

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.04-03

中等倾角岩层顺向坡滑坡发育特征及形成机制分析 ——以拖担水库左岸坝肩滑坡为例

王玉川, 郭其峰, 周延国

(黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要: 中等倾角岩层顺向坡, 受坡体结构和岩体物理力学性质控制, 多存在变形、崩塌、滑坡等工程地质问题, 常常会诱发大规模的地质灾害。该类斜坡潜在滑动面不直接出露地表, 一般具有变形机制复杂、隐蔽性强和危害大的特点, 是滑坡领域关注与研究的重点。拖担水库大坝左岸为一古滑坡, 在水库扩建开挖过程中, 诱发古滑坡体复活。在分析古滑坡工程地质条件的基础上, 结合地质勘察和变形监测结果, 研究了其变形特征及形成机制。研究表明: ①左岸古滑坡具有岩层倾角“上陡下缓”、滑体底部存在反倾坡内的剪切破碎带、滑床岩体产生弧状弯曲的特点; ②古滑坡体为一基岩顺层滑坡, 滑动模式为“滑移(弯曲)—剪断”型, 其变形破坏过程包括三个阶段: 弯曲隆起阶段、滑移剪出阶段和扰动变形阶段; ③该类斜坡变形破坏后, 坡体易沿“上陡下缓”的椅型软弱层面发生二次滑动, 滑坡控制关键是对下部变形区的保护。

关键词: 古滑坡; 中等倾角岩层顺向坡; 变形特征; 滑移(弯曲)—剪断; 形成机制

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)04-0017-07

Development characteristics and formation mechanism of the medium-dip bedding slopes: A case study of the landslide on the left bank of Tuodan reservoir dam

WANG Yuchuan, GUO Qifeng, ZHOU Yanguo

(Yellow River Engineering Consulting Co. Ltd., Zhengzhou, Henan 450003, China)

Abstract: Controlled by the slope structure and petrophysic properties, there are many engineering geological problems such as deformation, collapse in the medium-dip bedding slopes, and landslides, which often induce large-scale geological disasters. The potential sliding surface of this slope type does not directly expose on the surface, and it generally has the characteristics of complicated deformation mechanism, high concealment and great harm, which is the focus in the field of landslides research. The left bank of Tuodan reservoir dam is an ancient landslide. During the expansion and excavation of the reservoir, the ancient landslide was revived. Based on the analysis of the engineering geological conditions of the deformation body, combined with the results of geological survey and deformation monitoring, the deformation characteristics and formation mechanism are studied. The research results show that: ①The rock stratum dip has the characteristics of “steep upward and gentle downward” in ancient landslide of left bank. There is a shear fracture zone in the anti-inclined slope at the bottom of the landslide body, and the rock body of the slide bed is arch-bend.; ②The ancient landslide is a bedrock bedding landslide, and its sliding mode is “slip(bending)-shear” type. The deformation and failure process includes three stages, slipping shear-out stage and disturbance deformation stage; ③After the deformation and failure of the slope, it is more likely to slide again along the chair-shaped soft layer. The key to landslide control is to protect the lower deformation area.

收稿日期: 2020-08-21; 修订日期: 2020-12-31

第一作者: 王玉川(1987-), 男, 河南信阳人, 岩土工程专业, 硕士, 工程师, 主要从事水利水电工程地质勘察及相关研究工作。

E-mail: 625049063@qq.com

Keywords: ancient landslide; middle-inclined bedding slope; deformation characteristics; slip (bending)–shear; formation mechanism

0 引言

顺向坡是岩质斜坡中稳定性最差、最易变形破坏的斜坡类型^[1],受控于坡体结构和岩土体力学性质,加之人类活动和地震等外力作用,常常会形成滑坡,给国民经济建设和社会发展造成重大损失^[2-5]。

顺向层状岩体边坡的滑动变形主要分两种类型^[5]。一类是层面倾角小于坡角的顺层滑坡,其滑动面多在坡面出露,形成机制相对简单,通常表现为顺层的蠕滑—拉裂式滑动或平面滑移^[5-7]。另一类是层面倾角大于坡角的“隐伏型”滑面顺层滑坡,这种滑坡多发生在中等倾角地层内,形成机制相对复杂,潜在危害较大。目前对第一类平面滑移型滑坡机理的研究已很成熟^[8],对第二类中等倾角岩层顺向坡滑动失稳特征及形成机制的研究较少。任光明等^[9]利用物理模拟方法研究了中等倾角岩层顺向坡滑坡的形成机制,并通过能量平衡法,导出了该类斜坡发生溃屈破坏的临界坡长、隆起端位置等力学模型;陈全明等^[10]、朱晗迺等^[11]、李云鹏等^[12]将中等倾角岩层顺向坡破坏概化为板梁弯曲失稳问题,给出其稳定性位移判据;黄润秋^[5]、余姝等^[13]通过对中等倾角岩层顺向坡中大型滑坡发生机制的研究,提出了“滑移(弯曲)—剪断”模式或“滑移—剪断”的概念模型,并指出该类滑坡控制的关键是对坡脚“锁固段”的保护或在边坡开挖中预留足够的安全厚度;王运生等^[14]通过对雅砻江右岸某中等倾角岩层顺向坡特征及稳定性研究,提出了该类滑坡形成后,会形成保存原岩层序假基岩的结构特征,并且滑坡体由于抗滑段的存在及较好导水性,稳定性一般较好。

拖担水库位于滇中山区,在水库扩建施工开挖过程中,受施工扰动影响,左岸坝肩山体出现变形,严重影响了大坝施工及安全。本文以拖担水库大坝左岸中等倾角顺层滑坡为例,研究了其发育特征和形成机制,并进一步分析了该类型古滑坡体扰动复活发生滑动变形的规律和模式,对滑坡的综合治理提供了地质依据,对同类型滑坡的研究具有一定的借鉴意义^[15-16]。

1 研究区地质环境条件

1.1 自然地理

研究区地处滇中高原,为亚热带季风气候,多年平均气温 15.8℃,多年平均降水量 868.9 mm,每年 5—10 月为雨季,降水量占全年降雨总量的 87.9%。11 月至

次年 4 月为旱季,降水量占全年降雨总量的 12.1%。

1.2 研究区工程地质条件

1.2.1 地形地貌与地层岩性

研究区属构造侵蚀中山地貌,坝址附近河谷呈“U”字型,两岸自然斜坡高陡,坡高大于 100 m,左岸整体地形坡度约 20°~32°,右岸约 35°。

研究区地层岩性以震旦系下统澄江组(Z_{ac})中厚层-薄层中细粒长石石英砂岩为主,局部夹薄层泥质粉砂岩和泥岩等。

1.2.2 地质构造

研究区位于扬子准地台西部之川滇台背斜东部。处于南北向罗茨—易门断裂和普渡河大断裂两个区域性活动性断裂所挟持的断块带内,构造以近东西向和北东东向为主。左岸构造整体不发育,岩层呈单斜产出,产状 120°~150°∠35°~45°。

1.2.3 水文地质条件

研究区地下水类型主要为基岩裂隙水和第四系孔隙水,主要接受大气降水补给。左坝肩斜坡岩体节理发育,有利于地表水沿裂隙下渗,地下水位埋深较大,均位于滑坡底部以下。

1.2.4 物理地质现象

左岸坝肩在紧临滑坡体的下游侧发育有 H4 滑坡(图 1),为基岩顺层小型滑坡,滑面为风化的泥质粉砂岩薄层,具有分级滑动的特征,后缘可见错坎,前期处于临界稳定状态。

2 滑坡特征

2.1 变形过程

2017 年 12 月,左岸在 H4 滑坡下方修建施工道路过程中,诱发 H4 滑坡体出现滑塌,随后在完成 H4 滑坡的清挖和左岸灌浆洞平台及洞脸边坡开挖施工后,左坝肩山体(高程 1 984 m 以上)出现变形,边界裂缝最早发现于 2018 年 2 月初,位于滑坡后缘,宽度约 10 cm。

2.2 基本特征

2.2.1 边界特征

左坝肩滑坡分布高程 1 984~2 075 m,长约 150 m,宽 50~150 m,面积约 1.5×10⁴ m²,滑体厚度 10~20 m,体积约 25×10⁴ m³。滑坡边界已形成明显拉裂缝(图 1),以后缘和上游侧缘变形最为强烈,具有以下特征。

(1)边界裂缝:滑坡上游侧缘沿冲沟发育,可见基岩

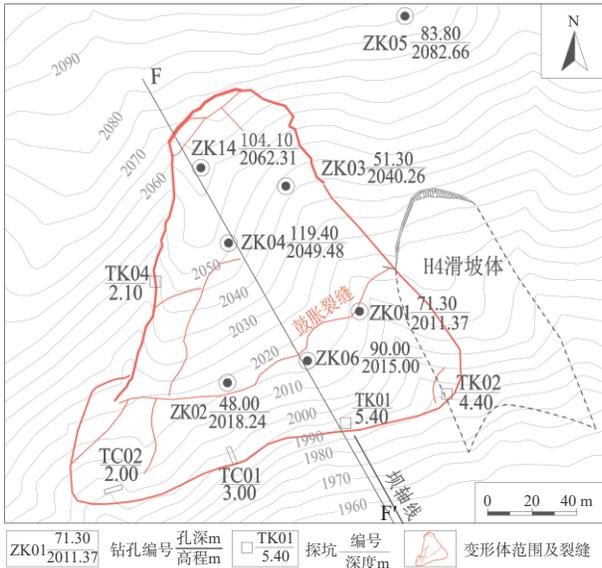


图1 左岸滑坡工程地质平面示意

Fig. 1 Engineering geological map of the left bank

滑面,为岩层层面;后缘由两条近平行的张裂缝组成,是斜坡变形最为剧烈的地方,截止到2018年12月,后缘裂缝宽度1.3~2.5 m,错距最大约3.5 m;下游侧缘裂缝由坡顶向下,宽度逐渐减小,并在高程2 030 m以下消失,但地表有轻微隆起变形;滑坡前缘坡脚部位,地表发育一条鼓胀裂缝,呈不规则弧状。

(2)前缘破碎带:滑坡前缘下部存在一层厚破碎带,滑体沿破碎带顶部有明显剪出现象;破碎带厚度4~9 m,反倾向坡内,产状 $6^\circ \angle 13^\circ$,由坡表向坡内逐渐变厚,向

坡内延伸距离较短,钻孔ZK04未揭露(图2)。破碎带呈碎屑夹泥状,无正常岩体层序,顶部有一层厚度10~20 cm的泥岩,遇水软化,沿泥岩层面不断有水渗出(图3)。

(3)滑坡内部:裂缝整体不发育,在2 015 m高程沿线,发育一组横向的鼓胀裂缝,连续性好,宽度0.5~1.0 m。

2.2.2 滑体特征

以滑坡中部2015 m高程沿线的鼓胀裂缝为界,将滑体分为后缘、前缘两个分区(图1)。

(1)滑坡后缘变形区

地形坡度约 25° ,岩体破碎(图4),坡体内薄层泥质粉砂岩层间风化现象发育,岩层倾角 $32^\circ \sim 40^\circ$,与区内正常岩层产状基本一致。该区坡体的自重构成了左坝肩滑坡的主要下滑力。

(2)滑坡前缘变形区

地形坡度约 32° ,岩层产状 $120^\circ \sim 130^\circ \angle 19^\circ \sim 26^\circ$,倾角较左岸正常岩体明显变缓,竖向节理非常发育,呈碎裂结构,但层面仍清晰可见(图5)。该区受上部变形区的推挤作用,提供了主要抗滑力。

2.2.3 滑面特征

滑坡后缘沿层面滑动,中部沿下部变形区内的软弱带滑动,前缘沿破碎带顶部剪出,底滑面为“三段式”组合型滑动面。

滑坡后缘沿软弱层滑动,滑带岩芯破碎,为风化的泥质粉砂岩,呈泥夹碎屑状(图6),遇水软化严重,后缘

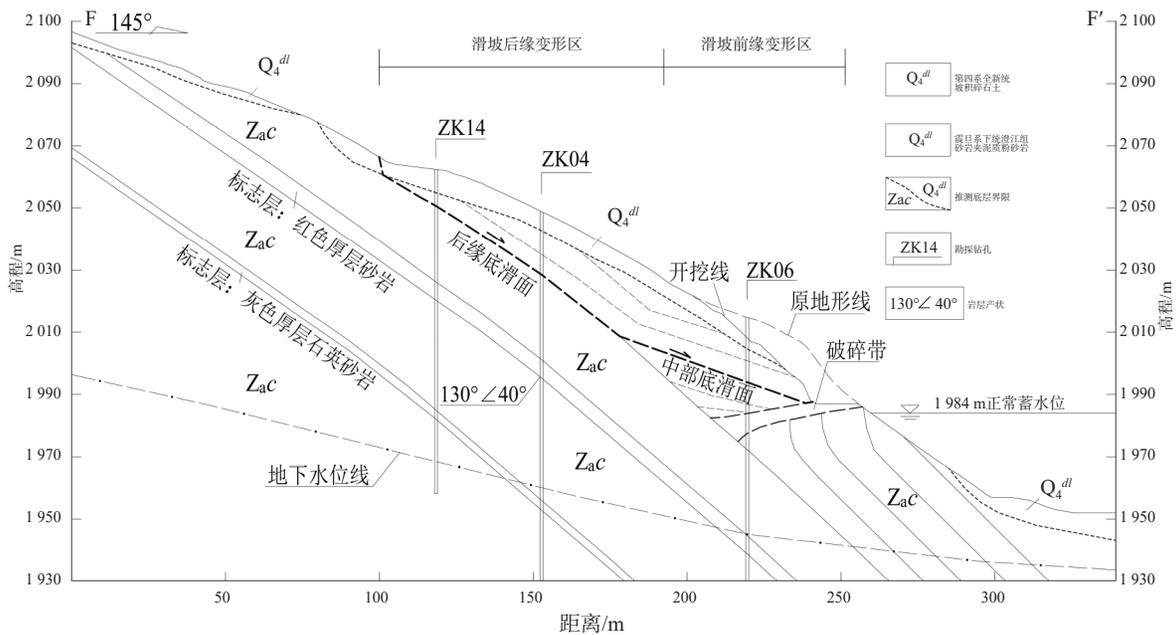


图2 左岸滑坡工程地质剖面图(F-F'剖面)

Fig. 2 Engineering geological profile



图 3 滑坡前缘下部的破碎带
Fig. 3 Fracture zone below the landslide



图 4 滑坡后缘变形区岩体特征
Fig. 4 Characteristics of the back deformation zone



图 5 滑坡前缘变形区岩体特征
Fig. 5 Characteristics of the front deformation zone



图 6 钻孔 ZK03 揭露后缘底滑面特征
Fig. 6 Characteristics of the sliding-zone of the trailing edge

滑面产状 $122^\circ \angle 39^\circ$, 与区内基岩产状一致。

滑坡前缘变形区内存在一薄层泥质粉砂岩夹层, 呈

碎屑夹泥状(图 7), 连续性好, 在 ZK01、ZK02 和 ZK06 钻孔内均有揭露, 构成了滑坡的中部底滑面, 中部底滑面产状 $125^\circ \angle 18^\circ$, 与滑坡前缘缓倾角岩层产状基本一致, 表明滑体前缘沿缓倾角层间软弱带滑动。



图 7 钻孔 ZK01 揭露中部底滑面特征
Fig. 7 Characteristics of the middle-sliding-zone

2.2.4 滑床特征

滑床岩体为中厚层长石石英砂岩, 岩体较完整, 标志层连续, 前缘破碎带下部与破碎带接触部位岩体呈弯曲弧状(图 8), 受上部岩体的推挤作用, 岩体发生了倾向主滑方向的弯曲变形。



图 8 滑坡前缘弧状弯曲岩体
Fig. 8 Curved rock mass at the front edge

2.3 变形监测

2018 年 4 月 10 日开始对左岸斜坡进行变形监测, 滑坡内部设监测点 11 个, 外部 6 个(图 9)。结果显示, 滑坡的水平位移方向为 $140^\circ \sim 151^\circ$, 垂直方向均为沉降变形; 滑坡外部山体稳定。2018 年全年总降雨量 697.8 mm, 降雨主要集中在 5—8 月, 滑坡水平位移速率与降雨量关系曲线见图 10, 主要有以下规律。

(1) 滑坡变形过程可分为三个阶段: ①匀速变形阶段, 5 月 28 日之前, 水平位移速率一般 $5 \sim 10 \text{ mm/d}$; ②持续变形阶段, 5 月 28 日—9 月 18 日, 汛期降雨量较大, 斜坡变形加剧, 水平位移速率一般 $20 \sim 40 \text{ mm/d}$, 最大约 70 mm/d ; ③缓慢变形阶段, 9 月 18 日以后随着降



图9 左岸斜坡监测点分布图

Fig. 9 Layout chart of monitoring

雨量减少,水平位移速率一般 $1 \sim 3 \text{ mm/d}$,呈逐渐减小的趋势。

(2)滑坡对降雨敏感,变形速率随降雨量的增大而显著增加,从降雨峰值和变形速率峰值来看,变形有一定的滞后,滞后时间一般 $3 \sim 6 \text{ d}$ 。

(3)滑坡内部各监测点变形速率基本一致,表明左岸滑坡以整体蠕滑变形为主,这也解释了滑体内部张拉裂缝较少发育的原因。

3 形成机制及演化过程

3.1 形成机制

综合左岸滑坡的发育特征,斜坡存在岩层倾角“上陡下缓”的两个分区,岩层仍有一定的层序,但完整性较差;前缘下部存在一厚层破碎带,仅在滑体下部发育,滑床岩体在靠近破碎带的部位发生了倾向滑动方向的弧状弯曲变形。分析认为左岸应为一古滑坡体,由于滑动速度慢、滑移距离短等原因,滑坡解体程度低,形成了

左岸保留原岩层序的破碎岩体,王运生等^[14]将其定义为“假基岩”。该类现象非常特殊,且隐蔽性高,勘察时非常容易被认为是构造破碎岩体。

左岸斜坡陡峻,岩性以中厚层砂岩夹薄层泥质粉砂岩,泥质粉砂岩岩性较软,在风化及降雨入渗等作用下,形成软弱滑面;左岸滑坡后缘、前缘两个变形区,在力学机制上,对应于“主动传力区”和“被动挤压区”^[5],滑坡后缘变形区在自重下滑力的驱动下,沿古滑坡体后缘滑面产生顺层滑移,此时滑坡前缘缓倾角变形岩体提供阻滑力,由于阻滑力较大,斜坡导水性好,施工前处于长期自然稳定状态,施工过程中由于开挖主要集中在滑坡前缘变形区和前缘山体,斜坡前缘阻滑力减小,并在滑坡前缘变形区内沿泥质粉砂岩夹层形成新的滑动面,导致左岸斜坡出现变形。正是由于滑坡体后缘滑面和中部滑面形成时期不同,导致了两处滑带土物质组成有所差异。

左坝肩下游的H4滑坡目前已经全部清挖完成,滑床正常连续的基岩出露,其滑动模式和左坝肩滑坡基本一致。二者滑体厚度差别较大,底滑面不连续,应为同时发育在左岸的两个古滑坡体,且H4滑坡的存在对左坝肩滑坡具有一定的阻滑作用。

3.2 演化过程

左岸古滑坡为基岩顺层滑坡,属典型的“滑移(弯曲)—剪断”型,现状左岸滑坡体为古滑坡的扰动复活形成,其发展演化过程分以下三个阶段(图11)。

(1) 弯曲、隆起阶段

中厚层状中等倾角岩层顺向坡,层间夹软弱薄层,坡体在自重应力作用下,沿软弱夹层发生顺层滑移,坡角部位薄板状岩层易发生挠曲变形,岩层向上弯曲,坡面出现隆起,随着变形的加剧,隆起部位岩体松动、架

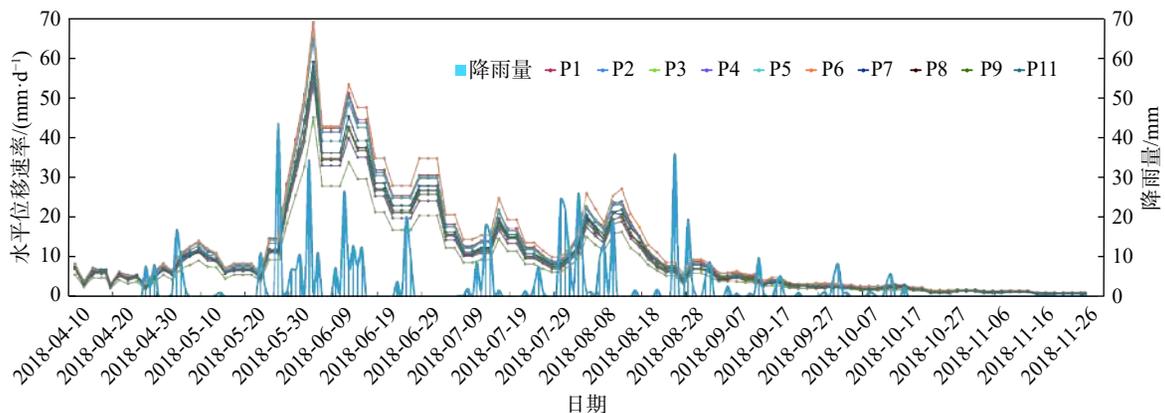


图10 左岸滑坡水平位移速率及降雨随时间关系曲线

Fig. 10 Relation curves of horizontal displacement rate of landslide and rainfall with time

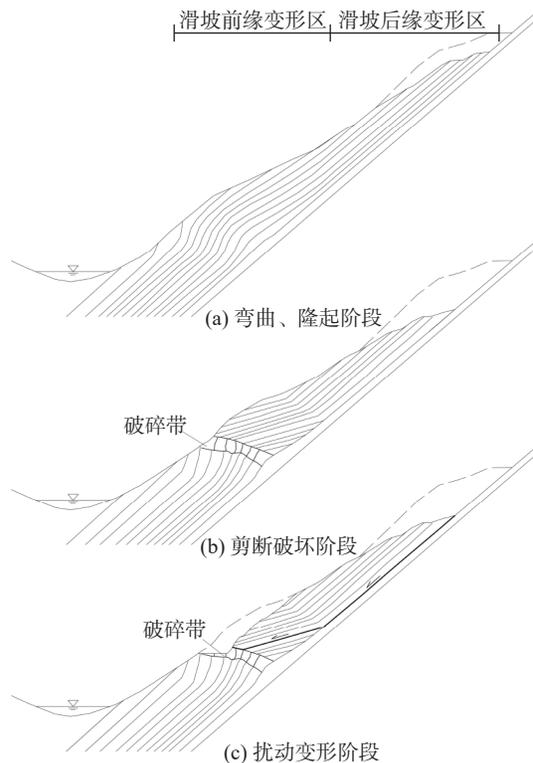


图 11 左岸滑坡演化过程示意图

Fig. 11 Evolution process of left bank deformation

空。弯曲隆起通常发生在近坡脚而又略高于坡脚的部位,这可能是由于该处顺层压应力与垂直层面的压应力之间压力差较大所致^[5],见图 11(a)。

(2) 剪断破坏阶段

斜坡发生变形后,形成岩层倾角“上陡下缓”的上、下两个变形性质不同的区域,并分别提供了主要下滑力和阻滑力。斜坡在最大隆起端部沿垂直层面折断,局部压碎,形成一个缓倾坡内的剪切带,随着滑坡前缘变形区的“弯曲—隆起”加剧,将最终被剪断而导致发生滑坡,见图 11(b)。

(3) 扰动变形阶段

施工过程中,随着对古滑坡体前缘 H4 滑坡体的清除以及滑坡前缘变形区的开挖,阻滑力减小,斜坡发生滑动变形,此时,由于古滑坡体的滑动面呈椅状,变形初期以“滑移—坐落”为主,前缘剪出现象不明显,随着变形的加剧,逐渐在滑坡前缘变形区内沿泥质粉砂岩夹层形成新的滑动面,斜坡变形加剧,见图 11(c)。

3.3 水库蓄水对滑坡的影响分析

水库设计正常蓄水位 1 984 m,左坝肩滑坡分布高程 1 984 ~ 2 075 m,滑坡基本位于拟建水库正常蓄水位高程之上,受库水直接影响较小。

水库蓄水后,左岸地下水壅高,滑坡现状底滑面虽

位于壅高后的地下水位之上,但滑坡前缘的破碎带和部分缓倾变形岩体受壅高后的地下水和库水位升降的水动力作用影响,不排除在滑坡前缘缓倾角变形区内产生新的滑动面的可能,左岸滑坡需进行有效治理。

4 结论

(1) 中等倾角岩层顺向坡易沿层间软弱夹层产生滑坡,滑动模式为滑移(弯曲)—剪断型,此类滑坡多发生在中厚层-薄层软硬相间的地层结构内,且岩层倾角一般大于斜坡坡角。

(2) 该类滑坡由于滑动时速慢,滑移距离短,解体程度低,一般会形成保留原岩层面的“上陡下缓”的破碎岩体,并在底部形成一个反倾坡内的剪切破碎带,破碎带下部岩体受滑坡的牵引作用,发生倾向滑动方向的弧状弯曲变形。

(3) 滑坡体易沿“上陡下缓”的椅型软弱层面发生二次滑动;滑坡前缘变形区提供阻滑力,是斜坡整体稳定的关键,因此在施工过程中应注意对滑坡前缘变形区的保护;另外降雨会加剧滑坡的变形,斜坡的排水措施也是阻止其变形的关键。

参考文献 (References) :

- [1] 柴波,殷坤龙. 顺向坡岩层倾向与坡向夹角对斜坡稳定性的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 628-634. [CHAI Bo, YIN Kunlong. Influence of intersection angle between trend of slope and strata on stability of bedding slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3): 628-634. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 周剑,邓茂林,李卓骏,等. 三峡库区浮托减重型滑坡对库水升降的响应规律 [J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 136-143. [ZHOU Jian, DENG Maolin, LI Zhuojun, et al. Response patterns of buoyancy weight loss landslides under reservoir water level fluctuation in the Three Gorges Reservoir area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(5): 136-143. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 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)]
- [4] 肖诗荣,刘德富,胡志宇. 世界三大典型水库型顺层岩质滑坡工程地质比较研究 [J]. 工程地质学报, 2010,

- 18(1): 52–59. [XIAO Shirong, LIU Defu, HU Zhiyu. Engineering geologic study of three actual dip bedding rockslides associated with reservoirs in the world [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(1): 52–59. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(3): 433–454. [HUANG Runqiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th Century [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(3): 433–454. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 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(12): 73–81. [WEI Tongyao, YIN Yueping, GAO Yang, et al. Deformation mechanism of the tapping H1 landslide in Wushan County in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(12): 73–81. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 瞿生军, 赵建军, 丁秀美, 等. 降雨诱发缓倾顺层滑坡机制离散元模拟 [J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(6): 120–126. [QU Shengjun, ZHAO Jianjun, DING Xiumei, et al. Discrete element simulation of rainfall induced shelving bedding landslides [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(6): 120–126. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 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, 2009. [ZHANG Zhuoyuan, WANG Shitian, WANG Lansheng. Principle of engineering geology analysis[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009. (in Chinese)]
- [9] 任光明, 李树森, 聂德新, 等. 顺层坡滑坡形成机制的物理模拟及力学分析 [J]. *山地研究*, 1998, 16(3): 182–187. [REN Guangming, LI Shusen, NIE Dexin, et al. The physical simulation and mechanical analysis on landslide's formation mechanism on consequent slope [J]. *Journal of Mountain Research*, 1998, 16(3): 182–187. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 陈全明, 方琼, 罗冠枝, 等. 缓倾顺层岩质斜坡破坏条件和变形机制分析—以常吉高速公路朱雀洞滑坡为例 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(2): 18–23. [CHEN Quanming, FANG Qiong, LUO Guanzhi, et al. Failure conditions and mechanism of the gentle dip bedding slopes: a case study of the Zhuqudong Landslide [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(2): 18–23. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 朱哈迺, 马美玲, 尚岳全. 顺倾向层状岩质边坡溃屈破坏分析 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2004, 38(9): 1144–1149. [ZHU Hanyu, MA Meiling, SHANG Yuequan. Analysis of buckling failure of consequent rock slope [J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2004, 38(9): 1144–1149. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 李云鹏, 杨治林, 王芝银. 顺层边坡岩体结构稳定性位移理论 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(6): 747–750. [LI Yunpeng, YANG Zhilin, WANG Zhiyin. Displacement theory of structure stability for rock mass bedding slope [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(6): 747–750. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 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): 18–23. [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): 18–23. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 王运生, 唐兴君, 石豫川, 等. 西南某水电站中倾顺层滑坡稳定性分析 [J]. *南水北调与水利科技*, 2006, 4(5): 23–25. [WANG Yunsheng, TANG Xingjun, SHI Yuchuan, et al. Analysis on the Medium-Dip bedding slide stability in a hydropower station of the southwest of China [J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2006, 4(5): 23–25. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 高杨, 贺凯, 李壮, 等. 西南岩溶山区特大滑坡成灾类型及动力学分析 [J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(4): 14–23. [GAO Yang, HE Kai, LI Zhuang, et al. An analysis of disaster types and dynamics of landslides in the southwest karst mountain areas [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(4): 14–23. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 郭延辉, 杨溢, 杨志全, 等. 国产GB-InSAR在特大型水库滑坡变形监测中的应用 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(2): 66–72. [GUO Yanhui, YANG Yi, YANG Zhiquan, et al. Application of GB-InSAR in deformation monitoring of huge landslide in reservoir area [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(2): 66–72. (in Chinese with English abstract)]