

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.01.006

古水水电站争岗堆积体滑坡复活条件分析

姚贺冬^{1,2}, 石崇^{1,2}, 徐卫亚^{1,2}, 邵建富^{1,2}, 王盛年^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对古水水电站争岗堆积体目前处于稳定状态, 在降雨、地震等不利条件下可能发生滑坡以至于威胁下游洞室群出口安全的问题, 在地质勘查的基础上, 选取典型剖面进行地质特性分析, 并建立合理的颗粒离散元模型, 进行不同工况量变条件下的滑坡复活数值模拟。结果表明: 滑面倾角急剧增大和断层发育处容易产生裂隙, 且影响着滑坡启滑位置; 滑面平均作用 3 m 水头时堆积体出现蠕滑, 5 m 水头时三期滑坡复活; 当地震强度达到 0.3g 时, 一级平台堆积体开始滑动, 形成三期滑坡。

关键词: 滑坡; 复活条件; 古水水电站; 争岗堆积体

中图分类号: TV697.2+3 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2015)01-0028-06

Landslide reactivation of Zhenggang deposit talus at Gushui Hydropower Station

YAO Hedong^{1,2}, SHI Chong^{1,2}, XU Weiya^{1,2}, SHAO Jianfu^{1,2}, WANG Shengnian^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Zhenggang deposit talus at Gushui Hydropower Station is in a stable state at present. However, it may become unstable under conditions of rain or earthquakes, which may lead to landslides and even threaten the safety of cavern exits downstream. In order to solve this problem, a typical geological profile was chosen for geological characteristic analysis. Then, a granular discrete element model was built for numerical simulation of landslide reactivation in different cases. The results show that cracks easily occur near the position where the dip angle of the slip surface increases sharply or a fault develops, which also affects the initial landslide position. When the water pressure of three meters is loaded on the slip surface, the deposit talus starts to creep, and when the water pressure reaches five meters, a third-stage landslide may become active again. When the seismic strength reaches 0.3g, the deposit talus on the first platform begins to slide, and a third-stage landslide is generated.

Key words: landslide; reactivation condition; Gushui Hydropower Station; Zhenggang deposit talus

古水水电站位于云南省德钦县澜沧江上游, 处于高山峡谷地貌中, 在库区附近, 因为山高、坡陡, 物理风化作用强烈, 发育多个大型堆积体滑坡等不良地质现象。争岗堆积体位于水电站坝址下游右岸, 目前处于稳定状态, 但在降雨及地震条件下曾多次发生蠕滑。现决定采用接力避让方案对水利枢纽进行规划, 所有泄水建筑物均采用长隧洞方式跨越争岗堆积体, 该堆积体一旦滑动将可能堵塞下游泄水建筑物出口, 对水电站等工程造成严重的破坏, 是水电站潜藏的巨大安全隐患。因此需要分析在何种条件下争岗堆积体可能发生滑坡复活, 为防灾减灾措施的制定提供参考。

对于滑坡复活的研究主要集中在降雨和地震 2 种条件下, 宏观方面有基于降雨阈值的降雨强度 I 、年平

均降水量 I_{MAP} 和持续时间 D 之间的统计分析^[1-3],进而提出时空概率模型^[4]及建立预警系统^[5]等;对地震引发滑坡复活的研究,侧重采用多种方法建立敏感性评价模型^[6-9]等。微观方面,一些学者针对具体滑坡进行了地震^[10-12]、降雨^[13-15]条件下的滑坡复活机制研究。上述成果虽然均针对特定工况下滑坡的复活机制进行研究,但对于如何判别不同工况量变条件下滑坡体各部位的变形复活情况、可能发生滑动的工况,仍需进一步研究。笔者以云南古水电站争岗堆积体典型剖面为研究对象,进行滑坡复活条件分析,并把得出的结论与现场勘测结果进行对比印证。

1 地质概况

争岗堆积体滑坡是由于层状岩体发生强烈弯曲倾倒变形并导致压裂-剪切形成的基岩滑坡,演化过程分为倾倒-剪断和贯通-滑动 2 个阶段,并在后期改造过程中发生多次局部滑动。堆积体总体积约为 4750 万 m^3 ,变形体积为 2892 万 m^3 ,以争岗沟为界,分为 I 区和 II 区,分区及地貌如图 1 所示。

通过现场勘察和平硐、钻孔勘探(如图 2 所示),获得典型地质剖面如图 3 所示。图 3 表明,争岗堆积体已经形成贯通滑面,与滑床岩体有明显分离,构成滑床的基岩为三叠系上统红坡组($T_{3\text{hm}}$)的倾倒基岩和二叠系下统吉东龙组(P_{1j}),且在 2500 m 高程处发育 I 级断层(F_1)红山-古水断裂。

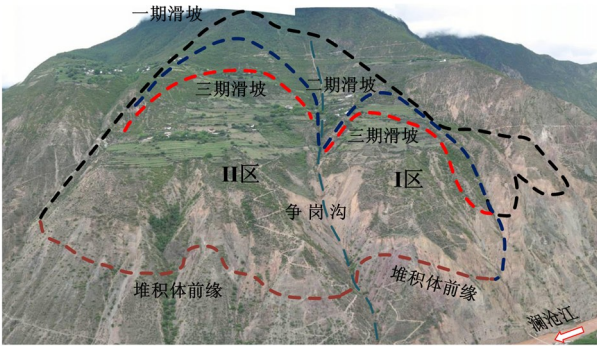


图 1 争岗堆积体地貌及分区

Fig. 1 Geomorphology and subzones of Zhenggang deposit talus

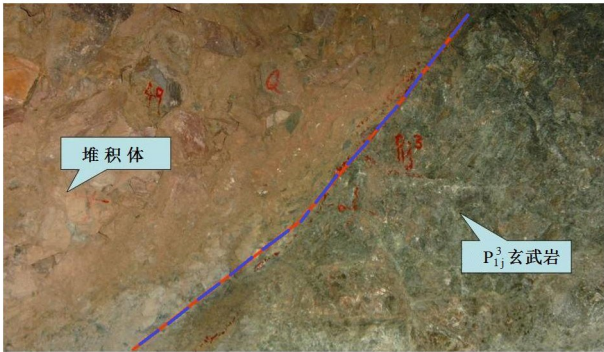


图 2 平硐勘察堆积体底面区域

Fig. 2 Survey of deposit talus bottom zone in adit

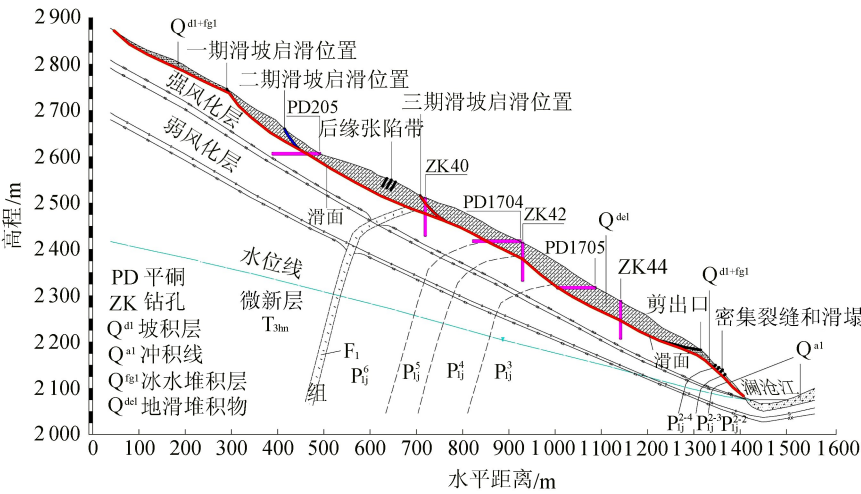


图 3 争岗堆积体典型地质剖面

Fig. 3 Typical geological profile of Zhenggang deposit talus

如图 3 所示:(a)争岗堆积体高程 2750 m 以上主要分布以第四系冰碛物为主的坡积层(Q^{dl})和冰水堆积层(Q^{gl})。坡积层(Q^{dl})主要成分为有机质土层、灰褐色碎石质砂土、粉土含少量块石;冰水堆积层(Q^{gl})主要成分为块石、碎石夹砂土、粉土,厚度一般 7~14 m。(b)高程 2180~2750 m 为基岩滑动形成的地滑堆积物(Q^{del}),主要为山梁上部滑落的岩体,以板岩、砂岩为主,局部可见近水平似层面的灰白~黄褐色条带,全~强风化状,岩体破碎呈碎块状,夹泥现象明显,结构松散,局部密实,厚度一般 15~45 m。(c)剪出口位于高程 2180 m 处,剪出口以下为坡积层(Q^{dl})、冰水堆积层(Q^{gl})和冲积层(Q^{al})(其中 Q^{al} 主要为漂石、卵、砾

石夹粉细砂,厚度较小)。

2 地质特性分析

2.1 争岗堆积体滑面倾角分布

选取图3所示堆积体典型地质剖面,统计其滑面高程及倾角分布,绘制分布图如图4所示。

图4表明,根据滑面倾角变化的缓急,该堆积体滑面可分为前缘和3个平台区域:高程2160 m以下为堆积体前缘,滑面平均倾角约为42.8°;高程2160~2340 m为一级平台,堆积体滑面平均倾角约为27.3°;高程2375~2680 m为二级平台,堆积体滑面平均倾角约为27.5°;高程2735~2840 m为三级平台,堆积体滑面平均倾角约为26.0°。

在堆积体前缘和3个平台区域的交界部分滑面倾角急剧增大,具体在高程2100~2160 m处、2340~2375 m处、2680~2735 m处,并且这些位置的滑面倾角都超过了40°。

2.2 启滑位置和地表裂隙与滑面倾角的关系

根据现场勘察:一、二期滑坡启滑位置高程约为2746 m和2660 m,均在二、三级平台交界部分附近;三期滑坡启滑位置高程为2516 m,且在高程2550 m附近出现了后缘拉裂带(如图5(a)所示),2处均位于2500 m高程处发育的I级断层(F_1)红山-古水断裂附近。

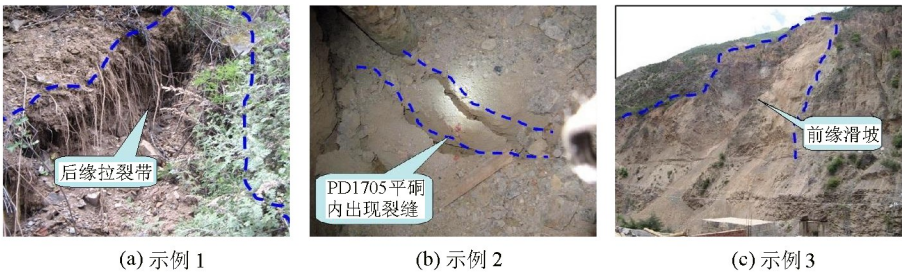


图5 争岗堆积体典型裂隙与变形

Fig. 5 Typical cracks and deformation of Zhenggang deposit talus

受2008年10月暴雨和2009年2月降雪的影响,PD1704(在高程2416 m处穿过滑面)和PD1705(在高程2318 m处穿过滑面,如图5(b)所示)滑面部位出现明显的变形,2处变形均在一、二级平台交界部分附近。堆积体前缘在高程2130~2150 m处也出现密集裂隙,剪出口部位有较大位移,产生了滑塌现象,如图5(c)所示。这些资料表明,在断层发育处和滑面倾角急剧增大处堆积体容易发生大变形,坡表容易产生裂隙,且影响着各期次滑坡的启滑位置。

3 滑坡复活条件分析

3.1 数值模型的建立

争岗堆积体发生的多次局部滑坡均沿滑面滑动,因此在进行数值模拟中规定堆积体沿滑面滑动。利用颗粒离散元软件PFC建立图3所示地质剖面的数值模型,采用颗粒模拟堆积体,滑面作为边界,保持边界固定,使堆积体在外力作用下沿滑面滑动,采用颗粒与边界之间的摩擦来模拟滑带土的抗剪作用,做到与实际滑坡相符。

颗粒离散元软件PFC无法直接赋予宏观参数,需要进行一系列双轴标定试验,通过调整模型的细观参数,使该模型具有与堆积体相应的宏观参数,则该细观参数即为模拟时采用的参数。采用的参数如下:(a)细观参数:颗粒半径为1~2 m,法定刚度为0.86 GN/m,切向刚度为0.33 GN/m,颗粒摩擦因数为0.70,法向接触力为 1×10^7 N,切向接触力为 3×10^6 N,颗粒与边界摩擦系数为0.4;(b)堆积体宏观参数:杨氏模量为0.4 GPa,泊松比为0.32,黏聚力为48 kPa,内摩擦角为34°;(c)滑带土宏观参数:黏聚力为48 kPa,内摩擦角

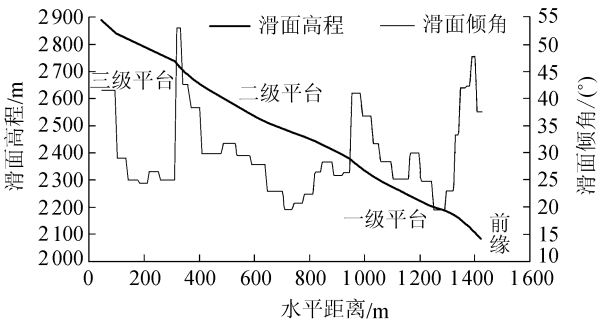


图4 典型剖面滑面倾角分布

Fig. 4 Distribution of dip angle of slip surface

为 26.5°。

影响争岗堆积体稳定的因素主要是降雨和地震,在堆积体上分别施加不同的水头作用力和地震力,模拟分析堆积体在 2 种条件下的滑坡复活情况。数值模拟中,观察塑性区出现的位置、裂隙扩展的程度、堆积体滑动情况等,从而分析堆积体复活情况。历次滑坡剪出口均有明显的位移,位移大小与堆积体变形和滑动距离大小相一致:剪出口位移较小,堆积体发生蠕滑,但能保持稳定;剪出口位移较大,则发生滑坡。因此记录剪出口的位移,以此反映堆积体位移变化趋势,定量分析堆积体复活及滑动情况。

3.2 降雨复活分析

2009 年降雨造成滑坡复活时,在堆积体后缘至剪出口部位钻孔水位在 1~9 m 之间变化,平均水头为 5 m。因此,为了与实际相符,在堆积体剪出口部位施加最大水头,堆积体后缘施加 1 m 水头,中间施加随高程线性变化水头。改变最大水头大小,使平均水头分别取值为 1 m、2 m、3 m、4 m、5 m 和 6 m,每种条件下迭代计算 10 万步,得到相应滑坡体状态如图 6 所示。

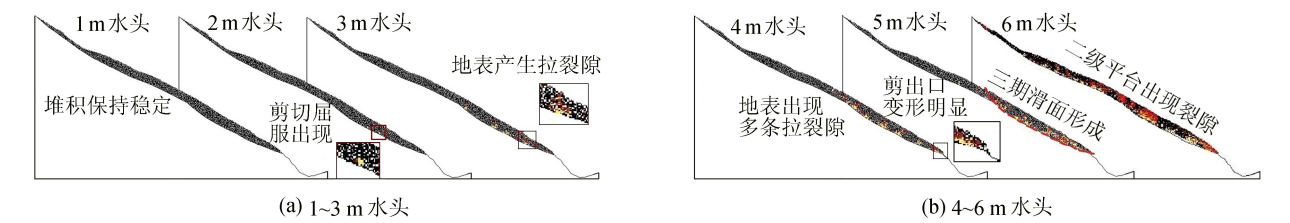


图 6 滑面作用不同水头时滑坡体状态

Fig. 6 Landslide state under different water pressures on slip surface

图 6(a)表明:当滑面上作用的平均水头为 1 m 时,堆积体保持稳定;平均水头增至 2 m 时,虽然会出现少量剪切屈服,但堆积体内未出现裂隙,变形可以忽略,堆积体仍能保持稳定;平均水头增大至 3 m 时,堆积体一级平台滑面上出现多处剪切屈服,地表开始产生拉裂隙,堆积体将沿着滑面做缓慢的蠕滑。图 6(b)表明:当滑面上作用的平均水头增至 4 m 时,地表出现多条拉裂隙,剪出口有明显变形;平均水头增大至 5 m 时,三期滑坡体内剪切裂隙扩张,地表拉裂隙明显,将形成三期滑动面;平均水头增大至 6 m 时,堆积体的二级平台上也出现裂隙。2009 年强降雨后,三期滑坡体上出现多条拉裂隙,平硐内滑面上出现剪切滑动,与模拟中 5 m 水头时的滑坡复活情况相吻合。

在剪出口部位设置监测点,统计该处颗粒位移随平均水头变化的趋势,如图 7 所示。图 7 表明,争岗堆积体典型剖面在滑面平均作用水头小于 2 m 时,剪出口位移很小,堆积体应能够保持稳定;当平均作用水头达到 3 m 时,剪出口位移缓慢增加,堆积体以沿着滑面的蠕滑为主;当平均作用水头超过 5 m 时,剪出口位移急剧增大,堆积体变形明显。因此,只要在滑面上施加 3 m 以上水头,计算时间足够长,即可以描述诱发滑坡的情况,但蠕滑阶段时间并不一样,故滑面平均作用 3 m 水头可视为降雨滑坡启滑的临界条件。

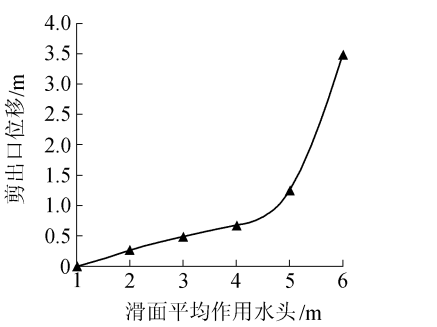


图 7 剪出口位移随滑面平均作用水头变化趋势

Fig. 7 Variation of shear displacement at cavern exit with average water pressure

3.3 地震复活分析

采用当地基岩反应谱设计参数构造随机地震,模拟水平向和竖直向振动,按照拟静力法规范规定考虑 0.25 的地震效应系数,并假定基岩作一致运动,不考虑放大效应变化。分别调整地震波峰值 f 为 0.126g、0.168g、0.3g、0.5g,计算地震作用 60 s 后相应滑坡体的状态,如图 8 所示。

图 8 表明,当地震波峰值为 0.126g 时(当地 50 年超越概率 10% 的地震),在一级平台和二级平台的交界附近产生裂隙,堆积体仍能保持稳定;地震波峰值增至 0.168g 时(当地 50 年超越概率 5% 的地震),高程约 2 380 m 处产生贯通拉裂隙,堆积体沿一级平台滑面产生一定的蠕滑现象,堆积体后缘仍保持稳定;地震波峰值增大到 0.3g 时,一级平台堆积体将发生滑坡复活,三期滑坡形成,剪出口产生大位移,会发生滑塌现象;地震波峰值为 0.5g 时,二级平台的堆积体也产生大量塑性区,开始发生滑动。

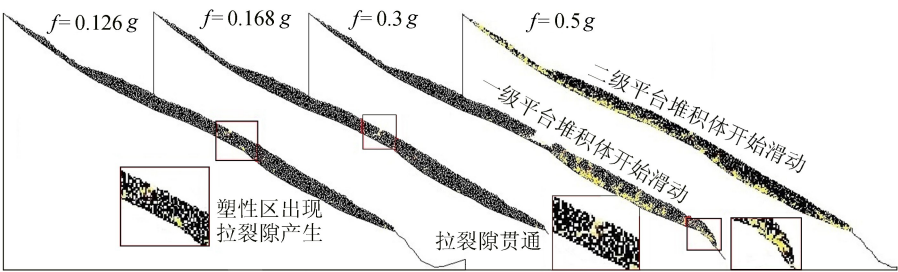


图8 作用不同强度地震 60 s 后滑坡体状态

Fig. 8 Landslide state under different seismic strengths lasting for 60 s

监测剪出口部位颗粒位移随地震强度变化的趋势如图 9 所示。图 9 表明,地震波峰值为 0.126g 与 0.168g 时,剪出口位移很小,表明堆积体以沿滑带土的变形为主,堆积体可以保持稳定;地震波峰值超过 0.3g 时,剪出口位移明显增大,三期滑坡体启滑;地震波峰值增加到 0.5g 时,剪出口位移急剧增大,堆积体产生较大滑动。

4 结 论

a. 对争岗堆积体典型剖面进行地质特性分析,结果表明,在滑面倾角急剧增大和断层发育处附近容易产生裂隙,且影响着各期次滑坡启滑位置;数值模拟中,一、二级平台交界附近容易产生裂隙,前缘则会发生滑塌。

b. 在滑面施加不同压力水头,进行滑坡复活数值模拟,结果表明:当作用水头小于 2 m 时,堆积体变形较小,基本保持稳定;作用 3 m 水头时堆积体出现蠕滑;作用 5 m 水头时将形成三期滑动面,该情况与 2009 年降雨造成的堆积体滑坡复活相吻合;作用 6 m 水头时二级平台堆积体也出现裂隙。

c. 不同地震力作用下,滑坡复活模拟分析表明:地震波峰值小于 0.126g 时,堆积体保持稳定;地震波峰值达到 0.168g 时,产生少量蠕滑;地震波峰值达到 0.3g 时,一级平台堆积体将发生滑动,三期滑坡形成;地震波峰值达到 0.5g 时,二级平台堆积体也开始滑动。

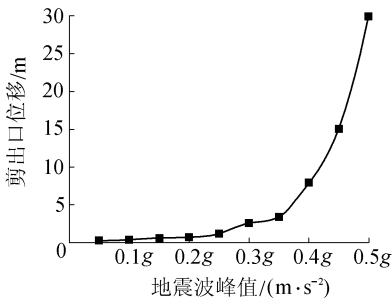


图9 剪出口位移随地震强度变化规律
Fig. 9 Variation of shear displacement at cavern exit with seismic strength

参考文献:

[1] DAHAL R K, HASEGAWA S. Representative rainfall thresholds for landslides in the Nepal Himalaya[J]. Geomorphology, 2008, 100(3) : 429-443.

[2] SAITO H, NAKAYAMA D, MATSUYAMA H. Relationship between the initiation of a shallow landslide and rainfall intensity-duration thresholds in Japan[J]. Geomorphology, 2010, 118(1) : 167-175.

[3] ROSI A, SEGONI S, CATANI F, et al. Statistical and environmental analyses for the definition of a regional rainfall threshold system for landslide triggering in Tuscany (Italy) [J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(4) : 617-629.

[4] JAISWAL P, van WESTEN C J. Estimating temporal probability for landslide initiation along transportation routes based on rainfall thresholds[J]. Geomorphology, 2009, 112(1) : 96-105.

[5] TIRANTI D, RABUFFETTI D. Estimation of rainfall thresholds triggering shallow landslides for an operational warning system implementation[J]. Landslides, 2010, 7(4) : 471-481.

[6] MELCHIORRE C, MATTEUCCI M, AZZONI A, et al. Artificial neural networks and cluster analysis in landslide susceptibility zonation[J]. Geomorphology, 2008, 94(3) : 379-400.

[7] LEE C T, HUANG C C, LEE J F, et al. Statistical approach to earthquake-induced landslide susceptibility[J]. Engineering Geology, 2008, 100(1) : 43-58.

[8] YILMAZ I. Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison: a case study from Kat landslides (Tokat-Turkey) [J]. Computers & Geosciences, 2009, 35(6) : 1125-1138.

[9] PRADHAN B, LEE S. Delineation of landslide hazard areas on Penang Island, Malaysia, by using frequency ratio, logistic

regression, and artificial neural network models[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 60(5):1037-1054.

[10] 黄润秋. 汶川 8.0 级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6):1239-1249. (HUANG Runqiu. Mechanism and geomechanical modes of landslide hazards triggered by Wenchuan 8.0 earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6):1239-1249. (in Chinese))

[11] 黄润秋, 裴向军, 李天斌. 汶川地震触发大光包巨型滑坡基本特征及形成机理分析[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6):730-741. (HUANG Runqiu, PEI Xiangjun, LI Tianbin. Basic characteristics and formation of the largest scale landslide at Daguangbao occurred during the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6):730-741. (in Chinese))

[12] 黄润秋, 裴向军, 张伟锋, 等. 再论大光包滑坡特征与形成机制[J]. 工程地质学报, 2009, 17(6):725-736. (HUANG Runqiu, PEI Xiangjun, ZHANG weifeng, et al. Further examination on characteristics and formation mechanism of Daguangbao landslide[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(6):725-736. (in Chinese))

[13] 谢守益, 徐卫亚. 降雨诱发滑坡机制研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1999, 32(1):21-23. (XIE Shouyi, XU Weiya. Mechanism of landslide induced by precipitation[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1999, 32(1):21-23. (in Chinese))

[14] 吴火珍, 冯美果, 焦玉勇, 等. 降雨条件下堆积层滑坡体滑动机制分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 1):324-329. (WU Huozhen, FENG Meiguo, JIAO Yuyong, et al. Analysis of sliding mechanism of accumulation horizon landslide under rainfall condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Sup1):324-329. (in Chinese))

[15] 张玉, 徐卫亚, 邹丽芳, 等. 降雨条件下大型滑坡体渗流稳定性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(3):833-841. (ZHANG Yu, XU Weiya, ZOU Lifang, et al. Analysis of seepage stability of large-scale landslide under rainfall condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3):833-841. (in Chinese))

· 简讯 ·

河海大学荣获 1 项国家科技进步二等奖

2015 年 1 月 9 日在北京举行的 2014 年度国家科学技术奖励大会上, 由河海大学唐洪武教授主持、河海大学为第一完成单位的“复杂河网多目标水力调控关键技术与应用”获国家科技进步二等奖。

“复杂河网多目标水力调控关键技术与应用”结合淮河、太湖等流域规划、防洪除涝、水污染控制、水资源调配等实践, 历经 10 余年, 开展了产、学、研联盟协同攻关, 构建了一套复杂河网工程调控与水动力耦合互馈精确模拟方法, 建立了多目标水力调控决策方法和成套实用技术, 解决了调控规模大、要素多、目标多、决策实时性强等难题。相关成果获发明专利 4 项, 发表论文 70 余篇; 部分成果被国家、行业标准和设计手册采纳。研究成果成功应用于淮河、太湖、珠江等流域及上海世博园共 30 多个复杂河网多目标调控中, 实现了水动力时空分布再构造, 满足了水问题综合治理需求, 近 3 年节省工程投资及运行管理费 3 亿多元, 防洪、水环境等综合效益数十亿元, 社会效益明显。

此前, 唐洪武教授主持完成的“平原河流防洪安全水动力关键技术及工程应用”获 2009 年度国家科技进步二等奖。以上 2 项获奖成果标志着河海大学水力学及河流动力学学科在平原流水动力学及工程治理方向形成了特色优势地位, 为流域生态文明建设、河流多目标综合治理提供了系统的理论和技术方法保证。

(本刊编辑部供稿)