

新建污水管拖拉管施工对邻近地铁隧道影响的工程实例简析

华琦, 赖小勇, 李慧慧

(杭州市勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘要: 市政排污工程中, 当污水管道需要穿越隧道等结构物且难以采用明挖施工时, 往往采用非开挖定向钻拖拉管技术。与明挖法相比, 水平定向钻(拖拉管)是一种非开挖技术, 采用这种技术进行管道铺设能更好地减小对地下结构及现状道路交通的影响, 同时能够缩短工期, 节约造价, 具有较多的优点, 但遇到穿越既有结构物时, 施工过程中应控制好钻进轨迹, 保证管底与地铁隧道顶的净距。本文以某穿越杭州地铁1号线市政排污工程为例, 通过有限元软件 Midas GTS NX 建立三维模型进行数值模拟, 分析水平定向钻(拖拉管)施工对邻近既有地铁隧道的影响, 并结合施工实测数据验证了数值分析的有效性, 通过对比可以看出采用水平定向钻(拖拉管)方法施工的地铁隧道最终实测变形值较小, 可供类似工程参考。

关键词: 市政排污工程; 拖拉管; 地铁隧道; 数值模拟; 监测数据

中图分类号: TU94

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)S1-0034-06

Case study on impact of dragging pipe construction of new sewage pipe on adjacent subway tunnels

HUA Qi, LAI Xiao-yong, LI Hui-hui

(Hangzhou Geotechnical Engineering and Surveying Research Institute with Limited Liability, Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

Abstract: Trenchless directional drilling and dragging pipe technology is often used in municipal sewage engineering, when sewage pipes need to pass through tunnels and other structures and it is difficult to use open-cut construction. Compared with open-cut method, the horizontal directional drilling (dragging pipe) is a kind of trenchless technology and able to reduce the impact on the underground structure and the current situation of road traffic. It has the advantages of short construction period and cost saving. When passing through the structure the construction process should be well controlled to ensure the clear distance between the bottom of the tube and the roof of the subway tunnel. Taking a municipal sewage project that crosses Hangzhou Metro Line 1 as an example, this paper uses finite element software Midas GTS NX to establish a three-dimensional model for numerical simulation, and analyzes the influence of horizontal directional drilling (dragging pipe) construction on adjacent existing subway tunnels. Combined with the construction measured data, the validity of the numerical analysis is verified. Through comparison, it can be seen that the final measured deformation of subway tunnel is small when horizontal directional drilling (dragging pipe) is used for construction, which can be used as reference for similar projects.

Key words: municipal sewage engineering; dragging pipe; subway tunnel; numerical simulation; monitoring data

0 引言

目前城市轨道交通发展迅速, 部分市政工程与地铁结构相邻。新建污水管需横穿现有道路, 如施

工时采用明挖法, 将会长时间阻塞主干道交通, 且对邻近地下构筑物影响较大, 因此为了减小市政工程施工对地上交通及地下结构的影响, 可以采用水平定向钻非开挖(拖拉管)技术对管道进行铺设。

顾清^[1]结合工程实例, 介绍了一种适用于城市道路和交叉口埋设地下管线的非开挖地面且在地下快速铺装管道的定向钻穿越法(拖拉管), 并简单分析了施工过程中存在的一些问题。刘建国等^[2]介绍了拖拉管技术的特点和适用范围, 并分析了其在排水管道工程应用中存在的问题。陈卫^[3]结合某市政工程污水管道施工的实践, 对拖拉管施工方法进行研究, 在此基础上对拖拉管工艺的控制措施、塌孔原因及措施展开分析。吉利军^[4]结合某穿越大桥市政给水工程, 探讨了定向钻进技术的施工要点及其应用优势。米新光等^[5]基于复杂地段某市政道路工程实例, 总结了其施工技术和要点, 并提出可通过选取合理的施工工艺及材料等措施减小对既有地下结构及现状道路交通的影响。总的来说, 目前的研究工作多针对拖拉管的施工工艺及技术难点, 有限元数值分析及后续实测数据的对比研究涉及较少。

本文以杭州市某市政排污工程为例, 利用 Midas GTS NX 有限元软件进行数值建模, 模型参数取值考虑了地基土强度折减、时空效应、拖拉管材料既有变形等诸多问题, 并将模型计算结果与施工监测实测数据进行了对比, 验证了数值分析的有效性, 本项目相关设计及评估经验可以为后续类似工程提供参考。

1 项目简介

1.1 项目概况

牛田路北起九沙里路, 南至九源路, 路线全长约 530 m。本工程雨、污水管根据规划建设, 雨水管需要接入九沙里路、九和路与九源路雨水系统; 污水管从北往南, 横穿规划支路四、九和路, 排至九源路污水系统。该区域内九和路下伏地铁 1 号线, 本项目与地铁 1 号线相对关系见图 1。

根据地铁隧道平面、纵断面, 牛田路、九和路交叉口处, 地铁盾构顶标高约为 -2.5 m, 路面标高约 6.0 m, 地铁盾构顶埋深约 8.5 m。

拖拉管与区间隧道斜交位置处地铁结构外顶标高 -2.5 m (绝对标高), 拖拉管外底标高约 2.6 m (绝对标高), 底埋深 3.4 m, 路面标高约 6.0 m (绝对标高), 与地铁盾构最小竖向净距 5.1 m。

1.2 工程地质条件

根据地质勘察报告, 基坑影响深度范围内土层较为均匀, 主要为填土、砂质粉土、砂质粉土夹粉砂、淤泥质黏土、粉质黏土等。浅部地表除 1.5~2.0 m 厚的填土外, 以下为 2.5 m 厚的黏质粉土、

10.0 m 厚的砂质粉土夹粉砂, 拖拉管穿越杂填土及黏质粉土, 杂填土呈松散状态, 以黏性土夹大量碎块石、碎砖块、水泥块、混凝土块等建筑垃圾为主, 砂质粉土呈稍密状态, 干强度低, 韧性低, 土层物理力学指标参数详见表 1。

单位: m

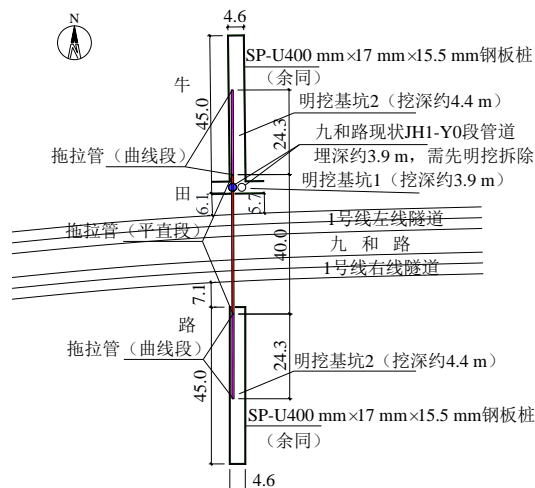


图 1 本工程平面示意图

Fig. 1 Schematic plan of this project

表 1 土层物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical index of soil layer

层号	岩土名称	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	$k_h/(\text{cm}/\text{s})$	$k_v/(\text{cm}/\text{s})$
①	杂填土	(18.0)	(10.0)	(12.0)	—	—
② ₁	黏质粉土	18.7	8.0	23.0	4.98×10^{-5}	3.53×10^{-5}
② ₂	砂质粉土 夹粉砂	19.5	3.0	28.0	—	—
③	淤泥质 黏土	17.4	12.0	9.0	—	—
⑤	粉质黏土	18.1	20.0	13.0	—	—

注: ()内为折减后强度指标。

地下水主要位于浅层的填土和粉土层中, 呈连续分布。表层填土具有连通性和较好的透水性, 而下方的粉土层通常透水性一般, 给水度低。水位埋深在 0.4~1.4 m 之间, 年水位变化约 0.5~1.5 m。

2 拖拉管实施方案

隧道与拖拉管上方后续将新建污水管及雨水管, 其中污水管有一段上穿地铁盾构。管道底绝对标高约 2.6 m, 污水管管径 500 mm, 为钢筋混凝土管, 钢筋混凝土基础底埋深最大约 4.4 m。污水管道上穿地铁及位于 5 m 特别保护区内的部分采用拖拉管施工, 其余段采用钢板桩支护、明挖施工。拖拉管与地铁隧道断面相对位置关系剖面图详见图 2。

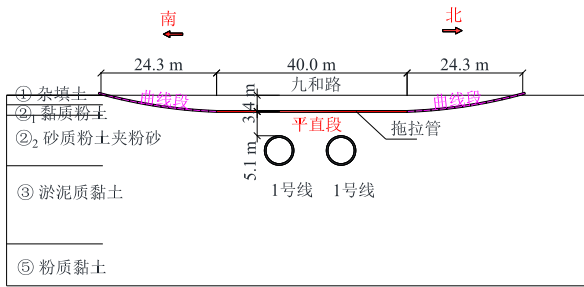


图2 拖拉管与地铁隧道相对位置关系剖面图

Fig. 2 Sectional of the relative position of dragging pipe and subway tunnel

采用 PE100 实壁管 (SDR11) [6], 设计管径 400 mm, 壁厚 36.3 mm, 压力等级 1.6 MPa, 环刚度 16 kN/m², 成孔孔径为 600 mm。拖拉管施工工艺流程图[7] 详见图 3。

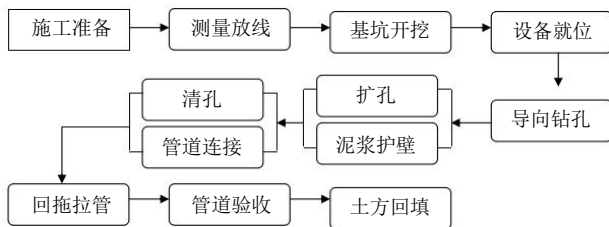


图3 拖拉管施工工艺流程图

Fig. 3 Process flow chart of dragging pipe construction

(1) 钻进轨迹及回拖力确定: 拖拉管施工轨迹曲线图详见图 4。

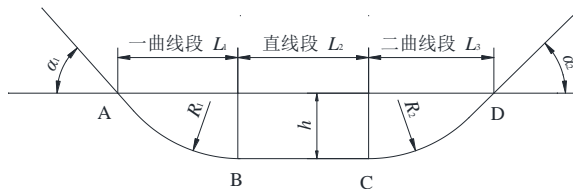


图4 拖拉管施工轨迹曲线图

Fig. 4 Dragging pipe construction track diagram

图中: α_1 为入土角; α_2 为出土角; A 为入土点; D 为出土点; B 为第一曲线段和直线段轨迹变化点; C 为直线段和第二曲线段轨迹变化点; h 为轨迹 (铺管) 深度; $L_1+L_2+L_3$ 为定向钻铺管水平长度。

本工程管道拟采用 PE 实壁管, 管径 DN 为 400 mm, h 为 3 m, R_1 、 R_2 取 250 倍 $DN=250 \times 0.4=100$ m。

则入土角、出土角计算如下:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 2 \arctg \sqrt{\frac{h}{2R_1 - h}} = 2 \arctg \sqrt{\frac{3}{2 \times 100 - 3}} = 14.1^\circ \quad (1)$$

入土角及出土角的范围应设置在 $8^\circ \sim 20^\circ$, 计算所得的出土角和入土角符合要求。

$$L_1 = L_3 = \sqrt{h(2R_1 - h)} = \sqrt{3(2 \times 100 - 3)} = 24.3 \text{ m} \quad (2)$$

$$L_2 = 40 \text{ m} \quad (3)$$

总回拖阻力计算如下:

$$P = P_1 + P_F \quad (4)$$

$$P_1 = \pi D_k^2 R_a / 4 \quad (5)$$

$$P_F = \pi D_o L f_1 \quad (6)$$

$$P = 3.14 \times 0.6^2 \times 900 / 4 + 3.14 \times 0.4 \times 90 \times 8.5 = 1215.18 \text{ kN} \quad (7)$$

式中: P 为总回拖阻力, kN; P_1 为扩孔钻头迎面阻力, kN; P_F 为管外壁周围摩擦阻力, kN; D_k 为扩孔钻头外径, m, 一般取管道外径的 1.2~1.5 倍, 取 0.6 m; D_o 为管节外径, m; R_a 为迎面土挤压力, kN/m², 一般情况下, 黏性土可取 500~600 kN/m², 砂性土可取 800~1000 kN/m², 管道位于砂质粉土夹粉砂, 取 900 kN/m²; L 为回拖管总长度, m; f_1 为管节外壁单位面积的平均摩擦阻力, kN/m², 可按《给水排水管道工程施工及验收规范》(GB 50268—2008) [8] 表 6.3.4-2 中的钢管取值, 7.0~10.0 kN/m² (取 8.5 kN/m²)。

(2) 护孔减阻泥浆的配置

扩孔时采用清水造浆, 并选用预水化钠基膨润土 (3%~5%) 加化学泥浆 (0.2%), PH 值为 6~8 的施工用水进行搅拌。在钻机拖管进洞时, 灌注拌合后的化学泥浆混合液, 将其注入管道和孔壁, 并使其凝固填充。

(3) 地面管道拼接要求

PE 管采用对接热焊, 管道焊接后从钻孔出口沿钻孔方向向远离出口的方向排列。

(4) 定位导向系统设备的选择及施工探测测量技术要求、控制措施

采用无线地下定位系统, 通过导向人的指挥, 及时调整钻头轨迹, 保证钻头沿着设计轨迹前进, 不要偏离。

为保证污水管道施工满足设计要求, 施工过程中必须进行实时监测和测量复核[9]。

(5) 注浆

为了避免地面沉降, PE 管道拉伸后需要进行注浆加固处理, 全段采用 5:100 水泥浆液 (0.4 MPa)。注浆时的注意事项:

a) 注浆应根据实际情况每隔 3~6 m 灌 1 次, 按照计算注浆量须大于泥浆量, 应尽量不中断注浆

时间。

b) 钢管拖入地面时必须用堵头堵住, 以防浆液顺着花管前端流出^[10]。

c) 拖入地面之前需要将花管的端头堵死, 这样可以确保注浆过程中浆液不会从管道前端流出, 从而保证加固的效果。

3 有限元数值模拟

采用有限元数值软件 Midas GTS NX 建立三维有限元模型, 对拖拉管施工过程中各个阶段的工况涉 1 号线区间隧道变形的影响进行模拟。土体材料本构模型采用土体硬化模型 (HS 模型), 隧道衬砌、围护桩结构等采用弹性材料类型, 板单元模拟。聚乙烯管材料属性设为: 密度 $\rho=950 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量 $E_0=530 \text{ MPa}$, 泊松比 $\mu=0.4$ ^[11]。详见表 2~3。

表 2 土层 HS 模型计算参数
Table 2 HS model parameters

层号	岩土名称	E_{50}/MPa	$E_{\text{ocd}}/\text{MPa}$	E_{ur}/MPa	G_0/MPa	$\gamma_{0.7}$
①	杂填土	(3.00)	(3.00)	(15.00)	(37.50)	2.0×10^{-4}
② ₁	黏质粉土	7.64	7.64	38.20	95.50	2.0×10^{-4}
② ₂	砂质粉土 夹粉砂	10.27	10.27	51.35	78.38	2.0×10^{-4}
③	淤泥质 黏土	2.41	2.41	12.05	30.13	2.0×10^{-4}
⑤	粉质黏土	4.03	4.03	20.15	50.38	2.0×10^{-4}

注: ()内为折减后强度指标。

表 3 结构材料参数
Table 3 Structural material parameters

名称	材料类型	轴向刚度 $EA/$ (kN/m 或 kN)	抗弯刚度 $EI/$ (kN·m ² /m 或 kN·m ²)	泊松比
隧道衬砌	弹性	34.500×10^6	2.880×10^6	0.20
拉森钢板桩	弹性	2.334×10^6	2.900×10^4	—

选取模型长 150 m, 宽 100 m, 高 40 m, 见图 5。在模型侧面施加法向约束, 底面施加完全约束, 顶面自由^[12]。计算得出土体总位移结果见图 6。

3.1 拖拉管结构变形模拟结果

根据 Midas GTS NX 数值模拟结果, 污水管拖拉管施工, 上穿地铁隧道这一工况, 邻地铁侧拖拉管结构的水平位移约 7.2 mm, 见图 7。

3.2 地铁结构变形模拟结果

根据 Midas GTS NX 数值模拟分析结果, 在当

前施工工况之后, 地铁隧道结构的最大水平位移为 0.21 mm, 最大竖向位移为 0.98 mm, 计算结果详见表 4, 位移云图详见图 8~9。

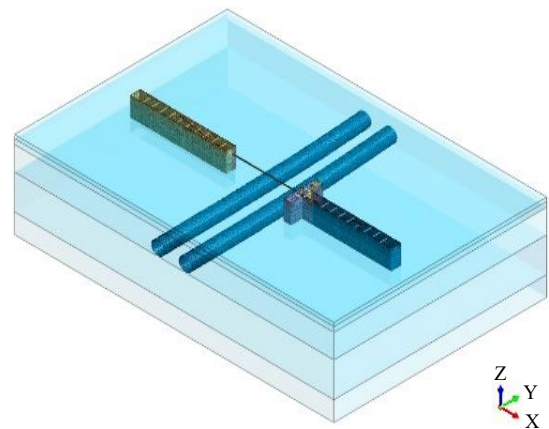


图 5 本工程与地铁相对位置关系图

Fig. 5 Relative position of dragging pipe and tunnel

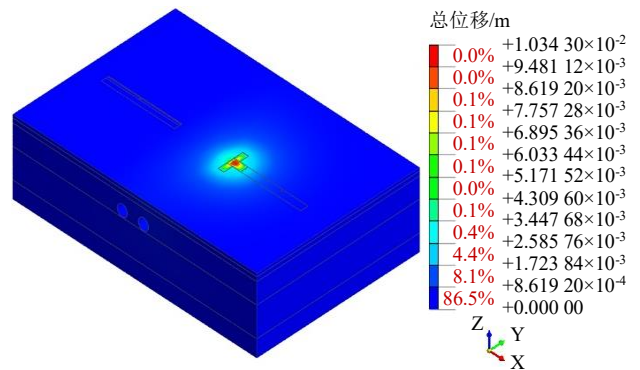


图 6 土体总位移云图

Fig. 6 Total displacement of soil mass

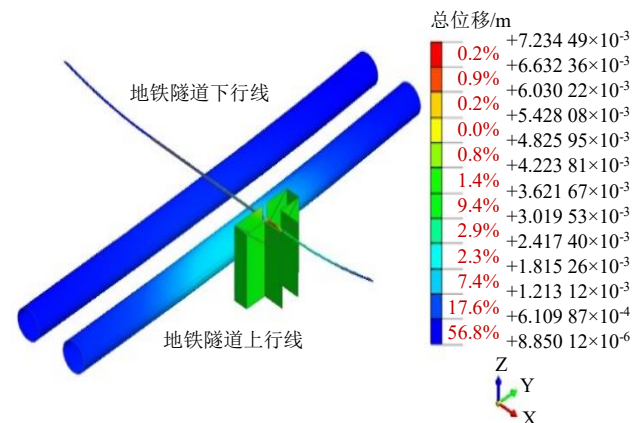


图 7 拖拉管结构总位移云图

Fig. 7 Total displacement nephogram of dragging pipe structure

表 4 地铁结构变形预测值

Table 4 Predicted deformation of subway structure

地铁结构	项目	变形预测值/mm
区间隧道结构	水平位移	+0.21
	竖向位移	+0.98

注: 水平位移中“+”代表向基坑内方向变形; 竖向位移中“+”代表向上隆起, “-”代表向下沉降。

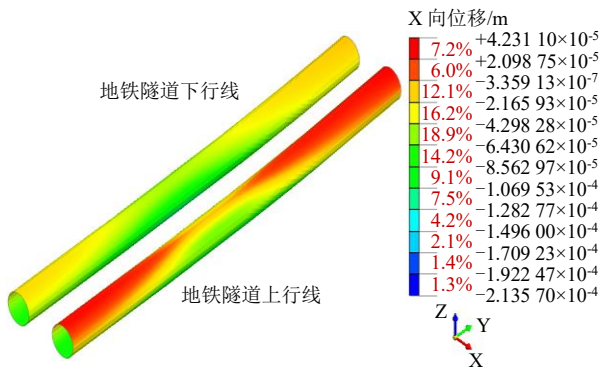


图8 地铁隧道结构水平位移云图

Fig. 8 Horizontal displacement nephogram of subway tunnel structure

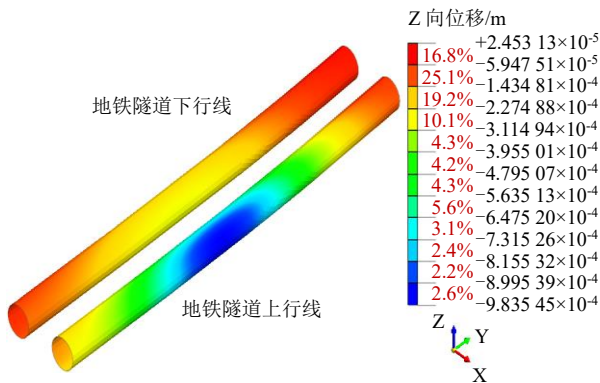


图9 地铁隧道结构竖向位移云图

Fig. 9 Vertical displacement nephogram of subway tunnel structure

4 地铁隧道变形监测数据

本项目拖拉管施工期间地铁隧道各测项累计最大变化量详见表5,其中道床沉降累计最大变化量约0.7 mm,变形趋势以向上隆起为主;水平位移累计最大变化量约0.2 mm,往管线基坑一侧变形;水平收敛累计最大变化量约0.4 mm,表现为扩径。

明挖部分基坑开挖到底时地铁隧道各测项累计最大变化量详见表6,其中道床沉降累计最大变化量约0.9 mm,变形趋势以向下沉降为主;水平位移累计最大变化量约0.8 mm,往管线基坑一侧变形;水平收敛累计最大变化量约1.0 mm,表现为扩径。

经过对比表4和表5的结果,在拖拉管施工工况下,地铁隧道实测变形值与有限元模拟值基本一致。

本项目明挖段管线基坑开挖到底时,地铁隧道最终实测变形值较小,不超过1 mm。

表5 拖拉管施工工况下地铁隧道变形实测数据

Table 5 Measured deformation of subway tunnel under dragging pipe construction

项目	累计最大变化量/mm
区间隧道上行线	
道床沉降	+0.70
水平位移	+0.20
水平收敛	+0.40
隧道轨间高差	+0.60
区间隧道下行线	
道床沉降	+0.60
水平位移	+0.10
水平收敛	+0.20
隧道轨间高差	+0.30

表6 基坑开挖到底时地铁隧道最终变形实测数据

Table 6 Final measured deformation of subway tunnel when foundation pit excavated to the end

项目	累计最大变化量/mm
区间隧道上行线	
道床沉降	-0.50
水平位移	-0.50
水平收敛	+0.30
隧道轨间高差	+0.90
区间隧道下行线	
道床沉降	-0.90
水平位移	+0.80
水平收敛	-1.00
隧道轨间高差	-0.90

5 结论

本文以杭州市某市政排污工程为例,通过Midas GTS NX有限元计算软件建立三维数值模型,分析了拖拉管施工以及管道基坑开挖对邻近地铁隧道的影响,得出以下结论:

(1)本工程新建污水管上跨地铁隧道段采用水平定向钻非开挖(拖拉管)技术进行管道铺设,与明挖法相比,能更好地减小施工对地铁隧道及路面交通的影响。

(2)拖拉管施工时应控制好钻进轨迹,保证管底与地铁隧道顶的净距。

(3)拖拉管施工过程中,水泥浆液起到较大作用,扩孔时有较好的护壁、携砂能力,能够很好地润滑,减少摩擦力和扭矩;PE管拉通后,注浆能很好地避免地面沉降。

(4)数值模拟是一种理想化的分析手段,无法考虑施工因素等方面的影响,实际过程中,拖拉管施工对既有地铁隧道产生的影响受勘察成果质量、

拖拉管设计细部措施、现场施工水平等多方面因素控制。

(5) 拖拉管施工期间地铁隧道实测数据与有限元模拟结果数值接近、趋势相符。明挖段管线基坑呈狭长形, 短边邻近隧道, 空间效应很好, 基坑开挖到底时隧道变形较小。本项目相关设计、评估及施工经验可以为后续类似工程提供参考。

参考文献

- [1] 顾清. 拖拉管管道敷设工艺在过路穿管工程中的应用[J]. 中国市政工程, 2009(2): 38-39, 80.
GU Qing. On dragging pipe laying technology applied in the crossing projects[J]. China Municipal Engineering, 2009(2): 38-39, 80.
- [2] 刘建国, 唐建国. 导向钻(拖拉管)管道敷设工艺在市政工程中的应用[J]. 给水排水, 2004, 30(9): 96-97.
LIU Jian-guo, TANG Jian-guo. Application of guided drill (tractor pipe) pipeline laying technology in municipal engineering[J]. Water & Wastewater Engineering, 2004, 30(9): 96-97.
- [3] 陈卫. 非开挖定向钻拖拉管技术在市政排污工程中的应用[J]. 中外建筑, 2020(2): 177-179.
CHEN Wei. Application of trenchless directional drill pipe technology in municipal sewage engineering[J]. Chinese & Overseas Architecture, 2020(2): 177-179.
- [4] 吉利军. 市政给水工程定向钻进技术及拖拉管施工技术[J]. 智能城市, 2021, 7(2): 163-164.
JI Li-jun. Directional drilling technology and drag pipe construction technology of municipal water supply engineering[J]. Intelligent City, 2021, 7(2): 163-164.
- [5] 米新光, 颜凡新, 肖友. 复杂地段雨水管道拖拉管施工技术[J]. 云南水力发电, 2022, 38(10): 131-135.
MI Xin-guang, YAN Fan-xin, XIAO You. Drag pipe construction technology of municipal pipe in complex area[J]. Yunnan Water Power, 2022, 38(10): 131-135.
- [6] 黄昭强. 大口径HDPE双壁缠绕管在定向钻牵引施工中的应用[J]. 广东建材, 2004(4): 52-54.
HUANG Zhao-qiang. Application of large diameter HDPE double wall winding pipe in directional drilling traction construction[J]. Guangdong Building Materials, 2004(4): 52-54.
- [7] 王慧冬. 浅谈市政给排水工程的非开挖拖拉管施工技术[J]. 城市建设理论研究, 2018, 273(27): 169.
WANG Hui-dong. Discussion on construction technology of trenchless drag pipe in municipal water supply and drainage engineering[J]. Theoretical Research in Urban Construction, 2018, 273(27): 169.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 给水排水管道工程施工及验收规范: GB 50268—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Construction and Acceptance of Water and Sewerage Pipeline Works: GB 50268—2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [9] 王永强. 拖拉管法在市政污水管道施工中的应用[J]. 市政设施管理, 2023, 144(1): 14-16.
WANG Yong-qiang. Application of drag pipe method in municipal sewage pipeline construction[J]. Management of Municipal Facilities, 2023, 144(1): 14-16.
- [10] 瞿洪海, 郑永祥. 复杂施工条件下非开挖拖拉管的施工[J]. 城市道桥与防洪, 2009, 122(9): 125, 130, 234.
QU Hong-hai, ZHENG Yong-xiang. Construction of trenchless drag pipe in complex conditions[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2009, 122(9): 125, 130, 234.
- [11] 李明阳, 戚政武, 姚炯, 等. PE管恒侧压实验及有限元分析[J]. 材料导报, 2015, 29(增刊1): 121-124.
LI Ming-yang, QI Zheng-wu, YAO Jiong, et al. Constant lateral pressure experiments and finite element analysis for PE pipe[J]. Materials Reports, 2015, 29(S1): 121-124.
- [12] 徐良仲, 赖小勇, 李慧慧. 基于已有实测数据的深基坑开挖对邻近地铁车站影响的实例简析[J]. 地基处理, 2021, 3(3): 238-245.
XU Liang-zhong, LAI Xiao-yong, LI Hui-hui. Case study on impact of deep excavation on adjacent subway tunnels based on the existing measured data[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(3): 238-245.