

临江污水处理厂深基坑施工中地下水的处理研究

刘耀峰, 柴文俊, 丁洪元, 杨彩虎

(中冶集团武汉勘察研究院有限公司, 湖北 武汉 430080)

摘要:介绍了场地位临长江,地质条件复杂的黄浦路污水处理厂深基坑施工实例。分析了深基坑施工中地下水的危害,论述了对其处理的方法及要点,指出深基坑地下水的处理中,降水不可回避,但周边沉降可以避免。只要处理方案合理,成井质量得到保证,施工操作规范,可以满足坑内干作业的施工要求。

关键词:深基坑;管井降水;帷幕隔渗;地面沉降

中图分类号:TU473.2 文献标识码:A 文章编号:1672-7428(2016)06-0075-06

Ground Water Treatment Research on Deep Foundation Pit Construction of Riverside Sewage Water Treatment Plant/LIU Yao-feng, CAI Wen-jun, DING Hong-yuan, YANG Cai-hu (Wuhan Surveying-geotechnical Research Institute Co., Ltd. of MCC, Wuhan Hubei 430080, China)

Abstract: This article describes a case of deep foundation pit construction for Huangpulu sewage treatment plant, which was by Yangtze River with complex geological conditions. The paper points out the harm of groundwater in the construction of deep foundation pit and discusses the methods and the major points of treatment. Dewatering is inevitable in the process of deep foundation water treatment but peripheral settlement can be avoided. With reasonable treatment scheme, ensured well quality and standard-operation, the construction requirements on dry operation can be reached.

Key words: deep foundation pit; tube well dewatering; seepage insulation by curtain; ground settlement

1 工程概况

黄浦路污水处理厂改建工程,场地位于汉口长江二桥桥头下游约 200 m 的长江滩地上,南侧紧邻原污水处理厂一期工程,东侧紧邻武汉市花鸟市场一层平房。地面标高约为 25.20 m,建筑物 ± 0.00

为 25.20 m。基坑设计采用钻孔灌注桩 + 2 道钢筋混凝土土内支撑方案,及帷幕止水和疏干降水,形成一个由底板、支护桩、冠梁、腰梁、内支撑、高压旋喷桩、工程桩、降水井组成的整体支护体系和隔渗降水体系。其基坑工程平面布置如图 1、降水井工程平面

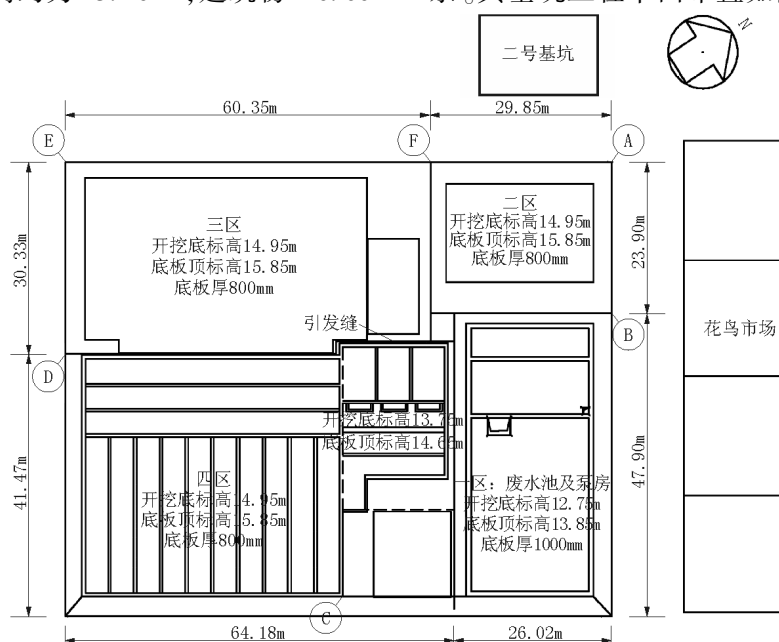


图 1 黄浦路污水处理厂深基坑工程平面布置图

收稿日期:2015-11-03; 修回日期:2016-05-04

作者简介:刘耀峰,男,汉族,1965 年生,副总经理,教授级高级工程师,注册一级建造师,注册安全工程师,从事岩土勘察设计与施工工作,湖北省武汉市青山区冶金大道 17 号,768646886@qq.com。

布置如图 2 所示。基坑开挖尺寸如表 1 所示。

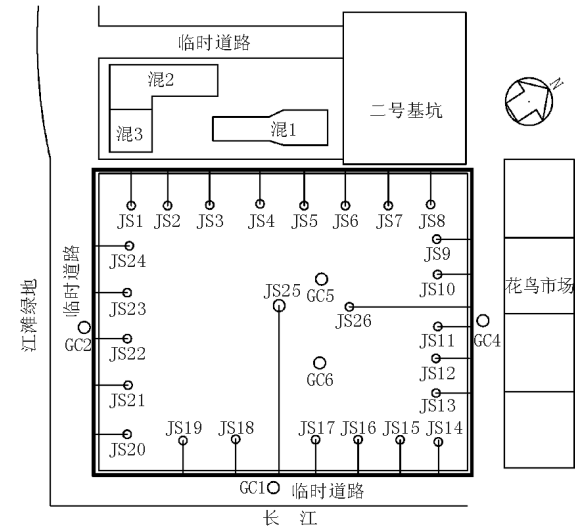


图 2 黄浦路污水处理厂深基坑工程降水井平面布置图

表 1 拟开挖基坑相关参数

基坑位置	坑底标高/m	开挖深度/m	基坑尺寸/m
AB 段	14.82	10.38	73×91.4
BC 段	12.95	12.95	
CDEFA 段	14.38	10.38	
坑内局部地段	16.37	8.83	

根据《基坑工程技术规程》(DB 42/159—2004)第 4.0.1 条,基坑工程重要性等级为一级。

2 工程地质与水文地质状况

2.1 工程地质岩土层特性

根据勘察所揭露的地层岩性特征,自上而下划分如表 2 所示。

2.2 水文地质条件

表 2 岩土层特性

层号	岩土名称	层厚/m	层底标高/m	土层特征描述
① ₁	杂填土	1.10~9.50	24.14~15.47	灰黄色,主要由粘性土、植物根茎、砖、瓦、碎石等建筑垃圾组成
① ₂	素填土			褐灰色,主要由粘性土组成,局部有分布
① ₃	冲填土	1.10~5.60	20.95~16.30	褐灰色,以淤泥质粘土为主,夹粉土
① ₄	冲填土			褐灰色,以粉砂为主,局部分布
②	淤泥质粉质粘土	3.00~9.30	9.30~3.00	灰褐色,呈流塑状,局部软塑状,具臭味,含有机质、腐殖质,夹有粉土、粉砂薄层
③	粉质粘土、粉土、粉砂互层	1.00~11.20	12.52~3.13	粉质粘土,灰色,软塑状;粉土,灰色,饱和,呈稍密状;间夹薄层松散一稍密的粉砂,含云母片,微层理清晰,砂感强
④ ₁	粉砂夹粉质粘土、粉土	0.90~7.00	9.49~2.04	灰一青灰色,粉砂呈松散一稍密状,粉质粘土呈软塑状,粉土呈中密状,饱和,主要由石英、长石、云母等组成
④ ₂	粉砂	0.20~9.05	7.70~-3.48	灰色,中密,饱和,主要由石英、长石、云母等组成
④ _{2a}	粉质粘土	2.00~6.80	-1.31~-5.41	灰色,软塑状,层中夹粉土、粉砂薄层

场地无统一的自由水面,水力联系较差,水位随季节变化,埋深 1.29~3.35 m 之间,相应高程 21.83~24.10 m。

场地内地下水可划分为 2 种类型:填土层中赋存有上层滞水,上层滞水受大气降水、地表水及生活排放水等补给;下部孔隙承压水赋存于③层粉质粘土、粉砂互层和④单元层粉砂中,水量丰富。上层滞水与下部孔隙承压水之间由②层淤泥质粉质粘土相隔无水力联系。承压水埋深为 6.74~6.80 m,相应水位高程为 18.48~18.42 m,且与长江水力联系密切,两者呈互补关系,其水位变化受降水量季节性(上游)变化影响规律明显。

2.3 地形地貌

主要由漫滩和阶地、冲积平原组成。场地位于武汉长江二桥东侧,长江防洪大堤外的滩地上,人工改造以吹填淤泥沙为主。地貌单元属长江一级阶地

前缘,地面高程为 24.93~26.27 m 之间。

3 深基坑开挖可能出现的工程问题

黄浦路污水处理厂基坑紧临长江,坑周土体松软,开挖可能有 3 方面岩土工程问题。

3.1 基坑边坡土体变形与整体失稳

一是由于开挖临空面引起土体向坑内少量位移而产生对支护悬臂结构的土压力,土压力大小和向坑内位移大小取决于开挖深度、速度和以下一定深度内土层的抗剪强度及土的侧向承载力;二是土体中存在软流塑淤泥质土,在临空条件下或开挖振动而产生塑形流动,或者边坡土体存在承压水,由于开挖保护厚度不够,而产生管涌或突涌,通常表现为坍塌;三是土体中有原生软弱结构面,因水作用而产生滑移或滑坡。

3.2 地下水及基础性含水层对基坑产生危害

工程项目位于武汉长江一级阶地分布区前缘,由于典型的二元结构组合使地下水明显分为2层。该项目基坑根据开挖深度不同分为3个区,其所受地下水危害程度不同,地下水的存在或沙土类随地下水涌出而产生涌水或流土,布置降水井以减压,疏干措施以防大范围突涌。

3.3 开挖和降水引起基坑四周地面沉降

由于开挖和降水原因,局部降深达13.25 m,基坑降水所形成的降水漏斗,可能会引起东侧的花鸟市场一层平房等建筑物的不均匀沉降,如不处理好深基坑工程的水的问题,则深基坑变形可能会造成严重的危害,甚至影响一期建筑的安全,产生环境影响问题。

4 基坑方案和处理要求

4.1 设计思路

4.1.1 确保安全

工程位临长江滩地,上部地层多为吹填淤泥,周边还有建筑群。基坑支护设计应确保工程的安全可靠,综合考虑地质条件、施工技术和环境,技术经济性对比,强调各种技术优势的综合运用,保证基坑临近地面建筑物及周边管线安全,保证坑内工程桩(汛期抗浮,枯水期抗压)安全,兼顾汛期施工的工期和安全。

4.1.2 重视基坑施工工程经验和现场管理

由于基坑工程复杂性,变异性,用类比的工程经验解决基坑将要遇到的问题仍是途径之一。另外设计和施工不可分,施工要根据具体岩土地质条件,选择合适施工工艺,满足设计和规范要求。

4.1.3 强调施工过程的质量与监测

除了施工质量上要严格按照设计要求进行,还应加强施工期间的变形监测。临江施工,在开挖过程中将水文地质条件变化情况和基坑变形监测结果分析,及时信息化反馈设计,做到设计调整及时,达到控制变形,保证基坑开挖安全的目的。

4.2 地下水处理方案

在深基坑开挖过程及底板之上施工过程中,开挖过程要有安全、稳定、干燥的作业环境,因此,必须对地下水进行处理,其处理方法和基本要求如下。

4.2.1 地下水处理方法选择

有2种地下水处理方法可供选择,一种是排降法,另一种是隔渗法。

4.2.1.1 排降法的原理和使用条件

排降法是指采用抽水设备在集水井坑内抽排,针对潜水或上层滞水,下部承压水,以达到坑内干燥可方便土建施工作业,并能保护坑壁及坑底稳定和邻近建(构)筑物及地下设备的正常使用。本基坑按照临江水文条件及开挖深度,选用了明沟排水和深井降水法。

(1)明沟排水法的水,常从坑壁中渗出,所以以往采取堵集、导流等措施,以防止对坑壁的冲刷。本项目用明沟排水法,是在基坑开挖至5 m前,对上层滞水或部分潜水采取的过渡措施之一,要尽量使水少流入坑内,少冲刷坑壁土层。

(2)深井降水法。因基坑开挖深度超过承压含水层顶板埋深,且局部含水层顶板很薄,承压的水压力可能冲破起盖层(承压水位6.74~6.80 m),从而使坑底突涌而无法完成基底施工。从勘察、设计、施工和维护阶段的程序出发,按技术要求进行深井降水法,此方法采用后应密切关注,防止发生过大的不均匀沉降。

4.2.1.2 隔渗法的原理和使用条件

隔渗法技术就是在基坑的四周或地板下某一深度采用高压旋喷(16 m深),形成一定强度、一定厚度、抗渗性较强的水泥土墙,以阻止地下水流入基坑的方法。本项目采用竖直隔渗墙中悬挂式竖向隔渗,用来隔断上层滞水和延长承压水的渗透途径。

4.2.2 进行基坑地下水处理的基本要求

(1)资料准备:含水层性质,厚度及顶板高程,水位标高及其动态规律以及含水层间的水力联系状况,长江补水距离关系及水力关系,基坑深度,尺寸范围,周边建筑,地下管线支护结构方案,基坑维持时间以及季节气象资料。

(2)水处理设计中,地面设立变形观测点,地下水位变化连同基坑开挖施工作业进度,基坑边坡支护结构变形等信息进行反馈,分析处理(信息法施工),并且要有相应的应急预案。

(3)地下水处理必须考虑其复杂程度(见表3)。

综合考虑本基坑的规模、降水深度、基坑等级,本工程地下水处理复杂程度为复杂,采取深井降水方案。

4.2.3 降水方案的采用

本工程因紧临长江边,承压水与长江水水力联系密切,降水能力受长江水位的影响较大。降水井

表 3 地下水处理工程复杂程度

分 类	基坑规模大小/m ²				降水深度/m				深基坑安全等级		
	< 500	500 ~ 2000	2000 ~ 5000	> 5000	< 6	6 ~ 10	10 ~ 16	> 16	三级	二级	一级
复杂程度系数	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3

布置方案需要在抽水试验后尽快确定,以保证其降水能力达到设计开挖及基坑封底要求。

为防止地下水结构底板渗水,在各钢立柱与地下结构地板的连接处要设止水带,止水带采用钢板,钢板满焊在钢立柱的杆件四周。上层滞水采用隔渗的方式处理,紧靠排桩外侧设置一排高压旋喷桩隔渗,桩径 800 mm,桩间距 600 mm,相邻桩搭接 200 mm,桩顶高出冠梁顶面 0.7 m,桩底穿过粉质粘土、粉土、粉砂互层以下 1 m。为满足基坑封底需要,在两钻孔灌注桩之间再布置一根高压旋喷桩加强防渗,桩径 800 mm,桩顶与冠梁顶面齐平,桩底穿过粉质粘土、粉土、粉砂互层以下 1 m。地下承压水采用深井降水与封底相结合的方式处理,基坑封底结构完工之前,采取深井疏干降水。本工程基坑布置了 31 口降水井,局部降深达 13.25 m,将承压含水层水位降至基坑开挖面以下 1.0 m,管井深入粉砂层。

4.2.3.1 基坑总排水量的估算

根据基坑大小、水位下降值和含水层的渗透系数预估基坑总排水量,用大井法对基坑总涌水量进行估算,其计算简图如图 3。

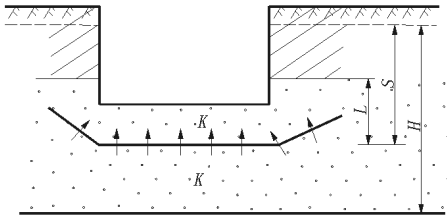


图 3 基坑涌水量计算简图

总排水量:

$$Q = 2\pi K_0 S r_0 \tag{1}$$

$$K_0 = (S + 0.8L)/H \cdot K \tag{2}$$

式中: K_0 ——含水层渗透系数概化值,m/d; r_0 ——基坑等效圆半径,m, $r_0 = 0.565 \sqrt{F}$; S ——承压水水位下降设计值,m; K ——含水层渗透系数,m/d; F ——基坑面积,m²; L ——含水层顶面与设计下降水位的高差,m; H ——从承压含水层底面算起的承压水测压水位高度,m

然后综合比较其他公式:

$$Q = 2.73K \frac{MS}{\lg(R + r_0) - \lg r_0} \tag{3}$$

式中: M ——承压含水层厚度,m; R ——引用影响半径,m。

渗透系数取 15.2 m/d,影响半径 $R = 250$ m,丰水期水位按 24 m 考虑,水位下降值 $S = 12$ m,计算结果为:

$$Q = 2\pi K_0 S r_0 = 31020 \text{ m}^3/\text{d} \tag{4}$$

4.2.3.2 单井出水能力计算及设计出水量选取

$$q = 120\pi r_w l^3 \sqrt{K} \tag{5}$$

式中: q ——单井出水能力,m³/d; l ——过滤管长度,m; r_w ——过滤器半径,m; K ——含水层渗透系数,m/d。

经计算单井出水能力 $q = 1802 \text{ m}^3/\text{d}$,单井设计出水量一般取 $1200 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

4.2.3.3 降水管井的数量确定

降水管井的数量,可按式确定:

$$n = Q/q \tag{6}$$

式中: n ——降水管井数量,口; Q ——基坑总抽排水量,m³/d; q ——设计单井出水量,m³/d。

按基坑总抽排水量 $31020 \text{ m}^3/\text{d}$,单井设计出水量取 $q = 1200 \text{ m}^3/\text{d}$ 设计,本工程设计降水井数量为 $n = Q/q = 26$ 口。

即计算降水井 26 口,另设置备用降水井 5 口,故基坑设计降水井总数 31 口,另设置水位观测井 6 口。

4.2.3.4 井身结构(如图 4 所示)

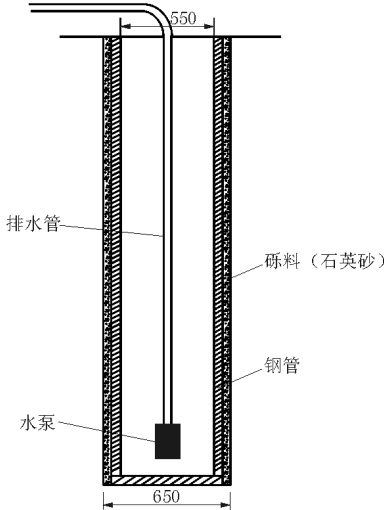


图 4 抽水井井身结构示意图

井深:抽水井及观测井井深均为 35.0 m。

井径:抽水井及观测井井径分别为 650 mm 和 325 mm。

成井方法:采用清水冲击钻探成孔,然后用深井潜水泵洗井抽水。

井管结构:抽水井和观测井井内下置钢管作为护井管和过滤管,抽水井管径 350 mm,观测井管径 108 mm,井管总长 35.0 m,其中实管 15.0 m,过滤管 20.0 m。

滤水管管眼直径为 1.5 cm,采用梅花型排列,孔隙率 > 20%,外壁垫筋骨架包尼龙网(60 目)缠铁丝。

管壁与井壁之间砾料填至孔口以下 35.0 m, 12.0 m 以深砾料直径为 2~5 mm 石英砂,12.0 m 以浅用风干粘土球(直径为 2~3 cm)捣实至地面。

4.2.3.5 抽水试验

抽水试验采用深井潜水泵进行,在正式抽水试验前进行间断抽水洗井,做到水清砂净,水位反应灵敏为止,并同步观测稳定水位。潜水泵扬程 ≥ 45 m,流量 ≥ 50 m³/h,泵体最大外径 ≤ 250 mm(200QJ-80-40),含砂量在满足洗井时 < 1/50000,正式运行时 < 1/100000。观测井能灵敏的反应地下水位变化。降水结束后,根据“以砂还砂,以土还土”的原则,在井管内填入相应的砂和粘土并焊封井口。

4.2.4 上层滞水及潜水的处理

在土方开挖前,沿护坡桩的外侧设一条排水沟,用堵、截、引、排的方法,排走坑周的地面大气降水及部分上层滞水。顺排水沟按一定距离设置集水井,使明沟内的水引流到集水井内再用泵抽走。随着开挖深度沿护坡桩内侧逐层开挖,先挖设一条低于开挖层底标高的内侧排水沟及集水坑,使之流入基坑的地下水由排水沟引入集水坑再由水泵抽走。

4.2.5 地下水处理的效果及环境影响

4.2.5.1 效果

启动水井一般 26 口左右,初期出水量 32000 m³/d 左右,稳定出水量 25000 m³/d 左右,含砂率 ≤ 1/100000,坑内地下水水位下降,1 号观测孔 -16.8 m,2 号观测孔为 -19.0 m,始终保持基坑干作业施工,是一个沿江堤内成功的深基坑深井降水。

4.2.5.2 沉降预测及其影响因素分析

一个含水层的水位下降后,含水层初始水位以下土层有效应力增加。压缩土层厚度、土层本身的

压缩模量,是导致地面沉降的主要因素。基坑降水地面沉降预测可采用下述公式计算:

$$\Delta_{sw} = M_s \cdot \sum_{i=1}^n \sigma_{wi} \cdot \frac{\Delta_{hi}}{E_{si}} \quad (7)$$

式中: Δ_{sw} ——水位下降引起的地面沉降量, cm; σ_{wi} ——水位下降引起的各计算分层有效应力增量, kPa; Δ_{hi} ——受降水影响地层(自降水前的水位至含水层底板之间)的分层厚度, cm; n ——计算分层数; E_{si} ——各分层的压缩模量, MPa; M_s ——经验系数; $M_s = M_1 M_2$, 对于一般粘性土 M_1 可取 0.3~0.5, 粉质粘土、粉土、粉砂互层 M_1 可取 0.5~0.7, 淤泥、淤泥质土 M_1 可取 0.7~0.9, 当降水维持时间 3 个月之内时 M_2 可取 0.5~0.7, 当降水维持时间超过 3 个月时 M_2 可取 0.7~0.9。

沉降预测:基坑降水后土层中地下水若仍然承压,则有效应力增量等于孔隙水压力下降值,即 $\sigma_{wi} = \Delta_{hi} \gamma$, γ 为水的容重,根据勘察报告花鸟市场侧承压水埋深为 6.74~6.80 m,由于开挖局部降深达 13.25 m,承压水下降厚度为 6.45 m,该层主要为粉质粘土,压缩模量取 5 MPa,计算经验值 M 取 0.6 × 0.8 = 0.48,则:

$$\begin{aligned} \Delta_{sw} &= M_s \cdot \sum_{i=1}^n \sigma_{wi} \cdot \frac{\Delta_{hi}}{E_{si}} \\ &= 0.48 \times 64.5 \times 645/5000 = 3.99 \text{ cm} \end{aligned}$$

预测结果为 3.99 cm。

水位下降是致沉的动力, h 和 E 指土层厚度和土层的压缩模量,它们是致沉关键。

4.2.5.3 减少沉降的措施

(1) 含水层的致沉作用是各个含水层独立行为,在基坑开挖过程中采取降水,若降低一个含水层水位能达到目的,则不要触动另一个含水层,这样可以减少地面沉降量。

(2) 适度控制降水强度(50 m³/h)和降水延续时间,合理开启,随着基坑开挖深度的增加,逐步调大基坑排水量,使水位降深逐步加大,直至最后达到水位降深值。

(3) 基坑开挖应尽量压缩开挖及施工时间,需要降则抽水,缩短基坑降水的延续时间,减少基坑累计排水量。

(4) 控制基坑支护结构的位移和沉降量,加强沉降监测。

(5) 严格控制降水井成井质量,符合《管井技术

规范》技术要求。

(6)做好汛期应急方案,必要时采取灌水措施以平衡承压水压力,防止基坑底板隆起破坏。灌水点位于基坑南边3 m,污水处理厂一期尾水排放处,灌水量=(长江水位高程-基坑底板标高)×基坑面积,估最大灌水量为69000 m³,采用8台型号为WQ250-7.75(250 m³/h)污水泵不间断抽水,30 h灌满。

沉降变形观测情况见表4。

表4 沉降变形观测情况

地 点	降水引起的不均匀沉降/%	总均匀沉降率/‰	降水引起最大沉降值/mm
东侧花鸟市场	2.5	2.5~3.5	40
北侧一期工程建筑	1	1.5	30
西南侧吹填绿地滩	0.5		

支护水平位移平均38 mm,最大值东北中点55 mm;沉降量平均值30 mm,最大值40 mm。

5 结语

(1)基坑水处理上层滞水及潜水,一般采用堵、截、引、排的方案。

(2)深井疏干降水,只要降水方案合理,施工操作规范,成井质量保证,及时调整降水强度和降水延续时间能满足坑内始终干作业施工。

(3)基坑降水引起地面沉降不可避免但可控,短暂基坑降水不足以危害坑周环境。

(4)基坑水处理设计、施工必须进行综合考虑周边环境影响和技术经济指标,在满足水处理要求后,方可进行基坑开挖。

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] 苏宏阳,酆锁林. 基础工程施工手册[M]. 北京:中国计划出版社,2002.

[3] DB42/J 830—2012, 基坑管井降水工程技术规程[S].

[4] 齐晓华. 喷锚支护与管井降水技术在基坑支护中的应用[J]. 探矿工程(岩土掘进工程),2013,40(9):63-67.

[5] 吴玉山. 高层建筑基础工程技术[M]. 北京:科学出版社,1995.

[6] 刘耀峰,李事业,等. 基坑降水引起的地面沉降机理探讨[J]. 安全与环境工程,2004,42(2):51-54.

[7] 樊朝金,李德文,邓春海. 山东潍坊万达广场深基坑降水及有承压水头降水井的封井方法[J]. 探矿工程(岩土掘进工程),2013,40(12):71-73.

[8] 王江,杨智. 某高层建筑深基坑工程降水方案研究[J]. 土木基础,2015,29(3):35-37.

[9] 中国地质调查局. 水文地质手册[M]. 北京:地质出版社,2012.

[10] 杜魁,余小国,岳丽娜,等. 武汉钰龙金融广场超深基坑工程设计方案选型[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(12):28-33.

(上接第74页)

护壁套管解卡,在起拔水文孔井管和钻探施工中卡埋钻事故处理也可发挥作用。

参考文献:

[1] 朱恒银,等. 深部岩心钻探技术与管理[M]. 北京:地质出版社,2014.

[2] 朱恒银,张文生,王玉贤. 控制地面沉降回灌井施工技术研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2005,32(S1):200-205.

[3] 李谦,酆泰宁,卢春华. 乌克兰的几种新型解卡震击器[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(4):73-77.

[4] 卢敦华,吴烨,徐联军. 套管隔离液在巨厚松散层套管起拔中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(4):42-44.

[5] 张文,全增房,吉宏儒. 浅谈钻孔成孔后表层套管的起拔[J]. 水文地质工程地质,2003,(1):100-102.

[6] 刘广志. 岩心钻探事故预防与处理[M]. 北京:地质出版社,1986.

[7] 刘庆余. 第四系松散地层深井施工中的几个问题[J]. 探矿工程,1991,(4):52-54.

[8] 郑仕善. 复杂地层套管起拔方法[J]. 地质与勘探,1980,(5):69-71.

[9] 沈桂忱. 防止套管事故及解决起拔困难的技术措施[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),1980,(3):46-48.

[10] 郑建礼. 爆破法起拔井管[J]. 煤炭科学技术,1993,(9)40-41.

[11] 谷毅军. 钻孔放炮起拔套管的经验[J]. 探矿工程,1960,(10):17.

[12] 刘康民,程永选. 起拔套管小经验[J]. 探矿工程,1958,(11):9.

[13] 孙景武,宋国龙,唐岳明,等. 自制水文孔过滤管起拔工具及其工程应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(7):32-33.

[14] 曹江涛. 第四系土层对钻探的影响及其解决方法[J]. 西部探矿工程,2015,(5):45-50.

[15] 张兆德,戴瑞斌,王德禹. 液压式上击器解卡的震击力计算[J]. 上海交通大学学报,2002,36(1):121-124.

[16] 张兆德,李向军,王德禹. 震击器解卡过程的动力学分析[J]. 石油矿场机械,2004,33(1):8-11.