

乡村展销大棚滑坡成因及稳定性评价

许德龙¹, 殷浩²

(1. 济南城建集团有限公司, 济南 250031; 2. 山东省鲁岳资源勘查开发有限公司, 山东 泰安 271021)

摘要: 莱芜区马家峪村在村庄后方山体建设展销大棚, 由于施工不当在展销大棚地表场外堆载平台形成滑坡。为研究滑坡体的变形特征、成因及稳定性, 在对滑坡现场进行详细勘查后, 对滑坡的诱发因素进行详细评价分析, 采用定量、定性的方法对稳定性进行研究。结果表明, 本次滑坡的总体积约 $5.0 \times 10^4 \text{ m}^3$, 为小型推移式滑坡。在自然状况下, 滑坡处于基本稳定状态; 在暴雨状况下, 稳定性系数为 $1.001 \sim 1.006$, 说明潜在滑坡处于欠稳定状态, 可能发生滑动变形。

关键词: 山体滑坡; 稳定性; 安全系数; 变形特征

中图分类号: TU47 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)03-0161-05

近年来, 各地都在施行美丽乡村建设。建设过程中涉及诸多工程建设活动, 在丘陵、山区易出现边坡滑塌现象。国内外都有边坡滑塌所造成的生命财产损失的例子, 因此对于边坡滑塌治理的重要性也就不言而喻。

近年来, 国内外众多学者对滑坡的诱导因素及稳定性评价都做了大量研究^[1-12]。宋国虎等^[1]通过对五家坟滑坡进行现场调查分析, 研究了滑坡的变形破坏特征和形成机制; 张泽方等^[2]通过对六盘水市水城区滑坡研究, 提出了一种考虑最优影响因素组合的滑坡易发性评价模型; 李厚芝等^[5]通过对三峡库区滑坡成因机制研究, 分析了强降雨条件下滑坡的稳定性; 许泰等^[6]通过对永登县苦水镇大路村滑坡得研究, 定性、定量分析了滑坡的稳定性; 吕文斌等^[7]以西宁市张家湾滑坡为研究对象, 结合极限平衡法和 Midas/GTS 有限元数值模拟方法, 研究了滑坡的形成机理、发展过程; 黄海韵^[12]通过对尖山营滑坡的分析研究, 得出了滑坡的稳定状态。现以莱芜区和庄镇马家峪村乡村旅游区建设所引起的山体滑坡为研究对象, 分析了滑坡形成的原因, 并对其稳定性进行评价, 提出治理建议, 以保证边坡安全。

1 工程概况

为实施乡村振兴战略, 莱芜区和庄镇马家峪村在其后方山坡建设展销大棚, 在建设区靠近斜坡边缘陆续填方堆载扩建。截至 2022 年 8 月位于斜坡顶部平台堆载完成并建设展销大棚设施, 自此填方区上部展销大棚地表场外堆载平台斜坡开始出现

缓慢开裂变形, 至 2022 年年底变形加剧形成滑坡。滑坡变形主要表现为地表开裂和展销大棚场内房屋破坏, 第一排房屋结构性完全破坏, 不能使用; 场地靠近坡体一侧围墙全部垮塌, 滑坡体下方道路内侧排水沟破坏, 路面局部鼓胀开裂变形。此外, 滑坡体前缘及东侧为乡村道路, 因道路修建造成 2~3 m 切坡, 形成临空面且无支护措施。

经过实地调查、测绘, 目前整个滑坡体范围均存在不同程度的变形开裂, 其中后缘变形最为严重, 后缘呈现台阶式下错, 最大高度约 2.5 m, 形成下陷区域, 最宽约 10 m, 裂缝可见深 2~3 m, 滑坡下部公路内侧坡体见少许放射性裂缝, 宽约 10 cm, 可见深约 10 cm。

2 区域地质环境

2.1 地形地貌

治理区位于县城东南侧, 区内地貌类型为山地, 由于侵蚀作用强烈, 形成了“脊尖”“坡陡”“谷窄”的地貌特征, 尖棱状山脊与“V”形沟谷交替出现, 山坡陡峻, 常见崩塌和滑坡。

滑坡区整体地势南高北低, 地形较为简单, 海拔高度为 498~550 m, 相对高差 52 m, 山体坡坡度为 $15^\circ \sim 35^\circ$ 。滑坡区上部为展销大棚, 下部为盘山乡道。区内植被茂盛。

2.2 地层岩性

场区岩土体类型主要为第四系残坡积、砂质板岩、硅质角岩。残坡积土及碎石直接覆盖于基岩之上, 结构松散, 物理力学性质差。砂质板岩、硅质角

收稿日期: 2023-11-27

作者简介: 许德龙(1990—), 男, 山东沂南人, 工程师, 硕士, 研究方向为岩土工程; 殷浩(1989—), 男, 山东淄博人, 工程师, 研究方向为岩土工程。

岩节理裂隙与孔隙较为发育,尤以风化节理最为发育,在强风化层之下,岩体物理力学性质较差。

场区内出露的岩层主要为二叠系上统包尔敖包组。岩性为紫色、灰绿色砂质板岩,与二云母角岩、硅质角岩呈渐变沉积接触或呈捕虏体分布其中。砂质板岩与硅质角岩不等厚互层,工程地质的特性为坚硬、半坚硬和软质岩类,按结构可分成块状到薄层状。

第四系土层分布广泛,其中斜坡中及斜坡中下部、斜坡凹部等部位较厚,岩性主要为亚黏土、亚砂土、砂砾石、碎块石土,表面堆积腐殖层,厚度一般为2~5 m。其不良工程地质现象主要表现为不均匀沉陷。在陡坡地段而局部松散堆积体较厚时,易出现滑坡。

中-厚层状砂质板岩与硅质角岩互层组主要分布于场区内大部分地区,易风化崩解,且遇水易软化,常形成较厚的风化层,沿其风化层,特别是在地下水、地表水渗透的作用下,易产生滑动。

2.3 水文地质条件

地下水主要为松散堆积层和基岩裂隙及构造破碎带潜水,风化裂隙发育深度在45 m左右,大气降水的垂直入渗直接补给地下水。山前洼地和沟谷地带主要分布孔隙潜水及局部的承压水,除接受大气降水补给外,还接受基岩裂隙水的补给。后沿沟谷向下游径流,在低洼地带受阻而形成沼泽湿地或以泉水的形式出露。

3 滑坡体特征

3.1 滑坡区地貌形态及边界特征

勘查区内地貌类型为山地,整体地势南高北低,展销大棚位于山体半山腰平台处,由于平台边缘填土及构筑物加载,导致岩土层滑动,挤压下部产生变形,形成滑坡。滑坡周界明显,滑坡前缘以下方盘山道路为界,滑坡后缘则以养殖场建筑边缘区域为界,两侧分别为西侧建筑构造边缘延伸及东侧道路边缘。

整个滑坡地形呈上陡下缓,坡度为 $15^{\circ}\sim 23^{\circ}$ 。坡体植被以松树、灌木、杂草为主,原生植被覆盖率约60%。滑坡体前缘高程为512 m,后缘高程为541 m,最大高差29 m。滑坡体横向宽度约120 m,主滑方向为 180° ,顺主滑方向长约95 m,滑体厚度为1.5~6 m,体积约 $5.0\times 10^4\text{ m}^3$,为小型推移式滑坡,如图1所示。

3.2 滑坡体变形特征

3.2.1 滑坡前缘

滑坡前缘为道路切坡,切坡坡度为 83° ,高

1.5~2 m,表面裸露处风化严重,上部40 cm为耕植土,下部为卵石土、砂质板岩等,可见树根。局部切坡出现坍塌现象,导致部分水沟及道路挤压变形,上方土体表面也出现多条放射性裂隙,走向 88° ,宽约0.2 m,深0.7 m,长2~5 m,如图2所示。



图1 滑坡全貌



图2 滑坡前缘裂缝

3.2.2 滑坡后缘

滑坡体位移后出现明显分界面,滑坡壁整体呈圈椅状暴露,高1.2~1.5 m,同时滑坡体与滑坡壁被拉开形成反坡地形的沟槽状低洼封闭地形,导致局部水泥硬化路面及展销大棚下陷垮塌,出现多个台坎及一条沉陷带。在展销大棚外出现3条张拉裂缝,呈圆弧形,与滑坡壁大致平行,其中主裂缝LF1长约110 m,宽0.5~1 m,深约0.7 m,贯通整个后缘滑坡周界的裂缝;LF2长约50 m,宽约0.5 m,深1~2 m;LF3长约35 m,宽约0.3~0.5 m,深1~2 m,如图3所示。

3.3 滑坡体的物质结构特征

3.3.1 滑体特征

滑坡体主要为滑坡堆积层,滑体物质主要以人工填筑土以及岩石风化坡积、残积成因土质为主,成分以黏土及碎石等为主,次为砂质板岩、硅质角岩碎屑、粉粒,具有结构松散、孔隙率高、力学性质差等特性。堆积层在滑坡后缘最厚,主要集中在后缘堆积平台位置约7 m,然后向滑体前缘厚度逐渐减小,滑坡体前缘厚度1.5~3 m。



图3 滑坡后缘裂缝

3.3.2 滑带土特征

根据现场勘查,滑带位于上部松散堆积层底部与下伏强风化砂质板岩岩土接触面,滑带土物质主要为含卵石粉质黏土,卵石含量 35% 左右,粒径多小于 3 cm,总体呈潮湿、近饱和和软塑状^[13]。

3.3.3 滑床特征

滑床为二叠系上统包尔敖包组砂质板岩夹硅质角岩。岩质较软,具有饱水软化、脱水开裂特征。岩层较为平缓,倾角 13° 左右,倾向南西 180° 左右,与滑坡方向 180° 基本一致,为顺层滑坡。根据风化程度可分为强风化带和弱风化带。①强风化带:岩体极为破碎,成碎石状,该层较为平缓,分布较均匀,平均厚度 4 m;②弱风化带:该层风化程度较低,岩体较为完整,呈中厚层状。

4 滑坡成因及形成机制

4.1 地质环境条件

4.1.1 地形地貌

滑坡区域位于山体中部斜坡处,总体呈上陡下缓趋势,坡度为 15°~35°。

4.1.2 地层岩性

滑坡体物质成分主要为人工填筑弱膨胀性黏性土和含卵石粉质黏土,结构松散,抗剪强度和抗风化能力较低,结构均匀性差,具饱水软化脱水开裂特征。根据现场勘查,滑体底部黏性土层相对富集,原生黏性土土质均匀,结构紧密,下伏滑床为风化砂质板岩。由于黏性土与砂质板岩透水性相对较差,滑体受强降雨影响,导致层内土体软化,抗剪强度大大降低,形成潜在软弱滑带,在外因的作用下滑体沿软弱带产生滑移^[14-16]。

4.2 诱发因素

(1)为工程活动破坏坡体平衡。早期展销大棚建设在场地南侧边缘填方堆载渣石后未对坡体采取支护措施,且修建展销大棚基础设施对坡体加载;再加上乡村道路修建在斜坡下方切坡形成临空面,导致坡体失去支撑诱发滑坡。

(2)大气降水。滑坡区雨水充沛,大气降雨渗入山体斜坡内,导致斜坡土层遇水饱和,增大土体重度;且滑体浸泡软化易滑地层,使土层的抗剪强度大幅降低;同时水充满裂隙时形成静水压力,当出现水头差时形成动水压力从而诱发滑坡。

5 滑坡稳定性分析

5.1 稳定性计算方法

根据前文分析得知,该滑坡滑动面为土石接触界面,根据现场勘查及调查显示滑动面呈折线型,采用《滑坡防治工程勘查规范》(GB/T 32864—2016)所推荐的传递系数法进行稳定性计算,计算公式为

$$K_f = \left\{ \sum_{i=1}^{n-1} \left[\left(\{W_i[(1-r_u)\cos a_i - A\sin a_i] - R_{Di}\} \tan \varphi_i + c_i L_i \right) \prod_{j=1}^{n-1} \psi_j \right] + R_n \right\} / \left(\sum_{i=1}^{n-1} \left[\{W_i(\sin a_i + A\cos a_i) + T_{Di}\} \prod_{j=1}^{n-1} \psi_j \right] + T_n \right) \quad (1)$$

$$R_n = \{W_n[(1-r_u)\cos a_n - A\sin a_n] - R_{Dn}\} \tan \varphi_n + c_n L_n \quad (2)$$

$$T_n = W_n(\sin a_n + A\cos a_n) + T_{Dn} \quad (3)$$

$$\prod_{i=1}^{n-1} \varphi_i = \varphi_i \varphi_{i+1} \varphi_{i+2} \varphi_{i+3} \cdots \varphi_{n-1} \quad (4)$$

式中: K_f 为滑坡稳定性系数; ψ_i 为第*i*块段的剩余下滑力传递至第*i*+1块段时的传递系数($j=i$),即 $\varphi_i = \cos(a_i - a_{i+1}) - \sin(a_i - a_{i+1}) \tan \varphi_{i+1}$; R_i 为第*i*计算条块坡体抗滑力, kN/m; T_i 为第*i*计算条块坡体下滑力, kN/m; a_i 为第*i*计算条块的滑面倾角(°); C_i 为第*i*计算条块的内聚力, kPa; φ_i 为第*i*计算条块内摩擦角(°); L_i 为第*i*计算条块滑面长度, m; A 为地震加速度; W_i 为第*i*条滑块自重; r_u 为孔隙压力比; R_{Di} 为第*i*条块渗透压力产生的垂直滑面分力; T_{Di} 为第*i*条块渗透压力产生的平行滑面分力; R_{Dn} 为第*n*条块渗透压力产生的垂直滑面分力; T_{Dn} 为第*n*条块渗透压力产生的平行滑面分力; R_n 为第*n*计算条块坡体抗滑力, kN/m; T_n 为第*n*计算条块坡体下滑力。

5.2 计算参数

滑动面抗剪强度根据反演分析及土工试验综合确定。结合滑坡变形特征,得知滑坡是在暴雨期间发生剧烈变形,滑坡在暴雨期间应处于极限稳定状态或临近极限稳定状态。因此,以能使得滑坡稳定性系数处于 1.01 左右的 c 、 φ 组合值作为分析参考对象,与室内土工试验结果分析对比,根据相关技术规范要求综合确定滑动面抗剪强度。反分析计算结果见表 1。

表 1 计算剖面滑坡稳定性反分析计算结果

c/kPa	反演稳定性系数									
	$\varphi=3^{\circ}$	$\varphi=4^{\circ}$	$\varphi=5^{\circ}$	$\varphi=6^{\circ}$	$\varphi=7^{\circ}$	$\varphi=8^{\circ}$	$\varphi=9^{\circ}$	$\varphi=10^{\circ}$	$\varphi=11^{\circ}$	$\varphi=12^{\circ}$
14	0.668	0.732	0.797	0.862	0.927	0.993	1.059	1.126	1.192	
15	0.702	0.766	0.831	0.896	0.961	1.027	1.093	1.160	1.226	
16	0.736	0.800	0.865	0.930	0.995	1.061	1.127	1.194		
17	0.770	0.835	0.899	0.964	1.029	1.096	1.162			
18	0.804	0.869	0.933	1.012	1.064	1.129	1.196			
19	0.838	0.903	0.968	1.033	1.098	1.164				
20	0.872	0.937	1.005	1.067	1.132	1.198				
21	0.906	0.971	1.036	1.101	1.166					
22	0.941	1.005	1.070	1.135						
23	0.974	1.039	1.104							
24	1.008	1.073	1.138							
25	1.043	1.107								

室内土工试验统计的滑带土抗剪参数见表 2。勘查得知滑带物质成分主要为含卵石粉质黏土,其粗颗粒含量 33%左右,因此根据《滑坡防治工程勘查规范》(GB/T 32864—2016)第 13.2.7 条相关规定,须对试验得出的内摩擦角进行修正,增大系数取 1.25,修正后的滑带土内摩擦角见表 3。

根据表 1 可知,暴雨工况下,能使计算剖面滑坡稳定性系数处于 1.01 左右的 c 、 φ 组合值有 3 种。组合 1: $c=18\text{ kPa}$, $\varphi=6^{\circ}$,稳定性系数 1.012;组合 2: $c=20\text{ kPa}$, $\varphi=5^{\circ}$,稳定性系数 1.005;组合 3: $c=22\text{ kPa}$, $\varphi=4^{\circ}$,稳定性系数 1.005。

天然状态:因《滑坡防治工程勘查规范》(GB/T 32864—2016)中规定了滑带土内摩擦角增大系数取值范围为 1.15~1.25,然而实际勘查该滑坡滑带土粗颗粒含量在 33%以上,本次修正取最大修正系数 1.25,内摩擦角取修正后的标准值 8° ,黏聚力取范围值中的标准值,即 $c=37.3\text{ kPa}$, $\varphi=8^{\circ}$ 。

饱和状态:选择反演分析组合 3,即 $c=22\text{ kPa}$,

$\varphi=4^{\circ}$ 。因为该组合中 $\varphi=4^{\circ}$,与修正后的滑带土内摩擦角最大值 4.1° 最为接近。

最终选定的计算参数取值见表 4。

5.3 计算工况及结果分析

5.3.1 计算工况

工况 1:仅考虑滑坡的自重力,计算时采用滑带土天然状态下的 c 、 φ 值,采用坡体的天然容重。

工况 2:根据水文地质资料,滑坡受地表水和地下水影响大,滑带土主要为松散卵石土,透水性强,在雨季,滑坡体大量充水,持续降雨可能使滑体全部饱水,计算时采用饱水容重。滑带土强度采用饱和状态下残余 c 、 φ 值。

工况 3:同时考虑了暴雨和地震,计算时采用饱水容重和饱和状态下残余 c 、 φ 值,根据规范,设计基本地震加速度值取 $0.05g$ (g 为重力加速度)。

5.3.2 计算结果

潜在滑坡在 3 种不同工况下的稳定性系数见表 5。

表 2 滑带土试验抗剪参数统计

试验工况	抗剪参数	最大值	最小值	平均值	标准值	标准差
天然剪切	黏聚力 c/kPa	44.1	35.2	39.7	37.3	2.9
	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	7.3	6.0	6.8	6.4	0.5
饱和剪切(残余)	黏聚力 c/kPa	19.9	15.5	17.4	16.1	1.6
	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	3.3	2.5	2.9	2.6	0.3

表 3 修正后的滑带土内摩擦角

试验工况	抗剪参数	最大值	最小值	平均值	标准值	标准差
天然剪切	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	9.0	7.5	8.5	8	0.5
饱和剪切	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	4.1	3.1	3.6	3.3	0.3

表 4 滑带土抗剪参数综合取值

计算工况	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	取值类型
天然状态	37.3	8.0	19.2	修正值
饱和状态	22.0	4.0	20.5	反演值

表 5 稳定性计算结果及评价

计算工况	稳定性系数	安全系数	剩余下滑力	稳定性评价
工况 1	1.323	1.15	0	基本稳定
工况 2	0.96	1.15	266.7	欠稳定
工况 3	0.93	1.05	408.8	欠稳定

工况 1 条件下,稳定性系数大于 1.2,滑坡处于稳定状态。

工况 2 条件下,稳定性系数小于 1,说明滑坡整体处于不稳定-欠稳定状态,该工况是滑坡最为常见的工况,滑坡主要在该工况下发生变形。

工况 3 条件下,稳定性系数小于 1,说明暴雨状态滑坡整体处于不稳定-欠稳定状态,在该工况下滑坡会发生整体变形。

6 结论

(1)滑坡体横向宽度约 120 m,主滑方向 180°,顺主滑方向长约 95 m,滑体厚度 1.5~6 m,体积约 $5.0 \times 10^4 \text{ m}^3$,为小型推移式滑坡。

(2)滑坡形成的主要因素为人类工程活动破坏坡体平衡和大气降水。

(3)综合分析潜在剖面在不同工况下的稳定性系数,工况 2、工况 3 条件下,潜在滑坡的稳定性系数位于 0.93~0.96,说明潜在滑坡处于欠稳定状态,可能发生滑动变形。因此,大气降雨为展销大棚滑坡的主要诱发因素。

参考文献

- [1] 宋国虎,杨桢贤,郭朝旭,等. 成都五家坟滑坡变形破坏特征和复活机制分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(2): 496-503.
- [2] 张泽方,钱志宽,魏勇,等. 考虑最优影响因素组合的滑坡易发性评价:以水城区为例[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(10): 4091-4099.
- [3] 朱权威,于维刚,蔡建华,等. 三峡库区旧县坪滑坡变形机理及稳定性[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(7): 2634-2640.
- [4] 李俊峰,王晓新,钱慧,等. 复杂地形下甘肃舟曲江顶崖

- 滑坡自动提取方法[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(23): 9828-9833.
- [5] 李厚芝,叶霄,朱鸿鹄,等. 三峡库区大坡滑坡成因机制分析及稳定性评价[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(25): 10876-10883.
- [6] 许泰,鄂崇毅,蒋兴波,等. 永登县苦水镇大路村滑坡发育特征及稳定性评价[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(6): 2300-2307.
- [7] 吕文斌,耿海深,魏赛拉加. 基于极限平衡法和 Midas/GTS 的张家湾滑坡稳定性[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(11): 4369-4378.
- [8] 林轩,张枝华,黄波林,等. 顺层岩质滑坡防治方案研究:以重庆市石柱县龙井滑坡为例[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(18): 7935-7944.
- [9] 郑鹏韬,师晋,陈粟,等. 人类活动影响高速公路滑坡的灾发机理和致灾模式研究:以余家海滑坡成因机理为例[J]. 科技和产业, 2023, 23(6): 255-263.
- [10] 李海军,董建辉,朱要强,等. 贵州织金垮坡组滑坡成因分析及稳定性评价[J]. 科技和产业, 2020, 20(5): 156-160.
- [11] 武哲,刘明扬,田宁,等. 十堰某扶贫产业园高填方边坡整体与局部稳定性分析[J]. 科技和产业, 2021, 21(5): 296-299.
- [12] 黄海韵. 水城县尖山营滑坡成因及稳定性分析[J]. 科技和产业, 2021, 21(3): 274-278.
- [13] 覃祖森,元星,李俊. 考虑滑带土剪切强度空间变异性的滑坡危险性评价[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(4): 151-160.
- [14] 杜岩,谢谟文,吴志祥,等. 平推式滑坡成因机制及其稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2019(S1): 2871-2880.
- [15] 丁博,陈文胜,潘峰. 求解推移式滑坡的一种改进条分方法[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(2): 22-28.
- [16] 卢应发,黄学斌,刘德富. 推移式滑坡渐进破坏机制及稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 333-345.

Causes and Stability Evaluation of Landslides in Rural Exhibition and Sales Greenhouses

XU Delong¹, YIN Hao²

(1. Jinan Urban Construction Group Co., Ltd., Jinan 250031, China;

2. Shandong Luyue Resources Exploration and Development Co., Ltd., Tai'an 271021, Shandong, China)

Abstract: Majiayu Village in Laiwu District is constructing an exhibition and sales greenhouse on the mountain behind the village. Due to improper construction, landslide often occurs on the surface of the exhibition and sales greenhouse and the platform is piled up outside the site. In order to study the deformation characteristics, causes, and stability of landslide bodies, a detailed investigation of the landslide site was conducted, and the triggering factors of the landslide were evaluated and analyzed in detail. Quantitative and qualitative methods were used to study the stability. The results show that the total volume of this landslide is about $5.0 \times 10^4 \text{ m}^3$, and it is a small-scale sliding landslide. Under natural conditions, landslides are in a basically stable state. Under the condition of rainstorm, the stability coefficient is between 1.001~1.006, indicating that the potential landslide is in an unstable state, and sliding deformation may occur.

Keywords: mountain landslide; stability; safety factor; deformation characteristics