

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.24.027

# 城市下穿立交雨水泵站进水管道路塌陷处置技术

孙元, 万罗为, 沈小红

(杭州市市政设施管理中心, 浙江 杭州 310000)

**摘要:** 以杭州市一座城市下穿立交雨水泵站进水管道路塌陷处置为例,分析了管道塌陷的成因,创造性地提出了半开挖人工盾构套管施工技术,详细介绍了预制装配式混凝土(PC)工法组合钢管桩施工、管棚注浆加固、人工盾构掘进、钢套管安装、新管顶进、原位固化(CIPP)内衬等施工工艺。采用Plaxis有限元分析软件,建立U型槽、泵房、钢板桩、管棚等结构模型,仿真半开挖人工盾构套管施工过程,结合施工动态全过程监测数据,证实该技术安全可靠,对类似工程有一定的借鉴作用。

**关键词:** 城市下穿立交; 管道塌陷; 半开挖人工盾构套管技术; 原位固化; 数值模拟  
**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2020)24-0145-05

## Disposal Technique of Intake Pipe Collapse in Urban Underpass Stormwater Pumping Station

SUN Yuan, WAN Luo-wei, SHEN Xiao-hong

(Hangzhou Municipal Facilities Management Center, Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** Taking the intake pipe collapse disposal in an urban underpass stormwater pumping station of Hangzhou as an example, this paper analyzes the causes of pipe collapse, puts forward the semi-excavated artificial shield casing technology creatively and elaborates the process of composite PC steel pipe pile construction, pipe shed grouting reinforcement, artificial shield tunneling, steel casing installation, new pipe jacking, CIPP lining, etc. Plaxis finite element analysis software was used to establish the structural models of U-shaped groove, pump house, steel sheet pile and pipe shed, etc., to simulate the construction process of semi-excavated artificial shield tunneling. Combined with the dynamic whole-process monitoring data of construction, it was proved that the technology was safe and reliable, which could be used for reference in similar projects.

**Key words:** urban underpass; pipe collapse; semi-excavated artificial shield casing technology; CIPP lining; numerical simulation

下穿式立交因其占地较少、对城市空间和周围环境影响较小的特点,被广泛应用在城市道路与城市道路交叉、城市道路与高速公路交叉、城市道路与铁路交叉中。由于下穿的道路需降低路面标高从而实现立体互通,导致下穿处路面雨水不能自然排入雨水管道,因此需配套建设雨水泵站,收集下穿处路面雨水至泵站提升至市政管网。在雨水泵站运行过程中,因进水管道路施工工艺、所处的地层条件、下穿

道U型槽与泵池不均匀沉降等因素,容易产生管道脱节、沉降、塌陷等病害,造成道路积水,影响车辆行驶安全<sup>[1]</sup>。

### 1 工程概况

紫金港北路下穿立交及雨水泵站建成于2015年12月,位于杭州市西湖区三墩镇,道路自北向南依次下穿金家汇路、宣杭铁路、金蓬街。雨水泵站位于金渡北路与金蓬街交叉口,用于排除下穿区域路

面雨水。2018年12月,养护单位巡查发现,泵站进水管上方出现大面积塌陷,经 CCTV 检测发现该段管道发生严重 V 字形变形,管道局部凹陷长度约 6.6 m,周围泥沙进入管道内部,使下穿区域路面雨水无法有效通过管道进入泵站,影响下穿立交路面雨水排出。由于该进水管埋深约 11 m,且上方敷设有两路高压线,大开挖施工风险大,对电力管线影响大,因此本工程借鉴隧道开挖中采用的管棚、人工盾构等施工工艺,结合套管、CIPP 内衬等非开挖换管处理技术成功完成塌陷管段的处置。

## 2 原因分析

### 2.1 场地条件

根据紫金港路下穿宣杭铁路工程地勘报告,该雨水泵站进水管位于黏质粉土层,管道上方土层分布依次为:粉质黏土、厚淤泥质黏土、粉质黏土、填土,场地地下水位较高。粉土层属渗透性地层,在一定的动水压力作用下易产生流沙和管涌现象。

### 2.2 设计缺陷

雨水泵站进水管为 D1 500 mm 的钢管,壁厚 10 mm。该进水管东连下穿道路面集水井,西接雨水泵站的沉井泵房,全长约 28 m,最大埋深达 11 m。其中 U 型槽范围内 6 m 管道大开挖施工,U 型槽以外至沉井范围 22 m 管道顶管施工。在不良土层和地下水的影响下,管道埋深较深、壁厚相对不足,以及顶管施工无法实施管道基础等因素,导致钢管刚度不足,失稳变形,破损凹陷,后期因水土流失,泥沙流入管道内,造成地面塌陷。

### 2.3 施工缺陷

经管道内部检测,顶管施工管段拼接处焊接质量不合格,存在焊接缺陷,导致焊接接头的机械性能和抗腐蚀性能不能满足技术要求。另外,该段顶管施工的管道与 U 型槽、沉井等刚性构筑物连接处未考虑防沉降措施,后期运营过程中 U 型槽与沉井的沉降差异,导致该段管道发生拉伸变形,结合焊接质量不良等因素,造成管段拼接处产生裂缝,水渗入腐蚀管壁,降低强度,钢管整体失圆变形。

## 3 修复方法

管道修复方法分为开挖修复和非开挖修复。其中,开挖修复有放坡开挖和支护开挖两种方式,对塌陷区域管道进行开挖换管处理,可彻底解决管道缺陷问题。对于非开挖修复,目前运用成熟的修复方式主要有紫外光原位固化修复、CIPP 翻转内衬法、

聚氨酯等高分子喷涂法及局部树脂修复法。这些工法适用于管道破裂、变形、错位、脱节、渗漏等缺陷,不适用于管道基础断裂、坍塌、脱节口呈倒栽状、接口严重错位、线形严重变形等结构性缺陷<sup>[2]</sup>。

综合考虑本项目施工作业场地较小、管道埋深较深、场地地质条件不良、地下水位较高以及电力沟体影响开挖施工等因素,且该进水管已经出现严重塌陷,无法采用常规的非开挖修复形式等特点,业主方与设计、施工等单位经过多轮技术方案论证,不断优化实施方案后,共同探索出一种新型修复方式——半开挖人工盾构套管技术。该技术采用 PC 工法组合钢管桩+内支撑的支护方式,保证土体稳定性和盾构作业的安全性,同时起到止水帷幕的作用,减小施工期间对周边电力管线的干扰;结合管棚注浆加固、人工盾构掘进、钢套管安装、新管顶进、CIPP 内衬等工艺成功完成塌陷管段的修复。

## 4 施工方案

### 4.1 前期准备

为保证施工期间下穿道内雨水正常排放,在对拟修复管段进行两侧封堵后,在下穿道集水井内设置 3 台水泵进行雨水临排,临排雨水接入泵站出水池排出。同步实施电力管线保护措施、施工场地平整等前期准备工作。

### 4.2 半开挖人工盾构套管施工

施工平面布置见图 1。

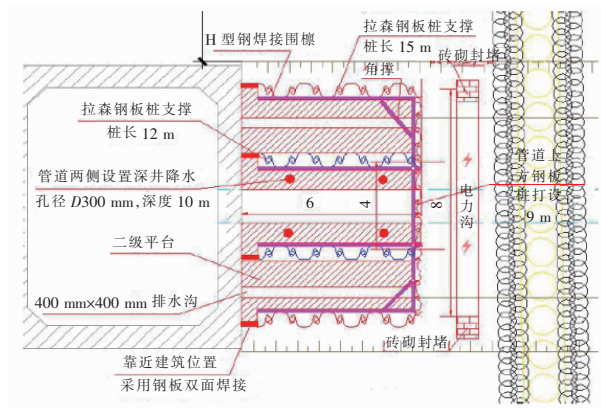


图1 施工平面布置

Fig. 1 Layout of construction pipe

为保证土体稳定性和盾构作业安全性,采用双层钢板桩加固方式,对拟修复管道上方塌陷区域进行双层拉森钢板桩(SP-IV)加固处理,第一排施打钢板桩长 15 m,施打钢板桩范围长 8 m、宽 6 m,其中位于管道正上方钢板桩长 9 m;完成第一排钢板

桩施打后,对该范围内的土体进行卸土,卸土深度约 3 m,同步围堰支撑;在二级平台施打第二排拉森钢板桩,施打钢板桩长 12 m,同步围堰支撑。同时,为了最大程度减少地下水的影响,在管道二级平台四周施打 4 座直径 300 mm、深 10 m 的深井,进行井点降水,同步开挖一条 400 mm × 400 mm 的集水沟,架设污水泵进行调水,保证下雨时边沟稳定,降水时间直至管道抢修完成。

施工立面布置见图2。

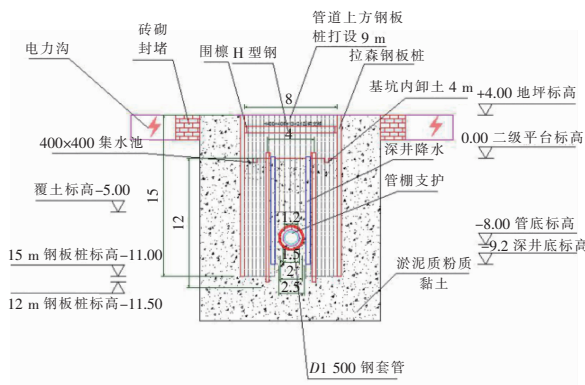


图2 施工立面布置

Fig. 2 Facades of construction pipe

下井作业前设置通风设备,持续对施工区域进行通风换气,确保施工人员安全。再进行管棚施工,在泵池进水口外围直径 2 m 位置处开孔,孔长 9 m,孔径 15 cm,孔数 36 个。管棚钢管采用  $\varnothing 108$  mm 热轧无缝钢管,壁厚 8 mm,钢管上每隔 10 ~ 15 cm 设置注浆孔。因进水池尺寸限制,实际每个注浆孔由

9根1 m长钢管焊接而成。管棚钢管施工完成后开始注浆,根据设计要求以及现场情况,严格控制注浆量和注浆压力。

待养护达标后,进行人工盾构掘进施工,为保证施工安全,原则上每次掘进深度不超过 30 cm,对塌陷管道气焊切割取出,同步进行 D1 500 mm 钢套管组装焊接,因施工条件限制,钢套管由长度 70 cm 的节段焊接而成,施工过程中要严格控制管内标高,确保管底标高满足后续套管接顺要求。掘进至原 D1 200 mm 进水管未出现病害处结束,D1 500 mm 套管与 D1 200 mm 老管衔接处用砖砌封堵。

人工盾构配合钢套管安装完成后,  $D1\ 200\ \text{mm}$  新管的顶进通道形成, 实施新管顶进安装施工, 待新管顶进完成且新老管段接顺处理后, 采用堵漏王、油麻丝及砖块对  $D1\ 200\ \text{mm}$  新管与  $D1\ 500\ \text{mm}$  套管间隙进行砖封砌筑, 堵漏王封边处理, 接缝处聚氨酯高压注浆堵漏, 确保密封性。同步对间隙处采用高压注浆工艺进行注浆填充处理。至此, 完成塌陷管道的修复。

### 4.3 CIPP 整体内衬施工

为确保新老钢管的整体性及防腐性,再对全段进水管进行 CIPP 整体内衬加固处理。在实施 CIPP 整体内衬前,依据《城镇排水管道检测与评估技术规程》(CJJ 181—2012)相关要求,对管道内部进行查勘,对局部缺陷处进行修复,确保修复后管道整体性较好,满足排水要求<sup>[3]</sup>。施工过程见图 3。



图3 CIPP 整体内衬施工过程

Fig. 3 Process of CIPP construction

## 5 数值模拟分析

Plaxis 有限元软件是目前用于基坑开挖及盾构隧道施工最好的分析软件之一,其含有大量先进的本构模型,其中 HSS 本构模型被认为是目前用于计算基坑工程最好的本构模型之一,因此本文基于 Plaxis 软件模拟半开挖人工盾构套管施工技术的可行性。

### 5.1 模型建立及网格划分

根据各结构特点,选用合适的模拟单元及本构模型。土体及管棚加固体采用实体单元模拟,土体选用 HSS 本构模型,根据地勘报告及相关文献经验取值,获得 HSS 模型参数(见表 1)。加固体采用 HS 本构模型,根据软件提供的建议值进行取值。紫金港北路下穿立交 U 型槽、U 型槽围护结构、检查井、



泵房、拉森钢板桩以及管道均采用板单元模拟,具体参数见表2。

表1 HSS 土体本构模型参数

Tab. 1 Parameter of HSS soil constitutive model

地层编号	地层名称	天然重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	有效黏聚力 $c'/\text{kPa}$	有效内摩擦角 $\varphi'/(^{\circ})$	标准三轴实验割线模量 $E_{50}/\text{MPa}$	侧限压缩实验切线模量 $E_{\text{ed}}/\text{MPa}$	卸载再加载模量 $E_{\text{ur}}/\text{MPa}$	小应变剪切模量 $G_0/\text{MPa}$	土工格栅与土体之间界面单元参数(Rinter)
②	粉质黏土	18.50	6	27	4.0	4.0	20.0	40.0	0.67
③	淤泥质黏土	16.86	3	24	3.0	2.0	16.0	40.0	0.67
④-1	粉质黏土	18.98	6	27	4.5	4.5	22.5	45.0	0.67
④-2	粉质黏土	18.20	7	28	6.5	6.5	32.5	65.0	0.67
⑤	淤泥质黏土	17.39	4	25	4.2	2.8	22.4	56.0	0.67
⑥	粉质黏土	19.33	8	28	6.0	6.0	30.0	60.0	0.67
⑧	粉砂	19.60	1	30	12.0	12.0	36.0	60.0	0.67
⑩	粉质黏土	19.53	8	28	7.0	7.0	35.0	70.0	0.67
	加固体	18.20	300	26	250	250	750	—	0.90

表2 板单元参数

Tab. 2 Parameters of sheet element

项 目	强度等级	弹性模量/ $10^4 \text{ MPa}$	厚度/m
紫金港北路 U 型槽	C30	3.00	1.00
U 型槽围护结构	C30	3.00	1.00
检查井	C30	3.00	0.16
泵房中隔板	C30	3.00	0.60
泵房底板	C30	3.00	0.35
泵房侧板	C30	3.00	0.80
原 D1 200 mm 进水管	—	0.172 4	0.019 5
D1 500 mm 套管	—	21.00	0.016
D1 200 mm 新管	—	21.00	0.015
拉森钢板桩	—	20.00	0.015 5

其中拉森钢板桩采用等效模量。拉森钢板桩的

围檩及支撑采用梁单元模拟,具体参数见表3。

表3 梁单元参数

Tab. 3 Parameters of beam element

结构名称	弹性模量/ $10^4 \text{ MPa}$	面积/ $\text{m}^2$
拉森钢板桩围檩	20	0.021 95
拉森钢板桩支撑	20	0.021 95

采用的三维模型尺寸为  $100 \text{ m} \times 200 \text{ m} \times 28.95 \text{ m}$  (长 $\times$ 宽 $\times$ 深),有限元整体计算模型如图4所示,模型共有 99 621 个节点、69 053 个单元。

本工程在采取降水措施后进行施工,不考虑地下水影响。原 D1 200 mm 进水管破坏采用,土体损失率为 6%,未破坏采用则土体损失率为 1%,D1 500 mm 套筒及新 D1 200 mm 套筒土体损失率取经验值 0.5%。

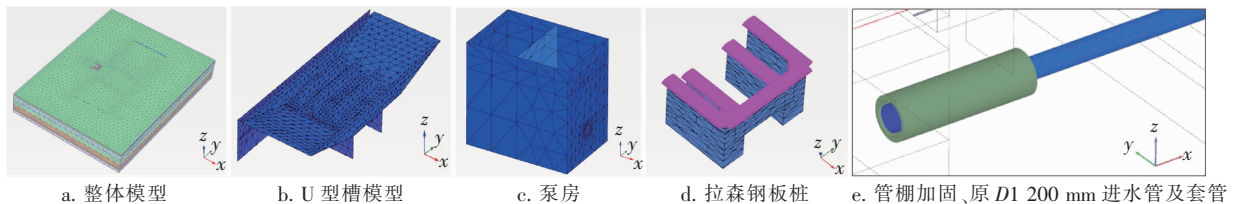


图4 有限元模型

Fig. 4 Model of finite element pipe

## 5.2 仿真施工方案

按照施工步骤建立仿真施工方案,主要包括 9 个步骤:①平衡地应力;②建造 U 型槽,包括 U 型槽桩基施工、土体开挖及 U 型槽侧板及底板施工;③检查井施工,包括检查井侧板施工、土体开挖及底板施工;④泵房施工,包括泵房围护结构施工、土体逐步开挖、底板施工;⑤原 D1 200 mm 进水管施工,塌

陷部位土体损失率逐步由 1% 变为 6%,模拟原 D1 200 mm 进水管塌陷;⑥拉森钢板桩施工,包括外层拉森钢板桩施工、一层围檩支撑施工、土体开挖至二级平台、内层拉森钢板桩施工、二层围檩施工(重置位移为零);⑦管棚施工;⑧套管掘进(考虑到计算问题,掘进步长为 1.5 m);⑨新 D1 200 mm 管掘进并填堵缝隙。

### 5.3 有限元分析结果

在进行半开挖人工盾构套管施工时以工况5为初始条件。工况6拉森钢板桩施工计算结果见表4。考虑到电力沟图纸资料不全,无法对电力沟进行模拟,故选取电力沟所在位置最大沉降作为评判半开挖人工盾构套管施工是否可行的指标。由计算结果可知,半开挖人工盾构套管施工结束时电力沟所在位置最大沉降为4.727 mm,主要变形发生在拉森钢板桩开挖第二层土体时,未超过报警值50 mm。

表4 有限元分析结果

Tab.4 Finite element analysis results mm

序号	工况	电力沟所在土层最大沉降
5-1	原D1 200 mm进水管土体损失1%	-0.465
5-2	原D1 200 mm进水管土体损失6%	-5.001
6-1	外层拉森钢板桩施工	-0.034 (重置位移为零)
6-2	一层围檩施工	-0.039
6-3	土体开挖1	-0.710
6-4	土体开挖2	-4.186
6-5	内层拉森钢板桩及二层围檩施工	-4.540
7	管棚支护	-4.541
8-1	D1 500 mm套管施工1.5 m	-4.548
8-2	D1 500 mm套管施工3.0 m	-4.568
8-3	D1 500 mm套管施工4.5 m	-4.598
8-4	D1 500 mm套管施工6 m	-4.638
8-5	D1 500 mm套管施工7.5 m	-4.688
8-6	D1 500 mm套管施工9.0 m	-4.718
9	D1 200 mm新管掘进并填堵缝隙	-4.727

### 6 施工监测

本工程基坑深3 m,施工作业区域地下约11 m,采用拉森钢板桩等围护结构,基坑周边有泵房、下穿道挡墙等建筑物,以及高压输电线管沟等构筑物,场地周边有紫金港北路下穿道和金蓬街等两条市政道路。为确保工程结构及周边环境的安全,减少施工对相邻的既有构筑物、路面、管线等周边环境的影响,本次设置38个监测点位,监测频率按三级基坑类别考虑,每天监测一次。

本次半开挖人工盾构套管施工期间,监测数据累计变化值和变化速率分别为3.28 mm、1.11 mm/d,均未超过报警值50 mm、3 mm/d,整个施工过程安全稳定,对周边环境影响较小。

### 7 结论及建议

以紫金港北路下穿立交雨水泵站进水管道路塌陷抢

修为例,创造性地提出了半开挖人工盾构套管施工技术,成功修复了紫金港北路下穿道雨水泵站进水管。该技术的成功应用为同类型管道修复提供了经验。同时,建议埋深较大的管道相应提高管道壁厚,应按压力管道的标准选择壁厚。

### 参考文献:

- [1] 王健伟,周宁聪,程高全,等. 下穿铁路立交雨水泵站进水管道路抢修实例[J]. 市政设施管理,2017(1): 25-27.  
Wang Jianwei, Zhou Ningcong, Cheng Gaoquan, et al. Rush repair case of intake pipeline of storm water pumping station of under crossing rail grade separation [J]. Management of Municipal Facilities, 2017(1): 25-27 (in Chinese).
- [2] CJJ/T 210—2014, 城镇排水管道非开挖修复更新工程技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.  
CJJ/T 210-2014, Technical Specification for Trenchless Rehabilitation and Renewal of Urban Sewer Pipeline[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014 (in Chinese).
- [3] 段宽,史志利,庞梅. 浅谈埋地排水管道非开挖修复技术与工程应用[J]. 特种结构,2016,33(1):109-114.  
Duan Kuan, Shi Zhili, Pang Mei. Discussion on non-excavation repair technology and engineering applications of underground drainage pipeline[J]. Special Structure, 2016,33(1):109-114 (in Chinese).



作者简介:孙元(1988—),男,安徽池州人,硕士,主要从事市政设施管理工作。

E-mail:357755136@qq.com

收稿日期:2020-07-22