



超深竖井基坑抗浮锚筋桩受力特性及布桩参数优化研究

龚兵文¹, 万 缘¹, 周王鹏², 陈保国²

(1. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610081; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 公明超深竖井为罗田-铁岗水库输水干线竖井, 其基坑底板高于地下水位约 70 m, 抗浮问题显著。文章依托于公明超深竖井, 利用三维数值模拟, 对超深竖井底板抗浮锚筋桩的受力特性及布桩参数优化进行研究。研究发现: 锚筋桩布置越靠近底板中心越先发挥拉拔作用, 最大轴力也越大, 随着锚筋桩布桩位置远离底板中心, 其最大轴力逐渐减小; 底板中心部位锚筋桩先发挥拉拔作用的同时使基岩向上隆起, 外围锚筋桩受基岩隆起影响显著, 甚至在桩侧出现了向上的侧摩阻力, 表现为轴力骤减, 桩侧剪应力减小, 有效锚固深度增加的特征; 根据模拟结果可将原方案第七、八环锚筋桩合并为一环锚筋桩, 优化后锚筋桩最大轴力值增加约 9%, 低于抗拔承载力设计值, 分担的水浮力减小约 4%, 但节省抗浮锚筋桩数量约 23%, 满足工程安全需求, 经济效益显著。

关键词: 超深竖井基坑; 抗浮锚筋桩; 受力特性; 优化设计; 数值模拟

中图分类号: TU753

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)04-0001-05

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.04.041

Study on layering excavation scheme of ultra-deep shaft in soft and hard alternate strata

GONG Bingwen¹, WAN Yuan¹, ZHOU Wangpeng², CHEN Baoguo²

(1. Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu 610081, Sichuan, China; 2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: Gongming ultra-deep shaft is a vertical shaft for the water transmission line of Luotian-Tiegang Reservoir. Its foundation pit floor is about 70 m higher than the groundwater level, and the anti-float problem is significant. Based on Gongming ultra-deep shaft, three-dimensional numerical simulation is used to study the force characteristics of anti-float anchor reinforcement pile on the ultra-deep shaft floor and the optimization of pile distribution parameters. It is found that the closer the anchorage reinforcement pile is to the center of the floor, the more it plays the drawing function first, and the greater the maximum axial force is. As the anchorage reinforcement pile is far away from the center of the floor, the maximum axial force decreases gradually. The anchor reinforcement pile in the central part of the bottom plate first plays the role of drawing and at the same time makes the bedrock uplift. The peripheral anchor reinforcement pile is significantly affected by the bedrock uplift, and even appears the lateral friction resistance on the pile side, which is manifested as the axial force decreases sharply, the shear stress on the pile side decreases, and the effective anchorage depth increases. According to the simulation results, the 7th and 8th ring anchor reinforcement piles in the original scheme can be combined into one ring anchor reinforcement piles. After optimization, the maximum axial force value of anchor reinforcement piles increases by about 9%, which is lower than the design value of tensile capacity, and the water buoyancy

收稿日期: 2024-09-04

基金项目: 中国水利水电第七工程局有限公司科技攻关资助项目(LT-02-ZY-2022-[科研]-01)

作者简介: 龚兵文(1986—), 男, 工程师, 从事土木工程施工管理工作。

通信作者: 周王鹏(1997—), 男, 硕士研究生, 从事岩土工程领域相关研究。

force shared by anchor reinforcement piles decreases by about 4% ,but the number of anti-buoyancy anchor reinforcement piles is saved by about 23% ,which meets the engineering safety requirements and has significant economic benefits.

Key words: ultra-deep working shaft foundation pit; anti-float anchor reinforcement pile; mechanical characteristic; optimization design; numerical simulation

随着我国城市化建设发展,深基坑工程愈加深大,面临的地质条件也越加复杂。其中,地下水成为影响深基坑工程稳定性的关键因素之一。在深基坑开挖结束进行底板施工时,过大的水浮力将导致底板破坏,因此,为了防止结构物被地下水的浮力破坏,需进行抗浮设计,抗浮锚杆作为常用的抗浮措施被广泛应用于深基坑工程。

张明义等^[1]通过现场单根抗浮锚杆拉拔破坏试验,确定了单锚的极限抗拔承载力及有效锚固长度;付文光等^[2]将群锚稳定性验算简化为单锚稳定性验算,认为群锚的抗浮承载力为单锚抗浮承载力之和;ZHOU^[3]通过现场试验和数值分析,对某抗浮锚杆的位移和内力进行了研究;赵天杨等^[4]利用 ABAQUS 数值模拟结合现场试验进行抗浮锚杆的承载特性研究,认为数值模拟与现场试验结果相吻合,采用数值模拟手段进行抗浮锚杆研究具有较好的应用意义;张晨等^[5]研发了一种扩底式抗浮锚杆,并进行了现场抗拔试验研究,认为在软土地层较为适用;GFRP 抗浮锚杆采用玻璃钢作为锚筋材料,白晓宇等^[6]通过现场试验揭示了锚筋—灌浆体界面、岩石—灌浆体界面黏结强度变化规律及影响因素;FARAG 等^[7]介绍了一种叶片螺旋锚桩,通过螺旋叶片增加了桩土间剪应力,提高了锚桩的抗拔承载力;魏刚等^[8]研究了基坑开挖对带抗浮锚杆的隧道影响,提出了相关计算方法并使用数值模拟进行了验证。

目前许多学者通过试验对抗浮锚杆进行了研究,获得了单锚和群锚的极限抗拔承载力、有效锚固长度以及稳定性验算简化公式,同时也开展了新型锚杆的研究。然而,目前学者对超深基坑底板抗浮锚筋桩群锚效应的研究相对较少,对于深基坑锚筋桩的荷载传递规律认识还不够深入。本文以公明超深竖井(深度为 80 m)为研究对象,利用 FLAC^{3D} 三维数值模拟手段,对竖井开挖施工全过程进行模拟,详细分析该竖井底板抗浮锚筋桩荷载传递规律,并在此基础上进行布桩参数优

化,以期对实际施工进行指导。

1 工程背景

公明超深竖井工程位于深圳市区,井边有紧邻建筑及管线,外径约为 35 m,开挖深度约为 80 m,采用“圆形地连墙+内衬”的支护形式,如图 1 所示。公明超深竖井以北 45 m 为合水口排洪渠,以南 78 m 为上下村调蓄池,以西 190 m 为茅洲河,西北侧 13 m 为紧邻闸室泵站的管理用房,南侧 5 m 有正在新建管道。

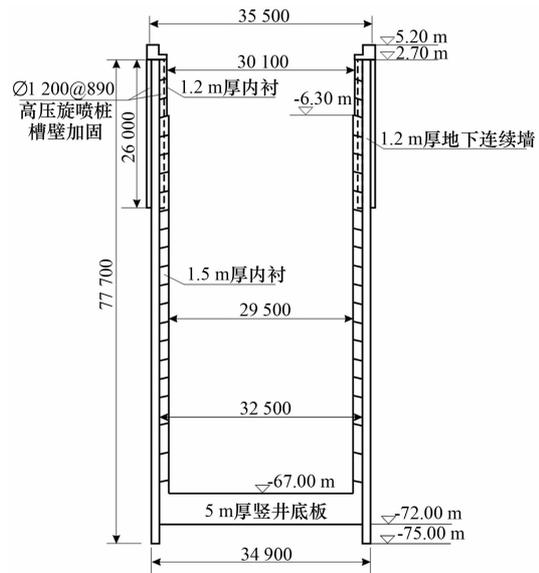


图 1 公明超深竖井剖面 mm

公明超深竖井岩土条件较差,上覆土层约 20 m 厚,从上至下为人工填土层、淤泥质黏土层、砂质黏性土层、砾砂层;下覆基岩以泥质粉砂岩、泥岩、岩屑砂岩互层为特征,且泥岩强度低,易失水干裂崩解,泥质粉砂岩与岩屑砂岩裂隙较发育,局部破碎。勘察期间地下水位埋深约为 6.5 m,高于工作井底板 70 m,竖井结构抗浮稳定系数为 0.95,需考虑基底抗浮问题。

2 三维数值模拟

2.1 三维数值模型建立

根据实际情况建立三维数值模型,由目前研

究可知, 竖井基坑对周边环境的影响普遍小于矩形基坑^[9-10], 因此取基坑开挖深度的 3 倍范围为影响边界, 模型尺寸为 400 m × 400 m × 180 m, 如图 2 所示。模型四周约束法向位移, 底部设置固定约束, 顶面自由。地下水位埋深取 6.5 m。

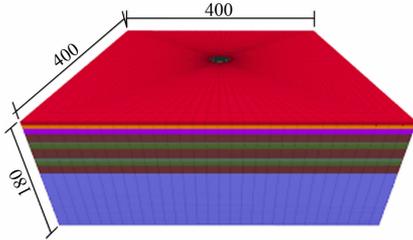


图 2 三维模型

地层采用 Mohr-Coulomb 本构模型进行初始地应力场模拟。对于围护结构模拟, 高压旋喷桩 (Ø1.2 m) 主要用于槽壁加固, 防止地连墙成槽时出现槽壁失稳, 旋喷桩桩长为 29 m, 同时考虑桩土间相互作用, 采用 pile 单元进行模拟。内衬墙采用逆作法施工, 地连墙深度为 80 m, 使用 C30 强度混凝土浇筑, 内衬墙深为 72 m, 使用 C35 强度混凝土浇筑。基坑底板施工, 基坑底板厚度为 5 m, 采用 C35 混凝土浇筑。地连墙、内衬墙和底板选用弹性本构进行模拟。材料参数如表 1 所示。

表 1 材料物理力学参数

构件	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	密度/(kg·m ⁻³)
人工填土	10.5	0.34	10	5	1 850
淤泥质黏土	7.2	0.33	4	4	1 800
砂质黏性土	11.7	0.34	16	20	1 920
砂砾	30.9	0.32	29	0	2 070
全风化泥质粉砂岩	12.6	0.34	18	23	1 940
强风化泥岩	210.0	0.21	38	160	2 250
微风化泥质粉砂岩	2 500.0	0.29	34	600	2 530
微风化岩屑砂岩	4 500.0	0.32	40	900	2 500
微风化泥岩	600.0	0.35	38	300	2 400
微风化泥质粉砂岩	4 000.0	0.34	40	650	2 530
微风化岩屑砂岩	9 000.0	0.30	40	950	2 560
微风化泥岩	1 400.0	0.33	38	330	2 500
高压旋喷桩	1 150.0	0.20	—	—	2 200
C30 混凝土	30 000.0	0.20	—	—	2 500
C35 混凝土	31 500.0	0.20	—	—	2 500

2.2 底板锚筋桩抗浮模拟

通过模拟基坑开挖施工全过程获得锚筋桩施工前应力场分布, 然后在此基础上进行锚筋桩抗浮模拟。锚筋桩单桩抗浮承载力特征值为 297 kN, 单桩极限抗浮承载力标准值为 594 kN。锚杆采用 3Ø36 III 级螺纹钢筋, 锚筋入岩深度为 11.3 m, 钻孔直径为 150 mm, 使用 cable 单元进行模拟, 参数如表 2、3 所示, 考虑锚筋桩破坏形式为桩-土界面破坏。

根据《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50487—2008)附录 W 外水压力折减系数, 对公明超深竖井底板水压力进行取值, 经折减后取水浮力值为 174 476 kN。

表 2 锚杆参数

杨氏模量/GPa	杆体密度/(kg·m ⁻³)	换算横截面积/m ²	拉伸屈服强度/MN
210	7 850	0.003 1	0.540

表 3 锚固剂参数

单位长度黏结力/(kN·m ⁻¹)	单位长度黏结刚度/(kN·m ⁻¹)	外露周长/m	内摩擦角/(°)
394	532 986	0.471	35

2.3 施工过程模拟

为了获得底板抗浮锚筋桩施工前的开挖应力场, 需先进行基坑开挖施工全过程模拟。基坑开挖施工模拟分 4 步: 1) 进行初始地应力平衡; 2) 进行高压旋喷桩及地连墙施工; 3) 进行基坑分层开挖, 每开挖一层同时施工一层内衬; 4) 开挖至基底时进行底板施工。

在基坑开挖后的应力场基础上进行抗浮锚筋桩施工模拟。抗浮模拟主要分为两步: 1) 按 2 m × 2 m 间距布置锚筋桩, 均匀分布在底板下, 图 3 为锚筋桩施工完成后模型图, 共布置 8 环锚筋桩; 2) 向基坑底板施加 174 476 kN 水浮力。

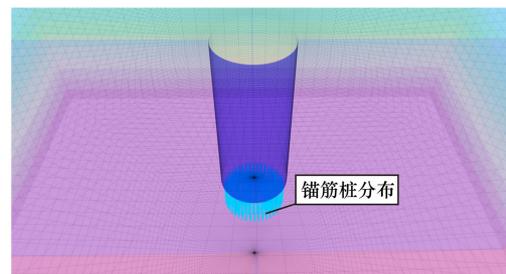
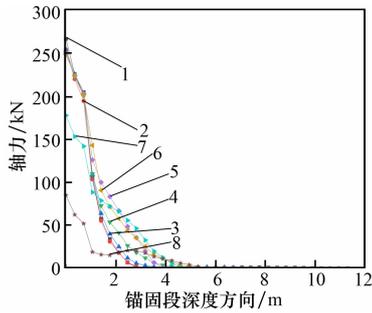


图 3 锚筋桩布置

3 底板抗浮锚筋桩受力特性分析

3.1 底板抗浮锚筋桩轴力分布规律

图 4 为底板抗浮锚筋桩的轴力分布规律。



距底板中心水平距离/m: 1—0; 2—2; 3—4;
4—6; 5—8; 6—10; 7—12; 8—14。

图 4 底板抗浮锚筋桩轴力分布规律

由图 4 可知：锚筋桩轴力沿锚固段深度方向表现出由大到小的变化规律，前 6 环锚筋桩最大轴力值相对集中，整体上表现出锚筋桩最大轴力随距底板中心距离增加而减小的趋势。最大轴力锚筋桩位于底板中心，为 266 kN；最小轴力锚筋桩分布于距底板中心 14 m 处，为 85 kN。

图 5 为底板抗浮隆起曲线。

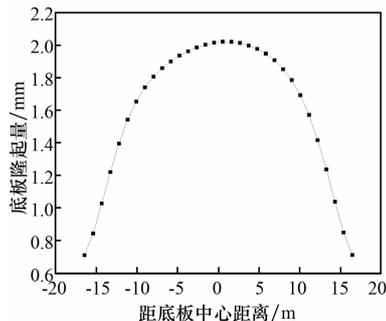
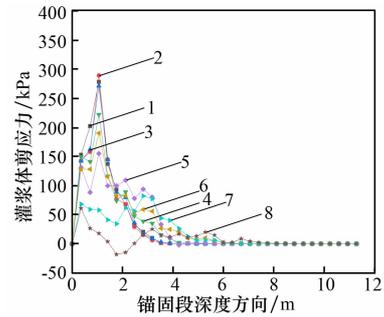


图 5 底板抗浮隆起曲线

由图 5 可知，底板 10 m 半径内的隆起量较为相近，而由于底板边缘部位受地连墙及内衬约束，因此在靠近底板边缘附近时隆起量出现骤减，从而使传递给第七、八环锚筋桩的轴力较小。

3.2 底板抗浮锚筋桩剪应力分布规律

图 6 为底板抗浮锚筋桩与围岩的剪应力分布规律。由图 6 可知，前 6 环锚筋桩侧剪应力沿锚固段深度方向为非均匀变化，随锚固段深度增加剪应力表现为先增加再减小为 0 的变化规律。第七、八环锚筋桩剪应力表现出“波谷”特征。



距底板中心水平距离/m: 1—0; 2—2; 3—4;
4—6; 5—8; 6—10; 7—12; 8—14。

图 6 底板抗浮锚筋桩剪应力分布规律

由于底板边缘受地连墙及内衬约束，当底板承受水浮力时在底板中心位置首先出现最大竖向位移，因此越靠近底板中心的锚筋桩越先发挥抗拔效用，而越远离底板中心部位的锚筋桩的拉拔力越小。当底板承受水浮力时底板中间部位锚筋桩首先发挥抗拔效用使底部岩体产生向上的位移，而到第七、八环桩附近时由于底板传递的拉拔力较小，锚筋桩桩体竖向位移较小，而底部岩体受前 6 环锚筋桩拉拔发生了较大向上位移，进一步缩减了外围锚筋桩与接触岩体的相对位移，使锚筋桩侧剪应力增长缓慢，甚至使桩侧产生了向上的侧摩阻力。以上原因导致抗浮锚筋桩有效锚固段向深部扩展，从而使第七、八环锚筋桩则剪应力出现两次增大又减小的特征。

4 锚筋桩参数优化

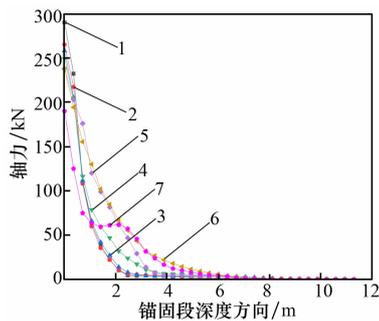
由图 4 底板抗浮锚筋桩轴力分布规律可知，原方案最外围两环锚筋桩(第七、八环)没有完全发挥出锚筋桩的抗拔作用，而前 6 环抗浮锚筋桩发挥较好。因此根据锚筋桩的轴力分布特征，本文优化第七环和第八环两环锚筋桩为一环，且同一环锚筋桩相邻间距为 2 m，与第六环锚筋桩间距为 3 m。

图 7 为优化后抗浮锚筋桩轴力分布图。由图可知，与原方案相比锚筋桩最大轴力增长幅度较小，为 290 kN，增长幅度约为 9%，第七环锚筋桩最大轴力为 190 kN，约占最大轴力的 65.5%，表明优化后的抗拔效果发挥较好。

图 8 为优化后竖井底板最大主应力云图。竖井底板最大压主应力主要沿竖井底板上部与内衬接触部位分布，最大拉主应力主要分布于竖井底

板底面及表面中心隆起部位,呈圆圈状分布。与优化前相比,优化后竖井底板最大主应力增加了约2%。最大拉主应力为1.438 MPa,低于C35混凝土的轴心抗拉强度设计值1.57 MPa;最大压主应力为1.215 MPa,远低于C35混凝土的轴心抗压强度设计值16.7 MPa,满足设计要求。

原方案抗拔锚筋桩共分担水浮力33 785 kN,占扣除底板自重后水浮力的50%,优化后抗浮锚筋桩共分担水浮力31 080 kN,占扣除底板自重后水浮力的46%。与原方案相比优化后抗浮分担水浮力略微下降,但抗浮锚筋桩数量从167根降低为130根,减少了约23%锚筋桩数量。



距底板中心水平距离/m: 1—0; 2—2;
3—4; 4—6; 5—8; 6—10; 7—13。

图7 优化后锚筋桩轴力分布

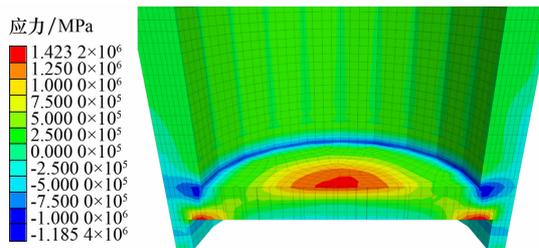


图8 优化后竖井底板最大主应力云图

5 结论

(1) 锚筋桩布置越靠近底板中心越先发挥拉拔作用,分担的轴力也越大,随着布桩位置远离底板中心,轴力逐渐减小,且间接受先发挥拉拔作用的锚筋桩影响越明显,表现为轴力骤减,桩侧剪应力减小,有效锚固深度增加等特征,在原

方案第七、八环锚筋桩尤为明显。

(2) 通过对原方案进行模拟获得了锚筋桩轴力分布图,根据轴力分布进行布桩优化,将第七、八环锚筋桩合并为一环锚筋桩。与原方案相比,优化后锚筋桩最大轴力值增加约9%,分担的浮力减小约4%,但减少了约23%的锚筋桩数量。

参考文献:

- [1] 张明义,张健,刘俊伟,等. 中风化花岗岩中抗浮锚杆的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008(增刊1): 2741-2746.
- [2] 付文光,柳建国,杨志银. 抗浮锚杆及锚杆抗浮体系稳定性验算公式研究[J]. 岩土工程学报,2014, 36(11):1971-1982.
- [3] ZHOU X L. Simulation and numerical analysis on anti-float anchor by field rock and soil tests [J]. Applied Mechanics and Materials,2014,3629:686-686.
- [4] 赵天杨,白晓宇,张明义,等. 钢筋抗浮锚杆承载特性现场试验与数值仿真[J]. 科学技术与工程,2018, 18(7):38-43.
- [5] 张晨,周峰,王旭东,等. 扩底抗浮锚杆的抗拔承载特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(6): 1888-1893.
- [6] 白晓宇,井德胜,王海刚,等. GFRP抗浮锚杆界面黏结性能现场试验[J]. 岩石力学与工程学报,2022, 41(4):748-763.
- [7] FARAG A,WASEIM A,AHMED F,et al. Nazir Ashraf. Utilization of blade anchor for improving the uplift capacity of pile in sand; Model Study[J]. Ocean Engineering,2023,278:114435.
- [8] 魏纲,赵毅,孙樵. 基坑开挖引起带抗浮锚杆的盾构隧道变形计算[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021,52(11):4158-4167.
- [9] 代鑫,徐伟,邹丽,等. 竖井开挖过程的数值模拟分析[J]. 岩土工程学报,2012,34(增刊1):154-157.
- [10] 贺炜,凡子义,崔剑峰,等. 坭洲水道桥圆形地连墙支护体系监测与分析[J]. 地下空间与工程学报,2019, 15(2):549-555.