

电站坝址下游滑坡变形破坏机制物理模拟研究

刘洋¹, 唐鸣发², 王亚昆¹

(1. 成都理工大学, 四川 成都 610059; 2. 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要:在对金沙江某水电站滑坡的形态及变形特征、结构及物质组成特征、以及滑床特征等实际情况认真调查的基础上,选取贯穿滑坡体的Ⅱ-Ⅱ'主剖面,利用物理模拟研究方法中的底摩擦试验,再现了该边坡变形破坏的部分过程,并对变形及最终破坏机制进行了深入分析,确定该滑坡属滑移-弯曲型;同时,通过与3DEC离散元程序模拟研究及该边坡变形破坏的实际情况之对比分析,充分验证了该物理模拟研究方法的可行性。

关键词:底摩擦试验;破坏机制;滑坡变形;离散元模拟;坝址下游;西南地区

中图分类号:TV314

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2012)02-0100-04

Physical simulation on the sliding deformation failure mechanism at downstream slope of a hydropower station in southwest

LIU Yang¹, TANG Mingfa², WANG Yakun¹

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. East China Investigation and Design Institute, CHECC, Hangzhou 310014, China)

Abstract: This paper based on the investigation of actual distortion and damage of the low-angle dip bedding slope, such as the characteristics of the shape and deformation, the structure and matter constituent for the landslide in a southwest hydropower station, reappeared the part process of deformation failure by choosing the Ⅱ-Ⅱ' main section of the landslide and using base contact friction experiment in the physical simulation method, synthetically analyzed the deformation of different phases and the final failure mechanism, and eventually confirmed that the landslide is belong to sliding-compression cracking. At the same time, according to the comparison of the research findings of the physical simulation method with the outcomes of 3DEC distinct element analysis and landslide stability analysis and with the actual distortion and damage of the landslide, this paper still adequately demonstrated the feasibility of the physical simulation method.

Key words: test of base friction; failure mechanism; sliding deformation; distinct element simulation; downstream slope; southwest of China

0 引言

在中国,物理模拟研究方法应用于斜坡岩体的稳定性分析起始于20世纪70年代。它具有两个突出的意义:一是能够直接观测和记录研究对象的变形、破坏演变过程;二是可以通过试验应力分析获得研究对象的变形演变过程中各阶段的应力分布状态以及由于变形与局部破坏导致的应力重分布情况,故近年来有较大的发展^[1-3]。目前国内底摩擦试验主要针对公路边坡的变形破坏机制做了大量的研究,但目前对水电站库区内中缓倾角顺层边坡的物理模拟研究还不多。本文根据金沙江某水电站坝址下游的某中缓倾角顺层滑坡变形破坏现象为特征,

通过大量的野外调研得出了滑坡形成的一些初步结论,为了进一步验证滑坡的变形破坏机制进行了该项模拟试验。

1 滑坡基本特征

1.1 形态特征

滑坡位于金沙江某水电站坝址下游左岸,距中坝址6.0~7.5 km,分布面积约2.795 km²,体积2.42亿m³,为巨型滑坡。该滑坡形态特征明显,后缘呈明显圈椅状地形,前缘呈舌状凸出。由于该滑坡处于金沙江的高山峡谷区,地应力高,因此滑坡分布范围广,厚度变化大,滑体中部及后部厚度为100~220 m,纵剖面上底滑面略呈弧形;前部滑体厚度

收稿日期:2011-11-20; 修回日期:2011-12-11

作者简介:刘洋(1986-),男,重庆人,硕士研究生,主要从事于边坡稳定、地质灾害防治研究。

35~40 m,纵剖面上底滑面为直线形。原始岸坡为一倾外的顺层边坡,这类岸坡常孕育大规模变形破坏,稳定性较差。

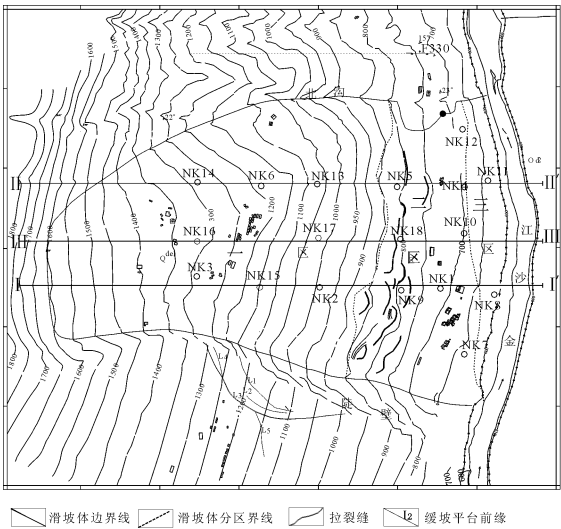


图 1 滑坡全景图

1.2 滑体结构特征

原始岸坡地层岩性比较简单,主要为奥陶系中统巧家组和大菁组,两地层为整合接触。

(1)巧家组(O₂q)。岩层产状变化较大,1 400 m 高程以下为 N10°~20°E,SE∠20°~30°,后缘分水岭一带倾角变陡,可达 40°~60°。岩性主要为瘤状灰岩,较软弱,遇水易软化,水理性质较差,为本区主要的易滑地层,控制了边坡岩体的变形破坏。

(2)大菁组(O₂d)。大菁组(O₂d)岩性主要为白云岩夹灰色白云质灰岩,岩层产状与巧家组相同,整合于巧家组之上。岩体坚硬,完整性较好,表部岩体受风化卸荷的影响完整性较差。

大菁组与巧家组接触带的瘤状灰岩抗风化能力较弱,在地下水长期浸泡条件下,其力学强度下降相对较快,在上覆岩体重力作用下很容易产生顺层错动。因此巧家组瘤状灰岩上部地层及与大菁组的接触带构成边坡岩体的潜在破坏面。其地质剖面简化图见图 2。

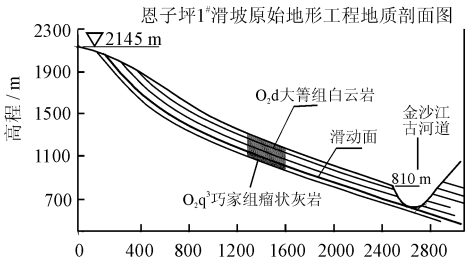


图 2 底摩擦模型简化图

2 试验设备及模型建立

2.1 试验原理及设备

底摩擦法是以摩擦力在摩擦方向上的分布与重力场相似的性质,利用模型和底面之间的摩擦力来模拟模型体积力(重力),原理如图 3 所示。底摩擦试验原理即将研究对象的剖面制成模型,平放在可以持续移动的底板上,并使原剖面的深度方向与底板移动方向一致。随着底板持续移动,模型也随之移动。在底板移动方向有一固定框架,当模型受到这一固定框架阻挡时,在模型与底板接触面上每一点就形成摩擦阻力 F :

$$F = (P + \gamma_m t)\mu \tag{1}$$

式中: P 为作用于模型法向单位面积上的压力; γ 为模型材料的密度; t 为模型的厚度; μ 为模型与接触面滑动摩擦系数。物理模拟以相似原理为基础,建立研究对象和模型试验之间的相似关系,保证模型试验中出现的物理现象与原型相似。模型与研究对象相似,需要在几何条件、受力条件和摩擦系数方面满足一定的关系^[1-5]。

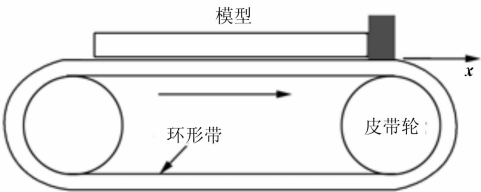


图 3 底摩擦模型试验原理示意图

根据圣维南原理,当模型足够薄时,认为摩擦力能够均匀作用在整个厚度上,可以模拟原型在天然状态下受到的重力作用。试验所采用的设备,是成都理工大学和四川大学在多年探索和经验积累的基础上,根据底摩擦试验的基本原理,共同设计的一套全自动化底摩擦试验仪器(见图 4)。

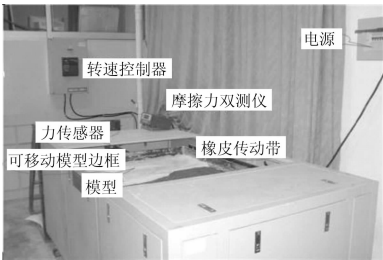


图 4 自动化底摩擦仪

该仪器的最大优点是:橡皮带转速可随时控制、增减速均匀,不会出现摩擦力变化剧烈的不稳定现象;摩擦力可随时从观测仪上获取,可随时利用增减

橡皮带转速而进行调节控制,以便适应实际要求,且可根据实际情况随时暂停。

2.2 模型建立

本次滑坡成因机制模拟主要考虑滑坡形成前的滑坡岩性及构造情况,本次模拟试验区的主要岩性为:白云岩和瘤状灰岩;而构造条件主要为倾向坡外的顺层层理,无大型的区域断裂。滑坡实际底边长 3 200 m,高 1 765 m;模型试验决定采用1:4000的比例;模型底边 0.8 m,高 0.441 m。依据实体研究对象与模型的长度比,将实体高度缩放为模型高度,即实体与模型的长度方向和高度方向的比值相同。

而对于模型材料的选取,因为研究对象滑坡体结构复杂,选用材料不可能完全满足真实配比,另外这里主要为变形破坏机制的模拟,因此,为了材料的选用的合理和使用方便,对滑坡体结构进行了简化处理,即重度取整个滑体土平均值,其大小为 21.4 kN/m³,摩擦系数亦取平均值,大小为 0.754($\varphi = 37^\circ$)。模型材料按照物理模拟惯例,采用由重晶石粉、石英砂和液体石蜡混合而成的可塑性材料。在配比方面,根据摩擦相似系数 $C_f = 1$ 的要求,对重晶石粉、石英砂和液体石蜡按不同配比配合,并施加同样的外力适当压实制作试样,分别对其物理力学性质进行试验在此基础上,再通过特定的击实试验,确定达到实际固结情况下的密实度。表 1 即为确定比较合理配比情况下的击实试验结果,最终试验选用 15 击击实数制模,结果见表 1。

表 1 模型材料土工试验成果表 kN/m ³ , kPa, (°)				
试验 编号	重晶石粉: 石英砂: 液体石蜡	密度 ρ_s	内聚力 c	内摩擦 角 φ
模型 1	61: 30: 9	21.0	16.5	36.4
模型 2	60.5: 30.5: 9	21.1	16.8	36.6
模型 3	60: 30: 10	21.4	17.0	37.0

最终选用最接近击实结果的模型 3 之配比进行本次物理模拟试验研究。最后,根据以上简化建模并结合原型与模型之间的相似系数关系,确定试验

过程中摩擦力保持在 62.3 N 左右。

3 试验过程、现象及结果初步分析

针对滑坡体 II - II' 剖面,根据前面所述,首先进行简化制模。试验开始后,结合实际情况,具体过程及分析评价如下。

3.1 试验过程及现象

将做好的“骨架”层先置于底摩擦仪上,先按滑坡剖面形态摆放,并注意将向斜根部压紧,将混合土置于其间,压密。制成 80 × 56 cm 长方体样。面上为了便于观察裂缝,撒上膨润土粉末,并抹平试验前准备好的模型如图 5,图 中所显示的为滑坡体破坏前的天然形态,上下两个面分别是滑体和基岩部分,中间滑带用锡纸铺隔,两侧及底部取为约束边界。

根据模拟研究,这类变形演变可分为 3 个阶段^[6]:

(1) 轻微弯曲阶段: 试验开始后不久,可见浅层滑面以上坡体内顺层的微裂纹开始发育,滑坡体前部有部分的破坏,同时,顶部也出现少许裂纹向下发育(见图 6)。

(2) 强烈弯曲、隆起阶段: 随着试验的继续进行,滑体前部的破坏加剧,近于直立的微裂与层面交互贯通,并且滑体部分发生拉裂变形;滑体中部的浅层层面上出现一条顺层面向深处发育的微裂隙,裂缝自下而上近于直立的微裂纹也开始扩大,并向后贯穿至坡体顶部。

(3) 切出面贯通阶段: 到试验终止时,滑体前缘滑体浅层部分基本解体,破坏较严重;中后部滑体滑体发生明显的顺层滑动,同时,伴随有向深处发生的拉裂缝,中后部的滑体只有部分破裂,总体上显示出滑体向前滑移的迹象(见图 7)。

3.2 结果初步分析

从图片中可以看出,裂缝最初由滑坡表面开始发育,随着试验的进行,逐渐向深部发展,直至破坏,这与滑坡体顺层产状有关。由该滑坡 II - II' 剖面的物理模拟结果可得出如下结论:

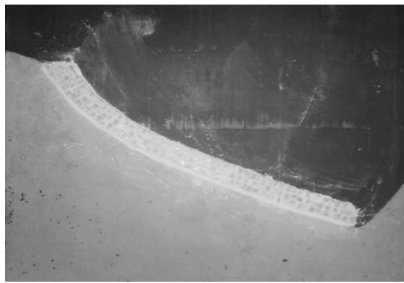


图 5 滑坡体破坏前天然边坡试验最初模型

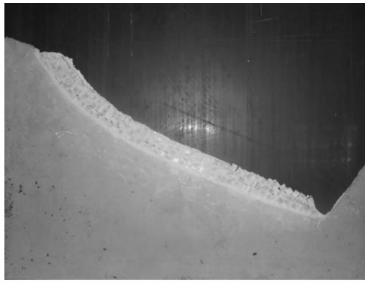


图 6 试验中期滑坡体发生轻微变形

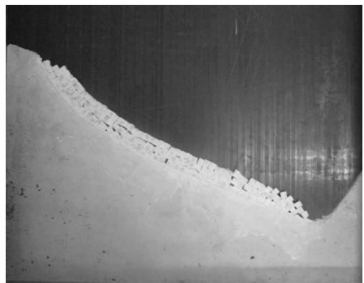


图 7 试验最终模型

(1)在整个试验进行过程中,滑坡体前缘破坏严重。其原因有两方面:①滑移控制面倾角大于该面的峰值摩擦角;②金沙江下切作用,形成了一个很好的临空面,所以滑体前部解体严重;

(2)滑体整体主要以顺层滑坡为主,受其前缘破锁固段的影响,造成坡角附近顺层岩体受纵向压力,该坡体在前缘产生强烈变形,因此其中后部破坏程度相比滑体的前部较小。

(3)对深层滑面以上的整个坡体来说,出现稍微的滑动迹象,虽然滑距小,但考虑到滑坡是以 1:4000 的比例缩小,故整个滑坡的滑距不容忽视。

4 离散元数值模拟验证

本文采用 3DEC (3Dimension Distinct Element Code) 离散元软件对滑坡变形破坏进行数值模拟分析,模拟结果如图 8 和图 9 所示。

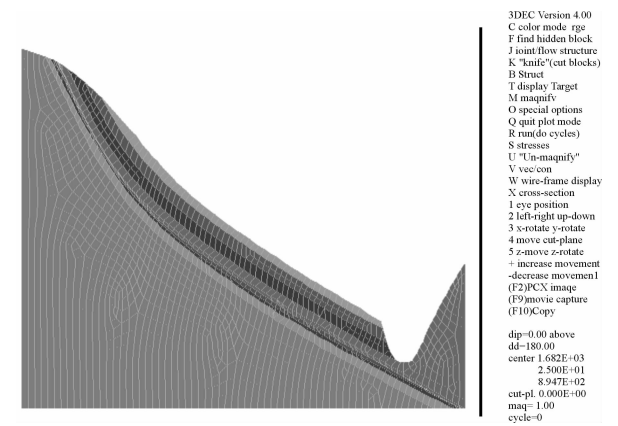


图 8 天然状态下滑坡体位移云图

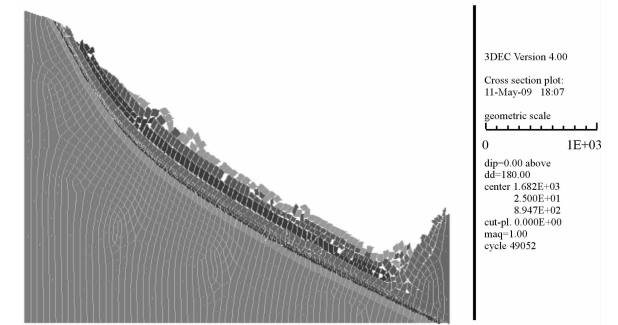


图 9 试验进行状态下滑坡体位移云图

离散元数值模拟的结果显示,在强大的自重应力作用下,边坡岩体产生整体滑移变形,变形是由前向后逐步扩展的,边坡前部岩体变形相对严重,沿潜在滑面发生滑动破坏,后部岩体由于前部锁固段岩体阻挡,变形相对较小。

通过物理模拟实验结果与离散元结果分析,离散元结果与物理模拟结果较为吻合,但并不能很好的模拟出滑坡渐进性破坏的过程。

5 结 语

通过对该库区滑坡的变形破坏机制物理模拟分析,可得出如下几点认识:

(1)验证了“滑移—弯曲线”这种坡体变形破坏机制主要发育在中—陡倾外层状体斜坡中,尤以在薄层状岩体及延性较强的碳酸岩类层状岩体较为多见。

(2)滑坡变形破坏部位主要集中在前部,同时后部变形破坏较轻微,破坏性质属于坡体深部滑移—弯曲线。

(3)离散元分析结果证明,物理模拟分析结果是正确的、可靠的。

参考文献:

[1] 石豫川,冯文凯,冯学钢,兰 波. 国道 108 线某段缓倾角顺层边坡变形破坏机制物理模拟研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2003,30(4):671-677.

[2] 冯文凯,石豫川,柴贺军,等. 斜坡填筑路堤变形破坏物理模拟研究[J],岩石力学与工程学报,2006,25(3):2861-2867.

[3] 冯文凯,石豫川,柴贺军,等. 缓倾角层状高边坡变形破坏机制物理模拟研究[J],中国公路学报,2004,17(4):32-36.

[4] 卢 达,黎梦军. 基于底摩擦试验的岩石边坡变形研究[J],铁道建筑,2010(10):70-72.

[5] 蔡国军,裴 钻. 反倾互层岩质边坡开挖物理模拟试验研究[J],水土保持研究,2007,14(10):126-130.

[6] 张倬元,王士天,王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社,1981.

[7] 徐 进. 斜坡变形破坏几种基本地质力学模式的物理模拟研究[D]. 成都:成都理工大学,1987.