

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.01-04

胡爱国, 周伟. 地震与强降雨作用下堆积体滑坡变形破坏机理及防治方案分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(1): 27-34.
HU Aiguo, ZHOU Wei. Deformation and failure mechanism and analysis on prevention measures of colluction landslide under earthquake and heavy rainfall[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(1): 27-34.

地震与强降雨作用下堆积体滑坡变形破坏 机理及防治方案分析

胡爱国, 周 伟

(四川省核工业地质局二八二大队, 四川 德阳 638000)

摘要:位于西南山地堆积体滑坡常受到地震和强降雨的双重作用, 查明此类滑坡变形破坏机理是地质灾害防治和风险防范的基础。文章的研究对象是鲜水河断裂带附近的炉霍县马居滑坡。研究表明, 地震作用对位于斜坡地带堆积体滑坡体结构损伤明显, 不但使滑坡整体稳定性下降, 还促使坡体内裂隙大量发育, 利于降雨入渗, 进一步恶化滑坡的水文地质条件。强降雨形成的大规模洪水和泥石流下切坡脚沟道, 牵引滑坡体整体向下。长历时强降雨入渗影响坡体稳定性, 且在降雨结束后较长时间持续影响坡体稳定性。因此, 对此类滑坡防治的对策应考虑坡脚防护和抗滑支挡设置。在对防治方案的有效性分析后, 表明防护方案在极端条件下仍然能保障安全性, 达防治和风险管控的目的。

关键词:堆积体滑坡; 降雨入渗; 地震作用; 沟道下切; 防护方案

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)01-0027-08

Deformation and failure mechanism and analysis on prevention measures of colluction landslide under earthquake and heavy rainfall

HU Aiguo, ZHOU Wei

(282 Brigade of Sichuan Province Nuclear Industry Geology Bureau, Deyang, Sichuan 638000, China)

Abstract: Accumulation landslides located in the Southwest Mountainous are affected by both earthquake and heavy rainfall, the deformation and failure characteristics of landslides are affected by these two main factors. Finding out the deformation and failure mechanism of this kind of landslide is the basis of geological disaster prevention and risk prevention and control. This paper takes Maju landslide in Luhuo County as the research object. The results show that, the seismic action has obvious damage effect on the structure of accumulation landslide located in slope zone, it not only reduces the overall stability of the landslide, but also promotes the development of a large number of fissures in the slope, which is conducive to the infiltration of rainfall into the slope, and then worsens the hydrogeological conditions of the landslide. Heavy rainfall is easy to form large-scale flood and debris flow, cutting the gully at the foot of the slope, and pulling the landslide to slide downward as a whole. The long-term heavy rainfall infiltration slope also has a great impact on the stability of the landslide, and the landslide is in an unstable state for a long time after rainfall. Therefore, for this kind of landslide prevention scheme, the strategy of paying equal attention to slope toe protection and anti slide retaining should be adopted, the effectiveness analysis of the protection scheme shows that the safety of the protection scheme has a certain guarantee under extreme conditions, achieves the purpose of prevention and control, and further controls the risk.

收稿日期: 2021-12-06; 修订日期: 2022-01-21

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190637)

第一作者: 胡爱国(1974-), 男, 四川蓬安人, 硕士研究生, 主要从事地质灾害防治工作。E-mail: 632987222@qq.com

Keywords: accumulation landslide; rainfall infiltration; earthquake action; cutting the gully at the foot of the slope; prevention scheme

0 引言

西南山地存在众多的不同成因的堆积体斜坡,坡体上常聚居村落、交通和水利水电等基础设施。在多种因素的作用下,堆积体斜坡常易形成大规模的滑坡,威胁人民生命财产安全。这类滑坡地处高山峡谷地貌,地质环境条件复杂多变,诱发滑坡变形的因素众多,其中地震和强降雨是主要的诱发因素,特别是两因素常相互作用防治难度大^[1-2]。

炉霍县旦都乡马居滑坡位于鲜水河断裂带附近,受近年来地震活动^[3]和降雨影响,从 2015 年开始明显变形,且逐年加剧,现已演化为一大型滑坡。滑坡的破坏模式和滑坡机理在区域内具有典型性,本次拟对此滑坡的变形破坏机理进行研究,以期理清这类滑坡变形发展的过程和各因素相互作用的影响,进一步优化防治方案,评价方案的有效性和安全性,为地质灾害防治和风险管控提供依据。

1 研究区地质环境条件

炉霍县地处青藏高原东南边缘,高山峡谷地貌区,海拔高度 3 300 ~ 3 600 m,区域内河流为鲜水河支流。平均年降雨量 700 ~ 920 mm。近 10 年降雨量较平稳。区域内地质构造复杂,新近构造活动强烈(图 1)。历史上遭受多次地震的影响,1973 年炉霍县鲜水河断

裂带发生 7.6 级地震,2014 年 11 月 22 日鲜水河断裂带的康定地区发生 6.3 级地震及多次余震。研究区基本地震动峰值加速度为 0.3 g,反应谱特征周期为 0.4 s^[4]。

研究区地层主要为三叠系上统雅江组上段(T_3y^3)含粉砂炭质绢云板岩和变质长石石英砂岩、第四系残坡积层(Q_4^{el+dl})、滑坡堆积层(Q_4^{del})。

2 滑坡基本特征

2.1 滑坡基本概况

滑坡整体呈圈椅状,滑坡后缘以寺庙(马居庙)外侧围墙前拉张裂缝为界,前缘以俄觉龙日沟沟床为界,左侧和右侧以水沟为界,滑坡面积 $4.6 \times 10^4 \text{ m}^2$,厚 10 ~ 13 m,体积 $60 \times 10^4 \text{ m}^3$,属中型土质滑坡。滑坡主滑方向为 100° ,整体坡度约 30° ,呈前陡后缓的趋势,前缘坡度约 $35^\circ \sim 40^\circ$,后缘坡度约 $20^\circ \sim 25^\circ$ 。

2.2 变形特征

根据滑坡的变形破坏特征将该滑坡划分为 2 个变形区,其中 I 区为寺庙及下方坡体,II 区为寺庙外北侧区域。变形 I 区主要变形特征有:前缘沟床侵蚀垮塌下错台坎,横向拉张裂缝,后缘拉裂缝、寺庙房屋裂缝等。变形 II 区主要变形特征有:后缘拉裂缝、地面开裂、电杆歪斜、前缘多级下错陡坎群等。

调查表明,该滑坡区在 2015 年以前未出现可见变形,受 2014 年 11 月康定地震及余震影响,该区震感明显,2015 年雨季时滑坡前缘陆续变形,以后每年雨季滑坡体变形呈现出了逐年加剧的趋势,滑坡体后缘也陆续出现了变形,2020 年发生了一次短历时强降雨,雨强约为 50 年一遇降雨,诱发了俄觉龙日沟泥石流,对坡脚冲刷淘蚀,滑坡前缘出现了大规模的滑坡变形,并进一步牵引后缘变形加剧。

2.3 坡体结构特征

滑体主要由第四系全新统滑坡堆积层组成。厚度为 10 ~ 13 m,主要成份为含黏碎石土,所充填黏性土褐黄色,稍湿,无摇振反应,干强度较高,切面较光滑,碎石成分主要为变质砂质、板岩,常见钙质胶结,粒径一般 2 ~ 10 cm,含量大于 50%。滑带位于滑体或基覆界面,含水量较大,地下水活动痕迹明显。滑床为三叠系上统雅江组上段含粉砂炭质绢云板岩(T_3y^3)和变质长石石英砂岩互层(表 1)。滑坡区工程地质平面图见图 2,滑坡体结构特征见图 3。



图 1 研究区地震断裂及历史地震分布图^[4]

Fig. 1 Distribution map of seismic faults and historical earthquakes in the study area

表 1 滑坡区主要岩土参数表
Table 1 Geotechnical parameters of landslide area

岩土体	体积模量/MPa	剪变模量/MPa	天然状态			饱和状态		
			重度/(t·m ⁻³)	内聚力/kPa	内摩擦角/(°)	重度/(t·m ⁻³)	内聚力/kPa	内摩擦角/(°)
滑坡体	15.60	5.18	2.01	24.3	30.8	2.05	22.9	27.8
强风化	15.20	7.80	22	40	35	-	-	-
中风化基岩	20.00	12.00	27	1900	42.8	-	-	-

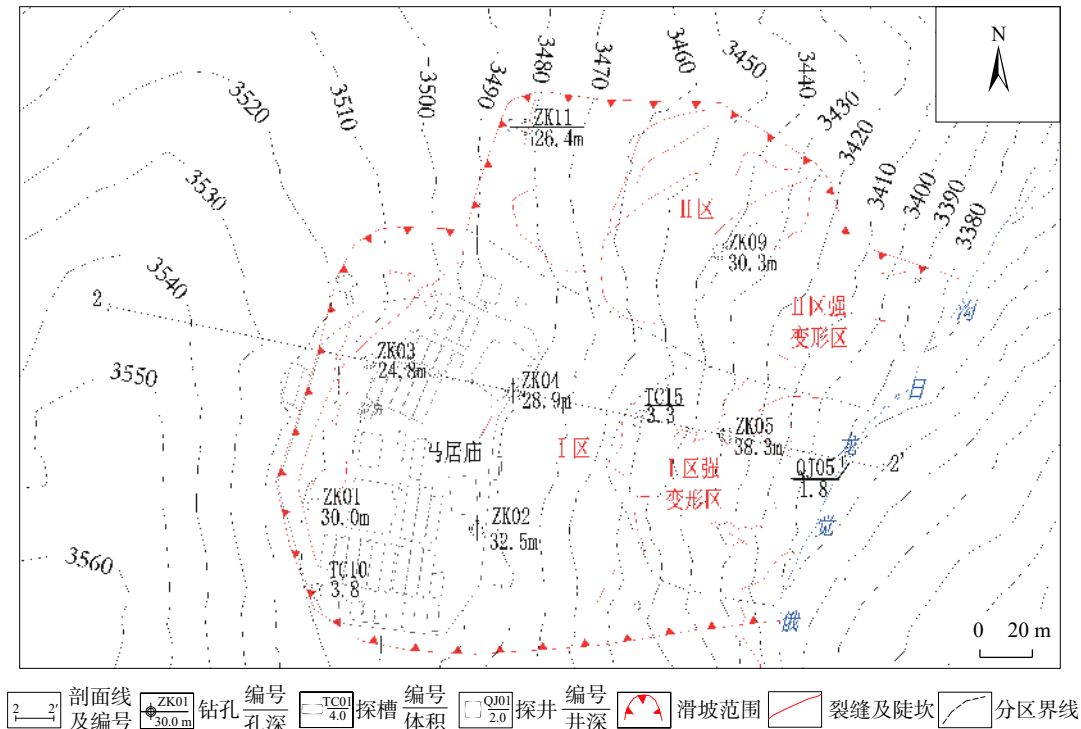


图 2 马居滑坡工程地质平面图
Fig. 2 Engineering geological plane map of Maju landslide

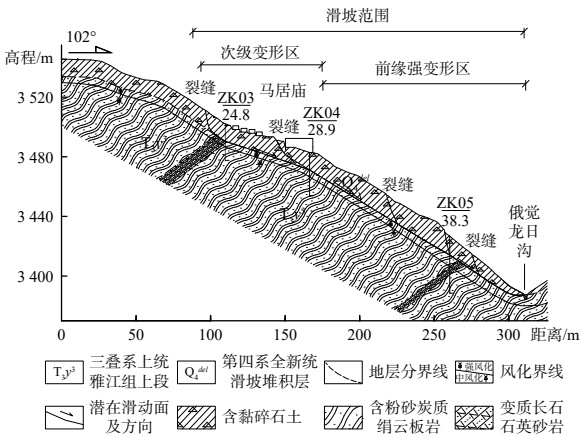


图 3 2-2'剖面图
Fig. 3 Section 2-2' of landslide area

3 滑坡变形破坏机理分析

马居滑坡是位于地震区的一堆积体滑坡, 勘查

表明, 该滑坡坡度较陡, 滑坡体结构为含黏碎石土层。下覆基岩为含粉砂炭质绢云板岩具有较好的隔水性, 基覆界面地下水活动较强。受 2014 年地震作用滑坡体结构完整性和稳定性变差, 随后受降雨和坡脚下切作用坡体变形持续加大, 滑坡体处于不稳定—欠稳定状态。

该滑坡变形过程及所受影响因素明确, 但总体来说, 该滑坡地质环境条件复杂多变, 诱发因素和作用方式多变, 通过对滑坡变形特征及变形历史分析, 基本理清了近期滑坡变形的时空关系, 为更好地查清该滑坡变形破坏机理, 更好地指导滑坡防治方案的制定, 这里对滑坡三个重要的影响因素进行数值分析。选取的分析剖面为滑坡主滑方向的 2-2'剖面, 模型水平方向左右采用位移约束, 模型的底部采用竖向位移约束。共划分 14 070 个结点, 6 811 个单元。参数见表 1。

3.1 地震作用下坡体变形机理分析

对马居滑坡变形历史调查表明,2014 年发生在鲜水河断裂带上的康定地震,对该滑坡稳定性影响大,为了进一步查明地震对该滑坡具体影响程度,这里选取该地区多遇地震加速度及特征周期人工合成地震波进行时程分析^[5]。人工合成的地震波见图 4。

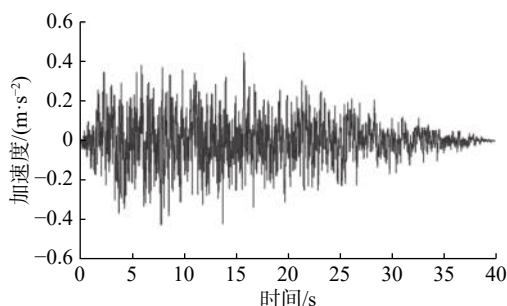


图 4 多遇地震条件下人工合成地震波时程曲线

Fig. 4 Synthetic seismic wave time history curve under frequent earthquakes

时程分析获得了斜坡在地震作用下坡体的塑性区分布图及最大剪应变增量云图^[6](图 5、图 6)。

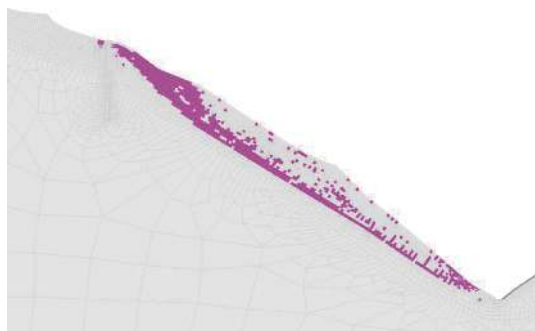


图 5 多遇地震条件下斜坡塑性区发育分布图

Fig. 5 Development distribution of slope plastic zone under frequent earthquake conditions

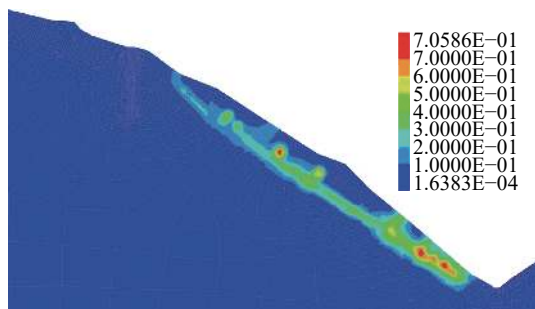


图 6 多遇地震条件下斜坡最大剪应变增量云图

Fig. 6 Cloud map of maximum shear strain increment of slope under frequent Earthquake

模拟结果表明地震作用对斜坡稳定性影响大,斜坡

体内塑性区基本上成片相连,特别是斜坡顶部出现了大面积的塑性区,该区域也是地表裂缝发现最多的区域,剪应变云图表明在基覆界面处剪应变增量最大,且出现了两个较大的区域,特别是沟道向上约 10~30 m 的位置,勘查表明该区裂缝发育密集。在地震荷载作用下,坡体稳定性下降,斜坡土体结构遭到破坏,地震后不久,在坡体缓坡平台前缘部分相继出现开裂,该点随即纳入监控。

3.2 坡脚沟道下切诱发坡体变形破坏分析

2020 年 7 月该区域暴发了短历时强降雨,俄觉龙日沟暴发了 50 年一遇泥石流,坡脚沟道淘蚀严重,滑坡体前缘变形加剧。为了查明沟道下切对滑坡稳定性影响,以本次勘查沟道内的基覆界面作为最大冲刷深度进行数值分析,采用参数折减法进行稳定系数计算。获得下切后稳定系数为 1.00,最大剪应变区域延伸至沟道底部,表明沟道下切后牵引作用明显,直接导致坡体变形加剧(图 7)。

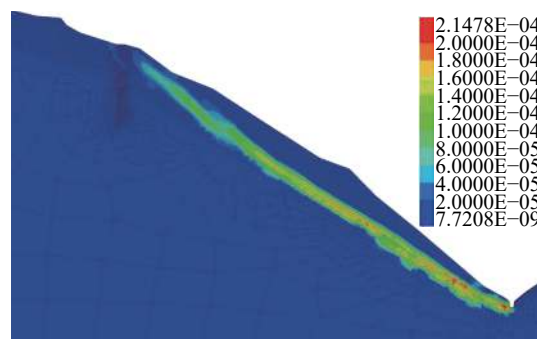


图 7 坡脚下切后斜坡最大剪应变增量云图

Fig. 7 Cloud map of maximum shear stress increment of slope after slope toe undercutting

3.3 不同降雨频率条件下稳定性分析

该滑坡不但受到短历时强降雨冲刷坡脚的影响,变形历史表明,长历时降雨也对滑坡的稳定性影响较大。研究表明^[7-19],滑坡体采用 Mein-Larson 降雨入渗模型能较好地模拟出降雨对坡体含水率影响,可计算出不同时刻坡体湿润锋深度,降雨结束后,再采用渗透模型计算各时刻地下水的分布特征,对于特征时间结点采用强度折减法计算出各时刻滑坡稳定系数,以此评价降雨全历时滑坡的稳定性变化。滑坡体的饱和渗透系数为 0.42 m/h, 100 年一遇降雨强度为 0.034 m/h, 50 年一遇降雨强度为 0.031 m/h, 20 年一遇降雨强度为 0.026 m/h, 10 年一遇降雨强度为 0.023 m/h, 常年降雨强度为 0.015 m/h, 滑坡体的饱和渗透系数大于小时降雨强度,则垂直湿润锋深度 Z_w 可采用以下公式计算:

$$Z_w = \frac{pt}{M} \quad (1)$$

式中: M ——饱和含水率与初始含水率的差值(本次取 0.1);

p ——降雨强度 m/h ;

t ——降雨历时/h。

本次降雨历时综合近年来该地区长历时强降雨并综合类似文献^[6]后综合确定计算时长为 10 d。强降雨入渗坡体后采用地下水渗透模型进行模拟分析,地表及沟道表明设置为透水边界,其余设置为不透水边界条件。

分析结果可以看出强降雨的雨强越大对滑坡的稳定性影响越大,强降雨在降雨过程中坡体浅表饱和,湿润锋下移,但是滑坡稳定下降不明显,随着湿润锋向坡体转移过中滑坡体的稳定性有较大幅度的下降,随后随着地下水沿着隔水界面活动时,滑坡稳定性长期处于不稳定状态,待滑坡体内的地下水基本被疏干后滑坡体整体稳定性逐渐恢复到初始状态。说明滑坡风险管控中不但要关注降雨时刻会诱发滑坡灾害,在降雨过后较长时间(可能 5 d 左右)内照样会出现滑坡灾害(图 8)。

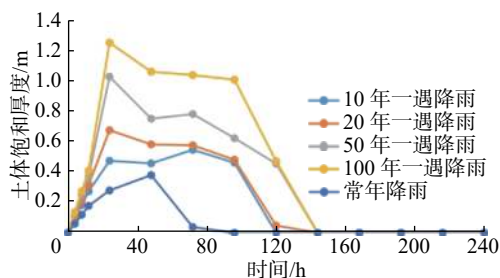


图 8 距离 240 m 处强降雨历时全过程饱和土体厚度变化情况 (2-2' 剖面)

Fig. 8 Variation of saturated soil thickness in the whole process of heavy rainfall at $x = 240 \text{ m}$ (2-2' section)

本次对于降雨入渗研究表明厚层堆积体滑坡的稳定性较降雨条件下浅表层滑坡稳定性的变化在降雨阶段有所不同,主要体现在浅表层无限边坡和岩质边坡^[20]的稳定性在降雨期间下降很快^[6],而厚层堆积体滑坡的整体稳定性虽有向下的趋势,但是整体稳定性下降不大(图 9)。

3.4 滑坡变形破坏机理小结

文中对马居滑坡的机理分析遵循该滑坡变形历史过程进行模拟,力求获得该滑坡地震、坡脚下切、强降雨入渗等因素的影响。分析结果表明:马居滑坡先是地震作用对坡体损伤作用明显,促使坡体裂隙发育,位于基覆界面的滑面基本形成,滑坡体整体处于欠稳定状态,后期随着降雨入渗的影响,滑坡体处于缓慢变形,2020 年的短历时强降雨诱发泥石流冲刷下切坡脚,诱

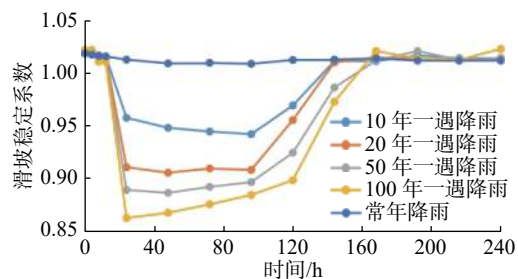


图 9 滑坡体在强降雨入渗条件下稳定系数变化情况

Fig. 9 Variation of stability coefficient of landslide under heavy rainfall infiltration

发前缘大规模滑坡,牵引作用使得滑面进一步贯通,变形加剧,坡体整体稳定性进一步下降。模拟结果很好地拟合了滑坡变形破坏过程,进一步揭示了滑坡变形破坏机理,这为工程防治和风险管控打下了基础。

4 滑坡防治方案分析

4.1 防治方案

马居滑坡坡体上常住人口多,周边斜坡失稳后将直接威胁寺庙安全,其后果严重,属大型地质灾害。该滑坡地质环境条件复杂,滑坡诱发因素多,地震、降雨等叠加后易形成特大型灾害。

滑坡体及周边地形坡度大,从寺庙至沟道斜坡基本上不具备设置抗滑支挡的工程施工条件,但该段斜坡稳定性最差,在天然状态下其稳定系数介于 1.03 ~ 1.05,沟道下切后坡体的稳定性将下降到 1.0 附近,若继续冲刷将整体失稳。寺庙建在缓坡平台上,寺庙前缘有一较缓坡平台,可作为抗滑桩施工场地,若在此设置抗滑桩将直接针寺庙建筑物进行保护。

所以,在综合考虑滑坡变形破坏机理和施工条件的基础上,确定了本滑坡治理方案:在滑坡体中部(寺庙前缘)抗滑支挡,坡脚沟道固床防止下切。

4.2 坡脚防护

坡脚沟道下切持续牵引坡体整体变形,坡脚沟道的防护措施是必要的。坡脚防护有两种方案,一种是沟道固床,保持现有状态,沟道不继续下切,前缘坡体在自然条件下逐步稳定。另外一种方案就是回淤压脚,提高滑坡前缘稳定性。后一种方案属于主动防治方案,这里选取回淤高度 2 m、4 m、6 m、8 m、10 m 进行回淤压脚效果分析,分析采用参数折减法。

分析结果表明,不同回淤高度的压脚提升滑坡稳定性差距较大,回淤高度 8 m 以内对滑坡前缘稳定性基本上无明显改善,只有当回淤高度超过 8 m 时才有较大幅度的提高。通过对滑坡前缘非稳定状态下的最

大剪应变云图分析, 滑坡前缘最不利滑面的剪出口距沟底的高度大于 8 m, 若回淤高度小于 8 m, 对稳定性的贡献基本上很小, 所以稳定系数一直处于徘徊于 1.03 附近, 若要大幅度提高滑坡整体稳定性, 回淤压脚的高度至少要大于 10 m, 考虑到该滑坡体坡脚沟道纵坡较陡、沟道较长, 必须采用多道高坝才能达到治理的效果 (图 10)。

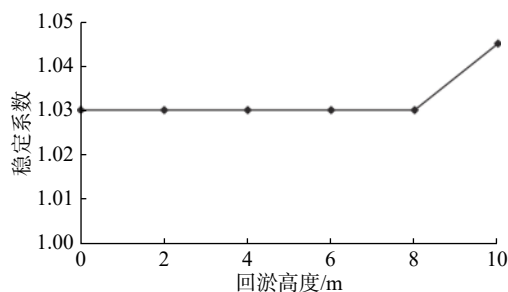


图 10 不同回淤高度滑坡前缘稳定系数变化情况

Fig. 10 Variation of stability coefficient of landslide front at different siltation heights

4.3 极端条件下防治方案安全性评价

滑坡区地处中国最活跃的地震断裂带上, 发生地震可能性大, 对在地震工况及强降雨条件下防治方案的安全性进行评价是必要的^[21-22]。本次考虑到在极端条件下, 如地震和长历时强降雨来袭后, 滑坡前缘失稳, 或者在坡脚淘蚀作用长期作用下滑坡前缘坡体累进破坏导致前缘整体失稳, 使抗滑桩前缘失去支挡, 在这种条件下对上部抗滑桩方案的安全性进行评价。滑坡区基本地震动峰值加速度为 0.3 g, 多遇地震动峰值加速度为 0.1 g, 罕遇地震 0.57g^[4](通过数值分析获得了各工况条件下滑坡稳定性分区云图图 11-图 15)。

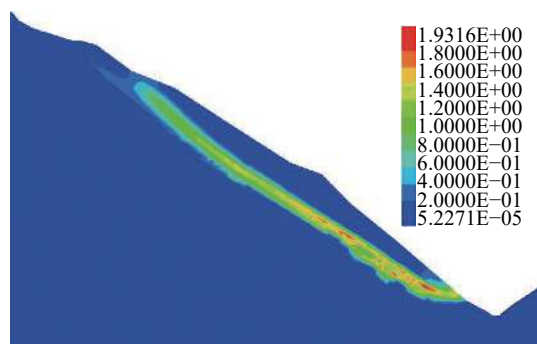


图 11 沟道现状条件下滑坡前缘最大剪应变增量云图

Fig. 11 Cloud map of maximum shear strain increment at the front edge of landslide under the current condition of gully

数值分析表明前缘失去支挡后, 抗滑桩方案对上部保护对象能有效的保护, 稳定性差的部分就是上部滑体及后缘陡坡部分, 天然工况及三种地震工况下稳定系数

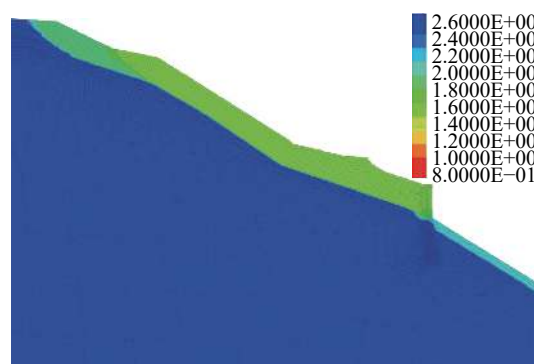


图 12 失去支挡后天然工况下滑坡稳定性分区云图

Fig. 12 Cloud map of landslide stability zoning under natural conditions after loss of support at the front edge

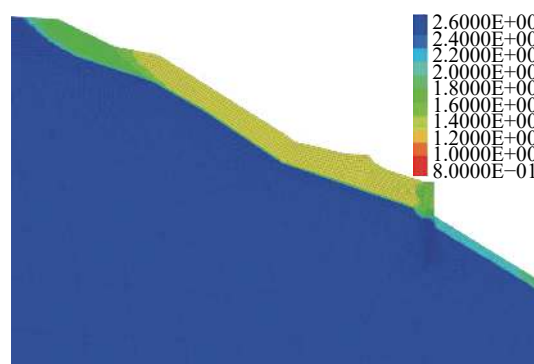


图 13 失去支挡后多遇地震工况下滑坡稳定性分区云图

Fig. 13 Cloud map of landslide stability zoning under frequent earthquake conditions after loss of support at the front edge

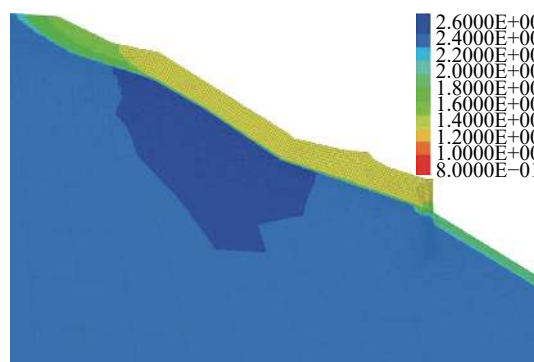


图 14 失去支挡后基本地震工况下滑坡稳定性分区云图

Fig. 14 Cloud map of landslide stability under basic seismic conditions after loss of support at the front edge

依次降低, 分别为 1.4, 1.3, 1.2, 1.0。数值分析结果说明在极端情况发生后, 上部滑坡不会随着前缘失去支挡后随即破坏且还具有一定安全余度, 但是该斜坡坡度陡, 易在余震和强降雨作用下再次发生变形破坏, 故在极端情况发生后, 抗滑桩方案能够为斜坡上的居民赢得撤离时间, 提高抗风险的能力。

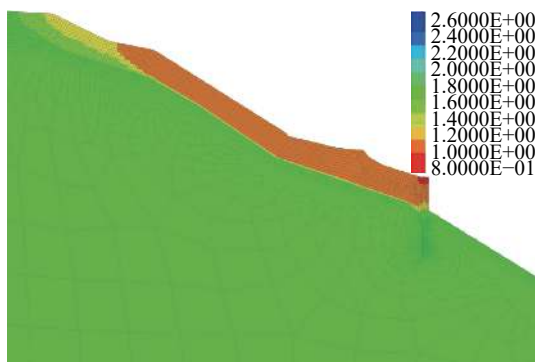


图 15 失去支挡后罕遇地震工况下滑坡稳定性分区云图

Fig. 15 Cloud map of landslide stability zoning under rare earthquake conditions after loss of support at the front edge

5 结论

通过对马居堆积体滑坡变形破坏机理及防治方案研究,得到如下结论:

(1) 马居滑坡受地震作用和降雨作用双重影响下,地震作用下坡体结构损伤严重,滑坡体稳定性下降,后期降雨作用下滑坡变形进一步加剧,滑坡目前处于欠稳定和欠稳定状态。

(2) 对降雨入渗坡体的研究表明,短历时降雨对滑坡的稳定性影响较小,长历时降雨在土体的湿润锋到达一定深度后滑坡的稳定性才有较大幅度的下降,若降雨历时较短,对滑坡的稳定性影响有限,这相对于无限斜坡整体稳定性要好。

(3) 短历时强降雨能形成较强的地表径流,形成洪水或泥石流冲刷和淘蚀滑坡坡脚,对滑坡的稳定性影响较大,易形成牵引式滑坡,进而堵塞沟道形成泥石流的堵溃点。

(4) 推荐采用抗滑桩加固床防治方案,固床回淤高度应综合考虑滑坡剪出口位置,抗滑支挡方案在极端情况下有一定抗风险能力。

参考文献 (References):

- [1] 黄润秋.汶川地震地质灾害后效应分析[J].工程地质学报,2011,19(2):145-151. [HUANG Runqiu. After effect of geohazards induced by the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(2): 145-151. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 于宝国,边波,李春龙,等.基于知识图谱的碎石土堆积体滑坡研究热点及发展趋势[J].地球科学前沿(汉斯),2021(10):1326-1340. [YU Baoguo, BIAN Bo, LI Chunlong, et al. Research hotspot and development trend of gravel soil accumulation landslide based on knowledge graph [J]. Advances in Geosciences, 2021(10): 1326-1340. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 孙凯,孟国杰,洪顺英,等.联合InSAR和GPS研究鲜水河断裂带炉霍—道孚段震间运动特征[J].地球物理学报,2021,64(7):2278-2296. [SUN Kai, MENG Guojie, HONG Shunying, et al. Interseismic movement along the Luhuo-Daofu section of the Xianshuihe Fault from InSAR and GPS observations [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(7): 2278-2296. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 中国地震台网中心国家地震科学数据中心. <http://data.earthquake.cn>. [China Seismological Network Center National Seismological Science Data Center. <http://data.earthquake.cn>. (in Chinese)]
- [5] 赵金,吴红刚,杨涛.滑坡对不同特性地震波的动力响应规律[J].中国地质灾害与防治学报,2018,29(6):47-52. [ZHAO Jin, WU Honggang, YANG Tao. Dynamic response of landslides to different seismic wave [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(6): 47-52. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 丁秀美,刘光士,黄润秋,等.剪应变增量在堆积体边坡稳定性研究中的应用[J].地球科学进展,2009,19(增刊1):318-323. [DING Xiumei, LIU Guangshi, HUANG Runqiu, et al. Shear strain increment applying instability studying of debris slope [J]. Advance in Earth Sciences, 2009, 19(Sup 1): 318-323. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 李秀珍,何思明.基于Mein-Larson入渗模型的浅层降雨滑坡稳定性研究[J].灾害学,2015,30(2):16-20. [LI Xiuzhen, HE Siming. A study on stability of shallow rainfall-induced landslide based on mein-larson infiltration model [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(2): 16-20. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 杨宗佑,蔡焕,雷小芹,等.非饱和地震滑坡堆积体降雨破坏水-力耦合行为试验[J].岩土力学,2019,40(5):1869-1880. [YANG Zongji, CAI Huan, LEI Xiaoqin, et al. Experiment on hydro-mechanical behavior of unsaturated gravelly soil slope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(5): 1869-1880. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 邹祖银,朱占元,张锋,等.连续降雨条件下某震后高边坡稳定性分析[J].地震工程学报,2016,38(4):541-548. [ZOU Zuyin, ZHU Zhanyuan, ZHANG Feng, et al. Stability analysis of post-earthquake high slope under continuous rainfall [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(4): 541-548. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 贺小黑,彭鑫,谭建民,等.地下水渗流对崩堆积滑坡稳定性和变形的影响:以湖南安化春风滑坡群为例[J].中国地质灾害与防治学报,2020,31(6):96-103. [HE Xiaohai, PENG Xin, TAN Jianmin, et al. Influence of groundwater seepage on stability and deformation of colluvial deposit landslide: Taking Chunfeng Landslide group in Anhua

- County of Hunan Province as an example [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(6): 96–103. (in Chinese with English abstract)
- [11] 韩培锋, 樊晓一, 田述军, 等. 降雨强度与含石量对松散堆积体失稳影响研究 [J]. 工程科学与技术, 2019, 51(1): 112–120. [HAN Peifeng, FAN Xiaoyi, TIAN Shujun, et al. Effect of rainfall intensity and stone content on the instability of quaternary deposits [J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51(1): 112–120. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 王家柱, 葛华, 高延超, 等. 川南红层区黄子树滑坡形成过程与运动特征 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(2): 9–17. [WANG Jiazhu, GE Hua, GAO Yanchao, et al. Mechanism and kinematic characteristics of Huangzishu Landslide in the red mudstone of southern Sichuan [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(2): 9–17. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 吴火珍, 冯美果, 焦玉勇, 等. 降雨条件下堆积层滑坡体滑动机制分析 [J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 1): 324–329. [WU Huozhen, FENG Meiguo, JIAO Yuyong, et al. Analysis of sliding mechanism of accumulation horizon landslide under rainfall condition [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Sup 1): 324–329. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 刘明扬, 武哲, 付晓东, 等. 不同降雨条件下堆积体边坡响应规律与失稳力学机制分析 [J]. 科技和产业, 2021, 21(7): 266–274. [LIU Mingyang, WU Zhe, FU Xiaodong, et al. Analysis of response law and instability mechanism of accumulation slope under different rainfall conditions [J]. Science Technology and Industry, 2021, 21(7): 266–274. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 廖军, 邓涛, 周越良, 等. 降雨作用下第四系堆积体路堤稳定性 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(23): 10090–10097. [LIAO Jun, DENG Tao, ZHOU Yueliang, et al. Stability of quaternary accumulation embankment under rainfall [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(23): 10090–10097. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 张雨林, 石惊涛, 涂国祥, 等. 粗、巨颗粒富集位置对堆积体降雨入渗的影响 [J]. 水利水运工程学报, 2021, 5: 76–83. [ZHANG Yulin, SHI Jingtao, TU Guoxiang, et al. Influence of coarse and giant particles enrichment position on rainfall infiltration of accumulation body [J]. Hydro-Science and Engineering, 2021, 5: 76–83. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 张国帅, 王晓亮, 夏建新. 入渗条件下颗粒堆积体稳定性试验研究 [J]. 泥沙研究, 2021, 46(5): 68–73. [ZHANG Guo-shuai, WANG Xiaoliang, XIA Jianxin. Experimental study on stability of particle accumulation under infiltration [J]. Journal of Sediment Research, 2021, 46(5): 68–73. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 张玉, 徐卫亚, 邹丽芳, 等. 降雨条件下大型滑坡体渗流稳定性分析 [J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 833–841. [ZHANG Yu, XU Weiya, ZOU Lifang, et al. Analysis of seepage stability of large-scale landslide under rainfall condition [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 833–841. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 左自波, 张璐璐, 王建华. 降雨触发不同级配堆积体滑坡模型试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37(7): 1319–1327. [ZUO Zibo, ZHANG Lulu, WANG Jianhua. Model tests on rainfall-induced colluvium landslides: effects of particle-size distribution [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(7): 1319–1327. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 卫童瑶, 殷跃平, 高杨, 等. 三峡库区巫山县塔坪 H1 滑坡变形机制 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 73–81. [WEI Tongyao, YIN Yueping, GAO Yang, et al. Deformation mechanism of the Taping H1 landslide in Wushan County in the Three Gorges Reservoir area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 73–81. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 穆鹏, 吴玮江, 折学森. 汶川地震重灾区陇南红土坡滑坡稳定性分析与防治对策研究 [J]. 工程地质学报, 2012, 20(2): 204–212. [MU Peng, WU Weijiang, SHE Xuesen. Stability assessment and treatment for hongtupo landslide in severe disaster area of southern Gansu induced by Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(2): 204–212. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 张玉, 徐卫亚, 石崇, 等. 争岗滑坡堆积体稳定性及治理措施研究 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1470–1478. [ZHANG Yu, XU Weiya, SHI Chong, et al. Stability and treatment of Zhenggang landslide accumulation mass [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1470–1478. (in Chinese with English abstract)]