

doi: 10.3724/SP.J.1201.2013.03138

大渡河章古滑坡演化机制分析及稳定性评价

蒋发森, 王运生, 吴俊峰

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘要: 章古滑坡位于大渡河右岸, 姑咱镇下游 2.5 km, 体积约 $19\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$, 属特大型滑坡, 且该区属高烈度区, 滑体一旦失稳, 可能造成堵河和堰塞溃坝。为了分析滑坡的演化过程及发展趋势, 通过野外调研、测绘、物探及室内测年等研究方法, 并利用三维有限元软件(FLAG 3D)进行数值模拟分析, 对滑坡的演化机制和滑坡体的稳定性进行了研究。结果表明: 章古滑坡为古地震滑坡, 滑坡体的形成经历了河谷卸荷松弛、大渡河侧蚀、强震滑坡和翻坝侵蚀四个阶段; 目前, 滑坡体整体处于稳定状态, 但局部范围可能发生次级滑坡。

关键词: 大渡河; 滑坡; 演化机制; 稳定性; 数值模拟; FLAG 3D

中图分类号: P642.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)03-0138-04

Analysis of Formation-Evolution Mechanism and Stability Assessment of Zhanggu Landslide in Daduhe River

JIANG Fa sen, WANG Yun sheng, WU Jun feng

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The Zhanggu Landslide lies at the right bank of the Daduhe River and 2.5 km downstream of Guza Town, which is a super large scale landslide with a volume of $19\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$. This area belongs to the highly seismic region. Once the landslide is damaged, it can result in river blocking and dam break. In order to analyze the evolution process and develop trend of the landslide, the field investigation, geological mapping, geophysical prospecting, and laboratory dating methods were used to investigate the formation evolution mechanism and stability of the Zhanggu Landslide based on the numerical simulation using the three dimensional finite element software (FLAG 3D). The results showed that the Zhanggu Landslide is a palaeo earthquake landslide and its formation includes four stages: unloading and relaxation of the Daduhe River, lateral erosion of the Daduhe River, slope failure triggered by a strong earthquake, and river dam erosion. At present, the landslide is in stable condition but a secondary landslide may occur on the local scale.

Key words: Daduhe River; landslide; formation evolution mechanism; stability; numerical simulation; FLAG 3D

大渡河地处青藏高原与四川盆地的过渡地带, 流域内河流深切, 地表起伏大, 地质构造复杂, 为我国地质灾害的高易发区。近年来, 随着大渡河流域水电和矿山的开发, 地质灾害的威胁也越来越严重^[1]。章古滑坡位于康定县姑咱镇下游 2.5 km 大渡河右岸, 省道 211 从滑坡坡脚位置通过, 滑坡体后缘平台有村民居住。若章古滑坡复活, 将可能再次阻断大渡河甚至堰塞溃坝, 对省道 211 的交通安全和姑咱镇人民群众的生命财产安全造成严重威胁。本文通过野外调查、测绘、勘察及室内试验, 结合 FLAG 3D 数值模拟分析, 对章古滑坡的演化机制及滑坡体的稳定性进行分析评价。

1 滑坡工程地质条件

章古滑坡位于北东-南西向龙门山断裂带, 北西-南东向鲜水河断裂带和南北向大渡河断裂带的交接部位, 区域内次级小断层发育, 是我国地震最活跃的地区之一。该区地震基本烈度为 Ⅷ 度, 地震峰值加速度为 0.2 g。该区构造稳定性主要受鲜水河活动断裂的控制, 该断裂为北西走向的弧形左旋走滑断裂带。区内高山耸峙, 沟谷深邃, 相对高差悬殊, 河谷呈“U”字形^[2,3]。地层岩性为元古代的花岗岩, 岩体较破碎, 卸荷松弛强烈, 主要发育四组优势结构面: $1. 40^\circ \angle 43^\circ$;

收稿日期: 2012-11-29 修回日期: 2013-04-22 网络出版时间: 2013-05-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130518.1016.007.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(2008CB425801); 中国地质调查局工作项目(1212010914010); 重点实验室基金(SKLG2009Z001)

作者简介: 蒋发森(1986-), 男, 四川内江人, 硕士研究生, 主要从事地质工程方面研究。E-mail: jiangfasen1@163.com

$^{\circ} 112^{\circ} \angle 70^{\circ}$; $\gg 103^{\circ} \angle 40^{\circ}$; $\frac{1}{4} 211^{\circ} \angle 42^{\circ}$ 。

2 滑坡基本地质特征

章古滑坡是一个巨大的岩质滑坡,其母岩成分为元古代花岗岩。依据 ESR 测年,章古滑坡约形成于 2 6 万年前。滑坡体平面形态呈“圈椅”状,主滑方向 95° ,滑坡体纵向最大长度约为 680 m,前缘最大横向宽度约为 1 500 m,面积约 $7.5 \times 10^5 \text{ m}^2$,滑坡体厚 70 0~ 350 m,平均厚度为 250 m,体积约 $19\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$ (图 1),属特大型滑坡(体积大于 $1\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$)。滑坡后缘为一大的平台,平台高程约为 1 785 m,前缘临河为陡坎,平均坡度约 50° ,坡脚高程约 1 400 m。堆积体左、右侧各发育一条冲沟,将滑坡体分割为一孤立体。依据钻孔资料和 MT 物探解译,滑坡剪出口被河流冲积物所覆盖(图 2、3),滑坡体主要由块石和碎石组成,堆积体中间部位则由碎裂结构的巨型块石组成。滑坡土体以黄灰色为主,局部呈灰绿色,分选级配较差。碎石多为棱角状,巨型块石多为低强度、低密度的碎裂状花岗岩体。滑坡体两侧缘的物质样本显示,块碎石呈棱角状,粒径 20~ 60 cm,少量块石粒径可达 1 0 m,块石的主要物质成分为花岗岩。滑坡体横向谷表层的采砂点露头可验证,该堆积体由块石、碎石组成。滑坡体后缘的物质组成与侧缘的相似,均为碎块石土,但是粒径却不相同,且受长时间风化的影响,后缘碎石土中泥质粉砂、辉绿岩碎屑的成分有所增加。

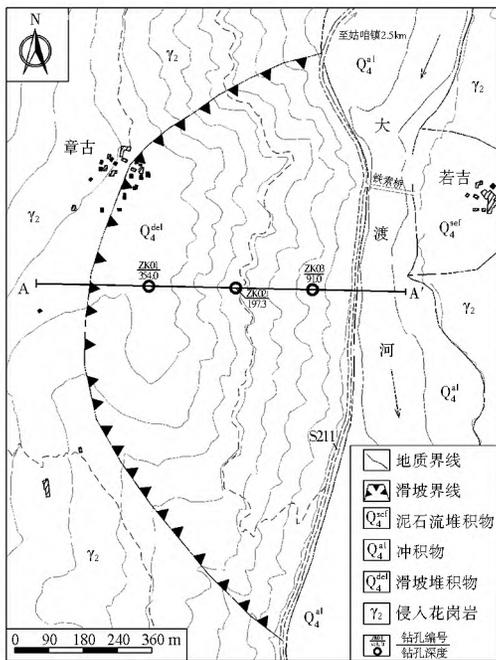


图 1 章古滑坡工程地质示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the engineering geology of the Zhanggu Landslide

滑带区:依据 MT 物探解译成果,并与周围环境相比较,章古滑坡滑带区显示为明显的低电阻率区域(图 2),滑带深约 100~ 350 m,其中滑坡体前缘埋深较浅,中部较深,后缘再次变浅。滑带区总体呈反“L”形,其中后半段较陡,长 380 m,倾角约 70° ,与前文涉及的第 $^{\circ}$ 组结构面相吻合;前半段较缓,长 440 m,倾角约 20° ,与第 \gg 组结构面对应。基于 MT 物探解译的低电阻率效应,并与其他发育于大渡河中上

游的地震滑坡相类比,推测章古滑坡的滑带主要由碎石和粘土组成。实地调查中,仅在滑坡体后缘平台前沿斜坡段发现部分细小裂缝,未发现大变形迹象。

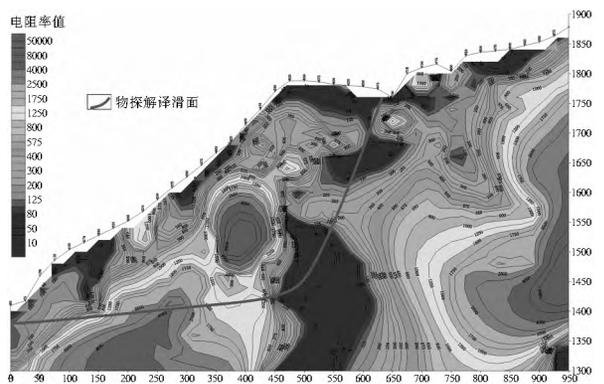


图 2 章古滑坡 MT 物探解译剖面

Fig. 2 Cross section of the MT geophysical interpretation of the Zhanggu Landslide

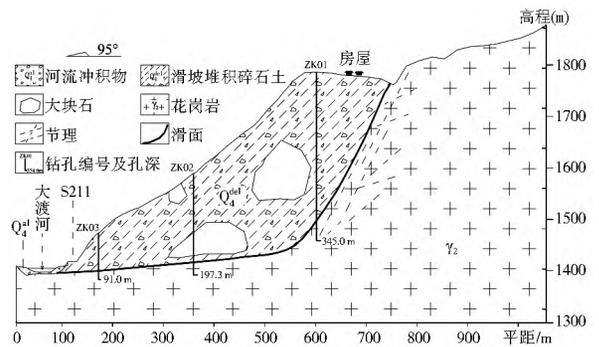


图 3 滑坡工程地质剖面图(A-A')

Fig. 3 Cross section of the engineering geology of the Zhanggu Landslide(A-A')

3 滑坡演化机制分析

大渡河地处川滇南北向构造带北段,地质历史时期经历多次近东西向挤压与拉张,形成近南北向中陡倾结构面,河流流向与之平行或小角度相交,更为不利的是,区域最大主应力方向与河流垂直,导致谷底及谷坡应力集中程度高,卸荷作用强烈。在大渡河三级阶地形成后,川西经历了一次长时间的强烈侵蚀阶段,当时的河床直接下切至现今基覆界面以下^[1,2]。这次强烈的河谷下切活动,导致岸坡岩体下部从应力高度集中阶段过渡到卸荷松弛阶段,破坏了斜坡岩体结构的完整性,从而使岩体抗剪强度大幅度降低。最终,一次大地震触发斜坡失稳形成章古滑坡。章古滑坡从堰塞到翻坝,经过长期侵蚀演化,最终形成现今地貌形态。其演化过程可概述为以下四个阶段:河谷卸荷松弛、大渡河侧蚀、强震滑坡和翻坝侵蚀,各阶段详情如下:

3.1 河谷卸荷松弛阶段

大渡河演化历史揭示,河谷可以区分为宽谷期和峡谷期两个阶段。二者的转换在中更新世中期^[4]。进入峡谷期后,河谷强烈下切,且河谷走向与最大主应力方向近于正交,卸荷十分强烈。高陡临空面形成过程中,在河谷二次应力场作用下,顺坡向次生裂隙利用并迁就早期方向有利的顺坡向陡

缓裂隙发展, ° 组结构面拉张, 沿 » 组结构面剪切, “锁固段”的应力积累将使这部分岩体进入累进性破坏阶段。在累进性破坏的作用下“锁固段”长度越来越短, 边坡的稳定性大幅度降低(图 4a)。

3.2 大渡河侧蚀阶段

章古滑坡对岸存在一泥石流沟, 其物源区为大渡河断裂通过区域, 该区岩体破碎, 崩坡积物发育, 物源十分丰富。大量泥石流堆积物挤占河道, 迫使大渡河向右岸偏移, 右岸侧蚀作用加剧, 加上斜坡前期卸荷松弛, 安全储备低, 而坡脚处破碎岩体在大渡侧蚀作用下不断被带走, 最终在斜坡前缘形成高陡的临空面, 斜坡表层岩体稳定性处于基本稳定状态(图 4b)。

3.3 强震触发滑坡阶段

加之章古滑坡位于高地震烈度区(Ⅷ度), 距鲜水河断裂仅 10 km。在一次强震作用下, 地处高位的斜坡岩体因地形等影响对地震波具有明显的放大效应(据青川地震监测结果, 水平地震峰值加速度放大 2-3 倍), 即坡体上部的地震动峰值加速度可达 0.4-0.6 g, 如此强大的惯性力将处于临界状态的高位岩体抛出滑源区并瞬间堵塞大渡河(图 4c)。据堰塞砂层测年, 章古滑坡形成年代距今约 2.6 万年前。

3.4 翻坝侵蚀阶段

滑坡体将大渡河堵塞后, 河水位迅速上升, 在滑坡体上游河段形成近 30 km 长的堰塞湖(根据堰塞堆积分布, 在金汤河口以上), 经历很长一段时期的沉积作用后, 形成深厚的河床覆盖层(距章古滑坡 5 km 的黄金坪电站河床覆盖层厚达 133 m)。随着河水位的不断上升, 湖水最终翻坝, 并在长期的侵蚀作用下, 大渡河重新切穿滑体, 恢复畅通, 伴随左岸泥石流堆积扇的渐进性挤占河道, 导致大渡河侵蚀右岸, 在其强烈的侵蚀作用下, 章古滑坡体物质不断带走, 最终形成现今的地貌形态(图 4d)。据堆积体结构对比, 分布于章古滑坡对岸的花岗岩块石残留体与滑坡堆积体形成于同一时期。

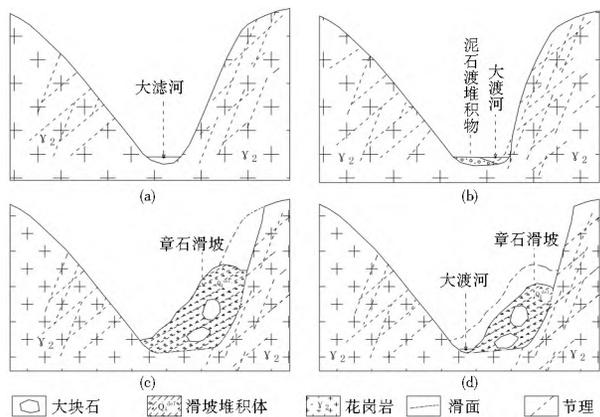


图 4 滑坡演化过程简图

Fig. 4 Evolution of the Zhanggu Landslide

4 滑坡稳定性数值模拟分析

滑坡堆积体的变形及稳定性分析是一个复杂的空间问题。其影响因素除滑坡体本身结构条件(如岩性结构、滑面形态等)以外, 还与滑坡体平面及空间分布形态有关, 因此, 针对不同类型的滑坡, 需采用不同的分析方法和计算公式评

价其稳定状态^[6-8]。本次采用美国 Itasca 咨询公司开发的三维快速拉格朗日分析程序 FLAG-3D 对章古滑坡稳定性进行分析。FLAG-3D 可以准确地模拟材料的屈服、塑性流动、软化直至有限大变形, 现已在岩土工程领域中得到广泛运用^[9-11]。

4.1 模型的建立

根据野外调查、测绘、物探等资料建立如图 5 所示模型。模型顺河方向(Y 轴, 滑坡横宽方向, 上游方向为正)宽 1 635 m, 垂直河谷方向(X 轴, 滑坡纵长方向, 顺坡向为正)长为 955 m, 模型高度(Z 轴, 竖直方向, 垂直向上为正)810 m(模型底面高程: 1 100 m, 顶部高程: 1 910 m)。边坡模型的基岩和滑坡体采用实体单元模拟, 滑面采用接触面模拟, 并将模型网分为 79 700 个四面体单元, 共计 15 775 个节点。模型底面采用三向约束, 四周采用法向约束, 地表为自由面。采用较常用的弹塑性模型, 屈服准则为莫尔-库仑准则。通过室内岩土体试验及工程地质类比估算相结合, 模型中岩土体物理力学参数综合取值见表 1。计算时, 仅考虑岩土体的自重应力场, 不考虑构造应力场。

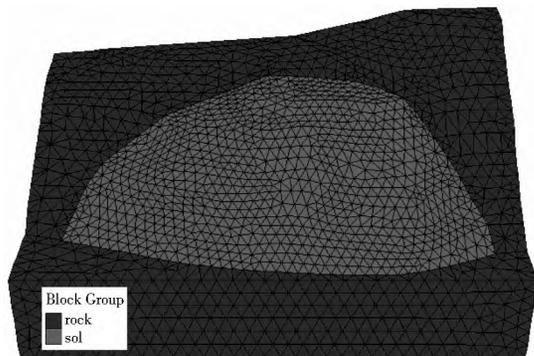


图 5 三维有限元模型

Fig. 5 The three dimensional finite element model

表 1 计算模型中各介质力学参数

Table 1 Mechanical parameters of each medium in the calculation model

岩土名称	密度 (kg·m ⁻³)	黏聚力 (MPa)	内摩擦角 (°)	体积模量 (GPa)	剪切模量 (GPa)	抗拉强度 (MPa)
滑坡体	2 500	0.08	33	2.88	1.26	0
花岗岩	2 600	1.5	43	43.0	30.0	6.00
接触面	-	黏聚力 (MPa)	内摩擦角 (°)	法向刚度 (GPa·m ⁻¹)	切向刚度 (GPa·m ⁻¹)	-
滑面	-	0.03	24	1.00	1.00	-

4.2 滑坡稳定性评价

(1) 根据系统不平衡力曲线分析滑坡稳定性。图 6 为模型计算得出的系统不平衡力演变过程曲线。由图可知, 初始 500 步计算过程中, 系统不平衡力波动较大, 随着计算的进行, 整个系统的不平衡力逐渐减小, 最终较好收敛。系统不平衡力演变过程曲线表明: 章古滑坡形成后随着时间的推移, 滑坡体在自重应力作用下固结, 变形和应力发生调整, 最终达到自我平衡。因此, 章古滑坡整体处于稳定状态, 但局部存在次级滑坡的可能。

(2) 根据模型整体位移分析滑坡稳定性。模型总位移等值线分布详情见图 7, 从整体上看, 模型变形主要集中在滑坡

后缘平台前沿区域,总位移最大值为 31.5 cm,由模型 X 方向位移等值线图(图 8)可知,滑坡体在 X 方向,即主滑方向上位移值较小,最大值仅为 11.3 cm,而模型竖向(Z 方向)位移分量较大,最大值约 30 cm,因此滑坡体变形以重力作用下的压缩变形为主。竖向位移分布规律与总位移分布规律大体一致,位移主要集中在滑坡后缘平台前沿区域,也是滑坡体厚度最大的区域;而 X 位移高值区主要集中在滑坡体后缘平台前斜坡段。由于滑坡体较厚(70~350 m),固结过程中产生上述变形是合理的,滑坡体整体处于稳定状态,其平台前斜坡段可能产生次级滑坡。

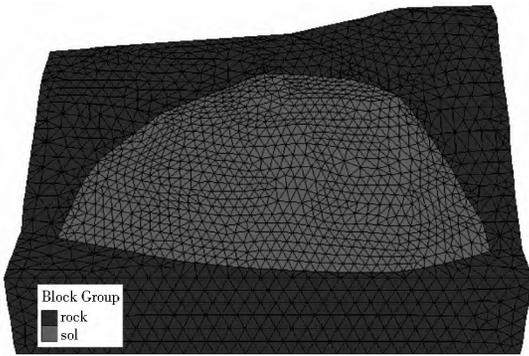


图 6 滑坡体系统不平衡力演化曲线

Fig. 6 Evolution curve of system unbalanced force of the Zhanggu Landslide

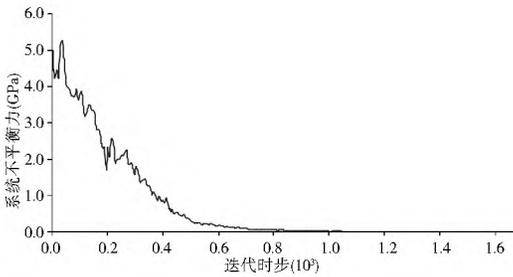


图 7 总位移等值线

Fig. 7 Isolines of total displacement

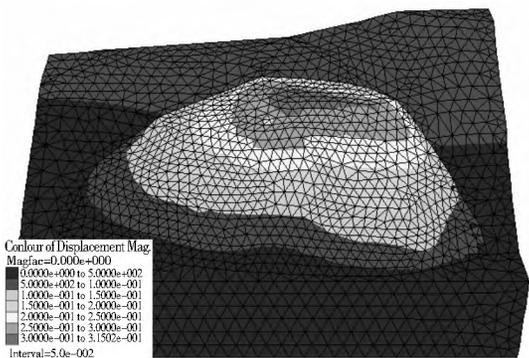


图 8 X 方向位移等值线

Fig. 8 Isolines of displacement in the x direction

(3) 根据监测点位移分析滑坡稳定性。从各监测点位移曲线看,滑坡形成后,位移迅速增大,但随着迭代的进行位移增长速率逐渐减小,最终均趋于稳定状态,其中, H2、H3、H4、H5、H6 监测点的位移稳定值分别约为 30.9 cm、25.7 cm、13.1 cm、6.63 cm、19.4 cm(图 9)。从图 9 中可以看出,滑坡体初期变形较大(总位移曲线快速攀升),之后经历一段

变形波动阶段,然后随着位移的逐渐增大,位移增量逐渐减小,总位移变形最终趋于一稳定值,滑坡体趋于稳定。因此,章古滑坡整体上是处于稳定状态的,仅局部小范围区域可能产生失稳。

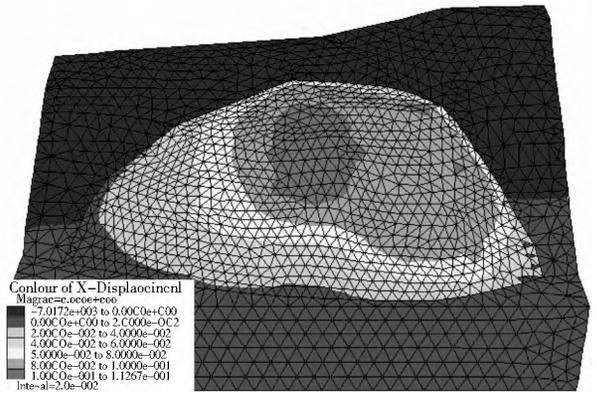


图 9 监测点位移时步曲线

Fig. 9 Displacements at the monitoring points

5 结论

通过野外调研、勘查及室内试验、数值模拟等方法,对章古滑坡的演化机制及稳定性进行研究,得出以下几点主要结论:

- (1) 章古滑坡为古地震岩质滑坡,滑坡体面积约 $7.5 \times 10^5 \text{ m}^2$, 体积 $19\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$, 属特大型滑坡。
- (2) 章古滑坡地处川滇南北向构造带北段,卸荷作用强烈,近南北向中陡倾结构面发育,加大渡河侧蚀作用强烈,使岸坡前缘形成高陡临空面,最终在强震作用下,斜坡失稳形成滑坡,滑坡体阻塞大渡河,经翻坝侵蚀,最终形成现今形态。其演化过程主要包括四个阶段:河谷卸荷松弛 \rightarrow 大渡河侧蚀 \rightarrow 强震滑坡 \rightarrow 翻坝侵蚀。
- (3) 综合现场调查及 FLAG-3D 数值模拟分析成果,章古滑坡体现阶段整体处于稳定状态,但局部范围可能发生次级滑坡。

参考文献(References):

- [1] 巴仁基,王丽,郑万模,等.大渡河流域地质灾害特征与分布规律[J].成都理工大学学报(自然科学版),2011(5):529-537. (BA Ren ji, WANG Li, ZHENG Wan mo, et al. Characteristics and Distribution of the Geology Disasters of the Dadu River in Sichuan, China[J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011(5): 529-537. (in Chinese))
- [2] 王新民,裴锡瑜.康定-泸定地区强震活动与地震宏观破坏研究[J].四川地震,1998(Z1):6-27. (WANG Xin min, PEI Xi yu. The Earthquake Activity and Macroscopic Failure of Kangding-Luding[J]. Earthquake Research in Sichuan, 1998(Z1): 7-46. (in Chinese))
- [3] 徐飞飞.大渡河黄金坪水电站后山高陡岩质边坡稳定性分析[J].路基工程,2011(4):182-184. (XU Fei fei. Stability Analysis of High Steep Rock Slope in Rear Mountain of Huangjinping Hydropower Station in Dadu River[J]. Subgrade Engineering, 2011(4): 182-184. (in Chinese))

(下转第 146 页)

- volution and Renewable Way of Groundwater in Guanzhong Basin [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2006: 1-3. (in Chinese)
- [12] 田春声, 李云峰, 郑书彦, 等. 关中盆地环境水文地质问题 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1995. (TIAN Chunsheng, LI Yurfeng, ZHENG Shuyan, et al. Environmental Hydrological Geological Problems [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1995. (in Chinese)
- [13] 陈胜可. SPSS 统计分析从入门到精通 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 31-39, 63-72. (CHEN Shengke. SPSS Statistical Analysis Savvy [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010: 31-39, 63-72. (in Chinese)
- [14] 田春声, 王丽艳. 关中盆地潜水化学特征及其变化趋势 [J]. 西安地质学院学报, 1993, 15: 10-14. (TIAN Chunsheng, WANG Liyan. The Phreatic Chemical Characteristics and Its Developing Tendency in Guanzhong Basin [J]. Journal of Chang'an University Earth Science Edition, 1993, 15: 10-14. (in Chinese)
- [15] 段磊, 王文科, 曹玉清, 等. 天山北麓中段地下水水化学特征及其形成作用 [J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(9): 29-34. (DUAN Lei, WANG Wenke, CAO Yurqing, et al. Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanics Groundwater in the Middle of Northern Slope of Tianshan Mountains [J]. 2007, 21(9): 29-34. (in Chinese)

(上接第 141 页)

- [4] 熊发挥, 肖渊甫, 张林. 大渡河中游泸定—石棉段阶地特征及河谷发育史探讨 [J]. 四川地质学报, 2009(4): 379-383. (XIONG Fahui, XIAO Yuanfu, ZHANG Lin. An Approach to Developmental History of the Luding Shimian Sector of the Dadu River Valley [J]. ACTA Geologica Sichuan, 2009(4): 379-383. (in Chinese)
- [5] 王运生, 李文纲, 黄润太, 等. 大渡河谷底卸荷松弛现象及其形成机制 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2007(4): 379-383. (WANG Yunsheng, LI Wengang, HUANG Runtai, et al. The Unloaded and Relaxed Phenomena in the Valley Bottom of the Daduhe River and Its Genetic Mechanism [J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2007(4): 379-383. (in Chinese)
- [6] Sarma S K. Stability analysis of embankment sand slopes [J]. Geotechnique, 1979, 105(12): 1511-1524.
- [7] 王瑞江, 吴树仁, 胡道功, 等. 滑坡稳定性三维数值模拟分析 [J]. 长春科技大学学报, 1999(3): 267-271, 27. (WANG Ruijiang, WU Shuren, HU Daogong, et al. Analysis on Landslide Stability by Using Three Dimensional Numerical Simulation [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 1999(3): 267-271, 27. (in Chinese)
- [8] Jaehong K, Sangseom J, Seongwan P, et al. Influence of Rainfall induced wetting on the stability of slopes in weathered soils [J]. Engineering Geology, 2004, 75: 251-262.
- [9] 张利洁, 黄正加, 雷菁. FLAG-3D 在边坡岩体稳定性分析中的应用 [J]. 岩土力学, 2005(S2): 61-64. (ZHANG Lijie, HUANG Zhengjia, LEI Jing. Application of FLAG-3D to Stability Analysis of Slope Rock Mass [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005(S2): 61-64. (in Chinese)
- [10] 孙书勤, 黄润秋, 丁秀美. 天台乡滑坡特征及稳定性的 FLAG-3D 分析 [J]. 水土保持研究, 2006(5): 30-32. (SUN Shuqin, HUANG Runqiu, DING Xiurui. Tiantai Landslide and Its Stability Analysis with FLAC(3D) [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006(5): 30-32. (in Chinese)
- [11] 张雪东, 陈剑平, 黄润秋, 等. 岬爬滑坡稳定性的 FLAG-3D 数值模拟分析 [J]. 岩土力学, 2003(S1): 113-116. (ZHANG Xuedong, CHEN Jianping, HUANG Runqiu, et al. FLAG-3D Numerical Simulation Analysis of Stability of Gapa Landslide [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003(S1): 113-116. (in Chinese)