

澜沧江某水电工程大型倾倒变形体边坡成因机制

周洪福¹, 聂德新², 李树武³

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心 四川 成都 610081; 2. 成都理工大学环境与土木工程学院 四川 成都 610059;
3. 中国水电顾问集团西北勘测设计研究院 陕西 西安 710065)

摘要 :在现场调查资料的基础上 ,结合倾倒变形体边坡地形地貌特征、地层岩性特征、结构面发育特征、河谷地应力以及岩体力学性能的差异等方面对澜沧江某水电工程大型倾倒变形体边坡的成因机制进行了综合分析。结果表明 :该大型倾倒变形体边坡地形上呈单薄、突出、三面临空的山梁 ,地层以薄层陡倾状岩体为主 ,并且在河谷下切过程中 ,砂岩和板岩将会出现差异卸荷回弹 ,边坡岩体中发育与倾倒变形体变形方向一致或相反的裂隙 ,有利于倾倒变形体的初始变形 ;河谷下切之前现今地面线附近岩体原始积累的地应力较高 ,当河谷下切至现今地面线时岩体卸荷强烈 ,在上述原因的共同作用下 ,倾倒变形体边坡向临空面发生大规模的倾倒变形。

关键词 :大型边坡 ;倾倒变形体 ;成因机制 ;数值分析 ;澜沧江

中图分类号 :TU457 ;TV741

文献标志码 :A

文章编号 :1006-7647(2012)03-0048-05

Integrated analysis of formation mechanism for large-scale toppling rock mass of a hydropower station on Lancangjiang River // ZHOU Hong-fu¹, NIE De-xin², LI Shu-wu³ (1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China; 2. Environment and Civil Engineering College, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. Hydrochina Xibei Engineering Corporation, Xi'an 710065, China)

Abstract :Based on field investigation of a hydropower project on the Lancangjiang River, this study analyzed the formation mechanism for a large-scale toppling rock mass in terms of the topographical features, lithological characteristics, crack orientation, in situ stress of the slope, and different mechanic capabilities. The results indicate that :the rock slope of the right dam shoulder is isolated and protruding; the stratum thickness is less than 10 cm and the unloading rebound displacements between the sandstones and the slates are different during the valley cutting; the cracks with the same or contrary orientation as the distortion orientation of distortion rock mass are beneficial to initiatory distortion of the toppling rock mass; and the computational results of the finite element method (FEM) also suggest that the in situ stress is much higher underground before the valley cutting and the rock mass unloading is intensively released after the valley cutting. Due to the aforementioned reasons, a significant toppling of the side slope rock mass may occur.

Key words :large-scale slopes; toppling rock mass; formation mechanism; numerical analysis; Lancangjiang River

我国西南地区发育大量的层状地层 ,在这些层状地层中 ,边坡岩体的倾倒变形是一个主要的变形破坏类型。倾倒变形体边坡的形成具有特定的地质条件 ,它一般发育在陡立或陡倾层状岩体组成的中-极陡坡中 ,岩层走向与边坡坡向近于平行 ,岩层倾向与边坡坡向相反^[1]。

大量的学者对边坡岩体的倾倒变形进行过较为详细的研究 ,得到了丰富的研究成果^[2-10]。但是这些研究多是针对倾倒变形体边坡的稳定性或者工程处理措施 ,对于大型倾倒变形体边坡的成因机制 ,特

别是多种原因造成边坡岩体倾倒变形的综合研究较少。为此 ,本文以现场调查资料为基础 ,结合倾倒变形体边坡地形地貌特征、地层岩性特征、结构面的发育特征、河谷地应力大小值以及岩体力学性能的差异等方面对澜沧江某水电工程大型倾倒变形体边坡的成因机制进行综合分析。

1 工程概况

拟建的某水电站位于澜沧江上游云南迪庆藏族自治州境内 ,水库正常蓄水位 1 906 m ,库容 2.72 亿 m³ ,

装机容量 840 MW。电站所在地区为横断山脉地带 , 区内山势险峻 地形坡度陡 岩层走向大多与澜沧江流向一致 高陡自然斜坡物理地质作用十分强烈 河谷两岸岩体变形、破坏较为普遍。

电站所在地区最大主应力方向为 NNW 向 , 大致平行于河流。在此种应力条件下 , 河谷应力特别是河床下部的应力集中程度较低 , 有利于边坡岩体的松弛卸荷。通过勘探发现在坝址右岸坝肩高处有一大型倾倒变形体分布(图 1 和图 2)。整个倾倒变形体总体上呈上游宽、下游窄的不规则形态 , 顺河流方向长 350 ~ 400 m , 垂直高度在 200 ~ 250 m 之间 ; 底部高程在 1920 ~ 1960 m (其中河水位高程在 1810 m 左右) , 在上游侧底部高程高一些 , 向下游方向高程逐渐降低 ; 顶部高程在 2130 ~ 2250 m 之间 , 同样也是在上游侧高程较高 , 向下游侧顺着山脊高程逐渐降低。根据平洞和钻孔揭露倾倒变形体的深度和空间展布特征 , 可以将倾倒变形体分为上下游两个区 :

a. 上游侧的 I 区为中-深倾倒变形区 , 范围相对 II 区来说要大一些 , 是右岸坝肩倾倒变形体的主

体部分 , 岩体倾倒变形的水平深度 80 ~ 120 m , 垂直深度在 40 ~ 70 m 之间 , 底界在 PD204 平洞洞口上方 , 顶部则一直延伸到右岸山脊顶部。

b. 下游侧的 II 区为浅-中倾倒变形区 , 岩体倾倒变形的水平深度 40 ~ 60 m , 垂直深度在 30 ~ 50 m 之间 , 向下游方向边坡岩体倾倒变形的垂直深度和水平深度逐渐降低。底界从 PD210 平洞上部通过 , 而顶部则同样延伸到了右岸山脊的顶部。

另外从平洞调查可知 , 平洞内边坡岩体倾倒折断明显 , 在 PD212 平洞和 PD228 平洞内均发现明显的倾倒折断面(图 3 和图 4)。根据平洞内倾倒折断面的产状可以确定边坡岩体的倾倒方向在 $NE75^{\circ} \sim 95^{\circ}$ 之间。倾倒折断面的存在进一步证实了右岸坝肩高处边坡岩体发生了明显的倾倒变形。

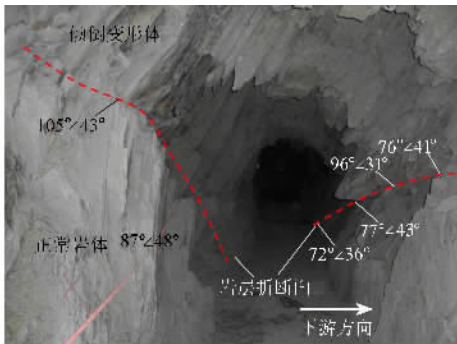


图 3 PD212 平洞 98 ~ 101 m 处岩层倾倒折断面

2 倾倒变形体成因机制分析

从现场调查以及室内分析的结果可知 , 右岸坝肩高处边坡岩体发生倾倒变形并不是由单一因素造成的 , 而是与倾倒变形体边坡的地形地貌特征、岩体



图 1 右岸坝肩高处倾倒变形体

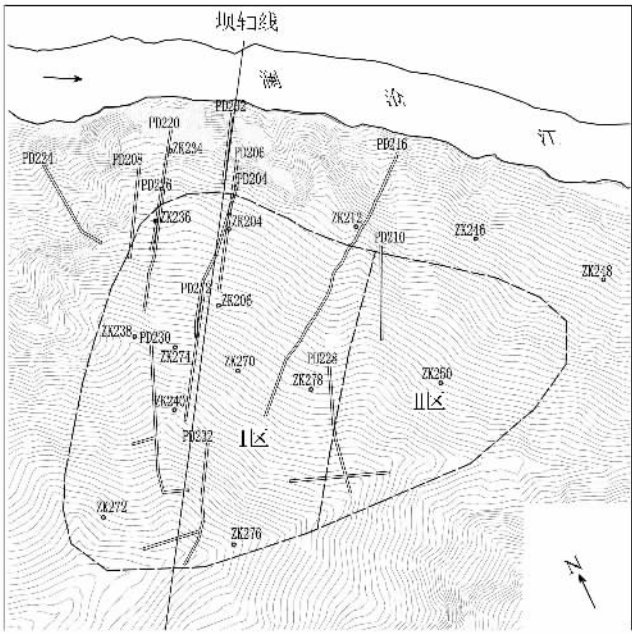


图 2 右岸坝肩倾倒变形体分区平面示意图

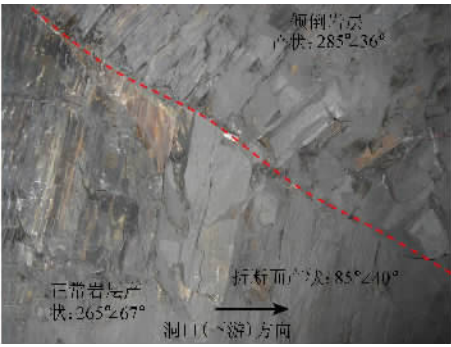


图4 PD228平洞上游支洞40~43m处岩层倾倒折断面结构特征、结构面的发育特征、河谷地应力场值以及岩体力学性能的差异等方面均有密切的关系。在这些因素的共同作用下,边坡岩体发生倾倒变形。

2.1 地形地貌条件

河谷的地形地貌特征是孕育倾倒变形体的一个重要条件,从地形上来看,右岸坝肩边坡由于澜沧江和南几洛沟的深切,使得右岸坝肩边坡呈孤立突出的单薄山梁状(图5),这使得边坡岩体三面临空,并且边坡顶部高程在2200~2300m之间,而澜沧江水位在1810m左右,整个边坡的高度达到了400~500m,在这种情况下,边坡岩体的卸荷更加强烈,卸荷深度也更大。在经历强卸荷后,岩体的力学性能降低,为岩体倾倒变形提供了有利的条件。



图5 右岸坝肩地形

2.2 地层岩性条件

水电站坝址区地层主要是二叠系上统下段的一套灰色、灰黑色薄层状砂质板岩、泥质板岩夹中厚层变质石英砂岩及少量英安岩。根据笔者在现场统计的大量岩层产状可知,岩层走向SN~NE向,与河流呈大角度相交,倾向在85°~110°之间,倾角普遍在75°以上,属于陡倾发育的一套地层(图6)。

岩层的层厚也是倾倒变形体发育的一个重要条件,从平洞中揭露的岩层层厚情况可知,主要以薄层-互层状结构为主,局部有少量中厚层状和厚层状结构。为了进一步分析右岸坝肩倾倒变形体边坡岩层的层厚特征,笔者在右岸坝肩平洞中对298个岩层的层厚进行了统计,从统计的结果可知,岩层层厚在

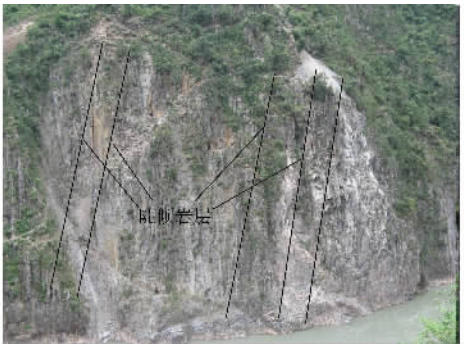


图6 坝址区陡倾发育的岩层

10cm以下的一共有178层,占全部统计层数的59.7%;岩层层厚在10~20cm之间的有74层,所占比例为24.8%;岩层层厚在20~30cm之间的有26层,只占8.7%;而层厚大于30cm的一共只有20层,所占比例也仅为6.7%。其中岩层层厚在20cm以下的一共有252层,占全部统计层数的比例高达84.5%。这种高陡倾、薄层状的岩体力学性质较差,在强烈的卸荷回弹作用下,岩体容易向临空方向产生倾倒变形破坏。

另外右岸坝肩边坡岩性为砂板岩互层,由于砂岩力学性能高,而板岩的力学性能相对砂岩来说要低一些,在河谷的不断下切过程中,倾倒变形体所在边坡要向临空面发生较大的卸荷回弹,而由于砂岩和板岩力学性能的差异,将会导致边坡表浅部层状岩体沿层面错位变形。利用有限元法来进一步分析这种差异卸荷回弹变形,建立的有限元计算模型见图7,对模型的要求如下:

- a. 有限元模型主要是为了分析右岸坝肩倾倒变形体的成因机制,因此选择计算剖面的剖面方向大致与倾倒变形的变形方向一致,为NE82°。
- b. 根据右岸坝肩岩层的岩性特点,模型中只考虑两种岩体:砂岩和板岩。
- c. 模型中考虑一级夷平面高程为3000m,初始地面为水平状。
- d. 在模拟河流下切过程中,模型一共分4步下切至现今河谷地面线。

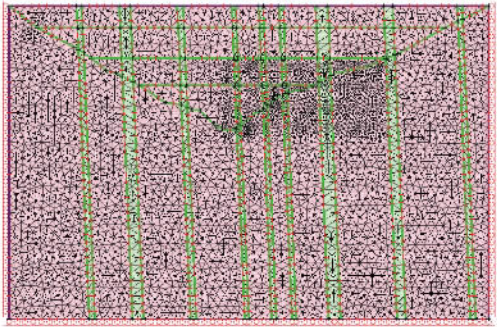


图7 有限元计算模型(河谷下切前)

计算得到的河谷下切到现今地面线以后,砂岩和板岩之间的层间错位如图 8 所示。在砂岩和板岩的接触面,向边坡上部差异卸荷回弹的量值从几厘米到 20 cm 不等,这种差异卸荷回弹导致岩层的层间发生错位,从而造成较紧密的层间发生松弛,边坡岩体的整体力学性能和完整性遭到破坏,使得岩体的抗弯曲变形能力降低,为岩层的倾倒变形提供了有利条件。

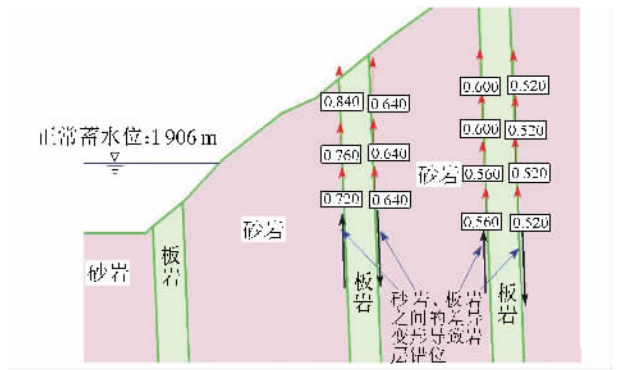


图 8 砂岩和板岩之间的层间错位(单位: m)

上述有限元分析计算结果与笔者从理论上分析斜坡层状岩体倾倒变形由于水平应力差异造成层间位移的模式是一致的(图 9 和图 10):以片理面构成的斜坡内结构面将受到向上错位的应力分量,造成片理面的进一步分离和错位,形成台状“板梁”;“板梁”状的岩体其力学性能有一定程度的降低;这些“板梁”在斜坡上部最大主应力的长期作用下,将发生向河谷方向的弯曲变形,有的发生折断,当斜坡中有适当的弱面时,更容易从结构面处弯折、拉开,

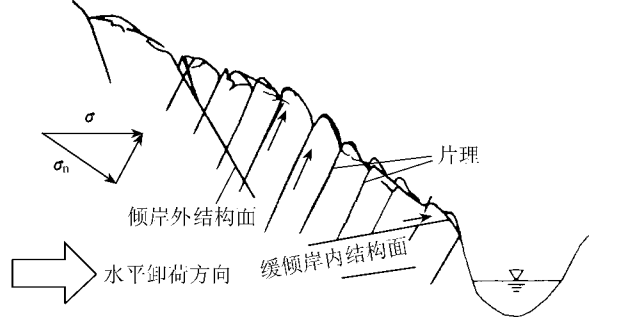


图 9 陡倾层状岩体在应力作用下的初始变形

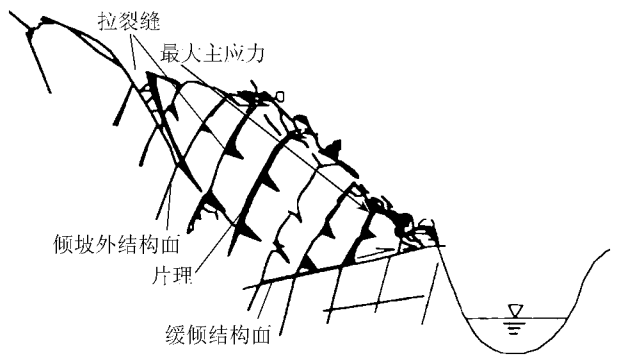


图 10 板状岩层弯曲、拉裂形成倾倒变形体和滑坡

图 10 展现了这种弯曲拉裂的状况;随着变形的发展,倾倒变形体形成;如果进一步变形,遇到斜坡下部发育缓倾结构面时,会形成滑坡。

2.3 地质构造条件

坚硬岩体在倾倒变形的初始,由于岩块的强度较高,而结构面的强度则相对要低很多,因此倾倒变形体的变形一般首先是从岩体中的结构面开始拉裂变形。而初始边坡中结构面的方向与倾倒变形体变形方向之间的相关关系则对倾倒变形体的发育形成有着重要的作用,如果边坡中结构面的方向与倾倒变形体变形方向一致或者相反的话,那么在倾倒变形体变形初始阶段,沿着这些结构面更容易拉张变形,促使倾倒变形体的进一步变形破坏。

图 11 是右岸坝肩边坡中结构面的优势方位与倾倒变形体变形方向之间的相关关系图。从图 11 可知,最发育的是走向与岩层走向大致垂直、倾角在 50°以上的两组结构面。从平洞中边坡岩体倾倒折断面的方向可知,倾倒变形体的变形方向为 NE75°~95°,而右岸坝肩优势裂隙中有两组倾向与倾倒变形体变形方向一致或相反的裂隙,从图 11 可以看出,两组裂隙面的倾角都在 40°以上,在倾倒变形体变形破坏的初始阶段,倾倒变形体根部折断面可以首先沿这两组结构面拉裂变形,为倾倒变形体进一步变形破坏提供有利条件。

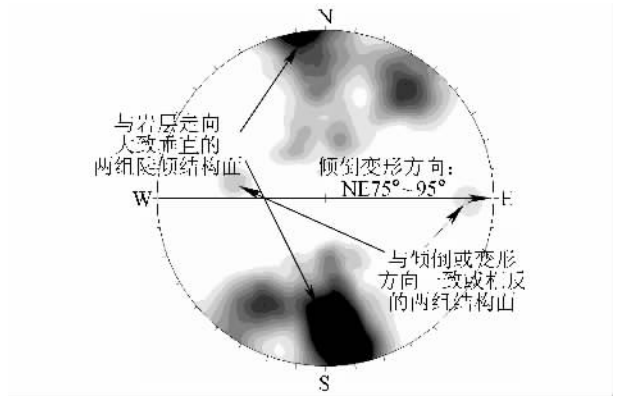


图 11 右岸坝肩优势结构面与倾倒变形方向的关系

2.4 应力条件

水电站坝址区一级夷平面的高程在 3 000 m 左右,而现今坝址区澜沧江河谷底部的高程在 1 800 m 左右,这就意味着,从一级夷平面算起,河谷的切割深度在 1 000 m 以上,如此大的切割深度,意味着在河流切割之前,地应力的积累程度较高,而当切割到河谷现今的地面线后,河谷边坡岩体的卸荷程度也相应地较大。

采用有限元法进一步分析说明河谷应力的积累程度以及边坡岩体卸荷程度的具体量值,建立的有限元计算模型见图 7。在河流未下切之前,计算得

到的现今河谷地面线处最大主应力见图 12,可以看出,现今地面线附近的最大主应力较高,可以达到 25 ~ 30 MPa。当河谷从一级夷平面下切至现今河谷,右岸坝肩斜坡上部岩体的卸荷值,即各位置上岩体应力减少值的计算结果见图 13。从图 13 可知,倾倒变形体边坡所在位置处岩体的卸荷值可以达到 7 ~ 10 MPa,高的卸荷或应力释放是造成岩体卸荷变形的主要因素,力的改变必然导致岩体变形——位移。

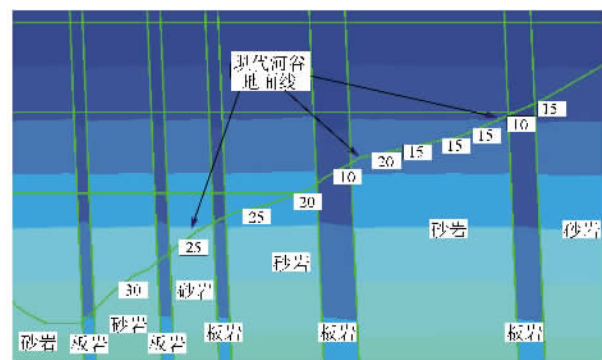


图 12 现今河谷地面线处最大主应力(单位:MPa)

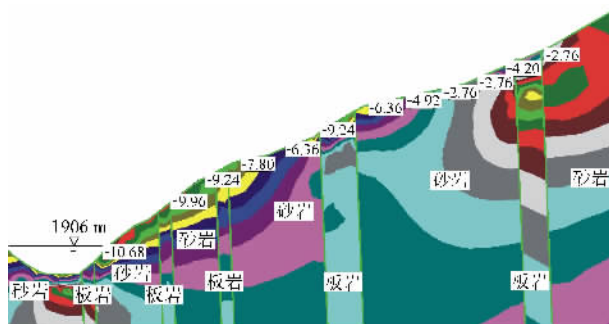


图 13 河流下切至现今河谷斜坡上部岩体卸荷值(单位:MPa)

3 结 论

a. 边坡岩体的倾倒变形并不是由单一因素造成的,而是与边坡的地形地貌特征、岩体结构特征、结构面的发育特征、河谷地应力大小以及岩体力学性能的差异等方面密切相关,是这些因素共同作用的结果。

b. 从地形上来看,由于澜沧江和南几洛沟的深切,使得右岸坝肩边坡呈孤立突出的单薄山梁状,这使得边坡岩体三面临空,并且边坡顶部高程在 2 200 ~ 2 300 m 之间,而澜沧江水位在 1 810 m 左右,整个边坡的高度达到了 400 ~ 500 m,在这种情况下,边坡岩体的卸荷更加强烈,卸荷深度也更大。

c. 右岸坝肩边坡岩体主要以薄层状结构为主,岩体的抗变形能力相对较差,再加上岩体的倾角普遍在 75°以上,陡倾薄层的岩体更容易发生倾倒变形破坏。此外,坝肩边坡的砂岩和板岩由于力学性能上的差异,在河谷下切、边坡岩体应力释放导致岩体

卸荷回弹的过程中,两者向临空面出现差异卸荷回弹,使得边坡浅部层状岩体沿层面错位变形。在斜坡上部最大主应力的长期作用下,将发生向临空方向的弯曲倾倒变形。

d. 右岸坝肩边坡岩体中发育两组倾向与倾倒变形体变形方向一致或相反的裂隙,在倾倒变形破坏的初始阶段,倾倒变形体根部折断面可以首先沿这两组结构面拉裂变形,为倾倒变形破坏提供了有利的条件,也促使倾倒变形进一步发展。

e. 有限元分析结果表明,河谷未下切之前,现今地面线附近的最大主应力较高,可以达到 25 ~ 30 MPa。当河谷从一级夷平面下切至现今河谷,右岸坝肩斜坡上部岩体的卸荷值,即各位置上岩体应力减少值可以达到 7 ~ 10 MPa,如此高的应力释放必然导致岩体变形,加剧岩体向临空面的倾倒变形。

f. 综合上述分析,可以得到右岸坝肩倾倒变形体的成因机制:右岸坝肩边坡由于南几洛沟和澜沧江的深度切割,形成了相对单薄、突出、三面临空的山梁,再加上河谷下切之前岩体原始积累的地应力较高,当河谷下切至现今地面线时岩体卸荷强烈,薄层的陡倾砂板岩在差异卸荷回弹作用下沿着倾向与倾倒变形体变形方向一致或相反的裂隙发生向边坡下游的倾倒变形破坏。

参考文献:

- [1] 张新克,任光明,刘金阳.某电站库区 1# 倾倒体边坡稳定性评价[J].水土保持研究,2007,14(1):313-317.
- [2] 姚爱军,苏伯苓.公伯峡坝前倾倒体地震敏感性数值模拟分析[J].河北地质学院学报,1995(2):150-154.
- [3] 邹正明.富溪连拱隧道出口变形倾倒体仰坡治理工程[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2006,29(12):1556-1559.
- [4] 周克发,王昭升,张士辰,等.克孜尔水库主坝右坝肩倾倒体结构稳定安全评价[J].大坝与安全,2007(6):21-24.
- [5] 苟富民.麒麟寺水电站坝前左岸倾倒体稳定性分析研究[J].西北水电,2008(4):8-14.
- [6] 宋彦辉,黄民奇,陈新建.班多水电站左岸 1 号倾倒体破坏机制分析[J].水利水电科技进展,2007,27(5):50-52.
- [7] 谢莉,李渝生,曹建军,等.澜沧江某水电站右坝肩岩体倾倒变形的数值模拟[J].中国地质,2009,36(4):907-914.
- [8] 张国新,赵妍,石根华,等.模拟岩石边坡倾倒破坏的数值流形法[J].岩土工程学报,2007,29(6):800-805.
- [9] 徐佩华,陈剑平,黄润秋,等.锦屏 I 级水电站解放沟左岸边坡倾倒变形机制的 3D 数值模拟[J].煤田地质与勘探,2004(4):40-43.
- [10] 李德亮,石崇,聂卫平,等.基于土性相关蒙特卡罗法的争岗滑坡堆积体可靠性分析[J].河海大学学报:自然科学版,2011,39(3):317-322.

(收稿日期:2011-10-25 编辑:熊水斌)