

镇雄大都会高填方边坡稳定性评价

穆道贵¹, 郝少雷², 徐世光^{1, 2}, 陈少聪²

(1. 云南地矿工程勘察集团公司, 云南 昆明 650000; 2. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要: 填土, 由于其成分不均匀、压缩性高的特点, 极易产生不均匀沉降, 其所形成的边坡存在较大安全隐患。以云南镇雄大都会项目 3 个相邻边坡为研究对象, 在室内实验结果与边坡实际变形情况的基础上, 通过摩尔-库仑 (Mohr-Columb) 与拉破坏准则结合的复合准则圈出边坡的塑性破坏区, 运用 FLAC 3D 强度折减法对计算参数进行不断跟踪反演。最终通过反演所得的强度参数对组合边坡进行三维稳定性计算分析。研究表明: 在天然状态下, 1#和 2#填土边坡安全系数为 0.85, 0.92, 处于失稳状态。相较于天然工况, 降雨工况下再降低约 10%, 因此 1#和 2#为重点防护边坡。3#边坡滑坡范围较小, 但其前缘所产生的塑性应变高于 2#填土边坡, 前缘抗灾能力很弱且在降雨工况下更为明显, 因此在治理过程中, 其防护工程也应当重视。

关键词: 回填土; 复合准则; 有限差分法; 参数反演; 边坡稳定性

中图分类号: P642.2

文献标识码: A

文章编号: 1006-7973 (2023) 01-0134-03

前言

滑坡是指边坡上的岩土体受多种因素影响, 在重力作用下沿软弱面整体发生破坏并向下滑动的地质灾害。我国西南地区多为山地丘陵, 地形地貌条件复杂, 在工程建设中常会引发地质灾害, 其中边坡稳定性问题尤为突出^[1]。2019 年 6 月宜宾长宁县 6.0 级地震, 诱发的山体崩塌、滑坡灾害占总数的九成以上, 受灾人数达 16.8 万之多^[2]。2017 年 8 月九寨沟 7.0 级地震, 景区公路沿线发育大量崩塌、滑坡灾害, 诺日朗瀑布、熊猫海等景观遭到不同程度损坏, 景区栈道受损严重^[3]。

目前对于高填方边坡的变形研究, 主要从填方体整体稳定性相关的应力应变及填方体与原地基的沉降变形来进行研究。其中, 离散元将边坡离散成无数个小单元, 利用单元之间的接触关系建立位移与应力的关系, 进而迭代出动力平衡方程, 但仅适用该方法节理发育的岩质边坡中效果较好^[4]; 而有限差分法是用差分方程等价表示运动方程和边界条件, 计算效率高, 准确度高, 适用范围广。

文中结合镇雄大都会高填方边坡工程勘察设计项目, 通过野外调研, 地质勘察, 采取原状试样进行室内试验, 对有关资料及试验数据进行整理分析得出所需参数, 并运用摩尔-库仑 (Mohr-Columb) 与拉破坏准则结合的复合准则和 FLAC 3D 强度折减法进行计算。最终, 从 3 个边坡 (1#、2#填土边坡、3#自然边坡) 的自重应力场、安全系数及塑性区状况等方面, 对高填方边坡稳定性进行详细的分析研究。

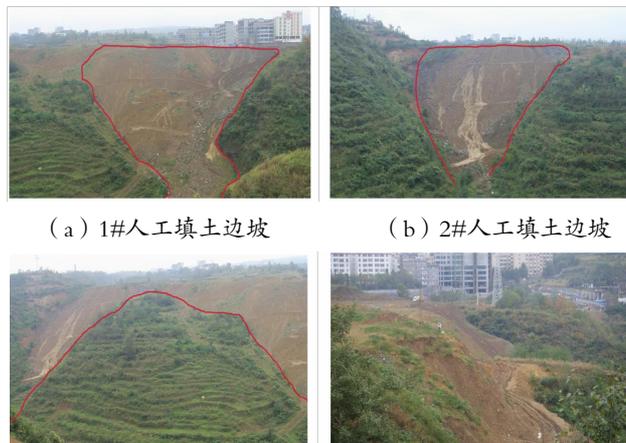
一、研究区概况

1. 研究区工程概况

镇雄县, 隶属云南省昭通市, 地处云贵川三省交界处, 横跨东经 104° 18' 至 105° 19', 北纬 27° 17' 至

27° 50'。研究区位于镇雄县城东南、镇 (雄) 赫 (章) 公路左侧, 距南大桥 200m, 属构造剥蚀斜坡地貌。

研究区发育有 3 个边坡, 其中: 1#、2#为高填方边坡, 横剖面呈“V”字型, 坡面物质松散裸露。3#边坡为自然边坡, 坡面被杂草及少量灌木所覆盖, 见图 1。



(a) 1#人工填土边坡

(b) 2#人工填土边坡

(c) 3#自然边坡

(d) 场地地形地貌 (西北方向)

图 1 研究区地形地貌

2. 研究区工程地质特性

钻探发现, 研究区主要由人工堆积层 (Q^{ml})、残坡积层 (Q^{el+dl})、二迭系上统玄武岩 (P^{2β}) 组成。其中人工堆积层以素填土为主, 平均厚度为 18 m; 残坡积层以粘土为主, 平均厚度为 5.8m; 二迭系上统玄武岩以强风化和中风化玄武岩为主, 岩质坚硬, 揭露厚度较薄且未钻穿。

二、研究区边坡稳定性分析

研究场区自 1989 年开始不断堆积弃土, 且在填土时未对坡面植被等杂物进行清除, 填土后腐败变质, 形成抗剪强

收稿日期: 2022-06-18

作者简介: 穆道贵 (1972-), 男, 云南地矿工程勘察集团公司, 高级工程师。

通讯作者: 郝少雷 (1996-), 男, 昆明理工大学国土资源工程学院, 硕士生。

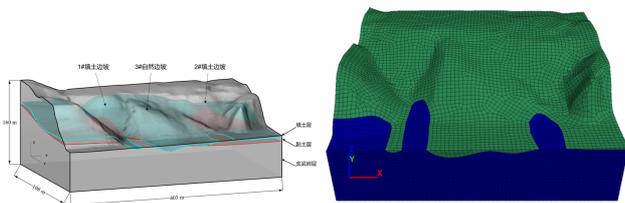
度很低、压缩性很高的人工堆积高边坡，易发生滑移、垮塌事故，对边坡稳定性造成极不利的影

1. 模型及边界条件

通过对研究区工程地质勘察资料和边坡变形监测数据的定性分析，认为场区的高填方边坡的变形破坏是边坡地貌形态、地质结构、地层特征等内在因素以及降雨等综合影响下的结果。

(1) 有限元模型建立

在研究区工程地质图的基础上，结合边坡地质特性将填土与玄武岩分层构建，建立含 1#、2#人工填土边坡、3#自然边坡的三维地质模型，见图 2。模型单元总数 63 万，节点总计 46 万，单元尺寸在 1~3.5m 之间。



(a) 边坡三维地质模型 (b) FLAC 3D 数值网格模型 图 2 研究区边坡三维模型

(2) 岩土体本构模型与屈服准则

岩土体在道路开挖和降雨作用下，由于经历不同的卸荷作用和加载而发生不同程度的弹塑性变形，在该过程中岩体可能出现张拉破坏和压剪破坏。本次计算采用能反映压剪和张拉破坏的 Mohr-Columb 与拉破坏准则结合的复合准则进行岩体在水库蓄水和降雨条件下的加载作用下的屈服破坏判断。

(3) 边界条件设定

通过静力分析，向边坡侧面施加法向约束，限制侧面节点的水平位移；边坡底部设置施加固定约束，限制底部节点的水平与竖向位移；边坡坡面设定为自由边界，见图 3。

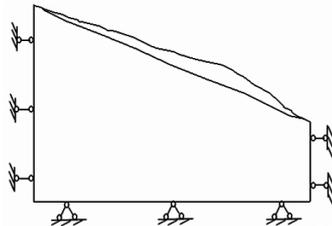


图 3 边坡边界条件示意图

2. 计算参数反演

在研究区填方边坡的物理力学参数基础上，结合边坡实际变形阶段与稳定性情况，不停对计算参数进行跟踪反演，直至符合边坡实际稳定性状态，得到天然状态该边坡粘聚力为 25.5KPa，摩擦角为 11.4°。在该反演参数下，1#填土边坡天然状态下的安全系数为 0.85；2#填土边坡为 0.92；3#自然边坡为 1.17。

3. 研究区稳定性分析计算方案

(1) 研究区工况分析

镇雄县抗震设防烈度为 6°，设计基本地震加速度为 0.05g，研究区高填方边坡天然工况设计时仅考虑自重作用，不进行地震工况稳定性分析。场区内无固定地下水位，地表水主要受降雨影响，且集中在 6~8 月份，故数值分析不进行水位的设置，但考虑降雨入渗对边坡的影响，即降雨工况下对填土层粘聚力进行 2.9KPa 的折减修正，对摩擦角进行 2.8° 的折减修正。

针对这 2 种工况，在研究区 3 个边坡中，共设计 8 组计算方案，见表 1。

表 1 边坡稳定性设计方案

Table with 4 columns: 边坡 (Slope), 设计状况 (Design Status), 填土层是否劣化 (Fill Layer Deterioration), 工况编号 (Case Number). It lists 8 cases for 1#, 2#, and 3# slopes under natural and rainy conditions.

(2) 稳定性计算方案

研究区三维地质模型中共包含 5 个边坡，且危险系数各不相同。为消除强度折减法的弊端和边坡之间的交互影响，保证滑移破坏只发生在单一边坡处，采取 FLAC 3D 中的 geometry 功能，区分 5 个边坡各自的影响范围 (图 4)。

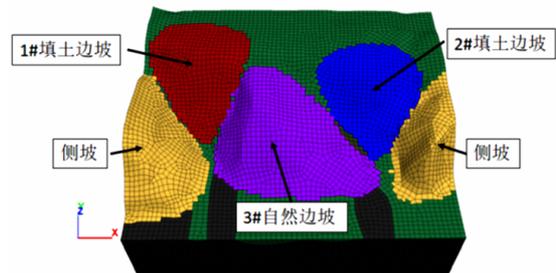
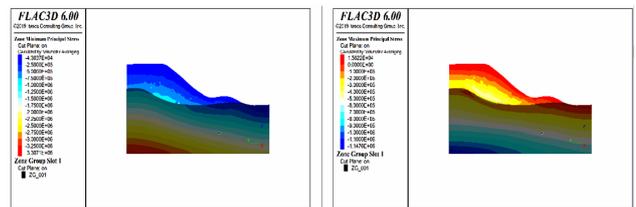


图 4 模型网格分区图

三、研究区边坡稳定性评价

1. 自重应力场

将研究区各边坡天然容重及变形参数带入 Flac 3D，可分析出整体边坡在弹塑性状态下的自重应力场，见图 5。其中，1#边坡填土层由于埋深较大，最大主应力量值在 40~1,000KPa，在地表附近存在拉应力，最小主应力在 -600~16KPa (拉应力为正值)；2#边坡填土层最大主应力量值在 30~750KPa，最小主应力-300~21KPa；3#边坡填土层最大主应力量值在 40~300KPa，最小主应力 -100~7KPa。



(a) 1#边坡最大主应力 (b) 1#边坡最小主应力

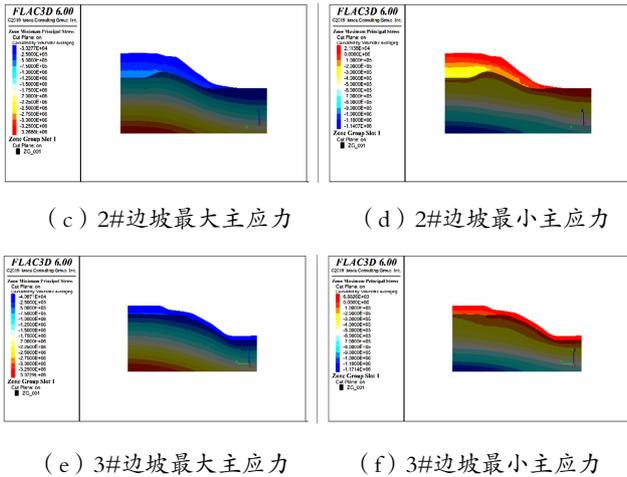


图 5 研究区应力分布图

2. 边坡安全系数计算结果分析

在天然工况下, 3#自然边坡安全系数最高, 为 1.17, 处于基本稳定状态; 1#和 2#人工填土边坡安全系数分别为 0.85 和 0.92, 都处于失稳状态。在组合边坡效应下, 整体边坡安全系数仅有 0.84, 原本不稳定边坡风险程度增加。相较于天然工况, 降雨工况下 3 个边坡安全系数都降低约 10%, 且与天然工况的变化趋势基本相同, 见图 6, 但 1#与 2#边坡处于极度失稳状态。

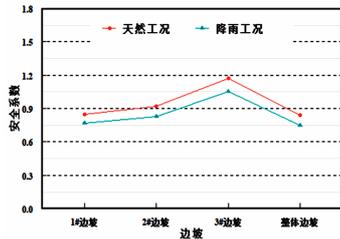
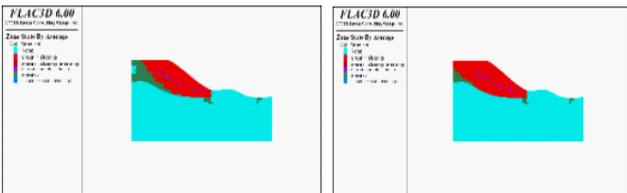


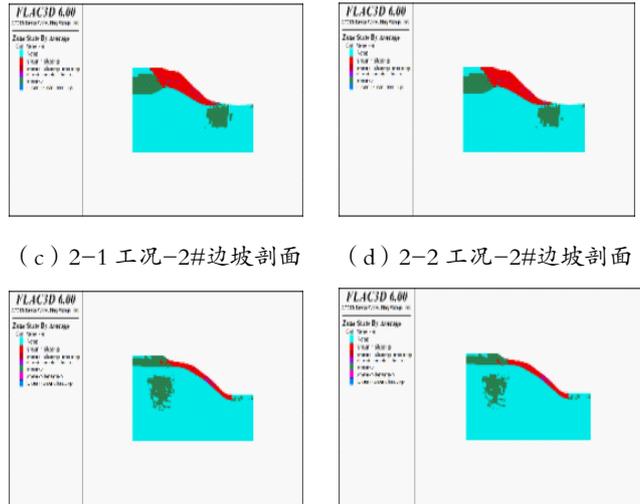
图 6 研究区边坡安全系数

3. 边坡塑性区计算结果分析

塑性贯通区域为研究区潜在滑动面。由天然工况与降雨工况塑性区剖面图, 见图 7, 可以明显看到各边坡塑性贯通区域是填土层与玄武岩的分界面。且滑动面外侧区域各网格点速度明显大于其他区域, 说明其他区域已经出现明显滑动, 即发生了破坏。从横纵向对比来看, 各边坡塑性区范围主要由边坡填土层厚度决定, 且破坏程度由大到小依次为 1#填土边坡、2#填土边坡和 3#自然边坡。由于各边坡在天然状态下已发生失稳, 塑性区范围已扩散至整个填土区域。



(a) 1-1 工况-1#边坡剖面 (b) 1-2 工况-1#边坡剖面



(c) 2-1 工况-2#边坡剖面 (d) 2-2 工况-2#边坡剖面 (e) 3-1 工况-3#边坡剖面 (f) 3-2 工况-3#边坡剖面

图 7 不同工况下各边坡塑性区剖面图

四、结论

基于镇雄大商汇建设项目, 对其场区内高填方边坡工程项目进行了研究, 得出以下结论:

(1) 通过研究区参数反分析, 天然状态下 1#和 2#填土边坡安全系数为 0.85, 0.92, 处于失稳状态; 3#自然边坡安全系数 1.17, 处于基本稳定状态; 边坡整体安全系数与 1#边坡近似, 为 0.84。相较于天然工况, 降雨工况下各边坡安全系数降低约 10%。

(2) 在弹塑性状态下得到整体边坡的自重应力场, 其填土层区域内, 最大主应力量值为 1MPa, 出现在 1#边坡埋深较大处。由于地表填土层发生全范围塑性破坏, 最小主应力降低, 量值约为 7~21KPa。

(3) 边坡塑性区范围主要由填土层厚度决定, 且塑性区范围要显著大于塑性应变区。各边坡滑动线为填土层与玄武岩层分界面, 且正发生剪切破坏, 破坏程度: 1#填土边坡>2#填土边坡>3#自然边坡。

参考文献

[1] 李永威, 徐林荣, 张亮亮等. 强震山区地震诱发滑坡发育规律与易发性评估[J]. 地球科学, 2022, 6: 1-14.
 [2] 廖勇, 徐闯, 陈军等. 四川长宁“6·17”地震诱发的次生地质灾害类型及其发育特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(1): 77-83.
 [3] 吴微微, 魏姪玲, 龙锋等. 2017年8月8日四川九寨沟M7.0地震及其余震序列的震源参数[J]. 地震地质, 2020, 42(2): 492-512.
 [4] 郝少雷, 张兵, 徐世光等. 基于 SPT-APD-DDA 的砂土液化评价方法研究[J]. 地震工程学报, 2022, 10: 1-10.