

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2017.04.16

基于物理模拟试验的岩质滑坡地表位移分析

唐 鹏,陈国庆,黄润秋,路晓东

(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,四川 成都 610059)

摘要:三段式岩质滑坡是一种典型的斜坡变形破坏模式,运用二维地质力学加载系统对其变形破坏全过程进行物理模拟试验研究,采用激光位移计对坡顶和坡脚位置进行位移监测。结果表明:位移监测曲线总体上表现为锁固段经历长时间的能量积累与应力调整后的突发脆性破坏;由于软弱夹层具有蠕滑特性,前缘蠕滑阶段呈现出与土质滑坡相似的初始变形→等速变形→加速变形特征;后缘拉裂阶段作为最短暂的变形阶段,其位移监测曲线表现为“减-增-减-增”的“W”型变化趋势;锁固段是三段式岩质边坡维持稳定的关键所在,其受剪变形的顺序为先上后下,损伤变形由端部向中部递进,最终锁固段剪断形成突发脆性破坏,滑坡高速启动。

关键词:岩质滑坡;三段式滑坡;物理模拟;地表位移分析;锁固段

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2017)04-0105-06

Surface displacement analysis of rock slope based on physical simulation tests

TANG Peng, CHEN Guoqing, HUANG Runqiu, LU Xiaodong

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

Abstract: Three-segment rockslide is a kind of unique mode from deformation to failure of a slope. Based on a 2-D geomechanics loading system, the physical simulation of the whole process from deformation to failure of the three-segment slide is accomplished. Displacement of the head and foot of the slope is tested with the laser displacement system. The experimental results indicate that the displacement monitoring curve generally shows the sudden brittle failure after the energy accumulation and stress adjustment. Because of the creep deformation of weak intercalation, the stage of creep consists of the initial deformation, the constant velocity deformation and the acceleration deformation just like that of a soil landslide. The stage of edge cracking is the most short-lived deformation stage, the displacement monitoring curve of which shows a “W” type change trend of “minus - increase-decrease-increase”. The locking section is the key of the stability of the rockslide, the foot of which is sheared after the top of which is sheared. Repeatedly, the damage deformation is progressive from the edge to the middle part. Eventually, the locking section is suddenly cut off. As a result, rockslide starts at a high speed.

Keywords: rockslides; three segments slides; physical simulation; displacement analysis of surface; locking section

三段式变形破坏模式是岩质边坡常见地质力学变形破坏模式之一^[1],此类边坡的变形破坏具有分

三段发育的特征,即前缘蠕滑、后缘拉裂和中部锁固段剪断。黄润秋^[2]指出,三段式变形破坏模式的边

收稿日期: 2016-10-14; 修订日期: 2016-12-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41130745、41521002、41272330); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB733202)

第一作者: 唐鹏(1993-),男,硕士研究生,主要从事岩土体稳定性及工程环境效应研究。E-mail:tp_tangpeng@126.com

通讯作者: 陈国庆(1982-),男,教授,主要从事地质灾害防治和岩石力学研究。E-mail:chgq1982@126.com

坡具有独特的地质结构:坡体主体由相对均值的脆性岩体或半成岩体构成,坡脚发育近水平或缓倾坡外的软弱结构面;或以坚硬岩体为主,但夹有相对较薄的缓倾坡外的软弱夹层。本文将这种具有独特地质结构并分三段发育的滑坡称为三段式岩质滑坡,此类滑坡常表现为突发性高速远程滑动,造成重大人员伤亡和经济损失,因此三段式岩质滑坡研究具有重大现实意义。

国内外学者对三段式岩质滑坡进行的大量研究主要是基于野外调查的宏观地质分析和基于数值模拟的地质过程再现。李季等^[3]以龙羊峡近坝库岸滑坡为研究对象,分析了三段式岩质滑坡高速滑动的成因机制。胡卸文等^[4]通过对唐家山滑坡的野外调查研究分析了三段式岩质滑坡的滑后运动机制。张倬元、黄润秋等^[5~6]通过野外地质调查,从岩体结构角度指出,三段式岩质滑坡坡体稳定性主要受控于锁固段,随着蠕滑和拉裂的发展锁固段应力逐步积累,最终能量突然释放形成高速滑坡。汤镇江^[7]在地质调查资料分析的基础上对三段式岩质滑坡进行数值模拟并分析了其稳定性的影响因素。E. Eberhardt^[8]和 Y. Guglielmi^[9]利用 CWFS 本构模型模拟了大型岩质边坡锁固段的破坏过程。张倬元、刘汉超^[10]基于野外调查研究提出了依据后缘拉裂深度进行三段式岩质滑坡预警预报的思路和边坡失稳临界深度计算方法。黄润秋等^[11]提出了考虑锁固段对边坡稳定性有利作用的评价方法;陈国庆等^[12]采用动态和整体强度折减法分析了岩质滑坡渐进失稳过程中的稳定性。在室内试验方面,唐鹏等^[13]设计了三段式岩质滑坡物理模型并由此开展了二维地质力学物理模拟试验,再现了三段式岩质滑坡变形破坏全过程并分析了锁固段应变规律,但对三段式岩质滑坡的滑体运动特征未深入研究。在滑坡地表位移研究方面,黄海峰等^[14]提出了平滑先验分析法,结合滑坡变形机制分析有效提高了滑坡位移预测精度。

前人在三段式岩质滑坡方面所做的大量工作大多以成因机制分析和稳定性评价为主,较少涉及三段式岩质滑坡地表位移研究。为深入揭示锁固段变形破坏机制并为三段式岩质滑坡稳定性评价和临滑预警奠定基础,本文基于物理模拟试验,采用激光位移计对坡顶和坡脚部位进行位移监测,从坡表变形角度分析了三段式岩质滑坡变形破坏全过程,细观深入地分析了前缘蠕滑、后缘拉裂和锁固段受剪的变形特征。

1 三段式岩质滑坡物理模拟试验

1.1 试验设计

实际滑坡案例是复杂多样的,为了使得本次针对岩质边坡三段式变形破坏模式的物理模拟研究具有广泛代表性,试验原型采用文献[2]提出的大型岩质滑坡三段式变形破坏模式抽象概化模型,通过控制物理模型结构实现对三段式滑坡独特地质结构的定性化模拟。

表 1 模型相似材料及质量配比

Table 1 Model similar materials and mass ratio /g				
模型区域	水泥	石膏粉	石英砂	水
I	37	47	142	33
II	36	52	156	36
III	21	47	146	35
IV	1 955	1 955	5 865	1 368

本次试验采用唐鹏等^[13]提出的具有分区特性的三段式岩质滑坡物理模型和数控加压探顶部加压的加载方式(图 1)。模型整体被分为四个部分(图 2a),第 I 部分模拟后缘拉裂区;第 II 部分为中部锁固段;第 III 部分模拟边坡软弱基座,为蠕滑区;第 IV 部分为模型主体,模拟边坡滑床及滑体。选取石膏、水泥、石英砂、水作为制样材料,模型各部分材料用量如表 1 所示,区域 I、II、IV 普通养护 18 d,区域 III 普通养护 6 h。本试验在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二维地质力学系统上进行,在坡顶和坡脚部位分别布置激光位移计以监测坡表变形。试验采用的激光位移计灵敏性好、精度高,每隔 0.016 s 捕捉一组距离数据(平均每秒捕捉 60 余组数据),各组数据均精确到 0.000 1 mm。

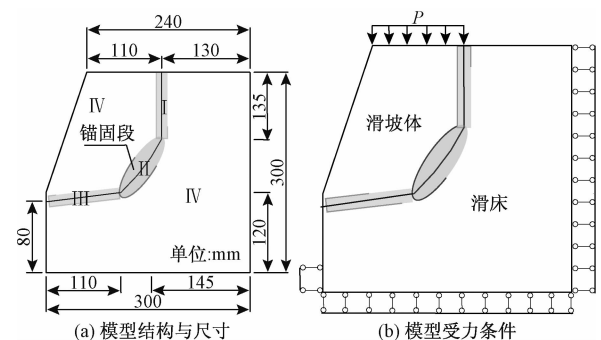


图 1 模型设计示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the model design

1.2 坡表位移数据处理

本文需要通过数据处理得到坡顶部位水平方向位

移变化量。试验中滑体只有两种基本的运动形式:绕锁固段的旋转和垂向坐落式平移(图2)。当滑体绕锁固段旋转(图2a)时,坡顶激光位移计可监测到 $\Delta S = S_2 - S_1$;如果在坡顶水平方向布设有激光位移计,那么该激光位移计将监测到位移变化量 X 。显然,存在几何关系 $X = \Delta S \times \cot \beta$ 。因为试验中偏转位移量极小(不超过0.366 mm),所以可认为 $\cot \alpha = \cot \beta$ 。因此,有 $X = \Delta S \times \cot \alpha$ 。当滑体坐落式平移(图2b)时,坡顶激光位移计可监测到 $\Delta S = S_2 - S_1$;如果在坡顶水平方向布设有激光位移计,那么该激光位移计将监测到位移变量 X 。显然, ΔS 与 X 之间有严格的几何关系 $X = \Delta S \times \cot \alpha$ 。

试验中滑体只有三种运动形式:①以锁固段为中心的偏转;②坐落式平移;③前面两种方式的复合运动。依据前述分析,滑体在各种运动模式下均可计算坡顶水平位移值:

$$X = \Delta S_n \times \cot \alpha = (S_n - S_0) \times \cot \alpha \quad (1)$$

式中: X ——斜坡旋转时坡面顶部的水平位移值/mm,

位移量的正负值依据图中坐标系确定;

S_0 ——激光位移计采集的初始距离值/mm;

S_n ——激光位移计第 n 次测量距离值/mm;

α ——坡面倾角,模型设计为 75° 。

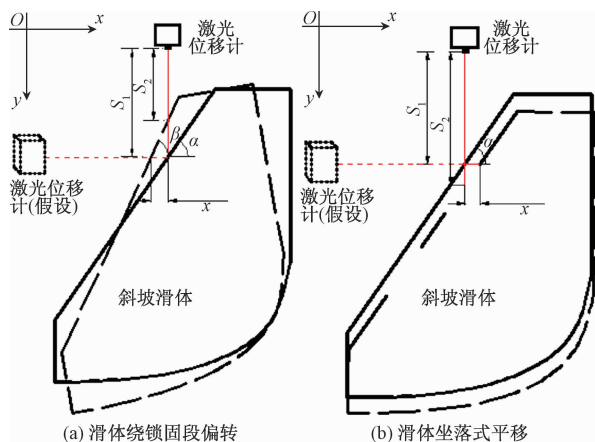


图2 试验中滑体的运动形式

Fig. 2 Movement form of the sliding body in the experiment

2 试验结果分析

“滑移—拉裂—剪断”三段式岩质滑坡的变形破坏全过程具有分三段发育特征,即下部沿近水平或缓倾坡外(内)结构面蠕滑、后缘拉裂和中部锁固段剪断。

2.1 滑坡变形破坏全过程分析

从坡顶全过程位移监测曲线(图3)可见,三段式

岩质滑坡具有厚积薄发特点,其变形破坏过程总体上表现为以锁固段为核心的能量逐渐积累和能量突然释放。试验全过程历时364 s,锁固段经过364 s的应力调整和能量积累,最终突发性破坏,导致滑坡高速启动。

试验初期,边坡模型经历短暂调整后迅速进入前缘蠕滑阶段(图4①):坡顶受拉且位移持续增大,出现两个明显峰值,此时坡顶结构面受压,滑体在坡顶位置向坡内间断性缓慢加速运移;坡脚出现两次向坡外的位移峰值,最大量值可达0.366 mm,前缘软弱基座物质塑性挤出,后缘坡体沿竖向引导缝生成竖向微裂隙(图5①)。从第100 s开始,进入后缘拉裂阶段(图4②):试验模型坡顶部位跨过初始位置并持续向坡外运动,结构面拉位移出现两次峰值,最大位移量值可达0.025 mm;随着两次显著拉裂,微裂隙加宽加深,形成明显拉裂缝(图5②)。试验进行到第150 s,坡顶位移回弹,坡顶结构面由受拉状态转变为受压状态,后缘拉裂阶段结束,坡体稳定性完全受控于锁固段。此后,坡表位移无显著变化(图4③),锁固段能量不断聚集(图5③),应力状态不断调整,最终锁固段剪断,能量瞬间释放,滑体弹射而出(图4④、图5④)。

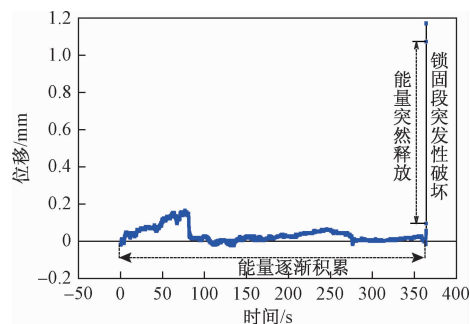


图3 坡顶位移-时间曲线图

Fig. 3 Displacement-time curve of the slope top

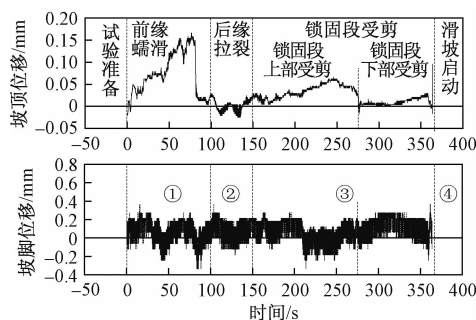


图4 位移监测曲线及变形阶段划分

Fig. 4 Displacement monitoring curve and deformation stage

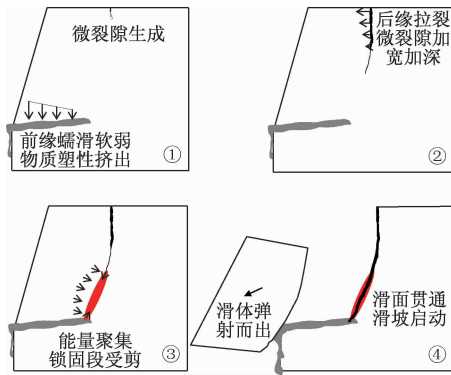


图 5 滑坡模型破坏示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the landslide model failure

2.2 滑坡变形各阶段细观分析

(1) 前缘蠕滑

三段式岩质滑坡前缘具有缓倾坡外(内)的软弱基座,因此其变形具有蠕滑特性。本次试验发现,三段式岩质滑坡前缘蠕滑阶段具有与土质滑坡相似的变形特征,即“初始变形→等速变形→加速变形”的累进性变形过程(图 6),这对三段式岩质滑坡的稳定性评价和监测预警具有指导意义。

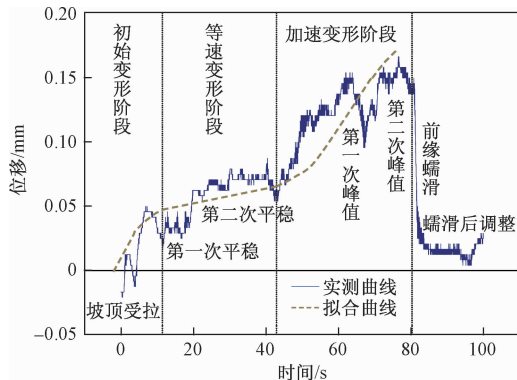


图 6 前缘蠕滑的累进性变形过程

Fig. 6 Progressive deformation process of the front creep

前缘蠕滑阶段为 0 ~ 100 s (图 8), 占总变形时长的 27.5%, 分析发现: 坡顶位移经历了位移调整→初始峰值(第 8 s)→第一次平稳(10 ~ 20 s)→第二次平稳(20 ~ 42 s)→第一次峰值(第 60 s)→第二次峰值(第 78 s)→前缘蠕滑(第 80 s)→蠕滑后调整(80 ~ 100 s)的各个阶段。试验初期坡顶受拉, 随后应力状态迅速调整为受压状态, 之后再次受拉。随后压应力维持在较高水准, 位移量越过零点并直线飙升, 坡顶进入持续受压状态。坡顶位移量在第 8 s 时达到初始峰值, 随后在拉应力作用下减小 0.025 ~ 0.05 mm, 并在此范围内交替增减, 此时的拉、压应力不断调整, 应力

重分布现象显著。试验进行到第 20 s, 坡顶位移量突变, 进入 0.05 ~ 0.08 mm 这一新的范围并持续 22 s, 这是位移量第一次出现相对平稳。其中在第 20 ~ 30 s 位移量以“稳-增-稳-减-稳-增”的特征保持缓慢增长, 第 30 ~ 38 s 位移量值恒定为 0.075 mm, 随后坡顶受拉, 坡顶位移量于第 43 s 降为 0.05 mm, 与此同时坡脚出现明显的前缘蠕滑现象, 向坡外的最大位移量达到 0.28 mm。坡顶持续受压, 第 43 ~ 60 s 增速表现为“快-慢-快”的特征, 到第 60 s 坡顶出现受压位移量的第一次峰值 0.17 mm, 随后 3 s 内均受拉, 位移量跌为 0.09 mm。第 63 ~ 78 s 坡顶位移保持增加态势, 于第 78 s 出现第二次峰值 0.19 mm。峰值过后坡顶位移缓慢减小, 在第 79 ~ 80 s 坡顶拉应力猛增, 位移量直线下降。第 85 s 坡体出现大规模的前缘蠕滑现象, 坡脚向坡外的位移量最大值达到 0.366 mm。作为对前缘蠕滑的响应, 坡顶位移在第 96 s 出现位移量谷值, 滑体在坡顶位置回归初始状态。

(2) 后缘拉裂

后缘拉裂阶段为第 100 ~ 150 s, 占总变形时长的 13.7%, 结合图 7 对此阶段进行细观分析发现, 坡顶位移—时间图像表现为“减-增-减-增”的“W”型变化趋势。拉位移的出现是后缘拉裂阶段的开始标志, 滑体在坡顶位置向坡外运动, 第 105 s 位移值越过 0 点转变为负(坡外方向), 并于第 112 s 出现第一次拉位移峰值; 从第 112 s 开始应力重分布, 第 120 s 后坡顶结构面再次恢复受压状态。第 125 ~ 135 s 是第二次显著拉裂阶段, 坡顶位置向坡外的最大水平位移量可达 0.025 mm。后缘拉裂之后, 坡顶迅速恢复其受压状态, 位移量不断增加。

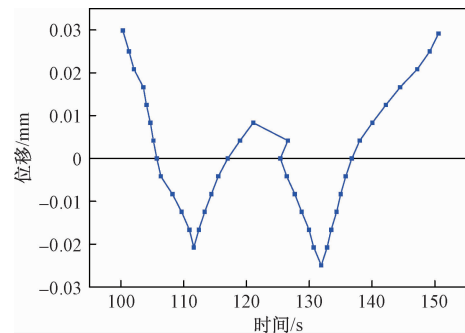


图 7 后缘拉裂阶段坡顶位移-时间曲线图

Fig. 7 Displacement of the slope top-time curve of the edge cracking stage

(3) 锁固段受剪

锁固段的破坏虽然表现出突发脆性破坏特征, 但

具有长期的能量积累和应力调整过程。锁固段受剪阶段为 150 ~ 364 s, 结合图 8 对此阶段进行细观分析, 结果显示: 锁固段受剪的顺序为先上段受剪再下段受剪, 如此交替往复, 损伤变形由两端向中部递进, 最终锁固段剪断形成突发脆性破坏, 滑坡高速启动。锁固段受剪历时 214 s, 占总变形时长的 58.8%, 表明三段式岩质滑坡稳定性主要受控于锁固段。

锁固段受剪阶段频繁的应力重分布将直接导致坡顶和坡脚的位移变化。因此本文认为当坡顶位移曲线出现正峰值时(坡脚位移归零)主要为锁固段上段受剪; 当坡脚位移曲线出现正峰值时(坡顶位移归零)主要为锁固段下段受剪。

试验第 150 ~ 210 s 为前期应力积累阶段, 锁固段上部 and 下部法向应力较小, 坡顶和坡脚的位移曲线均维持相对平稳状态。经过前期应力积累, 自第 210 s 起应力重分布, 锁固段法向应力在上部集中, 坡顶位移出现峰值, 坡脚位移量迅速归零, 锁固段上部强烈受剪。自第 260 s 开始, 锁固段应力再次调整, 法向应力由锁固段上部向下部转移, 坡顶位移量由峰值逐渐回落的同时坡脚位移量上升。第 280 ~ 340 s, 坡脚位移出现峰值, 坡顶位移归零, 法向应力在锁固段下部集中并引起剪切导致损伤。第 340 ~ 355 s 坡顶位移量增加, 坡脚位移量减小; 第 355 ~ 361 s 坡顶位移量减小, 坡脚位移量增加; 第 361 s 往后, 坡顶位移量增加, 坡脚位移量减小; 最后坡顶和坡脚位移量急速增加, 锁固段剪断。锁固段表现出典型突发脆性破坏, 破坏前应力不断调整, 并引起锁固段上、下部位交替受剪。

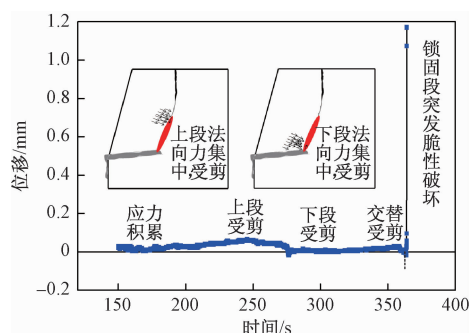


图 8 锁固段受剪阶段坡顶位移-时间曲线

Fig. 8 Displacement of the slope top-time curve when the locking section is sheared

3 结论

(1) 三段式岩质滑坡变形破坏过程总体上呈现为

锁固段经历长期的能量积累和应力调整后的突发脆性破坏。

(2) 前缘蠕滑阶段具有与土质滑坡相似的变形特征, 即呈现为初始变形→等速变形→加速变形的累进性变形过程, 这对三段式岩质滑坡的监测预警和稳定性评价具有指导意义。

(3) 后缘拉裂阶段为最短暂的变形阶段, 其位移监测曲线表现为“减-增-减-增”特征的“W”型变化趋势, 经历了两次显著拉裂破坏。

(4) 锁固段受剪是三段式岩质滑坡变形的主要阶段, 虽然锁固段表现为突发脆性破坏, 但其变形过程仍具有阶段性特征。锁固段受剪变形的顺序为先上后下, 如此交替往复, 损伤变形由端部向中部递进, 最终锁固段剪断形成突发脆性破坏, 滑坡高速启动。

参考文献:

- [1] 黄润秋. 中国西部地区典型岩质滑坡机理研究[J]. 地球科学进展, 2004, 19(3): 443 - 449. [HUANG R Q. Mechanism of large scale landslides in western china [J]. Advance in earth sciences, 2004, 19(3): 443 - 449. (in Chinese)]
- [2] 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): 443 - 444. [HUANG R Q. 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)]
- [3] 李季, 苏怀智, 赵斌. 龙羊峡近坝库岸滑坡成因机理研究[J]. 水电能源科学, 2008, 26(1): 117 - 118. [LI J, SU H Z, ZHAO B. Study on cause mechanism of slope landslides ahead Longyangxia dam [J]. Water Resources and Power, 2008, 26(1): 117 - 118. (in Chinese)]
- [4] 胡卸文, 黄润秋, 施裕兵, 等. 唐家山滑坡堵江机制及堰塞坝溃坝模式分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 181 - 189. [HU Y W, HUANG R Q, SHI Y B, et al. Analysis of blocking river mechanism of Tangjiashan landslides and dam-breaking mode of ITS barrier dam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 181 - 189. (in Chinese)]
- [5] ZHANG Z Y, HUANG R Q. Epigenetic recreation of rock mass structure and time-dependent deformation [C]// Proceed-Ing's of the 6th Congress of IAEGE. Rotterdam A A Balkema, 1990: 2065 - 2072.
- [6] 黄润秋, 张倬元, 王士天. 论岩体结构的表生改造

- [J]. 水文地质工程地质, 1994, 21(4): 17 - 21.
[HUANG R Q, ZHANG Z Y, WANG S T. The epigenetic modification of rock mass structure [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1994, 21(4): 17 - 21. (in Chinese)]
- [7] 汤镇江. 中部锁固段型岩质边坡稳定性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013. [TANG Z J. Stability analysis of the rock slope for the central locked section [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013. (in Chinese)]
- [8] Eberhardt E, Stead D, Coggan J S. Hybrid finite-/discrete-element modeling of progressive failure in massive rock slopes [C]// ISRM 2003-Technology roadmap for rock mechanics. South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003: 275 - 279.
- [9] Guglielmi Y, Cappa F. Regional-scale relief evolution and large landslides: Insights from geomechanical analyses in the Tinée Valley (southern French Alps) [J]. Geomorphology, 2009, 117(11): 121 - 129.
- [10] 刘汉超, 张倬元. 龙羊峡附近超固结粘土大型滑坡的形成机制及高速远滑的原因[J]. 成都地质学院学报, 1986, 8(3): 94 - 102. [LIU H C, ZHANG Z Y. The mechanism of huge landslides overconsolidated clay near Longyang Gorge damsite [J]. Journal of Chengdu College of Geology, 1986, 8(3): 94 - 102. (in Chinese)]
- [11] 黄润秋, 张倬元, 王士天. 高边坡稳定性的系统工程地质研究[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1991. [HUANG R Q, ZHANG Z Y, WANG S T. Study on the stability of high slope stability [M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1991. (in Chinese)]
- [12] 陈国庆, 黄润秋, 石豫川, 等. 基于动态和整体强度折减法的边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(2): 243 - 256. [CHEN G Q, HUANG R Q, SHI Y C, et al. Stability analysis of slope based on dynamic and whole strength reduction methods [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(2): 243 - 256. (in Chinese)]
- [13] 唐鹏, 陈国庆, 冉耀, 等. 三段式岩质边坡锁固段破坏试验研究[J]. 施工技术, 2016, 45(7): 95 - 98. [TANG P, CHEN G Q, RAN Y, et al. Test study of damage failure of locking section of three segments rock landslides [J]. Construction Technology, 2016, 45(7): 95 - 98. (in Chinese)]
- [14] 黄海峰, 易武, 易庆林, 等. 滑坡位移分解预测中的平滑先验分析方法[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(5): 95 - 100. [HUANG H F, YI W, YI Q L, et al. Smoothness priors approach in displacement decomposition and prediction of landslides [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(5): 95 - 100. (in Chinese)]

责任编辑: 张若琳

(上接第 104 页)

- [18] 张云, 陈梦芸. 击实黏土抗拉强度研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(4): 56 - 60. [ZHANG Y, CHEN M Y. Tensile strength of compacted clay [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(4): 56 - 60. (in Chinese)]
- [19] 汤连生, 王思敬. 湿吸力及非饱和土的有效应力原理探讨[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 83 - 88. [TANG L S, WANG S J. Absorbed suction and principle of effective stress in unsaturated soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1): 83 - 88. (in Chinese)]
- [20] 汤连生. 结构吸力及非饱和土的总有效应力原理探讨[J]. 中山大学学报, 2000, 39(6): 95 - 100. [TANG L S. Structure suction and principle of general effective stress in unsaturated soils [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2000, 39(6): 95 - 100. (in Chinese)]
- [21] 张云, 王惠敏, 鄢丽芬. 击实黏土单轴拉伸特性试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2151 - 2157. [ZHANG Y, WANG H M, YAN L F. Test research on tensile properties of compacted clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2151 - 2157. (in Chinese)]

责任编辑: 张若琳