

文章编号: 1007-2993(2024)05-0577-07

宁德白莲寺后山滑坡成因分析及综合治理

黄朝阳

(福建省第四地质大队, 福建宁德 352100)

【摘要】 宁德白莲寺后山滑坡为中型牵引式土质滑坡, 是典型的由于坡脚不合理开挖叠加强降雨作用导致的滑坡。根据勘查成果, 采用圆弧法和有限元法对滑坡进行稳定性分析, 分析结果显示, 一般工况下滑坡处于基本稳定状态, 暴雨工况下滑坡处于不稳定-欠稳定状态。滑坡治理采用削坡卸载、锚杆框架梁、植被防护、抗滑桩、坡脚挡墙及设置截排水沟等综合治理措施, 治理效果较好, 可为类似滑坡工程提供参考。

【关键词】 滑坡; 饱和滞水区; 圆弧法; 有限元; 稳定性评价; 锚杆; 抗滑桩

【中图分类号】 P642.22

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.05.012

Cause Analysis and Comprehensive Treatment of Back Mountain Landslide Slope of Bailian Temple in Ningde

Huang Chaoyang

(Fourth Geological Team of Fujian Province, Ningde 352100, Fujian, China)

【Abstract】 The back mountain landslide of Bailian Temple in Ningde is a medium-sized traction type soil landslide, which is a typical landslide caused by unreasonable excavation at the foot of the slope and heavy rainfall. According to the survey results, the arc method and finite element method were used to analyze the stability of the landslide. The analysis results show that the landslide is basically stable under general conditions, and unstable - understable under rainstorm conditions. The landslide treatment adopts comprehensive measures such as slope cutting and unloading, anchor frame beams, vegetation protection, anti-slip piles, retaining walls, and setting up interception and drainage ditches. The treatment effect is good and can provide reference for similar landslide projects.

【Key words】 landslide; saturated stagnant water zone; arc method; finite element; stability evaluation; anchor bar; anti-slip pile

0 引言

滑坡是一种常见地质灾害, 在水利水电、交通基础设施、土木工程、矿山建设等工程建设中普遍存在。滑坡是在多种因素共同作用下形成的, 这些因素大体上可分为内因和外因, 内因有地形地貌、地质构造、地层结构、岩土层性质等, 外因有人类工程活动和强降雨等因素。

业界认为滑坡发生的诱因是外因, 而外因中主要是降雨, 特别是长时间的强降雨极易引发滑坡地质灾害, 降雨入渗是导致土质边坡发生滑坡的一个重要原因^[1-4]。人类工程活动, 特别是对边坡坡脚的不合理开挖, 叠加强降水作用而引发滑坡的工程案例很多, 对人民生命财产造成严重威胁^[5-6]。

自 20 世纪 90 年代起, 学者们一直致力于研究降雨和地下水渗流作用下边坡失稳的机理^[7-10]。

1993 年 Fredlund 等提出了非饱和土抗剪强度理论, 认为降雨导致土体内基质吸力降低与饱和度升高削弱了土体自身的抗剪强度, 从而导致边坡稳定系数产生大范围波动^[11]。大量研究和工程案例表明, 降雨是引发边坡浅表土层失稳的直接触发因素^[12-13], 其主要原因在于强降雨入渗条件下, 地表雨水入渗导致非饱和土质边坡中基质吸力的降低或消失, 孔隙水压力升高, 土体有效抗剪强度明显降低, 同时湿润区土体重量增加, 在渗流作用下导致边坡失稳^[14]。

导致滑坡的另一重要外在因素为坡脚开挖, 开挖过程中, 在坡体内发生应力重分布, 随着开挖的进行, 坡体应力状态不断发生变化, 坡体变形逐渐加大, 开挖结束后, 坡体中部产生大量的剪切裂缝, 后缘产生张拉裂缝, 坡体稳定性大幅度降低, 最后产生失稳^[15]。

此外,斜坡稳定性问题也是一个时、空效应组合问题,在定量分析中经常遇到滑动面形态、指标选定及计算模型选择等问题^[6]。

宁德白莲寺后山滑坡是典型的由于坡脚不合理开挖叠加强降雨作用导致的滑坡。本文结合该滑坡勘查治理工程,对滑坡采用圆弧法和有限元法进行稳定性分析,并针对滑坡特征采取有效的综合治理措施,可为类似工程提供参考。

1 滑坡工程概况

1.1 地形地貌及滑坡特征

滑坡所在区域属丘陵斜坡地貌单元,斜坡呈西高东低走势,坡顶最高处标高为 250 m,坡脚最低处标高为 85 m。斜坡全长约 600 m,地形总体呈上(西)陡下(东)缓走势。滑坡发育于斜坡中下部,平面形态呈“圈椅”状,滑坡所在斜坡标高范围为 104~176 m,前后缘高差约 72 m,滑坡周界呈错落垂直陡坎,主滑方向为 105°,主轴长约 85 m,前缘宽约 95 m,平均宽约 85 m,滑坡平面面积约 7225 m²,滑体纵向分布呈中上部较厚、前部逐渐变薄的形态,

滑体横向分布呈典型的中间厚、两翼薄形态,滑体平均厚度约 18.5 m,滑坡体总方量约 6.6×10^4 m³,属中型牵引式土质滑坡。

滑坡体所在斜坡中上部有一机耕道路自南往北横穿而过,道路东侧边缘为滑坡后缘边界。道路西侧斜坡上方,坡度 35°~39°。道路东侧为滑坡区,地形平均坡度约 20°~30°,坡面因附近村民耕作而整理呈台阶状,阶高 0.8~1.2 m,为水果种植用地。斜坡坡面裂缝发育,裂缝导致坡面错落呈不规则台阶状,阶高 0.8~1.3 m。斜坡下部坡脚紧邻寺庙,坡脚处因寺庙建设开挖形成的高 5~30 m、长约 155 m 人工边坡,坡度 30°~45°,边坡坡顶发育一条长 15~35 m、宽 5~50 cm 的横展裂缝,坡面下错约 1.5 m,边坡坡面凹凸不平,无防护措施。

滑坡严重威胁到坡脚炉山村、白莲寺区域的人民群众生命财产安全,危险性较大,危害性较强,有必要对该地灾点采取合理治理措施。

滑坡总平面见图 1,滑坡概貌见图 2。

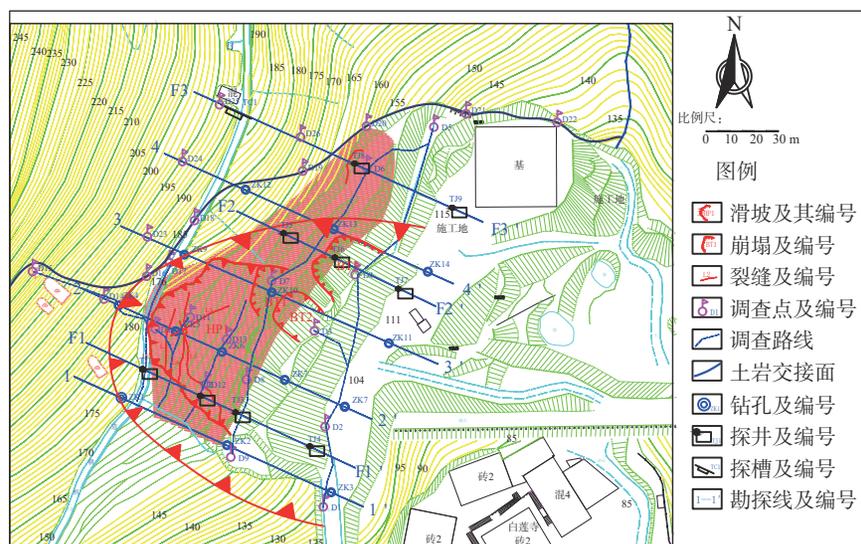


图 1 滑坡总平面图



图 2 滑坡概貌

1.2 滑坡区地质条件

1.2.1 工程地质条件

滑坡区下伏基岩主要为侏罗系上统南园组第三段凝灰熔岩,覆盖层主要为含碎石粉质黏土,其具体岩土层性质及特征如下。

(1)素填土:主要揭示于滑坡区东侧斜坡坡脚,钻孔揭示层厚 1.80~2.60 m,土层呈杂色,上部为滑坡堆积体,成分以含碎石粉质黏土为主,碎块含量约占 30%,粒径以 10~20 cm 为主,下部为黏土素填土,成

分以黏粉粒为主。

(2)含碎石粉质黏土: 呈黄褐色, 稍湿一湿, 可塑, 韧性低, 干强度中等, 切面粗糙, 土质不均, 以黏粉粒及碎石为主, 碎石含量约占 10%~20%, 一般粒径 5~20 cm。

(3)凝灰熔岩残积黏性土: 钻孔揭示层厚 2.50~7.50 m, 顶板坡度小于 24°。呈红褐色, 可塑, 原岩结构不清, 成分以黏粉粒为主, 干强度中等, 韧性中等, 母岩为凝灰熔岩。

(4)全风化凝灰熔岩: 钻孔揭示层厚 1.10~10.50 m, 黄褐色, 原岩结构大部分破坏, 散体状, 岩芯呈砂土状, 手捏易散, 遇水软化。

(5)砂土状强风化凝灰熔岩: 钻孔揭示层厚 1.10~3.60 m。灰黄色, 原岩结构清晰, 散体状, 岩芯呈砂土状, 手捏易散, 遇水软化。

(6)碎裂状强风化凝灰熔岩: 揭示层厚 0.50~8.30 m, 灰褐色, 碎裂状结构, 岩体风化裂隙发育, 较破碎, 岩芯呈碎块-块状。

(7)中等风化凝灰熔岩: 分布广泛, 各孔均有揭示, 均未揭穿, 层厚大于 5.0 m。青灰色, 块状构造, 岩体风化裂隙较不发育, 岩体上部较破碎, 下部较完整, 岩芯呈短柱-柱状。

滑坡典型工程地质剖面图见图 3, 主要岩土层物理力学指标见表 1。

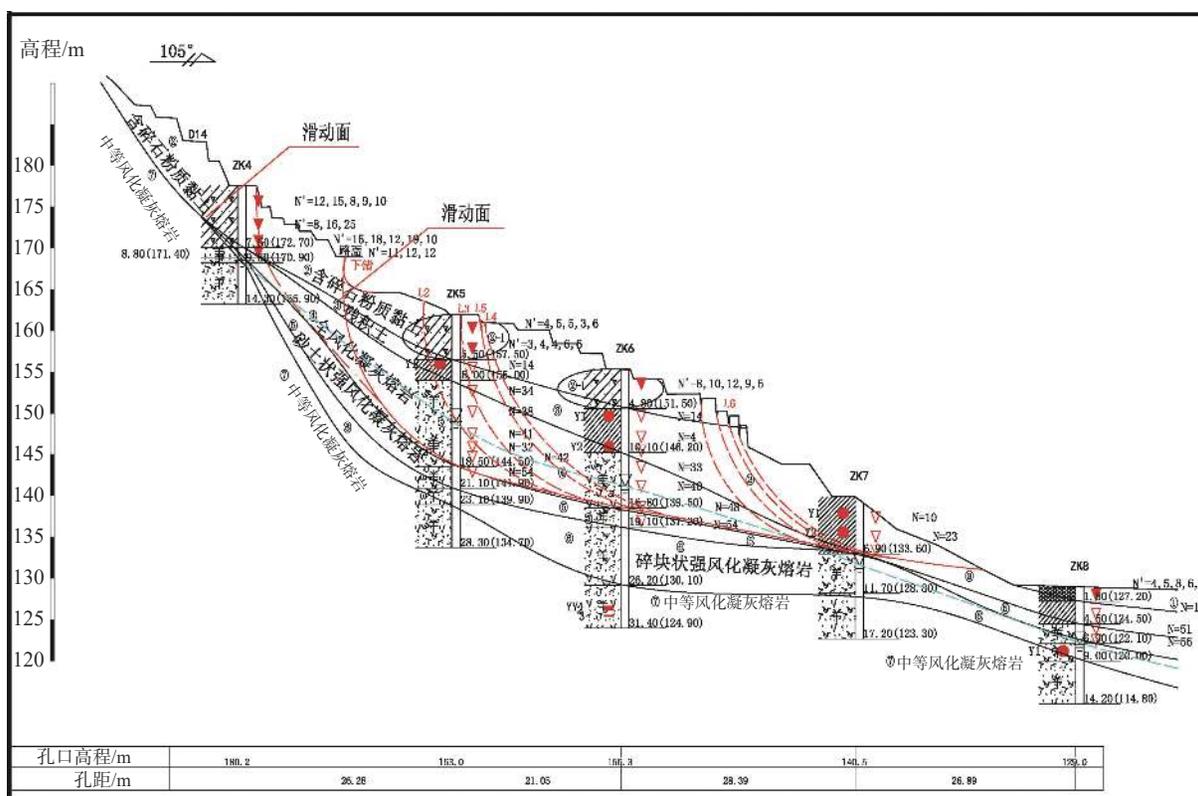


图 3 滑坡典型工程地质剖面图

表 1 岩土体物理力学指标参数表

岩土层名称	重度 γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ (°)
含碎石黏性土②	17.8	15	17
碎块石②-1	18.9	0	30
凝灰熔岩残积土③	18.6	13.7(天然)	24.37(天然)
		11.35(饱和)	20.52(饱和)
		10.21(残余)	13.11(残余)
全风化凝灰熔岩	19.0	30	28

经勘察判断, 该滑坡属沿基覆界面滑动型滑坡, 滑带土为凝灰熔岩残积土③。

1.2.2 水文地质条件

滑坡区地表水发育于东北侧沟谷, 沟谷走向由北向南, 坡降约 19%~30%, 常年流水, 调查期间流量约 80 m^3/d , 上游汇水面积约 0.2 km^2 。

区内地下水按赋存介质的类型可分为第四系松散岩类孔隙水和块状岩类裂隙水两类。第四系松散岩类孔隙水含水层主要为含碎石粉质黏土以及残积土地层, 地下水属于潜水型孔隙水, 地层富水性贫乏, 补给来源主要为大气降水, 区内地形坡度大, 排泄条件良好, 径流方向自西面山体高处往东面坡脚, 循环途径短, 为浅循环地下水。块状岩类裂隙水的含水地

层为凝灰熔岩带。因地势高差较大,排泄条件良好。这类地下水含水层的透水性和富水性由于节理裂隙、孔隙发育差异,导致富水性不均匀,具有明显区段性,总体上富水性贫乏。其补给来源于大气降水,径流方向自西往东,排泄由西往东低洼处排泄,径流、循环途径短。

滑坡区地下水稳定水位埋深为 2.7~15.6 m,高程 120.5~171.2 m,由于雨季降雨和暴雨对边坡的稳定性影响较大,验算需考虑雨季和暴雨地下水位对边坡的影响。

2 滑坡成因及模式分析

2.1 滑坡内因

导致该斜坡滑坡的内因有如下几个因素。

(1)地形地貌因素:滑坡区地形坡度达 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$,滑坡后缘外西侧斜坡地形平均坡度达 39° ,前缘由于人类工程活动开挖形成坡度达 60° 的人工边坡,整改地形呈下陡中缓上陡走势,陡峻地形为滑坡形成创造了条件。

(2)地质构造因素:在本滑坡的被东侧发育有一断层,该断层导致北面与本区岩性出现变化,北面为花岗岩,本区为凝灰熔岩,同时构造导致处于其两侧的山体岩体破碎,风化强烈。

(3)岩土层物质组成因素:滑坡体地层主要为含碎石粉质黏土、碎块石、残坡积层及全风化凝灰熔岩地层,地层复杂,岩土体结构松散,透水性强,黏聚力小,力学性能差,抗剪强度低,稳定性差。岩土层概貌见图 4。



图 4 滑坡后缘

2.2 滑坡外因

滑坡外因主要为人类工程活动和强降雨。

(1)人类工程活动因素:滑坡区为附近村民水果种植用地,村民耕作对坡体土层的造成扰动,对农作物的灌溉导致地表水不间断入渗,使坡体岩土体长期处于侵蚀状态;坡脚寺庙扩建对坡体的不合理开挖,形成高陡临空面,坡度约 $60^{\circ} \sim 65^{\circ}$,且没有采取有效

的支护措施,破坏了自然斜坡结构和力学平衡,上部土体在自重作用下沿软弱结构面产生应力松弛,引发滑坡。滑坡前缘概貌见图 5。

(2)强降雨因素:降雨是影响及诱发滑坡的主要因素。降雨形成的地表水沿斜坡入渗,形成静水压力和动水压力,使得裂缝张开、下错。地表水入渗使得地下水位抬升,从而引起土体强度衰减而造成斜坡失稳。强降雨的主要影响表现在:①在坡体内部产生了较高的孔隙水压力和动水压力,增加了斜坡的下滑力;②在坡体内部产生了地下水浮力,降低了坡体的抗滑阻力;③凝灰熔岩风化产物由于岩土体透水性差异,地表水下渗至不同岩土界面处易于富集,在不同土层交界面处出现饱和滞水区之后,土体孔隙水压力陡增导致土体抗剪强度骤降,进而引发边坡安全系数的变化^[17]。地表水入渗引起凝灰熔岩全风化地层和残积土地层之间形成夹层饱水带,饱水带土体软化形成抗剪强度较低的软弱分界夹层,为滑坡提供了物质及力学条件。



图 5 滑坡前缘

2.3 滑坡潜在活动模式

坡脚工程开挖导致滑坡前缘临空,为坡体滑动提供空间条件;受种植开垦影响坡体中上部多呈台坎状,为降雨入渗创造了有利条件;降雨入渗引起凝灰熔岩全风化地层和残积土地层之间形成夹层饱水带,饱水带土体软化形成抗剪强度较低的软弱分界夹层,为滑坡提供了物质及力学条件。在前述诸条件联动作用下引发滑坡。具体分析如下。

(1)滑坡前缘变形:滑坡前缘岩土体为含碎石粉质黏土、碎块石、残积土层及全风化凝灰熔岩,由于人类工程活动导致前缘形成坡高 5~30 m、坡度 $60^{\circ} \sim 65^{\circ}$ 的人工边坡,边坡在强降雨作用下出现滑塌,当前缘土体出现滑塌后,处于其后的坡顶岩土体因受到前部土体牵引而出现开裂。

(2)滑坡体内部变形:在前缘滑塌不断发展之际,滑体内部岩土体的应力分布也出现变化,随着地表水

的入渗, 滑坡体岩土进一步吸水, 黏聚力随之下降, 导致滑体地面出现开裂、下错, 进一步牵引后方岩土体变形, 使滑坡范围进一步扩大。

(3) 滑坡体与滑床界面处滑动: 随着滑体内部的变形, 在滑坡体与滑床之间由于不同地层渗透性不同, 在滑坡体与滑床界面形成饱和滞水区, 处于滞水区的不同岩土体因下滑力的不断变化进而出现错动, 最终演变为滑坡。

3 稳定性分析

根据《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013), 本工程宜采用圆弧法进行稳定性分析, 稳定性计算公式如下:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{m_{\theta i}} [c_i l_i \cos \theta_i + (G_i + G_{bi} - U_i \cos \theta_i) \tan \varphi_i]}{\sum_{i=1}^n [(G_i + G_{bi}) \sin \theta_i + Q_i \cos \theta_i]} \quad (1)$$

$$m_{\theta i} = \cos \theta_i + \frac{\tan \varphi_i \sin \theta_i}{F_s} \quad (2)$$

$$U_i = \frac{1}{2} \gamma_w (h_{wi} + h_{w,i-1}) l_i \quad (3)$$

式中: F_s 为边坡稳定性系数; U_i 为第 i 计算条块滑面单位宽度总水压力, kN/m; $m_{\theta i}$ 为迭代计算中间结果, 其他参数含义参见《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)附录 A, 其值参照勘查数据选用。

经计算, 各剖面稳定性系数见表 2。

表 2 稳定性计算结果

剖面	工况	稳定系数 F_s	安全系数	稳定状态
1-1'	一般	1.086	1.30	基本稳定
	暴雨	1.012	1.15	欠稳定
2-2'	一般	1.066	1.30	基本稳定
	暴雨	0.976	1.15	不稳定
3-3'	一般	1.076	1.30	基本稳定
	暴雨	0.989	1.15	不稳定
4-4'	一般	1.066	1.30	基本稳定
	暴雨	1.027	1.15	欠稳定
5-5'	一般	1.075	1.30	基本稳定
	暴雨	1.028	1.15	欠稳定

考虑到本滑坡地质条件复杂, 为验证上述稳定性分析结果的可靠性, 同时采用有限元数值模拟软件对滑坡各剖面进行建模分析, 其中典型剖面有限元模型见图 6, 其稳定性分析结果见图 7。

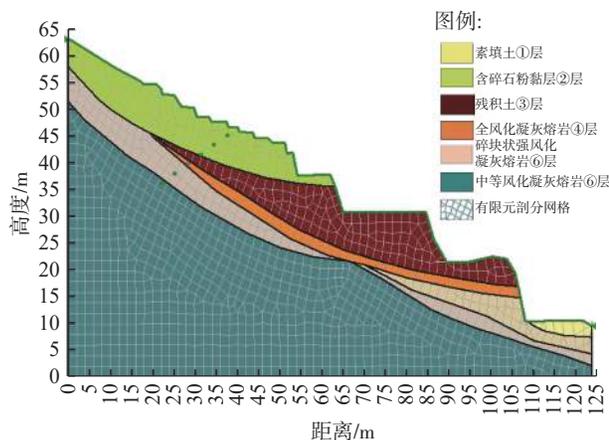


图 6 1-1'剖面有限元模型图

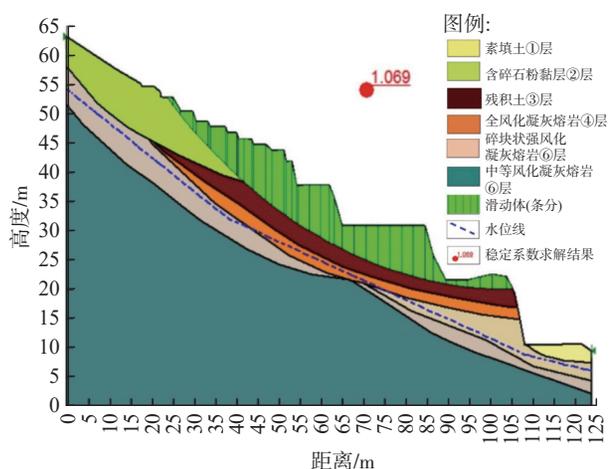


图 7 1-1'剖面稳定性模拟计算结果(一般工况)

对比规范圆弧法和有限元数值模拟计算结果, 两种方法的稳定性分析结果较为接近, 且与现场实际较为吻合。

4 滑坡治理及效果

4.1 治理方法

根据滑坡潜在破坏模式及特征, 对该滑坡采用削坡卸载、锚杆框架梁、植被防护、抗滑桩、坡脚挡墙及设置截排水沟等综合治理措施。斜坡上部、中部采用安全坡率进行放坡处理, 并采用锚杆框架梁结合设置仰斜式排水孔进行支护, 同时在边坡后缘布置截排水沟, 完善排水系统; 斜坡下部设置抗滑桩、抗滑挡墙进行支护, 墙面设置仰斜式排水孔结合地表排水沟, 完善排水系统。边坡治理立面图如图 8 所示, 典型治理支护剖面见图 9、图 10。

4.2 治理效果

截至目前, 该滑坡治理工程已完成了削坡卸载、抗滑桩和截排水沟等主要分项工程, 剩余分项工程正在进行中。主要治理措施完成后, 该滑坡经历了数次强降雨考验, 根据滑坡监测数据, 各项变形指标趋于

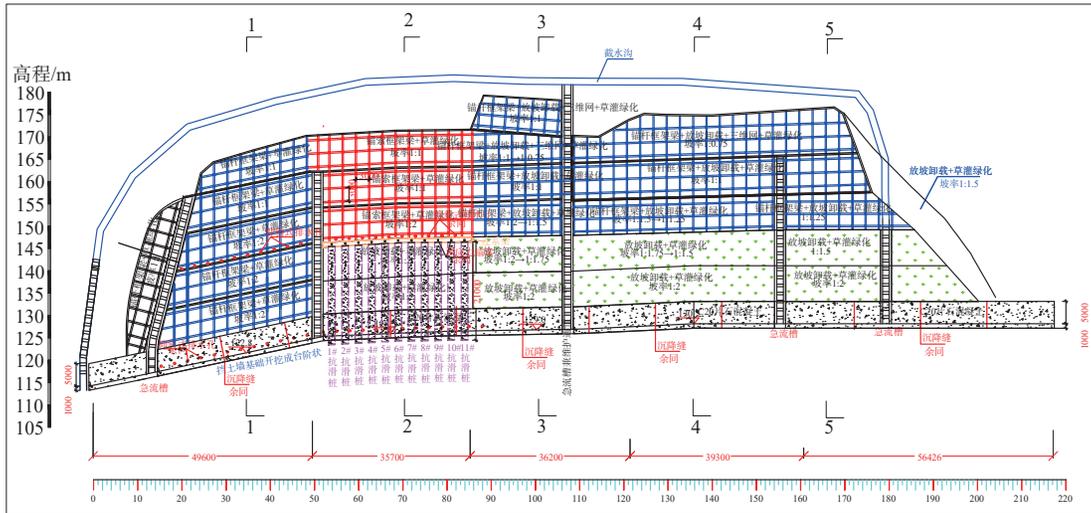


图8 边坡综合治理立面图

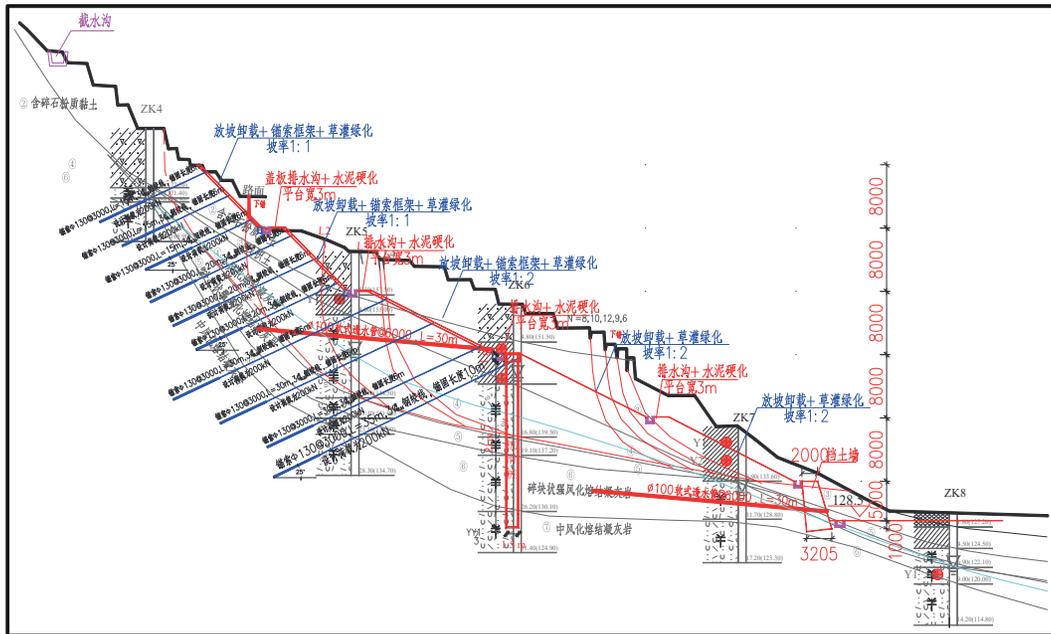


图9 1-1'支护剖面图(单位:mm)

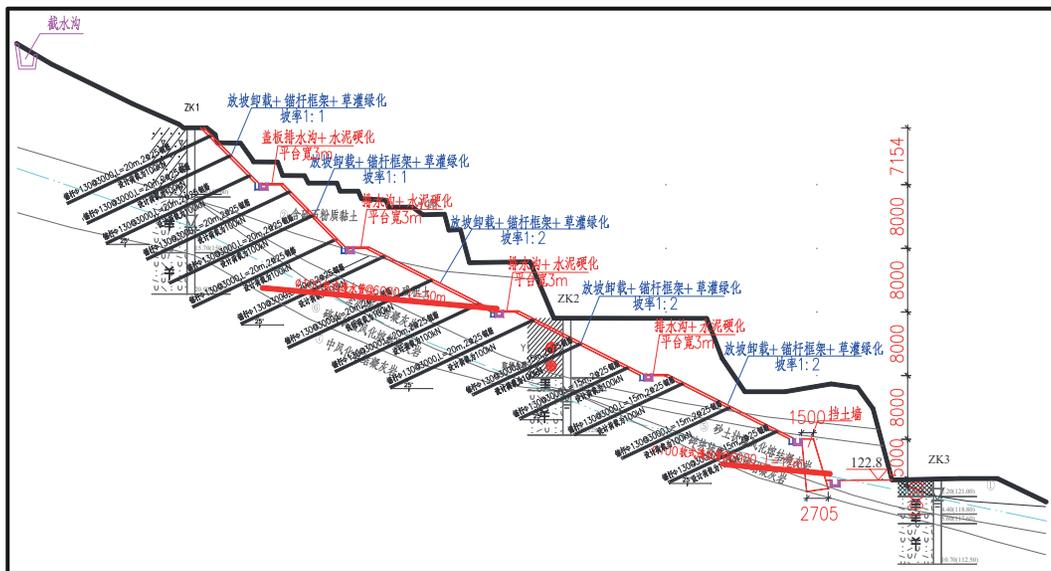


图10 2-2'支护剖面图(单位:mm)

稳定,地质灾害险情已基本解除。滑坡地表沉降监测数据见图 11,滑坡坡体深部位移监测数据见图 12。

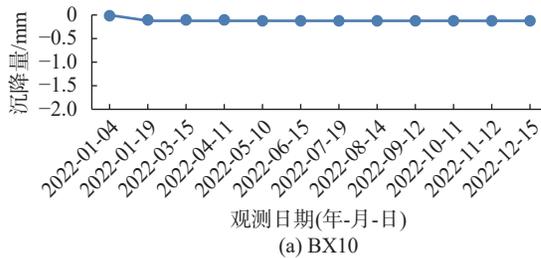
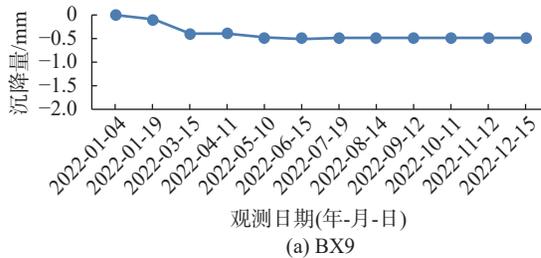


图 11 滑坡地表沉降曲线

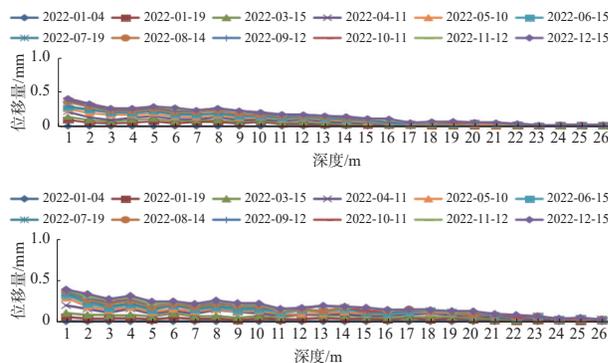


图 12 滑坡深部位移曲线

5 结论

(1) 宁德白莲寺后山滑坡属中型牵引式土质滑坡。坡脚工程开挖为坡体滑动提供空间条件,坡体中上部台坎耕种区为降雨入渗创造了有利条件,降雨入渗引起凝灰熔岩全风化地层和残积土地层之间形成夹层饱水带,饱水带土体软化形成抗剪强度较低的软弱分界夹层,为滑坡提供了物质及力学条件。在上述诸条件联动作用下引发滑坡。

(2) 规范圆弧法和有限元法分析结果表明,一般工况下滑坡处于基本稳定状态,暴雨工况下滑坡处于不稳定—欠稳定状态,分析结论与实际情况相符。

(3) 滑坡治理采取坡顶及坡面削坡卸载、斜坡上部锚杆框架梁支护、下部设置抗滑桩与抗滑挡墙以及截排水沟的综合加固措施。主要治理措施完成后,该滑坡经历了暴雨工况考验,现场调查及滑坡监测数据表明,滑坡变形较小且趋于稳定,治理效果显著。

参 考 文 献

- [1] 乔 兰,姜 波,庞林祥,等. 降雨入渗对板岩边坡稳定的影响及加固措施研究 [J]. 岩土力学, 2015, 36(S2): 545-550.
- [2] 唐荣昌,钱 洪. 活断层的地质研究及其在工程安全性评价的意义 [J]. 四川地震, 1994(1): 69-70.
- [3] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. Ottawa: John Wiley & Sons, 1993.
- [4] 肖 超,金福喜,刘海鸿,等. 开挖与降雨作用下边坡失稳机理及模拟分析 [J]. 工程地质学报, 2012, 20(1): 37-43.
- [5] 刘震涛,尚彦军,邵 鹏,等. 降雨与开挖联合作用下边坡位移矢量及速率变化分析—以韩江高陂水利枢纽右岸尾水渠边坡为例 [J]. 工程地质学报, 2020, 28(1): 122-131.
- [6] 蒋 涛,崔圣华,冉 耀. 开挖和降雨耦合诱发滑坡机理分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(3): 20-29.
- [7] MEIN R G, LARSON C L. Modeling infiltration during a steady rain[J]. *Water Resources Research*, 1973, 9(2): 384-394.
- [8] BODMAN G B, COLEMAN E A. Moisture and energy condition during downward entry of water into soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 8(2): 166-182.
- [9] ANDARA S, FERRARI A, LALLOUI L. Modeling landslides in unsaturated slopes subjected to rainfall infiltration using material point method[J]. *International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, 2016, 40(9): 1358-1380.
- [10] DAI F C, LEE C F, NGAI Y Y. Landslide risk assessment and management—an overview[J]. *Engineering Geology*, 2002, 64(1): 65-87.
- [11] 王述红,何 坚,杨天娇. 考虑降雨入渗的边坡稳定性数值分析 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(8): 1196-1200.
- [12] 马世国,韩同春,徐日庆,等. 强降雨条件下含倾斜基岩层的边坡稳定分析 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(7): 2673-2678.
- [13] 连继峰,罗 强,蒋良淮,等. 顺坡渗流条件下土质边坡浅层稳定分析 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37(8): 1440-1448.
- [14] 胡立雄,白会人. 降雨入渗的边坡稳定评价方法 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007(2): 235-237.
- [15] 裴向军,袁 广,张晓超,等. 坡脚开挖诱发滑坡机理—以沙井驿滑坡为例 [J]. 山地学报, 2017, 35(2): 195-202.
- [16] 晏鄂川,唐辉明. 工程岩体稳定性评价与利用 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2002.
- [17] 孙子涵,王述红,杨天娇,等. 降雨条件下多层土坡入渗机理与稳定性分析 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(8): 1201-1208.