

陆翔路矩形顶管人行横通道深基坑设计与施工研究

王思青

上海市市政工程设计研究（总院）有限公司，上海，200092；

摘要：随着地下空间的开发，深基坑工程越来越普通，深基坑开挖支护方案选择对周边环境的影响至关重要。本文结合上海陆翔路顶管人行横通道深基坑工程，重点分析该基坑设计的重难点，即在于两侧已建顶管的保护及狭窄施工空间。基于此情况，本坑围护方案采用了 MJS 加固桩+钻孔灌注桩+高压旋喷桩的模式。采用先行施工 MJS 桩，隔离加固基坑两侧顶管；然后施工剩余围护体系的施工工序。同时采用有限元软件 GTS NX 模拟基坑开挖对周边环境的影响分析，并通过现场监测结果对模拟结果进行反演。为类似工程提供设计参考。

关键词：狭窄深基坑；MJS 加固桩；GTS NX 模拟；监测

DOI: 10.69979/3029-2727.25.07.002

引言

针对地下隧道的联络通道的设计施工主要分为明挖法和暗挖法。明挖法为软土地下工程施工中最基本、最常用的施工方法。暗挖法目前暗挖法均已比较成熟，且广泛用于各类工程，并可细分为顶管法、矿山法（管幕暗挖法）、冻结法等。

顶管法在城市各类联络通道应用很多，如上海地铁 2 号线陆家嘴站某出入口地下通道工程、郑州纬四路下穿中州大道人行道项目^[2-3]。管幕暗挖法一种应用广泛的地下工程暗挖技术，如港珠澳大桥珠海连接线拱北隧道口岸暗挖段^[4-5]，天府新区兴隆 86 路综合管廊下穿天府大道建设工程^[6]，广州地铁 21 号线天河公园折返线大断面双线暗挖隧道下穿黄埔大道及市政管线^[7]以及上海外滩某地下连通道工程^[8]。联络通道冻结法施工中经常采用水平冻结模式，水平冻结法成功运用在上海联络通道工程^[9-10]、南京地铁一号线某联络通道工程^[11]广州地铁二、八线延长线工程南浦站—洛溪站区间联络通道等^[12]。

陆翔路-祁连山路贯通工程地道自 S20 高速南侧入地，下穿 S20 及顾村公园，于镜泊湖路南侧出地面。其下穿 S20 及顾村公园段采用大断面矩形顶管施工，其余均采用明挖施工^[13]。

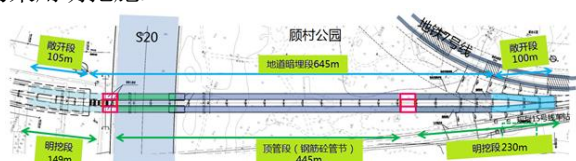


图 1 陆翔路-祁连山地道平面图

本人行横通道位于顾村公园内，原考虑顾村公园使

用场地因素，采用管幕暗挖施工进行设计，人行横通道纵断面如图 3。采用 MJS 全断面加固， $\varnothing 108 \times 6$ 钢管棚进行洞顶预加固，开挖中采用 $\varnothing 42 \times 3.5$ 小导管注浆加固，开挖后立即喷射混凝土及架设工字钢，形成整体，后续进行通道主体结构施工。

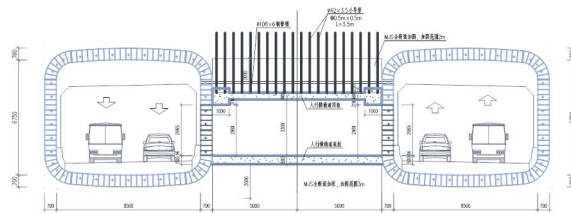


图 2 人行横通道纵断面（管幕暗挖法）

后根据现场情况，具备明挖条件，将方案调整为明挖施工，重新进行人行横通道的明挖施工设计。

1 工程概况

人行横通道位于 K2+543.045，项目位于公园河道回填区北侧，且在绿化带内。人行横通道长 10m，宽 3m，高 4.465m，埋深约 11m。

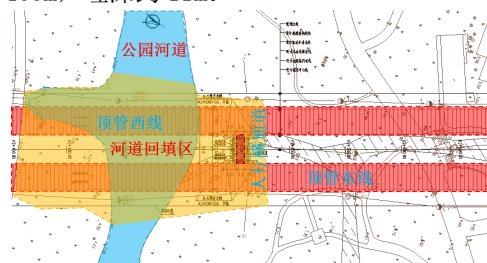


图 3 人行横通道平面图

2 工程与水文地质条件

2.1 工程地质条件

本工程场地自然地面以下 45.00m 深度范围内的地层自上而下可划分为 8 大层及若干亚层、夹层。地层构成与特征具体情况如下:

(1) 人工堆积层

表层为厚度约为 3.5m 的人工堆积土层,主要为①1 层,该层主要为绿化耕植土,含植物耕茎等,下部以杂填土为主,土质不均,结构松散。

(2) 全新世 Q4 沉积层

人工堆积层以下为②1 褐黄~灰黄色粉质黏土,③灰色淤泥质粉质黏土,③T 灰色黏质粉土,④灰色淤泥质黏土,⑤1 灰色黏土,⑤1T 灰色黏质粉土,⑤3 灰色黏土,⑤4 灰绿色粉质黏土。

(3) 晚更新世 Q3 沉积层

人工堆积层以及 Q4 沉积层以下为⑥暗绿~黄色粉质黏土,⑦草黄~灰黄色粉砂,⑧1 灰色黏土,⑧21 灰色粉质黏土与粉砂互层。

2.2 水文地质条件

拟建场地地下水类型有潜水、承压水,具体分述如下:

(1) 潜水

赋存于浅部黏性土层和浅部粉性土层中,其补给来源主要为大气降水与地表径流,地下水位随气候、季节及环境影响而变化,水位埋深一般在 0.3~1.5m,年变幅可达 1m 左右。勘察期间,实测地下水位埋深为 0.8~1.6m 之间,高程为 2.70~3.28m。

(2) 承压水

赋存于中部⑦层及下部⑧2、⑨层等粉(砂)性土层中承压水,根据地区经验,承压水埋深一般为 3~12m,并随季节有所变化。场地内⑤1T、⑦层承压水对本工程影响较大,⑧2、⑨层埋藏较深,其含有承压水对本工程无影响。

勘探期间,测得地下潜水位埋深一般为 0.8~1.6m 之间,高程为 2.70~3.28m。根据观测⑦层承压水结果,承压水头埋深 3.84m,水头标高 0.21m。

3 基坑支护设计

3.1 设计原则

根据工程实际情况和周围环境条件,结合场地工程

地质、水文地质条件等,参考地区类似工程经验,精心设计工程方案,力求科学、经济、合理。

3.2 结构设计

人行横通道范围顶管东、西线各 4 节管节均采用钢管片,其构造构成如下图。

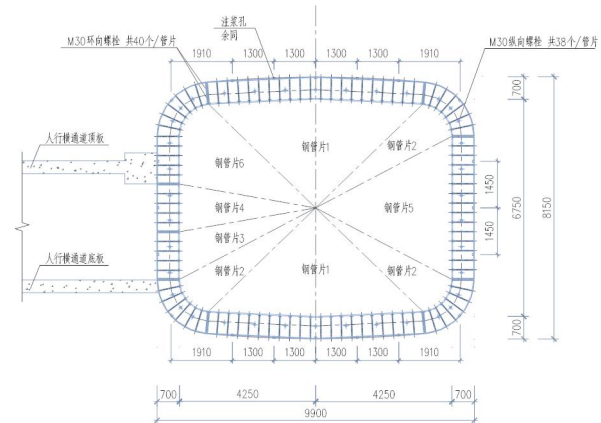


图 4 人行横通道钢管片构造图

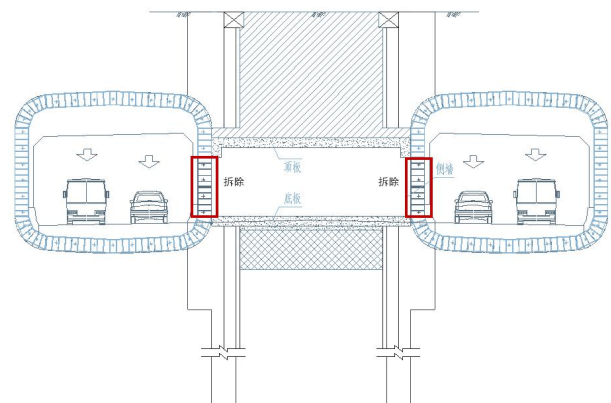


图 5 人行横通道结构施工示意图

人行横通道为框架结构,结构简单,本次施工难点主要在于小空间的围护方案的设计及两侧已施工顶管的变形控制。

3.3 基坑围护方案

人行横通道基坑纵向长 10.0m,宽 4.0 米,基坑挖深约 11.0 米,为窄长型基坑。基坑环境保护等级取一级,基坑安全等级取二级。

人行横通道两侧为已建成顶管,对于两侧顶管的保护及狭窄施工空间是本次设计的重点考虑因素。

结合地质条件及地区成熟经验,对基坑围护及支撑方案比选。

表 1 围护结构对比表

围护结构	SMW 工法桩	钻孔灌注桩	地下连续墙
对地层适应性	适用于软土地层	适用于各种地层	适用于各种地层
围护效果	刚度较小，变形较大	刚度较大，变形较小	刚度大，变形小
对邻近建筑管线影响	有一定影响	影响较小	影响小
防水效果	防水效果较好	防水效果差，需另设止水帷幕	防水效果好
施工对环境的影响	对周围污染小	施工时可采用套筒钻机成孔，对环境的影响小	施工时振动小，噪声低，施工泥浆对环境有一定影响
对机具设备的要求	需要大型钻机	需要大型钻机	需要大型挖槽机
施工速度	施工速度快	施工工艺成熟，施工速度快	施工工艺成熟，在土中施工速度较快
围护结构造价	较低	较高	高

综合考虑上海地区的施工经验，结合本项目的施工空间小、环境保护等级高的条件，本基坑围护方案采用钻孔灌注桩+止水帷幕的围护体系。

为严格控制顶管变形，根据上海等地相关项目经验^[14-18]，MJS 桩（全方位高压喷射桩）对于周边建构筑物保护具有对地层的低扰动性、施工便捷性、加固灵活性及可靠性等优点，其可进行孔内强制排浆和压力监测，并通过调整强制排浆量来控制孔内压力，使深处排泥和孔内压力得到合理控制，降低挤土效应，大幅减小对环境的影响，而孔内压力的降低也进一步保证了成桩直径。相比传统旋喷工艺，该工法能较大程度的减小施工对周边环境的影响。

因此本项目在围护体系施工前先采用 MJS 桩对顶管侧的地基进行加固，同时兼顾基坑防水作用及基坑支撑体系的承力结构。具体围护体系详见围护平面图及围护纵剖面图。

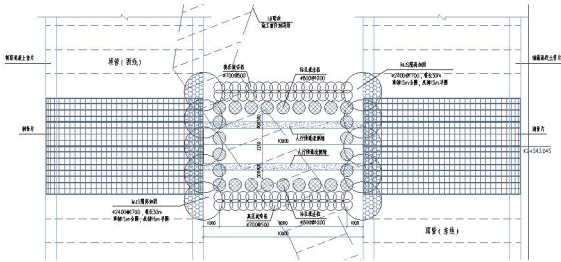


图 6 人行横通道基坑围护平面图

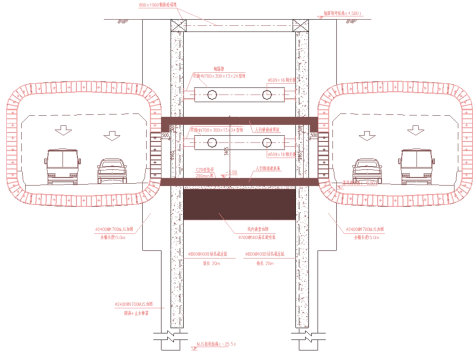


图 7 人行横通道基坑围护纵剖面图

3.4 基坑支护计算

基坑围护结构计算按上海市标准《基坑工程技术标准》（DG/TJ08-61-2018），采用同济启明星软件进行计算。针对围护结构各工况下的基坑整体稳定性、抗倾覆、抗隆起、地表沉降、渗透稳定性、坑底突涌稳定性及围护桩位移、围护桩及支撑内力等进行了验算，计算模型如图 8 所示。

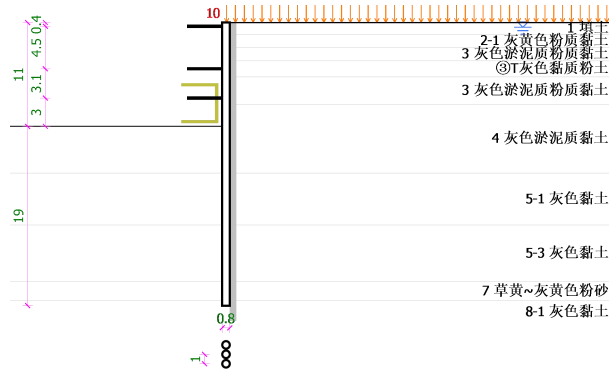


图 8 计算模型

经计算，基坑围护结构变形及基坑整体稳定性、抗倾覆、抗隆起、地表沉降、渗透稳定性、坑底突涌稳定性等均满足要求。其中，基坑施工引起的地面沉降最大值为 15.3mm。

3.5 基坑施工工序

1) 基坑施工首先整平场地，施工顶管两侧 MJS 加固桩；2) 施工灌注桩高压旋喷桩、坑内加固和冠梁；3) 基坑开挖，自上而下施工支撑体系，分步开挖至坑底；4) 割断临顶管开洞侧两侧围护桩及 MJS 加固桩，浇筑结构底板及开洞以下部分侧墙；5) 待底板及侧墙混凝土强度满足设计要求后，拆除第三道支撑，割断临近顶管开洞侧顶板范围内两侧围护桩及 MJS 加固桩；6) 浇筑剩余侧墙及顶板结构，且主体结构与围护墙间空隙采用 C20 素砼填充密实；7) 拆除第二道支撑，按要求回

填覆土至地面，最后拆除第一道砼冠梁；8）待沉降基本稳定后，拆除人行横通道范围内两侧的钢管片 3、钢管片 4，实现人行横通道与两侧顶管的贯通。

3.6 基坑模型的建立及分析方法

3.6.1 有限元模型建立及网格划分

此次采用 GTS NX 软件分析基坑开挖对已建保护顶管及周边的影响，模型水平方向按照基坑实际尺寸进行建模，综合考虑基坑开挖影响范围，模型水平方向取基坑中心线两侧各 50m，其竖直方向则取地表以下约 35m（如图 1）。

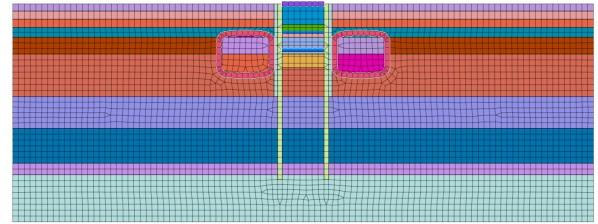


图 9 计算模型简图

3.6.2 计算参数选取

根据地勘钻孔柱状图，该深基坑各层土的基本物理力学参数见表 1。

表 2 地勘土体参数表

编号	厚度/m	压缩模量/MPa	泊松比	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c/kPa	$\phi/^\circ$
1	1.80	2.5	0.38	18.4	15.0	10.0
2-1	1.40	4.4	0.35	18.5	15.9	14.7
3	1.4	3.8	0.35	17.5	11.4	14.4
3T	1.7	6.0	0.35	18.8	4.2	27.5
3	2.9	3.8	0.35	17.5	11.4	14.4
4	7.30	1.9	0.4	16.7	9.5	9.7
5-1	5.50	3.9	0.35	17.6	13.9	14.0
5-3	6.00	4.0	0.35	17.5	14.1	14.1
7	2.00	6.0	0.35	18.2	2.8	30.9
8-1	9.30	5.1	0.35	17.7	18.3	15.3

3.6.3 模拟成果

通过模拟，可得基坑施工对顶管及周边环境变形影响以及基坑围护结构变形情况如下：

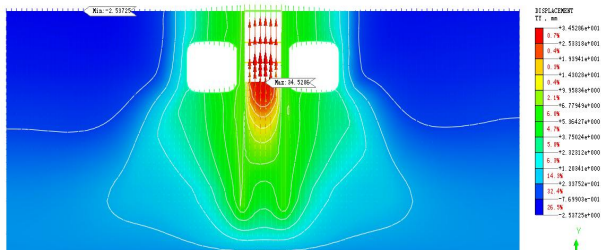


图 10 基坑竖直方向位移云图

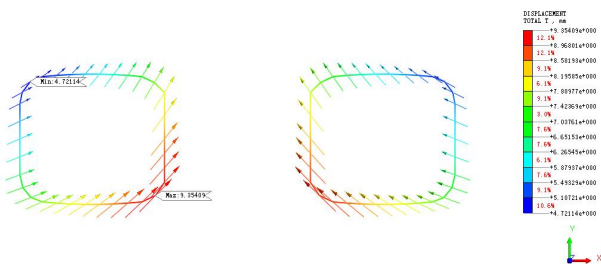


图 11 顶管位移云图

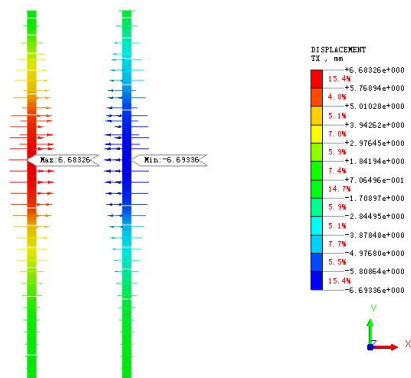


图 12 围护结构水平方向位移云图

根据分析结果可知，顶管最大位移为 9.35mm，数值分析地面最大沉降的最大位移为 4.75mm，围护结构最大水平位移最大值 6.69mm，均满足相关要求。

4 监控量测

本工程重点监测施工期间的围护结构、地表沉降、东西线已建顶管变形以及地下水位变化。其中顶管垂直位移、水平位移、顶管水平及竖向收敛监测在东、西线两侧均设置了监测点；地表垂直位移监测设置在基坑四

周；围护墙顶位移监测设置在围护四边。

根据监测数据，对已建顶管各项变形、基坑围护结构以及地表沉降等变化情况整理如下：

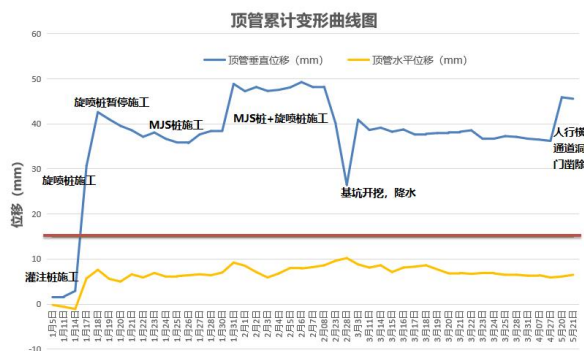


图 13 顶管累计变形图



图 14 顶管累计收敛变形图

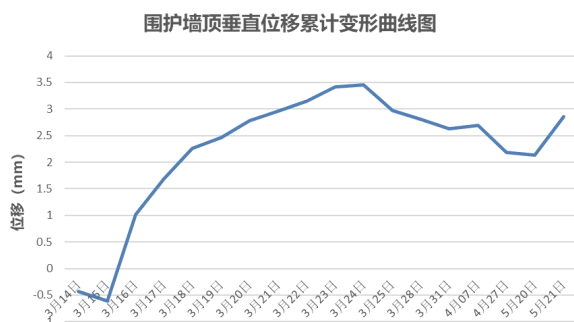


图 15 围护墙顶垂直位移累计变形曲线图



图 16 围护墙顶水平位移累计变形曲线图

地表垂直位移累计变形曲线图

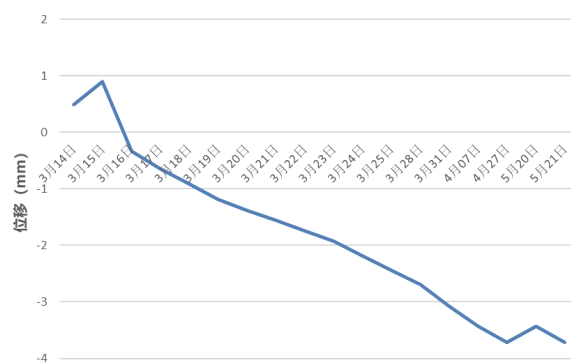


图 17 地表垂直位移累计变形曲线图

监测数据表明：

基坑两侧已建东西线保护顶管均发生了小幅度上抬，其垂直位移累计变化量大范围超过了 15mm，且累计变形最大值可达 49.25mm（异常原因在于未按设计要求先行施工临近 MJS 隔离桩加固，后期调整施工工序，变形可控）。基坑两侧顶管向基坑外侧偏移，顶管水平位移累计变化量均小于 15mm，累计变形最大值为 10.2mm。

已建东西线保护顶管水平及垂直收敛累计变化量维持在-4mm~2mm 的范围内，处于较稳定的状态；

基坑围护墙顶垂直位移累计上升位移最大值为 3.45mm，基坑围护墙顶水平位移累计位移最大值为 2mm；

基坑四周的地表下沉位移累计最大值为 3.72mm。

由此可见，该设计方案围护结构自身及施工对已建保护管道等周边环境影响均是可控的。通过模拟预测和监测值对比发现，两者基坑围护结构变形及周围地表沉降数值整体趋势一致，也验证了数值模型的可靠性。

5 结语

该文针对周边保护等级高、施工空间窄的软土地区深基坑提出了可行可靠的设计方案。同时通过有限元数值模型，用于预测后续工况的施工影响，并与实际监测值对比，得出以下结论：

（1）目前大部分隧道联络通道均采用暗挖法进行设计，对于暗挖设计及施工均已成熟。本文根据现场实际情况，采用明挖法进行顶管联络通道设计。在一定程度上为类似采用明挖施工的项目提供了设计参考。

（2）结合本次监测成果，本次设计 MJS 加固桩发挥了重要的作用，其施工对周边顶管的变形影响很小，在后续围护桩施工过程中对顶管保护效果明显。

（3）施工单位在施工过程中应严格按照围护桩施工顺序，保质保量进行现场施工也是项目质量、安全、进度能够满足要求的重中之重。

参考文献

- [1] 龚晓南. 深基坑工程设计施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [2] 王善根. 上海地铁二号线区间隧道的联络通道及泵站的顶管法施工[J]. 世界隧道, 2000, (05): 18-22.
- [3] 王贺敏, 肖尊群, 汤东桑, 何进江, 张卫中. 郑州地铁 4 号线商都路站 1 号地下通道矩形顶管施工过程数值模拟与现场监测[J]. 隧道建设(中英文), 2019, v. 39(S2): 110-119.
- [4] 胡宝生, 肖调清. 拱北隧道暗挖段曲线管幕顶管施工精度控制技术[J]. 公路交通技术, 2019, v. 35; No. 144(04): 100-110.
- [5] 任辉, 胡向东, 洪泽群, 张军. 超浅埋暗挖隧道管幕冻结法积极冻结方案试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, v. 41; No. 333(02): 320-328.
- [6] 刘冬冬, 周鑫, 杨柠菠, 田旭, 李骥. 管幕法在综合管廊暗挖施工中的应用研究[J]. 施工技术, 2019, v. 48; No. 535(12): 75-79.
- [7] 王科甫. 超前小口径管幕在广州地铁浅埋暗挖隧道中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2019, v. 22; No. 200(05): 160-165.
- [8] 张云海. 中心城区管幕法构筑地下通道的设计与施工[J]. 建筑施工, 2018, v. 40; No. 326(06): 977-980.
- [9] 王宁, 薛绍祖. 人工地层冻结法在地铁联络通道中的应用[J]. 隧道建设, 2007, (S2): 494-497.
- [10] 岳丰田, 仇培云, 杨国祥, 石荣剑. 复杂条件下隧道联络通道冻结施工设计与实践[J]. 岩土工程学报, 2006, (05): 660-663.
- [11] 李大勇, 王晖, 张庆贺. 南京地铁联络通道冻结法施工措施分析[J]. 岩土力学, 2003, (S2): 365-368.
- [12] 张志, 张勇, 陆路, 郑彭生. 冻结法在强扰动地层地铁联络通道施工中的应用[J]. 隧道建设, 2011, v. 31; No. 138(01): 114-120.
- [13] 胡文. 软土地区大断面矩形顶管浅覆土下穿高速变形控制分析研究[J]. 城市道桥与防洪, 2021, No. 264(04): 108-114+17.
- [14] 张志勇, 李淑海, 孙浩. MJS 工法及其在上海某地铁工程超深地基加固中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, v. 39; No. 310(07): 41-45.
- [15] 张鹏飞. MJS 工法在后世博园通道下穿综合管沟中的应用[J]. 中国市政工程, 2015, (1): 56-59+102.
- [16] 王会锋, 姚文娟. MJS 工法在上海 12 号线盾构进出洞加固中的应用[J]. 江西建材, 2016.
- [17] 张子新, 吴昌将. 盾构侧穿邻近古建筑地表长期沉降预测与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, v. 30; No. 245(10): 2143-2150.
- [18] 谢仟元. MJS 桩在盾构停机保压施工中的应用[J]. 建筑机械化, 2019, v. 40; No. 363(04): 44-46.
- [19] DGJ08-61-2018, 基坑工程技术标准[S].
- 作者简介: 王思青(1991—), 女, 汉族, 湖南邵阳人, 本科学历, 研究方向为地下结构及基坑围护结构设计。