

黄土坡滑坡形成与变形的地质过程机制

陈松¹, 陈国金², 徐光黎¹

1. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

2. 湖北省水文地质工程地质勘察院, 湖北荆州 434020

摘要: 巴东黄土坡滑坡是三峡库区重大滑坡之一, 规模大, 而且形成与变形地质过程机制复杂. 是与三峡库区构造强烈隆升、河流急剧下切、斜坡重力卸荷等各种作用相伴生的地质过程的结果; 其中的 I 号崩滑堆积体在回水条件下深层蠕变变形较明显, 受到多方面的关注. 采用地质过程类比分析方法, 通过对滑坡形成、回水前变形破坏、回水条件下变形的地质过程机制分析, 预测了深层蠕变变形使其中部和前部产生较大变形的发展趋势, 目前发现 I 号崩滑堆积体的深层蠕变变形问题, 主要是库水升降的动态过程与降雨效应耦合作用的结果.

关键词: 黄土坡滑坡; 形成; 回水条件; 变形; 地质过程.

中图分类号: P642

文章编号: 1000-2383(2008)03-0411-05

收稿日期: 2008-01-16

Mechanism of Geological Processes of Formation and Deformation of the Huangtupo Landslide

CHEN Song¹, CHEN Guo-jin², XU Guang-li¹

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

2. Hydrogeology and Geoenvironment Investigation Institute of Hubei, Jingzhou 434020, China

Abstract: Badong landslide is one of the most serious landslides in the Three Gorges Reservoir Area for its large scale and complex formation and deformation processes. It was formed as a result of intense tectonic uplift of the Three Gorges Reservoir Area, rapid cut-down of the river and slope unloading. The deep creep deformation of No. 1 collapse deposits under backwater conditions is obviously observed and has been paid special attention to. By the geological process analogy and analysis, we analyze the formation of slopes, deformation and destruction process, the mechanism of geological processes of formation and deformation under backwater conditions. We predict the trend that slide may happen in the front and middle part of the collapse deposits on a large scale, and it finds that deep creep distortion of No. 1 collapse deposits is mainly caused by the coupling of reservoir water and rain water.

Key words: Huangtupo landslide; formation; backwater condition; deformation; mechanism of geological processes.

0 引言

巴东城区地质环境条件复杂, 地处三叠系巴东组(T_2b)易滑地层区, 斜坡多为顺向坡, 官渡口向斜形成后期初始构造应力场的调整使该层位大面积卸荷松弛, 在构造强烈隆升、长江急剧下切环境条件下, 加之多暴雨, 故以深切冲沟为主要形式的地表改

造直接导致以失稳滑移与崩塌为主要形式的地质问题时有发生, 三峡水库蓄水后部分崩滑体稳定性降低. 其发展趋势如何, 本文主要采用地质过程类比分析方法, 探讨了各种影响因素在滑坡形成与变形的地质过程中相互作用关系和结果, 为滑坡防治提供科学依据.

1 滑坡概况与临江崩滑堆积体特征

1.1 黄土坡滑坡概况

黄土坡滑坡是三峡库区重大滑坡之一,位于巴东城区中的黄土坡小区。详细勘查研究表明,该滑坡由临江崩滑堆积体、变电站滑坡、园艺场滑坡及近期发生的小滑坡组成,统称为“黄土坡滑坡”。前缘高程 50~70 m,后缘高程 580~600 m,总面积 $135 \times 10^4 \text{ m}^2$,总体积 $6\,934 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。临江崩滑堆积体分布于高程 210~260 m 以下,三道沟将其分割为东西 2 个崩滑堆积体,以西为 I 号崩滑堆积体,以东为 II 号崩滑堆积体(图 1)。

依据滑坡体物质组成及其叠置关系、滑带特征及其形成的年代学研究(邓清禄和王学平,2000;杨世松等,2001;唐辉明和邓清禄,2005),临江崩滑堆积体是斜坡在重力作用下,经历长期变形、倾倒、剪切破坏、崩滑堆积的产物,园艺场滑坡和变电站滑坡是在前缘崩滑的基础上先后引发后部叠加形成的顺层岩质滑坡。

1.2 临江崩滑堆积体本构特征

临江崩滑堆积体物质组构成层性差,物质成分以碎块石夹粘性土、粉质粘土夹碎石、粘土为主(图

2)。碎石、块石大小悬殊,大部分由黄灰、绿灰色的泥灰岩、泥质灰岩组成。碎块石土上层结构松散,下层结构稍密至密实。

临江崩滑堆积体内不同部位、不同高程分布有众多不连续的软弱层,据统计,共分布有 114 层(次)。许多地段下卧基岩面上分布有粉质粘土夹碎石、碎石土软弱层。

临江崩滑堆积体渗透系数因物质成分不同具有一定的差异,其中碎石夹粘性土为 $0.76 \sim 1.20 \text{ m/d}$,粘性土夹碎石为 $0.24 \sim 0.44 \text{ m/d}$,碎块石夹粘性土为 2.35 m/d ,均属微弱透水岩类。据长观资料,临江崩滑堆积体内无统一地下水位。其中:I 号崩滑堆积体内地下水位高程 105~207 m,形成多层地下水位,其中部的 HZK6 钻孔水位变化与长江水位变化同步,表明两者水力联系密切;II 号崩滑堆积体内的 2 个钻孔(HZK22、HZK23),一个与长江水位变化同步,一个没有观测到孔内水位,表明其内渗透性极不均匀。基岩顶面高于江水位的钻孔水位受连阴雨的影响明显,短时强降雨对钻孔水位的影响相对较小。

2 崩滑堆积体回水前后的变形特征

2.1 临江崩滑堆积体回水前的变形破坏特征

I 号崩滑堆积体回水前深层蠕动变形不明显,位于其前部高程 195 m 的 ZK3 号钻孔倾斜仪位移变形为 3 mm/a ;浅层变形主要集中于高程 160 m 以下高陡坡段,以发生于 1995 年 10 月 29 日的三道沟滑坡为典型(图 1、图 2)。三道沟滑坡位于三道沟汇入长江处的西侧高陡坡段,体积约 $12.8 \times 10^4 \text{ m}^3$,后缘高程 150 m,前缘已突入江中 30 m,高程 70 m 左右,坡面呈上陡下缓折线型($20^\circ \sim 40^\circ$)。该滑坡发生之后,其后缘形成新的临空面,受滑动土体牵引影响,变形不断向坡体后部及西侧扩展,西侧裂缝长达 165 m。在滑坡治理施工过程中的 2002 年 12 月 8 日,发生了“12.8”滑坡,总体积 $6.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,其周界受控于三道沟滑坡西侧逐年产生的牵引裂缝,即该滑坡为三道沟滑坡牵引变形区的一部分,前缘地形坡度较陡,存在软弱夹层。

II 号崩滑堆积体回水前的变形主要发生于高程 180 m 以下高陡坡段,变形有逐渐向后扩展之势。“10.21”滑坡位于 II 号崩滑堆积体施工段,后缘高程约 150 m,总体积约 $2\,000 \text{ m}^3$,为一小型浅表层滑坡。受“3.31”特大暴雨影响,工程区及其外围坡体发生

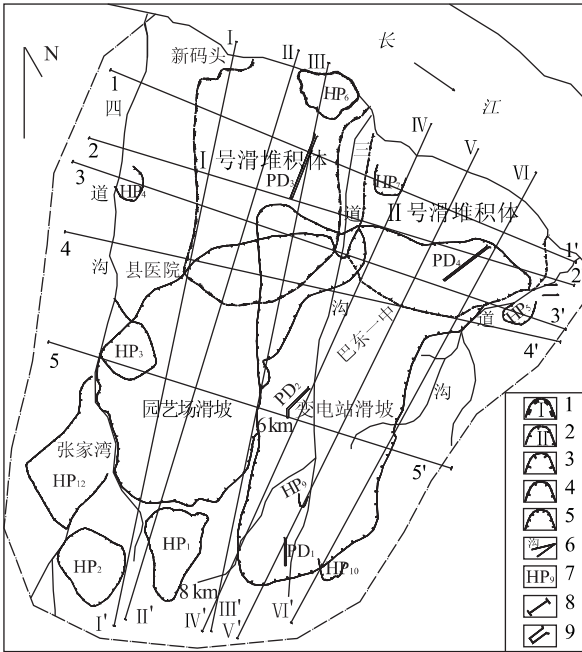


图 1 黄土坡滑坡组成分布图

Fig. 1 Distribution of Huangtupo landslide

1. I 号崩滑堆积体;2. II 号崩滑堆积体;3. 变电站滑坡;4. 园艺场滑坡;5. 近代滑坡;6. 水系及沟谷;7. 近代滑坡编号;8. 剖面线;9. 平阔

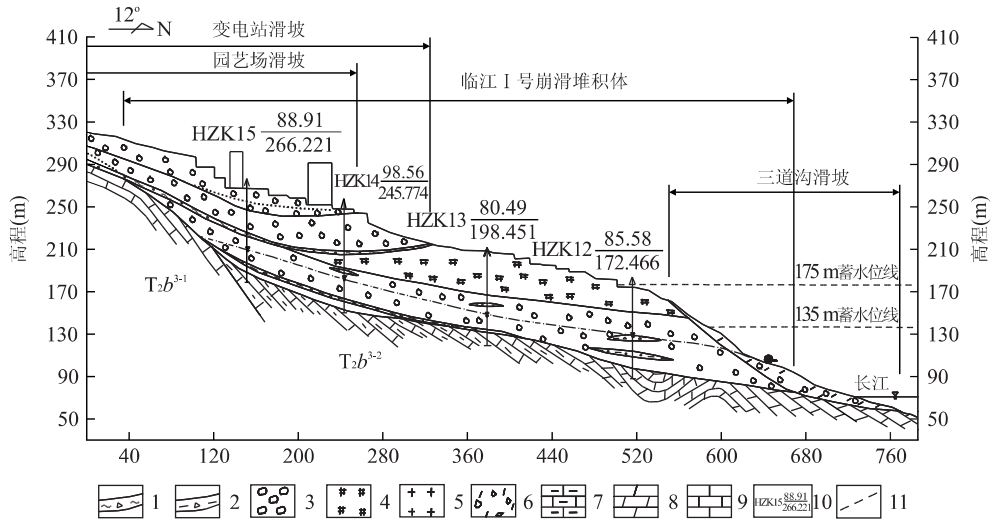


图 2 崩滑堆积体物质组成结构剖面图

Fig. 2 Geological section of collapse deposits

1. 滑带; 2. 软弱夹层; 3. 散裂岩; 4. 碎裂岩; 5. 块裂岩; 6. 碎石土夹粘土; 7. 泥质灰岩; 8. 泥灰岩; 9. 灰岩; 10. 钻孔及编号; 11. 水位线

了不同程度的变形破坏,主要表现为坡体浅层坍塌,其后缘分布高程在 140~155 m.

综上所述,临江崩滑堆积体浅层变形破坏的地质过程机制主要是由较松散的碎块石土组成,前缘坡陡,在江水和雨水浸蚀影响下,其前缘易沿软弱层发生变形滑移,粉质粘土夹碎石即为控制临江崩滑堆积体前缘浅表变形的软弱夹层;三道沟滑坡的发生也显示出深层长期蠕动下前缘应力集中的自组织调整过程.

2.2 回水条件下的深层蠕动变形主要特征

综合详细勘查、研究、治理和系统监测成果,黄土坡滑坡各区段回水条件下的变形特征及其影响因素分析如下:

II 号崩滑堆积体和园艺场滑坡、变电站滑坡至今没有明显变形迹象. I 号崩滑堆积体在 135 m 蓄水后地表和深部变形较明显,回水效应显著. 深部变形位置与勘探钻孔、平硐中揭露的不同高程的不连续滑带及软弱层位置吻合,表明崩滑堆积体系沿这些滑带及软弱层产生变形,深层变形位置与崩滑堆积体和基岩的接触面基本一致. 不同部位变形位移速率不尽一致,总体为中部主轴部位变形位移速率大于两侧,前缘变形位移速率大于中后缘. 地表与深部变形累计位移量相差不大,即地表位移与深部位移总体上同步缓慢增长,表明地表变形主要由深层变形引起. 变形发展最快的时段是 135 m 蓄水及运行期(2003 年 6~10 月),说明变形与水库蓄水关系

密切.

TP3 平硐(硐口高程 140 m)监测表明, I 号崩滑堆积体沿基岩界面蠕动滑移变形明显,在主硐拱梁顶部(硐深 225.50 m 处)出露一薄层厚 3~5 cm 的蠕变带,其物质组成为粉质粘土、粘土夹角砾,黄棕、褐黄色,呈可塑至硬塑状,蠕变带分布较连续,产状为 N30°W/NE∠19°,沿平硐拱梁顶部可见明显的深层蠕变磨光面和擦痕(图 3).

2004 年以来, I 号崩滑堆积体深部滑带变形速率有变缓趋势,平均日变形位移均小于 0.1 mm,其中 TP3 平硐内崩滑堆积体底部滑带短基线监测资料表明,该点 2004 年、2005 年及 2006 年上半年日,日变形速率分别为 0.085 mm、0.051 mm 及 0.041 mm. 2006 年汛后 156 m 蓄水后,主要是在



图 3 TP3 平硐硐顶蠕滑面剪出特征

Fig. 3 TP3 shear character of creep surface in drift

2007 年汛期 156 m 回落 142 m 条件下,变形加快,但没有超过 135 m 蓄水及运行期的变形速率。

回水后的 2004 年 9 月 26 日凌晨,巴东审计局综合楼下方挡墙形成了宽约 25 m 的坍塌,坍塌体规模约 900 m³。据调查,该滑坡以及县计生委旧宿舍房屋裂缝、巴一中教室外墙裂缝等,乃不同时期、不同地点、不同成因的浅表局部变形现象,与水库蓄水无关,即这几处变形体位于 II 号崩滑堆积体后缘与变电站滑坡前缘叠置部位,该部位土体结构松散、土的性质极不均一,在降雨和地下水作用下引起不均匀沉降或人工切坡变形破坏。经监测证实,这一带尚未发现有深部蠕变变形迹象。

I 号崩滑堆积体深层蠕变变形的影响因素主要是顺向坡,前缘坡形陡,由较松散的碎块石土组成,有多层软弱层,地下水位与江水位变化同步,其形成的地质过程机制是在既有的坡体组成及结构和回水条件下,主要是受库水浸水软化、浮托作用产生牵引和降雨入渗的地下水作用产生推移的耦合效应(朱冬林等,2002;殷跃平等,2004,胡新丽等,2007)。I 号崩滑堆积体滑带土中粘粒及粉粒含量较高,有亲水的粘土矿物成分和呈片状结构,是滑带土在回水作用下易饱水软化的重要条件;滑带土饱水后力学强度降低,是导致崩滑体蠕变变形的重要原因。

3 滑坡形成与变形的地质过程机制

3.1 黄土坡滑坡形成的地质过程机制分析

(1)临江崩滑堆积体形成的地质过程机制分析。中更新世中后期,鄂西地区大面积构造隆升,长江急剧下切,黄土坡一带的 T_2b^{3-1} 灰岩、白云岩等较硬岩层形成陡坡,在岩体自重、降雨入渗及风化作用等内外营力作用下,岩体沿软弱层面及其他软弱结构面产生蠕变、倾倒,被剪切破坏的岩体产生崩塌滑移堆积。根据崩滑堆积体物质结构特征及黄土坡地区正常的地层层序分析判定,崩滑堆积体物质水平位移距离约为 270~300 m。根据黄土坡滑坡发育的年代学研究,在中更新世中后期经多次应力调整,于距今 40×10^4 a~ 38×10^4 a、 31×10^4 a~ 30×10^4 a、 22×10^4 a~ 18×10^4 a 发生了三次较大的崩滑,最终于中更新世末期(距今 15×10^4 a~ 13×10^4 a)逐渐得以稳定。其后经长期地质变形演化及人工改造,形成了现今陡缓相间、零星分布、多级缓坡平台的阶梯状岸坡地貌景观;崩滑堆积体厚度受原始地形控制,

显示出源于 T_2b^2 、 T_2b^3 不同物源多层叠置堆积,风化状态不一,且分布有多个贯通性较差的软弱面的多期次崩滑堆积的性状特征。

(2)变电站滑坡、园艺场滑坡形成的地质过程机制分析。综合勘查研究资料,变电站滑坡、园艺场滑坡形成的地质过程机制及运动形式基本一致,仅园艺场滑坡发生的时间略晚于变电站滑坡。由于前述临江崩滑体的变形破坏,岸坡不断后退,使坡体中前部 T_2b^{3-2} 岩层崩滑殆尽,导致 T_2b^2 紫红色泥岩、粉砂岩裸露地表,在其后缘高程 250~290 m 一线形成新的高陡临空面,为滑坡的形成创造了良好的前缘临空条件,控制了其变形形式和发展演化过程。在大致经历了蠕滑变形、拉裂变形及高速滑移 3 个阶段后,形成了前缘地带超覆于 II 号崩滑堆积体之上的变电站滑坡,和前部东界超覆于变电站滑坡、前缘地带超覆于 I 号崩滑堆积体之上的园艺场滑坡(图 1、图 2)。

3.2 变形的地质过程机制分析与预测

关于黄土坡滑坡的变形模式,目前主要有 3 种不同的认识,即:(1)黄土坡是滑坡,但范围较小,前缘及后缘高程分别为 235 m 和 580 m,即变电站滑坡(钟立勋,1989;邓清禄和王学平,2000);(2)未经大的滑动,但经过较强的变形,称为坠覆体;(3)由临江崩滑堆积体、变电站滑坡、园艺场滑坡组成的黄土坡滑坡。杨世松等(2001)、唐辉明和邓清禄(2005)等在“三峡工程库区巴东组斜坡变形特性及其机理研究”中引入了“斜坡长期变形”的思路,认为黄土坡滑坡是在重力作用下,在经历长期变形基础上叠加滑坡的产物。文宝萍(2005)根据伊利石矿物结晶度指数,推测 I 号崩滑堆积体为缓慢蠕变型,II 号崩滑堆积体可能经历过较快的滑移过程。

综上所述,斜坡经过长期重力变形破坏,有些已发展为滑坡。因此,黄土坡已为滑坡所叠加,这基本上没有争议。现关注的焦点是在回水条件下滑坡的规模及范围有多大的问题。

经详细勘查、研究、治理、监测等多方面的长期的理论与实践探讨,从黄土坡滑坡区滑坡与崩滑堆积体形成机制、演化过程及稳定性分析表明,黄土坡滑坡存在深层滑移(沿基岩面滑移)、浅层滑移和塌岸(库岸再造)等三方面的问题,作为一个整体是基本稳定的,但局部特别是前部稳定性较差。在三峡水库蓄水前后,水文地质条件有很大的改变,滑坡浅层改造(浅层滑移、塌岸)还会加剧。在三峡库区二期地

质灾害防治中,主要是针对崩滑体前缘进行了大规模的库岸防护工程,其前部变形体的塌岸问题基本得到了解决,但没有考虑深层滑移问题。关于在回水条件下深层蠕变的规模及范围问题,现提出的主要就是Ⅰ号崩滑堆积体,还需要进一步观测研究和采取相应的防治措施。

针对Ⅰ号崩滑堆积体变形过程的数值仿真分析表明,175 m蓄水和175 m回落145 m条件下,滑坡变形和应力分布要经历由平衡到回水打破平衡,再调整至平衡的过程,即变形体还会递次出现变形加快现象,之后,随着应力调整又出现变缓趋势,在水库水位升降运行环境下,滑坡的这种变形快慢变化还会长期显现出来。其深层滑带位移为剪切塑性变形,活动方式将以长期缓慢蠕滑为主。其发展的地质过程机制,预测是在其前部应力逐步积累,形成类似三道沟滑坡模式的变形破坏。因此,要通过监测,捕捉前缘鼓胀、出现裂缝等滑移特征的滑坡前兆,并根据变形及发展趋势采取相应措施。

4 结论

黄土坡滑坡的形成是在重力作用下,经历了前部长期变形破坏引发后部滑坡叠加的地质过程。在回水条件下,目前发现Ⅰ号崩滑堆积体有深层蠕变变形问题,主要是库水与降雨效应耦合作用的结果。工程地质类比分析表明,深层蠕变变形有使其前部形成类似三道沟滑坡的变形破坏模式和使岸坡不断后退的发展趋势。

References

- Deng, Q. L., Wang, X. P., 2000. Growth history of Huangtupo landslide; Down-slope overlapping landsliding modification. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(1): 44—50 (in Chinese with English abstract).
- Hu, X. L., David, M. P., Lidija, G., 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).
- Tang, H. M., Deng, Q. L., 2005. Study on the deformation properties and mechanism of Badong Formation in the Three Gorges Reservoir area. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Wen, B. P., 2005. Study on regularity of large landslide slip zone and genetic of typical slip zone and micro-structure in the Three Gorges Reservoir. China University of Geosciences, Beijing (in Chinese).
- Yang, S. S., Chen, H. Y., Chen, G. J., et al., 2001. Study on the formation conditions and mechanism of Badong landslide in the Three Gorges Reservoir area. Hydrogeology and Geoengineering Surveying Institute of Hubei, Jingzhou (in Chinese).
- Yin, Y. P., Tang, H. M., Li, X., et al., 2004. Study on the major geological disasters in the relocation areas for migrants from the Three Gorges Reservoir area and their prevention and control. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhong, L. X., 1989. Study on environmental geology of Badong new city in the Three Gorges Reservoir. Chinese Institute of Geological Environment Monitoring, Beijing (in Chinese).
- Zhu, D. L., Ren, G. M., Lie, D. X., et al., 2002. Effecting and forecasting of landslide stability with the change of reservoir water level. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 29(3): 6—9 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 邓清禄,王学平,2000.黄土坡滑坡的发育历史:坠覆—滑坡—改造.地球科学——中国地质大学学报,25(1):44—50.
- 胡新丽,David, M. P., Lidija, G.,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.
- 唐辉明,邓清禄,2005.三峡工程库区巴东组斜坡变形特性及其机理研究.武汉:中国地质大学出版社.
- 文宝萍,2005.三峡库区大型滑坡滑带发育规律及典型滑带成因和微观结构研究.北京:中国地质大学.
- 杨世松,陈海洋,陈国金,2001.三峡库区巴东黄土坡滑坡形成条件与成因机制研究.荆州:湖北省水文地质工程地质勘察院.
- 殷跃平,唐辉明,李晓,等,2004.长江三峡库区移民迁建新址重大地质灾害及防治研究.北京:地质出版社.
- 钟立勋,1989.长江三峡工程库区拟迁城市巴东县新址环境地质研究.北京:中国地质环境监测院.
- 朱冬林,任光明,聂德新,等,2002.库水位变化下对水库滑坡稳定性影响的预测.水文地质工程地质,29(3):6—9.