

深厚软土区基坑施工对临近地铁隧道影响分析

熊永华,裴启涛,程文婕,杨兴阅

(武汉市政工程设计研究院有限责任公司,湖北 武汉 430023)

摘要:针对深厚淤泥质软土地区、高承压水等不利条件下的基坑开挖对临近运营地铁隧道结构影响问题,以临近武汉地铁2号线某综合管廊基坑施工为背景,构建了三维数值分析模型,系统分析了基坑施工对自身围护结构变形、地铁隧道结构位移及受力的影响。研究表明:基坑开挖引起的围护结构水平向、竖向最大位移值分别为11.5 mm、1.44 mm,地铁隧道结构最大水平向、竖向位移分别为0.42 mm、0.21 mm,盾构管片最大轴力、剪力及弯矩分别为1 479.65 kN/m、48.38 kN/m、109.77 kN·m/m,数值分析结果均在规范限值以内。研究成果可为类似基坑施工对临近建筑物安全风险评估提供借鉴。

关键词:深厚软土区;基坑施工;地铁隧道;围护结构;数值分析

中图分类号: TU457

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)07-0160-05

0 引言

随着城市化建设进程的加快和既有用地资源的不断减少,地下空间资源的合理利用与开发已成为各大城市缓解公共交通压力、解决用地紧缺问题的主要途径^[1-2]。地铁作为城市地下与地上的高密度、高运量的轨道交通工具之一,在改善交通、方便人们出行等方面发挥了巨大作用。工程实践表明^[3-5],对于临近现状地铁构筑物的深基坑施工,施工过程中会产生一定的土层卸荷扰动效应,继而改变了周围土体的位移场和应力场,引起应力重分布现象,从而对既有地铁构筑物产生诸如局部变形、应力集中现象,若不加以控制会严重影响地铁的正常运营,甚至引发交通安全事故。因此,对于临近地铁的基坑施工,较为全面地评价基坑开挖对地铁安全性影响具有重要的意义。

目前,国内外许多学者从不同角度出發,对基坑施工对既有运营地铁的主控因素、地铁结构变形与受力特征、施工工法及应对措施等方面进行了大量的研究。比较有代表性的如:高超等^[6]将基坑开挖对既有地铁结构的影响因素归咎为桩基施工、基坑降水、基坑开挖和主体结构施工等部分;王飞^[7]以几十个基坑工程为背景,采用数量化理论Ⅲ分析了不同影响因素对地铁基坑变形的影响程度,确定了控制

地铁基坑变形的主导因素及各影响因素间的耦合程度,并对基坑变形进行预测;臧延伟^[8]通过建立地铁车站基坑开挖有限元模型,分析了不同软土层厚度和基坑宽度对基坑围护结构水平变形、基坑隆起变形和基坑外地表沉降的影响;张兵兵等^[9]采用有限元数值模拟手段,系统分析了深基坑施工对地表沉降、隧道结构受力变形、轨道变形等影响。

本工程地质条件较差,淤泥质软土较为深厚,承压水头较高,基坑距离既有地铁最小水平距离不足10 m,基坑施工对地铁结构影响及安全危害极大。鉴于此,本文采用MIDAS/GTS NX大型商业软件构建了有限元计算模型,并利用修正的Mohr-Coulomb本构模型,系统分析了基坑施工对围护结构变形、地铁结构位移及受力的影响,并根据研究结果提出了基坑施工安全的针对性控制措施。

1 工程概况

1.1 工程简介

武汉轨道交通2号线是我国第一条穿越长江的地铁,素有“武汉市黄金地铁线”的美誉,是现今国内埋深最大的地铁,地铁结构距离长江底部约16~47 m。区间隧道采用盾构法施工,采用单层装配式钢筋混凝土管片,盾构衬砌管片内径、外径分别为5.4 m和6 m,厚度为0.3 m,环宽为1.5 m,环间错缝拼装,混凝土强度等级为C50、抗渗等级为P10。

拟建综合管廊工程位于武汉市江汉区,东起青年路,与现状水利路管廊相接,西止于商务东路,综合管廊基坑相应地铁范围内的隧道上覆土层厚度约

收稿日期:2023-04-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51609018)

作者简介:熊永华(1981—),男,硕士,高级工程师,从事地下空间结构和岩土的设计研究工作。

13.2 m。场地地势有一定的起伏,部分地段高差较大,勘探点地面标高在 20.13~26.07 m 之间,场地沿线分布有现状道路、街道、荒地、施工工地、拆迁区及现状桥梁等,周边环境较复杂。综合管廊基坑与运营地铁隧道相对位置关系平面图及剖面图分别见图 1、图 2。

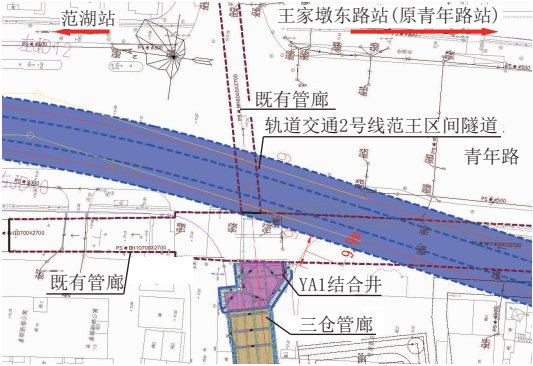


图 1 综合管廊基坑与运营地铁隧道之间的平面位置关系

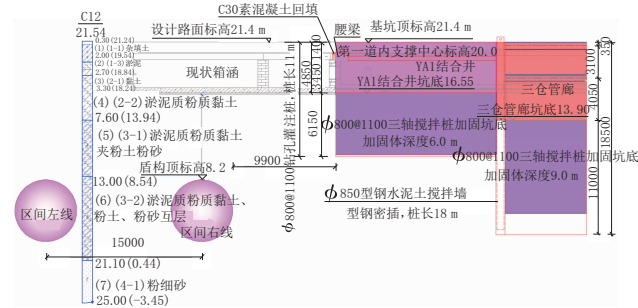


图 2 综合管廊基坑与地铁剖面位置关系(单位:mm)

拟建综合管廊基坑开挖深度为 4.85~7.5 m,距离区间隧道最小水平净距为 9.91m,综合采用围护桩+内支撑+坑底加固的支护形式。具体如下:

(1)对于临近地铁侧 YA1 结合井段基坑,围护桩采用双侧 $\phi 800@1100$ 灌注桩,灌注桩长 11 m;钢筋混凝土支撑尺寸 600 mm $\times$ 700 mm,支撑作用于 1200 mm $\times$ 800 mm 冠梁上;基底采用 $\phi 650@450$ 三轴搅拌桩加固坑底,加固体深 6.0 m;灌注桩外侧采用 $\phi 650@450$ 双轴水泥土搅拌桩止水挡淤,桩长 7 m。YA1 结合井基坑围护结构剖面见图 3。

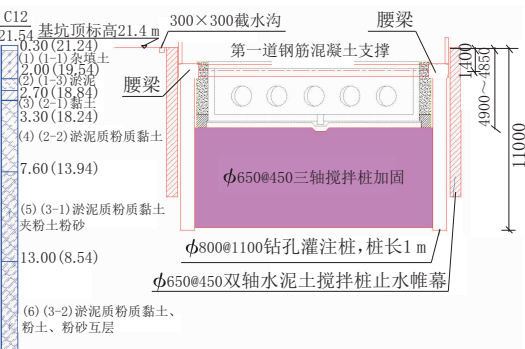


图 3 YA1 结合井基坑围护结构剖面图(单位:mm)

(2)对于临近地铁侧三仓管廊基坑,围护桩采用 $\phi 850$ 型钢水泥土搅拌墙,型钢密插,型钢长为 18 m;第一道内支撑为 600 mm $\times$ 700 mm 混凝土支撑,支撑作用于 1 200 mm $\times$ 800 mm 冠梁上,第二道支撑为 $\phi 609$ 、 $t=16$ mm 钢管撑;基坑底部采用 $\phi 650@450$ 搅拌桩加固兼封底止水,搅拌桩封底深度为 9 m。三仓管廊基坑围护结构剖面见图 4。

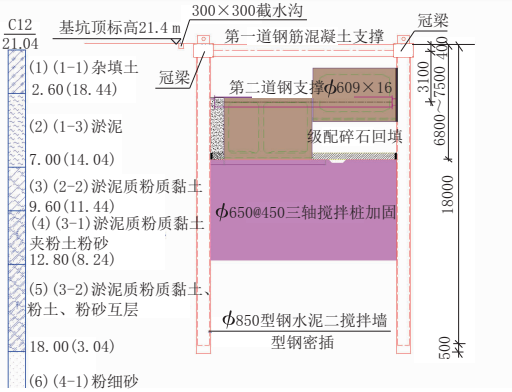


图 4 三仓管廊基坑围护结构剖面图(单位:mm)

1.2 工程地质及水文地质条件

根据勘察资料,地貌单元属长江冲积一级阶地。场地出露 4 类地层:(1)层为填土(Q^m)、淤泥层(Q^1);(2)层为第四系全新统冲积(Q_4^{al})黏性土层、淤泥质粉质黏土层;(3)层为第四系全新统冲积(Q_4^{al})粉质黏土夹粉土、粉砂及互层;(4)层为第四系全新统冲积(Q_4^{al})砂土层。

地下水类型主要为上层滞水、孔隙承压水。上层滞水赋存于(1)填土中,水位在地面下 0.5~1.3 m 之间,稳定水位在地面以下 1.10~1.50 m 之间,相当于标高 21.88~22.58 m。承压水赋存于底部(3)层黏性土、砂土过渡层及(4)层砂层中,水量较丰富;承压水头标高为 17.4 m,标高约 17~21 m。

2 三维模型建立

2.1 模型的构建及计算参数

本模型计算范围为长约 190 m,宽约 80 m,土层计算深度为 40 m。土体材料为理想弹塑性材料,采用修正的 Mohr-Coulomb 本构模型、实体单元模拟。模型中包含了既有地铁隧道结构、基坑围护结构和内支撑结构。对于冠梁和内支撑采用梁单元进行模拟,对于隧道衬砌、管廊、箱涵均采用板单元分析,灌注桩、钢板桩、SMW 桩基于刚度等效原理将其换算成一定厚度的板单元,本构模型均为弹性本构。

模型中,共划分六面体单元数为 8 174,节点数为 16 644。有限元数值分析模型,见图 5,基坑与地

铁结构空间位置关系见图 6,地层物理力学参数见表 1。结构参数见表 2。

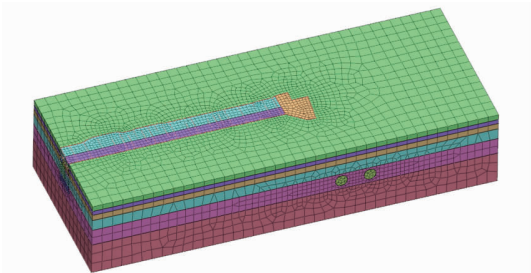


图 5 有限元数值分析模型

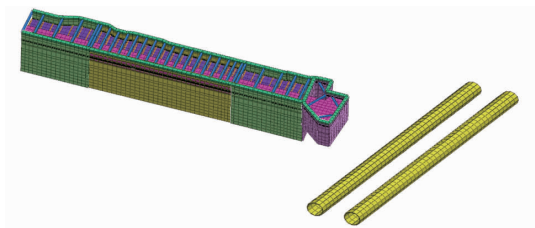


图 6 基坑与地铁隧道结构相对位置

表 1 地层物理力学参数取值^[10]

地层编号及岩土名称	天然容重 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	φ	$E_{\text{sed}}^{\text{ref}}/\text{kPa}$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{kPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	渗透系数 $K_v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
(1-1)杂填土	19	8	18	5 000	5 000	15 000	8.00E-06
(1-3)淤泥	17	10	4	2 400	2 400	7 200	6.00E-08
(2-2)淤泥质粉质黏土	17.7	14	5	3 200	3 200	9 600	5.00E-08
(3-1)淤泥质粉质黏土夹粉土粉砂	17.5	13	8	3 800	3 800	11 400	2.00E-05
(3-2) 淤泥质粉质黏土、粉土及粉砂互层	17.8	9	16	7 000	7 000	21 000	2.00E-05
(4-1)粉砂	19	0	31	16 000	16 000	48 000	2.00E-04

2.2 计算分析工况

本次分析主要是分析基坑施工对运营地铁隧道结构的影响以及基坑围护结构的变形特征,根据周边环境 and 基坑施工步骤,共划分 13 个施工工况,见表 3。

3 计算结果分析

3.1 基坑支护结构变形

计算结果表明,随着基坑的下挖施工,基坑支护结构变形逐渐变大。图 7 为开挖至基坑底工况下的围护结构变形情况。由图可知,开挖至基坑底部时,邻近地铁侧基坑支护结构水平方向、竖向最大位移值分别为 11.5 mm、1.44 mm,该值小于《基坑工程技术规程》规定的基坑支护工程水平位移控制值(30 mm)、竖向位移控制值(20 mm),满足规范要求。

3.2 基坑施工对地铁结构影响分析

3.2.1 地铁结构位移计算分析

图 8 给出了基坑不同施工工况下的地铁隧道结

表 2 结构物理力学参数表

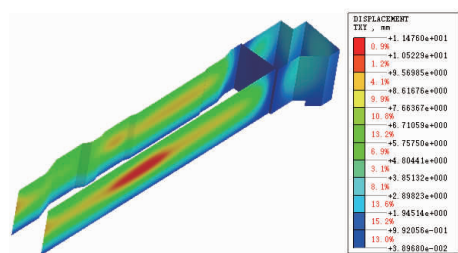
结构	类型	厚度 d/m	容重 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	E/GPa	泊松比
灌注桩	板	0.768	23	30	0.2
工法桩	板	0.273	25	200	0.2
钢板桩	板	0.2	78	200	0.2
冠梁	梁	1.2×0.8	25	30	0.2
管片	梁	0.35	25	34.5	0.2
箱涵	板	0.3	25	30	0.2
管廊	板	0.4	25	30	0.2

在计算中,仅考虑边坡自重作用,暂不考虑构造应力。此外,鉴于本工程上层滞水水量较小,基本忽略不计,而孔隙承压水水量较丰富,本次模型中考虑了承压水的影响,承压水头按最不利工况取,即水头标高 21 m。

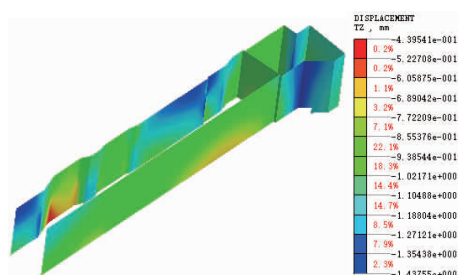
表 3 基坑施工工况

序号	工况	描述
1	初始渗流状态	激活所有地层
2	初始应力状态	考虑未开挖状态的岩土层应力状态
3	区间隧道施工	激活结构单元,钝化土体
4	位移清零	
5	坑底加固兼封底止水	激活坑底加固单元
6	围护结构施工	激活围护桩板单元
7	基坑开挖至第一道支撑底 0.5 m。	钝化土体单元,模拟开挖过程
8	第一道内支撑施工	激活内支撑单元
9	基坑开挖至 -4.85 m	钝化土体,模拟开挖过程
10	第二道内支撑施工	激活内支撑单元
11	基坑开挖至 -7.45 m	钝化土体,模拟开挖过程
12	三舱管廊底板施工/YA1 结合井底部回填	施工管廊结构底板,模拟底部结构施工过程
13	拆除支撑,施工管廊及回填	拆除支撑,激活剩余结构单元,模拟管廊施工及回填过程

构位移计算结果,图 9 给出了开挖至基坑底工况下的地铁隧道结构变形计算结果。由图可知,随着基坑



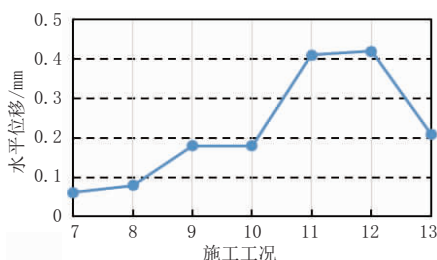
(a)水平方向位移



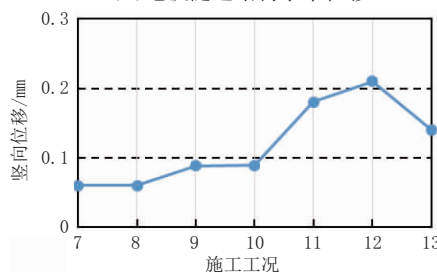
(b)竖向位移

图7 开挖至基坑底工况下的围护结构变形

的逐步开挖和支撑结构的实施,基坑土体变形方向均指向基坑内侧,地铁隧道结构靠近基坑侧的土体变形逐步增大,且以水平向变形为主,竖向位移较小。此外,地铁隧道结构水平方向变形和竖向变形呈现台阶状的变化特征。



(a)地铁隧道结构水平位移

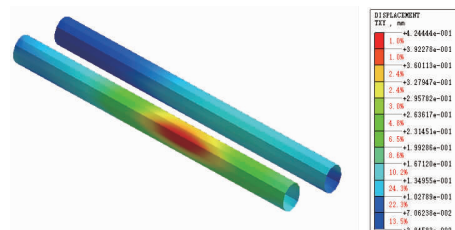


(b)地铁隧道结构竖向位移

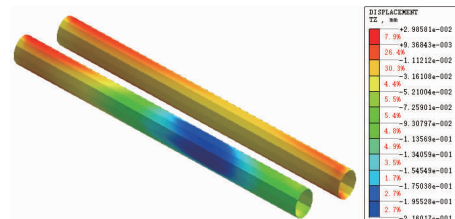
图8 基坑不同施工工序下地铁隧道结构变形特征
具体而言,地铁隧道结构变形特征如下:

(1)当基坑开挖至第一道支撑底0.5 m(工况7)及第一道内支撑施工(工况8)时,地铁隧道结构最大水平位移、竖向位移分别为0.08 mm、0.06 mm。

(2)当基坑继续开挖至-4.85 m(工况9)及第二道内支撑施工(工况10)时,地铁隧道结构最大水平位移、竖向位移分别增至0.18 mm、0.089 mm,这主要是由于基坑施工产生的土体卸荷效应,引起坑底



(a)水平方向位移



(b)竖向位移

图9 开挖至基坑底工况下的地铁隧道结构变形

土体的回弹及邻近土体的变形,进而影响地铁隧道周边土体的应力状态,导致其变形进一步增大。

(3)当基坑继续开挖至-7.45 m(工况11)及管廊、YA1结合井底部回填施工(工况12)时,地铁隧道结构最大水平位移、竖向位移分别增至0.42 mm、0.21 mm,可见,基坑开挖导致卸荷变形进一步增加。

(4)当结构底板施工完毕后,拆除内支撑、继续施工管廊侧墙、顶板结构及地表回填(工况13),地铁隧道结构最大水平位移、竖向位移分别减小至0.21 mm、0.14 mm,这主要是由于管廊结构侧壁施工及回填压实作用,使得地铁隧道结构变形收敛,并趋于稳定。

综上,本项目基坑施工对地铁结构的最大水平位移值约0.42 mm,远小于《城市轨道交通结构安全保护技术规范》规定的10 mm标准,基坑支护方案及分析结果满足规范要求。

3.2.2 地铁结构内力计算分析

图10给出了基坑开挖至底部工况下的地铁隧道结构轴力、弯矩及剪力图。通过对不同工况下基坑开挖引起的地铁隧道结构受力特征进行分析可知,随着基坑的逐步开挖和支撑结构的实施,地铁隧道结构受力逐步增大。当基坑开挖到设计标高时对地铁区间结构的影响最大,管片轴力最大值为1 479.65 kN/m,剪力最大值为48.38 kN/m,弯矩最大值为109.77 kN·m/m。

根据设计要求,本段盾构隧道管片配筋采用V型,环向主筋外侧配筋为12Φ22(4 562 mm²),内侧配筋为10Φ28(6 158 mm²),正常使用状态设计弯矩145.5 kN·m/m,承载能力极限状态设计弯矩

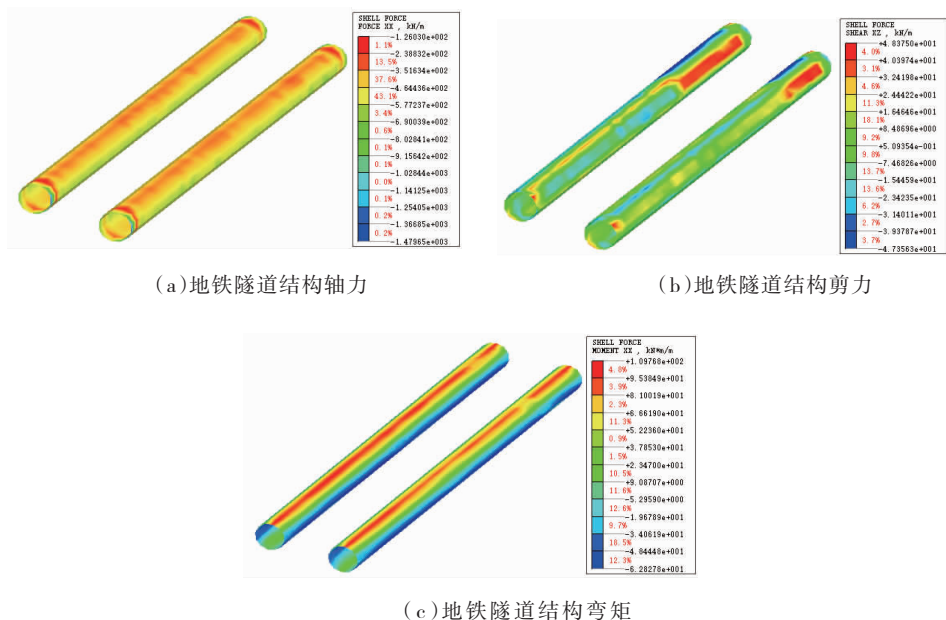


图10 开挖至基坑底工况下的地铁隧道结构受力

207.1 kN·m/m。可见,本项目管片最大弯矩小于设计弯矩,管片受力合理,管片配筋满足受力要求。

4 结 语

(1)本工程软土深厚,周边环境较复杂,地下水丰富,地质条件较差,地貌单元属长江冲积一级阶地,综合采用围护桩+内支撑+坑底加固的支护形式,有效控制了基坑施工对既有地铁的不利影响。

(2)计算表明:邻近地铁侧围护结构水平向、竖向最大位移分别为11.5 mm、1.44 mm,基坑开挖引起地铁结构最大水平、竖向位移分别为0.42 mm、0.21 mm,管片最大轴力、剪力及弯矩分别为1 479.65 kN/m、48.38 kN/m、109.77 kN·m/m,均在规范限值内,即在正常施工条件下,基坑支护方案可行。

(3)鉴于本项目场地存在深厚的承压含水层且渗透系数大,基坑设计综合采用悬挂式止水帷幕结合封底止水技术,建议施工前应进行试桩,确定合理水灰比,严格控制水泥土搅拌桩的搭接宽度和成桩质量,确保封底质量和止水效果;基坑施工期间,应加强对基坑自身以及地铁隧道结构实时监测,采用信

息化施工,确保地铁结构的稳定与运营安全。

参考文献:

- [1] 刘国彬,王卫东.基坑工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [2] 于清平,陈志健.基坑施工对邻近运营地铁结构的影响分析[J].现代隧道技术,2022,59(S1):502-508.
- [3] 刘波,范雪辉,王园园,等.基坑开挖对临近既有地铁隧道的影响研究进展[J].岩土工程学报,2021,43(S2):253-258.
- [4] 赵春伟.基坑开挖对临近或下卧既有隧道的影响及研究进展[J].中国新技术新产品,2017(14):82-83.
- [5] 王涛,余建民.基坑开挖对邻近既有下穿顶管隧道的变形影响分析[J].水利与建筑工程学报,2019,17(6):200-204.
- [6] 高超,陈涛,翟超,等.建筑工程施工对临近地铁安全性影响因素分析[J].水利与建筑工程学报,2018,16(3):77-80,125.
- [7] 王飞.基于数量化理论Ⅲ的地铁深基坑变形影响因素分析[J].长江科学院院报,2019,36(11):110-114.
- [8] 臧延伟.软土层厚度和基坑宽度对地铁车站基坑变形的影响[J].城市轨道交通研究,2022,25(9):105-110.
- [9] 张兵兵,卢伟晓,李为腾.基坑开挖对临近既有地铁隧道影响分析[J].科学技术与工程,2020,20(35):14673-14680.
- [10] 武汉市勘察设计有限公司.武汉中央商务区水利路综合管廊及道路排水工程岩土勘察报告(详细勘察阶段)[R].武汉:武汉市勘察设计有限公司,2018.

(上接第147页)

- 112-116.
- [3] 孔松,秦福军,沈良,等.平原河网地区排水管网提质增效案例分析与探讨[J].给水排水,2022(4):102-106.
- [4] 郭翔.CCTV管道检测在扬州污水提质增效行动中的应用[J].中国给水排水,2020(10):67-70,76.
- [5] CJJ 8—2009,城镇排水管道维护安全技术规程[S].
- [6] 何人杰,吴林安,董鲁燕,等.污水管网在线流量监测技术在无锡市

- 的应用[J].环境工程,2011(10):123-126.
- [7] 吕永鹏.城镇污水处理提质增效“十步法”研究与应用[J].中国给水排水,2020(5):82-88.
- [8] 齐利华,祖士卿,马骥.珠海市某区域污水管网CCTV检测结果与建议[J].中国给水排水,2017(11):135-138.
- [9] 沈小华,齐国辅,耿宏,等.管网异常(水质浓度低)排查技术路线和案例分析[J].中国给水排水,2021(2):97-100.