

水位骤降对边坡稳定性影响研究综述

李智慧, 贾苍琴, 王贵和, 郭溥海

(中国地质大学工程技术学院 北京 100083)

摘要 从理论研究和模型试验两方面对水位骤降对边坡稳定性的影响研究进行综述。探讨考虑基质吸力对水位骤降引起的非饱和边坡稳定性分析的重要性, 归纳和总结了坡内非饱和-非稳定渗流场和边坡稳定性分析方法、边坡稳定性变化规律及影响因素。针对目前研究中所存在的问题及今后的发展方向提出看法。

关键词 水位骤降; 基质吸力; 非饱和土; 非稳定渗流; 边坡稳定性

中图分类号 TV146+.3 **文献标识码** A **文章编号** 1006-7647(2011)S1-0086-05

我国有丰富的水力资源, 随着经济建设的发展, 陆续建设了各类水库工程。长期蓄水的库坝, 当库水位发生骤降时坝体内的孔隙水压力来不及消散, 渗透力的作用会破坏库岸边坡原有的自然平衡条件, 引起边坡形状及稳定性的变化, 容易导致库岸产生坍塌及滑坡等地质灾害。据不完全统计, 约有60%的库(河)岸边坡失稳发生在水位下降时。因此, 开展水位骤降对边坡稳定性的影响研究有重要的现实意义。

目前, 实际工程中水位骤降条件下的边坡稳定性研究大多建立在饱和渗流基础上, 但库水位变动必然会导致非饱和区的存在, 饱和渗流无法正确揭示坡体内渗流场的变化及对土体力学性质的影响。因此, 研究非饱和土核心变量——基质吸力对非饱和边坡稳定性的影响、确定坡内非饱和-非稳定渗流场至关重要。笔者从基质吸力、非饱和-非稳定渗流场的计算、边坡稳定性分析方法、边坡稳定性变化规律及影响因素, 以及室内试验等几个方面对国内外研究现状进行归纳和总结, 并针对目前研究所存在的问题及今后的研究方向提出了自己的看法。

1 理论研究现状

由于水位骤降会导致坡体内非饱和区的存在, 因此考虑基质吸力对边坡稳定性的影响、正确计算非饱和-非稳定渗流场、选择合适的边坡稳定性分析方法, 已经成为目前水位骤降对边坡稳定性影响理

论研究的方向。主要理论研究进展可综述如下。

1.1 基质吸力对非饱和边坡稳定性的影响

非饱和土力学理论^[1]认为: 基质吸力是研究处于非饱和状态土体的抗剪强度、应力-应变关系以及地下水渗流等各种重要研究问题的核心变量。因此, 在水位骤降诱发滑坡的诸多因素中, 基质吸力对抗剪强度的影响是一项重要的控制因素。Bishop等^[2]、Fredlund等^[3]考虑基质吸力对抗剪强度的影响, 分别提出了目前普遍应用于非饱和土研究的抗剪强度理论, 指出由于基质吸力的存在, 抗剪强度会增大。

但由于吸力量测和计算比较困难, 而含水量的分布在工程中相对容易确定, 国内外许多学者选择用含水量代替吸力, 间接研究吸力对非饱和土边坡稳定性的影响^[4-7], 并得到了一系列基质吸力的函数, 虽然不同的研究得到的土-水特征曲线不同, 但是总的规律一致, 即基质吸力随含水量的增大而降低。研究指出^[8-15], 考虑基质吸力对水位骤降过程中边坡稳定性的影响, 边坡的安全系数会有所提高, 且水位骤降比越大, 边坡安全系数增幅越大。张文杰等^[12]和汪斌等^[13]通过对比各因素对岸坡稳定性影响的敏感性分析指出, 库水位下降前期基质吸力对滑坡稳定性的有利影响小于渗透力和超孔压对滑坡的不利影响, 而后期相反。孙冬梅等^[16]指出, 基质吸力除影响抗剪强度外, 其在坡体内引起的非饱和流动及毛细管水饱和带也会影响安全分析最终

结果。

到目前为止,由于吸力量测的困难,考虑基质吸力对边坡稳定性的影响始终停留在理论研究阶段。基质吸力的影响研究很大程度上受到非饱和土强度理论及参数测试技术的限制。因此,认识水位骤降过程中坡体内水分的存储、运移和对岩土体的改造过程,量化基质吸力对水位骤降过程中边坡稳定性的影响还有待深入研究。

1.2 非饱和-非稳定渗流场研究

针对水位骤降所引起的边坡内渗流场的研究,目前采用最多的是以非饱和土理论为基础,采用有限元法进行分析。刘才华等^[17]通过假定水位骤降后的浸润面为坡面线推导出了渗透力计算公式。时卫民等^[9]用 Boussinesq 非稳定渗流基本微分方程和边界条件推导了水库水位下降时的浸润线计算公式,并采用多项式拟合的方法得到简化计算公式。孙冬梅等^[16]根据质量守恒定律和达西定律,结合多相流理论建立水-气二相流模型,采用高效积分有限差分法求解,通过变换主要变量实现了饱和与非饱和的相互转变,并给出了各种边界条件下的数学处理方法。廖红建等^[18]基于质量守恒定律和达西定律推导出了三维非稳态渗流场的基本方程。王增欣等^[19]以多孔介质的饱和度和渗流场总水头为变量,运用质量守恒定律和达西定律考虑各向同性渗流,建立了饱和-非饱和渗流数学模型,通过有限元分析饱和度的分布来自动捕捉渗透自由面。周桂云^[20]根据水体的连续性方程和动量方程,推导了饱和-非饱和非稳定渗流的整体平衡方程,提出饱和度对渗透力偏导数的修正公式,有效消除了有限元迭代求解过程中的振荡现象。国外许多学者针对非饱和-非稳定渗流场在水位骤降条件下的渗流特征也做了大量研究^[21-22]。但是迄今为止,由于边界条件及数学处理方法不同,针对水位骤降所引起的非饱和-非稳定渗流场的计算仍没有统一的标准。

虽然众多学者建立的非饱和-非稳定渗流模型不同,但是通过数学模拟和解析分析所反映的水位骤降过程中坡体内浸润线的变化规律是一致的^[23-27]。在水位骤降过程中,地下水响应有明显的滞后现象,饱和渗透系数越大,库水位下降速率越大,地下水响应滞后越明显,地下水位线形态整体越陡,水位变动仅对坡体附近的渗流场产生影响,而远离这一区域的土体,渗流场变化曲线均相似。

1.3 水位骤降过程中边坡稳定性分析方法

目前对水位骤降条件下的岸坡稳定性分析,主要采用将浸润线简化的极限平衡法、有限元渗流分析与极限平衡相结合的方法、有限元渗流分析与强

度折减相结合的方法以及流固耦合分析与极限平衡相结合的方法。

郑颖人等^[28]通过简化浸润线利用极限平衡法对水位骤降条件下岸坡的稳定性进行分析。之后,郑颖人等^[29]又应用 Plaxis 软件对水位骤降情况下的土坡稳定性进行分析,并通过数值解与解析解的对比,指出根据经验概化确定浸润面位置进行稳定性分析的误差。包太等^[30]利用极限平衡法对某岩质边坡在水位骤降情况下的稳定性进行了分析。王学武等^[31]分别应用极限平衡法和以有限元应力计算为基础的极限平衡法对水位骤降条件下的边坡稳定性进行分析。廖红建等^[18]通过 Geo-slope 软件中的 Seep 程序获得渗流场,利用 Slope 模块对水位下降条件下土体渗透系数、水位下降速率等因素对边坡稳定性的影响进行了分析。

但是极限平衡法无法分析土坡渐进破坏的过程,只能在假定滑动面上考虑基质吸力,不能考虑滑动面以上非饱和土体的基质吸力。针对这种情况,许多学者^[32-33]开始选用强度折减有限元法进行岸坡安全分析。贾苍琴等^[11]针对库水位骤降以后上游土坡和下游土坡的安全性,开展了强度折减有限元法和常规极限平衡法的对比研究。Lane 等^[34]假设浸润线为直线,基于强度折减有限元法分析了库水位在骤降与缓降条件下的岸坡稳定性。年廷凯等^[8]采用强度折减有限元法从坡体内浸润线位置、土体的渗透系数、水位下降速率、下降比及基质吸力 5 个方面研究了水位下降过程中土坡的整体稳定性。刘金龙等^[32]基于 Abaqus 软件利用强度折减有限元法对库水位下降速率对边坡安全系数的影响进行了分析。韦立德等^[35]首次研发了考虑渗流引起岩土体强度参数降低的三维强度折减有限元程序,并成功地应用于边坡稳定性分析,同时指出,与极限平衡法相比,强度折减有限元法能更好地模拟边界条件复杂的边坡。徐礼华等^[33]用强度折减有限元法对丹江口水库二期工程库岸的稳定性进行分析,并指出所应用的不同判断准则具有一致性。裴利剑等^[36]也指出强度折减有限元法应用不同的判据得到的结果有差别,是由于人为误判和有限元数值计算误差造成的,判据本身并无差别。李荣建等^[37]将基于 Bishop 和 Fredlund 两种强度准则的强度折减有限元分析结果进行对比分析。虽然国内外学者对将强度折减有限元法应用于水位骤降引起的边坡稳定性研究做了不少工作,但是如何将边坡的渗流、变形与稳定性及破坏过程有机地结合,真实地反映水位下降过程对边坡稳定性的影响仍需进一步的探讨。

此外,唐辉明等^[38]和柴军瑞等^[39]分别对三峡

库区赵树岭滑坡、泄滩滑坡渗流场与应力场的耦合作用进行了分析。汪斌等^[13]通过对渗流场和应力场两模块的交互反复迭代,得到了黄土坡滑坡前泄水情况下的应力场、变形场及孔压场的变化规律。丁秀丽等^[25]通过 FLAC 对奉节南桥头滑坡应力-渗流耦合作用下滑坡体的变形趋势与破坏特征进行了分析。Berilger^[21]考虑流固耦合作用,采用土体硬化模型,通过 Plaxis 对不同降速、不同渗透系数下的瞬态渗流场进行模拟分析,并对不同工况下边坡的安全性进行对比分析。但是由于流固耦合理论的复杂性,使其在边坡稳定分析中的研究还很不成熟,存在较多的假设,没能达到理论与实践的统一,还需要进一步的深入研究。

1.4 水位骤降过程中边坡稳定性变化规律及影响因素

近年来针对水位骤降引起的边坡稳定性变化研究获得了丰富的成果^[40-44]。Lane 等^[34]基于自己开发的软件,分析指出边坡安全系数随库水位的降落呈先变小后变大的趋势。郑颖人等^[28]指出库水位下降过程中坡体稳定系数最小值一般出现在滑体总高度的 $1/4 \sim 1/3$ 处,并指出陡降与缓降的稳定系数相差 20% 左右。马崇武等^[45]进一步指出,对于同一均质边坡,不管降速大小,坡体稳定系数最小值一般出现在滑体总高度的 $2/5 \sim 1/2$ 处。刘新喜等^[46]也证明了水位骤降过程中,岸坡稳定系数的变化规律具有一致性。Berilger^[21]和廖红建等^[47]指出相同渗透系数的滑坡体,水位下降越快,安全系数越小;当库水位下降到相同位置时,渗透系数越小,安全系数下降速率越大。Viratjandr 等^[48]通过对比不同坡度下边坡的安全性,指出其他条件相同时,坡度越缓,边坡安全性越高。

目前的研究主要针对渗透系数、土-水特征曲线的形状及水位降落速度对边坡安全系数的影响。而土体参数、初始水位等因素的变化对边坡安全也会造成很大的影响,在今后的研究中有必要针对这些参数做进一步的分析。

2 室内模型试验研究现状

对于边坡失稳破坏方面的研究,针对目前理论研究还不完善而原型试验周期长、费用高的缺点,越来越多的学者开始致力于室内模型试验的研究。

2.1 常规地质力学模型试验

目前国内外许多学者通过缩小原型尺寸,考虑主要水力参数的相似比,采用外部测量的方法对水位骤降条件下的岸坡稳定性进行分析,并得到了一系列水位骤降过程中地质力学参数随时间的变化规

律及整个破坏过程的影像资料^[49-54]。他们指出边坡破坏主要是由骤降引起的坡内外水位差引起,水位下降越快,饱和渗透系数越大,越易形成滑坡。这与数值模拟结果一致。

但是这种常规的地质力学模型试验由于受模型尺寸的限制,相似材料的力学性质难以满足相似比,同时尺寸效应也使模型试验成果的可靠性受到一定影响。

2.2 离心模型试验

离心模型试验由于其可较为真实地模拟重力场,再现边坡原型的应力过程和变形结果,克服了常规地质力学模型的一些缺点。针对水位骤降对边坡稳定性影响的离心模型试验,目前面临的主要问题是如何在高速旋转的离心机上模拟水库水位的涨落。针对这个问题,近几年来一些学者^[55-57]陆续成功研制出了适用于离心模型试验的水位控制系统。此外,离心模型试验对数据的采集系统要求也甚高,目前国际上主要采用非接触式的光纤滑环,其中也有部分实验室采用基于局域网技术的无线传输方式;在国内,中国水利水电科学研究院在经过充分论证的基础上于 2003 年完成了对 LXJ-4-450 大型土工离心机数据采集系统的改造,改造后的系统采用局域网无线传输技术,取得了良好的试验效果^[58]。

Zhang 等^[59]应用离心模型试验对水位骤降情况下的边坡稳定性进行了模拟研究,并将理论计算与模型试验结果进行对比分析。李邵军等^[60]以离心模型试验为手段,基于三峡库区典型滑坡的工程地质特征,建立了相应的边坡离心模型。Narita 等^[61]用离心模型试验对不同降速、不同渗透系数下的岸坡稳定性进行了模拟分析。Xu 等^[62]开展离心模型试验对软土地基在水位骤降情况下的稳定性进行了模拟。Timpong 等^[63]开展离心模型试验对地下水位变动过程中的边坡稳定性进行了研究。

目前针对水位骤降的离心模型试验主要考虑边坡破坏过程中位移变形的情况,且模型尺寸的确定、试验材料的选取及边界效应问题都会影响试验精度。因此,进一步开展边坡失稳过程中土体应力及孔隙水压力变化情况的模型试验,针对试验所得数据开展相应的数值模拟分析和验证十分必要。

3 结 语

综上所述,目前针对水位骤降对边坡稳定性的影响尚存在一些亟待解决的难点。主要概括为以下几点:

a. 在考虑水位骤降对边坡稳定性影响的研究中,虽考虑了基质吸力的作用,并利用各种方法对渗

流场及边坡稳定性进行了计算分析,但基质吸力对边坡稳定性的作用始终未能应用于工程实际,且由于各种假设条件、简化计算和各种边坡稳定分析方法本身的缺陷等使得无法将水位骤降过程中边坡的渗流、变形与稳定性及破坏过程有机地结合,真实地反映水位下降过程对边坡稳定性的影响。此外,目前研究主要集中在渗透系数、水位降落速度、土-水特征曲线的选取对岸坡稳定性的影响,而针对土体参数、岸坡坡度、初始水位等因素的变化对边坡稳定性影响的研究很少。

b. 目前的常规地质力学模型试验精度仍受尺寸的限制,设置土体参数时如何选择合适的相似比仍是一个难点。而离心模型试验由于其对室内试验设备的要求较高,操作也较复杂,应用还不普遍。目前已有的离心模型试验也只是针对边坡破坏过程中的位移变形进行研究,对边坡破坏过程中及破坏时土体内应力状态的研究很少。

c. 近些年来研究都是将理论分析和模型试验进行单独研究,没能针对所得结果考虑各自的优缺点进行分析比较,取长补短。

参考文献:

[1] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soil[M]. New York: Wiley, 1993.

[2] BISHOP A W, BLIGHT G E. Some aspects of effective stress in saturated and unsaturated soil[J]. Geotechnique, 1963, 13(3): 177-197.

[3] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R. Stress state variables for unsaturated soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1977, 103(5): 447-466.

[4] LEONG C, RAHARDJO H, CHIAM S L, et al. Suction profiles of a residual soil slope as affected by climatic condition[C]// Proceeding of the Second International Conference on Unsaturated Soils. Beijing: International Academic Publisher, 1998: 231-236.

[5] ZHANG L L, FREDLUND D G, ZHANG L M, et al. Numerical study of soil conditions under which matric suction can be maintained[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(4): 569-582.

[6] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(3): 521-532.

[7] 徐永福,董平. 非饱和土的水分特征曲线的分形模型[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 400-405.

[8] 年廷凯,万少石,蒋景彩,等. 库水位下降过程中土坡稳定强度折减有限元分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2264-2269.

[9] 时卫民,郑颖人. 库水位下降情况下滑坡的稳定性分析[J]. 水利学报, 2004(3): 67-71.

[10] 贾苍琴,黄茂松,王贵和,等. 水位骤降对土坡稳定性的影响分析[J]. 同济大学学报, 2008, 36(3): 304-309.

[11] 贾苍琴,黄茂松,王贵和. 非饱和非稳定渗流作用下土坡稳定分析的强度折减有限元方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1290-1296.

[12] 张文杰,詹良通,凌道盛,等. 水位升降对库区非饱和土质岸坡稳定性的影响[J]. 浙江大学学报, 2006, 40(8): 1365-1371.

[13] 汪斌,唐辉明,朱杰兵,等. 考虑流固耦合作用的库岸滑坡变形失稳机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 4484-4489.

[14] XU S J, DANG F N, HAN Q, et al. Analysis of stability of dam slope during rapid drawdown of reservoir water level[C]// 2009 International Conference on Engineering Computation. Hong Kong: IEEE Computer Society, 2009: 221-224.

[15] OLIVARES L, TOMMASI P. The role of suction and its changes on stability of steep slopes in unsaturated granular soil[C]// CHEN Z, ZHANG J M, LI Z K, et al. Landslides and Engineered Slopes: from the Past to the Future, USA: Taylor & Francis Group, 2008: 203-215.

[16] 孙冬梅,朱岳明,张明进. 库水位下降时的岸坡非稳定渗流问题研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1807-1812.

[17] 刘才华,陈从新,冯夏庭,等. 地下水对库岸边坡稳定性的影响[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 419-422.

[18] 廖红建,姬建,曾静. 考虑饱和-非饱和渗流作用的土质边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3229-3234.

[19] 王增欣,金生. 土石坝饱和和非饱和渗流的数值分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(3): 117-121.

[20] 周桂云. 饱和-非饱和非稳定渗流有限元分析方法的改进[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(1): 5-11.

[21] BERILGEN M M. Investigation of stability of slopes under drawdown condition[J]. Computers and Geotechnics, 2007, 34(2): 81-91.

[22] FREDLUND M, GITIRANA G, PHAM H. A methodology for applying probability theory to unsaturated hydraulic properties as the foundation for seepage analysis[J]. Geotechnical Special Publication, 2008, 179: 902-909.

[23] 柳群义,朱自强,何现启,等. 水位涨落对库岸滑坡孔隙水压力影响的非饱和渗流分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(增刊): 85-89.

[24] 刘燕,王海平,蒋永才,等. 长江三峡库区黄蜡石边坡地下水作用规律与动态稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3571-3576.

[25] 丁秀丽,付敬,张奇华. 三峡水库水位涨落条件下奉节南桥头滑坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 2913-2919.

[26] 李晓,张年学,廖秋林,等. 库水位涨落与降雨联合作用下滑坡地下水动力场分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3714-3720.

[27] 郝春华,陈群,龚霞. 水位降落深度和速度对坝坡稳定性的影响[J]. 水电站设计, 2008, 24(1): 66-69.

- [28] 郑颖人, 时卫民, 孔位学. 库水位下降时渗透力及地下水浸润线的计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9) 3203-3210.
- [29] 郑颖人, 唐晓松. 库水作用下的边(滑) 坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8) : 1115-1121.
- [30] 包太, 刘新荣, 税月. 水位下降卸荷诱发库岸边坡快速失稳机理分析[J]. 水文地质工程地质, 2004(5) : 7-11.
- [31] 王学武, 许尚杰, 党发宁, 等. 水位骤降时的非饱和坝坡稳定分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(9) : 2760-2764.
- [32] 刘金龙, 王吉利, 梁昌望, 等. 库水位变化对边坡稳定性影响的有限元模拟[J]. 水力发电, 2007, 33(10) : 41-44.
- [33] 徐礼华, 宋志斌, 彭少民. 强度折减法在丹江口水库二期工程库岸稳定性分析中的应用[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(2) : 17-21.
- [34] LANE P A, GRIFFITHS D V. Assessment of stability of slopes under drawdown conditions[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(5) : 443-450.
- [35] 韦立德, 陈从新, 杨春和. 渗流引起强度降低的三维强度折减有限元程序[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(2) : 207-209.
- [36] 裴利剑, 屈本宁, 钱闪光. 有限元强度折减法边坡失稳判据的统一性[J]. 岩土力学, 2010, 31(10) : 3337-3341.
- [37] 李荣建, 于玉贞, 邓丽军, 等. 非饱和土边坡稳定分析方法探讨[J]. 岩土力学, 2007, 28(10) : 2060-2064.
- [38] 唐辉明, 马淑芝, 刘佑荣. 三峡工程库区巴东县赵树岭滑坡稳定性与防治对策研究[J]. 中国地质大学学报: 地球科学, 2002, 27(5) : 621-626.
- [39] 柴军瑞, 李守义. 三峡库区泄滩滑坡渗流场与应力耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8) : 1280-1284.
- [40] RINALDI M, CASAQLI N, DAPPORTO S, et al. Monitoring and modeling of pore water pressure changes and riverbank stability during flow events[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2004, 29(2) : 237-254.
- [41] PINYOL N M, ALONSO E E, OLIVELLA S. Rapid drawdown in slopes and embankments[J]. Water Resources Research, 2008, 44 : 1-22.
- [42] MICHALOWSKI R L. Critical pool level and stability of slopes in granular soils [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(3) : 444-448.
- [43] MORGENTHAU N R. Stability charts for earth slopes during rapid drawdown[J]. Geotechnique, 1963, 13(1) : 121-131.
- [44] DESAI C S. Drawdown analysis of slopes by numerical method [J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1977, 103(7) : 667-676.
- [45] 马崇武, 刘忠玉, 苗天德, 等. 江河水位升降对堤岸边坡稳定性的影响[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2000, 36(3) : 56-60.
- [46] 刘新喜, 夏元友, 练操, 等. 库水位骤降时的滑坡稳定性评价方法研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(9) : 1427-1436.
- [47] 廖红建, 高石夯, 盛谦, 等. 渗透系数与库水位变化对边坡稳定性的影响[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(1) : 88-92.
- [48] VIRATJANDR C, MICHALOWSKI R L. Limit analysis of submerged slopes subjected to water drawdown[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(8) : 802-814.
- [49] 张均锋, 孟祥跃, 朱而干. 水位变化引起分层边坡滑坡的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16) : 2676-2680.
- [50] 胡修文, 唐辉明, 刘佑荣. 三峡库区赵树岭滑坡稳定性物理模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12) : 2089-2095.
- [51] 贾官伟, 詹良通, 陈云敏. 水位骤降对边坡稳定性影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9) : 1798-1803.
- [52] 罗先启, 刘德富, 吴剑, 等. 雨水及库水作用下滑坡模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14) : 2476-2483.
- [53] 段祥宝, 谢罗峰. 水位降落条件下非稳定渗流试验研究[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(10) : 7-12.
- [54] JIA G W, ZHAN T L T, CHEN Y M, et al. Performance of a large-scale slope model subjected to rising and lowering water level[J]. Engineering Geology, 2009, 106(1/2) : 92-103.
- [55] 高长胜, 陈生水, 徐光明, 等. 堤防边坡稳定离心模型试验技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23) : 4308-4312.
- [56] 高长胜, 徐光明, 张凌, 等. 边坡变形破坏离心机模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(4) : 478-481.
- [57] 左良栋, 周世良. 山区河流岸坡稳定性离心模型试验有关问题探讨[J]. 港工技术, 2009, 46(6) : 35-38.
- [58] SANTAMARINA J C, GOODINGS D J. Centrifuge modeling: a study of similarity[J]. Geotechnical Testing Journal, 1989, 12(2) : 163-166.
- [59] ZHANG L M, HU T. Development of a water control facility for centrifuge model tests[C]//Proceedings of the International Conference on Centrifuge 91. Boulder Colorado : A. A. Balkema, 1991 : 527.
- [60] 李邵军, KNAPPETT J A, 冯夏庭. 库水位升降条件下边坡失稳离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8) : 1586-1593.
- [61] NARITA K, OKUMURA T, KIMURA K, et al. Centrifuge tests on seepage behavior in embankment dam during rapid drawdown[J]. Bulletin of Aichi Institute of Technology : Part B, 2004, 39 : 85-90.
- [62] XU G M, ZHANG L, LIU S S. Preliminary study of instability behavior of levee on soft ground during sudden drawdown [C]//London : Geotechnical Special Publication, 2005 : 3009-3018.
- [63] TIMPONG S, ITOH K, TOYOSAWA Y. Geotechnical centrifuge modeling of slope failure induced by ground water table change, landslides and climate change[R]. London : Taylor and Francis Group, 2007 : 107-112.

(收稿日期: 2011-03-28 编辑: 骆超)