

洞坪水库大沟湾滑坡体变形机制

项伟, 江泊洧, 唐辉明, 崔德山, 黄玲

中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

摘要: 大沟湾滑坡是瞿家湾滑坡群中相对高差最大的滑坡体, 洞坪水库蓄水后滑坡体产生了较大变形且变形机制表现出一定的特殊性。野外调查研究表明: 蓄水前该滑坡体稳定性良好; 蓄水至 452 m 后, 滑坡后缘堆积体与基岩交界处产生贯通滑坡两侧冲沟的连续裂缝, 剪出口位于整个滑体中部 580 m 高程附近, 由于下部坡体的抗滑作用而使整个坡体仍处于稳定状态; 蓄水至 488 m 后, 从整个滑体前缘到 570 m 高程附近又形成另一滑坡体, 与先前上部滑坡呈梯级分布, 分析得出大沟湾滑坡为上部牵引—下部推移的复合式滑坡, 两个滑坡共同作用导致整个滑体发生明显变形。分析并利用 FLAC3D 模拟再现整个变形过程, 对滑坡体变形破坏机制做出了很好解释。

关键词: 洞坪水库; 大沟湾滑坡; 有限差分法; 变形机制; 复合滑坡。

中图分类号: P641

文章编号: 1000-2383(2009)05-0855-06

收稿日期: 2008-12-25

Deformation Mechanism of Dagouwan Landslide in Dongping Reservoir

XIANG Wei, JIANG Ji-wei, TANG Hui-ming, CUI De-shan, HUANG Ling

Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Based on engineering survey and experiments, slide mass structure and the mechanical parameters of Dagouwan landslide were obtained. FLAC3D was employed to analyze the stability and the deformation mechanism of Dagouwan landslide at different working conditions and water levels. The results of analysis show that: when the water level rose to 452 m, there showed a continuous crack at the back of the landslide from one side of gully to another, and the shear outlet of the landslide was located in the thick deposits of the slope at 580 m, but the whole slope still showed stability; when the water level rose to 488 m, another independent landslide formed from the toe of the landslide to 570 m. Interactions between two landslides caused the failure of the whole slope. The phenomenon had been confirmed during the two field explorations. The failure reasons of the landslide can be concluded as the loose structure of the landslide, high frequency of showers and the fluctuation of the water level in the reservoir, which finally led to the form of this complex retrogressive-progressive landslide.

Key words: Dongping reservoir; Dagouwan landslide; FDM method; deformation mechanism; complex landslide.

洞坪水利水电枢纽工程位于湖北省宣恩县清江支流中间河下游峡谷中, 是一座以发电为主, 兼有库区航运、交通、防洪、水产养殖和旅游综合效益的 II 等大型水利水电枢纽工程。工程距宣恩县城 42 km, 距恩施市 84 km, 下游距清江 11 km。

大沟湾滑坡位于洞坪水电站上游约 3.0 km 处, 位于中间河左岸瞿家湾滑坡群 5 个滑坡体的中央, 工程区大地构造单元位于扬子准地台(I)、上扬子

台坪(II)、八面山台褶带(III)和恩施台褶束(IV)。区内以宣恩—崔坝向斜为主要构造形迹(王建强和范玉龙, 2005), 中间河处于区域向斜中一次级背斜的转折端。

笔者分别于 2006 年 7 月和 2007 年 7~8 月对该滑坡进行了两次详细的综合勘察, 发现随蓄水位抬高, 该滑坡产生了日趋明显的变形, 稳定性下降明显。为了给滑坡防治和预报提供依据, 查清滑坡的

基金项目: 中国地质调查局“鄂西恩施地区滑坡形成机制与危险性评估”项目(No. 1212010640604)。

作者简介: 项伟(1953—), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事大型水利水电工程地质、软弱夹层、岩土性质、地质灾害防治、遥感监测和环境地质工程的教学与科研工作。E-mail: xiangwei@cug.edu.cn

变形机制很有必要.

1 大沟湾滑坡特征及成因

1.1 滑坡体类型和形态特征

大沟湾滑坡体滑坡前缘高程 380~390 m, 后缘最高高程 728 m, 主滑体平均厚度 25 m 左右, 面积 0.269 km², 估算体积 673×10⁴ m³. 滑坡体所在的斜坡为志留系粉砂质页岩构成的顺向坡, 基岩倾向与河流接近正交, 岩层倾角 50°~70°, 临空面坡度变化为: 前缘 20°、中部 10°、后缘 30°, 基岩倾角远大于滑坡体坡角, 因此该滑坡属厚层崩坡积物滑坡. 坡体堆积物渗透性良好, 区域内地表径流强烈, 因水库的蓄水作用已引起坡体局部发生明显变形.

1.2 滑坡体组成成分

经过钻孔、探槽和现场详细踏勘得到大沟湾滑坡的地质平面图(图 1)和主滑面工程地质剖面图

(图 2).

滑体在平面上呈梯型, 横剖面上呈倒三角形. 滑体物质由碎石土、亚粘土(含碎石)及砾石等组成, 多为崩坡积堆积物, 由于有三级阶地的存在, 局部有冲积堆积, 透水性强. 滑体最大厚度 32 m, 细分为碎石土中偏高压缩性土和卵及漂石中偏低压缩性土, 前者厚度为 12~25 m, 力学参数低; 后者力学性质较好, 磨圆度好, 滑坡体局部产生变形后, 对滑坡体稳定不利.

滑面为基岩与崩坡积物分界面, 根据钻孔资料, 滑面物质为含碎石粘土, 褐黄色, 接近饱和, 可塑状, 厚 30 cm 左右. 滑面呈斜坡状, 没有明显的台阶, 滑坡前缘略有反翘. 滑带剪切强度参数 *C*、*φ* 较上部滑体有明显偏低, 这与滑带土的力学性质表现为残余强度有关.

滑床由中下志留统纱帽组、罗惹平组砂页岩组成, 岩层倾角较陡, 50°~70°, 为顺向坡, 倾向与河流正交, 倾角远大于坡角, 基岩表面风化强烈, 岩体破

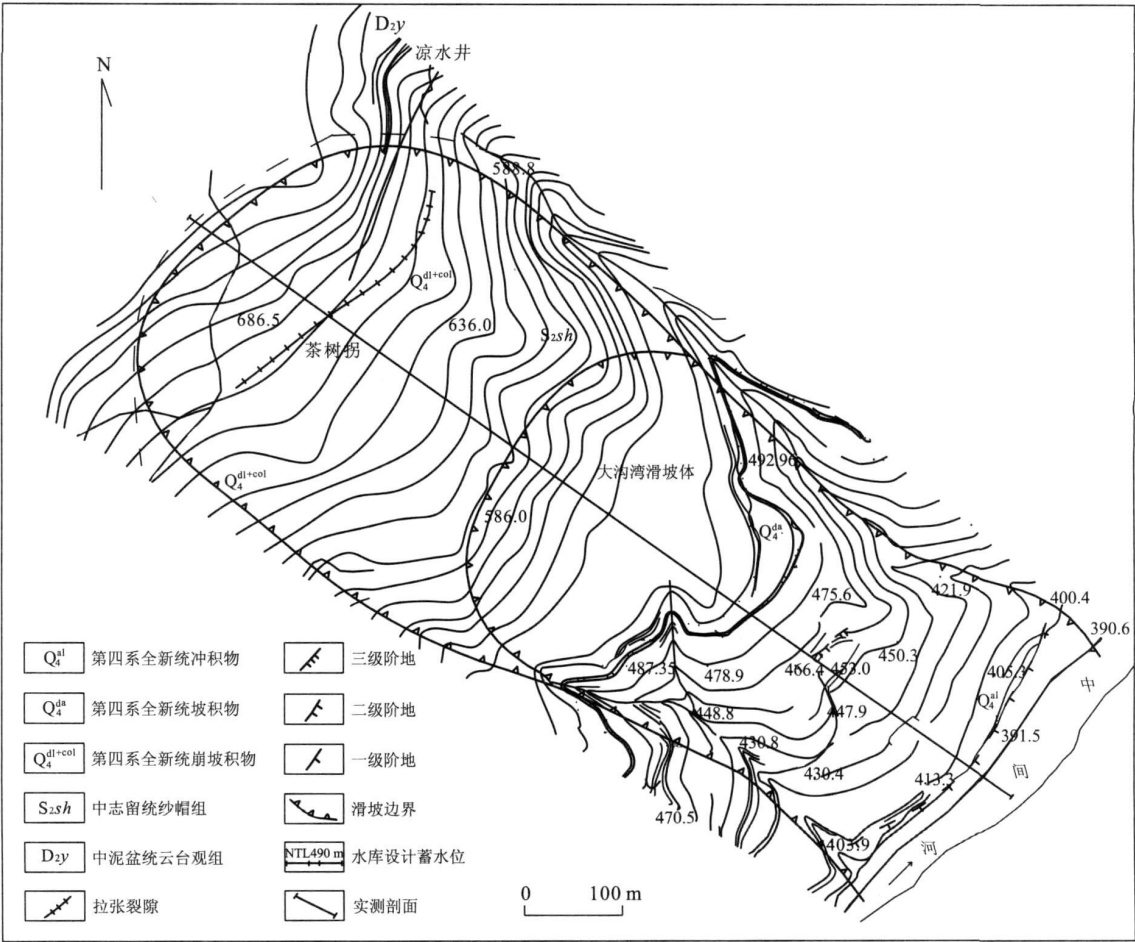


图 1 大沟湾滑坡平面地质图

Fig. 1 Schematic geological map of Dagouwan landslide

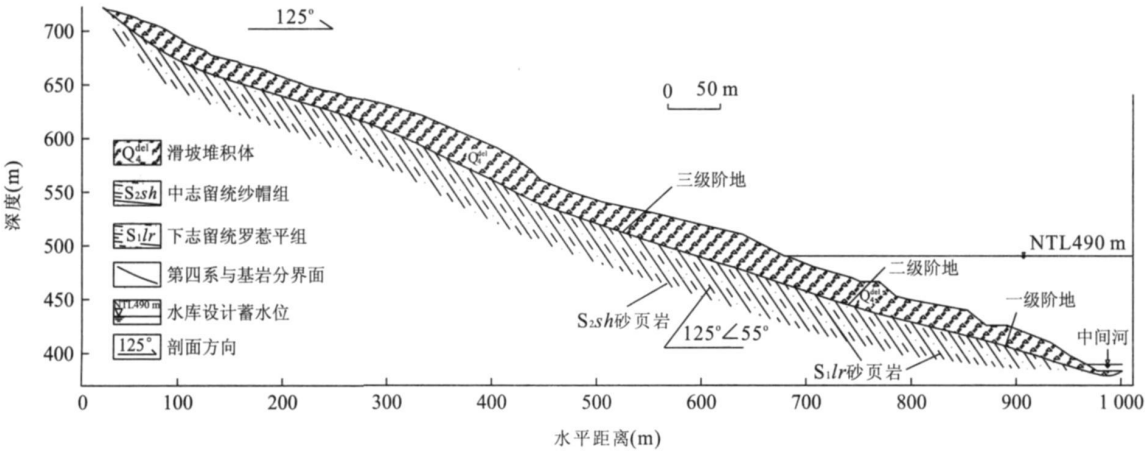


图 2 大沟湾滑坡体主滑面地质剖面图

Fig. 2 Geological section of Dagouwan landslide

表 1 大沟湾滑坡物理力学参数

Table 1 Mechanical parameters of Dagouwan landslide

类别	天然容重(kg/m ³)	饱和容重(kg/m ³)	内聚力 C(MPa)	内摩擦角 φ(°)	弹性模量(MPa)	泊松比	抗拉强度 T(MPa)
滑体	1 960	2 020	0.040	21(饱水 17)	30.0	0.28	0.030
滑面	1 900	1 950	0.015	18(饱水 14)	18.0	0.30	0.012
滑床	2 500	2 550	2.000	35	4 000.0	0.22	0.200

碎, 透水性较强. 滑坡体力学参数(平均值)见表 1.

1.3 滑坡成因分析

大沟湾滑坡位于区域背斜转折端附近, 基岩倾角远大于滑坡坡角, 地层岩性为砂页岩, 力学参数低, 在中间河谷快速下切形成三级阶地(图 2)的过程中, 表层砂页岩受风化和卸荷崩滑作用形成了厚层的崩残坡积物. 由于不同时期切割速度不同, 残坡积物的厚度在不同高程分布很不均匀, 不断地发生局部滑动来调整坡体的整体稳定性, 发展过程总结为以下 4 个阶段: 多次崩塌的碎石土和坡残积土顺坡堆积, 逐渐累增、加载→滑动能量逐渐积累, 斜坡局部平衡条件逐渐被破坏, 斜坡土石体向失稳方向发展; 同时由于中间河下切作用, 临空面进一步发育, 滑坡变形的边界条件逐渐完备(胡新丽等, 2007)→上部厚层崩滑积物在大雨, 尤其是连降大、暴雨激发下, 滑坡体下部饱水, 使坡体下段自然平衡状态完全被破坏, 引发上部滑坡变形失稳→上部滑坡滑动, 对下部坡体施加附加荷载, 同时由于库水位的波动, 极大地改变滑坡体内的水文地质条件(胡新丽等, 2006), 降低了滑坡体的工程力学性质, 下部滑坡亦产生较大位移, 导致整个坡体滑动.

堆积体与滑床间断续分布的阶地物质提供了良好的透水通道, 且上覆的残坡积物自身厚度达 15 ~

32 m, 结构较为松散, 水敏感性强, 由于洞坪拱坝的修建, 水位上升 100 余米, 使本来稳定性较差的坡体堆积物稳定性进一步降低, 容易形成滑坡地质灾害.

2 滑坡稳定分析和变形研究

2.1 模型建立

库水位大幅度、周期性涨落, 加之强降雨的影响, 将使滑坡区域地下水动力场产生剧烈变化, 威胁水库两岸滑坡的稳定(李晓等, 2004). 利用数值模拟方法研究水库型滑坡的稳定性时, 除根据地质条件和设计方案建立合理的数值计算力学模型外, 还必须通过水土耦合作用考虑库水位升降对滑坡的影响(Müller, 1964; Breth, 1967). 为了详细了解滑坡的稳定性和滑坡体受力变形机理, 选取原始水位 388 m、2006 年 7 月水位 452 m、2007 年 488 m 以及水库设计蓄水位 490 m 四种水位情况下不同工况(正常和暴雨), 利用 FLAC3D 有限差分方法通过 Mohr-Coulomb 模型建模模拟. 选取滑坡体主滑剖面(图 3)建立地质力学模型, 左边界水平约束, 下边界纵横向约束, 下边界高程为 340 m, 上部最高 728 m. 剖分网格包含 6 148 个节点和 2 908 个单元, 图 3 所示为网格划分图.

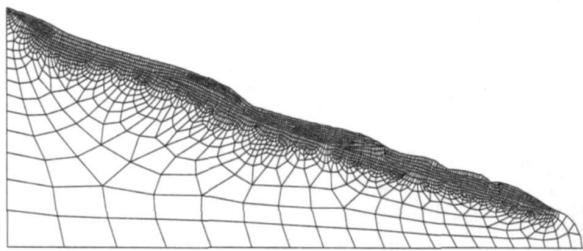


图 3 大沟湾滑坡单元剖分

Fig. 3 Numerical simulation meshes of Dawongou landslide



图 4 滑坡中部贯通的拉裂缝

Fig. 4 Consecutive tension cracks at the central of the landslide

2.2 参数及计算说明

2.2.1 地下水模拟方式 滑坡体地下水位面以下部分采用饱和容重,地下水位以上部分采用天然容重,且在静水位以上、地下水位以下部分考虑渗透压力 j ,公式表达为:

$$j = \gamma_w i,$$
 (1)

式(1)中: j 为渗流力, kN/m^3 ; i 为水力梯度; γ_w 为水的重度。

利用不同水位和工况的水力梯度 i 来体现不同情况下的渗透效果。

2.2.2 剪切模量和体积模量问题 利用弹性模量 E 换算出剪切模量 G 和体积模量 K (公式略),以便于FLAC计算,其余参数见表1。

2.3 数值模拟成果分析

2.3.1 稳定性分析 利用上述模型和参数,数值模拟得到滑坡体不同工况下的稳定系数(表2)。从稳定系数结果看出,只有在原始水位388 m和2006年7月蓄水452 m的正常情况时,滑坡才是完全稳定状态,其余5种状态都十分接近极限平衡状态或者已经破坏,存在整体或局部滑坡的危险。对于已经发生过的1~6工况,与2006年7月和2007年7~8月两次实地考察结果吻合。2006年7月在大沟湾滑坡体后缘与基岩交界面形成了大于10 cm的裂缝和超过20 cm的垂直下错,裂缝与两侧冲沟基本闭合,

据此可以判断滑坡体有大的变形产生,但是在靠近452 m高程处滑坡体没有明显变形迹象,而是在580 m高程发现了张裂缝等滑坡前缘的特征,说明该变形发生区间为580 m高程到滑坡后缘区域,没有一直延续到坡底。经调查,一个月前库区普降大雨,造成了上述滑坡体后缘的变形,但随后滑坡应力调整趋于自稳;2007年7~8月库区经历了50年一遇的暴雨,库水位涨至488 m,滑坡后缘出现新鲜的贯穿两侧冲沟的拉裂缝,同时在570~580 m高程发现了另一条贯穿两侧冲沟的拉裂缝,裂缝宽10 cm,垂直下错约40 cm(图4),冲沟水流浑浊,村民房屋遭受不同程度破坏,但没有建筑物倒塌。表明大沟湾出现了两个呈梯状上下分布的滑坡,整个坡体在暴雨中趋于失稳,但随后经过应力调整滑坡自稳,仍接近极限平衡状态。

2.3.2 滑坡变形过程分析 判断滑坡失稳或者滑动趋势可通过滑坡体内部的应变特征直观反映。本文采用体积切应变速率等值线图解释滑坡体变形发展过程,因为体积切应变速率等值线的连续性和贯通性能很好地反映出岩土体各部分变形延伸范围并能推测其发展趋势。

分别取388、452和488 m三种库水位下暴雨工况滑坡体的体积应变速率等值线图(图5)进行解释。数值计算时可能会因为岩土体自重及基岩内部自身剪切作用等因素的影响,形成一定的体应变速率区干扰分析,因此下面只针对滑带附近及其以上残坡积物区域分析变形机制,进而了解滑坡体内部变形过程和发展状况。

库水位为388 m暴雨工况时,高程580 m以上有一条明显的拉压剪切带(图5a),但没有连续,这时上部滑坡体显现出明显的滑动趋势,从图5a中可以看出,在580~620 m有明显的地形起伏,临空面坡角较大,前部坡体拉张变形,后部剪切带有被动受压变形,由于滑动面平缓连续,顶部坡体有效地提供了抗剪力,使得该段滑坡整体稳定,表现出牵引式

表 2 不同水位、工况下的滑坡稳定系数

Table 2 Factor of safety in different situations

编号	蓄水位(m)	工况	稳定系数
1	388	正常	1.31
2	388	暴雨	1.25
3	452	正常	1.18
4	452	暴雨	1.05
5	488	正常	1.05
6	488	暴雨	1.01
7*	490	正常	1.03
8*	490	暴雨	0.96

*为实际未遇见的工况

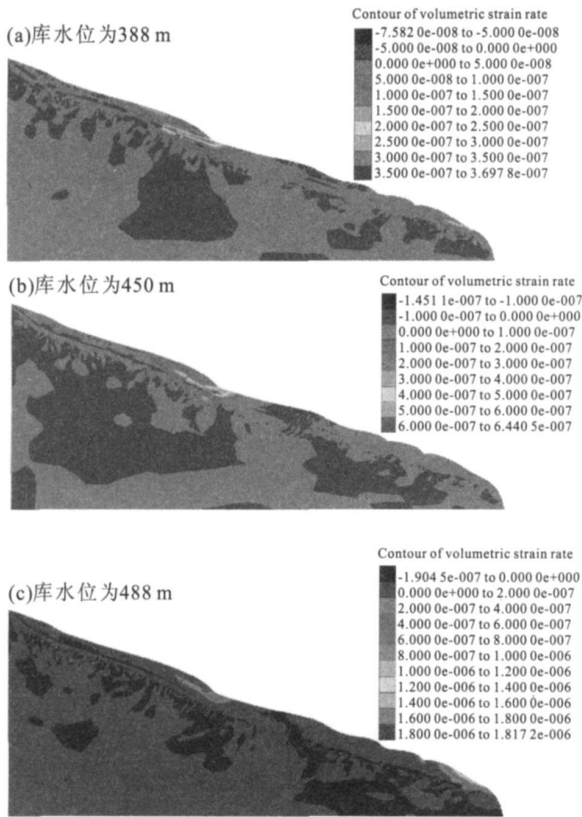


图 5 不同库水位暴雨工况滑坡体体积应变速率等值线
Fig.5 Contour of volumetric strain rate in different water levels

滑坡的特征。

当蓄水位为 452 m 时,安全系数为 1.05(暴雨工况),接近于极限平衡,580 m 高程上方的剪切带基本贯通(图 5b),分析认为该坡段由于浸润线抬升的影响,滑动面内摩擦角下降导致抗滑力下降而下滑力上升,上部坡体被进一步牵引变形,无法提供足够的抗剪切力来稳定上部坡体,使该坡段形成了连续线状分布的体积应变带,表明上部滑坡已产生剪切变形而发生破坏。

当蓄水位为 488 m 时,安全系数为 1.01(暴雨工况),逼近极限平衡状态,在 580 m 高程以上和 570 m 高程以下分别出现了一条连续分布的剪切带(图 5c),一条从位于后缘的坡体岩土分界面延续到 580 m 左右;另一条从位于 570 m 高程延续到底底。同时在上部坡体距离坡顶 40~50 m 处出现了延伸到坡表面的细网状拉张裂缝(图 6)。大沟湾滑坡体上以 570~580 m 高程为界,出现了两级滑坡体,坡体中部发育成的下级滑坡体连续拉裂缝与图 4 吻合,整个坡体趋于失稳。

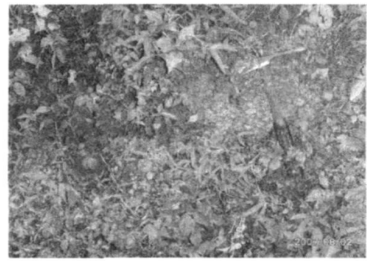


图 6 滑坡后缘拉张裂缝
Fig.6 Tension-extension cracks at the back of the landslide

3 变形机制分析

根据动态数值模拟结果,从不同蓄水位滑坡的变形直观看出,首先是 580 m 上部坡体失稳,之后对 580 m 以下坡体产生影响,致使整个滑坡体失稳。

变形失稳过程机制分析:580~620 m 这段坡体临空面坡角较大,容易形成滑坡前缘。由于水库蓄水水位从 388 m 升到 488 m,地下水位的大幅上升使浸润线大幅度上升、滑坡体饱水体积增大,一方面导致滑动面附近坡体由于被饱和而力学性质下降(表 1 计算参数中有所体现);另一方面地下水径流体积增大,渗流力不断增大,对下滑力贡献显著,最终结果是 580 m 以上部坡体滑动力上升同时抗滑力下降,但该段滑坡发生变形失稳但变形没有延续到后缘岩土交界面,而是交界面以下 50 m 左右的 670 m 左右形成了一系列延伸到地表的细小张裂缝(图 6),将上部坡体从该处体拉断而导致 580 m 以上滑坡体失稳。从坡体物质组成分析,大沟湾滑坡体是由内聚力较小的松散堆积物和亚粘土组成,只能提供较小的拉拽力,应力增大容易使坡体从中间薄弱处拉断分离,网状拉张裂缝带出现在坡体厚度最小的 670 m 左右区域,正是在这个薄弱区域上部坡体被拉断。据以上分析,上部滑坡的形成过程和变形失稳可认定为牵引式滑坡。

拉张断裂后,高程 580~670 m 滑坡体必然突然向下产生较大位移,一方面对 570 m 以下坡体滑动进行了后缘加载;另一方面使整个滑坡体的滑带松动(计算中体现在内摩擦角的减小),渗透系数增大,为地下水流动提供了通道,在暴雨情况下,增加了水力梯度导致渗流力增大,严重降低了滑坡体的稳定性。此外,蓄水到 488 m 后,滑坡下部约有 100 m 垂直高程岩土体完全浸没于水中,有约 200 m 左右的滑带受到扬压力的作用,即这时浸水部分土体的有效重度由天然重度变为浮重度。

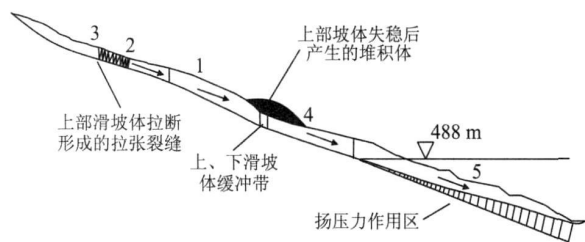


图7 滑坡整体失稳过程(数字代表变形次序)

Fig. 7 Invalidation progress of the landslide

设 C 为浸水前滑面的内聚力, 并假设浸泡前滑坡处于极限平衡状态, 由几何关系得出:

$$C = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi}{2 \cos \varphi} \quad (2)$$

浸水后, 最大最小主应力 σ_1 和 σ_3 都将减小, 应力圆左移且减小, 内聚力 C' 也将减小, 同时由于水对滑面具有润滑作用, 导致滑坡体摩擦角 φ' 也会降低, 使滑坡体内部应力状态重新调整, 产生位移。(刘才华等, 2005; 殷宗泽, 2007)。事实证明: 在整个应力调整过程中, 边坡稳定性下降, 抗滑力显著降低, 同时下滑力显著增大, 使 570 m 以下坡体无法自稳, 导致了整个滑坡体的变形失稳。从其产生过程和变形机理推测为推移式滑坡, 整个变形过程示意图见图 7。

4 结论

大沟湾滑坡体变形机制表现为一个牵引—推移式滑坡共同作用的结果。主要是由于水库蓄水一方面使滑坡体饱水体积增加动水压力增大, 另一方面坡体自身力学参数下降。首先导致上部坡体在剪和拉的作用下失稳, 形成牵引式滑坡, 之后由于滑动和堆积产生的附加荷载推动下部坡体失稳, 最终整个坡体破坏。

研究结果表明, 在前期详细野外地质调查与勘察的基础上, 通过 FLAC3D 进行建模计算和分析, 可很好地模拟和再现滑坡体的变形破坏过程。对深入研究滑坡形成机制及稳定性预测预报具有重要的理论与实际意义。

References

- Breth, H., 1967. The dynamics of a landslide produced by filling a reservoir. *9th Int. Cong. On Large Dams, Istanbul*, Q32 R3: 35—45.

- Hu, X. L., Potts, M. D., Zdravkovi, L., et al., 2007. Jinle landslide stability under water level fluctuation of Three Gorges reservoir. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(3): 403—408 (in Chinese with English abstract).
- Hu, X. L., Tang, H. M., Ma, S. Z., et al., 2006. Numerical Simulation of the 3D landslide stability in Three Gorges area based on NMR. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(2): 279—284 (in Chinese with English abstract).
- Li, X., Zhang, N. X., Liao, Q. L., et al., 2004. Analysis on hydrodynamic field influenced by combination of rainfall and reservoir level fluctuation. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 23(21): 3714—3720 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. H., Chen, C. X., Feng, X. T., 2005. Study on mechanism of slope instability due to reservoir water level rise. *Rock and Soil Mechanics*, 26(5): 769—773 (in Chinese with English abstract).
- Müller, L., 1964. The rock slide in the Vajont Valley. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, 2(1): 148—222.
- Wang, J. Q., Fan, Y. L., 2005. Analysis on stability of Baijiabu sliding mass in reservoir area of Dongping hydropower station. *Hubei Water Power*, 62(4): 13—16 (in Chinese with English abstract).
- Yin, Z. Z., 2007. *Earthwork principle*. China Water Power Press, Beijing (in Chinese).

附中文参考文献

- 胡新丽, Potts M. D., Zdravkovi, L., 等, 2007. 三峡水库运行条件下金乐滑坡稳定性评价. *地球科学——中国地质大学学报*, 32(3): 403—408.
- 胡新丽, 唐辉明, 马淑芝, 等, 2006. 基于 NMR 的库区滑坡三维稳定性数值模拟. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(2): 279—284.
- 李晓, 张年学, 廖秋林, 等, 2004. 库水位涨落与降雨联合作用下滑坡地下水动力场分析. *岩石力学与工程学报*, 23(21): 3714—3720.
- 刘才华, 陈从新, 冯夏庭, 2005. 库水位上升诱发边坡失稳机理研究. *岩土力学*, 26(5): 769—773.
- 王建强, 范玉龙, 2005. 洞坪水电站库区白家堡滑坡体稳定性分析. *湖北水力发电*, 62(4): 13—16.
- 殷宗泽, 2007. *土工原理*. 北京: 中国水利水电出版社.