

易滑地层多级建筑边坡治理工程分析

李杨秋 李安兴 唐秋元

(中煤科工集团重庆设计研究院有限公司,重庆 400016)

【摘要】 项目处长江一级斜坡,属于易滑地层,附近曾发生过滑坡、变形体不良地质现象,按建筑方案切坡以后分台地形成 3 级较高的人工边坡,高层建筑位于各阶边坡平台,距离坡顶较近,建筑修建后在地震、风荷载、竖向荷载作用下会有部分水平力通过斜坡岩土体传递到支挡结构,造成作用在支挡结构上的剩余下滑力增大。通过理论公式和数值模拟相结合的方法对斜坡整体稳定性及人工边坡局部稳定性进行了验算,肯定了支挡方案的合理性,分析了建筑水平荷载对边坡支挡结构内力的影响趋势,提出支挡结构设计应适当考虑建筑传递水平力的不利影响,建议采取加强建筑边桩、地梁刚度和桩顶增设抗拉锚杆等措施增强建筑自身抵抗部分水平力的能力。

【关键词】 易滑地层; 多级边坡; 整体稳定性; 局部稳定性; 支挡设计; 建筑荷载

【中图分类号】 TU 457

【文献标识码】 B

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2015.04.011

Analysis of Multistage Building Slope Treatment Project in Slippery Stratum

Li Yangqiu Li Anxing Tang Qiuyuan

(CCTEG Chongqing Engineering Co., Ltd, Chongqing 400016, China)

【Abstract】 The project is located in the first level slop of Yangtze River and belongs to the slippery stratum. There had been adverse geologic phenomena like landslide and deformable body near it. After cutting slopes according to the construction scheme, the tableland is divided into three relatively high artificial slopes, and the high-rise buildings are located in each plain stage of all stages of side slopes and near to the slope top. After the construction of buildings is finished, under the influence of earthquakes, wind loads and vertical loads, there will be part of the horizontal force transmitted to the retaining structures through rock and earth mass of slopes, resulting in a increase of the surplus sliding force on retaining structures. Through combining theoretical formulas and numerical simulation method, this paper checks the overall stability of the slope and the local stability of artificial side slope, confirms the rationality of retaining scheme, analyzes the trend of architecture horizontal load's influence on the internal force of side slope retaining structure, proposes that the retaining structures should be designed to consider the adverse effects of building transmitting horizontal force and recommends to take measures such as strengthening the construction side piles, strengthening the rigidity of ground beams and additional tensile anchor on pile block to enhance the capacity of building itself to resist part of horizontal force.

【Key words】 slippery stratum; multistage building slope; overall stability; partial stability; retaining design; construction load

0 引言

作为山地城市的重庆,土地资源日趋偏少,为修建建筑常不得不选择在地势高差大的斜坡地段进行大规模切坡、回填形成台地。这些建筑物距离边坡坡顶较近,其基础深入斜坡中,属于典型的坡体建筑^[1-2]。斜坡整体稳定性及人工高边坡的局部稳定性直接影响建筑物的安全,特别是在附近曾经发生过变形或滑坡的易滑地层区域修建高层建筑群时,

更应慎重选取支挡方案,从安全性出发合理控制每阶边坡的切坡高度,有效控制边坡坡顶水平变形量,充分考虑上部建筑物通过桩基传递到边坡坡体内的附加外荷载。本文将建筑物修建后竖向力、地震力和风荷载共同作用下的工况作为支挡结构设计的不利工况,进行了理论分析和数值计算,提出技术措施减少建筑物水平荷载传递至坡体不稳定岩土体中,以减小边坡支挡结构承受的剩余下滑力,保证建筑

及边坡的安全。

1 工程地质概况

1.1 项目概况

工程项目位于重庆市涪陵滨江路,场地斜坡整体为顺向坡,该区域地层为自流井页岩和泥岩,岩层层间裂隙发育,多存在层间泥化夹层,为易滑地层。项目由多层建筑(6~7F)及高层建筑(27~33F)组成,地下室4个(-1F~-4F),根据设计整平高程,场地施工后,将在建筑物与环境之间形成大量基坑边坡及环境边坡,因放坡条件受限,大多数边坡为直立切坡,切坡岩体以泥岩为主。

1.2 场地附近不良地质现象

项目附近区域曾在2008年1月3日发生过顺层岩质滑坡,滑体方量130万 m^3 。文献[3]详细分析了滑坡特征及成因,认为顺层结构、碎裂结构的岩体为滑坡的孕育和发生提供了物质基础和结构条件,是滑坡发生的结构性因素;泥质砂岩和泥岩属中等膨胀性岩石,遇水极易软化,加之历史上构造应力的作用,形成层间泥化夹层,泥化夹层含膨胀性粘土矿物蒙脱石和伊利石,是造成滑坡发生的控制性因素。随着坡体的蠕动变形,在坡体岩层间泥化夹层发生软化和坡体具备临空剪出的条件等因素的综合作用下,层间剪切带逐渐贯通,最终导致滑坡发生[3]。

1.3 工程地质条件及水文地质条件概述

1) 地形地貌

场地属构造剥蚀侵蚀丘陵斜坡地貌,长江一级斜坡上,斜坡走向北西—南东向,总体坡向 $35^\circ\sim 65^\circ$,总体坡角 $10^\circ\sim 37^\circ$ 。场区最高点高程264.75 m;最低点高程175.08 m,相对高差89.67 m。

2) 地质构造

场地位于箐口背斜东翼,岩层呈单斜产出,岩层产状 $65^\circ\sim 80^\circ\angle 20^\circ$,岩层层面为泥岩内部及泥岩与粉砂岩接触面,现场照片见图1。发育三组裂隙:① $273^\circ\angle 54^\circ$;② $344^\circ\angle 68^\circ$;③ $75^\circ\angle 64^\circ$ 。裂隙、岩层层面局部充填泥质和岩屑,结合很差,均为软弱结构面,区内裂隙总体较发育。

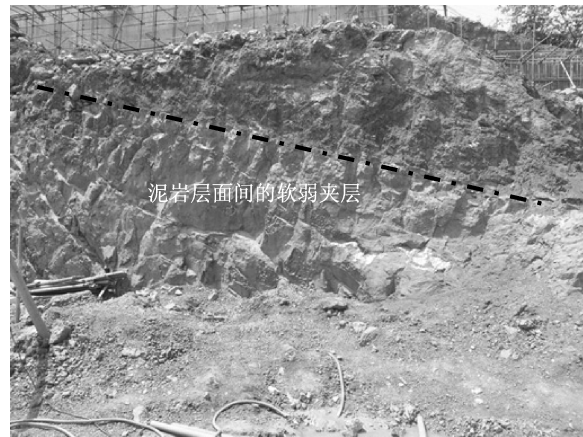


图1 泥岩岩层层面结合情况照片

3) 地层岩性

边坡体的地层岩(土)性主要有:第四系人工填土层,第四系残坡积粉质粘土,侏罗系下统自流井组泥岩、砂岩。

4) 场地地震效应

因场地位于斜坡之上,整平后形成大量边坡,为抗震不利地段。

1.4 边坡岩土体参数

1) 填土

天然重度 20 kN/m^3 ;饱和重度 21 kN/m^3 ;综合内摩擦角天然状态下为 30° ,饱和状态下为 25° ;沿基岩面滑动抗剪参数为天然状态下 $c=22\text{ kPa}$ 、 $\varphi=10^\circ$,饱和状态下 $c=20\text{ kPa}$ 、 $\varphi=8^\circ$ 。基底摩擦系数:0.30。

2) 粉质粘土

天然重度标准值 19.6 kN/m^3 ;天然抗剪强度 $c=25\text{ kPa}$ 、 $\varphi=15^\circ$;饱和抗剪强度 $c=20.2\text{ kPa}$ 、 $\varphi=10.4^\circ$;基底摩擦系数0.25。

3) 基岩

① 强风化基岩岩体

强风化泥岩:天然重度 23 kN/m^3 ,地基承载力特征值 $f_k=300\text{ kPa}$,基底摩擦系数0.30。

② 中等风化基岩岩体(见表1)

表1 岩体物理力学参数

岩性	重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	抗压强度		地基承载力特征值 /kPa	抗拉强度 /kPa	φ /($^\circ$)	c /kPa	弹性模量 /MPa	泊松比
		天然	饱和						
泥岩	25.60	8.47	5.28	2795	180	30.47	609	1190	0.34
砂岩	24.50	25.5	20.6	6798	280	37.5	850	3678	0.23

注:中等风化泥岩岩体基底摩擦系数为0.4,水平抗力系数 50 MN/m^3

4) 裂隙面及层面抗剪强度指标取值

根据泥岩层间结构面大面积直剪试验成果及勘察报告综合取值。裂隙面抗剪强度参数: $c=50$ kPa, $\varphi=18^\circ$; 泥岩层间结构面抗剪强度参数 $c=25$ kPa, $\varphi=13^\circ$ 。

2 边坡工程概况

2.1 泥岩软弱结构面抗剪参数取值合理性分析

选取勘察典型剖面 I-I 对软弱结构面抗剪参数取值进行反分析, 计算工况为原始状态, 采用文献 [4] 传递系数法(划分 8 个条块) 和有限元强度折减法两种方法分别进行计算。(见图 2、图 3)

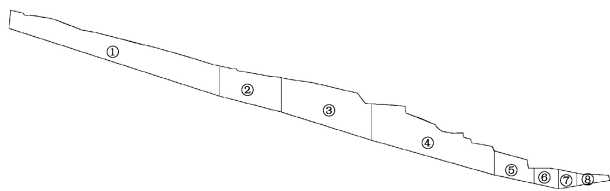


图 2 传递系数法示意图(原始地貌)

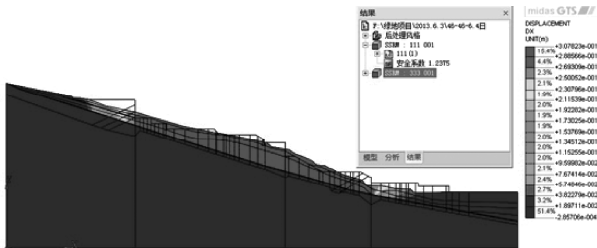


图 3 有限元强度折减法水平位移云图(原始地貌)

以上两种方式计算得出稳定系数见表 2。计算结果表明, 斜坡现状稳定系数为 1.15~1.24, 处于基本稳定状态, 与现场情况吻合。因此, 泥岩软弱结构面参数 c 取 25 kPa, φ 取 13° 基本符合现场实际情况。

表 2 两种计算方式求得斜坡稳定系数值

剖面编号	传递系数法	有限元强度折减法
I-I 剖面(原始地貌)	1.15	1.24

2.2 边坡基本特征

I-I 边坡治理剖面见图 4, 斜坡基本特征如下: 斜坡泥岩岩层中存在潜在滑动面, 在坡体岩层间泥化夹层发生软化和坡体具备临空剪出的条件下, 层间剪切带逐渐贯通可能发生滑动破坏, 潜在滑动面长度 230 m, 潜在剪出口标高 173 m, 滑块单位宽度面积 2405 m^2 。

斜坡体中分别在标高 241 m、210.5 m、190.4 m 处切坡, 形成三阶人工边坡, 在第二阶及第三阶边坡坡顶修建建筑。第一阶边坡高度 12.3 m, 为填方土质边坡, 坡底强风化层厚度 1.5 m; 第二阶边坡高度 11.6 m, 主要为土质边坡, 土坡高度 7.4 m, 岩坡高度 4.2 m; 第三阶放坡高度 3.7 m, 直立切坡高度 5.0 m, 为土质边坡。人工边坡可能破坏模式有两种: ① 岩土界面外倾, 土体可能沿岩土界面、强风化层或岩体内部发生滑动; ② 直立切坡可能在土体内部发生圆弧形滑动破坏。

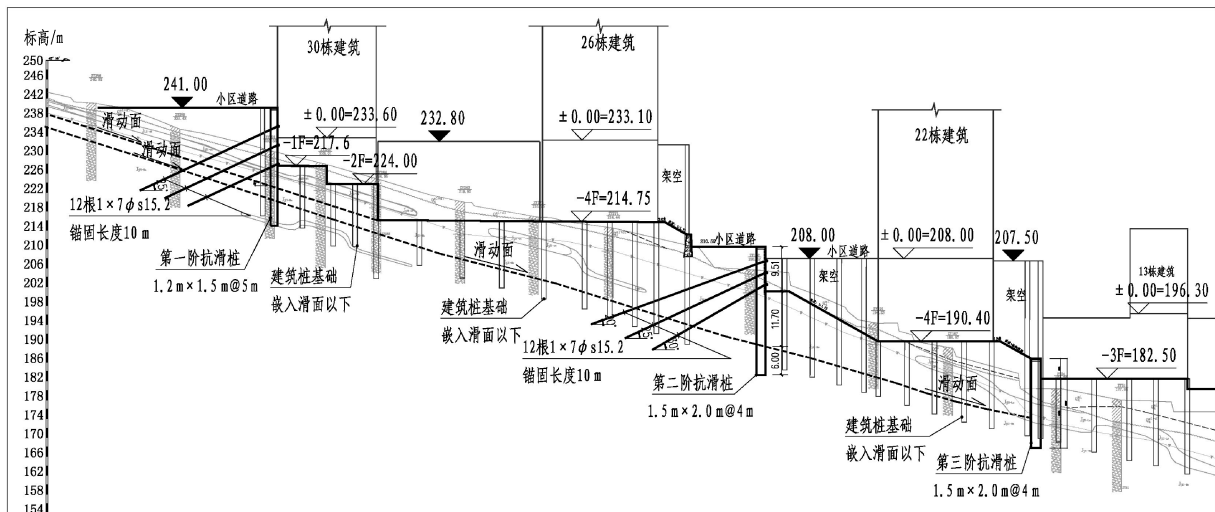


图 4 边坡治理地质 I-I 剖面

2.3 边坡治理方案概况

治理方案主要采用抗滑桩、锚拉桩、局部放坡(格构)等, 见表 3。

表 3 边坡治理方案

分阶编号	支护结构方案
第一阶	锚拉桩挡墙(桩径 1.2 m x 1.5 m, 间距 5 m; 共三排锚索, 间距 4.0 m, 锚索为 12 x 7 phi s15.2)

续表

分阶编号	支挡结构方案
第二阶	锚拉桩挡墙(桩径 1.5 m×2.0 m,间距 4 m;共三排锚索,间距 2.5 m,锚索为 12×7Φs15.2)
第三阶	1:1.75 放坡(格构)+抗滑桩挡墙(桩径 1.5 m×2.0 m,间距 4 m)

备注:挡墙分阶编号由斜坡坡顶开始,从上至下

2.4 危险源分析

根据项目的建筑方案,多层及高层建筑大都位于斜坡多级人工场平台地上,边坡的稳定性直接影响建筑物的安全。综合考虑现场实际情况和支挡结构设计,该项目的修建引起的安全风险主要有以下几点:

- 1)场地处于顺向外倾斜坡上,拟建项目的修建会导致现状地形地貌的改变,对场地的整体稳定性造成一定影响;
- 2)按建筑方案切坡以后,局部地区会形成较高的边坡,边坡失稳将会危及坡体建筑物的安全;
- 3)支挡结构设计计算中岩土体参数选值的合理性将直接影响边坡治理工程造价和边坡支挡结构的安全;

4)建筑修建后会有部分水平力通过斜坡岩土体传递到支挡结构,造成作用在支挡结构上的剩余下滑力有所增大,现阶段无现行规范和公式可计算剩余下滑力增大值,设计中如何考虑;

5)项目施工过程中对边坡岩土体的扰动,如渗水、爆破震动等,均会导致岩土体的力学性能降低;

6)支挡结构的施工方法及顺序对边坡整体稳定性的影响较大。

2.5 工程建设后斜坡整体稳定性验算

1)传递系数法分析斜坡整体稳定性

根据前述斜坡变形特征,潜在滑面为岩土界面及岩层面,其结构为折线型。按文献[4]的相关要求,并结合滑坡灾害的特点,采用刚体极限平衡法的传递系数法定量分析计算其稳定性与剩余下滑推力(见图 5)。计算 I—I 剖面工程建设后的斜坡整体稳定性,计算工况为暴雨工况。荷载取值如下:高层建筑风荷载 200 kN/m,地震荷载 140 kN/m;多层建筑地震荷载 54 kN/m;地下车库地震荷载 140 kN/m;根据数值分析结果,取风荷载和地震荷载的 20%作用于滑体进行计算。传递系数法计算中未考虑抗滑桩、锚索、建筑桩、桩顶锚杆的作用。

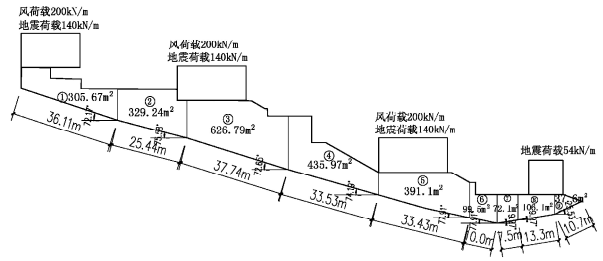


图 5 传递系数法示意图(工程建设后)

计算结果表明:在未设置支挡结构的不利工况下 I—I 剖面稳定性系数 $K_s = 1.20$, 剩余下滑力 1283.47 kN;未达到一级边坡要求的稳定安全系数 1.35,因此必须设置支挡结构,考虑剩余下滑力,解决场地稳定性问题。

2)有限元强度折减法分析斜坡整体稳定性

采用有限元强度折减法计算 I—I 剖面,计算模型考虑抗滑桩、锚拉桩支挡结构及建筑物桩基础,计算荷载考虑道路荷载,建筑物桩基础竖向荷载、风荷载和地震荷载组合。计算结果见表 4,位移云图见图 6。

表 4 工程建设后斜坡稳定系数对比表

剖面号	稳定性系数	
	传递系数法 (未考虑抗滑桩作用)	有限元强度折减法 (考虑抗滑桩作用)
I—I 剖面	1.20	1.46

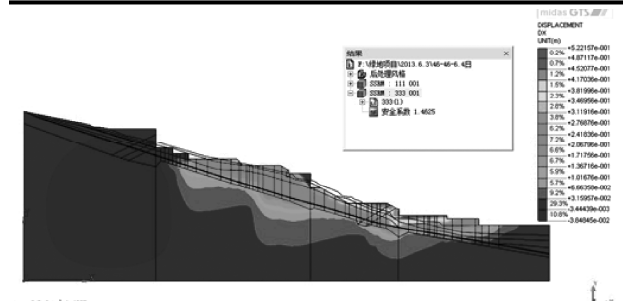


图 6 支挡、主体结构施工完成后水平位移云图

根据计算结果可知,支挡结构施工完成以后进行主体结构施工,场地整体稳定性满足规范及正常使用要求。

3 边坡支挡结构内力分析

3.1 计算模型及单元

采用 MIDAS-GTS 进行建模分析,模型计算范围根据边坡特征及深层潜在滑裂面发展区域确定。采用梁单元模拟抗滑桩、锚索锚固段、建筑桩基础及地梁,采用植入式桁架单元模拟锚索自由段及建筑

桩锚杆,采用二维平面应变单元模拟斜坡岩土体;此外,设置了接触单元对桩土接触进行了模拟。

3.2 相关荷载

1) 建筑荷载

根据上部结构设计单位提供的基础布置图及荷载值,在基础上施加轴力、水平剪力及弯矩,按多遇地震作用下的各荷载工况最不利组合取值。

2) 道路荷载

坡顶小区道路荷载取值 30 kPa。

3) 支挡结构锚索预应力

根据边坡方案设计单位提供的支挡方案,在锚索自由端施加预应力 1080 kN。

3.3 计算步设置

根据现场施工顺序,数值计算共分三步进行第一步原始地形地貌下的初始地应力场、位移场;第二步平场、支挡结构施工;第三步主体结构加载。

3.4 数值计算结果分析

I—I剖面支挡结构内力及位移计算结果见表 5。

表 5 各阶边坡抗滑桩计算结果

荷载步	第二阶抗滑桩			第三阶抗滑桩		
	弯矩 /(kN·m)	剪力 /kN	桩顶位移 /m	弯矩 /(kN·m)	剪力 /kN	桩顶位移 /mm
第二步支挡 结构施工	3669.85/ -3795.17	1338.38/ -1018.49	5.01	4742.65/ -4821.67	926.41/ -1359.19	13.91
第三步建筑 物加载	3980.31/ -4112.09	1565.68/ -1178.44	27.43	5696.08/ -5405.28	1024.57/ -1528.85	40.29
内力值增幅	8.4%	15.7%~16.9%		12.1%~20.1%	10.6%~12.5%	

注:表中数值为桩身正负弯矩、剪力最大值

根据数值计算分析结果,建筑荷载施加后,桩身弯矩及剪力都呈现增大的趋势,桩顶位移也有增大。数值分析中通过桩基础与周围岩土体设置的接触单元考虑了桩周应力隔离措施,在此前提下,抗滑桩桩身应力增大约 8%~20%。分析表明支挡结构内力增大比例和建筑物的荷载值、建筑物与坡顶的水平距离、建筑桩基础周边的岩土介质、支挡结构形式等多种因素有关。本文的分析仅针对一典型工程实例,表明坡顶建筑加载与支挡结构内力增大存在相关性,在后续工作中将对增大支挡结构内力的多种因素及其影响程度作进一步研究分析。

4 结论

1) 采用传递系数法和有限元强度折减法对原始斜坡进行稳定性验算,参数反分析结果表明,岩层面抗剪参数取值较为合理。工程修建时,场平回填改变了原始斜坡的稳定状态,稳定系数下降,已低于规范限值,必须设置支挡结构解决斜坡整体稳定性和分阶人工边坡的局部稳定性。

2) 通过有限元强度折减法,对工程建设后的场地整体稳定性分析得出:考虑支挡结构作用后,场地整体稳定性系数大于 1.35,满足相关规范要求。有限元计算结果表明,建筑加载后,部分竖向力、风荷载、地震荷载将通过桩基础传递给斜坡土体,继而传递给支挡结构,使支挡结构内力有一定程度的增大,与不考虑建筑水平荷载内力比较增大比例约 8%~20%,桩顶位移也有明显增大。因此,支挡结构设计

应当考虑建筑水平荷载的不利影响,适当加大支挡结构刚度或设置锚索控制坡顶变形。

3) 抗滑桩布置轴线应与滑坡推力方向垂直,建筑物桩基础和抗滑桩均置于最深层滑面以下不少于 3 m。桩身四周须采取应力隔离措施,以减小建筑荷载的施加对支挡结构内力及位移的影响。

4) 采取加强边桩、地梁刚度、桩顶增设抗拉锚杆等措施,增强建筑自身抵抗部分水平力的能力。

5) 建筑方案设计中多采用结构架空的方式,使场平标高尽量接近原始地面标高,以避免堆填土方对斜坡造成不利加载;

6) 通过增设地下室或调整地下室标高控制每阶边坡切坡高度在 5~15 m,避免形成单阶超高边坡。

参 考 文 献

- [1] 颜昌武,邓安福,曾祥勇. 山区岩质基坑边坡开挖对邻近建筑结构的影响分析[J]. 岩土工程学报,2008(S1):
- [2] 李杨秋,干腾君. 坡体中桩基的受力特性分析[D]. 重庆:重庆大学硕士论文,2005.
- [3] 成国文,李 晓,等. 重庆涪陵五中滑坡特征及成因分析[J]工程地质学报,2009(2):
- [4] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50330 建筑边坡工程技术规范[s]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.

收稿日期:2015-03-18