

多级桩锚结构体系在山地城市有限空间的实践

张金华, 李翔, 蒋莉

(重庆设计集团有限公司市政设计研究院, 重庆市 401120)

摘要: 为城市核心区用地受限条件下极软岩超限边坡的设计难题提供解决思路, 依托实际工程, 采用数值模拟和现场监测的方法, 对城市核心区用地特征和超限挡墙设计挑战进行分析, 对设计阶段材料选择、结构优化和生态设计等关键技术进行探讨。结果表明: 对于用地受限的极软岩超限挖方边坡, 采用与压力分散型锚索相结合的多级桩锚结构体系, 能有效的提高空间利用效率, 实现极限保护, 降低环境影响; 对于城市核心区利用立面空间进行植物嵌入, 创造生态空间, 形成层层遮挡, 能弱化挡墙, 给城市带来较好的绿化效果。

关键词: 超限挡墙; 城市核心区; 用地受限; 结构优化; 材料选择; 生态设计

中图分类号: U45

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)09-0159-04

Practice of Multi-level Pile Anchor Structure System in Limited Space of Mountainous Cities

ZHANG Jinhua, LI Xiang, JIANG Li

(Chongqing Design Group Co., Ltd. Municipal Design & Research Institute, Chongqing 401120, China)

Abstract: Aiming to provide solutions to the design challenges of ultra-soft rock over-limit slopes under land use constraints in urban core areas, based on actual engineering cases, the numerical simulation and field monitoring methods was adopted to analyze land use characteristics and over-limit retaining wall design challenges in urban core areas and meanwhile to explore key technologies in material selection, structural optimization, and ecological design during the design phase. The results demonstrate that for over-limit excavation slopes in ultra-soft rock with land use constraints, the implementation of a multi-level pile-anchor structural system combined with pressure-dispersed anchor cables can effectively enhance spatial utilization efficiency, achieve ultimate protection, and reduce environmental impact. Furthermore, utilizing vertical space for plant integration in urban core areas to create ecological spaces and form layered shielding can mitigate the visual impact of retaining walls and provide significant greening effects for the city.

Keywords: ultra-high retaining wall; core area of the city; limited land use; key technologies

0 引言

随着城市化进程的加速, 城市用地日益紧张, 尤其是在城市核心地段^[1-2], 如何在有限空间内实现高效、安全的基础设施建设成为亟待解决的难题。桩锚挡墙作为一种重要的土木工程结构, 在城市核心区建设中扮演着重要角色。然而, 坡顶建筑使得用地受限给超限边坡的设计带来了巨大挑战。

超限高边坡是指岩质边坡高度超过 30 m 或土质边坡高度超过 15 m 的边坡, 以往的研究多是基于超

限填方路基^[3-8], 很少有对超限挖方路基支挡结构的探讨, 本文旨在探索城市核心区用地受限条件下超限挖方支挡结构在设计过程中的关键技术, 以提高空间利用效率, 在确保结构安全的前提下和降低环境影响, 其设计思路可为今后类似工程提供参考。

1 城市用地受限条件下的设计挑战

城市核心区通常具有高密度开发、功能混合和交通繁忙等特点, 这些特征使得可用土地资源极其有限^[9-10]。在这种环境下, 超限边坡的设计面临着诸多挑战。首先, 征拆经济性差, 使得用地紧张, 传统放坡和挡墙方案难以实施; 其次, 周边建筑物临近, 施工空间狭小, 变形控制要求高^[11], 对挡墙提出了更高要求; 再者, 城市核心区对景观和环境的要求较高, 挡墙设计需要兼顾美观和生态功能。

收稿日期: 2025-08-11

基金项目: 重庆设计集团有限公司市政设计研究院科研项目, 城市核心区市政道路改造的关键性技术研究及运用(20241201)

作者简介: 张金华(1994—), 女, 硕士, 工程师, 从事岩土结构设计及研究工作。

此外,城市生活区管线密集,地质条件多变,这些因素都增加了超限边坡设计的难度。如何在有限的空间内实现结构安全、功能完善和环境友好的挡墙设计,成为工程师们面临的主要挑战。这些问题的解决需要创新设计理念和办法,综合考虑技术、经济、环境等多方面因素,以实现城市核心区基础设施的可持续发展。本文以实际工程案例重庆市内环快速路西北半环拓宽改造工程为依托,对超限挡墙在城市核心区用地受限情况下的设计进行探讨。

2 多级桩锚结构体系在城市有限空间的设计

2.1 工程概况

本文依托项目内环快速路西北半环拓宽改造工程,起于凤中立交,向北延伸至人和立交西侧,全长18.1 km,现状为6车道,主线设计行车速度80 km/h。其中石马河—石子山段两侧为山体,原道路纵坡3.0%~4.5%,为内环快速路事故多发路段,多为超速追尾事故,前期规划阶段被多方强烈要求作为改造重点。在前期方案阶段对本段进行了改线、降坡等多方案比选设计,因坡顶为江北区教委石子山工业园,被租用为厂房,一直在使用中,为避免建筑拆迁和景观等原因,最终确定按隧道设计。但在施工阶段深入设计后,经多次论证比选,考虑工期、造价等多方面因素,业主最终要求采用“分离式路基全放坡方案”。纵坡调整后,满足规范要求,但形成了最高35 m的边坡,并经各方多次协商,征拆困难,只能选择采用支挡结构,保证上方厂房的正常运营,然而边坡高度太大,条件又受限,使得设计在该阶段承受较大压力。

2.2 支挡结构设计

该项目平纵关系对边坡的设计十分不利,高差32 m,坡顶建筑距道路边缘最近仅12.5 m;建筑为三层砖房,浅基础,意味着对变形敏感;通过进一步勘察发现地质条件差强人意,坡顶存在一现状水池,水池结构薄弱,长期渗漏,使得水池及周围地基处于饱水状态,裂隙张开度较大,且存在少见的厚层卵石土及较厚的强风化层,岩石参数较低。

设计考虑将常用的拉力型锚索改为压力分散型锚索:压力型可改善极软质岩受力条件,灌浆体受压,不易开裂,防腐性能更好,承载力高。此外分散型有利于分段锚固,有效锚固长度加长到20 m,加强了极软质岩的整体锚固力。

按照常规设计思路,设置一级桩锚挡墙,对高

32 m的岩土混合边坡进行支挡,但悬臂过大、变形计算难以控制,且车行视线不佳。基于此,考虑采用两级锚拉桩进行支挡。结合地质条件和计算进行分级,采用下级挡墙悬臂高16 m,桩尺寸2 m×3 m,抵抗整体岩石应力释放,同时为上排桩提供强有力的嵌固;上级挡墙悬臂12 m,平台放坡高4 m,预留中间平台,减少荷载,有效分配荷载给两级桩。并通过有限元计算确定平台宽度。

2.2.1 设计原则

边坡安全等级为I级;安全系数为1.35;设计使用年限为50 a。

2.2.2 模型建立

采用大型有限元软件MIDAS GTS建立二维有限元模型,分析不同台阶宽度对边坡稳定性的影响。

模拟采用程序中提供的莫尔—库伦屈服准则建立二维弹塑性有限元分析模型。建立计算二维模型如图1所示,模型横向宽87.8 m,左侧高度56.6 m,右侧高度43.8 m。模型的上部边界为自由面不施加约束,对模型的其它平面施加水平和竖向约束,模型底部的节点为固定节点。

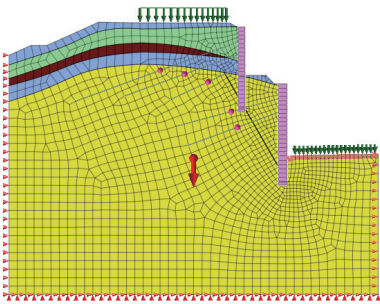


图1 二维有限元模型

2.2.3 计算参数选取

岩土体及支护结构参数如表1所示。

表1 岩土体及支护结构参数表

围岩类别	弹模/ MPa	泊松比 ν	黏聚力 C/Pa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
锚索	195 000	0.2	—	—	2 400
结构	30 000	0.2	—	—	2 550
素填土	18.5*	0.35	5	24	2 150
中等风化泥岩	1 554	0.37	370	32.46	2 530
粉质黏土	19*	0.3	12	19.5	2 020
卵石土	40	0.25	0	35	2 200

注:带“*”号为经验值。

2.2.4 施工工况

本段支挡结构施工的主要过程可以分为以下几个工况。工况1:初始应力分析,位移清零;工况2:上台阶桩施工;工况3:上台阶开挖、施工锚索及挡

板;工况 4:下台阶桩施工;工况 5:开挖至路面、施工锚索及挡板;工况 6:道路运营阶段。

2.2.5 结果分析

从图 2 至图 5 的位移云图及图 6 的曲线图可以看出,由于桩顶房屋荷载的存在,平台宽度越大,上排桩离房屋越近,桩顶位移越大,其位移值呈线性增加;而下排桩桩顶位移随平台宽度的增加减小,其中平台宽度为 7 m 时,较平台宽度为 6 m 时的位移值显著减小,而平台宽度 8 m 与平台宽度 7 m 下排桩位移值相差不大;综上所述,当平台宽度超过 7 m 时,宽度的变化对上下排桩桩顶位移的影响都不大,故选取平台宽度为 7 m 进行支护设计较为合理。当台阶宽度为 7 m 时计算得边坡整体稳定安全系数为 1.55。

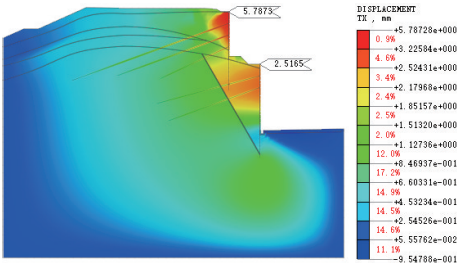


图 2 台阶宽度 5 m

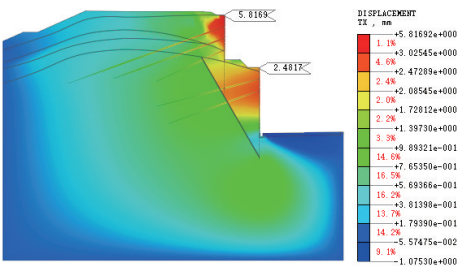


图 3 台阶宽度 6 m

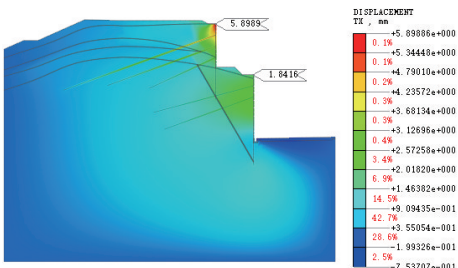


图 4 台阶宽度 7 m

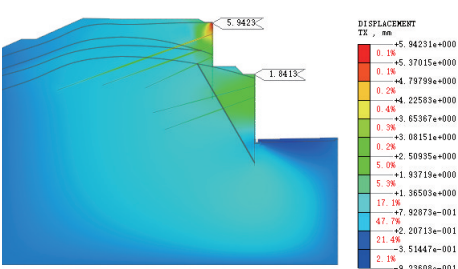


图 5 台阶宽度 8 m

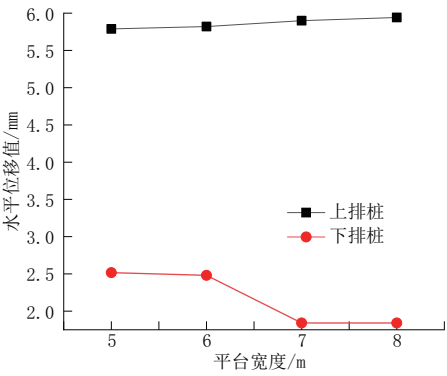


图 6 不同平台宽度桩顶位移曲线图

从图 7 至图 8 内力云图可以看出,上下排桩的最大剪力和最大弯矩均出现在桩嵌固点位置,其中最大值出现在下排桩嵌固点位置,因此在实际设计中应对下排桩桩嵌固点位置进行加强。

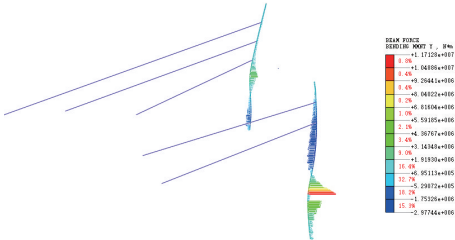


图 7 桩弯矩云图

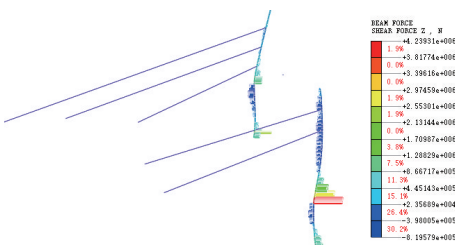


图 8 桩剪力云图

2.2.6 数值模拟预测计算与实际对比

选取计算剖面位置上排桩桩顶位移监测数据与数值模拟数值进行对比,如图 9 所示。

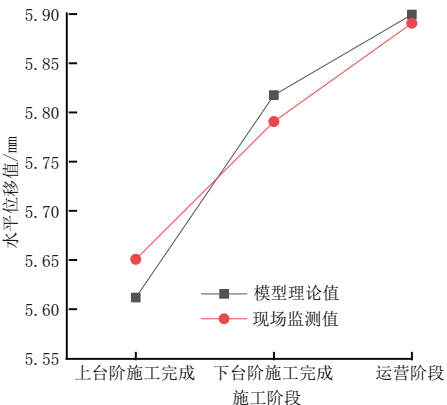


图 9 数值模拟与现场监测数据对比

根据监测数据可知,采用与压力分散型锚索相结合的多级桩锚结构体系,能很好的解决城市有限

空间条件下,极软质岩超限挡墙的设计问题。且验证了有限元计算模型的正确性。

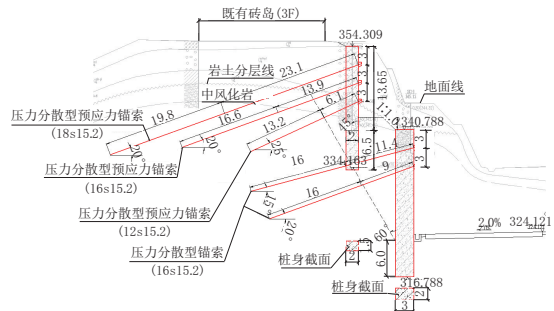


图 10 典型横断面

2.2.7 压力分散型锚索详细设计

采用 1×7φ_{15.2} 钢绞线,钢绞线强度等级为 1 860 MPa,岩层与锚固体间极限黏结强度标准值取 360 kPa,锚索竖向间距 3 m,锚固体直径 190 mm,锚孔倾角从上至下,依次为 20°、20°、25°、15°、20°。

根据计算,锚索根数从上至下依次为 18 根、16 根、12 根、16 根、16 根,锚索共分成 6 个锚固单元,第 1 个(远端)、第 2 个、第 4 个、第 5 个(近端)锚固单元各布置 3 根钢绞线,锚固体长度取 3 m;第 3 个、第 6 个锚固单元布置 2 根钢绞线,锚固体长度取 2 m。锚索设计大样图如图 11 所示。安全型压力分散装置见图 12。

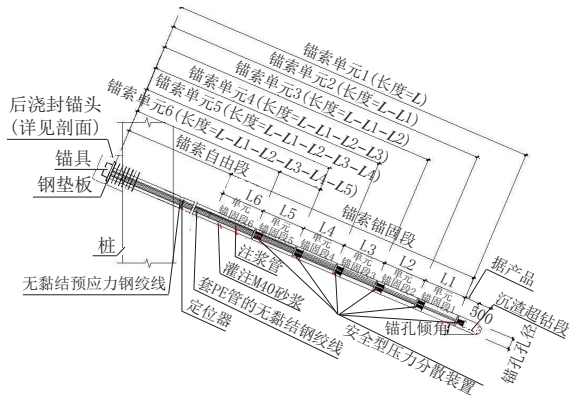


图 11 安全型压力分散锚索结构构造大样图

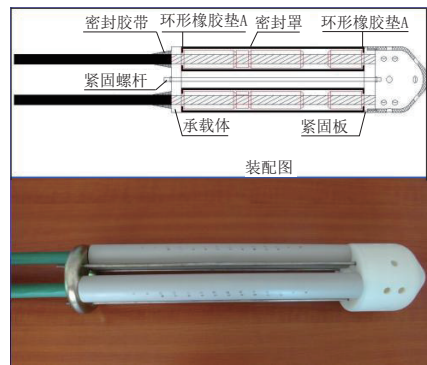


图 12 安全型压力分散装置构造图

压力分散型锚索的防腐至关重要,其直接关系到锚索的长期耐久性和整个工程的安全。本工程在

锚固段防腐:在成品压力分散装置中填充防腐油脂;自由段防腐:采用无黏结钢绞线(含 PE 管);锚头(锚具)防腐:采用钢质保护罩保护锚具和外露的钢绞线,用密封胶密封锚板、垫板、密封垫圈、保护罩之间的所有缝隙,然后从保护罩的注油口注入黄油或黄油与石蜡的混合料,用堵头封口,最后用 C30 混凝土浇筑保护罩和构造物槽口,捣实、密封。

2.3 超限挡墙与周边环境的协调设计

道路作为城市枢纽的重要一环,其品质的好坏直接影响着所处城市的发展命脉^[12],该挡墙作为内环重要节点虽保证房屋的安全、节约了整体投资,但长而高的直立挡墙,行车视觉比较压抑,设计在高档墙中利用立面空间进行植物嵌入,预留植物种植槽,在种植槽内种植攀爬垂吊植物对挡墙进行遮挡,弱化挡墙,如图 13 所示。



图 13 绿化设计现状

3 结 论

(1)针对有限空间的超限挖方边坡,采用分级桩锚挡墙能有效兼顾受力和保护需求,提高空间利用效率,降低环境影响。

(2)压力分散型锚索可改善极软质岩受力条件,灌浆体受压,不易开裂,防腐性能更好,承载力高,可用于超限挡墙在极软岩条件下的设计。

(3)对于两台阶式桩锚挡墙,当桩顶有荷载时,台阶宽度的变化对上排桩桩顶位移的影响程线性;但对下排桩却不是,当宽度达到一定值后,台阶宽度的增加对下排桩的桩顶位移的影响将减小,本项目中该平台宽度为 7 m,当平台宽度大于 7 m 时,宽度的变化对桩顶位移的影响减小,几乎可以忽略不计。

(4)对于两台阶式桩锚挡墙,其弯矩和剪力最大值均出现在下排桩嵌固点位置,因此在实际设计中应对下排桩桩嵌固点位置进行加强。

(5)对于超限挡墙可以利用立面空间进行植物嵌入,创造生态空间,形成层层遮挡,弱化挡墙,给城市带来更好的绿化效果。

(下转第 175 页)