



外海人工岛明挖隧道深基坑边坡支护技术应用

蔡朝金

(中铁武汉大桥工程咨询监理有限公司)

摘 要：随着公路施工技术的不断进步，跨海通道工程逐渐增多，外海人工岛明挖隧道的深基坑边坡支护尤为重要。文章结合深中通道外海人工岛深基坑边坡设计思路，针对海上地基处理施工特点，详细介绍了外海深基坑边坡支护工艺的设计及施工方法，通过对边坡连续沉降位移监测，验证了玻璃纤维锚杆及钢筋混凝土边坡支护工艺设计的安全性，分析并总结深基坑边坡支护技术，在确保深基坑开挖边坡施工安全下提高施工工效，可为同类工程施工提供参考。

关键词：外海；深中通道；深基坑边坡支护；玻璃纤维筋锚杆支护

0 引言

随着城市高水平快速发展，高层建筑、地下建筑及隧道等工程大幅增加，深基坑边坡支护技术也应用越来越广泛。20 世纪 60 年代初期最早在法国发展起加筋土技术，70 年代多个国家开始了现代土钉墙技术的研究与应用^[1]。

土钉技术在我国应用始于 20 世纪 80 年代初，90 年代后国内深基坑工程大规模兴起，目前在高层建筑的深基坑支护中应用越来越多，甚至很多用于常规支护基坑失稳时抢险加固或塌滑处理。但由于土钉支护的局限性，在松散砂土、软土及丰富地下水源的情况下不能单独使用，须与其他的土体加固支护方法相结合，由此发展出复合式土钉支护施工工艺。在复合式土钉支护的施工中，土钉多使用钢筋或型钢，而对于临时结构来讲不便于后期拆除。玻璃纤维筋因其具有较高抗拉强度和较低抗剪强度，常在临时地连墙施工中使用。

玻璃纤维筋的物理性能适用于本工程，但在外海人工岛中高水位、中粗砂地质深基坑支护缺乏相关经验。本文以深中通道外海人工岛为背景，结合玻璃纤维筋锚杆在深基坑护坡支护中的应用，总结外海深基坑支护技术。

1 工程背景

深中通道外海人工岛采用钢圆筒及副格插入海床形成围闭结构，向岛内抛填中粗砂形成陆域，并在岛内埋设降水井，打设排水板开展降水联合堆载预压进行地基处理。地基加固效果

满足要求后，开始深基坑开挖及边坡支护施工。

外海人工岛深基坑由纯放坡式开挖优化为放坡加土钉支护方式，大幅减少开挖及后续回填工程量，避免因施工场地局限制约施工进度^[2]。坡面采用 $\phi 20$ mm 玻璃纤维筋锚杆与双向钢筋网片固定后浇筑 8 cm 厚 C20 细石混凝土进行护坡。边坡设计为两级边坡，上部边坡坡比 1:1.3，下部边坡坡比 1:1.4，锚杆长度 6~8 m，按照竖向 2 m，纵向 1.5~3 m 进行布置。坡面预留排水管，坡底及坡顶设置排水沟。

人工岛基坑开挖方量约 51 万 m^3 ，最大开挖宽度 126.7 m，单次开挖最大长度为 115 m，最大开挖深度为 16.7 m，坑底坡度为 2.98%。深基坑边坡支护断面见图 1。

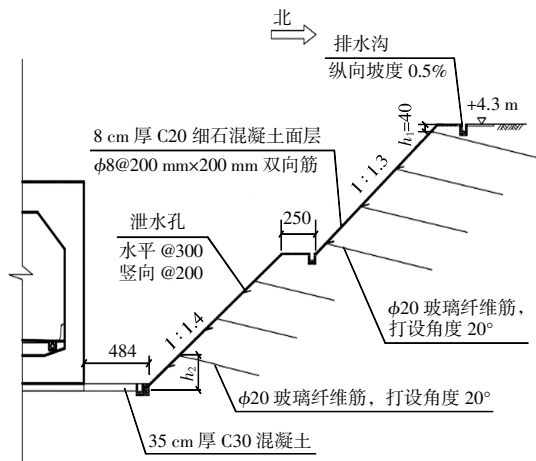


图 1 基坑边坡典型横断面示意图 (cm)

2 设计思路

基坑边坡支护必须严格遵循“安全适用、保护环境、技术先进、经济合理”的设计原则^[3]，要在有效确保施工安全及支护坡体稳定的状况下，结合基坑深度、边坡土的性质、地下水条件和周围环境状况选择切合实际的支护方式，加快施工进度，缩短工期，降低成本。

深中通道外海人工岛基坑土质为中粗砂，边坡支护方式为玻璃纤维筋锚杆+钢筋网片+细石混凝土，该方式作业简便快捷、作业工期短，不需要在基坑内安设临时支撑，便于控制施工作业质量，适用于放坡开挖场地受限放坡开挖工程量大的基坑。通过理论分析计算边坡稳定安全系数(图2)，计算公式^[4]如下：

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n T_{di} \cdot \sin(\theta + \beta) \cdot \tan \varphi + G \cdot \cos \beta \cdot \tan \varphi + c \cdot A}{G \cdot \cos \beta - \sum_{i=1}^n T_{di} \cdot \cos(\theta + \beta)}$$

式中： T_{di} 为第*i*根锚杆受拉承载力设计值，kN， $T_{di}=90$ kN； G 为边坡岩体自重，kN，经计算得 $G=470.4$ kN； C 为边坡岩体结构面的黏聚力标准值，kPa，因为边坡岩体全部为中粗砂，取 $C=0$ ； φ 为边坡岩体结构面的内摩擦角标准值，(°)，取 $\varphi=25^\circ$ ； A 为边坡岩体结构面面积， m^2 ； β 为岩体结构面与水平面的夹角，(°)，取 $\beta=37.6^\circ$ ； θ 为锚杆的倾角，(°)，取 $\theta=20^\circ$ ； n 为锚杆的根数，取 $n=4$ 。

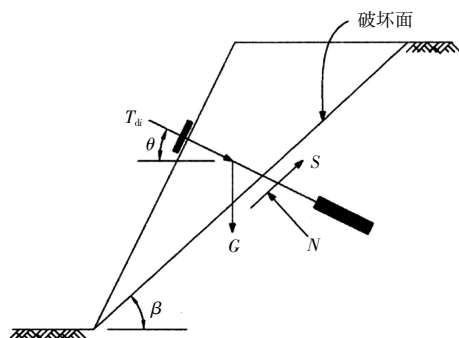


图2 滑动面受力示意图

经计算， $K=3.3>1.2$ ，边坡安全性满足要求。

3 施工流程及方法

3.1 施工流程

深基坑采用分区域分阶段分层开挖法，逐层进行边坡支护，总体流程图如图3所示。

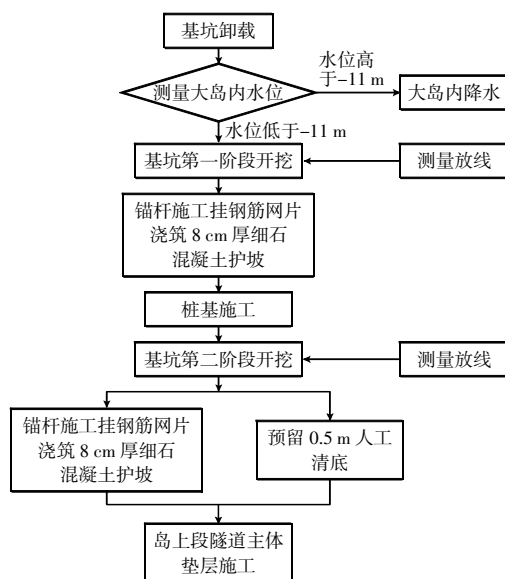


图3 总体施工流程图

3.2 施工方法

因施工区域属外海孤岛，开挖施工前规划布置岛上临时道路及出运通道，第一阶段开挖与第二阶段开挖实施间隙，需进行桩基施工。为满足机械合理布置需要，确保优质高效完成，一阶段开挖各区域沿纵向呈台阶式分布。随着开挖纵向深度每2 m在两侧边坡进行锚杆支护，各层开挖完成后依次挂网浇筑细石混凝土护坡。各段开挖完成后，对场地进行整平，提供良好作业面，待桩基础施工完成后，台阶传递和分层相结合方式进行第二阶段开挖，机械开挖至距离基槽底部50 cm时，改为人工开挖，避免对基底原状砂层造成扰动。

3.2.1 玻纤锚杆施工

锚杆支护钻机采用MLX-150D型，整机重6 t，竖向最高打设1.5 m，套管直径110 mm，打设角度设置为20°。玻纤锚杆施工采用先插锚杆后注浆的方法。施工工艺流程为：测量放线确定孔位→钻机就位→钻孔(套管)→清孔→安装锚杆→注浆→挂网→锚头连接→浇筑细石混凝土护面→对锚头进行保护。

1) 清理坡面

测量放线后利用挖机对边坡进行修坡并拍打密实，锚杆施工前进行全面检查，人工用铲锹进行二次切削清坡，以达到设计规定的坡度。

2) 孔位布点

土钉成孔前，应按设计要求定出孔位并作出

标记编号。在基坑边坡坡顶设置基线或间隔 10 m 设置一处基点, 并采用干撒生石灰及插旗等方式进行标识, 按照基点拉尺确定锚固点, 并做好标识。

3) 钻机就位

开挖时在每排锚杆下方 1.5 m 高度位置预留 6 m 钻机作业平台, 钻机移机到孔位, 调整好角度, 将支腿支撑到地面确保钻进过程不发生位移, 钻孔应按设计图所示位置、孔径、长度和方向进行, 并特别注意不破坏周边地层^[4]。

4) 成孔

利用机械套管钻孔, 套管安装前先检查套管直径, 要求直径偏差小于 10 mm, 然后安装第一节钻杆, 装好后安装首节牙套管, 开钻时将牙套管对准所要施工的土钉孔位, 采用罗盘仪将钻机角度调整为 20°, 角度偏差 $\pm 1^\circ$ 。通过与钻杆连接的空压机, 采用边钻孔边吹气的方式, 通过钻杆与套管之间的空隙排出废渣。钻孔过程中如遇障碍物需调整孔位时, 不得影响支护安全。

5) 锚杆安装

向钻孔安装玻璃纤维锚杆前, 应将孔内砂屑清洗干净, 采用对中定位支架进行玻璃纤维锚杆孔内对中安装。沿杆体全长设置对中定位支架, 支架间距 2 m。对中定位支架构造见图 4。



图 4 玻璃纤维筋对中定位支架

6) 注浆

锚杆安装到位后, 应及时按 M20 配比将水泥砂浆或水泥净浆注入孔内, 采用搅拌机现场搅拌。注浆导管应插至距孔底 5~10 cm 处, 注浆同时将导管以匀速缓慢撤出, 整个过程中导管的出浆口应始终处在孔中浆体的表面以下, 保证孔中气体能全部逸出。导管离孔口 0.5~1 m 时高压注满, 并保持高压 3~5 min; 终止注浆时, 压力应大于 0.6 MPa, 注满后及时封堵, 让压力缓慢扩散。如注浆量未达到设计用量, 应二次或多次注浆。注浆量计量按照单根设计用量在搅拌罐中做出明显

标记, 每个孔注浆过程中需确保注浆量大于设计用量^[5]。

7) 面层挂网

待锚杆注浆完成后进行网片铺设, 钢筋网采用马凳筋或撑筋进行固定, 确保在混凝土垫层内居中布置。钢筋网应采用绑扎搭接, 搭接长度不得小于 20 cm, 且各层网片应错开横向搭接部位不少于 35d。由于土钉采用玻璃纤维锚杆, 因此不得在土钉部位进行电焊作业。钢筋网片宜采用 $\phi 8@200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 间距成品钢筋网片。挂网绑扎完成后, 应在土钉杆体位置通长处绑扎 2 根 $\phi 16 \text{ mm}$ 加强钢筋。

8) 锚头托盘施工

玻璃纤维筋土钉必须与钢筋网连接可靠, 采用配套螺母、 $\phi 140 \text{ mm}$ 托盘和混凝土面层有效连接, 连接做法见图 5。托盘应垫设平整, 玻璃纤维筋端部应露出螺母 3~5 个丝扣。

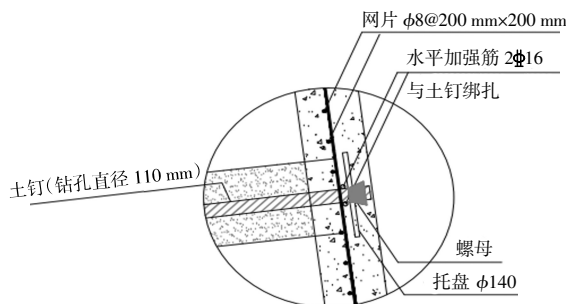


图 5 土钉与面层连接细部图

9) 细石混凝土浇筑

二级边坡开挖并完成锚杆打设及挂网后, 按照 5 m 一条整体浇筑边坡防护混凝土面层。自下而上进行浇筑, 采用刮杠粗平, 木抹人工二次收平。混凝土浇筑采用 62 m 汽车泵在基坑边坡外侧驻位, 混凝土由岛上拌合站生产。一级边坡开挖成, 再统一对平台及边坡进行整体支护及硬化处理。

3.2.2 监控监测

为了保证基坑开挖期间基坑施工安全、顺利进行, 必须对基坑边坡及支护结构进行沉降和位移监测^[6], 通过监测数据的分析, 对基坑结构的安全稳定进行预控, 实现信息化施工。

经 23 个月的连续观测, 深基坑边坡顶沉降监测点的累计沉降量介于 -2.02~16.37 mm 之间。大岛深基坑边坡顶沉降监测点的变化速率值介于 -0.42~0.51 mm/d 之间, 均未超出监测预警值 24 mm 和

2~3 mm/d; 西大岛深基坑现有边坡顶水平位移监测点的累计水平位移量介于-5.99~22.45 mm之间。现有边坡顶水平位移监测点的水平位移变化速率值介于-0.39~0.67 mm/d之间, 均未超出监测预警值 30 mm 和 2~3 mm/d; 西大岛深基坑地下水位标高介于-4.769~-4.121 m之间, 未超出监测预警值-3 m; 水位变化速率值介于-45~54 mm/d之间, 均未超出监测预警值 500 mm/d。

3.3 施工要点

开挖前, 明确划分各机械作业区域。开挖过程中严格按照划分方案执行, 避免因机械工作密度过高影响作业效率。开挖过程中, 预留岛内降水及观测井避免被破坏。此外, 必须加强对监测仪器的保护, 可设置明确警示标识。开挖期间, 需确保岛内水位满足设计要求。开挖分层厚度原则上不超过 2 m, 通过使用 GPS 测量设备对场内开挖深度进行监测, 及时提供开挖深度反馈。

施工中, 如出现暴雨等极端天气, 需暂停施工, 并转移挖掘机等作业设备远离边坡, 暴雨等恶劣天气来临前, 采用防雨布对开挖成型的边坡进行临时苫盖防护。基坑开挖过程中, 应边开挖边支护, 锚杆支护完成后应分级对边坡进行挂网浇筑混凝土护面。

边坡坡顶应在开挖前整平, 避免局部堆高造成坍塌。钻孔应连续完成, 边坡成型时, 采用挖掘机挖斗进行修坡并拍打密实, 加强自身稳定性, 锚杆施工前进行全面检查, 人工用铲锹进行二次切削清坡, 以达到设计规定的坡度。边坡顶部截水沟采用砖砌抹灰方案, 并设置自东向西 0.5% 的纵坡, 每 50 m 设置一处尺寸为 1 m × 1 m × 1 m (长 × 宽 × 高) 的集水井并配备水泵。

4 施工难点分析与工艺措施

4.1 难点分析

1) 人工岛基坑开挖及边坡支护工期紧, 开挖方量较大, 出运难度较高。影响后续地基加固及结构施工进度, 对现场设备组织安排提出了较高要求。

2) 开挖深度较大, 最大开挖深度 16.7 m, 边坡坡度高, 需按照分层开挖并同步进行边坡支护, 实施过程中涉及到基坑开挖及边坡支护交叉同步作业, 实施要求较高。

3) 安全管理难度突出, 风险点多面广。基坑开挖过程中, 施工区域工程机械众多, 交叉作业

频繁, 且深基坑高边坡支护高处作业、防止极端工况下边坡坍塌安全风险较大, 现场安全管理工作难度大。

4.2 工艺措施

1) 分层放坡与锚杆支护方法能有效保证深基坑边坡安全坡率, 消除因场地局限带来的不利影响。减少开挖及回填量, 大大节约施工成本及施工进度。

2) 玻璃纤维筋同钢筋相比质量轻, 便于安装, 且自身抗拉强度高, 抗剪能力弱, 在需要拆除的临时结构中可灵活应用。

3) 边坡防护采用锚杆施工、挂网及细石混凝土浇筑方式, 通过对土钉进行拉拔试验, 结果显示土钉抗拔力均大于 90 kN, 通过挂网及细石混凝土有效保证边坡整体性, 提高边坡安全稳定性^[7]。合理安排施工工序, 基坑顶部严禁超载堆载, 及时反馈监测信息指导现场施工。

5 结语

深基坑支护施工工艺多种多样, 设计单位和施工单位应结合数据和现场实际情况, 选择合理的深基坑支护方案, 从而达到建设工程效益最优。

本文结合深中通道外海人工岛基坑边坡支护项目, 介绍了玻璃纤维锚杆结合混凝土钢筋网片边坡支护工艺在深基坑支护中的设计思路及应用, 验证了在中粗砂地质条件下玻璃纤维锚杆抗拔力、边坡稳定性及玻璃纤维筋在临时护坡结构的适用性。通过前期对总体工艺优化, 结合主体施工进度, 在施工现场局限、工程机械众多、交叉作业频繁、深基坑安全风险大等诸多不利因素下提高了施工进度、保证了深基坑边坡支护稳定, 取得了较理想的成果, 达到了预期效果。为后续外海深基坑边坡防护标准化施工奠定了基础, 具有较强的实用性及推广价值。

参考文献:

- [1] 陈肇元, 崔京浩. 土钉支护在基坑工程中的应用[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [2] 郑伟锋, 刘慧芬, 宋肖冰, 等. 深中通道西人工岛玻璃纤维锚杆边坡支护应用研究[J]. 建筑科学, 2020, 36(S1): 130-136.
- [3] JGJ 120—2012, 建筑基坑支护技术规程[S].
- [4] GB 50086—2015, 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范[S].
- [5] 山西省工业设备安装集团有限公司. 玻璃纤维筋(GFRP)在土钉墙边坡支护中的应用研究[R]. 2020.
- [6] JTS 205—1—2008, 水运工程施工安全防护技术规范[S].
- [7] 程涛. 混凝土中玻璃纤维筋黏结强度试验研究[J]. 安徽建筑, 2021, 28(8): 246-247, 270.