

三峡库区大型滑坡发育机理*

陈洪凯,唐红梅

(重庆交通大学 岩土与地质工程系,重庆 400074)

摘要 :体积超过 $1 \times 10^7 \text{ m}^3$ 的大型滑坡是三峡库区主要地质灾害,其发育机理包括形成机理和诱发机理两方面。通过大量现场调查和观测,运用地貌学方法,揭示了三峡库区大型滑坡在地质历史时期的3种形成机理即危岩链式崩落、泥石流堆积和地震,所占比例分别约为70%、10%和20%;发现存在于斜坡表面的大量危岩链式崩落堆积物是形成大型滑坡的基本条件,滑坡类型主要属于堆积层滑坡,而地震作用主要形成基岩滑坡。通过大量室内土工试验和模型试验,揭示了滑坡目前的3种诱发机理即降雨软化滑坡土体、坡顶加载和坡脚切割或工程弃渣堆积等人类工程活动、库水位变化和滑坡体周期性浸泡等,其中前两类诱发机理主要出现在175 m水位以上大量城镇、交通干线及移民等工程建设区段,后一类诱发机理出现在库水位变动带内,位于库水位变动带的大型滑坡,滑坡土体被库水周期性浸泡,强度非线性衰减,同时,库水位降落期间在滑坡体内产生较大的渗透力,两者耦合作用,加速了库岸滑坡的变形与破坏过程。以上研究成果基本概括了三峡库区大型滑坡的主要发育机理。

关键词 :三峡库区 地质灾害 大型滑坡 形成机理 诱发机理

中图分类号 :P642.22;P649

文献标识码 :A

文章编号 :1672-6693(2009)04-0043-05

三峡水库是世界闻名的特大型水库,库岸长度超过5300 km,直接受库水位变化影响的滑坡1190个,不受库水位变化影响但与三峡水库移民工程有关的滑坡近3000个,其中体积超过 $1 \times 10^7 \text{ m}^3$ 的大型滑坡占60%左右,如巫山县的白门坡滑坡和残联滑坡、奉节县的三马山滑坡和宝塔坪滑坡、万州区的和平广场滑坡、关塘口滑坡、草街子滑坡和清泉路滑坡、云阳县的故陵滑坡、开县的渠口滑坡、康家嘴滑坡,等等。滑坡是三峡库区主要地质灾害,威胁着400多万人的生命安全和数百亿元财产安全,2000—2006年间,国家已先后投入近150亿元用于三峡库区的滑坡灾害治理。

从20世纪80年代以来,国内外学者对三峡库区的滑坡进行了大量研究,如张家桂和李守定等分析了宝塔坪滑坡的形成机制^[1-2],陆关祥等对重庆主城区的滑坡发育规律进行了初步探索^[3],蔡永胜等分析了黄土坡滑坡的稳定性^[4],杨为民等探讨了千将坪滑坡的形成机理^[5],孙云志等系统分析了和平广场滑坡的堆积过程^[6-7],李长安^[8]和唐红梅等^[9]分析了库区大型滑坡与构造应力场之间的耦合关系,陈洪凯等对水库岸坡内的地下水压力及库区松散土体滑坡启动机理进行了试验研究^[10-11]。然而,

以上这些成果均主要属于对局部问题分析。本文结合多年来的研究力图较系统地总结、揭示三峡库区大型滑坡的发育机理,以便对全面认识库区滑坡灾害的形成机制起到抛砖引玉的作用。

1 滑坡形成机理

通过大量现场调查和观测,运用地貌学方法,本文进一步将滑坡发育机理区分为形成机理和诱发机理两方面。三峡库区内在地质历史时期形成目前仍然处于活跃或潜在活跃状态的大型滑坡形成机理可总结为3种,即危岩链式崩落、泥石流堆积和地震。

1.1 危岩链式崩落

和平广场滑坡、草街子滑坡、关塘口滑坡等大型滑坡均为第四纪松散堆积物滑坡,滑坡体由崩积物和坡积物组成。松散物质聚积过程本质上即为滑坡的形成过程^[6],源于陡崖或陡坡上危岩链式崩落^[12-15],三峡库区内近70%的大型滑坡遵从该形成机理。陈洪凯等将危岩链式崩落机理划分为5个阶段即河流下切阶段、差异风化阶段、危岩体形成阶段、单一危岩体崩落阶段和多个危岩体形成及崩落阶段^[16-17](图1)。陡崖或陡坡坡脚岩腔形成以后,把岩腔顶部危岩体逐渐形成、崩落的过程定义为边

* 收稿日期 2009-05-08

资助项目 国家自然科学基金(No. 50678182),重庆市重点自然科学基金(No. 2008BA0015)

作者简介 陈洪凯,男,教授,博士后,博士生导师,新世纪百千万人才工程国家级人选,重庆市杰出专业技术人才,研究方向为动力地貌学、山地灾害演变、安全警报与减灾技术。

坡演化微观链,即危岩块,而从陡崖或陡坡向其后部山体的阶段性后退过程定义为边坡演化宏观链,如A→B→C……。宏观链和微观链的组合即为层状岩体边坡链式演化规律,可以分为简单模式(图2)和复合嵌套模式(图3)^[18]。链式演化规律简单模式是指在陡崖坡高度较小(三峡库区内20 m以下)时,在岩腔形成以后,仅表现为一个宏观链(如A),该宏观链内微观链逐渐发育,直到所有微观链结束后进入下一个宏观链;而当陡崖高度较大(三峡库区内超过20 m)时,链式演化规律便体现为复合嵌套模式,表现为两个以上的宏观链同时发育。陡崖高度越大,同时发育的宏观链数量越多,但在三峡库区内迄今尚未发现5个以上宏观链共存的情况。边坡链式演化规律的宏观链与陡崖高度和硬质岩性有关:高度越大、岩性为砂岩时,共存的宏观链数量较少、微观链块体高度较大;在高度较小、岩性为灰岩时,共存的宏观链数量较多,但微观链块体的高度减小。

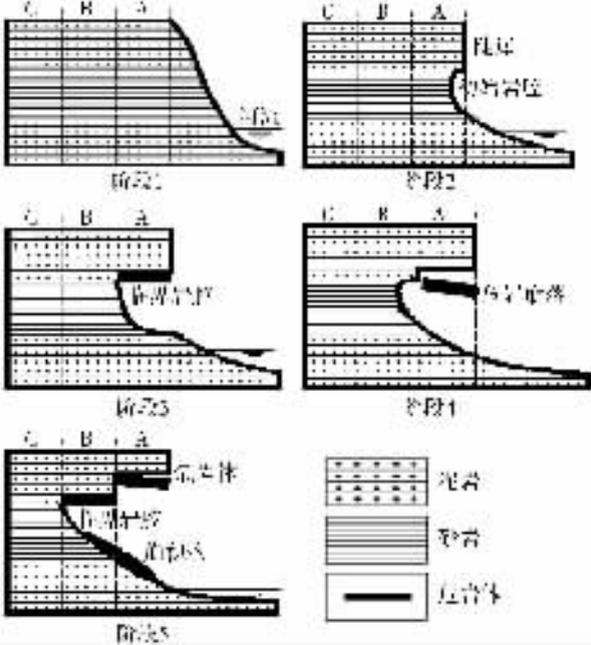


图 1 危岩链式崩落机理

Fig. 1 Chained regularity of perilous rock

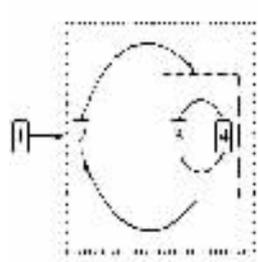


图 2 链式规律简单模式
Fig. 2 Single model of chained regularity

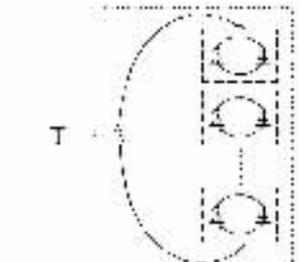


图 3 链式规律复合嵌套模式
Fig. 3 Complex model of chained regularity

危岩链式崩落机理的关键是危岩主控结构面的损伤和断裂扩展^[19-20],控制着微观链的形成时间^[21]。陡崖或陡坡坡脚的第一个微观链形成机理源于岩腔形成过程(图4)。值得注意的是,一般最后5~10个微观链常常可能同时失稳破坏,如万州关塘口滑坡发育于第五级阶地上的滑坡体最后9个微观链同时失稳,近 $800 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的崩积物快速运动,推挤前期崩积物而在阶地外缘形成堆积山丘;后部出现堰塘,常年积水,在崩积物中产生渗流(图5),加速了滑坡的发育进程。

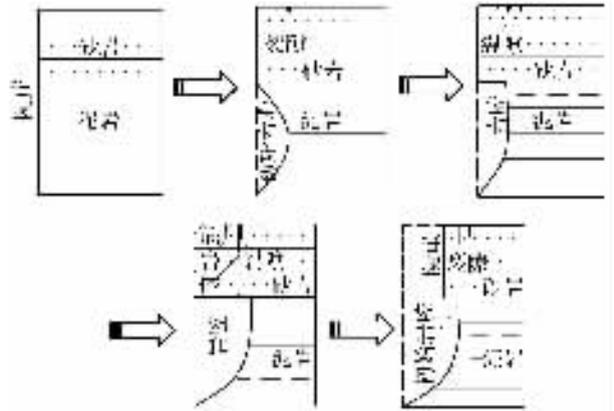


图 4 岩腔发育过程

Fig. 4 Developing process of rockcell

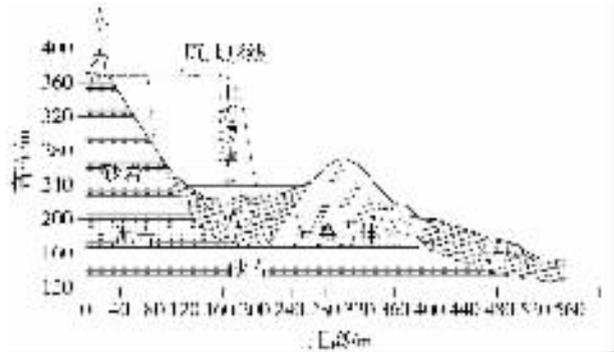


图 5 关塘口滑坡体形成机制

Fig. 5 Developing mechanism of Guantangkou landslide

1.2 泥石流堆积

三峡库区内10%左右的大型滑坡是由第四纪期间发育的特大型滑坡型泥石流流体组成,泥石流属于蠕动型泥石流。如开县康家嘴滑坡,其平面形态呈现典型的沟谷泥石流流通区段和沉积区(图6),滑坡体积 $2\,043.45 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。滑坡前端沉积区段鼓胀裂缝、放射状裂缝发育,属于大型滑坡强变形区或易变形区,伸入江河的滑坡体前端易受后期流水冲刷切割。

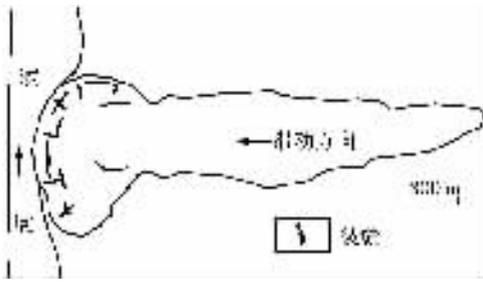


图 6 康家嘴滑坡平面图

Fig. 6 Planar graph of Kangjiazui landslide

1.3 地震

三峡库区内约 20% 的大型滑坡由地震作用产生,主要为基岩滑坡,如长江新滩滑坡、鸡扒子滑坡、小南海滑坡。滑坡体体积一般均超过 $3 \times 10^7 \text{ m}^3$,陡高斜坡在地震作用下造成山崩,通常堵塞坡脚的河道形成堰塞湖,如黔江小南海,形成于 20 世纪初,滑坡体积近 $8 \times 10^7 \text{ m}^3$,堵塞河道成坝,滑坡后壁目前仍清晰可见(封三彩图 7),高差 300 m 左右(图 8)。

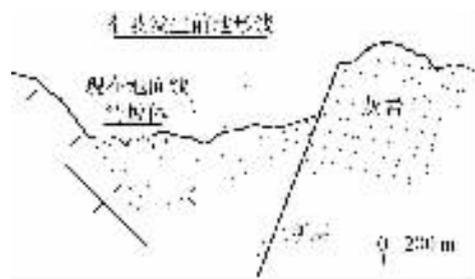


图 8 小南海滑坡剖面图

Fig. 8 Section of Xiaonanhai landslide

2 滑坡诱发机理

通过对三峡库区万州、奉节、巫山等地 200 多个大型滑坡的现场观测及大量的土工试验和对奉节白马港的大比尺室内物理模型试验,发现降雨软化滑坡土体、人类工程活动、三峡水库库水位变化及周期性浸泡等是目前三峡库区内大型滑坡的主要诱发机理,几乎均是现有大型滑坡的整体复活或局部复活。

2.1 降雨软化滑坡土体

三峡库区内松散物质分布广泛,奉节县以下的地区主要分布三叠纪的巴东组和嘉陵江组地层。尤其是巴东组为碎屑岩、粘土岩和碳酸盐岩的互层和夹层,其中碳酸盐岩中富含石膏和岩溶角砾岩,易于溶解,粘土岩中富含蒙脱石和亲水性极强的伊利石、水云母和高岭石等粘土矿物,浸水易膨胀,失水易收缩,吸水后强度快速衰减而成为易崩、易滑地层,致使岸坡崩塌堆积体极其发育,奉节县以上的巨厚层崩积物底部与基岩接触带,由于动力分选及后期地下

水淋滤,伊利石和高岭石等粘土矿物富集。分别代表水库上游、中游和下游的万州青草背港、奉节白马港和巫山龙门港的代表性土体矿物成分测试结果见表 1。其中可见,石英含量越高的土体强度参数越高,而蒙脱石含量较高的土体强度参数较低。

表 1 港区土体矿物组成及抗剪强度参数

Tab. 1 Mineral ingredients and shear strength parameters of soil in harbors

土体类型	矿物组成/%						强度参数	
	蒙脱石	伊利石	高岭石	绿泥石	长石	石英	C/kPa	$\varphi/^\circ$
白马港 粘性土	41	17	3	12	9	18	23.4	17.2
龙门港粉质 粘土 1 [#]	51	17	4	10	11	7	36.6	12.8
龙门港粉质 粘土 2 [#]	48	8	11	11	13	9	33.4	14.3
青草背港粉 质粘土 1 [#]	49	29	6	-	10	9	34.3	13.0
青草背港粉 质粘土 2 [#]	45	17	13	7	29	10	31.5	16.7

注:采用 D/MAX IIC 型衍射仪, CuK α Ni 滤光, 35KV 6 $^\circ$ /min

通过对三峡库区内 20 余种代表性土体 300 多组试样的试验发现(图 9),随着含水量增加土体内摩擦角逐渐减小,而粘结力呈现先增加后减小的非线性关系。从粘结力-含水量曲线发现,土体存在介于 10%~20% 的特征含水量,在该含水量附近,粘结力为极大值。据此随着含水量增加或减小,粘结力都单调减小。

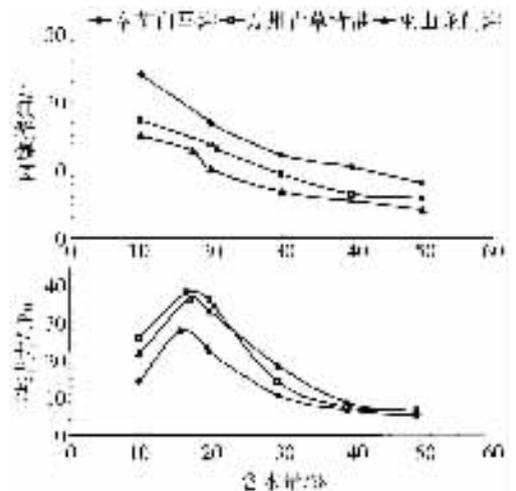


图 9 粉质粘土抗剪强度参数随含水量变化曲线

Fig. 9 Shear strength parameters variation vs water content of silty clay

位于重庆主城区的巴南区麻柳嘴滑坡,体积约 $3 \times 10^7 \text{ m}^3$,1998—1999 年对滑坡体中部深部位移监

测结果发现,滑坡体在雨季的位移量明显大于旱季^[22]。室内模型试验也揭示了滑坡变形与降雨量及降雨历时之间的正相关关系^[11]。

2.2 工程活动

人类工程活动主要体现为诱发中小型滑坡灾害,而对大型滑坡的诱发机制,则主要通过通过对滑坡坡顶加载、坡脚切割等方式诱发滑坡体局部变形或失稳^[15]。如云南南溪公路滑坡,体积近 $1.3 \times 10^7 \text{ m}^3$,2004 年在滑坡体中前部开挖修建公路,逐渐在坡顶出现 3 条横向拉张裂缝,最宽 18 cm(封三彩图 10),滑面抗剪强度逐渐减小,于 2007 年 5 月失稳(封三彩图 11)。从 2000 年以来,库区大量新城镇、道路建设过程中诱发滑坡的事例 50 余处,如巫溪至巫山公路建设中诱发边坡滑动破坏(封三彩图 12)。此外,大量工程弃渣在边坡或沟谷内,易于诱发堆积层滑坡。

2.3 库水位变化及周期性浸泡

根据三峡水库调度运行方案,库水位每年变化于 145 ~ 175 m 之间,存在 30 m 左右的水位变幅,水位变幅区即为水库消落带。位于消落带的巨型潜在滑坡,滑坡土体被库水周期性浸泡,抗剪强度参数劣化(图 13)尤其在库水位降落期间,将在滑坡体内产生显著的渗透力,两者共同作用(图 14),使抗滑力急剧减小,而滑动力又显著增大,进而诱发滑坡。当滑坡体厚度较大时,易于诱发深层大型滑坡,如千将坪滑坡(封三彩图 15);当滑坡体厚度较小时,库水位周期性变化将产生周期性牵引力,使滑坡呈现牵引破坏(图 16),2004 年在重庆交通大学模型试验场进行了奉节白马港 1:500 大比尺模型试验,证实了该机理(图 17)。

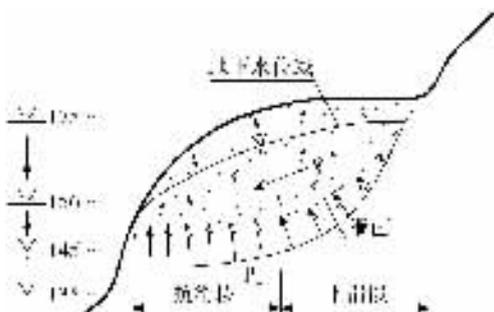


图 14 库水位降落期间的滑坡体受力情况
Fig. 14 Forces acting on landslide during drawdown of reservoir

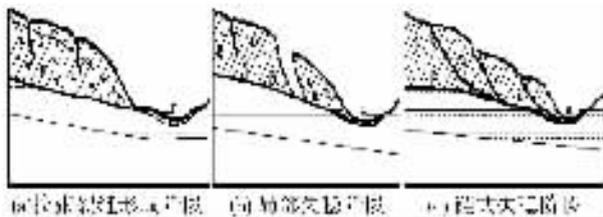


图 16 库岸滑坡发育过程
Fig. 16 Developing process of landslide in bank area of reservoir

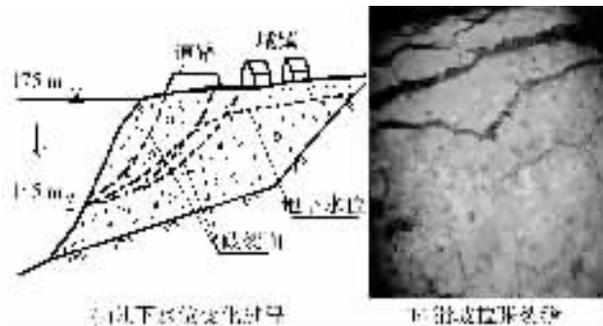


图 17 奉节白马港滑坡发育模型试验
Fig. 17 Model testing to Baima harbor landslide in Fengjie county

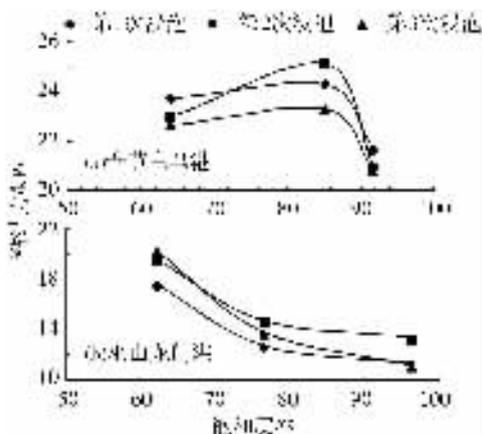


图 13 奉节白马港、巫山龙门港粘土粘聚力随饱和度变化
Fig. 13 Cohesive force variation with saturation of clay in Baima harbor in Fengjie county and Longmen harbor in Wushan county

3 结论

本研究结论总结归纳后有以下 4 点。

1) 体积超过 $1 \times 10^7 \text{ m}^3$ 的大型滑坡是三峡库区主要地质灾害,具有数量多、分布广、致灾影响严重等特点,其发育机理可以分为形成机理和诱发机理两方面。

2) 三峡库区滑坡的形成机理可概括为 3 种,即危岩链式崩落、泥石流堆积和地震,所占比例分别在 70%、10% 和 20% 左右。进一步将危岩链式崩落机理分为 5 个阶段,即河流下切阶段、差异风化阶段、危岩体形成阶段、单一危岩体崩落阶段和多个危岩体形成及崩落阶段。存在于斜坡表面数量多、厚度大、分布面积较大的危岩链式崩落堆积物是形成大

型滑坡的基本条件,这种机理主要形成堆积层滑坡;地震作用形成的滑坡主要属于基岩滑坡。

3)滑坡诱发机理可以概括为3类,即降雨软化滑坡土体、坡顶加载、坡脚切割或工程弃渣堆积等人类工程活动、水库库水位变化及滑坡体周期性浸泡,其中前两类诱发机理主要出现在175 m水位以上大量城镇、交通干线及移民等工程建设区段,后一类诱发机理出现在与库水位变动带有关的滑坡内。位于库水位变动带的大型滑坡,整体或部分滑坡土体被库水周期性浸泡,强度非线性衰减,同时,库水位降落期间在滑坡体内产生较大的渗透力,两者耦合作用,加速了库岸滑坡的变形及破坏过程,当潜在滑坡厚度较大时库水位周期性变化易于诱发巨型深层滑坡,当潜在滑坡厚度较小时库水位变化具有牵引性,滑坡具有拉张牵引性质。

4)大量的室内土体吸水强度衰减试验、周期性浸泡试验,以及库水位变化过程中岸坡变形及破坏过程,验证了三峡库区大型滑坡的诱发机理。

参考文献:

- [1] 张家桂. 三峡库区别奉节县宝塔坪小区大型复杂滑坡特征及成因机制[J]. 地质论评, 2000, 46(4): 431-436.
- [2] 李守定, 李晓, 张年学, 等. 三峡库区宝塔滑坡泥化夹层泥化过程的水岩作用[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1841-1846.
- [3] 陆关祥, 李林. 重庆市滑坡、崩塌的发育规律及区域危险性程度区划[J]. 地质科学, 2001, 36(3): 335-341.
- [4] 蔡永胜, 郑建芳. 长江三峡库区巴东县黄土坡滑坡稳态分析及防滑措施[J]. 东南大学学报(自科版), 2001, 31(5): 53-57.
- [5] 杨为民, 吴树仁, 石菊松, 等. 湖北秭归干将坪滑坡形成机理[J]. 煤炭工程, 2004(4): 57-59.
- [6] 孙云志, 张业明. 万州和平广场堆积体形成时间与堆积过程[J]. 人民长江, 2005, 36(12): 44-46.
- [7] 孙云志, 苏爱军, 崔政权. 三峡库区万州和平广场滑坡成因与防治对策研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工学版), 2003, 27(6): 853-855.
- [8] 李长安. 三峡库区滑坡与构造运动/气候变化的关系[J]. 地质科技情报, 1997, 16(3): 88-91.
- [9] 唐红梅, 陈洪凯, 耿大玉, 等. 重庆库区新构造应力场及

其对滑坡宏观活动规律的控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 352-356.

- [10] 陈洪凯, 艾南山. 岩石边坡中地下水压力的基本特性及作用[J]. 兰州大学学报(自科版), 1998, 34(4): 171-175.
- [11] 陈洪凯, 唐红梅. 散体滑坡室内启动模型试验[J]. 山地学报, 2002, 20(1): 112-115.
- [12] 陈洪凯, 唐红梅. 三峡库区危岩发育规律研究[C]//第二届全国岩土与工程学术大会委员会. 第二届全国岩土与工程学术大会论文集(上). 北京: 科学出版社, 2006: 837-842.
- [13] Bertran P. The rock-avalanche of february 1995 at claux (french alps)[J]. Geomorphology, 2003, 54(3): 339-346.
- [14] Braathen A, Blikra L H, Karlsen S S. Rock-slope failure in norway type geometry deformation mechanisms and stability[J]. Norwegian Journal of Geology, 2004, 84: 67-88.
- [15] Richard J C, Stanley A S, David E S. Geomorphology[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1984: 255-275.
- [16] Chen H K, Tang H M. Chained mechanism and moving routine for perilous rock to avalanche in the area of the three gorges reservoir of china[C]//Anon. The proceedings of the china association for science and technology Vol. 3 No. 1. Beijing: Science Press, 2006: 501-506.
- [17] Chen H K, Tang H M, Zhu H. Research on duration for perilous rock to form[J]. WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics, 2006, 1(2): 169-173.
- [18] 陈洪凯, 唐红梅. 三峡库区公路缓倾角岩层边坡崩塌机理及警报系统[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2009, 26(3): 26-29.
- [19] 唐红梅, 叶四桥, 陈洪凯. 危岩主控结构面应力强度因子求解分析[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(3): 393-397.
- [20] Chen H K, Tang H M, Ye S Q. Research on damage model of control fissure in perilous rock[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2006, 27(7): 967-974.
- [21] Chen H K, Tang H M. Method to calculate fatigue fracture life of control fissure in perilous rock[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2007, 28(5): 643-649.
- [22] 任幼蓉, 张涛. 麻柳嘴滑坡变形监测分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2000, 11(2): 147-151.

Developing Mechanism of Giant Landslides in the Area of Three Gorges Reservoir

CHEN Hong-kai, TANG Hong-mei

(Dept. of Geotechnical & Geological Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract : Giant landslides over $1 \times 10^7 \text{ m}^3$ for a single landslide volume are dominant geological disasters in the area of the Three Gorges reservoir , whose developing mechanism include two aspects , i. e. , forming mechanism and triggering mechanism. Based on investigations in real-time field , forming mechanism of giant landslides in the area are revealed by using Geomorphology and are classified into chain avalanching of perilous rock , debris flow deposits , and earthquake , appearing about 70% , 10% and 20% respectively. Meanwhile , lots of loose deposits sitting on slopes are initial conditions to form landslides , and almost all landslides are composed of loose deposits ; while that by earthquake belongs to rock landslides. According to many geotechnical observations and physical simulations in laboratory , three triggering mechanisms of landslides are promulgated obviously , i. e. ,(1) softening landslide earth by precipitation ;(2) unreasonable mankind actions , such as loading on top and cutting at foot of slope and engineering refuse dump , etc. ;(3) variation between 145 m a. s. l. and 175 m a. s. l. of water level of the reservoir , and alternatively soaking of earth at the variation region. In the three mechanisms , the first and the second extensively appear in engineering construction sits , such as urban , roads and highways , villages of immigrants above 175 m a. s. l. , while the third plays a role frequently in landslides locating in the variation region. Giant landslides locating in the variation region are soaked by water of the reservoir totally or partially , so strength of earth is composed of the landslide attenuate by a big margin. Additionally , greater seepage forces exist in these landslides during descending of water level of the reservoir , and coupling both of the aspects speed up forming and rupture processes of landslides sitting on the slope. All results above reveal initially developing mechanisms of giant landslides in the area.

Key words : the area of Three Gorges reservoir ; geological disaster ; giant landslide ; developing mechanism ; triggering mechanism

(责任编辑 方 兴)

(接正文45-46页)



图7 小南海地震滑坡地貌
Fig. 7 Landscape of Xisannhai landslide triggered by earthquake

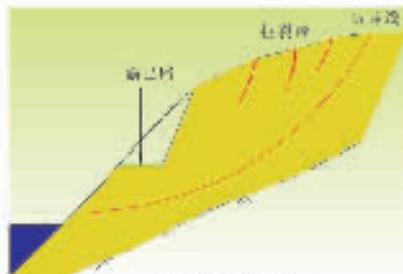


图10 南溪滑坡发育机理
Fig. 10 Developing mechanism of Neazi landslide



图11 南溪滑坡破坏公路
Fig. 11 Destructive highway in Naxi landslide



图12 巫溪-巫山公路开挖诱发滑坡
Fig. 12 Landslide triggered by artificial cutting along highway between Wuxi county and Wushen county



图13 2003年7月失稳的千将坪滑坡
Fig. 13 Landscape of Qianjiaping landslide in July, 2003