

大断面矩形顶管近距离下穿河道开挖方案比选研究

周晓舟

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要:大断面矩形顶管近距离下穿河道具有一定的风险性,需要在设计和施工中采用合适的方案来降低隧道开挖风险。依托陆翔路—祁连山路大断面矩形顶管地道工程,采用数值分析的方法分别对先顶进后抗浮工法和先抗浮后顶进工法进行分析,并基于施工流程、数值模拟结果等进行方案比选,确立了先顶进后抗浮工法的开挖方案。施工监测结果表明,贯通后一段时间内,顶管结构整体略有沉降,约 2.5 mm,管节最大上浮量约 30 mm。

关键词:大断面矩形顶管;下穿河道;抗浮方案设计;开挖工法比选

中图分类号: TU990.3

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)07-0190-04

0 引言

矩形顶管法具有不破坏地面道路、不干扰道路交通、不需迁改地下管线等优势,在地下空间开发中得到了广泛应用^[1-3]。在顶管建设过程中,会不可避免地近接穿越既有建筑、管线、河道等设施或地形,顶管顶进过程中所带来的扰动可能会导致周边设施或地层应力应变状态发生变化。当大断面矩形顶管下穿河道时,若方案设计或施工方法不当,可能会因工作面失稳、土体切排不均衡、管线偏离及管节渗漏等各种原因引发塌方、透水等安全事故^[1-2]。因此,如何在顶管顶进过程中有效地控制施工所引起的地层沉降及保护工程沿线的安全,已成为城市地下隧道建设中的重要课题之一^[4-5]。

在顶管下穿河道方面,目前国内外已有部分工程实践。龚颖和孔德凡^[1]结合苏州市城北路综合管廊工程,研究了顶管下穿河道施工中的出土、减阻等技术。金鑫^[2]研究了大断面矩形顶管下穿京杭大运河的土体扰动规律,分析了顶管顶进过程中的地表沉降,并提出了相关的扰动控制技术和监测方案。仓乃瑞^[6]基于上海市闵行区某下穿 S20 外环高速的地道工程,分析了矩形顶管法、盾构法和管幕箱涵法下穿软土地层及河道的适用性。王利民^[7]研究了武家岭隧道浅埋段下穿季节性河道的施工技术,采用半明挖暗穿河道的施工方案,减小了基坑开挖规模,缩短了施工周期,有效规避了安全风险。赵刚和薛普

恒^[8]对比了顶管法和围堰法下穿河道的方案,认为河流较宽时采用顶管法经济性明显。同时,由于顶管与盾构的管节结构相对接近,研究也可以对部分盾构下穿河道的工作进行借鉴。彭荣华^[9]以成都某地铁区间下穿河道工程为依托,采用抗浮板加抗拔桩结构进行盾构隧道的辅助抗浮,并分析了盾构隧道穿越过程中的受力情况。陈德国^[10]基于成都地铁 5 号线工程,研究了下穿河道过程中对既有承压隧道的保护方法。

本文依托陆翔路—祁连山路大断面矩形顶管地道工程,对大断面矩形顶管近距离下穿河道抗浮方案进行设计,首先阐述了矩形顶管在施工阶段与使用阶段的抗浮需求,通过对先顶进后抗浮工法和先抗浮后顶进工法进行方案比选,确立了先顶进后抗浮工法的开挖方案,并采用数值分析的方法对比选结果进行验证,最后对施工监测结果进行了分析讨论。

1 工程概况

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,地道全长 850 m。明挖段结构敞开段采用 U 形槽结构,暗埋段采用箱形结构。地道中间区段受 S20 外环高速公路保通要求及顾村公园环境条件限制,暗埋段下穿采用外轮廓尺寸 9.9 m × 8.15 m 矩形顶管施工,单向顶进长度达 445 m,创造大断面矩形顶管工程世界纪录。地道平面图及纵断面图如图 1 所示。

2 抗浮方案设计

暗埋顶管段下穿 S20 外环高速及顾村公园内绿地、河浜,其中 S20 两侧及顾村公园内合计约 340 m

收稿日期: 2023-06-06

作者简介: 周晓舟(1987—),男,博士,工程师,主要从事市政地下工程设计工作。

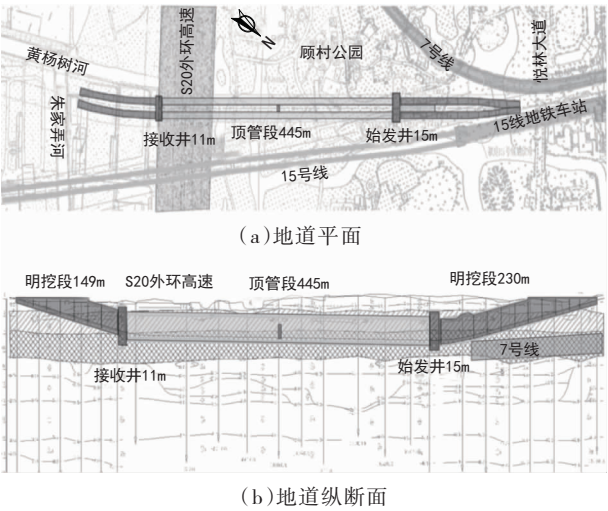


图 1 地道布置方案

长范围内顶板以上覆土较浅，非过河段最小覆土约 2.4 m，过河段覆土最浅处几乎零覆土，无法满足施工期间顶管安全顶进要求，部分过河段覆土无法满足顶管运营期间抗浮要求。因此，顶管顶进阶段需要考虑临时抗浮措施，范围约 340 m；顶管运营阶段需要考虑永久抗浮措施，范围为两处过河段，长约 124 m。

2.1 施工阶段抗浮

下穿河道处及周边属于超浅覆土段，当浅覆土厚度不满足地道施工期间和运营期间结构抗浮要求，顶管施工时，覆土厚度若无法满足其施工安全要求，可将该段回填或部分回填。如回填河道，可待顶管施工后再恢复河道。为满足施工安全要求，对于超浅覆土段，有条件的应加载至覆土 5.5 m，也可满足长期使用抗浮要求。加载区域纵断面如图 2 所示。

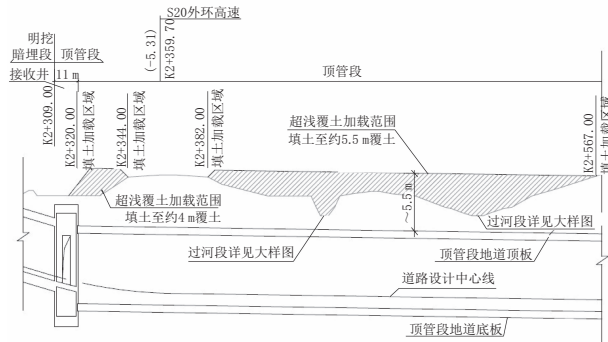


图 2 超浅覆土段加载覆土纵断面

为满足下穿河道段顶管施工要求，需将河道部分回填，采用在地道两侧的河道围堰截流，将围堰区域内的河道覆土回填至 5.5 m 厚并压实，满足顶管施工要求后进行地道顶推施工。围堰及河道回填区域如图 3 所示。

由于顶管施工完成后需恢复河道，为满足顶管过河段的抗浮要求，采用抗浮梁 + 直径 800 mm 抗浮桩的抗浮措施，同时对河床底采用抛石挤淤，增强过

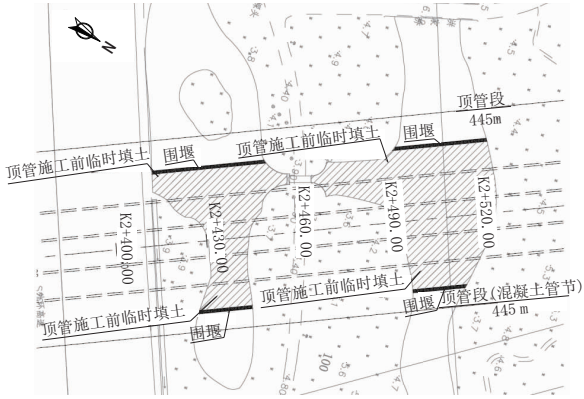


图 3 顶管过河段围堰及河道回填平面

河段顶管地道的整体性和抗浮能力。

2.2 使用阶段抗浮

顶管段地道沿线覆土较深，一般不需要采用抗拔措施。对于部分覆土不足区域，采用填土压实的方式增加该部分区域覆土厚度，以通过抗浮验算。经计算，为满足自重抗浮要求并考虑到长期抗浮的安全系数，覆土应至少为 1.5 m。经验算，抗浮安全系数 K_f 大于 1.05，满足抗浮验算要求。

对于过河段顶管地道，不能采用覆土加载的方式，因此采用抗浮梁 + 抗拔桩的抗浮方式。

顶管过河段横断面及纵断面分别如图 4 和图 5 所示。顶管过河段地道的结构顶板距河床底部约 1.0 m，考虑当地地质条件，采用直径 800 mm 抗拔桩，单根抗拔桩长 22 m，桩间距 4.0 m，在抗浮桩处设置 0.8 m × 0.8 m 抗浮梁，同时采用抛石挤淤对河床基底进行加固，增强抗浮整体性。

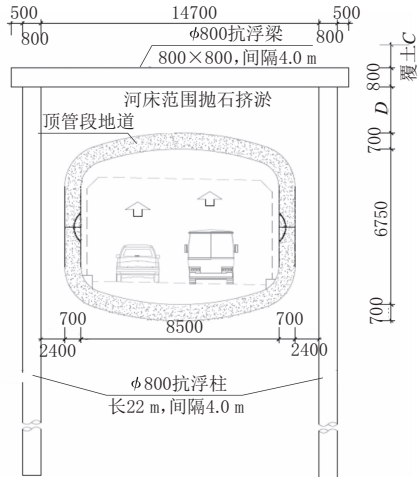


图 4 顶管过河段横断面示意图(单位:mm)

经计算，抗浮安全系数小于 1.05，因此节段自重抗浮不满足设计要求。每 1.5 m 标准节段所需抗拔力 $F_t=1\ 086.9 \times 1.05-1\ 000.8=140.45\text{ kN}$ ，经计算，单根抗拔桩的抗拔承载力至少为 550 kN。抗拔桩每 1.5 m 标准节段可提供 275 kN 抗拔力，考虑抗拔桩后的抗

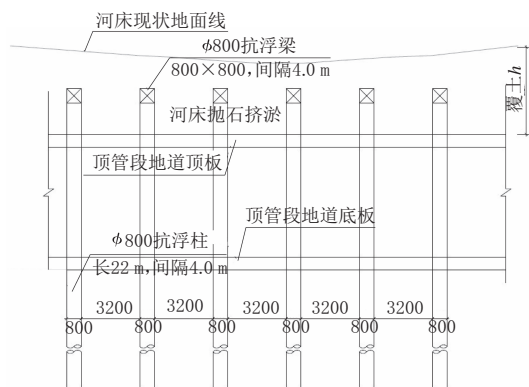


图5 顶管过河段纵断面示意图

浮安全系数为 $1\ 386.5/1\ 086.9=1.27$, 大于 1.05, 满足抗浮要求。

3 开挖工法比选

具体可采用的开挖工法可分为先顶进后抗浮工法和先抗浮后顶进工法。

针对顶管近距离下穿河道抗浮工况, 本文采用 MIDAS GTS 有限元数值分析软件, 分别对先顶进后抗浮和先抗浮后顶进两种不同的施工工法进行模拟。

先顶进后抗浮工法流程如下: (1) 在河底以上填土, 做抗拔桩; (2) 顶管顶进; (3) 顶管内压重, 分段开挖; (4) 做抗浮梁、板; (5) 回填河底覆土。

图 6 显示了先顶进后抗浮工法的计算结果。其中, 图(a)为整体竖向位移, 最大位移量为 28 mm; 图(b)为管片竖向位移, 最大位移量为 21.5 mm; 图(c)和图(d)分别为结构竖向位移和抗拔桩轴力。

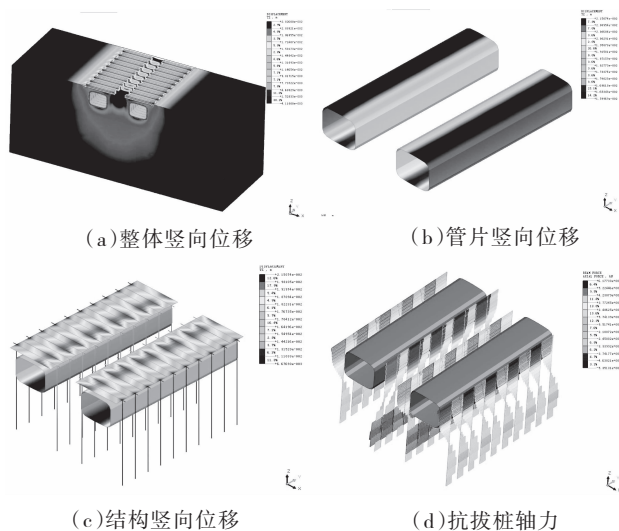


图6 先顶进后抗浮施工计算结果

先抗浮后顶进工法流程如下: (1) 做抗拔桩; (2) 整体开挖, 做抗浮梁、板; (3) 抗浮板以上填土压重; (4) 顶管顶进; (5) 填土开挖至原河底。

图 7 显示了先抗浮后顶进工法的计算结果。其中, 图(a)为整体竖向位移, 最大位移量为 43 mm; 图(b)为管片竖向位移, 最大位移量为 18.8 mm; 图(c)和图(d)分别为结构竖向位移和抗拔桩轴力。

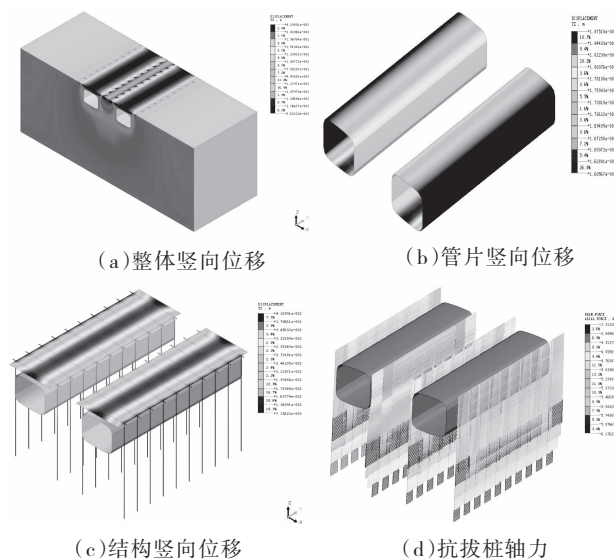


图7 先抗浮后顶进施工计算结果

对比先顶进后抗浮工法与先抗浮后顶进工法, 可以看出两者均整体变形可控。先顶进后抗浮工法管片回弹变形略大, 施工步骤较多。先抗浮后顶进工法抗浮板回弹变形较大, 管片回弹变形略小, 施工步骤较少, 若顶管顶进偏差较大, 则先行实施的抗浮梁板会阻碍顶管顶进。此外, 从力学角度分析, 施工开始均设置了抗拔桩, 由于施工顺序不同, 先顶进后抗浮工法中顶管先于抗浮梁板施工, 故后期施工对管片的扰动会大于土体, 而先抗浮后顶进工法对土体的扰动会大于管片, 这与模拟结果也较为吻合。综合考虑施工安全性、便捷程度与经济效益, 本工程选取先顶进后抗浮工法进行施工。两者对比见表 1。

4 施工监测结果

随着顶管施工的进展, 每间隔 15 个管节布设沉降测点, 顶管工程贯通后采集初始数据。图 8 显示了管节上浮的累积变化。

从顶管沉降的前期发展数据来看, 贯通后一段时间内, 顶管结构整体略有沉降, 约 2.5 mm。后由于隧道全线进行了膨润土固结注浆, 隧道略有上浮后, 开始稳定。可能是由于全线固结注浆压力和上覆荷载的差异, 以及沿线地层条件的不同, 管节上浮的大小略有差异, 最大上浮量约 30 mm。同时, 监测结果中大部分区域的管节上浮量在 20~25 mm 之间, 与数值模拟结果接近, 证明了数值模拟的可靠性。

表 1 开挖工法对比

项目	先顶进后抗浮工法	先抗浮后顶进工法
施工流程	河底以上填土压重→做抗拔桩→顶管顶进→管片内部压重→分段开挖→分段做抗拔梁、板→回填河底覆土	做抗拔桩→整体开挖→做抗浮梁、板→抗浮板以上填土→顶管顶进→填土开挖至原河底
管片最大位移/mm	21.5(竖直向上)	18.8(竖直向上)
土体最大位移/mm	28(竖直向上)	43(竖直向上)
施工工期	一般	长
经济性	好	一般
优缺点	整体变形可控;管片回弹变形略大;施工步骤较多	整体变形可控;抗浮板回弹变形较大,管片回弹变形略小;施工步骤较少;若顶管顶进偏差较大,则先行实施的抗浮梁板会阻碍顶管顶进

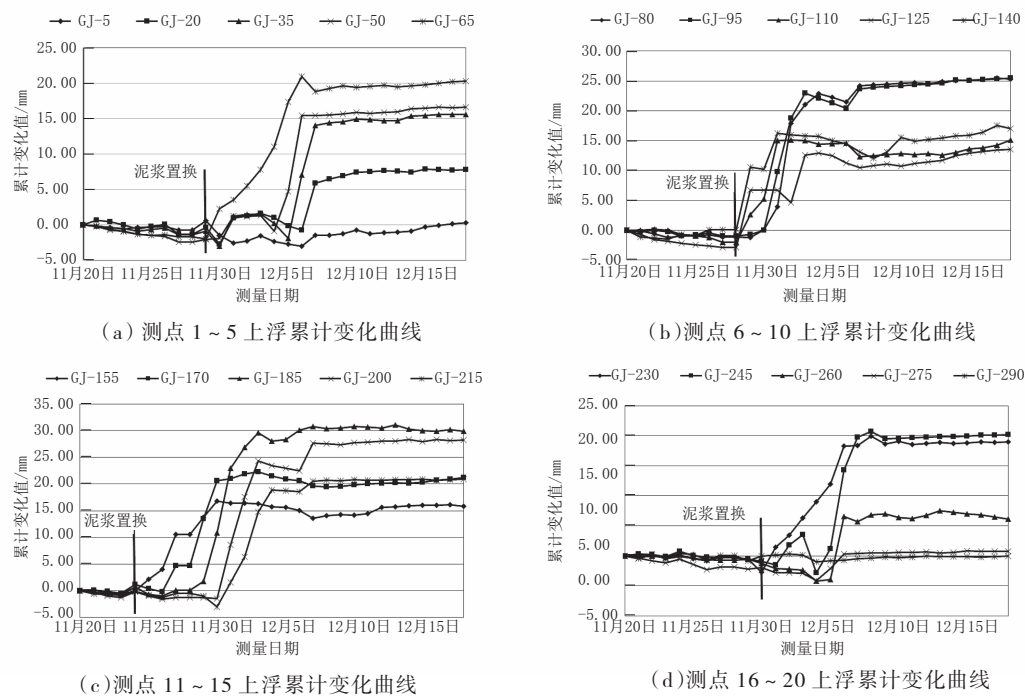


图 8 管节上浮监测累计变化曲线

5 结 论

本研究依托陆翔路—祁连山路大断面矩形顶管地道工程。对大断面矩形顶管近距离下穿河道开挖方案进行设计,首先阐述了矩形顶管在施工阶段与使用阶段的抗浮需求,通过对先顶进后抗浮工法和先抗浮后顶进工法进行方案比选,确立了先顶进后抗浮工法的开挖方案,并采用数值分析的方法对比选结果进行验证,最后对施工监测结果进行了分析讨论。主要结论如下:

(1)顶管下穿河道时,若覆土厚度无法满足其施工安全要求,可将该段回填或部分回填,待顶管施工后再恢复河道。在施工完成后,可采用抗浮梁+抗浮桩的抗浮措施,同时对河床底采用抛石挤淤,增强过河段顶管地道的整体性和抗浮能力。

(2)先顶进后抗浮工法与先抗浮后顶进工法均整

体变形可控,先顶进后抗浮工法管片回弹变形略大,施工步骤较多。先抗浮后顶进工法抗浮板回弹变形较大,管片回弹变形略小,施工步骤较少,若顶管顶进偏差较大,则先行实施的抗浮梁板会阻碍顶管顶进。

(3)采用数值模拟和监测数据对顶管下穿河道抗浮方案可靠性进行验证,管节最大上浮量监测结果约 30 mm,与数值模拟结果接近,证明了数值模拟结果的可靠性,工程开挖方案可为类似工程提供参考。

参考文献:

[1] 龚颖,孔德凡.大截面矩形顶管下穿河道施工技术[J].施工技术,2018(A4):1331-1334.

[2] 金鑫.大断面矩形顶管下穿京杭大运河土体扰动规律及控制技术[D].徐州:中国矿业大学,2020.

[3] 杨勇,尹桂平,王超.顶管下穿堤防抗滑桩清除补偿加固方案[J].城市道桥与防洪,2020(11):138-139.

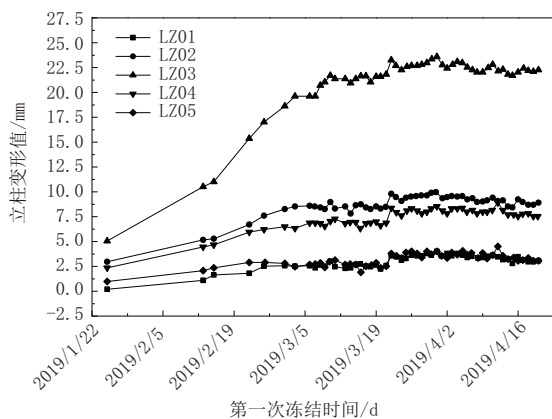


图 12 立柱沉降

隧道下穿 10 号线上部运营车站冻结法施工项目,进行了冻结施工过程的完整监测,同时对温度与沉降指标进行对比分析,总结分析了采用冻结法施工的关键温度参数的变化过程。

(2)通过分析冻结施工过程中冻结温度与时间的历时变化曲线可知:积极冻结期间,冻结温度前期较后期下降速率较快,内圈测温孔的温度较外围测温孔低。冻结 30 d,土体初步形成冻结壁。

(3)通过分析冻结施工过程中冻胀变形与冻结时间的变化曲线可知:积极冻结期间,道床、立柱与侧墙均产生地表沉降。0~15 d 内,沉降值均在 2 mm 之内,冻结 30 d,道床沉降与立柱沉降较为明显,沉降值分别达到 10 mm 与 22 mm。冻结至 50 d 时,降温速度减缓,结构沉降变形趋于稳定。

参考文献:

- [1] 赵鹏.浅埋暗挖隧道上穿既有盾构变形控制研究[J].铁道建筑技术, 2021(11):137-141.
- [2] 朱国斌.软土地区近接工程对隧道的安全影响分析[J].交通世界, 2021(26):163-164.
- [3] 张珣.盾构近接施工对既有构筑物的影响[J].铁道建筑, 2021, 61(4): 71-74, 106.
- [4] 刘士波.盾构邻近既有隧道施工控制技术及影响分析[J].山西建筑, 2021, 47(7):139-142.
- [5] 王婷.既有盾构隧道受近接上穿地下通道施工影响研究[D].石家庄:河北地质大学, 2020.
- [6] 余双池.明挖隧道近接施工对既有地铁隧道的变形控制研究[D].重庆:重庆交通大学, 2020.
- [7] 尚明源.既有隧道近接施工安全影响分析[J].四川水泥, 2020(5): 301.
- [8] 鲁茜茜, 蹇蕴奇, 王先明.软硬不均地层盾构下穿既有隧道近接施工影响特性研究[J].四川建筑, 2019, 39(6):161-164.
- [9] 李方政, 方亮文, 王磊, 丁航.近接隧道冻结对运营车站冻胀变形控制研究[J].土木工程学报, 2020, 53(增刊 1):292-299.
- [10] 王磊, 李方政, 方亮文, 等.-18℃盐水冻结隧道近接下穿上覆结构冻胀规律试验研究[J].隧道建设(中英文), 2020, 40(9):1307-1313.
- [11] 龙道选, 王凯, 何红员, 等.饱和粉砂地层中联络通道冻结法在水流-盐分共同作用下的施工监测方法[J].隧道与地下工程灾害防治, 2022, 4(3):107-114.
- [12] 冶林茂, 杨海鹰, 许蓬蓬.河南土壤冻融过程与土壤水分的变化探讨[C]//第 28 届中国气象学会年会——S11 气象与现代农业.中国气象学会, 2011:6.
- [13] 牛江宇.人工冻结黏土特性试验研究[D].淮南:安徽理工大学, 2015.
- [14] 洪荣宝.地铁隧道水平冻结法施工期地层三维融沉变形规律研究[D].淮南:安徽理工大学, 2023.

(上接第 193 页)

- [4] 杨洋.大直径电力顶管隧道下穿既有高铁桩基础的影响研究[D].郑州:郑州大学, 2020.
- [5] 宋艺.地铁区间隧道浅覆土下穿水库方案设计[J].铁道标准设计, 2017, 61(10):112-117, 124.
- [6] 仓乃瑞.软土地层中地道下穿工法适用性分析[J].城市道桥与防洪, 2019(6):189-193.
- [7] 王利民.浅埋隧道下穿季节性河道施工技术研究[J].施工技术, 2018

(S1):758-760.

- [8] 赵刚, 薛普恒.综合管廊下穿某河流方案研究[J].建筑技术开发, 2019, 46(5):106-107.
- [9] 彭荣华.地铁盾构隧道浅覆土下穿河道方案设计[J].低温建筑技术, 2019, 41(1):109-113.
- [10] 陈德国.盾构近距离下穿河底大直径承压管道施工关键技术[J].铁道建筑技术, 2018(3):102-106.