

文章编号:1000-582X(2002)12-0134-03

# 三峡库区名山滑坡稳定性的计算分析<sup>\*</sup>

陈萍<sup>1</sup>, 许江<sup>1</sup>, 刘玉洪<sup>2</sup>, 李克钢<sup>1</sup>

(1. 重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆市地勘总公司 208 水文地质与工程地质队, 重庆 400015)

**摘要:**三峡大坝建成蓄水后, 无疑将导致部分古滑体的复活和新滑体的产生, 对三峡库区的城镇建设、交通安全等造成一定影响。针对三峡库区的实际情况, 以重庆市丰都县名山滑坡为例, 具体考虑了旱季(天然状态)、雨季(暴雨或长期降雨状态)、旱季+175 m 库水位、雨季+175 m 库水位、旱季+地震、雨季+地震、旱季+175 m 库水位+地震、雨季+175 m 库水位+地震、旱季+库水位由 175 m 下降至 145 m、雨季+库水位由 175 m 下降至 145 m 等 10 种计算工况, 并给出了相应的作用荷载体系, 提出了相应评价库岸滑体稳定性分析计算方法。

**关键词:**滑坡; 稳定性; 三峡库区

**中图分类号:** P694

**文献标识码:** A

三峡库区地处川鄂交界的山地峡谷区, 属亚热带季风性气候, 山多坡陡, 降雨充沛, 且时有暴雨发生, 尤其是在三峡水利枢纽工程建成蓄水后, 库区内长江水位将由现在的几十米海拔高度提高到 175 m, 且库水位每年还将在 145 m 和 175 m 之间进行周期性调节, 岸坡中的大量古滑坡体或在外荷载、库水等环境因素作用下产生的新滑坡体将受到潜水和长期周期性的流水冲刷、浮力减重、静动水压力、浸泡软化以及年复一年的高、低库水水位动态变化所产生的变动荷载等的作用和影响, 无疑将导致古滑体复活和新滑体的产生, 这样势必会对未来的三峡水库以及城镇居民建设、交通安全造成一定的影响。因此, 有必要针对三峡库区的实际情况, 探索岸坡滑体稳定性分析评价的方法, 为确定岸坡滑体整治工程措施提供理论依据<sup>[1-3]</sup>。

## 1 作用于滑体上的特殊力系

针对三峡库区特殊的地质环境, 作用在岸坡滑体上的力( $P$ ), 除了必须考虑滑体自重( $W$ )、滑面摩擦阻力( $R$ )和地表建筑物等作用在滑体上的附加载荷( $F$ )之外, 还应充分考虑由于库水位的升降、暴雨、地下水和地震等因素的变化所引起的作用在滑体上的动水压力( $P_d$ )、静水压力( $P_s$ )和地震力( $P_z$ ), 以及处于库水位以下部分的滑体所受到的浮托力( $S$ )等, 即作用在岸坡滑体上的合力应为<sup>[4]</sup>:

$$P = W + R + F + P_d + P_s + P_z + S \quad (1)$$

## 2 计算工况与滑带土参数的确定

当滑体处于旱季(天然状态)、雨季(暴雨或长期降雨状态)、175 m 库水位、地震以及库水位由 175 m 下降至 145 m 等不同的情况下, 作用在其上的荷载是截然不同的, 应加以区别对待。因此, 在对岸坡滑体进行稳定性分析评价中, 应充分考虑上述各种不同情况对滑体稳定性的影响, 并归纳总结出了 10 种不同计算工况及其作用荷载(见表 1)。

表 1 各种计算工况及其作用荷载

工 况	作用荷载
旱季(天然状态)	$W + R + F$
雨季(暴雨或长期降雨状态)	$W + R + F + P_d$
旱季 + 175 m 库水位	$W + R + F + S$
雨季 + 175 m 库水位	$W + R + F + P_d + S$
旱季 + 地震	$W + R + F + P_z$
雨季 + 地震	$W + R + F + P_d + P_z$
旱季 + 175 m 库水位 + 地震	$W + R + F + S + P_z$
雨季 + 175 m 库水位 + 地震	$W + R + F + P_d + S + P_z$
旱季 + 库水位由 175 m 下降至 145 m	$W + R + F + S + P_s$
雨季 + 库水位由 175 m 下降至 145 m	$W + R + F + P_d + S + P_s$

· 收稿日期: 2002-09-15

基金项目: 重庆市应用基础基金资助项目、教育部优秀青年教师资助计划、重庆市院士基金资助项目(6592)

作者简介: 陈萍(1974-), 女, 四川大英人, 重庆大学硕士研究生, 主要从事岩石力学与工程方面的研究。

不同的滑体在不同状态下,由于其滑移面形态与贯通状况、滑带土成分与厚度以及滑带土中的含水量等的不同,致使滑带土的抗剪强度指标——内聚力  $C$  和内摩擦角  $\varphi$  较为离散,如何合理有效地确定滑体上滑带土的抗剪强度指标,一直都是工程上未能很好解决的问题。基于上述,笔者认为,滑体上滑带土的抗剪强度指标的取值应该依据滑体上滑带土的室内与现场剪切实验、反演分析、经验数据类比 3 方面的资料予以综合确定<sup>[5]</sup>。

### 3 稳定性系数计算与滑体稳定性评价

关于滑体稳定性分析的方法有极限平衡法、极限分析法、滑移线场法、有限单元法、有限差分法、离散单元法等。但基于目前的现状和工程实际情况,岸坡滑体稳定性分析计算仍以极限平衡法为主,不仅计算方法简单,而且能基本反映滑体的稳定性状况,对于其条块的划分是以前滑体上、下部边界线转折处为界,相应的滑坡稳定性系数  $F_s$  可采用式(2) 计算<sup>[6]</sup>:

$$F_s = \frac{\sum_{j=1}^{n-1} (R_j \prod_{j=i}^{n-1} \Psi_j) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} (T_i \prod_{j=i}^{n-1} \Psi_j) + T_n} \quad (2)$$

其中  $\Psi_j$  为第  $j$  条块滑体的剩余下滑力传递至第  $j+1$  条块滑体时的传递系数:

$$\Psi_j = \cos(\alpha_i - \alpha_{i-1}) - \sin(\alpha_i - \alpha_{i-1}) \cdot \text{tg}\varphi_{i+1};$$

$R_i$  为作用于第  $i$  条块滑体的抗滑力(kN/m),

$$R_i = N_i \cdot \text{tg}\varphi_i + C_i L_i;$$

$N_i$  为作用于第  $i$  条块滑体的法向分力(kN/m):

$$N_i = W_i \cdot \cos\alpha_i - P_{di} \cdot \sin\alpha_i - P_{si} \cdot \sin\alpha_i - S_i \cdot \cos\alpha_i;$$

$T_i$  为第  $i$  条块滑体切向分力(kN/m):

$$T_i = W_i \cdot \sin\alpha_i + P_{di} \cdot \cos\alpha_i + P_{si} \cdot \cos\alpha_i + P_{ai} - S_i \cdot \sin\alpha_i;$$

$W_i$  为第  $i$  条块滑体的重力(kN/m),  $P_{di}$  为作用于第  $i$  条块滑体的动水压力:  $P_{di} = A_{oi} \cdot n_i \cdot r_w \cdot I \cdot C_w$ ;

$P_{si}$  为作用于第  $i$  条块滑体的静水压力:  $P_{si} = \frac{1}{2} r_w h_i^2$ ;

$P_{ai}$  为作用于第  $i$  条块滑体的地震力:  $P_{ai} = \frac{\alpha_h}{g} \cdot W_i$ ;

$S_i$  为作用于第  $i$  条块滑体的浮托力:  $S_i = A_{oi} \cdot r_w$ ;

$\alpha_i$  为第  $i$  条块滑体的滑面倾角, ( $^\circ$ );  $L_i$  为第  $i$  条块滑体的长度, m;  $C_i$  为第  $i$  条块滑体的滑带土内聚力, kN/m<sup>2</sup>;  $\varphi_i$  为第  $i$  条块滑体的滑面内摩擦角, ( $^\circ$ );  $r_w$  为水容重, kN/m<sup>3</sup>;  $C_w$  为饱水系数;  $h_i$  为饱水厚度, m;  $\alpha_h$  为地震水平加速度 m/s<sup>2</sup>, 重庆地区按 6 度地震设防, 其值为 0.45 ~ 0.89, 由于缺少实测数据, 这里拟取其平均值 0.49。

根据上述公式计算得出的岸坡滑体稳定性系数

$F_s$ , 笔者认为, 当其大于 1.05 时, 滑体处于稳定状态; 当其介于 0.95 ~ 1.05 之间时, 滑体处于临界稳定状态; 当其小于 0.95 时, 滑体处于暂时稳定或不稳定状态。

### 4 滑体推力计算

当某滑体处于非稳定状态, 并对滑体周围居民的人民生命财产安全及交通安全有一定的威胁时, 就必须对其加以整治, 但在滑体整治过程中, 首先必须通过对不同条块上滑坡推力的分析计算, 才能有针对性地确定岸坡滑体的合理整治措施。笔者认为, 滑坡推力按传递系数法计算是既简单又合理的, 即滑体上第  $i$  条块的滑坡推力可按式(3) 进行计算<sup>[6]</sup>

$$E_i = E_{i-1} \cdot \Psi + K \cdot T_i - D_i \cdot \text{tg}\varphi_i - C_i L_i \quad (3)$$

其中:  $K$  为设计安全系数; 其余参数同上。

### 5 工程实例

名山滑坡位于重庆市丰都县名山风景区, 该滑体自 70 年代中期以来就出现了种种变形破坏迹象, 部分区段的表层土体发生了蠕滑, 形成大量醉汉林, 近来, 滑体变形加剧, 蠕滑速度加快, 局部区段出现失稳, 部分建筑物遭到破坏, 严重威胁着名山风景区和坡脚居民的生命财产安全。

根据重庆市地勘总公司 208 水文地质与工程地质队的地质勘察资料, 该滑坡滑面形态似箭弓状, 横宽 260 ~ 430 m, 纵长 110 ~ 150 m, 滑体厚度为 1.60 ~ 5.10 m, 前缘高程约 158 ~ 176 m, 后缘高程约 215 ~ 244 m, 滑坡分布面积 43 910 m<sup>2</sup>, 体积约 21 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>, 属中型浅层土质滑坡。图 1 为其中一剖面及其条块划分情况, 表 2 为该滑体上滑带土的在枯季(天然)、雨季及饱水状态下的容重以及抗剪强度指标  $C$ 、 $\varphi$  值, 表 3 为根据式(2) 计算出的各种不同工况下滑体的稳定系数  $F_s$ , 表 4 为根据式(3) 计算出的其中 4-4 剖面在不同工况下的滑坡推力  $E_i$  值。

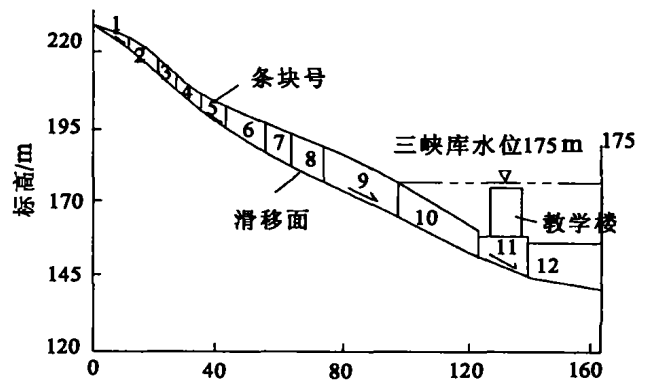


图 1 4-4 工程地质剖面图及其条块划分情况

表2 滑带土的抗剪强度指标的具体取值

状态	内聚力 $c$ / (kPa)	内摩擦角 $\varphi$ / ( $^{\circ}$ )	容重 $\gamma$ / (kN/m <sup>3</sup> )
枯季	23	15	19.7
雨季	13	10	19.9
饱水状态	11	9	19.9

表3 各剖面在10种工况下的稳定性系数( $F_s$ )

计算工况	剖面			
	3-3	4-4	9-9	13-13
工况1	1.69	1.60	1.66	1.55
工况2	1.00	0.91	0.96	0.94
工况3	1.77	1.47	1.66	1.31
工况4	1.00	0.89	0.96	0.93
工况5	1.53	1.42	1.48	1.39
工况6	0.95	0.85	0.91	0.88
工况7	1.53	1.31	1.47	1.23
工况8	0.91	0.80	0.87	0.83
工况9	1.66	1.46	1.65	1.33
工况10	1.00	0.86	0.96	0.90

表4 不同工况下滑体各条块的推力计算结果 kN/m

剖面条块	计算方案				
	工况2	工况4	工况6	工况8	工况10
1	0	0	0	0	0
2	74	74	102	102	74
3	169	169	217	217	169
4	247	247	345	345	247
5	348	348	467	467	348
6	415	415	603	603	415
7	696	696	934	934	696
8	815	815	1077	1077	815
9	947	947	1297	1297	947
10	1099	1161	1537	1599	1176
11	873	934	1296	1357	944

由表3计算结果不难看出,当岸坡滑体处于天然状态时,其最小稳定性系数为1.55,滑体显然是处于稳定状态;但当滑体在暴雨或长期降雨的影响下,其最小稳定性系数降低至0.91,滑体将处于不稳定或临界稳定状态;当库水位蓄水至175 m库水位之后,且滑体同时受到暴雨或长期降雨的影响时,其最小稳定性系数降为0.89,滑体将处于不稳定状态;当在库水位由175 m调节下降至145 m过程中,滑体同时又受到暴雨或长期降雨的影响时,其最小稳定性系数为0.86,滑体也将处于不稳定状态。由表4计算结果不难看出,该滑体在暴雨或长期降雨的影响下,4-4剖面的推力累计值873 kN/m,其中以10号条块的推力为最大(1 099 kN/m),

这一结果与地质勘察中所发现的该区段变形最强烈的结论是一致的;在三峡水库蓄水至175 m库水位之后,滑体中部分土体处于库水位以下,其前缘土体将受到库水浮托力作用,抗滑力减小,其中4-4剖面的推力累计值为934 kN/m(其值比雨季时大61 kN/m),该剖面中的推力仍以10号条块的为最大(但其值比雨季时增加62 kN/m);又当库水位由175 m调节下降至145 m时,滑体中将出现较大的静、动水压力,使其受到的下滑力增大,其4-4剖面的推力累计值比雨季时大了71 kN/m,该剖面中的推力仍以10号条块的为最大(但其值比雨季时增加了77 kN/m)。

## 6 结 论

1) 针对三峡库区的具体情况,在分析作用在岸坡滑体上的力时,不但考虑了滑体自重、滑面摩擦阻力和地表建筑物等作用在滑体上的附加荷载,而且还考虑了由于库水位的升降、暴雨、地下水和地震等因素的变化所引起的作用在滑体上的动水压力、静水压力和地震力,以及处于库水位以下部分的滑体所受到的浮托力等。

2) 在对岸坡滑体稳定性进行分析评价时,通过对滑体处于旱季(天然状态)、雨季(暴雨或长期降雨状态)、175 m库水位、地震以及库水位由175 m调节下降至145 m等不同的情况的有机组合,归纳总结出了10种典型计算工况及其相应的作用荷载,并根据稳定性系数 $F_s$ 值,提出了评价岸坡滑体稳定性的具体方法。

3) 以丰都名山滑坡为例,证明提出的作用于岸坡滑体上的力系、计算工况及其作用荷载、稳定性评价方法等是合理可行、有效适用的。

## 参考文献:

- [1] 乔建平,赵宇. 滑坡危险度区划研究述评. 山地学报, 2001, 19(2): 157-160.
- [2] 范文,俞茂宏,李同录,等. 层状岩体边坡变形破坏模式及滑坡稳定性数值分析[J]. 岩石力学与工程学报 2000, 19(增刊): 983-986.
- [3] 朱冬林,任光明,聂德新,等. 库水位变化下对水库滑坡稳定性影响的预测[J]. 水文地质工程, 2002(3): 6-7.
- [4] 王昌贤. 地质学基础[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1998.
- [5] 张学年,盛祝平,孙广忠,等. 长江三峡工程库区顺层岸坡研究[M]. 北京: 地震出版社, 1993.
- [6] 《岩土工程手册》编写委员会. 岩土工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.

(下转第140页)

[6] 张金峰,高崇林,齐占国.隧道围岩量测工法[J].东北公路,1997(4):83-87.

[7] 李俊法.歌乐山隧道主要施工技术问题的探讨[J].西部探矿工程,2001(4):84-85.

## Analyses of Rockmass Displacement of Jinyun Tunnel

TANG Jian-xin<sup>1</sup>, CAO Shi-ming<sup>1</sup>, LIU Hong-zhou<sup>1,2</sup>, DAI Gao-fei<sup>1</sup>

(1. College of Resource and Environment Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** As an example, through analyses of in-situ measurements of Jinyun Road Tunnel and considering the geological environment and construction technics synthetically, relation among rockmass displacement and geological tectonics, rockmass sort, horizontal displacement and vertical subsidence, a new concept "sensitivity of displacement" are presented in order to evaluate stability of displacement normally. The characteristic of distribution of rockmass displacement along the longitudinal direction of road tunnel related to geological tectonics is concluded. It can be used for reference of design, construction and research of road tunnel.

**Key words:** Road tunnel; Rockmass displacement; Sensitivity of displacement

(责任编辑 姚 飞)

(上接第 136 页)

## Analytical and Calculative Method of Stability of MingShan Landslide in the Three Gorges Reservoir Area

CHEN Ping<sup>1</sup>, XU Jiang<sup>1</sup>, LIU Yu-hong<sup>2</sup>, LI Ke-gang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for the Exploitation of Southwestern Resources & the Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. 208 Hydrogeology & Engineering geology Crew of Geological Prospecting Primary Company, Chongqing 400015, China)

**Abstract:** After the dam of the Three Gorges is built, the raising water will inevitably cause the revival of the part of ancient landslide and the generation of new landslide, which will influence the town development and traffic safety in the Three Gorges Reservoir Area. In the light of the specific conditions of the Three Gorges Reservoir Area, this paper, taking Fengdu's MingShan landslide in Chongqing for an example, has considered ten typical calculative projects, offered the correspondent load systems acting on the sliding mass and put forward the analytical and calculative method to evaluate the stability of a landslide. The ten typical calculative projects include dry season (natural state), raining season (rainstorm or rain for a long period of time), dry season and water level (175 m) of the reservoir, raining season and water level (175 m) of the reservoir, dry season and earthquake, raining season and earthquake, dry season and water level (175 m) of the reservoir and earthquake, raining season and water level (175 m) of the reservoir and earthquake, dry season and water level lowered from 175 m to 145 m, raining seasons and water level lowered from 175 m to 145 m, and so on.

**Key words:** landslide; stability; the Three Gorges Reservoir Area

(责任编辑 姚 飞)