

软土地区护塘河开挖稳定性分析及 支护方案研究

郑明强

(温州市交通规划设计研究院有限公司, 浙江 温州 325000)

摘要: 针对浙南软土地段护塘河开挖时出现的淤泥隆起, 规划路周边地块沉陷问题, 对规划路与护塘河的路堤合一结构进行稳定性分析和支护方案研究。综合考虑地质条件、技术可行性、施工进度等因素, 提出了钻孔灌注桩与水泥搅拌桩联合支护方案, 并通过 FLAC^{3D} 建立三维支护加固方案的数值计算模型, 分析了护塘河基坑开挖过程中的位移变化规律。结果表明: 钻孔灌注桩与水泥搅拌桩的联合支护方案可在深厚软基路段起到良好的支护作用, 保证护塘河开挖基坑和周边规划路的稳定性, 对类似软土地质条件下护塘河开挖工程具有借鉴意义。

关键词: 软土地区; FLAC^{3D}; 护塘河开挖; 钻孔灌注桩; 联合支护

中图分类号: TU447

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)11-0197-04

Stability Analysis and Support Scheme Study for Hutang River Excavation in Soft Soil Areas

ZHENG Mingqiang

(Wenzhou Transportation Planning and Design Research Institute Co., Ltd., Wenzhou 325000, China)

Abstract: Aiming at the issues of silt uplift and subsidence in surrounding planned road areas during the excavation of Hutang River in a soft soil region of South Zhejiang, the stability analysis and support scheme research on the integrated structure of the planned road and the embankment of the Hutang River are conducted. By comprehensively considering the geological conditions, technical feasibility, construction progress and the other factors, a combined supporting scheme of bored cast-in-place piles and cement mixing piles is proposed. The numerical calculation model of 3D supporting reinforcement scheme is established through FLAC^{3D} to analyze the displacement variation rule during the excavation of foundation pit of Hutang River. The result shows that the combined supporting scheme of bored cast-in-place piles and cement mixing piles can play the good supporting role in the deep and thick soft foundation road sections, which ensures the stability of the foundation pit for the excavation of the Hutang River and the surrounding planned roads, and is of reference significance for the excavation project of such rivers under similar soft soil conditions.

Keywords: soft soil area; FLAC^{3D}; Hutang River excavation; bored cast-in-place piles; combined support

0 引言

随着我国交通、水利工程的快速发展, 施工过程中经常会出现基坑开挖塌陷问题^[1-2]。特别是环境复杂的软土地区, 因软土本身具有天然含水量高、抗剪强度低、渗透性差、灵敏度高等特点, 极易因降水效果不理想而出现滑塌现象, 从而给基坑开挖支护带来较大挑战。选择合理的支护型式可有效降低安全事故的发生概率^[3-4]。目前工程上普遍借助计算

机建立数学模型进行模拟计算分析, 通过结合实际情况, 利用相关计算理论, 并对地质参数进行反向修正, 不仅计算精度高, 稳定性好, 而且能提高施工进度, 与传统解析法相比具有明显优势^[5-6]。浙南软土地区规划路已进行施工堆载, 且其旁边有居民楼、厂房, 周边环境复杂, 地质条件多变, 对于紧邻该规划路的护塘河开挖而言, 难度和风险很大。因此如何选择支护方案, 以保障护塘河开挖基坑的稳定性, 成为了工程设计和施工的关键。

本文针对浙南软土地区护塘河开挖时出现的淤泥隆起, 规划路周边地块沉陷问题, 通过现场踏勘, 建立规划路与护塘河的路堤合一模型, 进行护塘河

收稿日期: 2025-04-07

作者简介: 郑明强(1990—), 男, 硕士, 工程师, 从事路基路面设计工作。

开挖稳定性分析,并据此提出合理的加固方案。研究结果可为将来类似工程的稳定性分析和支护方案研究提供借鉴意义。

1 工程概况

本区域范围塘河全长 1.1 km,宽度约 50 m,河塘底高程 0.0 m,防洪标准 20 a 一遇;本区域范围常水位 2.12 m,20 a 一遇洪水位 3.90 m。护塘河后侧紧邻规划路,规划路目前路床已填筑完成,处于堆载预压阶段。规划路为城市次干路,设计时速 30 km/h,路线全长 1.5 km,设计标高 4.94~5.76 m,路基宽度 18 m。规划路路基范围内采用水泥搅拌桩处理,采用双向搅拌、4 搅 2 喷施工工艺,正方形布置;水泥搅拌桩桩径 500 mm,处理深度 10 m,间距 1.2 m;材料采用强度等级为 42.5 级普通硅酸盐水泥,28 d 无侧限抗压强度平均值不小于 1 MPa。道路范围右侧布置悬臂式挡墙。塘河两岸范围采用高压旋喷桩处理,矩形

布置 1 排,桩径 700 mm,桩长 20 m,已施工完成。图 1 为工程范围示意图。

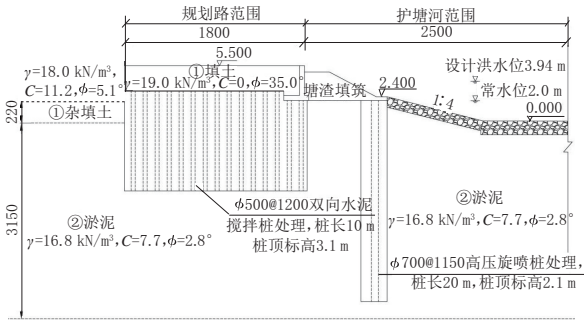


图 1 工程示意图(单位:mm)

塘河开挖过程中,鉴于塘河底高程与规划路顶标高之间高差增大,护塘河底部淤泥开始隆起,规划路周边地块出现细小裂纹,导致路堤合一结构的边坡稳定性出现滑移风险。为此,针对此工况进行稳定性分析和支护方案研究。根据该项目工程地质勘察报告,土层主要物理力学性质指标见表 1。

表 1 土层主要物理力学性质指标

土层名称	土层厚度/m	天然含水量 w/%	天然孔隙比 e	直剪快剪黏聚力 C/kPa	直剪快剪内摩擦角 φ/(°)	承载力特征值 f _{ak} /kPa
杂填土	2.2	45.9		11.2	5.1	60
淤泥	31.5	63.9	1.803	7.7	2.8	40
淤泥质黏土	15.6	50.8	1.467	12.8	4.1	50
黏土	10.8	44.4	1.296	20.3	7.5	80

2 护塘河开挖稳定性分析

2.1 计算断面选取

选取规划路水泥搅拌桩处理断面(水泥搅拌桩处理长度 10 m,规划路标高 5.5 m),与护塘河建立联合断面作为稳定性分析计算断面,采用瑞典圆弧法进行稳定性分析。

2.2 参数选取

水泥搅拌桩和高压旋喷桩处理范围内采用复合地基加固土体指标,其他采用原始地基土物理力学指标(地勘报告),参数如表 2 所示。

表 2 计算断面土层参数

土层名称	重度/(kN·m ⁻³)	黏聚力 C/kPa	内摩擦角 φ/(°)
土石混合料	20	0	30
高压旋喷桩加固土	18.7	51.4	8.6
水泥搅拌桩加固土	17.2	18.5	6.1

2.3 开挖稳定性分析

选取护塘河护岸与规划路地块完成填筑施工,河道护岸施工按最低要求,河道水位 1.2 m,地下水位为路面以下 0.5 m 时的施工期工况,模拟分析现有

地基处理措施下护塘河开挖时的护塘河稳定性。搜索最不利滑动面,得到最小稳定性安全系数 K_s=0.78<1.05,不满足《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)要求,如图 2 所示。原因主要在于②层淤泥含水量丰富,呈流塑状态,渗透性很差。在规划路预压堆载和规划路附近厂区填筑过程中,孔隙水无法从该层土体中及时排除,从而导致其抗剪强度下降,土体滑动面从水泥搅拌桩和高压旋喷桩加固区域下方滑出,最终基坑失稳。为避免护塘河开挖后产生基坑塌陷,开挖前需采取必要加固措施,保证护塘河开挖的安全稳定性。

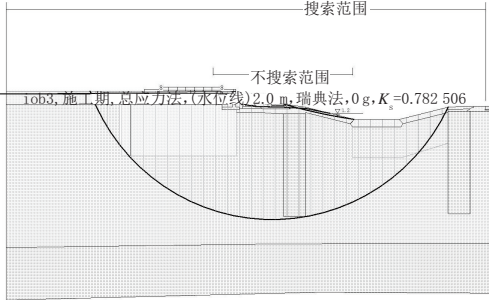


图 2 稳定性分析结果

3 加固方案

为确保基坑及其周边环境安全,根据现场实际

情况,需采用合理支护加固方案,以达到安全、快速施工的目的。钻孔灌注桩具有良好的适应能力和结构可靠性,是较为合适的支护方式。

根据基坑深度和地质情况,确定桩径和桩间距组合,设计桩径采用 800 mm,桩间距密排布置,桩长采用 30 m,钻孔灌注桩桩身采用 C30 混凝土结构,内部配筋选用 HRB400 级钢筋,确保支护结构具有足够的抗压和抗剪能力。考虑到嵌固深度与地质结构的匹配性,确保支护桩与土层的紧密结合,钻孔灌注桩打设在水泥搅拌桩之间,水泥搅拌桩及桩周土为钻孔灌注桩提供有效内支撑,从而形成灌注桩与水泥搅拌桩的联合支护型式。

钻孔灌注桩加固方案示意图见图 3。

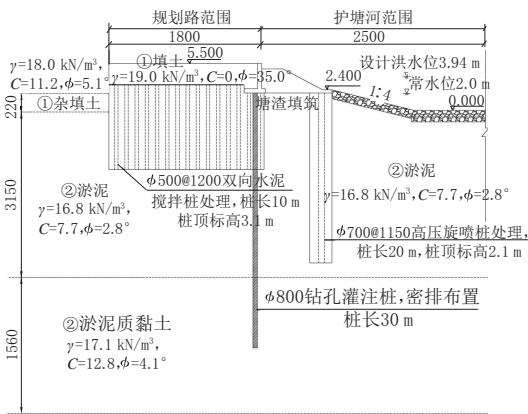


图 3 钻孔灌注桩加固方案示意图(单位:mm)

支护结构设计计算采用分区计算。取河道水位 1.2 m,地下水位为路面以下 0.5 m 时的施工期工况,规划路范围荷载按照 10 kPa 考虑,采用 FLAC^{3D} 建立数值计算模型,模拟分析支护结构加载后,护塘河开挖过程中的位移变化规律。

通过 FLAC^{3D} 建立的数值计算模型见图 4、图 5。模型尺寸为 80 m×16 m×53 m,同时对模型边界进行约束。

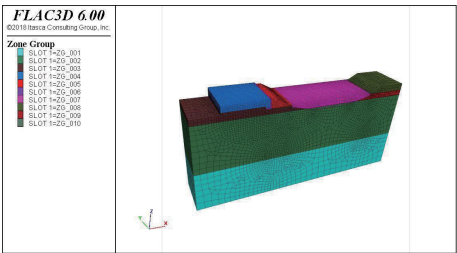


图 4 桩加载前数值模型图

4 加固方案模拟结果分析

钻孔灌注桩加载完成后对护塘河进行开挖计算,在开挖过程中产生的位移主要集中在护塘河开

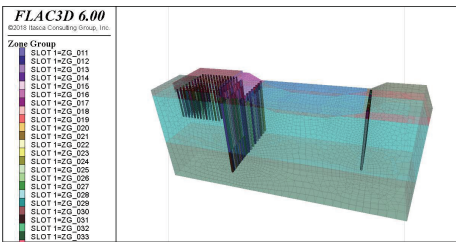


图 5 桩加载后数值模型图

挖基坑周围,支护结构中部区域产生的水平位移较大,两端产生的水平位移较小,最大位移 7.52 mm;在基坑底部产生了较大的竖向位移,最大位移 1.42 mm。因此,施工过程中需加强对支护结构中部区域和基坑底部区域的监测。

同时采用理正软件进行抗滑稳定性计算,采用瑞典圆弧法计算整体稳定性,其表达式为:

$$K = \frac{\sum \{ [w \cos \alpha - ub \sec \alpha] \tan \phi' + c' b \sec \alpha \}}{\sum W \sin \alpha} \quad (1)$$

式中:K为抗滑稳定性安全系数;W为土条重量,kN;u为作用于土条底面的孔隙压力,kN;a为条块重力线与通过此条块底面中点的半径之间的夹角,(°);b为土条宽度,m;c'为土条底面有效应力抗剪强度指标的凝聚力,kN/m²;φ'为土条底面有效应力抗剪强度指标的内摩擦角,(°)。

支护方案计算结果见表 3,满足《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)要求。

表 3 支护方案计算结构分析结果

支护型式	整体稳定性安全系数	抗倾覆安全系数
钻孔灌注桩	1.19	1.50

5 施工监测

后期施工过程中,同步对规划路周边地块及支护体进行深层水平位移监测,并形成监测报告,报告显示整个护塘河开挖过程中变形得到很好控制。监测过程中,钻孔灌注桩前 10 m 深度范围属于水泥搅拌桩与钻孔灌注桩的联合支护方案,由于水泥搅拌桩为钻孔灌注桩提供了有效内支撑作用,钻孔灌注桩在深度 10 m 范围内的侧向水平位移变化不大。但在深度 10 m 以后,钻孔灌注桩侧向水平位移急速加大,最大侧向水平位移达到 7.150 mm(见图 6)。选取钻孔灌注桩侧向水平位移最大处作为研究对象,监测其侧向水平位移与时间变化情况,结果见图 7。由图 7 可见,钻孔灌注桩的侧向水平位移在前 10 d 增加较快,之后随着时间的增加逐渐放缓,在 27 d 趋于稳定。

周边地块最大沉降 -6.52 mm ,基坑底部隆起 1.15 mm ,满足基坑支护《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)要求。监测数据表明,钻孔灌注桩与水泥搅拌桩的联合支护方案能有效保证护塘河开挖及周边地块安全。

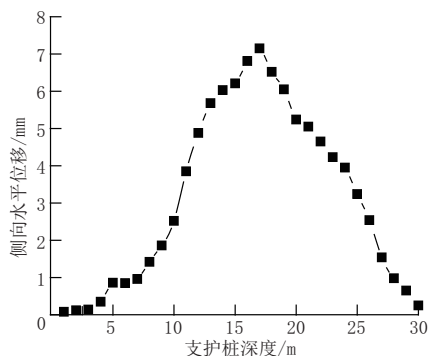


图6 钻孔灌注桩深层水平位移与支护深度监测结果

6 结 语

(1)护塘河现有加固措施无法满足护塘河开挖过程中的稳定性安全要求。

(2)钻孔灌注桩与水泥搅拌桩的联合支护方案在深厚软基路段起到了良好的支护作用,保证了护塘河开挖基坑和周边规划路的稳定性。

(3)钻孔灌注桩打设在水泥搅拌桩复合地基内,该复合地基对钻孔灌注桩的水平位移有一定限制

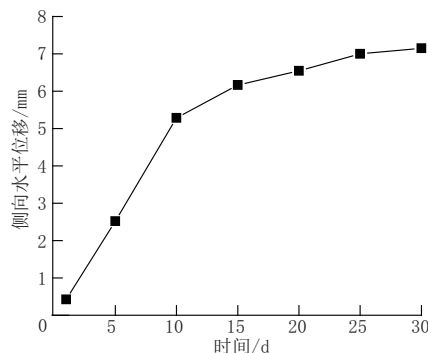


图7 钻孔灌注桩深层水平位移与时间变化监测结果

作用。

参考文献:

- [1] 赵意晋,刘恒,蔡晓慧,等.深厚软土地层中异形地铁车站深基坑开挖三维数值模拟分析[J].南京工业大学学报(自然科学版),2023,45(5):563-572.
- [2] 管大刚,胡志明,郑鹏鹏,等.开挖顺序及内支撑早期刚度对软土基坑稳定性影响规律[J].建筑科学与工程学报,2024,41(2):181-190.
- [3] 王晓录.软土地区深基坑变形监测及钻孔灌注桩加固效果研究[J].福建建材,2024(4):66-68;88.
- [4] 王甫云.小河坝大桥钻孔灌注桩施工技术要点及质量控制分析[J].交通科技与管理,2024,5(9):152-154.
- [5] 朱春柏,钱栋栋,余忠祥,等.考虑空间效应的基坑开挖对邻近隧道影响分析[J].地下空间与工程学报,2023,148(5):1471-1477.
- [6] 邓旭,甄洁,林森斌,等.基坑开挖引起地铁结构隆起的堆载控制研究[J/OL].铁道科学与工程学报,2024,21(6):1-13.

(上接第142页)

- 研究[J].东南大学学报(自然科学版),2025,55(2):487-495.
- [9] 牛新华,陈冠飞.大跨混凝土连续箱梁桥无缝拓宽受力分析与方案设计[J].结构工程师,2023,39(3):173-179.
 - [10] 陈朴,江静婧.公路桥梁拓宽拼接设计关键问题研究[J].黑龙江交通科技,2022(12):82-84.
 - [11] 李泽涛,王骞.梁式桥拓宽方法及其应用[J].北方交通,2015(2):9-14;17.
 - [12] 赵旭东.对城市桥梁拓宽设计的思考[J].城市道桥与防洪,2019(9):98-100.
 - [13] 邵景干.郑漯高速公路加宽工程新旧桥梁拼接设计施工技术研究[J].公路交通技术,2009,4(2):95-98;102.
 - [14] 李全林,杨超,李朝,等.车辆动力作用对拓宽桥现浇混凝土拼接缝的不利影响及控制对策[J].科学技术与工程,2024,24(33):

- 14424-14431.
- [15] Li K F, Yang C Q, Zhao Y B, et al. Effects of early vibration and resistant strategies on bond performances between high-strength concrete and rebar[J]. Structures, 2023(58): 105490.
 - [16] 吴昊,行车扰动下桥梁拼宽湿接缝混凝土性能试验研究[D].扬州:扬州大学,2023.
 - [17] JTG/T 3650—2020,公路桥涵施工技术规范[S]
 - [18] 严国齐,杨帆,汪剑.城市立交桥梁拓宽改造工程设计实践[J].城市道桥与防洪,2022(7):75-77;84.
 - [19] 李志军.高速公路改扩建工程桥梁拼接关键技术研究[J].北方交通,2016(3):13-15.
 - [20] 李子豪.拓宽桥梁新旧基础不均匀沉降及其对上部结构影响的研究[D].北京:北京交通大学,2019.