

文章编号:1005-0523(2022)01-0059-08



地下水位及地层渗透系数对基坑抗浮影响研究

陈昭阳¹,李敏²,高江林³,赵一行¹,詹刚毅⁴,石钰锋¹

(1.华东交通大学江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室,江西 南昌 330013;2. 中铁十八局集团第五工程有限公司,天津 300459;3 江西省水利科学院,江西 南昌 330029;4. 中铁上海设计院集团有限公司,上海 200070)

摘要:某超深圆形盾构始发井基坑因考虑抗浮及盾构始发安全而进行了坑外降水,但引起周边地层较大沉降,按照要求停止降水并恢复原地下水位。在现场监测基础上,采用理论及数值手段,对高水位下该基坑的抗浮及地层渗透系数对围护结构的影响开展研究。研究表明:在不考虑围护结构与地层间摩擦阻力的情况下,基坑可以依靠围护结构自重抵抗地下水产生的浮力;在相同水位下,基坑围护结构底部所处土层的渗透系数是影响围护结构上浮的主要因素。

关键词:抗浮验算;数值分析;圆形基坑;超深基坑;渗流分析

中图分类号:U452

文献标志码:A

本文引用格式:陈昭阳,李敏,高江林,等. 地下水位及地层渗透系数对基坑抗浮影响研究[J]. 华东交通大学学报,2022,39(1):59-66.

Study on the Influence of Groundwater Level and Stratum Permeability Coefficient on Foundation Pit

Chen Zhaoyang¹, Li Min², Gao Jianglin³, Zhao Yixing¹, Zhan Gangyi⁴, Shi Yufeng¹

(1. Jiangxi Key Laboratory of Geotechnical Infrastructure Safety and Control, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. China Railway 18th Bureau Group Fifth Engineering Co., Ltd., Tianjin 300459, China; 3. Jiangxi Academy of Water Sciences and Engineering, Nanchang 330029, China; 4. China Railway Shanghai Design Institute Group Co., Ltd., Shanghai 200070, China)

Abstract: Due to the consideration of anti-floating and shield launching safety, the foundation pit of an ultra-deep circular shield launching shaft was dewatering outside the pit. However, the surrounding strata settlement was large. The dewatering was stopped and the original groundwater level was restored according to the requirements. In this paper, based on the field monitoring, theoretical and numerical methods were used to study the influence of anti-floating and permeability coefficient of the foundation pit on the retaining structure under high water level. The results show that the foundation pit can rely on the self-weight of retaining structure to resist the buoyancy of groundwater without considering the friction between retaining structure and stratum. Under the same water level, the permeability coefficient of the soil layer at the bottom of the retaining structure is the main factor affecting the uplift of the retaining structure.

Key words: anti-floating checking calculation; numerical analysis; circular foundation pit; super-deep foundation pit; seepage analysis

Citation format: CHEN Z Y, LI M, GAO J L, et al. Study on the influence of groundwater level and stratum permeability coefficient on foundation pit[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(1): 59-66.

收稿日期:2021-06-21

基金项目:国家地区科学基金项目(51768020);江西省自然科学基金重点项目(20202ACB202005);江西省交通运输厅科技项目(2021Z0004)

近年来,由地下水上升引起的基坑上浮事件屡见不鲜^[1],特别是针对超大、深基坑,处理不当将引起重大工程事故。例如:南昌某学校综合楼人防地下室上浮事故^[2];海口商场地下室上浮事故^[3];湖北保健酒基地工程联合车间地下室上浮事件^[4]等,造成很大财产损失及不良社会影响,故应对基坑上浮问题给予足够重视。万先逵^[5]等依托实际工程,探究基坑支护结构的优化方案。董培鑫^[6]等采用抗浮锚杆有效解决某中学操场抗浮问题。张在明^[7]对抗浮水位展开系统研究,提出将地下水位预测与孔隙水压力分布用于抗浮水位分析中。曹洪^[8]等以本奈特假定为前提,推导出用于临江二元地层渗流分析的简化算法,得到强透水中水头分布,提出地下结构物底板的水压力实用计算方法。肖立^[9]采用 Plaxis 3D 软件结合离心机模型试验结果,研究得出储罐侧壁和地连墙受到的摩擦力对结构抗浮有重要的作用。黄俊光等^[10]提出主、被动抗浮措施的组合克服了传统抗浮技术的不足。鲁昂^[11]针对设计中稳定安全系数、抗力分项系数等规范规定不统一的计算参数予以整理。李国胜^[12]认为设计中应根据当地的实际情况确定抗浮水位和不同抗浮水位时的抗浮验算方法。贾朋涛^[13]认为场地地下结构抗浮水位取值考虑水的来源和排泄条件及建筑物的施工和使用两个阶段。刘子洁^[14]、张竹庭^[15]依托多个工程案例研究抗浮水位,认为地下结构抗浮水位由场地的水文条件、项目结构的具体功能要求及其他多种因素决定。张国才^[16]依据相关研究得出坡地地下结构的计算方法。王帅^[17]提出不同条件下基坑抗浮水头取值的计算公式。熊欢^[18]提出位于砂土地层中的地下结构所受水浮力无需折减,而位于黏土地层中的地下结构所受水浮力应进行合理折减。且由相关资料可知,基坑上浮缘于地下水浮力大于其自重、基坑内部荷载及周围阻力总和,与地下水位高低、水位变化及地层渗透系数有关。对于渗透系数较小地层应根据水头损失程度对坑底水压进行折减。

目前工程中常用抗浮措施有自重、加载、锚杆(索)、抗拔桩、排水减压、隔渗帷幕抗浮^[19-22]等。本文主要考虑基坑在围护结构自重作用下抗浮效果。采用理论及数值计算手段对某超深圆形基坑自重抗浮进行验算,分析依托工程水位变化后的抗浮稳定

性,为抗浮措施决策提供依据。

1 工程概况

某盾构工作井为外径 35.9 m 圆形竖井。地面平整高程 3.5 m,基坑底高程-63.85 m(不含集水井底坑加深 2.5 m),开挖深度为 67.35 m。采用地下连续墙+砼内衬墙支护方案。基坑开挖采用地下连续墙垂直支护,盾构井内衬墙采用逆作法施工。其支护结构设计为:地下连续墙厚 1.2 m,嵌入井底 4 m,逆作法内衬墙厚 1.2~1.5 m,分界面于高程-18.25 m 处,采用 C30 钢筋混凝土。衬砌后基坑内径分别为 31.1 m、30.5 m。洞门处设置两道 C35 砼环梁,宽×高为 2.5 m×1.4 m。如图 1 所示。基坑降水井及监测点如图 2 所示,其中 LG09#-1-LD 表示垂直位移测点;LG09#-1-TP 表示水平与垂直共用测点;LG09#-1-IN 表示围护结构顶部水平位移监测点;LG09#-1-UP 表示地下水压监测点。

该地区地下水丰富,以孔隙性潜水为主,地表水与地下水互为补排。局部丘陵地带以基岩裂隙水为主,大多在强风化泥质粉砂岩底部至弱风化泥质粉砂岩顶部。

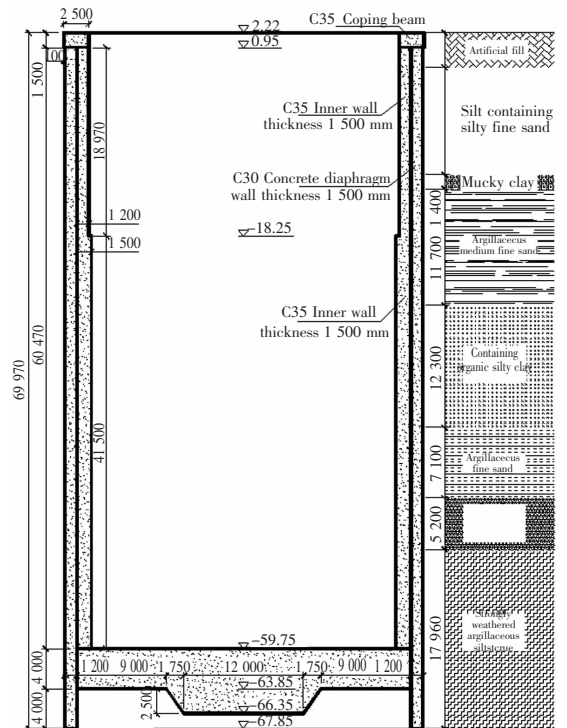


图 1 圆形基坑剖面图(单位:mm)

Fig.1 Profile of circular foundation pit (Unit: mm)

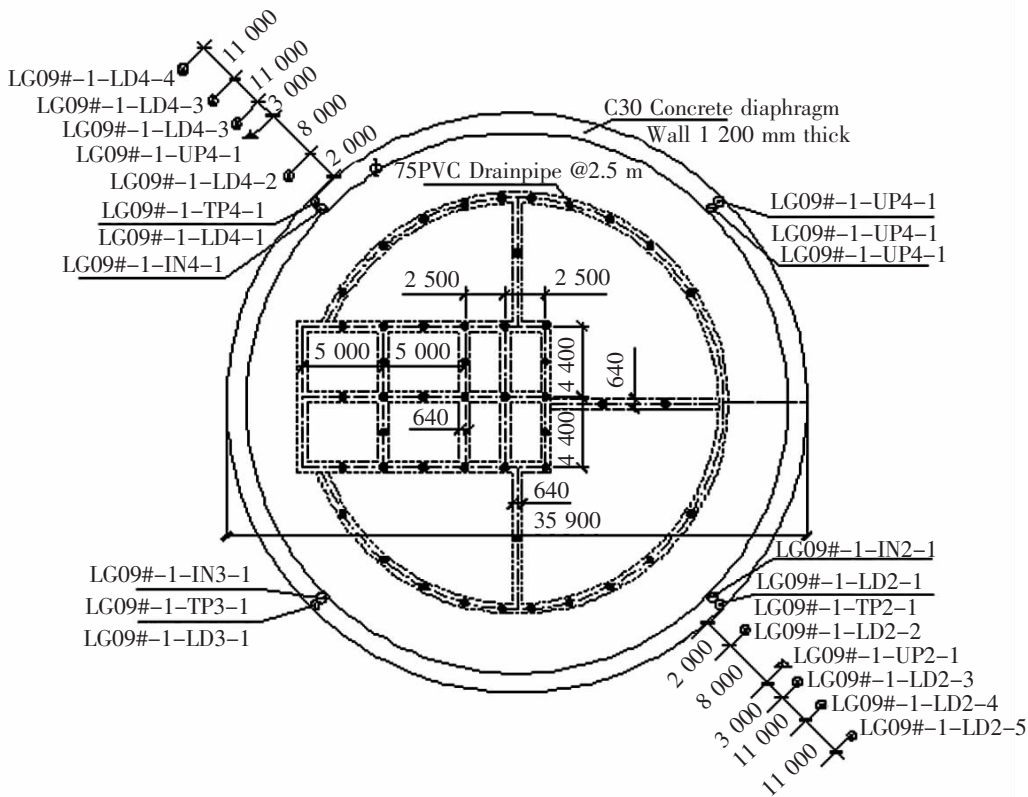


图 2 基坑降水井及监测点位布置图(单位:mm)

Fig.2 Layout of foundation pit dewatering well and monitoring points(Unit:mm)

施工前期地下水位于地下 4 m 处,由于前期基坑施工时降水,引起周围地层沉降,导致建筑物出现较大裂缝。目前,基坑已施工完毕。根据相关要求,现需将水位提升至原水位。水位上升过程中,基坑中隧道开挖工作面出现渗水状况。为保证基坑及周围建筑物安全,需对地下水水位上升时基坑抗浮进行验算。

2 数值分析

2.1 模型建立

采用 Plaxis 3D 软件对地下水渗流时基坑抗浮建模计算。为消除尺寸效应,取模型尺寸 X、Y 方向为基坑半径 5.5 倍(即 100 m),Z 方向为 90 m。土层共 8 层,从上往下依次为:人工填土、含淤泥质粉细砂、淤泥质黏土、含有机质粉质黏土、泥质细砂、强风化泥质粉砂岩、弱风化泥质粉砂岩。基坑底部建立降水井。地下连续墙及内衬墙按实际尺寸建立,并进行网格加密处理,模型底部及侧面约束位移,如图 3 所示。本模型仅考虑在围护结构

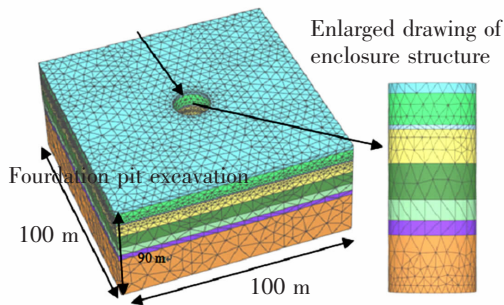


图 3 有限元计算模型图

Fig3 Finite element calculation model diagram

自重作用下基坑的抗浮能力,忽略墙体与地层之间的摩擦作用。

2.2 参数选取

因本模型主要分析基坑抗浮,故模型各土层采用摩尔—库伦材料模型,各结构均采用实体单元模拟。土层及结构参数根据相关地勘资料得出,如表 1 所示。

表1 计算参数
Tab.1 Calculation parameters

Soil layer	Elastic modulus /MPa	Poisson's ratio	Permeability coefficient / (cm/s)	Cohesion c /kPa	Internal friction angle / ($^{\circ}$)	Saturation gravity / (kN/m ³)	Natural gravity / (kN/m ³)	Thickness /m
Artificial fill	18	0.3	1×10^{-7}	8	15	19	18.2	3.5
Muddy silty fine sand	37	0.3	1×10^{-3}	8	23	18.9	18.5	10.82
Mucky clay	19	0.3	1×10^{-7}	4	10	18.6	17.6	1.4
Argillaceous medium fine sand	28	0.35	1×10^{-3}	5	23	20.5	19.1	12.3
Containing organic silty clay	31	0.3	1×10^{-7}	11	16	18.3	17.8	7.1
Argillaceous fine sand	42	0.28	1×10^{-3}	5	24	21.8	20.1	5.2
Strongly weathered argillaceous siltstone	800	0.27	1×10^{-8}	50	26	21.5	21	13.8
Weakly weathered argillaceous siltstone	12 000	0.25	1×10^{-21}	300	-	23.2	23.1	27.69
Enclosure structure	30 000	0.2	-	-	-	25	-	-

表2 监测及数值计算数据对比值
Tab.2 Comparison of monitoring and numerical calculation data

Water level depth/m	Field monitoring data		Numerical calculation data	
	Bottom water pressure/MPa	Settlement value/mm	Bottom water pressure/MPa	Settlement value /mm
-7.5	0.168	0.51	0.169 3	0.532
-7	0.171	0.44	0.170 4	0.392
-6.5	0.174	0.21	0.174 3	0.271
-6	0.177	0.13	0.177 2	0.136

2.3 模型正确性验证

基坑开挖通过Plaxis 3D中对某层土体的停用实现,地下连续墙及内衬墙施工通过启用及改变材料属性实现。以下各步骤均在地下水渗流情况下进行,且除步骤1),步骤5)外,降水井均持续降水。具体计算步骤如下:

- 1) 地应力平衡计算(即软件中重力加载计算);
- 2) 地下连续墙施工;
- 3) 模拟基坑开挖及施做内衬墙,根据现场实际施工进度,建立施工步骤;
- 4) 模拟基坑底板施工,该步骤完成后执行位移清零;
- 5) 降水井停止降水,地下水位回升至-6 m。

现场对基坑底部设置水压预警值为0.2 MPa,由监测与模型计算数据对比可知,如表2所示,现场监测数值与模型计算数值吻合,表明该数值模拟合理。

2.4 数值计算结果分析

为研究地下水位于原水位(-4 m)时基坑抗浮能力,将模型水位调整为-4 m。计算得出基坑整体上浮位移为0.251 mm,基坑底部所受水压为0.187 4 MPa,未超预警值。由此可知,该超深圆形基坑在围护结构自重作用下抗浮效果较好。

3 力学计算

由于地下水渗流过程中,不同渗透系数的地层

表 3 水压折减系数
Tab.3 Calculation parameters

Item	Water level depth/m				
	-6	-7	-8	-9	-10
Water pressure (hydrostatic state)/MPa	0.602 5	0.592 5	0.582 5	0.572 5	0.562 5
Numerical value/MPa	0.177 2	0.176 5	0.174 1	0.170 3	0.168 5
Reduction factor	0.294 1	0.297 3	0.298 3	0.296 9	0.299 0

会使地下水产生水头损失,故应按动水压力计算

$$q_{f_w,k}=\gamma_w h_w \eta_{f_w} \quad (1)$$

式中: $q_{f_w,k}$ 为构筑物基础底面上的浮力标准值, kN/m^3 ; γ_w 为水的重度, kN/m^3 ,可按 10 kN/m^3 采用; h_w 为地表水或地下水的最高水位至基础底面(不包括垫层)计算部位的距离, m ; η_{f_w} 为浮力折减系数。

本文通过已验证模型,计算当水位在-6,-7,-8,-9,-10 m 时基坑底部水压值。将数值计算及现场监测所得水压与静水压比值作为该地层地下水浮力折减系数,如表 3 所示。由现场监测值计算得折减系数为 0.293 8。为满足工程安全储备需求,需选取表 3 中折减系数的较大值。

取折减系数为

$$\eta_{f_w}=0.3$$

当水位上升至-4 m 时,取 $h_w=62.35 \text{ m}$ 。故:

$$q_{f_w,k}=\gamma_w h_w \eta_{f_w}=10 \text{ kN/m}^3 \times 62.35 \text{ m} \times 0.3=0.187 \text{ MPa}$$

基坑底部面积为 $S=1\ 011.72 \text{ m}^2$ 。故:

$$F_{f_w}=1.892 \times 10^5 \text{ kN}$$

取钢筋混凝土重度

$$\gamma=25 \text{ kN/m}^3$$

经计算的围护结构总体积 V 为

$$V=14\ 836.657 \text{ m}^3$$

故围护结构自重为

$$G_{f_w}=\gamma \times V=14\ 836.657 \text{ m}^3 \times 25 \text{ kN/m}^3 \\ =3.709\ 16 \times 10^5 \text{ kN}$$

$$P=\frac{G_{f_w}}{S}=\frac{3.709\ 16 \times 10^5 \text{ kN}}{1\ 011.72 \text{ m}^2}$$

故:

$$G_{f_w} > F_{f_w}$$

经计算得基坑围护结构自重 G_{f_w} 大于地下水浮力 F_{f_w} ,且基坑以其自重可承受 0.366 6 MPa 以内水压。

4 地层渗透系数影响分析

基于上述数值计算模型,分析相同水位下地层渗透系数对超深圆形基坑围护结构的影响。以基坑

围护结构底板所在土层为界线(即-50.62 m 处),分别考虑上部土层及下部土层不同渗透系数对围护结构的影响。设置工况如下:

工况一:当界线以下土层渗透系数不变时,上部土层整体增长 0%、10%、20%、30%、40%、50%、60% 时对基坑围护结构的影响分析。

工况二:当界线以上土层渗透系数不变时,下部土层整体增长 0%、10%、20%、30%、40%、50%、60% 时对基坑围护结构的影响分析。

图 4~图 6 分别为工况一下基坑围护结构水平位移曲线图,围护结构顶部沉降曲线图及底部水压曲线图。

由图 4 知:土层渗透系数增大 10% 时,对围护结构水平位移影响影响较小;增大 20% 时,围护结

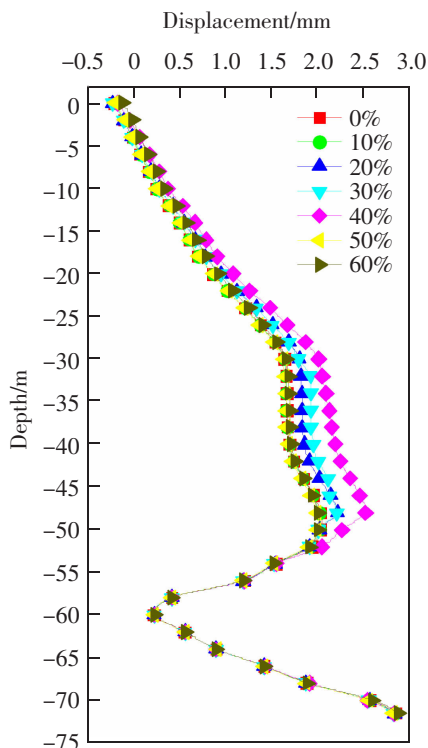


图 4 围护结构水平位移曲线图

Fig.4 Horizontal displacement curve of retaining structure

构水平位移值在 -50.62 m 以上影响较大,平均增长率为 7.3% ,其中在 -48 m 处增长率最大,为 9% 。 -50.62 m 以下位移无变化;增大 30% 时,与增大 20% 时影响范围相同。平均增长率为 9.5% ,其中在 -38 m 处增长率最大,为 15.5% ;增大 40% 时,影响范围同上,平均增长率为 19% ,其中在 -48 m 处增长率最大,为 24% ;增长 50% 、 60% 时对基坑围护结构影响较小。

由图5,图6知:土层渗透系数变化对基坑围护结构顶部沉降及底部水压影响较小。

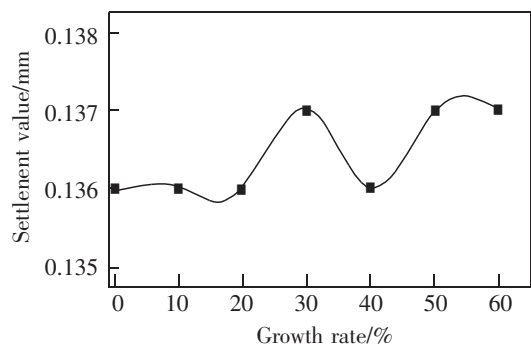


图5 围护结构顶部沉降曲线图

Fig.5 Top settlement curve of retaining structure

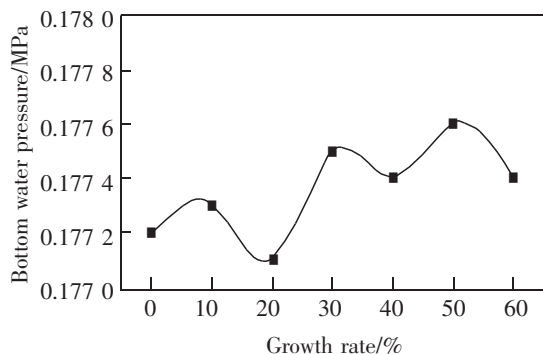


图6 基坑底部水压曲线图

Fig.6 Water pressure curve at the bottom of foundation pit

综上所述,上部土层渗透系数增长对围护结构侧面影响较大,对底部影响较小。

图7,图8分别为工况二下围护结构顶部沉降曲线图及底部水压曲线图。

据计算结果分析,界线以下土层渗透系数变化对基坑围护结构整体的水平位移无影响。

由图7可知,界线以下土层渗透系数变化对基坑围护结构顶部沉降值(即基坑上浮量)影响较大。土层渗透系数增大 10% 时,围护结构上浮量增加

4.6% ;增大 20% 时,上浮量增大 8.8% ;增大 30% 时,上浮量增大 11.5% ;增大 40% 时,上浮量增大 13% ;增大 50% 时,上浮量增大 14.3% ;增大 60% 时,上浮量增大 15.3% 。

由图8可知,界线以下土层渗透系数变化对基坑围护结构底部水压值影响较大。土层渗透系数增大 10% 时,基坑底部水压值增加 0.96% ;增大 20% 时,水压值增大 3.33% ;增大 30% 时,水压值增大 5.87% ;增大 40% 时,水压值增大 7.17% ;增大 50% 时,水压值增大 7.39% ;增大 60% 时,水压值增大 7.51% 。

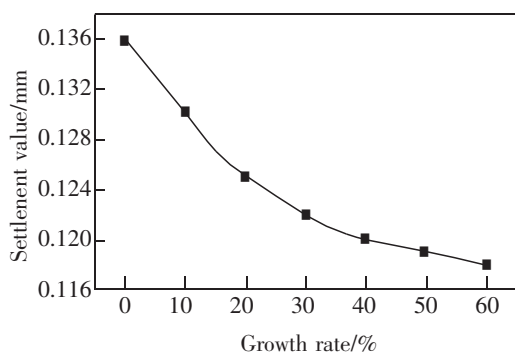


图7 围护结构顶部沉降曲线图

Fig.7 Top settlement curve of retaining structure

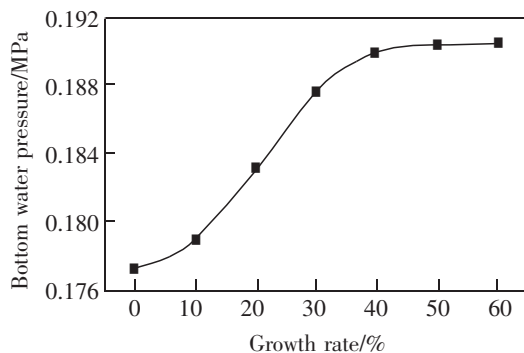


图8 基坑底部水压曲线图

Fig.8 Water pressure curve at the bottom of foundation pit

综上所述,上部土层渗透系数变化对围护结构侧面影响较大,对底部影响较小。下部土层渗透系数变化对围护结构侧面影响较小,对其围护结构上浮量及底部水压影响较大。

5 结论

本文依托某超深圆形基坑工程实例,采用理论及数值计算手段分析得出当水位回升至原水位时,

有以下结论:

1) 在不考虑地层与基坑围护结构间摩擦阻力的情况下,该超深圆形基坑可通过围护结构自重抵抗地下水浮力,且有一定的安全储备,现场施工可正常进行;

2) 该工程地层浮力折减系数约为0.3,可供类似工程参考;

3) 基坑围护结构周围土层的渗透系数对其水平位移影响较大,对其沉降及底部水压影响较小;

4) 基坑围护结构底部所在土层的渗透系数对其沉降及底部水压影响较大,相对其周围土层,底部土层渗透系数是影响围护结构上浮的主要因素。

参考文献:

- [1] 贾益纲,费逸,吴光宇,等. 某大型地下室结构上浮拱起工程事故分析与处理[J]. 施工技术,2016,45(16):48-52.
JIA Y G,FEI Y,WU G Y,et al. Analysis and treatment of a large-scale basement structure floating arch engineering accident[J]. Construction Technology,2016,45(16):48-52.
- [2] 李大浪,蔡飞,黄玉屏. 丘陵坡地地下室抗浮设计研究[J]. 有色冶金设计与研究,2016(2):34-37.
LI D L,CAI F,HUANG Y P. Research on anti-floating design of basement on hilly slopes[J]. Design and Research of Nonferrous Metallurgy,2016(2):34-37.
- [3] 谢敏,石小平,叶世建,等. 某商场地下室工程上浮事故分析及处理方案论证[J]. 基建优化,2001,33(3):43-47.
XIE M,SHI X P,YE S J,et al. Analysis of a shopping mall's basement project floating accident and treatment plan demonstration[J]. Infrastructure Optimization,2001,33(3):43-47.
- [4] 陈政治,马哲胜,詹红中,等. 地下建筑抗浮失效案例分析及处理[J]. 资源环境与工程,2009,2(23):47-51.
CHEN Z Z,MA Z S,ZHAN H Z,et al. Case analysis and treatment of anti-floating failure of underground buildings [J]. Resources Environment and Engineering,2009,2(23):47-51.
- [5] 万先逵,袁聪聪,黄展军,等. 某深厚软土地层基坑支护方案优化研究[J]. 华东交通大学学报,2020,37(5):47-52.
WAN X K,YUAN C C,HUANG Z J,et al. Study on optimization of foundation pit support scheme in a deep soft soil layer[J]. Journal of East China Jiaotong University,2020,37(5):47-52.
- [6] 董培鑫,杨浩军,阚生雷,等. 某中学基坑工程抗浮设计方
- 案优化分析[J]. 土工基础,2020,34(1):9-11.
DONG P X,YANG H J,KAN S L,et al. Optimization analysis of anti floating design scheme of foundation pit engineering in a middle school[J]. Geotechnical foundation,2020,34(1):9-11.
- [7] 张在明,孙保卫,徐宏声. 地下水赋存状态与渗流特征对基础抗浮的影响[J]. 土木工程学报,2001(1):73-78.
ZHANG Z M,SUN B W,XU H S. The influence of groundwater occurrence state and seepage characteristics on foundation anti-floating[J]. China Civil Engineering Journal,2001(1):73-78.
- [8] 曹洪,朱东风,骆冠勇,等. 临江地下结构抗浮计算方法研究[J]. 岩土力学,2017,38(10):2973-2979.
CAO H,ZHU D F,LUO G Y,et al. Research on anti-floating calculation method of underground structures along the river [J]. Rock and Soil Mechanics,2017,38(10):2973-2979.
- [9] 肖立. 大型 LNG 地下储罐受力变形试验及模拟研究[J]. 地下空间与工程学报,2020,16(S1):63-70.
XIAO L. Experimental and simulation study on stress and deformation of large-scale LNG underground storage tanks [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2020,16(S1):63-70.
- [10] 黄俊光,李健斌,秦泳生. 超深地下工程抗浮技术的探索 [J]. 建筑结构,2020,50(10):129-134.
HUANG J G,LI J B,QIN Y S. Exploration of anti-floating technology for ultra-deep underground engineering[J]. Building Structure,2020,50(10):129-134.
- [11] 鲁昂,阎钟巍,尤天直,等. 建筑地下室抗浮设计若干问题探讨[J]. 建筑结构,2017,47(S1):1142-1145.
LU A,YAN Z W,YOU T Z,et al. Discussion on several issues of anti-floating design of building basement[J]. Building Structure,2017,47(S1):1142-1145.
- [12] 李国胜. 地下室设计中水浮力问题的探讨[J]. 建筑结构,2018,48(18):117-123.
LI G S. Discussion on water buoyancy in basement design [J]. Building Structure,2018,48(18):117-123.
- [13] 贾朋涛. 无地下水场地基坑抗浮水位取值[J]. 工程设计与研究,2010(2):38-39.
JIA P T. Value of anti floating water level of foundation pit without groundwater[J]. Engineering design and research,2010(2):38-39.
- [14] 刘子洁,罗华. 地下室抗浮设计水位合理选择的方法实例[J]. 江苏建材,2011(3):26-28.
LIU Z J,LUO H. Method example of reasonable selection of anti floating design water level in basement[J]. Jiangsu Building Materials,2011(3):26-28.

- [15] 张竹庭. 地下水渗流对地下结构抗浮计算的影响分析[J]. 建筑施工, 2012(8):42-44.
ZHANG Z T. Influence analysis of groundwater seepage on anti floating calculation of underground structures[J]. Building construction, 2012(8):42-44.
- [16] 张国才. 坡地地下结构浮力计算方法研究与应用[D]. 广州:华南理工大学, 2010.
ZHANG G C. Study and application of calculation method for underground structure buoyancy in slope land[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2010.
- [17] 王帅. 基坑内地下水渗流机理与抗浮水头取值研究[D]. 青岛:青岛理工大学, 2017.
WANG S. Study on groundwater seepage mechanism and anti floating head in foundation pit[D]. Qingdao:Qingdao University of Technology, 2017.
- [18] 熊欢. 地下结构抗浮设计中浮力的研究[D]. 长沙:中南大学, 2013.
XIONG H. Study on buoyancy in anti floating design of underground structures[D]. Changsha:Central South University, 2013.
- [19] 江蝉辉, 赖有修. 运用井点降水和地面堆载处理地下室上浮一例[J]. 土工基础, 1999, 13(1):49-51.
JIANG C H, LAI Y X. An example of using well point precipitation and surface loading to deal with basement floating[J]. Geotechnical Foundation, 1999, 13(1):49-51.
- [20] 许加安, 周可贵. 土层锚杆在某抗浮工程中的应用[J]. 岩土工程界, 2004, 7(1):73-77.
XU J A, ZHOU K G. The application of soil anchor in a certain anti-floating project[J]. Geotechnical Engineering, 2004, 7(1):73-77.
- [21] 高嘉河, 杜有亮. 自撑式双排抗拔桩护壁工艺在人防工程中的应用[J]. 建筑技术, 1993, 20(3):140-143.

GAO J H, DU Y L. Application of self-supporting double-row anti-uptift pile wall protection technology in civil air defense engineering[J]. Construction Technology, 1993, 20(3):140-143.

- [22] 杨光华. 广东深基坑支护工程的发展及新挑战[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11):2276-2284.
YANG G H. Development and new challenges of Guangdong deep foundation pit support engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(11):2276-2284.



第一作者:陈昭阳(1995—),男,硕士研究生,研究方向为隧道与地下工程。E-mail:749122500@qq.com。



通信作者:李敏(1984—),男,高级工程师,研究方向为隧道与地下工程。E-mail:174276860@qq.com。

(责任编辑:姜红贵)