

膨胀土地区地下结构抗浮失效机理及主动抗浮措施应用

罗益斌, 陈继彬, 王媛媛, 沈攀

Anti-floating failure mechanism of underground structures in expansive soil area and application of active anti-floating measures

LUO Yibin, CHEN Jibin, WANG Yuanyuan, and SHEN Pan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202203008>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

膨胀土边坡非饱和渗流及渐进性破坏耦合分析

A coupling analysis of unsaturated seepage and progressive failure of an expansive soil slope

陈亮胜, 韦秉旭, 廖欢, 张寒冰 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 132-140

基于IPP图像处理的膨胀土微观结构定量研究

A quantitative study of microstructure of expansive soil based on IPP image processing

侯超群, 席瑶, 孙志彬, 高可可 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 156-156

含裂隙膨胀土无侧限抗压强度特征试验研究

An experimental study of the unconfined compressive strength characteristics of the expansive soil with cracks

李关洋, 顾凯, 王翔, 施斌 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 62-70

干湿过程中膨胀土最大剪切模量及其预测

The maximum shear modulus of expansive soil during wetting-drying processes and its prediction

陈伟, 孙德安, 张俊然 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 89-96

基于有限元软件自定义本构模型的膨胀土边坡降雨入渗分析

An analysis of rainfall infiltration of expansive soil slope based on the finite element software custom constitutive model

饶鸿, 王金淑, 赵志明, 吴光, 冯涛 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 154-162

武汉地区厚互层土中基坑抗突涌破坏评价方法研究

Study of evaluation method of anti-uprush stability of foundation pit with thick interbedded soil layers in Wuhan

熊宗海, 冯晓腊, 张红章, 范卫琴, 程华强 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 134-140



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202203008

罗益斌, 陈继彬, 王媛媛, 等. 膨胀土地区地下结构抗浮失效机理及主动抗浮措施应用 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 64-73.

LUO Yibin, CHEN Jibin, WANG Yuanyuan, *et al.* Anti-floating failure mechanism of underground structures in expansive soil area and application of active anti-floating measures[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 64-73.

膨胀土地区地下结构抗浮失效机理及 主动抗浮措施应用

罗益斌, 陈继彬, 王媛媛, 沈 攀

(中国建筑西南勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610052)

摘要: 膨胀土地层透水性弱、渗透性低, 一般被视为相对隔水层或隔水层, 其抗浮设防水位需综合考虑场地渗流特性、肥槽填料特性、水-结构相互作用而确定, 建筑工程抗浮设计问题素来棘手难解。本文依托成都膨胀土地区某商住楼地下室局部抗浮失效案例, 通过地下室渗漏水水源调查、基底地下水流量监测、排水系统排泄能力评价等方法, 认为地下室上浮属肥槽施工控制不当使高压水渗入抗水板底部进而导致水力学条件失衡造成的。基于此, 结合 FLAC^{3D} 有限差分法, 详细探讨了地下水浮力及膨胀土膨胀力作用下地下结构的力学行为特征。结合工程实际, 提出一种以“卸压”为主的地下室抗浮方法, 其理念是在底板开设卸压孔使地下水流动, 通过主动式泄排适量地下水来减小或消除水浮力, 并辅以观测及自动控制措施, 实现抗浮目的。工程监测结果表明, 流量及水头可控, 运行效果良好, 成本低廉。

关键词: 膨胀土; 地下结构; 抗浮失效; 主动抗浮措施

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)06-0064-10

Anti-floating failure mechanism of underground structures in expansive soil area and application of active anti-floating measures

LUO Yibin, CHEN Jibin, WANG Yuanyuan, SHEN Pan

(China Southwest Geotechnical Investigation & Design Institute Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610052, China)

Abstract: Expansive soil is a weakly permeable stratum with low permeability. It is generally regarded as a relative aquiclude or water resisting layer. Its anti-floating water level is needed to comprehensively consider the site seepage characteristics, fertilizer tank filler characteristics and water-structure interaction, which makes the anti-floating problem very prominent and difficult to deal with. Based on a building failure treatment case in the expansive soil area of Chengdu, through the investigation of the water leakage source of the basement, the monitoring of groundwater flow and the evaluation of the discharge capacity of the drainage system, it is considered that the basement floating is caused by the improper construction control of the fertilizer tank, which makes the high-pressure water penetrate into the bottom of the water resistant plate, resulting in the imbalance of hydraulic conditions. Combined with the FLAC^{3D} finite difference method, the mechanical behavior characteristics

收稿日期: 2022-03-03; 修订日期: 2022-06-15

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 中国建筑股份科技研发课题青年基金项目(CSCEC-2021-Q-64)

第一作者: 罗益斌(1989-), 男, 工程师, 工学学士, 主要从事岩土工程、地下结构抗浮工程研究。E-mail: 734472639@qq.com

通讯作者: 陈继彬(1987-), 男, 高级工程师, 工学博士, 主要从事岩土工程、城市特殊岩土研究。E-mail: weizhishuiyu@163.com

of underground structures under the action of groundwater buoyancy and expansive force are discussed in detail. Combined with the engineering practice, an anti-floating method based on "pressure relief" is proposed. The idea is to open a pressure relief hole in the bottom plate to make the groundwater flow and convert the hydrostatic pressure into kinetic energy without changing the groundwater level, and supplement observation and automatic control measures is carried out to achieve the purpose of anti-floating. The monitoring results of the project show that the flow and head are controllable and the operation cost is low.

Keywords: expansive soil; underground structures; drainage anti-floating failure; active anti floating

地下空间的开发利用已成为国家战略,以地铁、TOD综合体为代表的地下空间工程既深且大,建设过程中必然面临工程抗浮安全性的关键技术问题。如若抗浮措施不当或地下水作用预估不足,建筑物因抗浮措施失效便会事故频发,如内蒙古神华准能办公大楼地下室局部整体抗浮失效^[1]、广州市花都区某地下车库整体抗浮失效^[2]、长沙市某超大地下室局部抗浮失效^[3],这些事故均表明在既有抗浮措施和抗浮失效成因机制的分析上存在不足:首先设计概念中的抗浮设防水位并不是基于区域环境条件或预测峰值地下水水位而确定的^[4-6];其次抗浮措施仍以抗拔桩或抗拔锚杆等被动措施为主^[7],限于筋材本身的属性不能大幅提高其抗拔能力,反而常因施工捡底、节点处理和注浆效果等质量问题造成承载力的丧失。另外,抗浮失效事故发生后,对原有被动抗浮措施的修复繁琐且费用高^[2]。基于上述诸多事故和问题,众多学者采用室内试验、数值模拟等手段,针对平地地形、坡地地形、临江地形提出了对应的抗浮设防水位及水浮力计算方法^[7-10],并结合地下结构所在地层的强、弱透水特性及地层组合情况建议了相应的边界水头计算公式^[10]。同时,考虑土颗粒微观结构对水的影响及孔隙水作用效应提出了不同地层组合环境下水浮力折减规律^[11-13],形成了旋喷扩大头抗浮锚杆^[14]、伞状锚^[15]、GFRP混凝土抗拔桩^[16]等被动式抗浮技术和截排减压^[6-9]、疏排降压^[17]等主动式抗浮技术。

然而,作为典型弱透水层的膨胀土地基,地下水匮乏,以上层滞水为主,无稳定地下水水位,仅在极端天气或隔水措施不良时会发生地下水水位上涨,如按历史罕遇最高地下水水位开展抗浮设计则会使工程造价大幅上升,且最为重要的是其抗浮作用也不能得到充分利用。迄今为止,对于此类地层中地下结构上浮的变形特征、失效成因机制和完整的处置研究总结较少。本文以成都膨胀土地区某商住楼地下室局部抗浮失效工程为例,采用原位调查、测试监测和数值模拟等

手段,综合考虑场地渗流特性、肥槽填料特性、水-结构相互作用特性分析膨胀土地基地下结构抗浮失效成因。然后结合主动和被动抗浮措施的优劣,基于地下结构水动力行为特征提出一种以“排水卸压”理念为主的地下室主动抗浮方法,辅以观测及自动控制措施对其工程应用效果进行验证。研究成果是对抗浮设计理念的一次拓展和尝试,亦是为此类工程提供抗浮处置借鉴。

1 工程概况及场地条件

1.1 工程概况

建筑项目位于成都市成华区,由1栋33层超高层住宅、6栋1~3层别墅和2栋2~5层商业建筑组成。地下室整体为2层,包含独立基础、筏板和墙下条基。抗水板板厚为350 mm,配筋为双层双向12@150通长布置。抗浮设计采用地下水水位高程 -0.51 m ,原抗浮措施以封闭肥槽防止地表水及地下水的下渗为主,并在回槽底部设置排水盲沟来消除地下水产生的浮力,未采取其他抗浮措施。如图1所示。

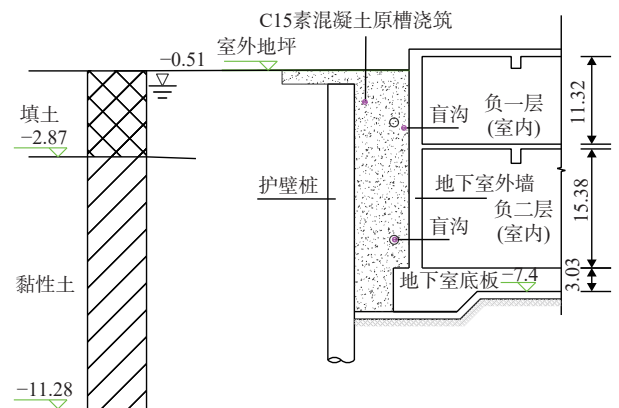


图1 建筑地下结构断面图(单位:m)

Fig. 1 Section of the underground building structure (unit: m)

1.2 场地工程地质、水文地质条件

研究区位于成都平原区三级阶地,地层从上至下依次为:第四系全新统人工填土层(Q_4^m)、第四系中下

更新统黏土层和含黏土卵石(Q_{1-2}^{gl})、白垩系中统灌口组全风化红层泥岩层(K_2g)。建筑物地下室底板位于基底以下第三层中(即含黏土卵石层),主要为缓倾裂隙较发育的可塑—硬塑黏土(典型的成都膨胀土),局部含粒径 5~10 cm 卵石,黏土自由膨胀率范围 40%~78%,岩土体物理力学参数如表 1 所示。

表 1 研究区岩土体物理力学参数
Table 1 Physical and mechanical parameters of rock and soil mass

岩土体类型	重度/ ($kN \cdot m^{-3}$)	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	黏聚力/ kPa	压缩模量/ MPa	渗透系数/ ($m \cdot d^{-1}$)
杂填土	19.0	8.0	8		0.2
黏土	20.0	6.0	15	5.0	2.5×10^{-3}
含黏土卵石	19.5	20.0	8		1.5
全风化泥岩	19.5	15.0	15	6.5	1.2

研究区地下水的主要补给源以北干渠为主。场地孔隙水主要分布于含黏土卵石层中,水位埋深 11.5~12.5 m,具有一定的承压性。根据邻近工程试验结果和经验,填土内存储有大量上层滞水,并补给基坑。下伏的膨胀土层、红层泥岩地下水匮乏,对基坑的补给能力弱,分布于含黏土卵石层中的孔隙型潜水对本工程影响较小。

2 事故成因分析

2.1 事故破坏情况分析

2019 年 7 月底因雨季降水导致地下水位升高,室内积水,后于 8 月初发现地下室负一、负二层抗水板后浇带、墙脚、梁跨中以及柱脚位置出现裂缝。其中,梁受损区域主要位于纯地下室与主楼交接处,梁端部与柱或剪力墙交界处明显受损破坏,大部分裂缝呈“U”型裂开,宽度 0.1~0.2 mm,部分为梁底或梁侧沿横截面方向轻微裂开,宽度小于 0.1 mm。另外,二次结构填充墙开裂现象严重,普遍为贯通斜裂缝。典型破坏现象示意图如图 2 所示。

基于险情的发生状态,在分析地下水赋存及径流存在可能性的基础上,采用现场调查、现场测试的方法查明地下室渗漏水来源,以明确膨胀土地基地下结构使用期抗浮失效成因。

2.2 肥槽排泄能力评价

在肥槽区域选择 2 处人工开挖探坑揭露肥槽回填情况,发现现场回填材料主要为混凝土块、砖头等建渣和现场原土,肥槽顶部 1~2 m 范围内为混凝土、黏性土混合物,向下建渣、砖块等硬杂质含量逐渐增加,为 30%~50%。场地架空层区域肥槽未进行全部回

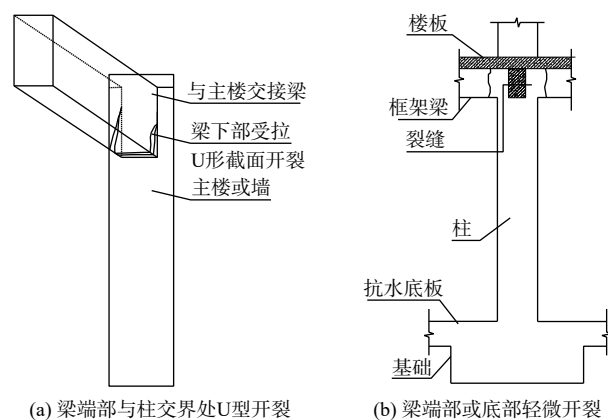


图 2 典型破坏现象示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the typical failure phenomena

填。探坑未发现混凝土及素填土夯实封填,亦未发现负一层盲沟。肥槽填料分层示意如图 3 所示。

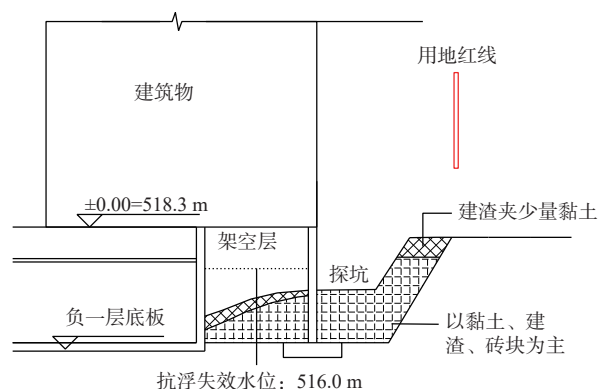


图 3 建筑地下室肥槽回填情况

Fig. 3 Backfilling of side wall of the building basement

2.2.1 肥槽渗透特性分析

对建筑外围均布的 4 口集水井进行了 8 次抽水试验,监测地下室不同区域 4 个泄水孔地下水流量,以评价肥槽排泄能力。集水井内部尺寸为 1.8 m×2.2 m,井底标高约与基底齐平,井顶部标高均略高于室外地面,井深约 8 m。集水井水位埋深分别为 5.68 m (I)、3.09 m (II)、5.6 m (III) 和 4.1 m (IV)。

试验时,每次抽排 4 口集水井 24 h,停抽后采用 2 L 量筒量取泄水孔 3 min 的出水量,量测 3 次取平均值;重复上述步骤 8 次。于此同时,在场地肥槽不同位置进行 8 点单环渗透试验(图 4),试验采用直径 30 cm、高 50 cm 的 PVC 嵌入肥槽 5 cm,瞬间注满水后下渗每 2 min 计读水位 1 次。泄水孔涌水量-抽排次数曲线见图 5,现场渗透试验结果见表 2。

由图 5 可见,抽水试验后,场地北、南、东三侧地下室泄压孔(②、③、④)涌水量匀加速下降,在抽排

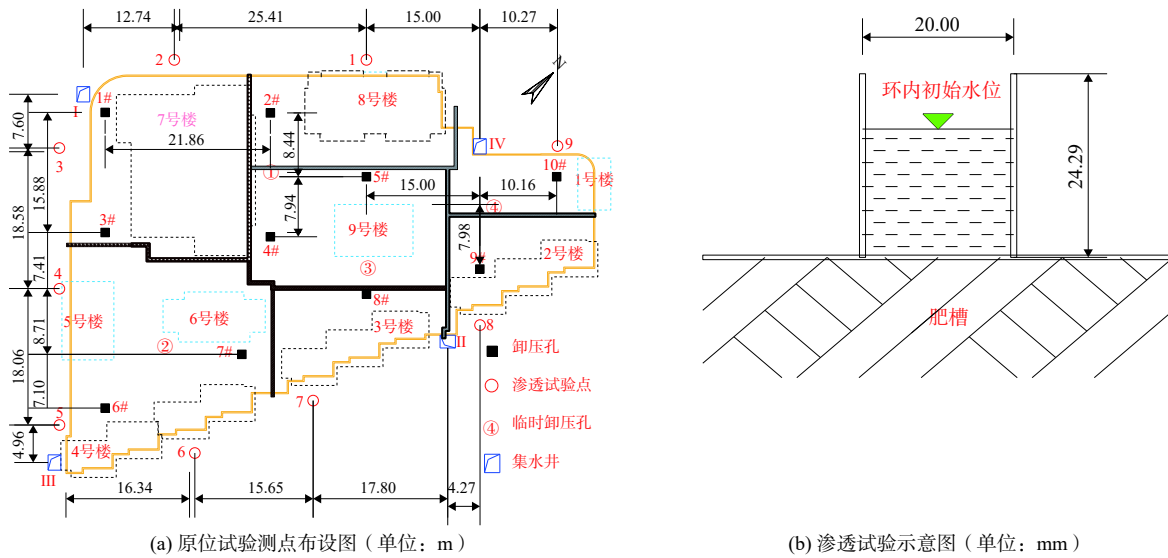


图 4 原位试验布设点
Fig. 4 Location of in-situ test

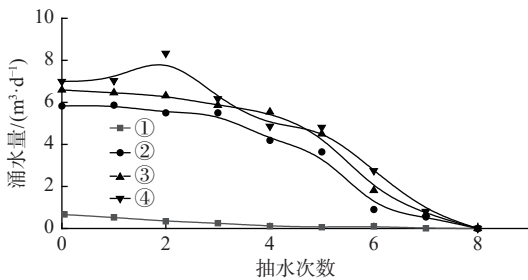


图 5 泄水孔涌水量-抽排次数曲线
Fig. 5 Discharge of water inflow hole vs pumping times

表 2 现场渗透试验结果

Table 2 Field penetration test results

渗透点编号	$K/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$			$K_{\text{均值}}/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$
1	0.754	0.858	0.639	0.750
2	1.529	1.334	1.910	1.591
3	0.692	0.403	0.051	0.382
4	8.222	8.249	8.168	8.213
5	7.584	7.320	7.584	7.496
6	7.019	7.019	7.019	7.019
7	9.310	9.022	9.897	9.076
8	6.273	6.153	6.095	6.174
9	10.26	10.28	10.19	10.243

注: 考虑到渗透试验初始状态对入渗影响较大, 在处理时采用试验结束时阶段数据进行从后往前逐段累加处理, 分别求得不同渗透系数 K_i 。

期间无降雨补给的情况下, 从最大的 $5.9 \text{ m}^3/\text{d}$ 下降到 $0.03 \text{ m}^3/\text{d}$; 但西侧①泄水孔涌水量几近不变, 在 $0.5 \sim 0.3 \text{ m}^3/\text{d}$ 波动。这与场地肥槽各区域渗透系数差异较大直接相关(表 2), 说明地下室底板涌水主要为基坑肥槽下渗的地下水, 涌水量取决于基坑肥槽的积水量。

2.2.2 降雨对肥槽入渗影响

据统计, 2019 年总降雨量为 763 mm , 项目抗浮措施失效前(6 月至 7 月)的总降雨量为 326.9 mm 。考虑到工程开挖红线位置外设置有围挡, 且回填后的肥槽相对开挖线以外地势相对较低, 汇水面积取开挖红线围成的面积, 即 $S_{\text{汇}}=12\ 690 \text{ m}^2$ 。因肥槽位置地势相对较低, 且肥槽表面未设置有止水处理措施, 因此取降雨入渗率 $\lambda=1$ 。以此计算得到 2019 年降雨入渗量为 $Q=\lambda PS_{\text{汇}}=4\ 136.94 \text{ m}^4$ 。

按照等流量原则, 不考虑集水井抽水排泄, 可按式(1)计算肥槽水位的上升高度 ΔH :

$$\Delta H = \frac{Q}{nS} = \frac{\lambda PS_{\text{汇水}}}{nS} \quad (1)$$

式中: Q ——降雨入渗量/ $(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$;

S ——肥槽水平面面积/ m^2 ;

$S_{\text{汇水}}$ ——汇水面积/ m^2 ;

n ——孔隙率;

λ ——降雨入渗率;

P ——设计暴雨量/ m 。

当负二层地下室肥槽区域全部淹没时降雨量 P 为 0.133 m (负二层肥槽储水量 $1\ 690 \text{ m}^3$ 与场地汇水面积 $12\ 690 \text{ m}^2$ 比值), 由于 2 层地下室肥槽面积不同, 计算降雨量与水位高度时需要分段考虑, 以负二层地下室肥槽被全部淹没时的降雨量 0.133 m 为计算分界点。通过现场调查得出负二层区域肥槽面积约为 $S_{-2\text{F}}=1\ 300 \text{ m}^2$, 负一层区域肥槽面积约为 $S_{-1\text{F}}=1\ 500 \text{ m}^2$, 肥槽填土空隙率 $V_c=0.4$, 通过计算得出肥槽汇水高度

ΔH 可表示为:

$$\Delta H = \begin{cases} \frac{PS_{\text{汇水}}}{V_c S_{-2F}}; & P \leq 0.133 \text{ m} \\ \frac{(P-0.133) S_{\text{汇水}}}{V_c S_{-1F}} + 3.25; & P > 0.133 \text{ m} \end{cases} \quad (2)$$

以此计算得肥槽汇水高度 $\Delta H=7.35 \text{ m}$, 换算为地下水水位绝对标高为 516.25 m , 与 7 月底抗浮失效时集水井水位(约 516 m)相当。由此表明, 降雨量基本是地下水渗漏的补给量, 是地下水渗漏的水源或水源之一。

2.3 地下室渗漏水水源其他补给源

结合场地水文地质和气候条件, 以抗浮失效时建筑集水井水位(516 m)为判断依据, 进一步对稳定地下水、上层滞水、远端地表水可能产生的流量进行验算, 以确定可能存在的补给水源。

①场地地下水潜水稳定水位埋深标高 $505.20 \sim 506.05 \text{ m}$, 低于基础底部且位于膨胀土层内, 很难作为水源补给地下室渗漏水。该判断符合膨胀土地区的基本特征, 因为膨胀土层属于渗透性极弱的地层, 一般作为相对隔水层或隔水层, 其内很难形成稳定的统一地下水位, 且大部分土体处于非饱和状态, 很难补给地下室渗漏水。

②远端地表水以场地附近北干渠为主, 其他堰塘随着人为活动的改造已经消失, 渠面采用混凝土处理且与场地间距约 30 m , 基本为原貌, 两者之间区域填土较薄, 水源通过渠底、堤身裂隙及伸缩缝等补给基坑的能力较弱, 补给量微小。

③场地表层为填土层, 存在一定的上层滞水, 以考虑最不利工况来计算最大补给能力。假定上层滞水在填土层内全范围分布, 并向基坑内补给, 补给断面面积为基坑周长 \times 水位上填土层厚度= $400 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} =$

200 m^2 。补给水力梯度=(坑内水头-坑外水头)/间距= $(2-0) \text{ m}/1.2 \text{ m}=1.67$ 。根据达西定律, 取填土层渗透系数 0.2 m/d (表 1), 计算得到单位时间上层滞水对基坑内的最大补给量为 600 m^3 。如果用于补给肥槽, 据式(1)计算, 将导致肥槽水位上升 $0.3 \sim 0.4 \text{ m}$ 。由此表明, 上层滞水对地下室渗漏水有一定的补给量, 但补给能力有限。

2.4 事故成因机理分析

通过对地下水不同补给来源的简化分析, 得到降雨、稳定地下水、远端地表水、填土层上层滞水补给量分别为 $12\,690 \text{ m}^3$ 、微弱、微弱、 600 m^3 , 降雨影响肥槽水位 7.35 m , 计算结果可作为定性分析的依据。结果表明, 降雨(已储存在肥槽中)是最主要的补给来源, 上层滞水有一定的补给, 膨胀土层、远端地表水的补给微弱。统计结果见表 3。

表 3 肥槽积水补给来源水量计算汇总表

Table 3 Calculation summary of water supply source of fertilizer tank

补给来源	简化计算补给量/ m^3	对肥槽水位的影响/ m	补给方式
降雨	12 690	7.35	直接补给肥槽
膨胀土层地下水	微弱	微弱	
远端地表水(北干支渠)	微弱	微弱	通过膨胀土层或填土层径流补给
上层滞水	600	0.3 ~ 0.4	直接补给肥槽

由此可见, 本例中膨胀土地区地下结构抗浮失效主要是因为降雨汇集后通过肥槽入渗而导致。失效原因简图见图 6。因肥槽回填质量差(含未回填现象), 导致肥槽的渗透性强且储水量大, 加上施工期内肥槽表面未及时进行封闭处理, 导致降雨大量入渗, 协同填土层中的上层滞水进一步加大了肥槽的积水

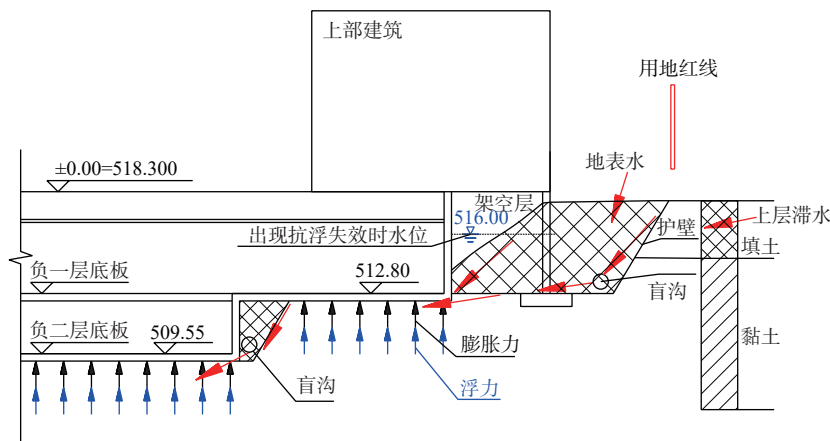


图 6 地下室上浮失效原因简图(单位: m)

Fig. 6 Failure reason diagram of basement floating (unit: m)

量。雨水进入肥槽后,由于膨胀土层的渗透性低(相对隔水层),不能自然排泄,而设计的肥槽内地下盲沟+集水井抽排系统失效且未及时抽排,导致肥槽内的水位逐渐提高,水压力逐渐增大。高压水加快了地下水沿着结构体与地基土之间的缝隙、膨胀土微裂隙逐渐进入抗水板底部,一方面对抗水板产生水压力,另一方面逐渐向非饱和膨胀土地基入渗。随着入渗深度及入渗量的逐渐增大,膨胀土地基产生越来越大的膨胀力,作用于地下室底板。共同作用下的水压力及膨胀力大于抗水板设计强度,从而导致抗水板隆起开裂。

3 地下结构的力学行为特征

3.1 模型的建立

采用三维有限差分软件(FLAC^{3D})^[18]模拟计算地下水浮力及膨胀土膨胀力作用下地下建筑结构的力学行为,分析工程结构物的受力状态,以提供更好的抗浮事故处置措施。所建模型如图7所示,模型尺寸120 m×60 m×105 m,模型底部为黏性土层与基岩的分界面,其上为填土层。本模型重点分析基底反力作用下地下室底板的整体力学行为,对抗水板的网格尺寸进行加密处理,上部建筑采用映射法对网格尺寸进行放大,以提升计算速率。本模型的单元均采用六面体形式,模型共有单元7万余个,节点8万余个。

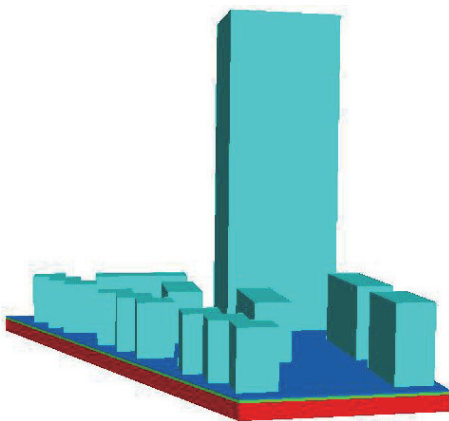


图7 计算模型

Fig. 7 Computational model

注:地层从下到上依次为黏性土层、填土层和地表回填土。

模型均采用实体单元,本构关系为弹塑性,模型的4个侧面及底部设置法向约束边界,岩土体物理力学参数参见表1,肥槽及结构参数参见表4。

3.2 外荷载施加

(1)地下水浮力

地下水浮力的计算分为以下2步:

表4 结构体物理力学参数

Table 4 Physical and mechanical parameters of structure

内容	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	体积模量/ MPa	剪切模量/ MPa
素混凝土垫层	1870	16.65	13.30	4.04	1.76
抗水板	1830	10.87	17.74	3.73	1.53
建筑体	1910	11.98	20.37	4.51	2.08

①前已述及,降雨入渗产生肥槽汇水高度 $\Delta H=7.35\text{ m}$,换算为水位标高为516.25 m;上层滞水对肥槽的最大补给量约为 600 m^3 ,肥槽水位可提升 $0.3\sim 0.4\text{ m}$ 。故总水位按 7.75 m 计。

②由于膨胀土的隔水作用,场地内地下水浮力为典型的盆式模型,可不考虑地下水径流衰减的影响。以此可确定地下水的浮力为地下室抗水板底部受到的静水压力之和,即 $P=\gamma_w\Delta H=76.03\text{ kPa}$ 。

(2)膨胀土膨胀力

根据规范GB 50112—2013^[19]的建议方法,在地下室开孔,采用洛阳铲钻土取芯,酒精法测试土体含水率,测试间距 20 cm ,测试土体深度 3 m 。得到地基黏性土不同深度的含水率,如图8所示。经计算得到超高层建筑下部抗水板的膨胀力荷载为 28 kPa ,多层建筑为 24 kPa ,其余地段处为 18 kPa 。

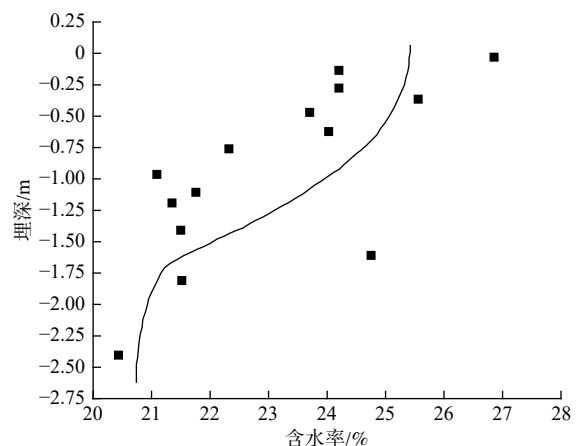


图8 基底不同深度膨胀土含水率

Fig. 8 Water content of expansive soil at different depths of the base

3.3 计算结果分析

(1)基底反力作用下的整体力学行为分析

模型竖直方向(z 方向)的初始应力如图9(a)所示。从图中可以看出,初始应力从上自下逐渐增大,由于地形平坦,应力等值线也基本水平。在抗水板底部施加的膨胀应力和地下水上浮力作用下,33层超高层处的抗水板隆起变形最小,北侧4-1号楼及4-2号

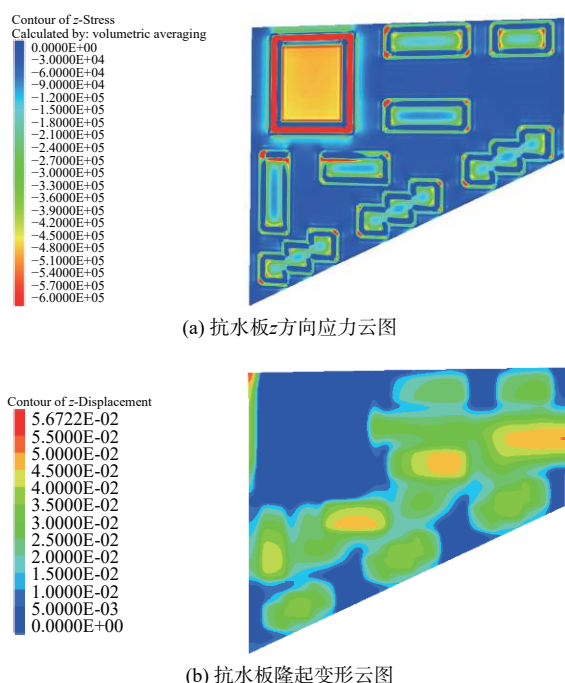


图 9 基底反力作用下的整体力学计算结果

Fig. 9 Mechanical calculation results under the base reaction

楼之间的隆起变形最大, 见图 9(b), 最大值为 5.7 cm。现场调查表明, 本区裂缝发育。

(2) 基底反力作用下的局部力学行为分析

整体力学行为不能表达细部位置的力学行为及

力学状态, 进一步结合现场调查的裂隙分布特征, 选取 4 个细部位置进行详细分析: ①如图 10(a)所示, 33 层超高层剪力墙边缘模型(含剪力墙 2 个, 柱 2 个); ②如图 10(b)所示, 多层柱边缘模型(2 个柱、1 个剪力墙及对侧 2 个柱); ③如图 10(c)所示, 最大柱间跨度 8 m 模型; ④如图 10(d)所示, 负一层和负二层地下室边界模型。建立模型对应的工程位置、计算结果如图 10 所示。局部力学计算结果均表明剪力墙和柱的跨中位置变形最大, 如图 10(a) ~ (d)变形分别为 5.7, 4, 3, 3.3 cm, 柱脚处的变形次之, 剪力墙脚的变形最小。跨中位置的大位移可能导致抗水板受拉, 产生拉裂缝。同时可见, 模型底部 z 方向应力约为 0.1 MPa, 剪力墙墙脚及柱脚附近的应力集中。由于剪力墙上部荷载更大, 应力集中程度最高, 为柱脚应力的 2 ~ 3 倍。

4 排水卸压设计方案及效果分析

4.1 排水卸压设计方案

本工程采用排水卸压主动抗浮措施, 理由是: ①抗浮失效是由于肥槽施工质量控制不佳致使雨季降雨入渗, 受季节和天气影响显著, 当地下水位超过常水位以上时排水卸压即可; ②底板下分布有较厚的

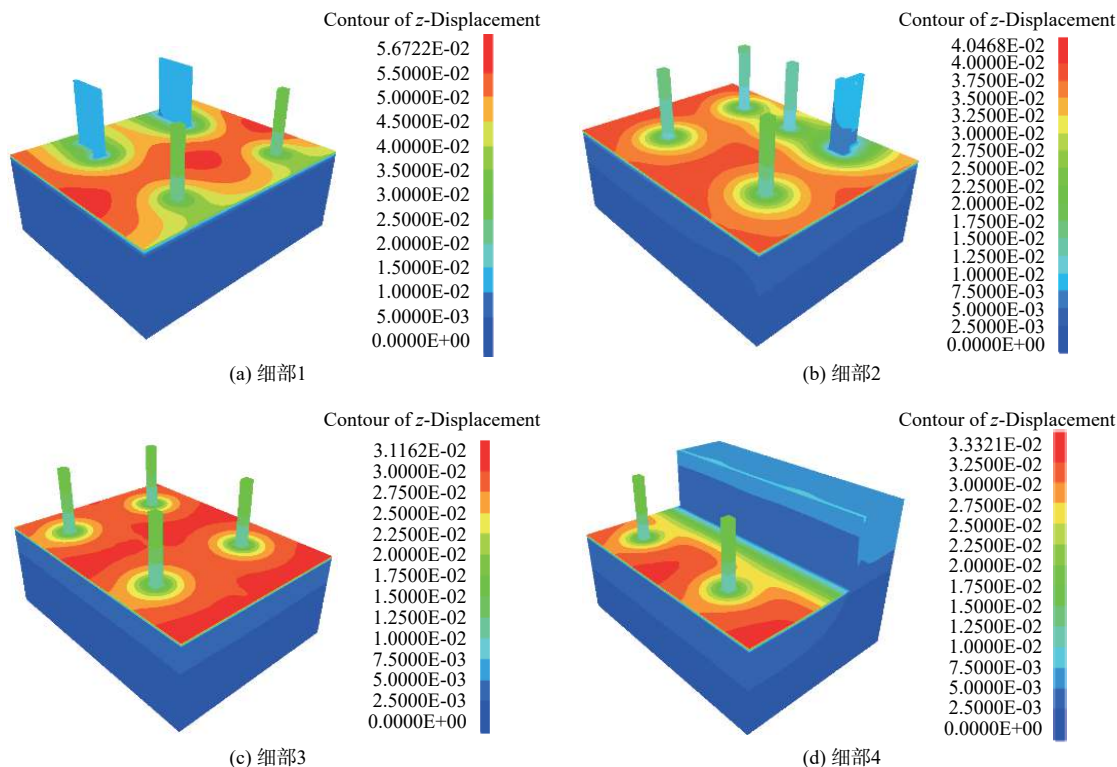


图 10 基底反力作用下的局部力学计算结果

Fig. 10 Local mechanical calculation results under the base reaction

黏性土层,是天然的隔水屏障,这对截水有利;③既有建筑集排水井/沟互畅通;④设计理念是在底板开设卸压孔使地下水流动,通过主动式泄排适量地下水来减小或消除水浮力。

超高层建筑剪力墙墙脚、多层建筑剪力墙墙脚、负二层地下室边墙墙脚和普通立柱柱脚这些位置易产生剪切裂缝;抗水板跨中变形最大,抗水板的7号楼(33层超高层)边缘剪力墙附近、2号楼之间、8号楼与9号楼之间的裂缝验算宽度相对较大,最易开裂。这些部位是排水卸压方案设计时应明确的目标。

4.2 卸压措施构造及设计参数确定

利用排水管将地下水与集水井进行联通,对于既有加固项目,卸压点应邻近集水坑布置,综合考虑地下室结构,不影响地下室原有功能使用,卸压措施构造如图11所示。另外,卸压孔内应设置反滤材料,反滤层渗透性大于被保护土体,能通畅地排出地下水。

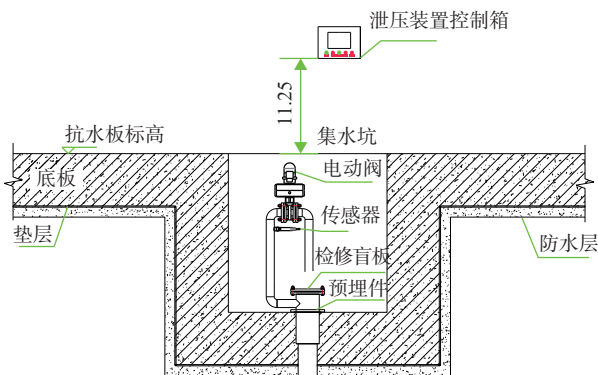


图 11 排水卸压措施构造大样图

Fig. 11 Structural detail

据规范 JGJ120-2012^[20] 确定主要设计参数:

①卸压点数量 N :

$$N \geq \frac{kQ'}{q} \quad (3)$$

②场地总入渗量 Q' 考虑肥槽暴雨时入渗水量:

$$Q' = \lambda_y \varphi P' S_{\text{汇水}} \quad (4)$$

③卸压点布置间距 r 可由卸压点附近的承压水水头分布曲线结合底板所能承受的最大安全水头确定:

$$h = (H - h_0) \frac{\ln\left(\frac{r}{r_w}\right)}{\ln\left(\frac{R}{r_w}\right)} \quad (5)$$

上述各式参数释义及取值如表5所示。

考虑到抗水板底水位超过1.5m后(本项目而言为地面±0m以下5.9m)原抗浮措施失效,需采用主动

表 5 排水卸压措施基本设计参数

Table 5 Basic design parameters of the drainage and pressure relief measures

参量名称	符号	建议取值
安全系数	k	1.4
潜水含水层厚度	H	8.5 m
卸压降水影响半径	R	210 m
卸压水位降深	h_0	7 m
单个卸压点排水能力	q	100 m ³ /d
肥槽入渗系数	λ_y	0.2
地表径流系数	φ	0.5
设计暴雨强度	P'	700 mm/d
汇水面积	$S_{\text{汇水}}$	12 690 m ²
泄压孔半径	r_w	0.053 m

抗浮措施,依此计算得到:场地总水量 $Q'=907.2 \text{ m}^3/\text{d}$,卸压点数量 $N \geq 13$,卸压点布置间距 $r=30 \text{ m}$ 。

4.3 实施效果分析

根据分析结果,卸压点布设如图5所示。施工分为排水卸压孔成孔、引流管道安装、智控箱安装及调试。

自2019年12月施工完毕,当水压力超过5.9m时(地面±0m以下),启动排水卸压,控制板底水压力。该系统一直稳定运行,期间对卸压孔(1#、2#、4#、6#、9#)底板压力水头保持观测(图12)。监测结果显示各点位水头低于设计抗浮设防水位,主动抗浮措施处置效果显著。

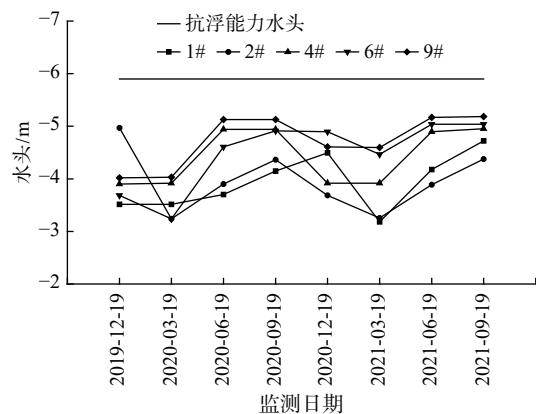


图 12 测压管水头高度监测曲线

Fig. 12 Observation curve of the hydraulic heads of piezometric tubes

5 结论

(1)膨胀土地区地下室上浮主要是降雨随肥槽入渗后未能及时排泄,导致水压力直接作用于抗水板;同时地下水向非饱和膨胀土地基入渗后产生膨胀力。共同作用下的地下水压力及膨胀力大于抗水板

设计强度,导致抗水板隆起开裂。

(2)在水浮力及膨胀力的作用下,结构转折端和墙柱脚处易出现应力集中现象,上部荷载越大,应力集中程度越高;跨中位置的变形较大,特别是跨中为后浇带时,变形则更明显。

(3)考虑压重和抗浮锚杆等被动抗浮措施会损坏既有建筑结构顶底板,利用既有排水沟和集水井,提出通过底板卸压孔主动式泄排适量地下水来减小或消除水浮力的地下室抗浮方法,无需再增设管道设施且可智能管控,抗浮加固效果明显。

参考文献 (References) :

- [1] 于贵,李星,舒中文,等.高层建筑地下室上浮变形特征及处置措施研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(1):211-218. [YU Gui, LI Xing, SHU Zhongwen, et al. Research on floating deformation characteristics and treatment measures of high-rise building basement[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(1): 211 - 218. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 朱东风,曹洪,骆冠勇,等.截排减压抗浮系统在抗浮事故处理中的应用[J].岩土工程学报,2018,40(9):1746-1752. [ZHU Dongfeng, CAO Hong, LUO Guanyong, et al. Application of interception and drainage anti-floating system in treatment of uplift accidents[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(9): 1746 - 1752. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 王海东,罗雨佳.超大地下室施工期抗浮破坏机理分析与应对思考[J].铁道科学与工程学报,2019,16(10):2538-2546. [WANG Haidong, LUO Yujia. Analysis of the mechanism of anti-floating damage and its countermeasures during construction period of oversized underground garage[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(10): 2538 - 2546. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 崔虎群,李文鹏,康卫东,等.黑河中游不同灌溉方式下地下水入渗补给特征研究[J].水文地质工程地质,2022,49(3):22-28. [CUI Huqun, LI Wenpeng, KANG Weidong, et al. A study of groundwater recharge under different irrigation conditions in the middle reaches of the Heihe River[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(3): 22 - 28. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 张晨晨,黄翀,何云,等.黄河三角洲浅层地下水埋深动态与降水的时空响应关系[J].水文地质工程地质,2020,47(5):21-30. [ZHANG Chenchen, HUANG Chong, HE Yun, et al. An analysis of the space-time patterns of precipitation-shallow groundwater depth interactions in the Yellow River Delta[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(5): 21 - 30. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑工程抗浮技术标准:JGJ 476—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for building engineering against uplift: JGJ 476—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)]
- [7] 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 Junguang, LI Jianbin, QIN Yongsheng. Exploration of anti-floating technology for super-deep underground structures[J]. Building Structure, 2020, 50(10): 129 - 134. (in Chinese with English abstract)]
- [8] XIAO Y P, CAO H, LUO G Y, et al. Modelling seepage flow near the pipe tip[J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(7): 1953 - 1966.
- [9] 骆冠勇,马铭骏,曹洪,等.临江地下结构主被动联合抗浮方法及应用[J].岩土力学,2020,41(11):3730-3739. [LUO Guanyong, MA Mingjun, CAO Hong, et al. A new anti-float method for riverside underground structures: drainage corridor combined with uplift piles or uplift anchors[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(11): 3730 - 3739. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 朱东风.地下结构截排减压抗浮法渗控关键问题研究[D].广州:华南理工大学,2019. [ZHU Dongfeng. A study on seepage control issues of anti-uplift method for underground structures based on intercepting and discharging water[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [11] NI P P, KANG X, SONG L H, et al. Model tests of buoyant force on underground structures[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2019, 47(2). DOI: 10.1520/JTE20170017.
- [12] 陆启贤.土中孔压传递规律及水浮力折减机理研究[D].南宁:广西大学,2019. [LU Qixian. Study on pore pressure transfer rule and water buoyancy reduction mechanism[D]. Nanning: Guangxi University, 2019. (in Chinese with English abstract)]

- [13] 木林隆,王乐,李杰,等. 地下结构对地下水渗流场水位改变的数值分析[J]. 土木工程学报, 2019, 52(增刊 1): 78 - 84. [MU Linlong, WANG Le, LI Jie, et al. Numerical analysis of influence of the underground structure on seepage[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(Sup 1): 78 - 84. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 王新,康景文. 成都地区卵石层抗浮锚杆的设计方法探讨[J]. 四川建筑科学研究, 2012, 38(6): 131 - 134. [WANG Xin, KANG Jingwen. Discussion on design method for anti-float anchor at pebble soil in Chengdu[J]. Sichuan Building Science, 2012, 38(6): 131 - 134. (in Chinese with English abstract)]
- [15] ZHU H H, MEI G X, XU M, et al. Experimental and numerical investigation of uplift behavior of umbrella-shaped ground anchor[J]. Geomechanics and Engineering, 2014, 7(2): 165 - 181.
- [16] ZHANG C C, ZHU H H, XU Q, et al. Time-dependent pullout behavior of glass fiber reinforced polymer (GFRP) soil nail in sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(6): 671 - 681.
- [17] 梅国雄,宋林辉. 地下结构抗浮理论与技术应用[M]. 北京: 科学出版社, 2019. [MEI Guoxiong, SONG Linhui. Anti floating theory and technical application of underground structures[M]. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese)]
- [18] 孙书伟,林杭,任连伟. FLAC3D在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011. [SUN Shuwei, LIN Hang, REN Lianwei. Application of FLAC3D in geotechnical engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2011. (in Chinese)]
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 膨胀土地区建筑技术规范: GB 50112—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for building in expansive soil regions: GB 50112—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)]
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations: JGJ 120—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)]

编辑: 张明霞