

青岛星雨华府基坑抗浮锚杆方案设计与优化

王绪勇¹, 杨 蕾², 王会军¹, 管洪博¹, 盛兆旺¹

(1. 青岛地矿岩土工程有限公司, 山东 青岛 266000; 2. 青岛国立设计有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要: 抗浮锚杆是建筑工程中控制地下水浮力的重要技术。结合青岛星雨华府北区下沉广场基坑抗浮锚杆工程, 基于现有抗浮锚杆设计理论进行了初步方案设计, 并运用 FLAC^{3D} 开展了数值模拟试验, 分析了在结构荷载、地下水浮力和锚杆共同作用下基坑底板的受力和变形。在综合考虑受力和施工成本的情况下, 得到了抗浮锚杆优化方案。

关键词: 基坑工程; 地下水浮力; 抗浮锚杆; FLAC^{3D}; 数值模拟; 方案优化

中图分类号: TU473 **文献标识码:** B **文章编号:** 1672-7428(2020)01-0075-06

Design and optimization of the anti-floating anchor bolt for a foundation pit project in Qingdao

WANG Xuyong¹, YANG Lei², WANG Huijun¹, GUAN Hongbo¹, SHENG Zhaowang¹

(1. Qingdao Geologic and Mineral Geotechnical Engineering Co., Ltd., Qingdao Shandong 266000, China;

2. Qingdao Golive Design Co., Ltd., Qingdao Shandong 266000, China)

Abstract: The anti-floating anchor bolt is an important technique to control groundwater buoyancy in construction works. The anti-floating anchor bolt project for the underground square foundation pit in north Xingyuhuaifu in Qingdao was taken as the research object. The preliminary design was carried out based on the existing anti-floating anchor design theory, and the numerical simulation test was carried out using FLAC^{3D}. The stress and deformation of the foundation pit floor under the combined action of structural loads, underground water buoyancy and anchor bolts were analyzed. The optimization scheme for anti-floating anchor bolts was obtained through trade off of the loading conditions and construction cost.

Key words: foundation pit; underground water buoyancy; anti-floating anchor bolt; FLAC^{3D}; numerical simulation; scheme optimization

0 引言

在一些地下水位较高或沿海地区的建筑工程结构当中, 地下水浮力容易对建筑工程结构的稳定性产生影响^[1-3]。在很多地下空间项目中, 地下结构常常被地下水浮力破坏^[4]。常采用的抗浮方法有: 降排截水法、压重法、抗拔桩法等^[5-6]。近些年, 主要用于地下支护结构的锚杆也越来越多的被用来处理地下水浮力问题^[7-9]。抗浮锚杆是一种设置在岩土体中的竖向受力结构, 其顶部通过钢筋和基础防水板或基础连接, 底部通过岩土锚固力将作用于基础防水板上的浮力传递给地层^[10]。抗浮锚杆具有地层适应性强、单点受力小、施工方法简便、工期短、

造价低等优点, 在工程中应用广泛^[11-13]。

但是目前抗浮锚杆的方案设计主要以规范和经验类比法为主, 相对较为粗糙, 多数情况偏于保守。数值模拟方法现在被广泛应用于工程支护方案的优化设计中, 为抗浮锚杆方案的精细化分析和优化设计提供了有力手段。本文以青岛市高新区星雨华府北区下沉广场基坑工程为实例, 设计其抗浮锚杆初步方案, 并运用数值分析软件 FLAC^{3D} 开展数值模拟试验^[14-15], 分析基坑工程底板在结构荷载、地下水浮力和锚杆共同作用下的位移情况, 在满足锚杆受力且减少工程造价的条件下研究得出抗浮锚杆最优布置方案。

收稿日期: 2019-04-11; 修回日期: 2019-12-27 DOI: 10.12143/j.tkgc.2020.01.014

作者简介: 王绪勇, 男, 汉族, 1984 年生, 高级工程师, 岩土工程专业, 硕士, 长期从事基坑、桩基以及工程勘察的研究和施工工作, 山东省青岛市科苑纬四路 73 号, 13863920635@163.com。

引用格式: 王绪勇, 杨蕾, 王会军, 等. 青岛星雨华府基坑抗浮锚杆方案设计与优化[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(1): 75-80.

WANG Xuyong, YANG Lei, WANG Huijun, et al. Design and optimization of the anti-floating anchor bolt for a foundation pit project in Qingdao[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(1): 75-80.

1 工程概况

星雨华府北区项目位于青岛市高新区,工程总建筑面积为 13662.9 m²,建筑结构形式为短肢剪力墙结构,建筑结构的类别为二类,设计使用年限为 50 年,抗震设防烈度为 6 度。其中,下沉广场为纯地下结构,其基坑工程抗浮措施采用抗浮锚杆。

钻探结果显示,拟建场区第四系厚度较大,场区第四系主要由全新统人工填土、全新统海相沼泽化层、全新统陆相洪冲积层和上更新统陆相洪冲积层组成,场区基岩为白垩系王氏群组泥质粉砂岩及白垩系青山群组安山岩。场区地质剖面如图 1 所示。

(一)第四系全新统人工填土层(Q₄^{ml})

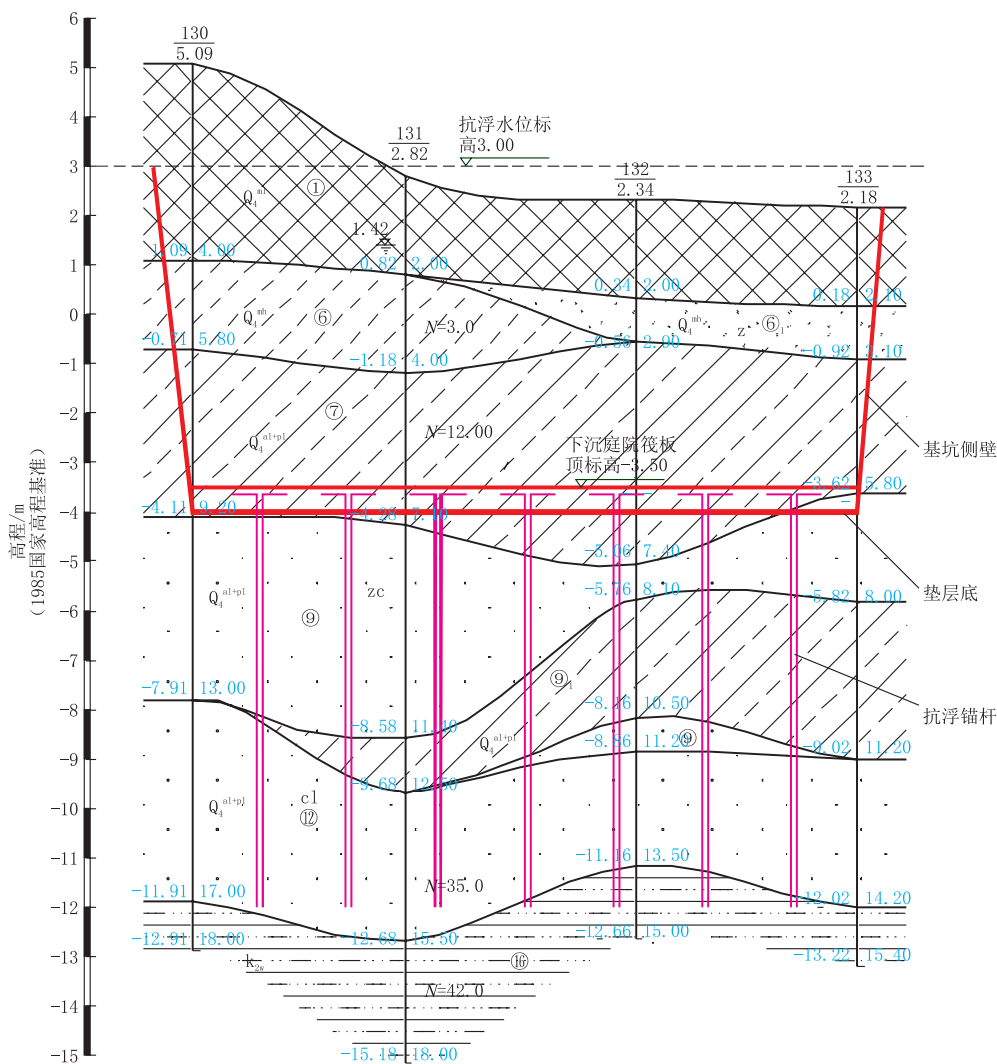


图 1 场区地质剖面

Fig.1 Geologic profile at the site

第①层素填土,褐、灰褐色,干—稍湿,松散。回填物以粘性土为主,混杂 10%~30%不等的砂类土及淤泥质土,局部淤泥质土含量高达 50%,混碎块石及碎混凝土块等建筑垃圾(主要为场区东部及北部靠近临近施工场区地段,直径为 2~10 cm)。该层土回填时间 3~6 个月,密实度不均匀,自稳性差。

(二)第四系全新统海相沼泽化层(Q₄^{ml})

第⑥层粉土,较广泛分布于场区,地表回填时局

部有填土挤入。黑灰—灰褐色,湿,流塑—可塑。见贝壳,有腥臭味,手摇失水即散,无光泽反应,含砂量 25%~40%,见中砂薄夹层,局部相变为淤泥质粉质粘土、粉质粘土。其表层受填土影响,多被扰动。该层干强度低,韧性差,底部塑性稍高。

(三)第四系全新统洪冲积层(Q₄^{al+pl})

第⑦层粉质粘土,灰褐—黄褐色,可塑。见铁质氧化物,偶见锰质结核及高岭土条带,与上覆海相沼

泽化层交接带普遍见有姜石(粒径 0.5~4 cm),该层局部相变为粘土,夹多层中粗砂薄层。干强度中等,韧性中等,具中等压缩性,该层从上向下强度逐渐增高。

第⑨层中粗砂,褐、黄褐色,饱和,中密—密实,砂粒矿物成分主要为长石、石英,粘性土含量 10%~20%,圆砾及卵石(粒径 20~50 mm),含量约 5%。磨圆一般。分选较差,局部相变为粉砂,夹多层粘性土薄层。该层由上至下,砂颗粒粒径逐渐增大,强度渐高,底部见粘性土透镜体分布。

(四)第四系上更新统洪冲积层(Q_4^{al+pl})

第⑫层粗砾砂,灰白、褐黄色,饱和,中密—密实,砂粒矿物成分主要为长石、石英,圆砾及卵石(粒

径 2~5 cm),含量约 10%,分选较差,磨圆一般。该层由上至下,砂粒粒径逐渐增大,强度渐高,底部卵石含量可达 15%。

(五)基岩

第⑮层泥质粉砂岩强风化带,棕红色、灰褐色,泥质结构,层状构造,以长石和粘土矿物为主,风化较强烈,岩心呈土柱状,手捏即碎裂成角砾状,遇水易软化,水平方向风化程度差异较大,由上而下风化程度渐弱。根据岩心性状判定,该岩石属极软岩,岩体极破碎,基本质量等级 V 级。

各岩土层主要物理力学性质特征值如表 1 所示。

表 1 各岩土层力学参数
Table 1 The mechanical parameters of strata

层号	土层名称	岩土体与锚固体粘结强度特征值 f_{tb}/kPa	天然重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	压缩模量 E_{s1-2}/MPa	变形模量 E_0/MPa	地基承载力特征值 f_{ak}/kPa	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
①	素填土		20.0					20.0*
⑥	粉土		19.9	7.0		90	6.3	16.8
⑦	粉质粘土	20		7.4		170	20.5	15.9
⑨	中粗砂	70			20	330		35.0*
⑫	粗砾砂	120			30	400		38.0*
⑮	泥质粉砂岩强风化带	80	20.0		25	400		35.0*

* 等效内摩擦角。

场地岩土层中含地下水,对本工程有影响的地下水类型为上层滞水及第四系弱承压水。勘察期间为枯水期,勘察期间测得混合地下水稳定水位绝对标高 -0.84~2.67 m。场区内原填土中粘性土含量较高,地下水短期内较难消散。规划场区设计室外坪为 4.7~5.3 m,考虑到青岛地区水位变幅及场区水文地质条件改变,因此建议抗浮水位绝对标高按 3.00 m 计取,每米水头浮托力为 10 kPa。工程平面布置如图 2 所示。

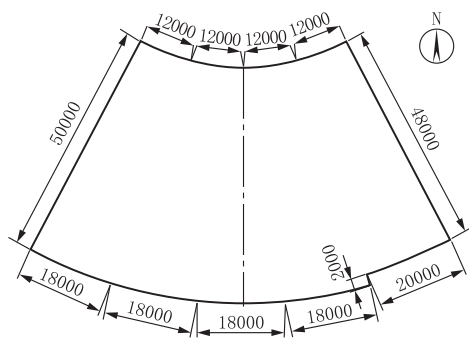


图 2 下沉广场平面布置

Fig.2 The layout of the underground square

2 抗浮锚杆初步方案

2.1 地下水浮力计算

根据阿基米德定律:浸在液体里的物体受到向上的浮力作用,其大小等于被排开的液体的重力。地下结构可按式计算其单位面积的初始浮力 $P^{[16]}$:

$$P = \gamma_w H = \gamma_w (H_{\text{抗浮水位}} - H_{\text{基础底部标高}}) \quad (1)$$

式中: P ——单位面积上水的浮力, kN/m^2 ; γ_w ——水的重度, kN/m^3 ; H ——水头高度, m 。

2.2 锚杆强度计算

锚杆的抗拉力特征值 N_{ak} 根据下式计算^[14-15]:

$$N_{ak} = \sum q_{si} u_i l_i \quad (2)$$

锚杆的轴向拉力初始设计值 N_a :

$$N_a = r_Q N_{ak} \quad (3)$$

式中: q_{si} ——岩土层与抗浮锚杆锚固段间的摩阻力特征值, kPa ; u_i ——锚固段的周长; l_i ——锚固段的长度; r_Q ——荷载分项系数, 取 1.35。

2.3 锚杆数量间距计算

抗浮锚杆数量 n :

$$n = \gamma_0 S_k A / N_a \quad (4)$$

式中: γ_0 ——结构重要性系数; S_k ——抗浮力标准值,kPa; A ——设计抗浮区域总面积。

锚杆抗浮面积 A' :

$$A' = A/n \quad (5)$$

锚杆布设方案应满足下式:

$$nN_a/A > S_k \quad (6)$$

2.4 抗浮锚杆初步设计方案

该下沉广场为扇环形结构,基坑工程中采用抗浮锚杆,采用上述计算理论,得到抗浮锚杆初始设计参数:锚杆长度为9 m,其中锚固段长度为8.5 m,自由段长度为0.5 m;锚杆杆体为2025 mm环氧涂层钢筋,成孔孔径200 mm,注浆浆体采用水泥净浆,水泥采用强度等级为42.5的普通硅酸盐水泥,水灰比0.40,浆体28 d无侧限抗压强度 ≤ 30 MPa,采用反向注浆工艺,灌浆压力0.6~1.0 MPa。间排距为1.2 m $\times$ 1.2 m,锚杆根数共1564根,工程量较大。

3 方案优化

在岩土工程的室内试验和现场研究当中,通常

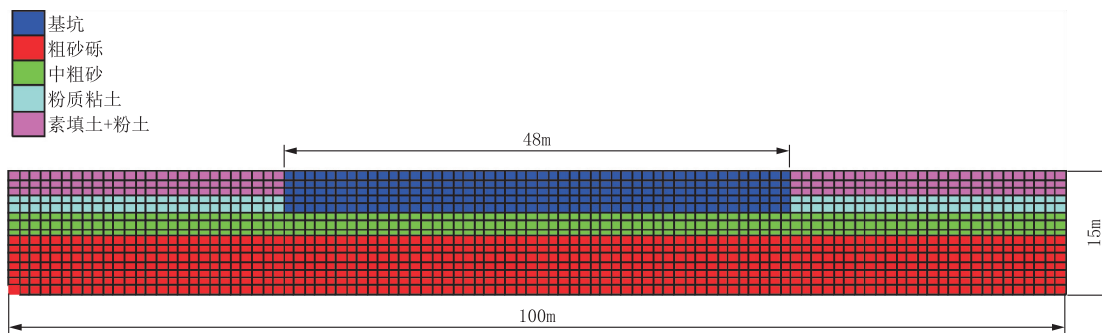


图3 基坑数值模型

Fig.3 The numerical model of the foundation pit

在数值模拟实验中采用Cable单元来模拟锚杆,设置锚杆横截面积 $A = 9.07 \times 10^{-4} \text{ m}^2$,弹性模量 $E = 2.0 \times 10^{11} \text{ MPa}$ 。方案二中每根锚杆由18个长度为0.5 m的Cable单元构成,其中最上端1个Cable单元作为外锚段,锚固在底板混凝土中;向下1个Cable单元作为自由段;其余16个Cable单元作为内锚段。方案三中每根锚杆由16个长度为0.5 m的Cable单元构成,其中最上端1个Cable单元作为外锚段,锚固在底板混凝土中;向下1个Cable单元作为自由段;其余14个Cable单元作为内锚段。基坑底部筏板为钢筋混凝土结构,厚度为1000 mm。外锚段的锚固参数:体积模量为10000

采用数值模拟软件进行分析。FLAC^{3D}是用于工程中力学计算的三维显式有限差分程序,可用来模拟由土、岩石或其他材料构成的三维结构在平面内的力学行为,在隧道、边坡等地下结构中应用广泛。Cable单元是FLAC^{3D}中的一种结构单元,为弹塑性材料,能够承受拉压力,通常用来模拟锚杆。

本文取其中间剖面为计算截面,采用FLAC^{3D}进行数值模拟分析及方案比选优化。总体比选方案包括3组:方案一不设抗浮锚杆;方案二与初步设计方案一致;方案三抗浮锚杆长度缩短为8 m,间排距增大为1.5 m $\times$ 1.2 m,其他参数与初步设计方案相同。

根据下沉广场基坑工程实际情况,建立一个宽 $\times$ 高 $\times$ 厚为100 m $\times$ 15 m $\times$ 1.5 m的平面模型,如图3所示。其中基坑深度为5 m,宽度为48 m。采用实体单元模拟土层和基坑工程底板,底板采用C30混凝土。设计抗浮水位绝对标高为3.00 m,水头浮托力设计值为10 kPa。地层及混凝土均选取Mohr-Coulomb本构模型。

MPa,粘结力为10000 MPa,内摩擦角为25°;内锚段的锚固参数:体积模量为20 MPa,粘结力为20 MPa,内摩擦角为45°;设置自由段锚固参数:体积模量为0 MPa,粘结力为0 MPa,内摩擦角为0°,删除自由段Cable单元与岩土层之间的link。

采用此数值模型进行模拟计算,计算至3000步,提取3组模拟方案基坑底部的整体变形和位移云图,如图4所示。

比较施加抗浮锚杆前后基坑底部截面整体变形及位移云图可知,由于地下水的浮力较大,没有抗浮锚杆的下沉广场基坑底部上浮较大,最大变形量达到了62 cm。而如方案三布设了抗浮锚杆的下沉广

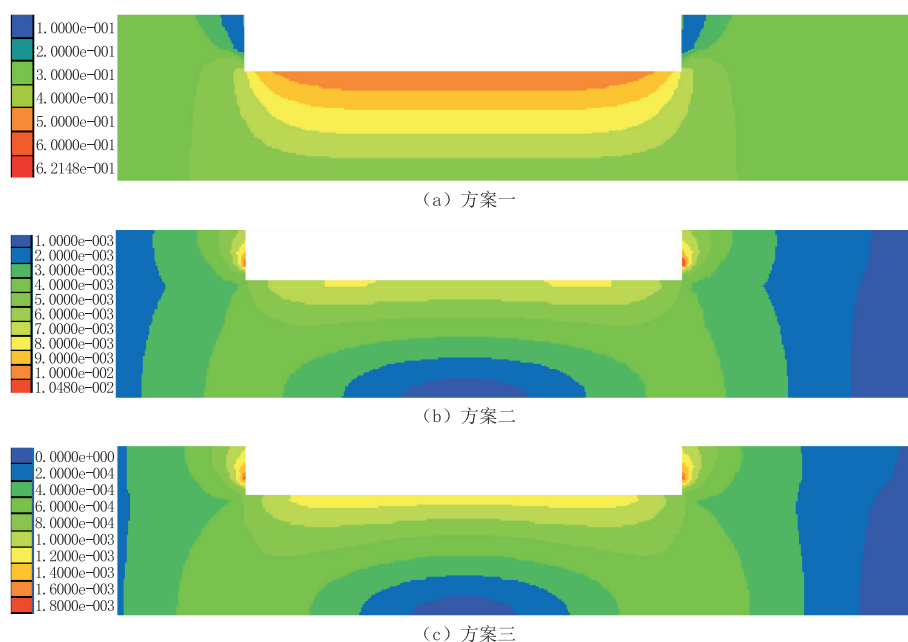


图 4 布设抗浮锚杆前后基坑底部截面位移云图

Fig.4 Displacement nephogram of the foundation pit bottom before and after placement of anti-floating anchor bolts

场基坑底部上浮较小,最大变形量不足 1 cm。因此,所布设的抗浮锚杆对底板抗浮效果十分显著。

抗浮锚杆施工较为复杂,且本下沉广场工程量较大,比较方案二和方案三基坑底部位移云图,发现两方案中基坑底部位移情况近似,但是初步设计方案设置锚杆较长,间排距较小,明显偏于保守,在满足了抗浮要求之后存在着资源浪费情况。因此,在工程施工中采用了方案三,将锚杆长度缩短为 8 m,间排距设置为 1.5 m×1.2 m,共设置锚杆 1289 根。

4 最终设计方案确定

场地地下水主要为上层滞水及第四系弱承压水。地下水主要接受大气降水的补给。根据水质分析结果,依据《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)(2009 年版)的有关规定,场区属Ⅱ类环境,场区地下水对混凝土结构具中等腐蚀性;对钢筋混凝土结构中的钢筋在干湿交替下具强腐蚀性,在长期浸水下具有微腐蚀性。

下沉广场基坑工程抗浮措施采用抗浮锚杆,锚杆筋体采用 HRB400 钢筋, $f_{yk}=400$ MPa,锚杆杆体为 2025 mm 环氧涂层钢筋,成孔孔径 200 mm,粘结体为水泥浆,灌浆压力 0.6~1.0 MPa。

场地水对钢筋混凝土中的钢筋在干湿交替下具有强腐蚀,在设计过程中锚杆钢筋采用环氧树脂涂

层钢筋:(1) 钢筋涂层制作、施工及检验标准等应按照《环氧树脂涂层钢筋》(JG 3042—1997)执行。固化后的环氧树脂涂层厚度应为 0.18~0.30 mm。(2) 环氧树脂涂层钢筋在运输、存放及施工过程中,应采取有效措施防止涂层受损。涂层有缺陷或破损部分应按《环氧树脂涂层钢筋》(JG 3042—1997)要求进行修补。

定位架采用厚度 20 mm 的聚氯乙烯加工而成。锚杆主筋需接长时,应采用机械连接,接头等级Ⅰ级。隔离段需进行防腐蚀处理,先除锈、刷沥青船底漆、缠裹 2 层沥青玻纤布(两油两布)。

注浆浆体采用水泥净浆,水泥采用强度等级为 42.5 的普通硅酸盐水泥,水灰比 0.40,掺入水泥用量 0.3% 的 FDN-5 外加剂,浆体的 28 d 无侧限抗压强度 <30 MPa,采用反向注浆工艺。注浆管的出浆口应插入接近孔底处,浆液自下而上连续灌注,且确保从孔内顺利排水、排气,排岩粉。注浆设备应有足够的浆液生产能力和所需的额定压力,采用的注浆管应能在 1 h 内完成单根锚杆的连续注浆。注浆材料采用的拌合水宜采用饮用水,不得使用污水。当采用其它水源时,必须经试验确认对水泥浆体和杆体材料无害;拌合水的水质应符合现行行业标准《混凝土拌合用水标准》(JGJ 63—2006),拌合水中酸、有机物和盐类等对水泥浆体和钢拉杆有害的物

质的含量不得超标,不得影响水泥正常凝结和硬化。

5 结论

(1)FLAC^{3D}数值模拟结果显示,抗浮锚杆在地下工程的抗浮设计中作用明显。

(2)优化方案与初步支护方案数值模拟结果对比显示,初步设计方案中锚杆设计过长、数量过多,明显偏于保守,将抬高工程造价、延长工期;优化方案中将锚杆长度由9 m缩短为8 m、间排距由1.2 m×1.2 m放大到1.5 m×1.2 m,锚杆减少275根,实际工程监测结果显示优化方案很好的达到了抗浮目标,且有效控制了成本,缩短了工期。

(3)根据施工反馈及后期运营阶段的监测,抗浮锚杆设计达到了预期效果,实践证明抗浮锚杆的设计是比较合理的。

参考文献(References):

- [1] 王健,郑秀芳,张璇,等.基础抗浮锚杆布设方案优化分析[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2018,37(2):341—345.
WANG Jian, ZHENG Xiufang, ZHANG Xuan, et al. Optimum analysis of foundation anti-floating anchor rod layout scheme[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2018, 37(2): 341—345.
- [2] 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].资源环境工程,2009,23(1):47—51.
CHEN Zhengzhi, MA Zhesheng, ZHAN Hongzhong, et al. Analysis on failure anti-floating case of underground buildings and its countermeasure[J]. Resources Environment & Engineering, 2009, 23(1): 47—51.
- [3] 郭丰涛,蒋国琼.浅析抗浮锚杆的抗浮设计[J].建筑结构,2013,43(S2):674—676.
GUO Fengtao, JIANG Guoqiong. Shallow analysis of the anti-floating design of anti-float anchor[J]. Building Structure, 2013, 43(S2): 674—676.
- [4] 孙树勋,王公胜,王艳森,等.大型地下工程抗浮锚杆整体优化研究[J].工程质量,2015,33(3):76—80.
SUN Shuxun, WANG Gongsheng, WANG Yansen, et al. The research of whole optimization of anti-float anchor in large underground projects[J]. Construction Quality, 2015, 33(3): 76—80.
- [5] 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 of anti-float anchor at pebble soil in Chengdu[J]. Sichuan Building Science, 2012, 38(6): 131—134.
- [6] 程良奎,张培文,王帆.岩土锚固工程的若干力学概念问题[J].岩石力学与工程学报,2015,34(4):668—682.
CHENG Liangkui, ZHANG Peiwen, WANG Fan. Several mechanical concepts for anchored structures in rock and soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4): 668—682.
- [7] 尤春安,战玉宝.预应力锚索锚固段界面滑移的细观力学分析[J].岩石力学与工程学报,2009,28(10):1976—1985.
YOU Chunan, ZHAN Yubao. Analysis of interfacial slip mechanisms in anchorage section of prestressed anchor cable[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10): 1976—1985.
- [8] 战玉宝.锚固体应力分布的试验及数值模拟研究[D].青岛:山东科技大学,2005.
ZHAN Yubao. Experimental and numerical simulation study on stress distribution of anchorage body[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2005.
- [9] 王洪涛,尤春安,王绪勇.不同屈服条件对巷道围岩塑性区的影响研究[J].水电能源科学,2011,29(3):107—109.
WANG Hongtao, YOU Chunan, WANG Xuyong. Research on impact on plastic zone of roadway surrounding rock based on different yield criteria[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(3): 107—109.
- [10] 刘焱春,魏一祥,贾世祥.临海基坑工程支护设计与施工实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(2):50—54.
LIU Yanchun, WEI Yixiang, JIA Shixiang. Design on supporting for near-sea foundation pit and construction practice[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009, 36(2): 50—54.
- [11] 谭孟云,王殿博,徐红兵.抗浮岩石锚杆在青岛某工程中的施工实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2005,32(1):29—30.
TAN Mengyun, WANG Dianbo, XU Hongbing. Construction practice of anti-floating rock bolt in a project in Qingdao[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling Tunneling), 2005, 32(1): 29—30.
- [12] 李万喜,刘建民.全长粘结式注浆锚杆抗拔力分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2004,31(6):6—8.
LI Wanxi, LIU Jianmin. Discussion on wholly grouted anchor pullout resistance[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2004, 31(6): 6—8.
- [13] 孙小杰,张辉,杜绍伟.高陡岩石边坡软体护坡技术设计及施工实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(4):78—81.
SUN Xiaojie, ZHANG Hui, DU Zhaowei. Design and construction practice of software slope protection for high and steep rock slope[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(4): 78—81.
- [14] 李为腾,杨宁,李廷春,等.FLAC^{3D}中锚杆破断失效的实现及应用[J].岩石力学与工程学报,2016,35(4):753—767.
LI Weiteng, YANG Ning, LI Tingchun, et al. Implementation of bolt broken failure in FLAC^{3D} and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(4): 753—767.
- [15] 杨宁,李为腾,玄超,等.FLAC^{3D}可破断锚杆单元完善及深部煤巷应用[J].采矿与安全工程学报,2017,34(2):251—258.
YANG Ning, LI Weiteng, XUAN Chao, et al. Improvement of breakable anchor bolt element in FLAC^{3D} and its application in deep coal roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(2): 251—258.
- [16] 杨淑娟,张同波,吕天启,等.地下室抗浮问题分析及处理措施研究[J].建筑技术,2012,43(12):1067—1070.
YANG Shujuan, ZHANG Tongbo, LYU Tianqi, et al. Analysis and research on anti-floating problem for basement and treatment measures[J]. Architecture Technology, 2012, 43(12): 1067—1070.

(编辑 周红军)