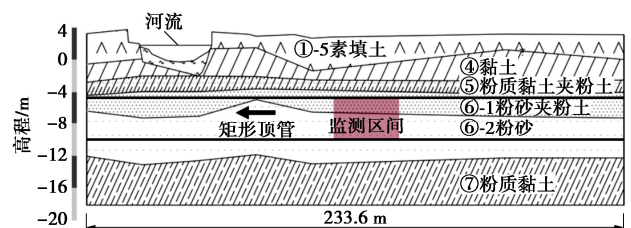


图 2 管周地质剖面图

Fig. 2 Geological profile of pipe jacking

表 1 地层基本参数

Table 1 Parameters of soil strata

代号	地层	厚度/m	含水率/%	天然密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	垂直渗透系数/ (cm·s <sup>-1</sup> )
①-5	素填土	4.3	30.4	1.92	0.865	27.9	16.8	3.2×10 <sup>-6</sup>
④	黏土	2.0	26.2	1.99	0.737	41.4	15.7	1.3×10 <sup>-7</sup>
⑤	粉质黏土夹粉土	1.3	30.0	1.92	0.841	16.8	22.7	5.4×10 <sup>-6</sup>
⑥-1	粉砂夹粉土	4.4	30.2	1.91	0.836	4.6	31.4	1.6×10 <sup>-3</sup>
⑥-2	粉砂	4.0	28.9	1.94	0.789	3.8	33.4	2.1×10 <sup>-3</sup>
⑦	粉质黏土	5.7	29.9	1.93	0.840	25.7	17.7	4.6×10 <sup>-6</sup>

### 1.2 设备布点及安装

本文采用振弦式压力传感器进行监测, 该压力传感器通过采集温度及振动频率并经标定方程转换为压力值, 根据其工作原理可知监测的压力为土压力、地下水压力及泥浆压力的合力, 即本文研究的施工中管周压力。

监测点位分布见图 3, 选取距掘进机头 35 m 的第 19 根管节作为监测断面, 在注浆孔正后方 0.7 m 共布置了 11 个振弦式压力传感器, 采集频率为 20 min/次。其中, T1~T5 为顶部测点, T1, T5 为对称布置, T2, T3 与顶部两个注浆孔相邻, 主要监测注浆孔附近的压力, T4 位于管顶正中间; L1~L3 分别位于左侧侧壁的上、中、下个位置, R2 为右侧侧壁上的压力监测点, 高度与 L2 相对, 作为 L2 数据的补充验证; B1 和 B2 为底部测点。

为防止压力传感器被洞口止水钢板和加固区混凝土碎石损坏, 本文采用了自主设计的传感器可伸缩式底座, 如图 4。底座包括内底座、外底座、定位板和埋线筒。其中, 外底座、定位板与埋线筒焊接, 并在浇筑管节前埋设在钢筋笼上; 混凝土管节养护完成后, 将内底座与压力传感器通过胶水粘结, 再通过内外螺纹与外底座连接。监测初始阶段传感器受压面低于管节表面, 通过止水钢板和加固区后通过旋转六角螺母使受压面与管节表面齐平, 可有效避免压力传感器的损坏。

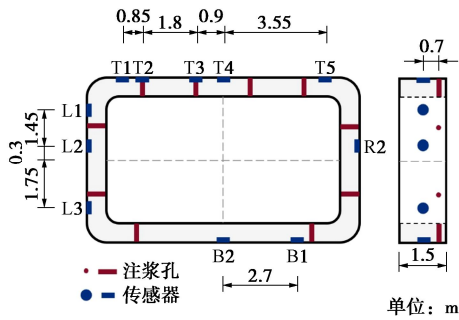
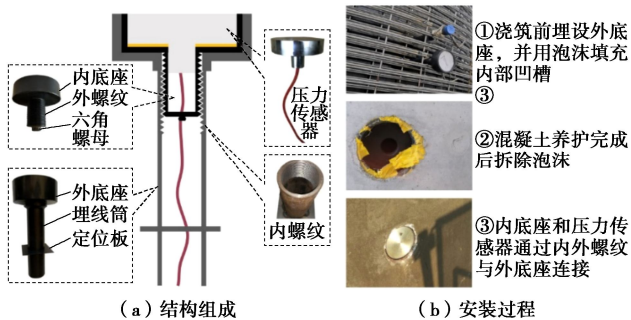


图 3 压力传感器布点图

Fig. 3 Layout of pressure sensors



(a) 结构组成

(b) 安装过程

图 4 可伸缩式底座结构图及安装过程

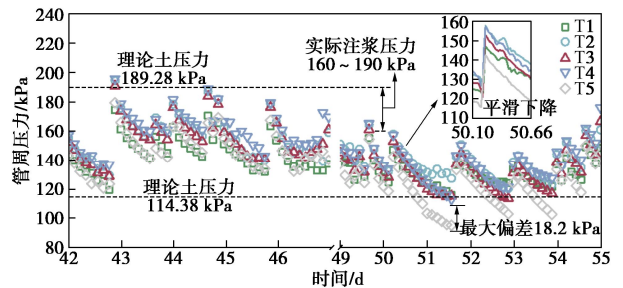
Fig. 4 Structure and installation process of retractable base

## 2 施工中管周压力时空分布规律

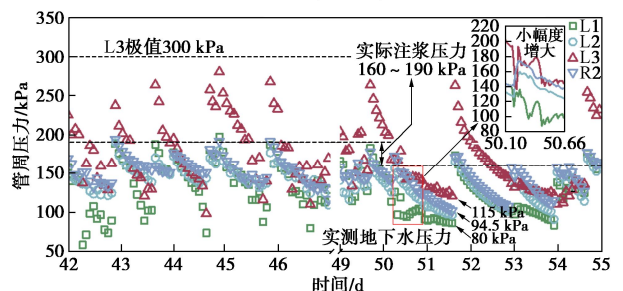
本次原位监测试验收集了从顶进 35 m 到 233.6 m 的超过 5000 组的数据, 考虑到 100~130 m 区间覆土深度较为均匀, 选取该区间采集的 1000 组管周压力数据展开分析。

### 2.1 空间分布特征

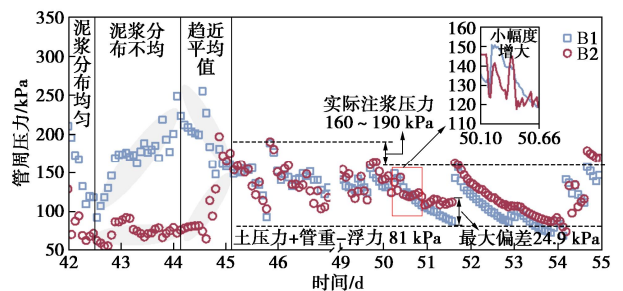
如图 5 (a)~5 (c) 所示, 从变化趋势上看, 矩形顶管管周压力受触变泥浆影响呈现出压力消散的规律。不同位置的管周压力在注入触变泥浆后迅速上升, 且所有测点出现压力极大值的时间基本同步, 注浆结束后管周泥浆逐渐滤失导致压力逐渐下降。由于触变泥浆良好的流动性, 同一深度的管周压力 (顶部 T1~T5、侧壁 L2 与 R2、底部 B1 与 B2) 分布较为均匀, 变化曲线基本重合。但底部 B1 和 B2 在 43~45 d 压力差异较大, 这是由于测点之间被泥块堵塞, 泥浆压力无法均匀分布; 同理, 51~52 d 管节顶部 T5 与 T4 出现最大偏差 18.2 kPa, 底部 B1 与 B2 出现最大偏差 24.9 kPa。整个监测曲线中这种现象并不常见, 且重复注浆作用将冲刷掉堵塞泥块, 测点之间的泥浆会再次贯通, 管周压力迅速趋近于两者平均值。



(a) 管节顶部



(b) 管节侧壁



(c) 管节底部

图 5 不同管周位置的管周压力变化图

Fig. 5 Variation of pressures at different positions around pipe

从曲线变化特点上看, 顶部注入触变泥浆后逐渐向周围地层滤失, 其管周压力曲线平滑下降; 而泥浆受重力作用向管节下方的环空间隙运移, 对侧壁和底部形成泥浆补给, 导致侧壁和底部管周压力以锯齿形下降, 即在泥浆滤失过程中管周下方区域的泥浆少量增多引起压力小幅度增大的现象。

从管周压力大小上看, 注入触变泥浆后顶部 (T1~T5)、侧壁中上部 (L1, L2, R2)、底部 (B1, B2) 在 42~50 d 期间的管周压力极大值为 190 kPa, 50~55 d 期间为 160 kPa, 这与该时间内现场实际设定的注浆压力吻合。理论上, 若设定的注浆压力小于地下水压力, 将无法注入泥浆, 地下水甚至会沿注浆孔回流; 而注浆压力太大, 则会引起地层上抬, 或者形成劈裂通道, 导致地面冒浆。因此, 现场通常将注浆压力大小设定在地下水压力与水土压力之间, 对于本工程, 最大地下水压力为 120 kPa, 采用太沙基压力理论计算得到最大水土压力为 189.28 kPa, 实际注浆压力基本处于该范围。此外, 顶部及侧壁中上部的泥浆在侧壁下部大量堆积, 导致浆体体积迅速增加, 因此侧壁下部管周压力远大于其余测点, 达到 300 kPa。

佛山砂层圆形顶管施工中的管周压力变化见图 6<sup>[13]</sup>, 可以发现圆形顶管与矩形顶管在压力大小和分布特点上存在明显区别。压力大小上, 注浆后矩形管节底部与顶部的管周压力都接近注浆压力, 且最大管周压力出现在侧壁下部, 而圆形顶管的泥浆沿管节弧面向底部流动, 注浆后圆形管节仅底部接近注浆压力, 且最大管周压力出现在管节底部。分布特点上, 矩形管节同一深度的管周压力 (T 系列、B 系列) 基本相同, 说明泥浆分布较为均匀, 而圆形管节同一深度的管周压力 (F2 和 F3) 差别较大, 说明同一深度泥浆难以均匀分布。文献[10, 12, 13]通过圆形顶管现场监测也得到同样的结论。

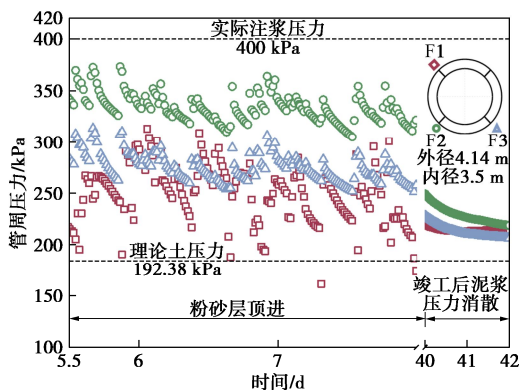


图 6 圆形顶管的管周压力变化图

Fig. 6 Variation of pressures around pipe of circular pipe jacking

## 2.2 时间演化规律

为排除上部泥浆补给导致压力小幅度波动对整体变化趋势的影响, 选取图 5 中 51~53 d 管节顶部、侧壁及底部管周压力变化均较为平滑的数据, 并将两次注浆之间管周压力对时间求导, 得到施工中管周压力变化速率曲线, 见图 7。

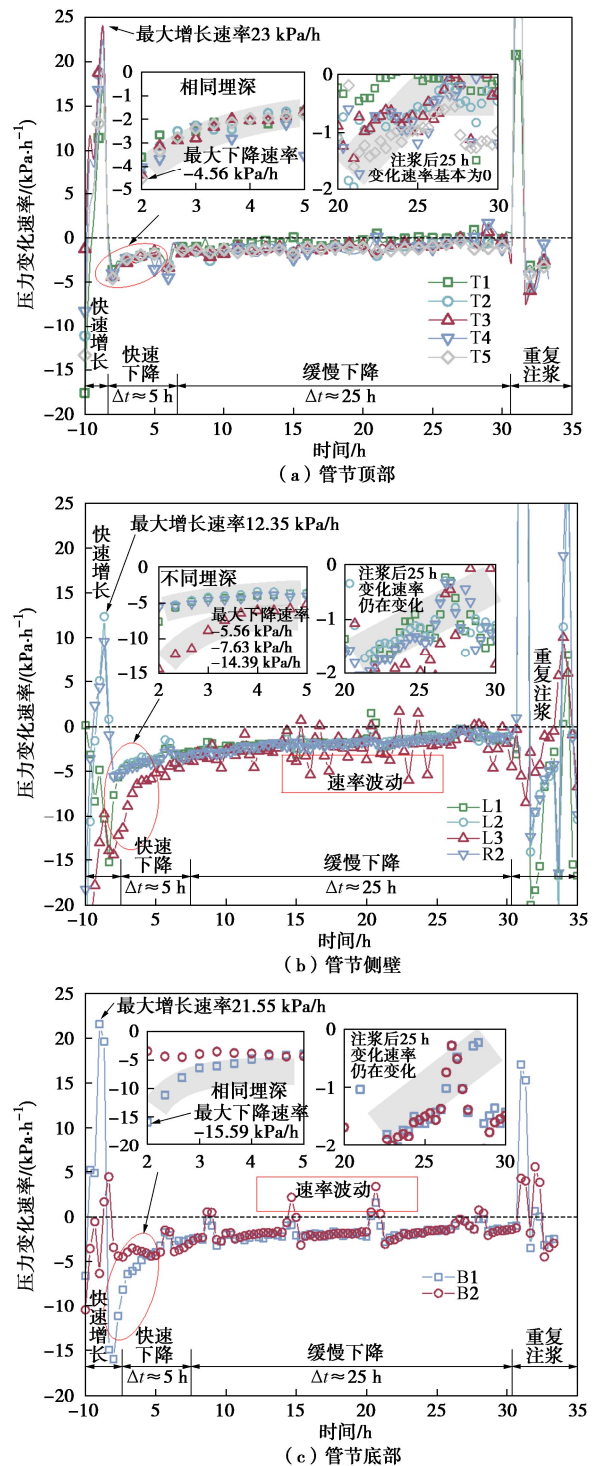


图 7 不同管周位置的压力变化速率图

Fig. 7 Variation rates of pressures at different positions around pipe

在 34 h 的监测时间内顶管掘进了 2 m, 单次补浆时间为 20~40 min, 注浆压力为 160 kPa, 图 7 中正值代表压力增长, 负值代表压力下降。可以发现, 管周压力变化速率并非恒定值, 根据变化速率大小可将管周压力随时间的变化划分为快速增长阶段、快速下降阶段和缓慢下降阶段。

注浆开始后, 环空泥浆体积迅速扩张, 压力变化速率也呈线性增加, 最大增长速率均在 10 kPa/h 以上, 进行快速增长阶段; L3 在此阶段变化速率为负值, 说明管周压力仍在下降, 但注浆使压力下降速率减缓, 由-17.80 kPa/h 降至-9.79 kPa/h, 注浆结束时压力仅降低 6.53 kPa。前文提到侧壁下部 L3 受上部泥浆补给, 管周压力还未完全消散并大于注浆压力, 该处附近的注浆孔无法注浆, 因此未表现出快速增长的规律。

注浆结束后, 触变泥浆沿土体孔隙滤失, 泥浆中的固相颗粒逐渐堆积并在洞周形成泥皮, 渗透系数随之减小, 进入压力快速下降阶段, 所有测点的管周压力开始递减, 下降速率达到最大值, 并随时间呈反比降低。同一深度(顶部: T1, T2, T3, T5; 侧壁: L2, R2; 底部: B1、B2)压力变化速率基本相同, 在不同深度(T 系列, L1, L2, L3, B 系列)之间, 管周压力的下降速率随着深度的增加而增加, 即越靠近管节下部, 管周压力下降越快。可以发现泥浆在管节下部局部堆积, 不仅导致管周压力高于上部, 而且更大的压力差加快了管周压力下降速率。

注浆结束 5 h 左右, 洞周的泥皮达到最厚, 渗透系数不再继续下降, 进入缓慢下降阶段。泥浆由上向下补给使顶部更快达到压力稳定, 表现为注浆 25 h 后顶部的压力变化速率约为 0, 即管周压力基本不再变化, 而侧壁和底部的变化速率仍保持缓慢下降且有一定速率波动, 压力稳定需要 30 h 以上。

### 3 泥浆滤失过程中管周压力预测模型

#### 3.1 函数拟合

根据洞周泥皮的稳定状态, 触变泥浆在顶管施工过程中存在两种滤失模式交替循环。停止注浆时环空间隙的泥浆逐渐滤失, 洞周土体表面形成泥皮, 此时泥皮不受注浆冲刷发生破坏, 其厚度不断增大, 渗透系数减小, 滤失速率逐渐降低, 称为静滤失状态; 泥皮形成过程中持续注浆, 洞周已有的泥皮受到冲刷, 泥皮厚度和滤失速率处于不稳定变化, 称为动滤失状态。顶管注浆时间相比顶进时间来说很短, 实际施工中除了掘进机机头前端同步注浆, 其余管节均为定时补浆, 通常每 24 h 补浆 15~40 min, 可以认为大部分时间处于静滤失状态。

静滤失状态下, 压力差是造成触变泥浆滤失的驱动力, 管周土体的孔隙是泥浆滤液的滤失通道<sup>[15-18]</sup>。滤失过程中泥浆体积减少使泥浆压力逐渐消散, 渗透压力差降低, 直至和土压力、地下水压力再次平衡; 同时固相颗粒填充土体孔隙形成泥皮, 土体渗透系数逐渐降低。因此, 泥浆滤失过程中因压力差和土体渗透系数不断变化, 管周压力消散呈现出先快后慢的变化趋势, 其静滤失过程可采用非线性回归模型予以定量表征。

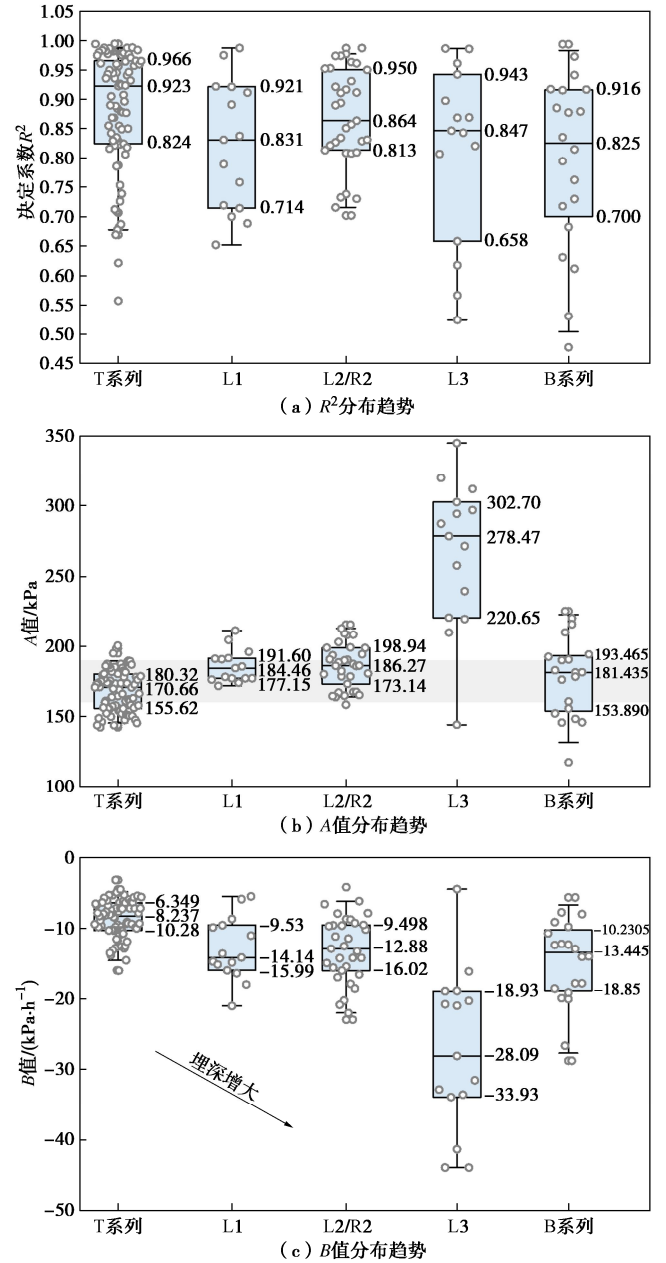


图 8 管周压力拟合函数相关参数箱型分布图

Fig. 8 Box distribution of parameters of pressures around pipe for fitting function

根据压力及变化速率的曲线特点, 将图 5 每个注浆-漏失周期的管周压力拟合为  $y = A - B \ln x$  的对数回

归函数,  $y$  为某时刻的管周压力,  $x$  为注浆结束后的时间, 该回归函数的物理意义为管周压力达到某一极值  $A$  后, 以  $B/x$  的压力消散速率衰减。图 8 为基于图 5 拟合结果统计的  $A$  值,  $B$  值及  $R^2$ 。其中, 决定系数  $R^2$  均达到 0.82 以上 (如图 8 (a)), 表明该回归函数能够较好预测泥浆滤失过程中的管周压力变化规律。

$A$  值代表管周压力的极大值, 图 8 (b) 中除管节侧壁下部 L3 处  $A$  值较注浆压力偏大且各箱型分位波动明显, 其余位置均集中在注浆压力值附近, 各箱型分位差值较小。

$B$  值表征了管周压力消散速率的强度, 图 8 (c) 中管节顶部 (T 系列) 及侧壁中上部 (L1, L2, R2) 的  $B$  值小于侧壁下部 (L3) 及底部 (B 系列), 根据表 1 可知本工程管周不同位置土体渗透系数基本一致, 因此各位置下降速率的差异是压力差引起的, 其本质是管周不同位置的泥浆体积分布不均匀。

### 3.2 参数求解

对于不同的砂土地层矩形顶管工程, 其注浆压力、地层条件、管节尺寸等因素与本工程存有差异, 影响  $y = A - B \ln x$  中关键参数  $A, B$  的取值, 以下对参数求解方法展开探讨。

基于前文分析,  $A$  值可取注浆压力, 矩形顶管工程实际施工中一般根据埋深、地层性质、管节尺寸、地下水压力计算注浆压力的调控范围, 则  $A$  值的计算公式为

$$A = P_{\text{注浆压力}} = P_{\text{土压力}} + P_{\text{地下水压力}} \quad (1)$$

式中:  $P_{\text{土压力}}$  根据太沙基松动土压力公式计算;  $P_{\text{地下水压力}}$  根据现场勘察报告选取。

$B$  值受压力差和土体渗透系数影响, 由于  $B/x$  是与时间相关的反比函数, 反映了压力消散速率因压力差和土体渗透性变化引起的递减趋势, 当  $x$  趋近无穷大时, 压力消散速率趋近于 0, 即管周压力不再变化。为便于实际工程运用, 假定压力消散速率小于 1 kPa/h 时管周压力基本稳定, 则达到稳定需经历  $B$  小时, 此时压力稳定值  $P_B = A - B \ln B$ , 得到管周压力稳定值  $P_B$  即可求解  $B$  值, 而管周压力稳定值  $P_B$  与管土接触状态相关。

洞周与后续管节存在 20~50 mm 的环空间隙作为泥浆填充空间, 注浆初期较大的注浆压力可保持隧洞稳定, 理想状态下管节与隧洞的形心重合, 管周填充泥浆且与洞周不发生直接接触, 如图 9 (a)。林天翔等<sup>[9]</sup>基于冲击映像试验也证明了顶管管周局部区域与洞周不发生接触。矩形管节结构受断面尺寸、厚度、管节密度等影响, 浮重比通常大于 1<sup>[14, 20]</sup>, 即泥浆浮力大于管节重力而上浮, 管节顶部与土体接触, 实际呈图 9 (b) 中状态。泥浆滤失后期的泥浆压力不足以维持隧洞稳定, 隧洞由于地层损失具有径向收缩

的趋势, 理论上此时的管周压力趋近于水土压力。而泥浆在管节中下部堆积的特点导致该区域泥皮形成情况更好, 一方面表现为如图 6 中顶部管周压力基本稳定时管节中下部仍有泥浆未完全滤失的现象; 另一方面在泥浆完全滤失后中下部的泥皮也会更厚, 泥皮填充了部分地层损失, 且泥浆中的固相颗粒渗入土体发生絮凝形成凝胶体, 对隧洞具有支撑作用<sup>[21]</sup>, 导致管节相对于理想状态发生上移。因此, 管周压力稳定期间管节仍处于图 9 (b) 中的接触状态。

管周压力稳定时管周受力示意图如图 9 (c), 顶部与上部土体直接接触, 并且泥皮隔绝了作用在管节表面的地下水压力,  $P_B$  趋向于土压力; 侧壁及底部孔壁形成较好泥皮, 洞周稳定并在压力稳定时仍存在有泥浆, 其中侧壁泥浆压力与地下水压力达到动态平衡, 压力差降低至零, 泥浆不再向土体滤失,  $P_B$  为剩余泥浆压力, 大小等于地下水压力, Hashimoto 等<sup>[22]</sup>在砂层盾构隧道的衬砌压力研究中得到了同样的结论, 并认为这是由于土体自身稳定性引起的; 根据受力平衡, 底部受到顶部土压力、管节重力、浮力, 因此管周压力趋向于顶部土压力、管节重力、浮力的矢量和。图 5 中实测管周各位置的稳定值也分别趋近于土压力、地下水压力及浮重矢量和, 进一步验证了基于管土接触状态求解  $P_B$  的合理性。

由此,  $B$  值的计算公式为

$$B \ln B = A - P_B$$

$$P_B = \begin{cases} P_{\text{土压力}} & \text{(管节顶部)} \\ P_{\text{地下水压力}} & \text{(管节侧壁)} \\ P_{\text{土压力}} + G_{\text{管节}} - P_{\text{泥浆浮力}} & \text{(管节底部)} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $G_{\text{管节}}$  为管节自重。

综上, 泥浆滤失过程中的矩形顶管管周压力按式 (3) 计算, 该函数方程所需参数  $A, B, P_B$  按式 (1), (2) 求解。

$$y = A - B \ln x (0 < x \leq T) \quad (3)$$

式中:  $T$  为泥浆完全滤失所需时间, 数值上等于  $B$  值。

### 3.3 对比验证

按式 (2) 计算管节各位置  $P_B$  值, 分别采用实际注浆压力和式 (1) 求得的理论水土压力作为  $A$  值, 并求得  $B$  值, 见表 2。前文得到了管周压力稳定需要 25~30 h, 表中根据预测模型计算的  $B$  值基本处于该范围; 而相比实测值拟合得到的  $B$  值, 预测模型计算的  $B$  值更大, 这是由于预测模型假设压力达到稳定需要  $B$  小时, 而实际上压力稳定时间大于  $B$  小时, 当式 (2) 中  $A - P_B$  一定时,  $\ln x$  更小, 求得的  $B$  值更大。由此也表明基于实测值拟合的  $B$  值不能代表压力稳定的时间。

表 2 预测函数所需参数计算值

Table 2 Calculated values of parameters for prediction function

管节位置	$P_b$ /kPa	A/kPa		B/(kPa·h <sup>-1</sup> )			拟合值 (图 8 (c) 中位数)
		实际注浆压力	理论水土压力	实际注浆压力		理论水土压力	
				160	190	189.28	
顶部	114.38			16.333	23.844	23.671	8.237
侧壁上部	80.00			24.888	31.798	31.636	14.140
侧壁中部	94.50	160	190	21.386	28.506	28.341	12.880
侧壁下部	115.00			16.169	23.695	23.522	28.090
底部	81.00			24.651	31.573	31.411	13.445

不大的 42~50 d 拟合结果基本一致, 50~54 d 理论水土压力较实际注浆压力偏大 30 kPa, 其拟合曲线的起始点相应上移, 在中后段仍有较好的预测效果。因此, 已知现场实际注浆压力时,  $P_{\text{注浆压力}}$  按实际注浆压力选取, 当现场注浆压力不明确时,  $P_{\text{注浆压力}}$  取太沙基理论公式计算的水土压力。

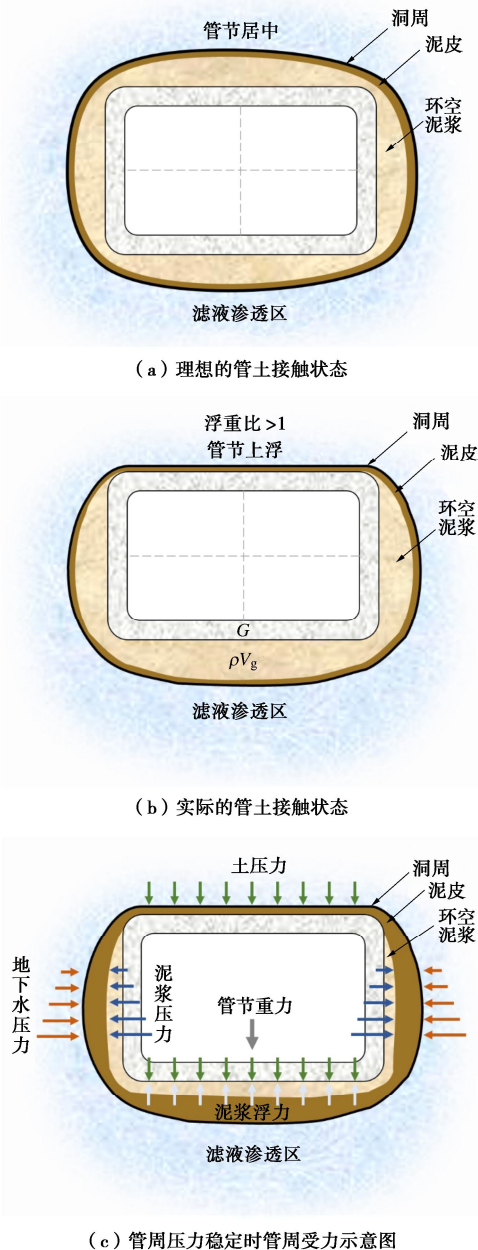


图 9 矩形顶管管土接触状态

Fig. 9 Pipe-soil contact states of rectangular pipe jacking

将表 2 各参数代入式 (3) 并对比管周压力预测值与实测值, 图 10 中采用实际注浆压力作为 A 值得到的拟合曲线能较好预测实际管周压力的变化过程, 而采用理论水土压力作为 A 值, 在与实际注浆压力相差

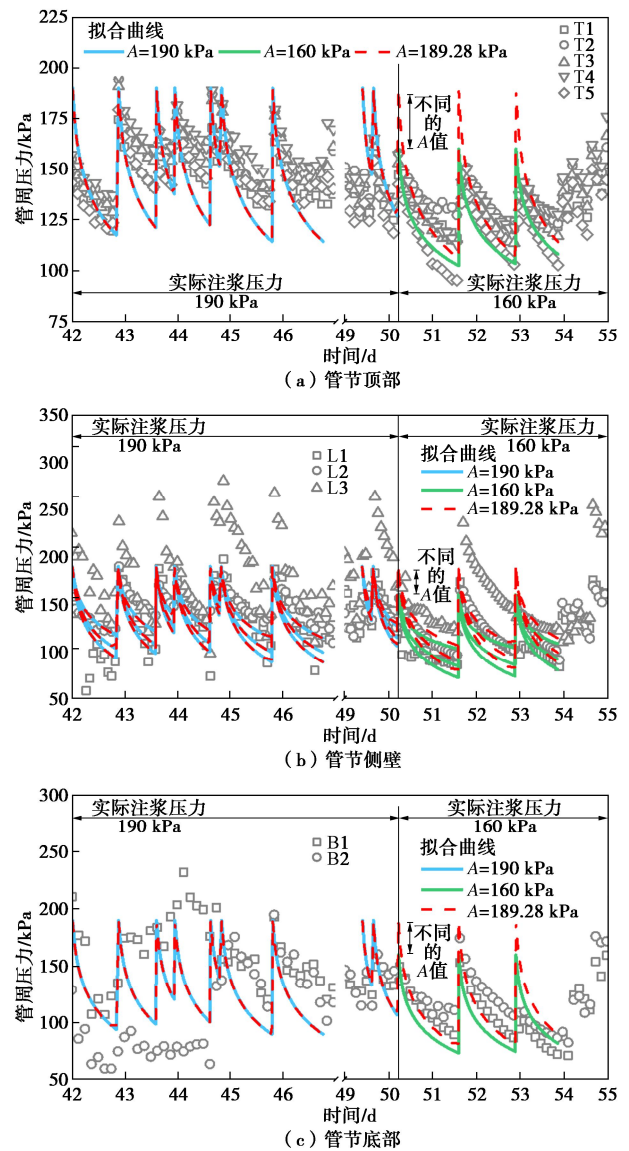


图 10 理论预测值与实测值的对比

Fig. 10 Comparison between predicted and measured values

## 4 结 论

本文基于现场原位监测及理论模型研究了砂土地层大断面矩形顶管施工过程中管周压力的时空分布规律,提出了泥浆滤失过程中的管周压力预测模型,得到4点结论。

(1) 注入触变泥浆对管周压力影响显著,整体趋势表现为注浆开始后泥浆体积增多导致压力迅速上升,注浆结束后泥浆滤失导致压力逐渐下降。管周同一深度的压力变化曲线基本重合,而不同深度管周压力的极大值有所区别,注入触变泥浆后顶部、侧壁中上部、底部趋近于实际注浆压力,侧壁下部远大于其余位置。

(2) 管周压力在注浆-滤失过程中依次经历快速增长阶段、快速下降阶段和缓慢下降阶段。注浆开始后变化速率快速增长,管周压力及增长速率均达到极大值;注浆结束后进入压力快速下降阶段,下降速率达到最大值,并随时间呈反比降低,其中同一深度压力下降速率基本相同,不同深度压力下降速率随着深度的增加而增加;注浆结束5 h左右,进入缓慢下降阶段,并在25~30 h后压力下降速率基本降至0。

(3) 本文采用对数回归函数  $y = A - B \ln x$  拟合现场实测值,得到决定系数  $R^2$  均达到0.82以上, $A$ 值主要位于实际注浆压力范围,管节顶部及侧壁中上部的  $B$  值小于侧壁下部及底部,该对数回归函数可表征泥浆静滤失过程中的管周压力变化规律,压力下降速率  $B/x$  反映了泥浆滤失过程中压力差和洞周土体渗透系数不断变化的特点。

(4) 基于矩形顶管管土接触状态及受力特点,本文提出了预测函数中参数  $A$ ,  $B$ ,  $P_b$  的求解方法,通过预测值与实测值对比证明了该求解方法的准确性。该求解方法考虑了土体性质、覆土埋深、地下水压力、管节自重、泥浆浮力、实际注浆压力等工程参数,其中  $A$  值取实际注浆压力或理论水土压力, $P_b$  分别趋近于顶部土压力、侧壁地下水压力及顶部土压力、管节重力、浮力的矢量和。

### 参考文献:

- [1] CHEN X L, MA B S, NAJAFI M, et al. Long rectangular box jacking project: a case study[J]. *Underground Space*, 2021, **6**(2): 101-125.
- [2] 许有俊,文中坤,闫履顺,等.多刀盘土压平衡矩形顶管隧道土体改良试验研究[J].*岩土工程学报*, 2016, **38**(2): 288-296. (XU Youjun, WEN Zhongkun, YAN Lüshun, et al. Experimental study on soil improvement during construction of EPB rectangular pipe jacking with multi-cutter[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(2): 288-296. (in Chinese))
- [3] 张鹏.拱北隧道超大型曲线顶管管幕施工关键技术及理论研究[D].武汉:中国地质大学,2018. (ZHANG Peng. Research on Key Construction Techniques and Theory of Super Large Curved Pipe Jacking Roof in Gongbei Tunnel [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018. (in Chinese))
- [4] MARSTON A, ANDERSON A O. The Theory of Loads on Pipe in Ditches and Tests of Cement and Clay Drain Tile and Sewer Pipe[D]. Ames: Iowa Engineering Experiment Station, 1913.
- [5] SPANGLER M G. A theory on loads on negative projecting conduits[C]// Highway Research Board Proceedings No. 00204134. Washington D C, 1950.
- [6] TERZAGHI K. Stress distribution in dry and in saturated sand above a yielding trap-door[C]// Proceedings of the First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Cambridge, 1936.
- [7] ZHANG H F, ZHANG P, ZHOU W, et al. A new model to predict soil pressure acting on deep burial jacked pipes[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, **60**: 183-196.
- [8] 蒋洪胜,侯学渊.软土地层中的圆形隧道载荷模式研究[J].*岩石力学与工程学报*, 2003, **22**(4): 651-658. (JIANG Hongsheng, HOU Xueyuan. Study of the loading pattern on circular tunnel in soft ground[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, **22**(4): 651-658. (in Chinese))
- [9] MILLIGAN G W E, NORRIS P. Pipe-soil interaction during pipe jacking[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 1999, **137**(1): 27-44.
- [10] 魏纲,徐日庆,余剑英,等.顶管施工中管道受力性能的现场试验研究[J].*岩土力学*, 2005, **26**(8): 1273-1277. (WEI Gang, XU Riqing, YU Jianying, et al. Site-based experimental study on pipe behavior during pipe jacking[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, **26**(8): 1273-1277. (in Chinese))
- [11] 冯海宁,温晓贵,魏纲,等.顶管施工对土体影响的现场试验研究[J].*岩土力学*, 2003, **24**(5): 781-785. (FENG Haining, WEN Xiaogui, WEI Gang, et al. In-situ test research on influence of pipe jacking on soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, **24**(5): 781-785. (in Chinese))



- [12] 刘翔. 软土中4 m直径混凝土顶管施工管土受力特性测试与分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2014. (LIU Xiang. Site-based Experimental Study on Characteristic of Pipe-Soil Interaction of 4 m Diameter Jacking Pipe in Soft Soil[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014. (in Chinese))
- [13] NIU Guolun, MA Baosong, ZHANG Peng, et al. Measurement analysis of pipe-soil interaction in large-diameter pipe jacking project of a power tunnel in Foshan, China[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(8): 1353-1360.
- [14] 袁心, 马保松, 赵阳森, 等. 矩形顶管施工中管周压力的实测与分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(4): 1225-1233. (YUAN Xin, MA Baosong, ZHAO Yangsen, et al. Field measurement and analysis of pipe pressure during box jacking construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(4): 1225-1233. (in Chinese))
- [15] 闵凡路, 吕焕杰, 宋帮红, 等. 砂地层孔径分析及其对泥浆在地层中渗透性的影响[J]. 中国公路学报, 2020, 33(3): 144-151. (MIN Fanlu, LÜ Huanjie, SONG Banghong, et al. Pore size analysis and its influence on slurry infiltration in sandy layers[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(3): 144-151. (in Chinese))
- [16] 林钰丰, 张尚达, 方勇, 等. 不同渗透系数地层中泥浆渗透成膜试验研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(12): 190-199. (LIN Yufeng, ZHANG Shangda, FANG Yong, et al. Experimental study on filter cake for slurry infiltration in different permeability strata[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(12): 190-199. (in Chinese))
- [17] 周中, 张俊杰, 张称呈, 等. 泥水盾构泥浆渗透-扩散时空演化解析模型[J]. 岩土力学, 2021, 42(8): 2185-2194. (ZHOU Zhong, ZHANG Junjie, ZHANG Chengcheng, et al. Analytical model for the spatial-temporal evolution of slurry penetration-diffusion in a slurry shield[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(8): 2185-2194. (in Chinese))
- [18] 毛家骅, 袁大军, 杨将晓, 等. 砂土地层泥水盾构开挖面孔隙变化特征理论研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(7): 2283-2292. (MAO Jiahua, YUAN Dajun, YANG Jiangxiao, et al. A theoretical study of porosity characteristics on the excavation face of slurry shield in sand stratum[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(7): 2283-2292. (in Chinese))
- [19] 林天翔, 冯少孔, 叶冠林, 等. 顶管施工中管壁与围土间不同接触关系的冲击响应特征[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(10): 1924-1932, 1961. (LIN Tianxiang, FENG Shaokong, YE Guanlin, et al. Impact response characteristics under different contact relationships between pipe and soil in pipe-jacking construction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(10): 1924-1932, 1961. (in Chinese))
- [20] XUE Qingsong. Calculation and measurement analysis of jacking force of large cross-section rectangular pipe jacking machine used in Suzhou Chengbei Road[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(12): 1717-1724.
- [21] 雷华阳, 刘旭, 施福硕, 等. 顶管工程聚合物改性膨润土泥浆配比优化研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增刊2): 51-55. (LEI Huayang, LIU Xu, SHI Fushuo, et al. Proportional optimization of polymer-modified bentonite slurry in pipe jacking[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S2): 51-55. (in Chinese))
- [22] HASHIMOTO T, BRINKMAN J. Simultaneous backfill grouting, pressure development in construction phase and in the long-term[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2004, 19(4/5): 447.