

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.02.05

三峡库区典型顺斜向岩质滑坡变形破坏特征及失稳机制分析

蒋先念¹, 张晨阳²

(1. 重庆市地勘局 208 水文地质工程地质队, 重庆 400700;

2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:近年来,三峡库区城集镇开发区顺斜向岩质滑坡失稳破坏现象时有发生,研究顺斜向岩质滑坡的变形破坏特征及失稳机制对防治此类滑坡具有重要意义。本文以巫山县白杨湾滑坡为例,通过现场踏勘、钻探和多种监测手段,对这一典型顺斜向岩质滑坡的变形破坏特征及失稳机制进行了深入研究。此滑坡所处地层为巴东组第二段泥岩,岩体破碎,地下水较丰富。滑坡岩层向右边界倾斜,右边界受断层控制,断层面与岩层面相交切割形成楔形体顺斜向滑移。滑坡体积约 $320 \times 10^4 \text{ m}^3$,滑动方向与岩层倾向夹角 60° 。受坡脚开挖和坡体建筑荷载等人类工程活动的影响,滑坡于 2019 年 7 月开始出现显著变形,滑坡中部的位移速率达到 $2 \sim 5 \text{ mm/d}$ 。2019 年 9 月中旬,滑坡前部设置应急抗滑桩后,滑坡变形开始减缓至 $0 \sim 0.5 \text{ mm/d}$ 。白杨湾滑坡对城集镇开发区金科城造成巨大威胁,建议采取“搬迁避让+工程治理+专业监测”的防治对策。本文的研究成果对指导三峡库区顺斜向岩质滑坡防治和人工开挖诱发滑坡的防治具有重要借鉴意义。

关键词:顺斜向坡;变形破坏特征;失稳机制;岩质滑坡

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)02-0036-07

Deformation characteristics and failure mechanism of large-scale obliquely dip rock landslide in the Three Gorges Reservoir Region

JIANG Xiannian¹, ZHANG Chenyang²

(1. Hydrogeology and Engineering Geology Team 208 of Chongqing Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Chongqing 400700, China; 2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: In recent years, the tangential rock landslides occurred frequently in the urban area of the Three Gorges Reservoir region. Therefore, it is of great significance to study the deformation and failure characteristics and failure mechanism for the prevention and control of the tangential rock landslides. In this paper, taking the Baiyangwan landslide in Wushan Town as a case study, the deformation characteristics and failure mechanism are studied in detail, by field investigation, drilling works and in-situ comprehensive monitoring system. The stratum of the landslide is mudstone in the second member of the Badong Formation, with abundant groundwater and broken rock mass. The rock layer incline to the right boundary, which is cut by a fault, and the multi-layered weak interlayer forms a multi-stage slip zone. Therefore, wedge-shaped sliding surface was easily developed. The volume of the landslide is about $320 \times 10^4 \text{ m}^3$, and the angle between the sliding direction and the rock formation attitude is 60° . Affected by human engineering activities, such as slope excavation and construction loading, the significant deformation began in July 2019, and the displacement velocities in the middle part reached to $2 \sim 5 \text{ mm/day}$. In September 2019, the emergency anti-slide pile project was set at the toe part of the landslide, after that the deformation velocities of the

收稿日期: 2020-05-06; 修订日期: 2020-06-07

第一作者: 蒋先念(1979-), 男, 贵州普安人, 水工环地质专业, 硕士, 正高级工程师, 主要从事地质灾害防治研究。E-mail: 317595476@qq.com

通讯作者: 张晨阳(1993-), 男, 安徽六安人, 工程地质专业, 博士, 主要从事地质灾害防治研究。E-mail: 20121002304@cug.edu.cn

landslide slow down to 0 ~ 0.5 mm/day. The Baiyangwan landslide seriously threaten to the Jinke community, and the prevention and control measures of "relocation avoidance + project management + professional monitoring" were recommended to adopt to the landslide. The research results of this paper are of great significance for guiding the prevention of tangential rock landslides in the Three Gorges reservoir area and landslides induced by excavation.

Keywords: obliquely dip slope; deformation and failure characteristics; instability mechanism; rock landslide

0 引言

重庆市位于我国内陆西南地区,长江三峡库区腹地,为低山丘陵区,地质灾害频发。全市分布各类地质灾害隐患 16 076 处,多为土质滑坡,岩质滑坡分布较少。且多以顺层岩质滑坡为主,而与顺斜向岩质滑坡的相关研究实例更少。

对于岩质层状边坡,当岩层倾向与斜坡倾向夹角小于 20° 时,坡体表现为顺层下滑,其变形破坏往往简单地受层面控制,大量的研究对该类滑坡的变形破坏特征^[1-4]、失稳机制^[5-11]、防治措施^[12-14]进行了深入研究。当岩层倾向与斜坡倾向夹角超过 20° 时,情况将复杂得多,不宜用平面分析方法分析^[15-16]。

在国内,张倬元等^[17]在 1981 年便对顺斜向岩质边坡进行了深入研究,结果表明顺斜向岩质滑坡的坡体往往表现为旋转滑移—拉裂变形,滑移从临空面附近发动,逐步向上扩展并使坡体解体。孙红月等^[18]进一步深入研究了顺斜向坡的变形破坏方式,其主要受斜交角度大小的影响,产生旋转变形破坏或者整体性下滑形成楔形体滑坡。程谦恭等^[19]研究表明顺斜向层状岩质斜坡在特殊的边界条件控制下,发生渐进性变形而形成的平面旋转滑坡。

综上所述可知,顺斜向岩质滑坡的变形破坏特征和失稳机制往往较为特殊,且国内鲜有大型顺斜向岩质滑坡的研究成果。重庆市巫山县白杨湾滑坡^[20]地处巫山县城新区,直接危及前部金科城小区多栋 30 层建筑的安全。鉴于此,本文以白杨湾滑坡为例,通过现场探勘、钻探和多种监测手段,研究该滑坡变形破坏特征及失稳机制,并提出了相应的防治对策。研究成果对指导三峡库区顺斜向岩质滑坡防治具有重要意义^[21-24]。

1 地质背景

1.1 滑坡概况

白杨湾滑坡位于巫山县城北部,研究区属亚热带季风气候,年平均降雨量为 1 049.3 mm,降雨主要分布在 5—10 月。研究区主要出露第四系全新统残坡积层 (Q_4^{el+dl})、滑坡堆积层 (Q_4^{del})、三叠系巴东组第二段

(T_2b^2)紫红色泥岩和砂岩。构造部位处于大巴山弧、川东褶皱带及川鄂湘黔隆起褶皱带结合部,巫山向斜北西翼,岩层产状约为 $155^\circ \sim 165^\circ \angle 24^\circ \sim 40^\circ$ 。

白杨湾滑坡纵长 350 ~ 400 m,横宽 180 ~ 230 m,厚度 20.70 ~ 69.00 m,面积 $7.30 \times 10^4 \text{ m}^2$,体积约 $320 \times 10^4 \text{ m}^3$ (图 1)。根据监测矢量位移方向,滑坡主滑方向 95° 。滑坡右侧边界发育一条正断层,断层延伸长约 4 km,走向 $85^\circ \sim 90^\circ$,倾向北—北西向,倾角 $35^\circ \sim 50^\circ$,断层带宽 8 ~ 12 m。研究区地势西高东低,高程 530 ~ 630 m,坡角平均约 28° 。滑坡区后缘主要为耕地,地势平坦;中部西坪村分布着大量住宅建筑和国道 G348;滑坡坡脚为多级人工开挖边坡,前缘延伸至金科城小区。研究区附近分布 3 条冲沟,分别为滑坡北侧边界,西北侧以及南侧边界,三条冲沟近年来均已回填。

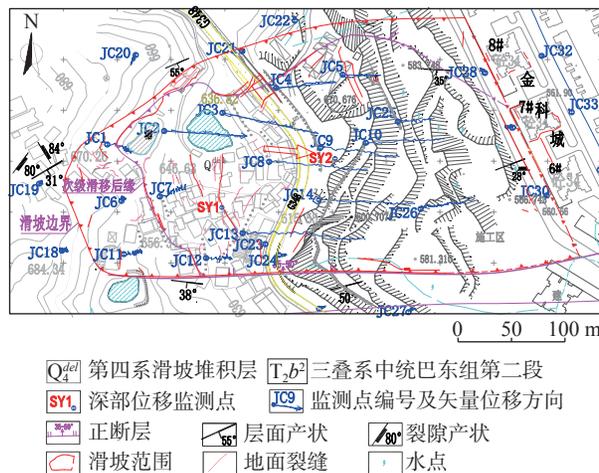


图 1 白杨湾滑坡平面及监测点分布图

Fig. 1 Plane and monitoring distribution map of Baiyangwan landslide

1.2 滑坡物质组成

滑体主要由第四系人工填土 (Q_4^m) 和第四系坡积层 (Q_4^{del}) 组成,厚度约 20.7 ~ 59.0 m。滑体材料在垂向上的异质性很强,上部为含砾粉质黏土,下部为风化的层状泥岩和砂岩 (图 2)。

白杨湾滑坡有两级滑带。第一级滑带位于滑体泥岩破碎岩体内,滑带土由粉质黏土组成,埋深 18.25 ~ 26.20 m,可见明显的镜面和擦痕 (图 3),滑带厚度 0.20 ~

0.50 m, 经 XRD 测试可知, SiO_2 含量 50% ~ 60%, Al_2O_3 含量 18% ~ 19%, Fe_2O_3 含量 6.5% ~ 7.5%, MgO 含量 3.5% ~ 5.5%, K_2O 含量 2.5% ~ 4%, $\text{Si} : \text{Al} : \text{Fe} : \text{Mg} : \text{K}$ 为 10 : 6 : 2 : 1 : 1, Si 占绝对优势, 其矿物组成主要是石英、伊利石、铁、绿泥石、蒙脱石。第二级滑带主要位于破碎岩体 Q_4^{del} 与 T_2b^2 基岩接触面, 埋深 36.60 ~ 56.00 m, 滑带物质为紫红色黏土, 滑带厚度约 0.50 m, 钻探揭示滑带擦痕、镜面清晰可见(图 4)。

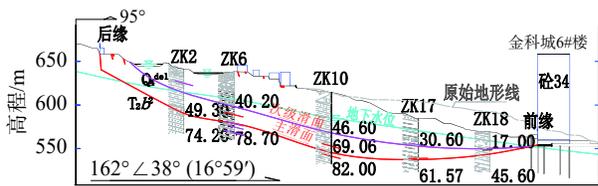


图 2 白杨湾滑坡典型剖面图
Fig. 2 Typical profile of Baiyangwan landslide



图 3 开挖区裸露的第一级滑面
Fig. 3 First order slip zone exposed in excavated area



(a) 钻孔揭露层滑带, 为紫红色泥岩黏土
(b) 钻孔揭露层滑带, 为灰黄色泥化夹层

图 4 钻孔揭示滑带
Fig. 4 Drilling to reveal sliding zone

滑床主要为 T_2b^2 砂岩, 产状为 $150^\circ \angle 22^\circ$ 。 T_2b^2 砂岩呈紫红色, 呈破碎状, 其内部存在多个泥质软弱夹层。

1.3 水文地质条件

研究区地表水丰富, 滑坡区分布三处池塘。据当地村民所述, 滑坡右边界冲沟内曾为一条溪流, 由于人工填土掩埋, 已经消失。研究区地下水可分为松散岩类孔隙水和基岩裂隙水。现场调查可知, 滑坡前缘开挖区出

露 7 处泉点, 流量介于 0.01 ~ 0.05 L/s 之间。滑坡右侧、后部泥岩地层分别出露 1 处泉点, 流量 0.01 ~ 0.02 L/s。钻孔抽水试验显示, 地下水流量 $57.70 \text{ m}^3/\text{d}$ 。研究区地下水不受三峡库水位的影响。

2 滑坡变形破坏特征

2.1 宏观变形破坏特征

滑坡的变形始于 2019 年 7 月 17 日, 现场调查揭示了宏观变形迹象主要为以下三种: 地面裂缝、建筑变形破坏、道路变形。

地面裂缝主要包括前缘鼓张裂缝, 后部拉张裂缝和中部侧缘的剪切裂缝。前缘鼓张裂缝主要分布在坡脚金科路地面上, 隆起高度约 5 cm(图 5 中 C06)。拉张裂缝主要分布在滑坡后部, 局部宽度最大可达 20 ~ 50 cm(图 5 中 C04、C05)。剪切裂缝分布在滑坡中部左右两侧边界处(图 5 中 C07、C08), 长度可达 20 ~ 100 m, 裂缝宽度最大约 20 cm。



图 5 滑坡宏观变形破坏迹象
Fig. 5 Signs of macroscopic deformation and failure of landslide

滑坡体中部位置西坪村的建筑物变形十分严重, 变形迹象包括墙体裂缝、立柱倾斜等(图 5 中 C03、C09)。滑坡中部的国道 G348 路面在滑坡北侧边界处出现显著地面拉裂, 拉裂缝宽 1 ~ 6 cm, 裂缝沿滑坡边界上、下贯通, 局部路面沉降 10 ~ 30 cm(图 5 中 C01、C02)。

2.2 滑坡变形时空特征

为研判滑坡变形规律, 在地表布置了长期位移监测点。监测结果表明, 滑坡前缘金科城及滑坡后部监测点

位移量较小,边界附近监测点变形不明显(图1)。滑坡中部变形量大,7月到12月的累积位移最大达200 mm(图6),各监测点变形方向均为95°左右。可将滑坡位移方向分解为岩层倾向和坡向的矢量,矢量大小可大致反映层面、坡向对滑移的贡献大小。由图7可知,滑坡滑移趋势受层面和坡向的共同作用,岩层倾向与滑坡方

向交角约60°,坡向与滑坡方向相交约20°。坡向矢量较大,说明坡向对滑移方向起主要控制作用;岩层倾向方向矢量较小,说明层面对滑移方向的控制作用较小。另一方面,矢量大小可反映岩层倾向方向遭受的拦阻约束作用的大小,岩层倾向方向矢量较小,说明倾向方向遭受边界拦阻约束作用较大。

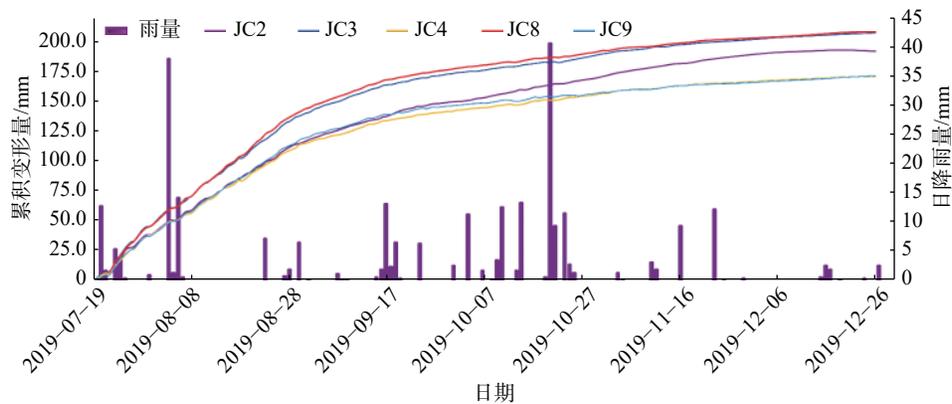


图6 滑坡中部地表位移监测曲线

Fig. 6 Monitoring curve of surface displacement in the middle of landslide

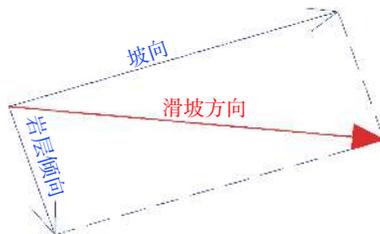


图7 滑坡方向与岩层倾向、坡向关系图

Fig. 7 Relationship between landslide direction and rock stratum tendency and slope direction

地表位移监测曲线显示(图6),2019年7月以来,滑坡位移持续增大,2019年8月28日前,滑坡呈匀速变形状态,日水平位移量2~5 mm/d。2019年8月18日,滑坡前部开始设置应急处置抗滑桩,9月23日,抗滑桩施工完毕,累计完成抗滑桩35根,桩长35 m,桩间距5 m。抗滑桩的不断成桩,使得2019年8月25日至2019年9月25日滑坡变形速率日渐减弱。2019年9月25日后,滑坡呈缓慢匀速变形状态。变形速率发生变化的时段处于应急抗滑桩开始发挥作用的时段。应急抗滑桩发挥作用后,滑坡变形速率减缓,直至发生缓慢匀速变形,变形速率0~0.5 mm/d。可见应急抗滑桩对控制滑坡变形发挥了作用,但滑坡仍处于缓慢匀速变形状态,滑坡尚未得到彻底根治。

2.3 深部位移监测

在滑坡的钻孔中安装了深部测斜装置,图8为滑坡中部SY01和SY02深部位移曲线,SY01和SY02的平

面位置见图1。

SY01位移曲线表现为底部小,向上位移逐渐增大,第一个滑动面位于25~26 m,第二个滑动面位于46~47 m之间。SY02深部位移监测曲线也揭露了两处明显的滑动面,第一个滑移面深度为25~26 m,第二个滑移面深度为55~57 m。深部位移监测结果与钻孔岩芯揭示的两层滑动面相符。

3 滑坡影响因素及失稳机制

3.1 滑坡影响因素

(1) 内因

岩性:滑坡地层主要为三叠系中统巴东组第二段(T_2b^2)泥岩地层,泥岩地层岩体破碎,地下水较丰富,夹多层泥化软弱夹层、角砾状泥岩,具有易滑特性。

构造:从构造上来看,滑坡区岩层呈单斜构造,右侧边界发育正断层,断层面与岩层面相交切割形成楔形体,形成顺斜向滑移的空间组合边界。其中,断层面控制滑坡右侧边界,岩层面控制滑带和左侧边界,滑坡后缘受构造裂隙控制,滑坡为受层面、断层面主控的顺斜向滑移破坏,具备顺斜向楔形体滑移破坏条件。

(2) 外因

降雨和地下水:研究区地下水赋存于碎裂状泥岩、砂岩地层中,地下水较丰富,地下水流量约57.70 m³/d。水位监测曲线(图9)显示,地下水位稳定,受降雨影响

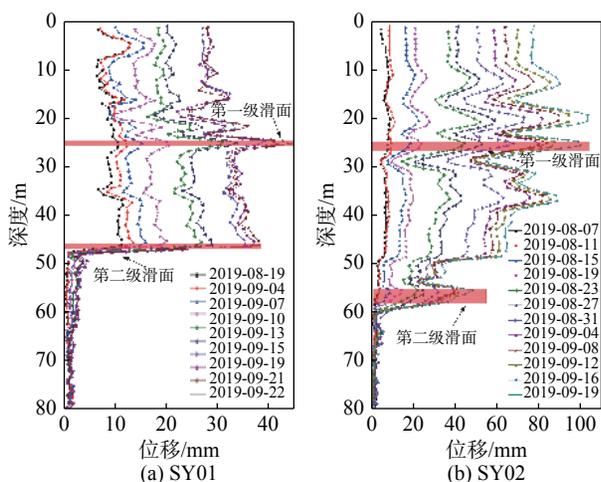


图 8 深部位移监测曲线

Fig. 8 Deep displacement monitoring curve

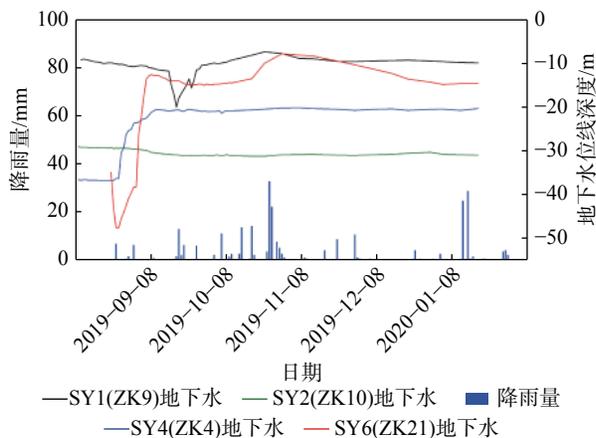


图 9 研究区降雨和地下水位曲线

Fig. 9 Curve of rainfall and groundwater level curve in the study area

不大。一方面, 饱水状态的泥化夹层或软弱岩体抗剪强度较低。另一方面, 地下水运移使斜坡岩土体遭受动水压力、扬压力作用, 下滑力增大, 抗滑力降低, 不利于斜坡稳定。该滑坡所处地形坡角不大, 地下水作用是导致滑坡变形的重要因素。

人类工程活动: 近年来, 在研究区中部和后部的西坪村陆续修建了 40 多栋 3~6 层的房屋, 增大了滑坡的下滑力。最重要的是, 2019 年 4 月至 7 月, 由于滑坡前部金科城小区的扩建, 滑坡前缘开挖了体积约 $30 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的岩土体, 形成多级阶梯式边坡(图 10), 开挖显著降低了滑坡的抗滑力, 直接导致滑坡变形失稳。

3.2 滑坡失稳机制分析

岩层呈单斜构造, 右侧边界发育正断层, 断层面与岩层面相交切割形成楔形体, 交线倾向坡外(图 11), 倾角约 13° , 形成顺斜向滑移的空间组合边界。其中, 断层

面控制滑坡右侧边界, 岩层面控制滑带和左侧边界, 滑坡受层面、断层面控制, 随着滑坡坡脚大规模开挖, 显著降低了滑坡抗滑力, 直接诱发滑坡沿断层面与岩层面相交切割形成的楔形体顺斜向滑移破坏。



图 10 开挖前后白杨湾滑坡航拍图

Fig. 10 Aerial map of Baiyangwan landslide before and after excavation

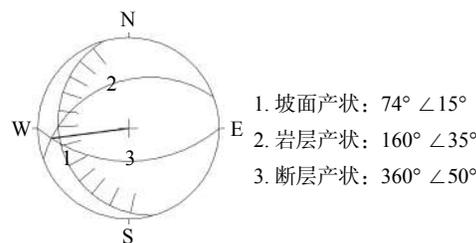


图 11 极射赤平投影图

Fig. 11 Stereographic projection of structural plan

4 防治理念和对策

4.1 防治理念

该滑坡危及滑坡后部居民 136 户 588 人、前缘金科城 6 栋高层建筑及后期建设场地等的安全。针对滑坡变形特点和危害性, 防治方案既要确保居民和金科城已有建筑安全, 又要满足金科城后期建设和城市规划发展需要。

4.2 防治对策

在前期已设应急处置抗滑桩的基础上, 采取“搬迁避让+工程治理+专业监测”的综合防治对策, 以达到彻底根治滑坡的目的。一方面, 对滑坡后部居民 136 户 588 人进行搬迁避让。另一方面, 结合金科城后期建设和城市规划发展需要, 采取“削方减载+排水工程+锚杆格构”进行综合治理, 削方减载后既要不影响金科城后期建设, 又要兼顾土地整治用于后期建设。削方体积约 $150 \times 10^4 \text{ m}^3$, 削方后设置排水系统, 对削方形成的边坡采用锚杆格构进行护坡。第三, 对滑坡进行持续专业

监测,监测周期视后期对滑坡变形趋势会商确定。

5 结论

(1)白杨湾滑坡纵长 350~400 m,横宽 180~230 m,体积约 $320 \times 10^4 \text{ m}^3$,为一大型顺斜向岩质滑坡。滑坡于 2019 年 7 月开始出现显著变形,滑坡中部的位移速率达到 2~5 mm/d。2019 年 9 月中旬,滑坡前部设置应急抗滑桩后,滑坡变形开始减缓至 0~0.5 mm/d。

(2)滑坡区岩层呈单斜构造,右侧边界发育正断层,断层面与岩层面相交切割形成楔形体。受岩层面、断层控制,白杨湾滑坡具备顺斜向楔形体滑移破坏的条件。研究区雨量充沛,滑体渗透性较好,地下水较丰富,地下水运移使斜坡岩土体遭受动水压力、扬压力作用,下滑力增大,抗滑力降低;滑坡中后部民房建设,增加了滑坡的下滑力;而滑坡坡脚大规模开挖,显著降低了抗滑力,直接诱发滑坡失稳。

(3)结合白杨湾威胁对象和城市规划建设,采取“搬迁避让+工程治理+专业监测”的防治对策。一方面,对滑坡后部居民进行搬迁避让。另一方面,采取“削方减载+排水工程+锚杆格构”进行综合治理,综合治理工程既不影响金科城后期建设,又要兼顾土地整治用于后期工程建设。第三,对滑坡进行持续专业监测,监测周期视后期对滑坡变形趋势会商确定。

参考文献 (References) :

- [1] 黄润秋,赵建军,巨能攀,等. 汤屯高速公路顺层岩质边坡变形机制分析及治理对策研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(2): 239-246. [HUANG Runqiu, ZHAO Jianjun, JU Nengpan, et al. Study on deformation mechanism and control method of bedding rock slope along Tangtun expressway [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(2): 239-246. (in Chinese with English abstract)]
- [2] YIN Y P, SUN P, ZHANG M, et al. Mechanism on apparent dip sliding of oblique inclined bedding rockslide at Jiweishan, Chongqing, China [J]. *Landslides*, 2011, 8(1): 49-65.
- [3] TANG H, ZOU Z, XIONG C, et al. An evolution model of large consequent bedding rockslides, with particular reference to the Jiweishan rockslide in Southwest China [J]. *Engineering Geology*, 2015, 186: 17-27.
- [4] ZHANG S, ZHU Z, QI S, et al. Deformation process and mechanism analyses for a planar sliding in the Mayanpo massive bedding rock slope at the Xiangjiaba Hydropower Station [J]. *Landslides*, 2018, 15(10): 2061-2073.
- [5] 殷跃平. 长江三峡库区移民迁建新址重大地质灾害及防治研究[M]. 北京:地质出版社, 2004. [YIN Yueping. Study on the major geological hazards and prevention of the new relocation site in the Three Gorges Reservoir area of the Yangtze River[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004. (in Chinese)]
- [6] 邹宗兴,唐辉明,熊承仁,等. 大型顺层岩质滑坡渐进破坏地质力学模型与稳定性分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(11): 2222-2231. [ZOU Zongxing, TANG Huiming, XIONG Chengren, et al. Geomechanical model of progressive failure for large consequent bedding rockslide and its stability analysis [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(11): 2222-2231. (in Chinese with English abstract)]
- [7] SANTANGELO M, MARCHESINI I, CARDINALI M, et al. A method for the assessment of the influence of bedding on landslide abundance and types [J]. *Landslides*, 2015, 12(2): 295-309.
- [8] 邓弟平,杨成. 达州环城路加油站顺层岩质边坡稳定性分析 [J]. *土工基础*, 2019, 33(6): 647-649. [DENG Diping, YANG Cheng. Stability analysis of a syncline bedded rock slope near a gas station [J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2019, 33(6): 647-649. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 余姝,张枝华,黄波林,等. 三峡库区青石-抱龙段顺层灰岩库岸坡变形破坏机理 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(3): 19-23. [YU Shu, ZHANG Zhihua, HUANG Bolin, et al. Deformation mechanism of bedding limestone bank slope from Qingshi to Baolong, the Three Gorges Area [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(3): 19-23. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 蒋正,倪化勇,宋志. 重庆丰都县城区红层边坡变形破坏模式与稳定性评价 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2018, 29(6): 24-32. [JIANG Zheng, NI Huayong, SONG Zhi. Deformation and failure modes and stability assessment of red bed slope in the urban area of Fengdu, Chongqing [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2018, 29(6): 24-32. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 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): 74-81. [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): 74-81. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 冯君,周德培,江南,等. 微型桩体系加固顺层岩质边坡的内力计算模式 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(2): 284-288. [FENG Jun, ZHOU Depei, JIANG Nan, et

- al. A model for calculation of internal force of micropile system to reinforce bedding rock slope [J] . *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(2): 284 – 288. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 陈训龙, 龚文惠, 钟旭晗, 等. 水平和竖向地震作用下顺层岩质边坡动力可靠性分析 [J] . *土木工程学报*, 2017, 50(10): 91 – 98. [CHEN Xunlong, GONG Wenhui, ZHONG Xuhan, et al. Dynamic reliability analysis of bedding rock slopes under horizontal and vertical earthquake actions [J] . *China Civil Engineering Journal*, 2017, 50(10): 91 – 98. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 张孝伟. 顺层岩质边坡隧道破坏模式与防治对策 [J] . *西部探矿工程*, 2019, 31(10): 184 – 186. [ZHANG Xiaowei. Failure modes and preventive measures of tunnel on consequent bedding rock slope [J] . *West-China Exploration Engineering*, 2019, 31(10): 184 – 186. (in Chinese with English abstract)]
- [15] E HOEK, J W BRAY. 岩石边坡工程 [M] . 北京: 冶金工业出版社, 1977. [E HOEK, J W BRAY. *Rock slope Engineering* [M] . Beijing: Metallurgical Industry Press, 1977. (in Chinese)]
- [16] DAI F C, TU X B, XU C, et al. Rock avalanches triggered by oblique-thrusting during the 12 May 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake, China [J] . *Geomorphology*, 2011, 132(3/4): 300 – 318.
- [17] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理 [M] . 北京: 地质出版社, 1981. [ZHANG Zhuoyuan, WANG Shitian, WANG Lansheng. *Principle of engineering geology analysis* [M] . Beijing: Geological Publishing House, 1981. (in Chinese)]
- [18] 孙红月, 尚岳全. 顺斜向坡变形破坏特征研究 [J] . *工程地质学报*, 1999, 7(2): 141 – 146. [SUN Hongyue, SHANG Yuequan. Study on deformation of failure of down dip slopes [J] . *Journal of Engineering Geology*, 1999, 7(2): 141 – 146. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 程谦恭, 张倬元, 黄润秋. 侧翼与滑床复合锁固切向层状岩质滑坡动力学机理与稳定性判据 [J] . *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(11): 1874 – 1882. [CHENG Qiangong, ZHANG Zhouyuan, HUANG Runqiu. Dynamics and stability criterion of oblique layered rocky landslide under lockup with combination of flank and bedding plane [J] . *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(11): 1874 – 1882. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 蒋先念, 王恒, 杨长明, 等. 重庆市巫山县巫峡镇白杨湾滑坡应急抢险勘查报告 [R] . 重庆市二零八勘察设计院, 2019. [JIANG Xiannian, WANG Heng, YANG Changming, et al. Investigation report on emergency rescue of Baiyangwan landslide in Wuxia Town, Wushan County, Chongqing [R] . Chongqing 208 Survey and Design Institute, 2019. (in Chinese)]
- [21] 张茂省. 发挥新型举国体制优势提高地质灾害防治能力 [J] . *西北地质*, 2019, 52(2): I – II. [ZHANG Maosheng. Maximising the advantages of the new national system for improving the ability to prevent and mitigate geological disasters [J] . *Northwestern Geology*, 2019, 52(2): I – II. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 张茂省, 薛强, 贾俊, 等. 山区城镇地质灾害调查与风险评估方法及实践 [J] . *西北地质*, 2019, 52(2): 125 – 135. [ZHANG Maosheng, XUE Qiang, JIA Jun, et al. Methods and practices for the investigation and risk assessment of geohazards in mountainous towns [J] . *Northwestern Geology*, 2019, 52(2): 125 – 135. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 刘畅, 张平松, 杨为民, 等. 税湾地震黄土滑坡的岩土动力特性及其稳定性评价 [J] . *西北地质*, 2020, 53(4): 176 – 185. [LIU Chang, ZHANG Pingsong, YANG Weimin, et al. Geotechnical dynamic characteristics and stability evaluation of loess landslides in Shuiwan Earthquake, Tianshui, Gansu [J] . *Northwestern Geology*, 2020, 53(4): 176 – 185. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 李滨, 张青, 王文沛, 等. 金沙江乌东德水电站坝区高陡边坡地质灾害监测预警研究 [J] . *地质力学学报*, 2020, 26(4): 556 – 564. [LI Bin, ZHANG Qing, WANG Wenpei, et al. Geohazard monitoring and risk management of high-steep slope in the Wudongde dam area [J] . *Journal of Geomechanics*, 2020, 26(4): 556 – 564. (in Chinese with English abstract)]