

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.03.04

三峡库区青石-抱龙段顺层灰岩库岸坡变形破坏机理

余 姝¹, 张枝华¹, 黄波林^{2,3}, 胡明军¹, 王 健^{2,3}

- (1. 重庆市地勘局 208 水文地质工程地质队(重庆市地质灾害防治工程勘察设计院), 重庆 400700; 2. 三峡大学防灾减灾湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 3. 湖北长江三峡滑坡国家野外科学观测研究站, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 三峡库区基岩顺层滑坡大多以砂/泥岩或泥/泥灰岩互层滑坡为主, 力学机制以顺层滑移剪切为主。新近发现的青石-抱龙段顺层灰岩库岸, 岸坡岩性以灰岩、白云岩为主。在 21 个顺向斜坡中 9 个斜坡存在岩层弯曲现象, 高程分布在 145 ~ 175 m, 且大量层面有擦痕, 局部岩层强烈弯曲形成了类似逆断层的现象。这些变形破坏现象受控于重力作用下沿层面的滑移-弯曲力学机制。通过连续-非连续数值分析方法研究表明, 在这一带岸坡中约 200 m 的主动平滑滑移段下滑力驱动了约 30 m 的被动弯曲隆起段变形, 被动弯曲隆起段位移地形变缓、岩层增厚。当前青石-抱龙一带顺层灰岩库岸岩层隆起和松动较小, 处于滑移-弯曲变形的早期阶段, 主要以累进性变形为主。建议对该段库岸进行专业监测, 并开展进一步的调查研究工作。

关键词: 三峡库区; 顺层灰岩库岸; 数值分析; 滑移-弯曲机制; 岩层松动

中图分类号: P642.5

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)03-0018-06

Deformation mechanism of bedding limestone bank slope from Qingshi to Baolong, the Three Gorges Area

YU Shu¹, ZHANG Zhihua¹, HUANG Bolin^{2,3}, HU Mingjun¹, WANG Jian^{2,3}

- (1. 208-Branch of Hydrogeology & Engineering, Chongqing Bureau of Geology and Mineral Exploration (Chongqing Exploration & Design Institute of Geological Hazard Control Engineering), Chongqing 400700, China; 2. Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Reduction, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 3. National Field Observation and Research Station of Landslides in Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: Bedrock of most of the bedding landslide in the Three Gorges Area is interbedding sandstone and mudstone, or interbedding mudstone and marl. The mechanical mechanism of the landslide is mainly bedding shear slip. Geological survey from in Qingshi to Baolong reveals that the lithology of the bank slope is mainly limestone and dolomite. At the elevation between 145 ~ 175 m, 9 slopes in the 21 consequent slopes have the phenomenon of strata bending, and a large number of scratches were found at the bending surface. The deformation and failure phenomena are similar to the reverse faults in local strong bending strata. These deformation and failure phenomena are controlled by the mechanism of sliding and bending under gravity. The

收稿日期: 2018-07-16; 修订日期: 2018-08-27

基金项目: 重庆市三峡地防办科研项目; 三峡工程重庆库区长江干流水位变动带岸坡长期强度弱化规律及防护措施示范研究

第一作者: 余 姝(1981-), 女, 四川大竹人, 水工环地质专业, 大学本科, 高级工程师, 主要从事地质灾害防治研究。E-mail: 17544363@qq.com

通讯作者: 张枝华(1980-), 男, 四川宜宾人, 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: 471316266@qq.com

study of continuous-discontinuous numerical analysis indicates that there is an active straight slip section of about 200 m in the bank slope in this range, and its sliding force causes the deformation of the passive flexural uplift section of about 30 m. The topography of the passive bending uplift section is gentle and the strata are thickened. At present, the bank is in the early stage of sliding-bending deformation, which is mainly progressive deformation. Therefore, it is suggested that professional monitoring and further investigation of the reservoir bank should be carried out.

Keywords: the Three Gorges Area; bedding limestone bank; numerical analysis; sliding to bending; rock loosening

0 引言

世界上一些巨型灾难性滑坡大都是顺层滑坡^[1],例如意大利的瓦伊昂滑坡^[2-3]。在长江三峡库区,顺层滑坡也是灾难性滑坡的主要类型之一。例如2004年9月5日发生的万州吉安滑坡,体积约为 $7.00 \times 10^6 \text{ m}^3$,摧毁了一个集镇和高速公路,滑坡形成的堰塞湖给下游的人民生命财产带来了极大威胁^[4]。

三峡库区的岩性除了坝址区为花岗岩外,其他区域都为沉积岩。三峡库区发育的基岩顺层滑坡大多以砂泥岩互层或泥岩与泥灰岩互层为主,发生机制主要以滑移-剪切或滑移-拉裂为主^[5-7]。它们的滑带一般为原生岩石经过层间剪切改造而形成^[8]。例如涪陵五中滑坡的滑动带为泥岩改造形成的泥化夹层^[9],千将坪滑坡滑床上则明显可见层间剪切留下的方解石结晶和擦痕^[10]。

在三峡地区灰岩(顺层)滑坡较少发生,很少见到相关文献报道,少量被报道的滑坡发生机制也非常特殊。例如武隆鸡尾山的视倾向滑动机制,滑坡主要受重力、岩溶和采矿影响,侧向挤压滑动^[11]。武隆鸡尾山滑坡的发生与关键阻滑块体的压碎密切相关^[12]。灰岩顺层滑坡还存在一些弯曲或溃屈等特殊的机制,尤其是当其产出倾角较大时。例如雅奢江金龙山变形体主要岩性为玄武岩和灰岩,它是一个受控于软弱层间挤压带的“滑移-弯曲”变形体^[7]。

本文首先描述新近在三峡库区发现的青石-抱龙段顺层灰岩斜坡变形特征,进而采用数值法分析其滑移-弯曲机制,讨论了灰岩顺层库岸的演化阶段,为该类型库岸防治提供技术支撑。

1 三峡库区青石-抱龙段顺层灰岩库岸坡变形特征

青石-抱龙一带顺层库岸位于三峡库区巫山县青石社区点下游长江右岸,沿长江至上游的巫山县城约

16 km,沿长江至下游的巴东县城约32 km(图1)。该段库岸起始于青石社区下游300 m,止于下游抱龙河口,沿长江约有3.7 km长。库岸中分布有20条冲沟,将库岸分割为21个自然库岸,分别命名为青岩子1#斜坡-青岩子21#斜坡。

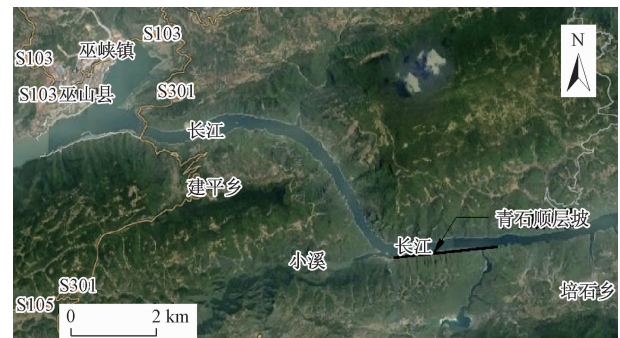


图1 青石-抱龙顺层灰岩库岸位置图

Fig.1 The bedding limestone bank from Qingshi to Baolong

地貌上,这些库岸斜坡由临江的平直斜坡、中部悬崖或马鞍状斜坡和山顶岩溶浅丘平台构成。岩溶浅丘平台为夷平面,最高高程约820 m。构造上,该斜坡处于官渡口向斜的南翼和楠木园背斜的北翼,地层稳定,无断裂通过。出露基岩为三叠系下统嘉陵江组三段和二段地层,岩性主要为浅灰色薄层夹中厚层泥粒灰岩及中薄层白云岩夹泥质灰岩。平直斜坡段岩层产状为 $340^\circ \sim 350^\circ \angle 40^\circ \sim 55^\circ$,马鞍状斜坡段(一些库岸的中部为陡立悬崖段)产状开始变缓,至岩溶浅丘平台处产状近水平,为楠木园背斜的核部。因此这些平直斜坡段顺层灰岩库岸后缘高程在300~400 m不等,前缘插入长江。长江在该区域河床高程约40 m,江水水位在145~175 m波动。

由于两侧冲沟并不等间距发育,后缘高程也不尽相同,青岩子各顺向斜坡的宽度和纵向长度不一。145 m水位时,青岩子各顺向斜坡顺长江宽约100~300 m,纵长约250~350 m,总体坡向为 $340^\circ \sim 360^\circ$ 。由于坡度略小于岩层倾角,坡面由多个岩层面组成,平

均坡角约为 40°,为典型的顺向岩质岸坡。

这些顺向岸坡坡面上一般发育 2 组结构面,产状分别为 270°∠80°和 34°∠70°。这两组结构面延伸一般非常小,倾向偶尔有一些变化,在表面岩层中发育。斜坡区冲沟应是从结构面演化发育而来,这些冲沟都近平行,走向近南北向。

在大量斜坡裸露的岩层面上发现了大量方解石擦痕。例如在 6#斜坡上发现的擦痕走向 325°,倾向约 48°。经过详细地质调查,青石-抱龙一带 21 个顺层斜坡中有 9 个斜坡岩层在消落带区域(由于周期性水位变动,该区域基本没有植被,而其他区域植被非常发育)发现了浅层岩体波状弯曲。这 9 个斜坡具有一定的随机性,并不相连。这种弯曲现象在空间上不连续,

弯曲程度不一致,不具有区域性。因此,它们不是地质构造作用造成的,而是后期重力作用造成的。

有些弯曲变形发育在斜坡的冲沟内,深度方向上大量岩层均出现了起伏不一的弯折(图 2),这些弯曲区近似在一条线上。有些波状弯曲的岩层则在斜坡面上被发现,呈非常不规则形状产出(图 3)。这种波状弯曲大多没有跨冲沟发育,且即便紧邻的斜坡都发育这种现象,它们在坡面上的高程亦不相同。例如青岩子 3#斜坡弯曲区域在坡面上的高程为 150 m 附近,而青岩子 6#斜坡弯曲区域在坡面上的高程为 165 m 附近。这种波状弯曲的转折端多为角砾岩或角砾填充的裂缝。在弯曲岩层的层间可见隆起现象,角砾岩填充或中空。

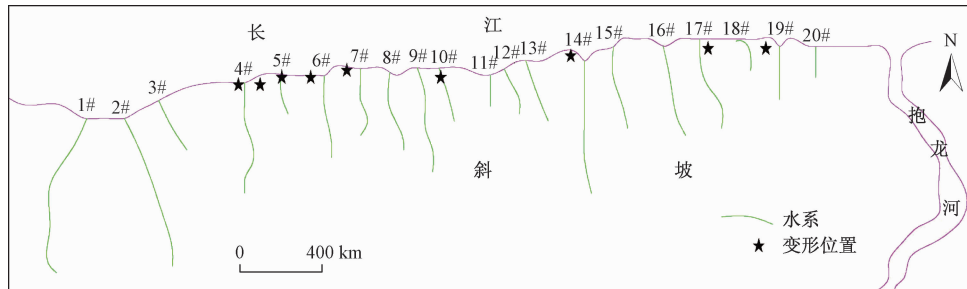


图 2 弯曲变形在青石-抱龙一带岸坡中的分布情况图

Fig. 2 Distribution of bending deformation at the bank slope from Qingshi to Baolong



图 3 青岩子 3#斜坡冲沟内的岩层弯曲现象

Fig. 3 Strata Bending in the gully 3# of Qingshizi slope

形态。



图 4 青岩子 5#斜坡坡面上的岩层弯曲现象

Fig. 4 Strata Bending at the slope surface of slope 5#

青岩子 5#斜坡上的弯曲现象非常强烈,岩层弯曲后出露的岩层倾角十分平缓,并以类似“逆断层”方式接触其下部岩层(图 4)。青石至抱龙一系列岸坡上波状弯曲继续挤压都会形成这一“逆断层”现象(图 5)。通过对青岩子 6#斜坡的剖面测量、坡面和冲沟内岩层调查,形成了地质剖面图,主滑面主要结合冲沟内薄层泥灰岩夹层的位置和地貌形态来确定。这一典型剖面基本可以代表青石-抱龙一带的顺层灰岩岸坡的剖面

2 青石-抱龙顺层滑坡变形破坏机理

在重力作用下斜坡岩体沿层状结构面滑移可以产生弯曲现象。这种滑移-弯曲机制很早就被一些研究者报道过^[7,13-14]。它主要发育在中-陡倾角的层状斜坡中,尤以薄层状岩体及延性较强的碳酸岩中为多见^[7]。葡萄牙的阿尔加维西海岸陡立层状岩体也存

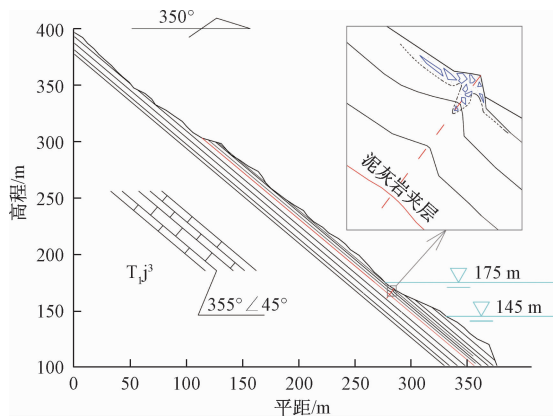


图 5 青岩子滑坡剖面图

Fig. 5 The profile of the Qingyanzi Landslide

在明显的溃屈现象^[15]。弯曲一般发生在边坡表层, 屈曲形式受控于边坡的滑动变形^[16]。物理模型试验表明顺层滑坡发生滑移-弯曲需要具备一定的条件, 也有一定的变形失稳特征^[17]。滑移-弯曲的滑坡滑面一般为两段线的滑面, 上段提供轴向的下滑力, 下段为被动段或阻滑段^[18]。

为了深入理解这一重力造成的弯曲现象及今后发展趋势, 采用 UDEC 进行数值分析。非连续力学方法范畴的 UDEC 程序基于离散的角度来对待物理介质, 它可将岩体的两个基本组成对象——岩块和结构面分别以连续力学定律和接触定律加以描述。结构面是连续体(岩块)的边界, 单个的连续体在进行力学求解过程中可以被处理成独立对象, 并通过接触和其他连续体发生相互作用, 其中连续体可具有可变性、或刚性受力变形特征^[19]。就具备可变形能力的单个连续体分析环节而言, 介质受力变形求解方法完全遵从 FLAC 快速拉格朗日定律。UDEC 被广泛应用在岩质边坡的变形破坏机理研究中, 例如可利用 UDEC 研究不同倾角对切坡引起的倾倒破坏的影响^[20]。

根据青岩子 6# 斜坡的工程地质特征, 构建了一个二维的 UDEC 数值模型。模型中岩体采用连续介质的 Morh-Coulomb 本构模型, 层面为不连续介质的 Coulomb slip 模型。采用的青岩子滑坡岩石、结构面的相关物理力学参数见表 1。数值模型长约 400 m, 高约 400 m, 采用的层厚不等, 层厚范围为 0.4 ~ 2.8 m。

经过 1 200 000 时步的计算后, 在 170 m 高程附近出现了明显隆起现象。从力学机制上来看, 斜坡中上部的顺层滑移岩体为主动传力段, 高程 170 m 附近弯曲-隆起岩体为被动挤压段。主动传力段的自重下滑力驱使岩层沿结构面滑移, 后缘出现下错。高程

160 m 以下斜坡坡度变缓, 滑移岩层在 160 m 以下出现急剧增厚的覆盖岩层, 滑移严重受阻。主动传力区传递的力在此部位不能沿层面以滑移的形式传递/耗散, 而产生被动挤压。挤压产生了垂直于层面的变形, 即弯曲-隆起。从应力上来看(图 6), 主应力迹线有明显偏转, 最大主应力方向由垂直过渡到倾斜; 在浅表层, 最大主应力方向平行坡面。由于受力状态不一样, 平直滑移段岩体以拉破坏为主, 弯曲-隆起段岩体则存在拉张破坏和剪切破坏。

表 1 离散元模拟所需岩体和结构面参数表

Table 1 Rock mass and joint parameters for discrete element simulation

岩石结构面	天然密度/ (kg·m ⁻³)	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)	抗拉强度/ MPa	剪切角/ (°)
浅层岩体	2 500	3.2	2	0.2	35	0.3	0
基岩	2 600	5.6	3.3	5.2	42	2.8	0
一般层面	/	2	1	0.006	25	/	/
主滑移面	/	2	1	0.003	12	/	/

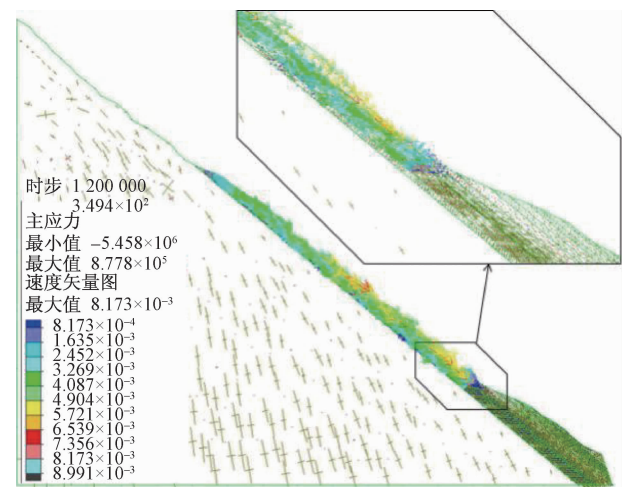


图 6 1 200 000 时步下模型主应力迹线和运动速度矢量图
Fig. 6 The principal stress trajectory and velocity vector of the model at 1.2 million time steps

根据图 7 位移图可见, 主动滑移段的位移值基本一致, 不同层可能有差异, 主动滑移段长度约 200 m。而在被动弯曲-隆起段的位移则急剧下降, 被动弯曲-隆起段仅约 30 m 长。被动弯曲段约占总变形长度的 13.0%。这种主动传力区的滑移和被动挤压的弯曲-隆起构成了一个完整的变形体系, 控制协调着整个斜坡的变形破坏现象。弯曲显著后, 岩层会隆起, 出现架空或充填, 地面也会出现隆起(图 7)。层状体较薄时,

滑移弯曲变形加剧后,弯曲的岩层形成褶曲的弯曲形态。

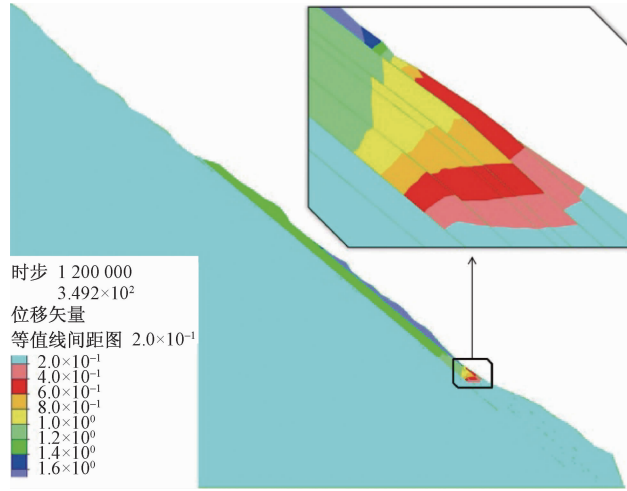


图 7 1 200 000 时步下模型位移云图

Fig. 7 The displacement nephogram of the model at 1.2 million time steps

3 青石-抱龙顺层斜坡所处演化阶段

青石-抱龙的灰岩顺层库岸长约 3.7 km,同时其他地段也还有很多这种灰岩顺向斜坡,探讨他们的演化进程及其对应的现象很有意义。根据青岩-抱龙顺层斜坡调查、数值分析和其他研究者的成果,可将灰岩顺向斜坡的变形分为三个典型阶段:轻微弯曲阶段、强烈弯曲-隆起阶段和溃屈贯通阶段^[7]。

(1)轻微弯曲阶段(图 8-a)。坡面轻微隆起,岩体轻微松动,弯曲部位仅出现局部压碎和类似褶曲现象。弯曲隆起部位通常出现在坡脚或地形凹处。

(2)强烈弯曲-隆起阶段(图 8-b)。地面显著隆起,岩体松动加剧,弯曲-隆起区内拉应力的增强导致缓倾滑移面出现。由于弯曲部位岩体强烈扩容,往往剪出口附近出现局部的崩落或滑落。

(3)溃屈贯通阶段(图 8-c)。当下滑力大于弯曲-隆起区滑移面岩桥强度时,弯曲板梁溃曲破坏,滑移面贯通,形成大规模的滑动。

当前,青岩子系列斜坡的整体隆起和弯曲并不是很明显,没有达到长距离的弯曲或大的隆起。从旁侧斜坡和本段库岸的岩体松动现象来看,尽管局部有岩体剧烈弯曲,但在斜坡的整体弯曲-隆起区并没有明显的岩体松动现象。当斜坡层状灰岩岩体为硬度较大的脆性岩体时,要形成这种破坏小的似柔性弯曲变形,必须在极低的应变速率下长时间的累进变形。因此,青

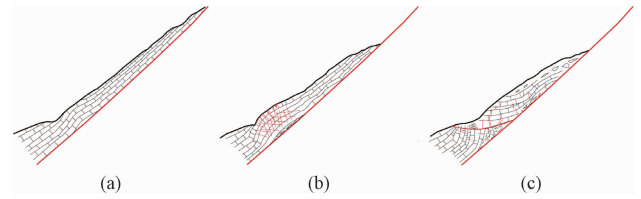


图 8 滑移-弯曲型滑坡演化过程 (修改自文献[7](Zhang et al. (1993)))

Fig. 8 Evolution process of slid-bending type landslide

岩子库岸的滑移-弯曲应变速率较低,造成了当前岩体弯曲类似“流变”,应力增加较小,松动破坏较少。这些都说明了当前青岩子库岸处于滑移-弯曲变形的早期阶段,主要以累进性变形为主。

由于水位周期性变动在弯曲隆起带重叠,而水位周期性变动会加速岩体的劣化(黄波林等,2016),这造成了弯曲隆起带更易破坏。水位周期性变动会加速青石-抱龙一带顺向灰岩库岸的演化进程。

4 结论与建议

通过对三峡库区新发现的灰岩顺层库岸开展大量的野外调查和数值模拟分析,得到了以下结论和建议:

(1)青石-抱龙段顺向库岸坡有 21 个斜坡,由灰岩、白云岩组成,岩层产状为 $340^{\circ} \sim 350^{\circ} \angle 40^{\circ} \sim 50^{\circ}$,在 9 个斜坡的坡面和冲沟内发现了岩层的波状弯曲,岩层面上存在大量擦痕。分析显示该段斜坡变形破坏的机制为滑移-弯曲机制。

(2)采用 UDEC 软件开展的典型剖面应力应变分析表明,在自重下滑力驱使下,约 200 m 长的岩层产生大位移的滑移;受下部急剧增厚的覆盖岩层阻挡,高程 170 m 附近约 30 m 长的岩层被动挤压弯曲隆起,该段位移量相对滑移段急剧减小。

(3)当前,青石-抱龙段顺向库岸的整体隆起和弯曲并不是很明显,岩体松动破坏也较少,尚处于滑移-弯曲变形的早期阶段,主要以累进性变形为主。

(4)鉴于水库区灰岩顺层库岸溃屈失稳将产生高速滑坡及较大的涌浪灾害,建议对青石-抱龙灰岩顺向库岸开展长期专业监测,进一步的调查和研究工作也是非常必要的。

参考文献:

[1] HUNGR OLDRIKCH, LEROUEIL SERGE, PICARELLI LUCIANO. The Varnes classification of landslide types, an update [J]. Landslides, 2014, 11:167 - 194.

- [2] WOLTER A, STEAD D, CLAGUE JJ. An engineering geomorphological characterisation of the 1963 Vajont Slide[J]. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 2013,6:613 - 622.
- [3] MASSIRONI M, ZAMPIERI D, SUPERCHI L, et al. Geological structures of the Vajont landslide [J]. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 2013,6: 573 - 582.
- [4] 李守定,李晓,董艳辉,等. 重庆万州吉安滑坡特征与成因研究 [J]. *岩石力学与工程学报*,2005,24(17):3159 - 3164.
LI Shouding, LI Xiao, DONG Yanhui, et al. Study on Ji'an landslide characters and origin in Wanzhou, Chongqing [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005,24(17):3159 - 3164.
- [5] HUANG Bolin, LIU Guangning, WANG Shichang, et al. Failure mechanism on high steep bank in Three Gorges Reservoir [M]. Beijing: Science Press of China, 2015.
- [6] TANG H, YONG R, EZ ELDIN MAM. Stability analysis of stratified rock slopes with spatially variable strength parameters: the case of Qianjiangping landslide [J]. *Bull Eng Geol Environ*, 2017, 76: 839 - 853.
- [7] ZHANG Zhuoyuan, WANG Shitian, WANG Lansheng. Geo-engineering analysis theory [M]. Beijing: Geology Press, 1993.
- [8] 李守定,李晓,吴疆,等. 大型基岩顺层滑坡滑带形成演化过程与模式 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2007,26(12): 2473 - 2480.
LI Shouding, LI Xiao, WU Jiang, et al. Evolution process and pattern of sliding zone in large consequent bedding rock landslide [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26 (12): 2473 - 2480.
- [9] 成国文,李晓,许家美,等. 重庆涪陵五中滑坡特征及成因分析 [J]. *工程地质学报*, 2009, 17 (2): 220 - 227.
CHENG Guowen, LI Xiao, XU Jiamei, et al. Characteristics and causes of landslide at Fuling Fifth Middle School in Chongqing [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2009,17(2):220 - 227.
- [10] WANG Fawu, ZHANG Yeming, HUO Zhitao, et al. The July 14, 2003, Qianjiangping landslide, Three Gorges Reservoir, China [J]. *Landslides*, 2004, 1: 157 - 162.
- [11] XU Q, FAN X, HUANG R, et al. A catastrophic rockslide-debris flow in Wulong, Chongqing, China in 2009: background, characterization, and causes [J]. *Landslides*, 2010, 7: 75 - 87.
- [12] YIN Y, SUN P, ZHANG M, et al. Mechanism on apparent dip sliding of oblique inclined bedding rockslide at Jiweishan, Chongqing, China [J]. *Landslides*, 2011, 8: 49.
- [13] SUN Guangzhong. Rockmass structural mechanics [M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [14] HUTCHINSON JN. General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology [R]. In: *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides*, Lausanne, 1988, 1: 3 - 35.
- [15] MARQUES FMSF. Landslide activity in Upper Palaeozoic shale sea cliffs: a case study along the western coast of the Algarve (Portugal) [J]. *Bull Eng Geol Environ*, 2003, 62: 299 - 214.
- [16] CHANG KT, GE L, LIN HH. Slope creep behavior: observations and simulations [J]. *Environ Earth Sci*, 2015, 73: 275 - 287.
- [17] LO CM, WENG MC. Identification of deformation and failure characteristics in cataclinal slopes using physical modeling [J]. *Landslides*, 2017, 14: 499 - 515.
- [18] STEAD DOUG, EBERHARDT ERIK. Understanding the mechanics of large landslides [J]. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 2013, 6: 85 - 108.
- [19] Itasca Consulting Group Inc. UDEC User Manuals, Version 4.0 [Z]. Minneapolis, Minnesota, 2005.
- [20] ADMASSU Y, SHAKOOR A. Cut slope design recommendations for sub-horizontal hard sedimentary rock units in Ohio, USA [J]. *Geotech Geol Eng*, 2013, 31(4): 1207 - 1219.