

溪洛渡库区干海子滑坡变形特征分析

樊柱军¹, 王 振²

(1. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院, 陕西 西安 710032; 2. 黄河勘测规划设计有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要:通过有限差分软件FLAC^{3D}对滑坡进行了三维数值位移计算及变形特征分析,结果表明:水库正常蓄水至600m高程,滑坡的剪切变形主要集中在前缘垮堵湾附近,前缘局部会发生浅层滑带;后缘拉伸屈服区域较大,坡度较陡,可能会发生崩塌或倾倒;滑坡的水平、竖向位移变形主要集中在前缘高程590~650m、 $x=479200 \sim x=479214$ 靠近垮堵湾附近区域。

关键词:滑坡;变形特征;剪切变形;浅层滑带;拉伸屈服

文章编号:1003-8035(2013)02-0038-06

中图分类号:P642.22

文献标识码:A

0 引言

干海子滑坡^[1]位于溪洛渡水电站库区右岸距坝址约14km,堆积体约 $4760 \times 10^4 \text{m}^3$,滑坡具有展布面积广、堆积厚度大等特征,施工期围堰蓄水至431m高程以及水库正常蓄水至600m高程后,在库水位上升、暴雨等外营力作用下,滑坡将发生变形,一旦滑坡局部破坏或整体失稳,就会对下游大坝的安全以及人民的生命财产造成极大的威胁。因此,弄清该滑坡的成因机制、合理的评价其变形破坏模式以及稳定性就显得非常必要。

邹国庆^[2]对该滑坡的成因机制、形成原因进行了分析。同时以极限平衡理论为基础对滑坡的稳定性进行了评价;兰恒星^[3]提出一种滑坡非线性动力学模拟的方法,并对该滑坡进行了几种荷载情况下的动力学模拟;樊柱军^[4]基于模糊信息优化方法对滑坡进行了定性分析。王治华^[5]等对三峡库区滑坡活动进行了分析。上述文献的研究表明:水库蓄水到600m高程条件下,对滑坡的影响最大,滑坡整体上处于偏稳定状态;但滑坡体是一个非线性系统^[6],局部可能会发生应力、应变的突变,发生小范围的破坏,本文以有限差分软件FLAC^{3D}为手段,以滑坡600m高程蓄水后内部位移变形为出发点,分析变形特征,从而推测滑坡局部可能发生的破坏模式,为滑坡后期的治理提供依据。

1 滑坡概况

1.1 滑坡区地质概况

滑坡所处的金沙江段(图1),江水总体流向由N55°E转为N25°E;河谷深切,切割深度达1500~1800m;该段金沙江枯水期水位384~388m,洪枯水

位变化幅度达十余米。地貌上滑坡所在的岸坡向右岸凹进,谷坡陡缓相间,1180~950m高程以上基岩裸露,为近千米高的陡坡,局部为陡壁;600~950m坡度较缓,总体上为一缓倾下游的斜坡,主要是滑坡、崩塌和洪积物堆积区。

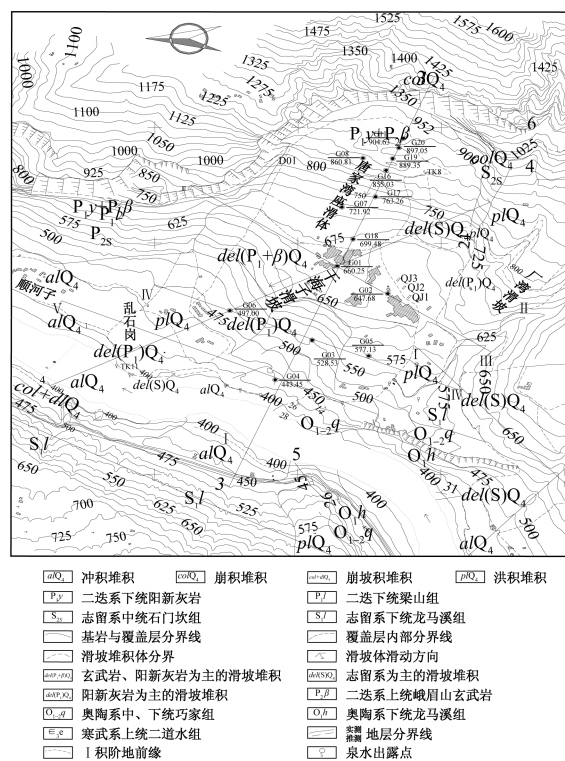


图1 干海子滑坡平面地质图

Fig. 1 Plan of GanHaiZi landslide

收稿日期:2012-10-11;修订日期:2012-12-12

作者简介:樊柱军(1983—),男,河南南阳人,工程师,硕士研究生,从事岩土工程方面的工作。

E-mail: hbsyffzjj@163.com

坡区出露的基岩有寒武系上统二道水组(ϵ_3e),奥陶系红石崖组(O_1h)、巧家组($O_{1-2}q$),志留系龙马溪组(S_1l)、石门坎组(S_2s),二叠系下统梁山组(P_1l)、阳新灰岩(P_{1y})及二迭系上统峨眉山玄武岩($P_2\beta$)。

结合国家地震局提供的相关地震烈度区划信息以及水库诱发地震成因分析,马边—盐津地震带距离坝址区较近,为影响库岸滑坡稳定性外围地震带,地震危险性主要来自于该地震带的波及影响,地震基本烈度为Ⅷ度。

1.2 滑坡工程地质特征

滑坡后缘为干海子平台,高程 640~650m,长约 600m,宽 200~300m,总体以 $3^\circ\sim5^\circ$ 倾角向坡内反倾;平台后部为一负地形,既所谓的“干海子”,长约 300m,宽约 80m,地形平缓,覆盖有洪积的砂壤土层。上游侧经老庙子前面至登干堡沟口有一槽状地形,为原来“海子”的出口,沿途均有冲积的中粗砂分布。平台下游侧有阳新灰岩孤块石分布;平台前缘临江斜坡较陡,坡度总体为 $35^\circ\sim40^\circ$ 。

唐家湾座滑体位于干海子滑坡后缘,高程 640m 左右,后缘高程 900m 左右,上游和硝厂湾滑坡以基岩斜坡为界,下游经过凹地形过渡到基岩陡壁;平面上呈 $700\text{m}\times600\text{m}\times(60.35\sim203.49\text{m})$ 三角形展布,堆积体积约 $3040\times10^4\text{m}^3$;地形上呈前陡后缓的态势,后缘为一平台,底部和基岩、干海子滑坡界线呈弧状;在平台上发育 NNE 向展布的弧形凹槽。

选取干海子滑坡—唐家湾纵 4-4 剖面(图 2),滑坡体的岩土成份及其结构特征见表 1。

由于滑坡前缘斜坡较陡,在金沙江的冲蚀以及其

它外力作用下,发生了多期次、多阶段的牵引~张拉活动;正交金沙江的方向 $N68^\circ W$,剪出口高程 380~390m;在 457m、475m、530m 和 610m 可清晰看到滑动后的痕迹,存在明显的平台。活动体顺河向长 300~420m,厚度在 20~30m,体积 $315\times10^4\text{m}^3$ 结构松散,表层堆积块碎石。

滑坡地下水位存在滑体底部的碎石土层中,埋深较深,主要来源大气降水、后缘基岩裂隙水及灌溉下渗水,由于滑体物质渗透系数较大,有良好的下渗和排泄通道,其地下水位的变幅和大气降雨同步,前缘泉点呈线状分布,出露高程在 400m 左右,流量较小。

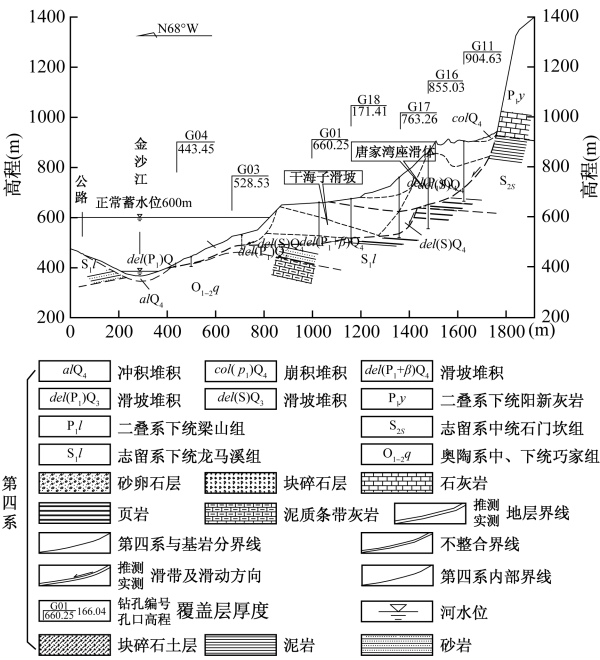


图 2 干海子滑坡工程地质纵剖面图
Fig. 2 Ganhaizi landslide longitudinal profile

表 1 滑坡岩土体成份
Table 1 Landslide geotechnical composition

名称	组成	分布	厚度粒径	结构
$del(P_1+\beta)Q_4$	灰岩和玄武岩混杂的碎块石	滑坡后缘平台	厚 10.30~130.70m, 粒径 3~8cm	松散
$del(P_1)Q_4$	灰岩组成块碎石	前缘斜坡上及滑体的中上部	厚 33.67~75.01m, 粒径 1~4m	架空
$del(S)Q_4$	泥页岩块碎石	滑体的底部	厚度 25.78~30.41m	较密实
滑带	泥页岩角砾、岩屑夹泥	滑带	厚 0.5~2.30m, 粒径 0.5~1.0cm	紧密
S_1l	灰岩	滑床	—	完整性好

2 滑坡三维变形特征分析

2.1 模型的建立及计算参数的选取

鉴于滑坡形态的复杂性,采用 surfer-ansys-FLAC 相结合的手段建立,首先提出滑坡表面等高线,在

surfer 内插法生成滑坡表面基线,将内插数据按照 ansys 格式,由点-线-面-体逐步建立滑坡表面形态;在滑带建模时,利用文献^[1]在该滑坡做的大量钻探、竖井、坑、槽探、地质测绘工作成果,确定了滑带的形态、边界条件和 5 条勘探剖面(图 1)地层数据,同

时近似假定滑带各点沿主滑方向呈对称,按照滑带各点与主滑方向距离远近,采用线性方法,以及 surfer 内插法导出滑带数据点,建立滑带形态(图 3);将在 ansys 中建立的三维模型导入 FLAC^{3D}中,由于滑带相对滑体很薄,在 FLAC^{3D}将滑带作为接触面处理,最终三维计算模型见图 4,顺河方向(X 轴方向,指向上游为正)宽 1260m;垂直河谷(Y 轴方向,指向滑坡体内为正)宽 1800m;模型最大高度(Z 轴方向,向上为正)为 540m,海拔为 920m。

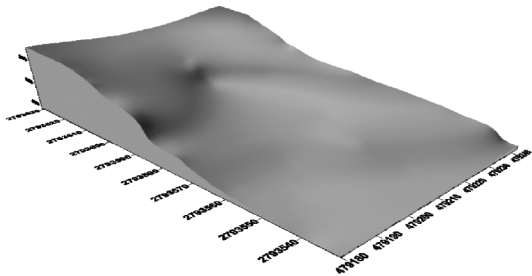


图 3 滑带表面

Fig. 3 The slip belt surface

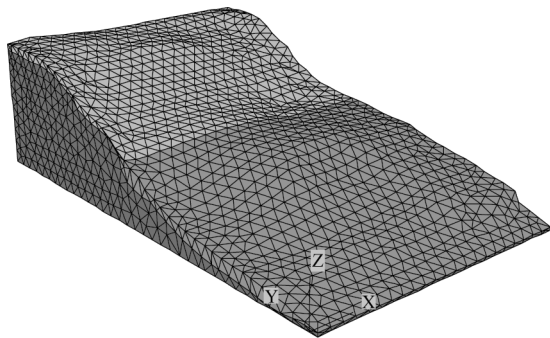


图 4 三维计算模型图

Fig. 4 Model used in calculation

根据滑体、滑床和滑带的岩土特性,将模型主要概化成三种材料。基岩采用理想线弹性模型,滑体和滑带采用理想弹塑性模型, Mohr-Coulomb 屈服准则。所需体积模量(K)、剪切模量(G)由弹性模量(E)和泊松比(ν)换算而来,最终计算参数如表 2。

表 2 岩土体力学参数取值

Table 2 Mechanical parameter of rock and soil in calculation					
岩性分区	密度 (g/cm^3)	粘聚力 (MPa)	摩擦角 ($^\circ$)	体积模量 (MPa)	剪切模型 (MPa)
滑体	2.35	0.18	31	30.3	15.62
滑带	2.35	0.025	21	17	9.4
基岩	2.6	0.8	55	5333	3200

模型考虑了自重应力和天然地下水的影响,未施

加构造边界应力以及地震的影响。模型的底面为三向约束,四周为单向约束,坡面为自由面。计算模型共划分 6253 个结点,29949 个单元。计算工况只考虑天然正常蓄水状态(600m 高程)后的变形破坏情况。计算模型在天然状态下计算至平衡状态,然后将位移、速度清零,加至蓄水高程后继续计算。水下滑体分析计算模式相对比较复杂,刘建国^[7]和刘涛^[8]对水下边坡稳定性模式进行了探讨和论证,根据其成果对浸润线以下采用有效容重,岩土体参数采用水下参数进行计算。

2.2 剪应变与塑性区分析

目前,滑坡失稳与位移的关系没有统一的评判标准。连镇营^[9]等采用滑动面某一幅值的广义剪应变的贯通作为失稳判据, Griffiths and Lane^[10]和 Dawson^[11]等将计算不收敛作为失稳判据,邓建辉^[12]等以滑动面塑性区贯通作为失稳判据。本文主要从计算收敛性、位移和塑性区贯通来对滑坡的失稳进行评价。

图 5 为典型剖面的剪应变增量图,图 6 为典型的滑坡体塑性区分布图。

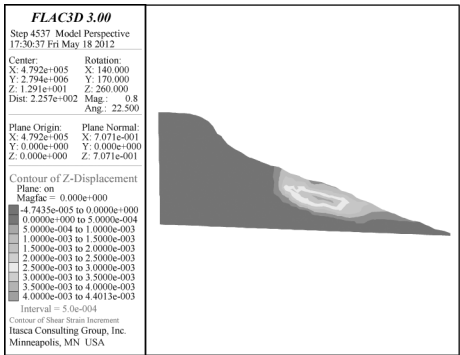


图 5 X = 479210 剖面剪应变增量

Fig. 5 X = 479210 section shear strain

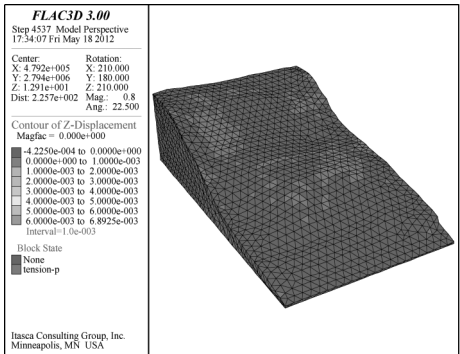


图 6 滑坡体塑性区分布

Fig. 6 Plastic zone of the landslide

剪应变前缘影响范围达到 430m 高程附近,后缘影响范围达到 680m 高程附近,整体上呈现弧状;最大值出现在底滑带以上、前缘沿垮堵湾表面以下的狭长区域,并未贯通,表明蓄水后滑坡水位线以上部分区域稳定性较差,前缘局部可能发生失稳或较大变形。

滑坡后缘堆积体屈服区域较大,主要是拉伸屈服,说明后缘堆积体变形主要有张拉引起,主要原因是滑坡后缘堆积体呈现中间凸两边凹的形状,两边地势较低处拉伸作用比较明显;滑体表面屈服呈片状分布,主要集中的滑体前缘地形突变处。

2.3 位移场分析

水库蓄水到 600m 过程中,引起滑坡内地下水位抬升,同时作用在滑坡前缘水压力将引起滑坡内土体产生变形(图 7、图 8、图 9),同时选取 $x = 479210$ 、 $y = 2793583$ 剖面表面节点进行位移监测,进行滑坡在纵向和横向变形特征规律分析(图 10、图 11 及表 3)。

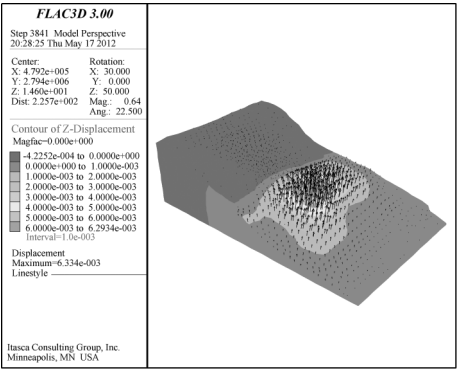


图 7 600m 蓄水位移等值线及矢量图
Fig. 7 600m water storage displacement contour and vector

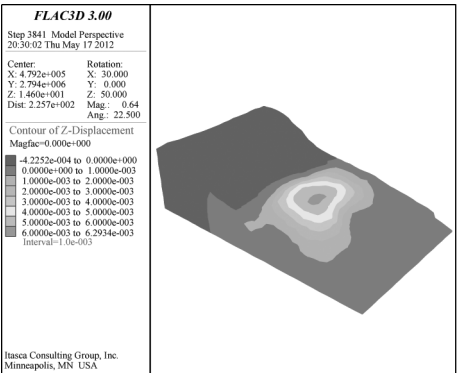


图 8 600m 蓄水竖向位移
Fig. 8 600m water storage vertical displacement

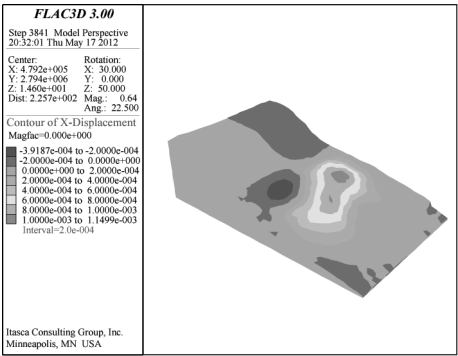


图 9 600m 蓄水水平向位移
Fig. 9 600m water storage horizontal displacement

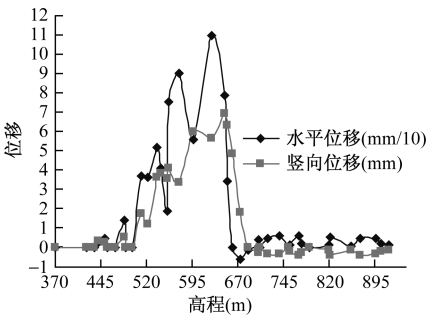


图 10 $x = 479210$ 剖面表面监测点位移变化曲线
Fig. 10 The $x = 479210$ profile surface monitoring points displacement curve

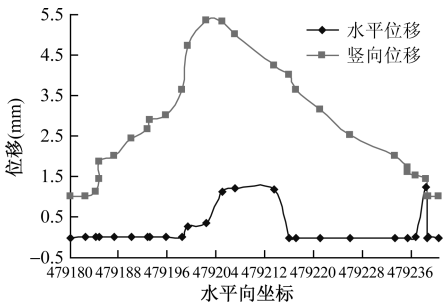


图 11 $y = 2793583$ 剖面表面监测点位移变化曲线
Fig. 11 The $y = 2793583$ profile surface monitoring points displacement curve

表 3 剖面位移指标统计

剖面	水平位移		竖向位移	
	最大值 (mm)	高程 (m)	最大值 (mm)	高程 (m)
$x = 479210$	1.09	628.702	6.893	649.444
$y = 2793580$	1.23	596.100	5.3677	613

位移呈带状分布,自中心向周围逐渐减小,位形变形影响范围后缘基本上达到了滑体与堆积体交界处;滑坡后缘自 680m 高程以上、前缘 430m 高程以下

位移矢量垂直向下,变现为“沉降”;中部位移矢量向上,表现出斜向上“剪出”;滑坡竖向位移最大值为 6.49mm,水平向位移最大值为 1.23mm;滑坡位移在垂直 x 轴方向上中心部位的变化特征为:前缘高程 500m 以下位移数值较小,500m 高程以上位移开始增加,在 620m 高程附近位移达到最大,位移变形较大的区域主要集中在高程 590 ~ 650m 范围内,也就是垮堵湾次级活动前缘上下区域;滑坡位移在垂直 y 轴方向上中心部位的变化特征为:在 $x = 479200$ 下游侧水平向位移值基本上保持不变,竖向位移缓慢增加;位移变化剧烈区位移 $x = 479200 \sim x = 479214$ 范围内,在次区域位移达到最大值,在 $x = 479214$ 上游侧竖向位移缓慢较小,竖向位移明显的关于 $x = 479200 \sim x = 479214$ 区域呈对称特征,水平位移出现负值。

3 结论

通过建立滑坡体三维地质模型,利用有限差分软件 FLAC^{3D}模拟了滑坡体在蓄水 600m 高程时的变形破坏情况得出如下结论:

(1)剪切变形主要集中的前缘垮堵湾附近,最大剪切变形出现在前缘以下底滑带以上斜长区域,但塑性区并未贯通,说明滑坡局部稳定性较差,在 600m 运行阶段前缘局部可能会发生浅层滑带或较大变形。

(2)随着滑体地下水文地质条件的改变,加之后缘堆积体岩土体呈局部架空且较松散,坡度较陡,后缘局部可能发生较大的变形,可能会发生崩塌或倾倒。

(3)在后缘堆积体的推力和前缘侧向水压力作用下,滑坡的位移变形主要集中在前缘高程 590 ~ 650m、 $x = 479200 \sim x = 479214$ 靠近跨堵湾附近区域,形成前缘斜向上剪出,这种形式是推拉作用的结果;位移变形呈带状分布,数值自中间向周围逐渐减少,位移竖向、水平向最大值分别为 6.49mm、1.23mm。

最后本文在滑带建模时,鉴于滑带模型的复杂性和本人能力的有限,近似采用对称形式提出滑带数据,有点欠缺,建模的精度有待进一步提高。

参考文献:

- [1] 金沙江溪洛渡水电站库区库岸稳定性综合研究报告[R]. 成都:中国水电顾问集团成都勘测设计研究院,2009.
Jinsha River Xiluodu hydropower station reservoir bank

stability comprehensive research report [R]. ChengDu: Chengdu Hydroelectric Investigation & Design Institute of CHECC,2009.

- [2] 邹国庆,张绍成. 溪洛渡水电站干海子滑坡稳定性分析[J]. 四川地质学报,2011,31(3):347-352.
ZOU Guoqing, ZHANG Shaocheng. On stability of the Ganhaizi landslide of the Xiluodu hydropower station[J]. Acta Geologica Sichuan,2011, 31(3):347-352.
- [3] 樊柱军,李明霞,黄志全,等. 基于模糊信息优化的干海子滑坡稳定性研究[J]. 人民长江,2012,43(1):41-46.
FAN Zhujun, LI Mingxia, HUANG Zhiqian, et al. Study of Ganhaizi slope stability based on fuzzy information optimization[J]. Yangtze River, 2012,43(1):41-46.
- [4] 兰恒星,祁生文,伍法权,等. 溪洛渡水电站干海子滑坡非线性动力学模拟[J]. 湘潭矿业学院学报,2001,16(3):5-11.
LAN Hengxing, QI Shengwen, WU Faquan, et al. Nonlinear dynamic modeling on Ganhaizi landslide near Xiluodu hydropower station [J]. Journal of Xiangtan Mining Institute,2001,16(3):5-11.
- [5] 王治华,杨日红. 三峡水库区千将坪滑坡活动性质及运动特征[J]. 中国地质灾害与防治学报,2005,16(3):5-11.
WANG Zhihua, YANG Rihong. The activity characteristics and movement style of Qianjiangping landslide in the Three Gorges Reservoir region[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2005,16(3):5-11.
- [6] 黄志全. 边坡工程非线性分析理论及应用[M]. 郑州:黄河水利出版社,2005.
HUANG Zhiqian. Nonlinear Analysis Theory and Application on slope [M]. Lanzhou: Yellow River Conservancy Press,2005.
- [7] 刘建国,周顺华,官全美. 水下边坡稳定性计算模式的探讨[J]. 上海铁道大学学报,2000,21(2):35-38.
LIU Jianguo, ZHOU Shunhua, GONG Quanmei. Calculating mode for the stability of underwater slope [J]. Journal of Shanghai Tiedao University, 2000,21(2):35-38.
- [8] 刘涛,沈明荣,陈建峰,等. 水下岩质边坡稳定性计算模式的探讨[J]. 水文地质工程地质,2006,33(4):5-8.
LIU Tao, SHENG Mingrong, CHEN Jianfeng, et al. Calculating mode for the stability of underwater rock slope [J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2006,33(4):5-8.
- [9] 连镇营,韩国城,孔宪京. 强度折减有限元法研究开挖坡的稳定性[J]. 岩土工程学报,2001,23(4):407-411.

- LIAN Zhenying, HAN Guocheng, KONG Xianjing. Stability analysis of excavation by strength reduction FEM [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23 (4): 407 - 411.
- [10] Griffiths D V, Lane P A. Slope Stability Analysis by Finite Element [J]. Geotechnique, 1999, 49 (3): 387 - 403.
- [11] Dawson E M, Roth W H, Drescher A. Slope Stability Analysis by Strength Reduction [J]. Geotechnique, 1999, 49 (6): 835 - 840.
- [12] 邓建辉, 张嘉翔, 闵弘, 等. 基于强度折减概念的滑坡稳定性三维分析方法 [J]. 岩土力学, 2004, 25 (6): 871 - 875.
- DENG Jianhui, ZHANG Jiaxiang, Min Hong, et al. 3D stability analysis of landslides based on strength reduction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25 (6): 871 - 875.

Analysis on the deformation behaviour of Ganhaizi landslide after impoundment of Xiluodu Reservoir

FAN Zhu-jun¹, WANG Zhen²

(1. Northwest Electric Power Design Institute of China Power Engineering Consulting Group, Xi an 710032, China;

2. The Yellow River Survey Planning Design Limited, HeNan ZhengZhou 450003, China)

Abstract: This paper analyzes the landslide three-dimensional displacement and deformation behaviour by the finite difference software FLAC^{3D}, the assessment indicates that: after the reservoir water rises to the 600m elevation, shear deformation is mainly concentrated in the leading edge of KuaDuWan, shallow sliding may occur; the Landslide trailing edge have larger tensile yield areas, steep, may be the event of failure or dumping; the landslide level, vertical displacement deformation is mainly concentrated in the elevation of the leading edge of 590 ~ 650m, $x = 479200 \sim x = 479214$ close to KuaDuWan.

Key words: landslide; deformation behaviour; shear deformation; shallow sliding; tensile yield

第六届《中国地质灾害与防治学报》编辑委员会

名誉主任: 李烈荣

主任: 侯金武

委员: 岑嘉法 陈梦熊 陈毓川 程伯禹 邓霁松 丁建博 段永侯 范宏喜 范相德 方鸿琪

葛文彬 何满潮 贺咏梅 胡时友 侯金武 黄润秋 黄学斌 姜建军 鞠建华 雷明堂

李烈荣 李善峰 李世海 李铁锋 李廷栋 刘传正 刘广志 刘希林 柳源 罗元华

马凤山 乔建平 孙党生 石建省 孙晓明 唐辉明 田廷山 王来贵 王兰生 王思敬

王树仁 文宝萍 伍法权 武强 徐开祥 殷坤龙 殷跃平 曾青石 张进德 张杰坤

张咸恭 张新兴 张永波 张宗祜 张作辰 赵运昌 钟立勋 周平根 朱汝烈

主编: 张咸恭 副主编: 文宝萍 黄润秋 殷跃平 张新兴 赵运昌

编辑部主任: 范宏喜 副主任: 李善峰

编辑: 李善峰 赵慧 倪天翔

编务: 董建英