

涉水库岸稳定性影响因素及敏感性分析

王浩 夏立权

(中兵勘察设计研究院,北京 100053)

【摘要】通过对长江三峡某地区库岸稳定性的影响因素分析,概括、总结了塌岸影响因素的类型和作用特点,并运用数值模拟对因素的影响程度进行了模拟分析,得出各因素的影响规律,并通过正交设计分析得到各因素的敏感性,为三峡库区类似地质条件的地质灾害治理提供了可靠依据。

【关键词】塌岸;影响因素;数值模拟;敏感性

【中图分类号】 TV 223

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2009.06.007

Influence Factors and Sensitivity Analysis of Stability for Bank Involved in Water

Wang Hao Xia Liqun

(China Ordnance Industry Survey Design&Research Institute, Beijing 100053,China)

【Abstract】 In this paper, the author analyzed the influence factors of bank ruin in the Three Gorges of the Yangtze River area and summarized the type and feature of the factors. And we analyzed the factors with the numerical simulation software to get the impact of various factors and the sensitivity with Orthogonal test. The production will provide the reliable basis for the Three Gorges area which has the similar geological condition.

【Key words】 bank ruin; influence factors; numerical simulation; sensitivity

0 引言

三峡水库蓄水以来,库区水位有了较大幅度的升高,在多个地段库岸诱发了塌岸、滑坡等地质灾害。为了保证三峡电站正常发电和库区人民生命财产安全,国家投入了大量人力和资金用以研究和治理三峡库岸,但仍有部分地区发生塌岸等地质灾害。据统计,仅三峡重庆库区就实施了二、三期地灾治理项目751个,总投资约76亿元。

本文以重庆三峡某地区库岸为例,分析影响库岸稳定性的主要因素,运用理正岩土软件对各因素的影响进行模拟计算,试图得出各影响因素的作用规律,并通过正交设计分析得到各因素的敏感性,为三峡库区的地质灾害治理提供可靠依据。

1 库岸情况

该库岸位于长江支流綦江左岸,地势呈南高北低,根据现场实际情况分为东和西两段(见图1)。

1.1 地形地貌

该库岸所在区域属剥蚀侵蚀地貌区。西段紧邻一居民区,分段长约200m,坡长约14.00~37.00m;

走向近东西。岸坡平面形态呈长条形,地形起伏较大,整体坡度角在30°左右,局部接近45°,纵剖面形态呈折线形。前缘分布高程186.50m,后缘分布高程199.50m,前后缘相对高差13.00m;东段位于公路外侧岸坡地带,分段长约450m,坡长约15.00~48.50m;走向近南北。岸坡平面形态呈长条形,纵剖面形态呈直线形,整体坡角约45°,局部接近60°。前缘分布高程186.50m,后缘分布高程207.00m,前后缘相对高差20.50m。

1.2 地层岩性

该库岸地层岩性相对简单,为一级阶地,阶地堆积物一般具二元结构,上层为人工填土和第四系全新统冲洪积粉质粘土,下层为粉砂和卵石层;阶地基岩为侏罗系中统沙溪庙组的灰—紫褐色砂岩和紫红—紫褐色泥岩。

2 库岸稳定性影响因素

对于不同类型的库岸,库岸影响因素也不相同。该库岸东段经分析库岸类型为岩土混合型库岸,其影响塌岸的因素可分为两大类:自然因素和人为因

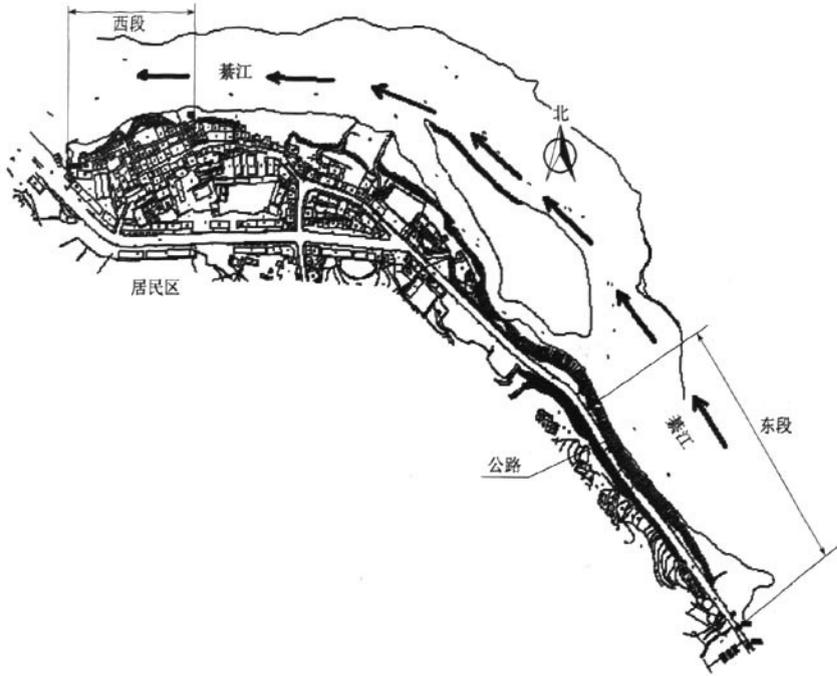


图1 库岸分布示意图

素^[1]。自然因素包括:①库岸的物质组成、结构;②库岸形态及地质构造条件;③降水作用;④库水位变化等^[2,3]。

在库岸稳定性分析中共有6种工况条件,具体见表1。在讨论各因对库岸稳定性的影响时,选择相应的工况进行对比分析。

表1 库岸稳定性分析采用的6种工况

| 水库运行水位 | 工况组合编号 | 荷载组合内容 |
|--------|--------|---|
| 静止水位 | 1 | 自重+地表荷载+常年洪水位(193.00 m) |
| | 2 | 自重+地表荷载+非汛期20年一遇洪水位(186.50 m)+非汛期20年一遇暴雨(q _枯) |
| | 3 | 自重+地表荷载+50年一遇洪水位(198.31 m)+20年一遇暴雨(q _全) |
| 水位降落 | 4 | 自重+地表荷载+非汛期20年一遇洪水位(186.50 m)降至非汛期常年洪水位(184.70 m) |
| | 5 | 自重+地表荷载+非汛期20年一遇洪水位降(186.50 m)至非汛期常年洪水位(184.70 m)+非汛期20年一遇暴雨(q _枯) |
| | 6 | 自重+地表荷载+50年一遇洪水位降(198.31 m)至常年洪水位(193.00 m)+20年一遇暴雨(q _全) |

在分析中采用的参数是由室内土工试验和现场大面积剪切试验所得。

2.1 自然因素

1) 库岸的物质组成、结构

组成库岸的岩土体的类型直接影响到塌岸的宽度和破坏方式。颗粒细小、孔隙度大的土体如人工填土、粉土和砂土等,在外力特别是降水和库水位涨落的作用下,容易产生范围较大的塌岸,且塌岸形成的时间也较短,危害性最大。对于物理力学性质较好的粘性土和由砂岩和泥岩等沉积岩风化形成的残坡积土体,在外力作用下塌岸的宽度相对较小,且时间也相对较长。而对于节理裂隙不发育,性质稳定的

中等风化沉积岩,在外力作用下不易形成塌岸^[4,5]。

对比不同类型岩土体,在分析库岸物质组成和结构对塌岸的影响过程中,根据东段4-4'剖面,采用同一形态的岸坡、三种不同类型的岩土体(分别是人工填土、粉质粘土和基岩),在工况3(自重+地表荷载+50年一遇洪水位(198.31 m)+20年一遇暴雨)条件下进行了深层土体圆弧滑动分析(见图2)。模拟选用参数和结果见表2,在相同岸坡形态的条件下,库岸稳定系数随着库岸岩土体的物理力学参数的加强,稳定系数相应提高,且基岩的稳定系数要远大于土体,说明基岩在这种条件下是相对稳定的,不会发生像土体一样的圆弧滑动。

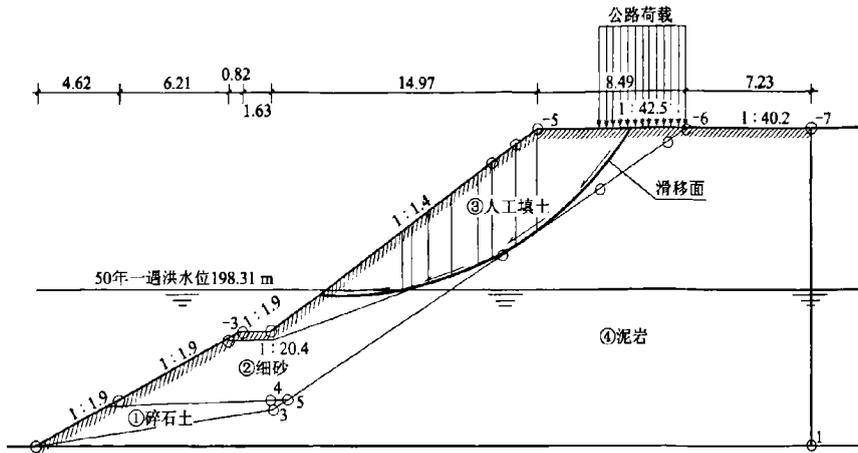


图2 库岸剖面图

表2 滑移型塌岸土体物理力学参数和模拟计算结果(安全系数为1.15)

| 土体类型 | 天然重度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$) | 饱和重度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$) | 粘聚力 c/kPa | 内摩擦角 $\varphi/(\circ)$ | 水下粘聚力 / kPa | 水下内摩擦角 / (\circ) | 稳定系数 | 剩余下滑力 / kN |
|----------------|--|--|-----------------------|---------------------------|-------------------------|-----------------------|-------|------------------------|
| 人工填土 (实际土体) | 19.5 | 20.5 | 12.0 | 25.0 | 8.0 | 15.0 | 1.032 | 149.30 |
| 粉质粘土 | 19.2 | 19.7 | 25.0 | 15.0 | 18.0 | 12.1 | 1.048 | 166.98 |
| 泥岩 | 25.0 | 24.0 | 120.0 | 50.0 | 100.0 | 35.0 | 5.120 | 0 |

2) 库岸形态及地质构造条件

库岸形态对于库岸稳定性有很大的影响。库岸在河水的侧蚀作用下,下部岩土体会发生破坏,甚至形成局部深槽,最终导致库岸上部失稳产生滑移型破坏。库岸坡面越陡,其下部经受河水侵蚀作用后形成的塌岸土体部分就越大。东段库岸为上陡下缓型库岸,整体坡角为 45° ,部分地段为 60° ,库岸前后缘高差近20m。这就造成此段岸库在发生滑移破坏时,参与塌岸的土体部分要明显多于坡度小的库岸,且滑移破坏范围也要更大。

库岸地质构造条件主要指库岸岩层产状与库岸形态之间的关系,可分为顺向坡、逆向坡和切向坡,就变形强度而言有顺向坡 $>$ 逆向坡 $>$ 切向坡的规律^[6]。东段岸坡类型为逆向坡,其对库岸稳定性的影响中等,岩层产状为 $172^\circ \angle 4^\circ$,模拟计算得出滑移破坏宽度为12.59~28.20m,与实际情况相符。

3) 降水作用

库岸的降水作用影响是指一定时间内的暴雨对岸坡稳定性的影响。大规模、持续时间长的暴雨对渗透系数较小、孔隙度大的岩土体(特别是人工填土)影响较大,雨水入渗土体后,使得土体由天然状态变为饱和状态,土体的物理力学性质发生变化,主要表现为重度增大,物理力学参数内摩擦角和抗剪

强度降低,从而导致库岸更易发生滑移型破坏。东段库岸在工况1(自重+地表荷载+常年洪水位(193.00m))的天然状态和20年一遇暴雨状态条件下模拟计算的稳定系数差别很大(见表3)。因此,降水作用对库岸稳定性的影响极大,特别是短时间内的大量降水极易造成库岸的突发性破坏。

表3 各剖面天然状态和暴雨状态的岸坡稳定性对比表

| 剖面号 | 滑移部分 土体类型 | 天然重度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$) | 暴雨状态 饱和重度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$) | 天然状态 稳定系数 | 暴雨状态 稳定系数 |
|--------|--------------|--|--|--------------|--------------|
| 4-4' | 人工填土 | 19.5 | 20.5 | 1.113 | 1.089 |
| B3-B3' | 人工填土 | 19.5 | 20.5 | 1.239 | 1.146 |
| 5-5' | 人工填土 | 19.5 | 20.5 | 1.236 | 1.139 |
| B4-B4' | 人工填土 | 19.5 | 20.5 | 1.205 | 1.126 |
| 6-6' | 人工填土 | 19.5 | 20.5 | 1.122 | 1.087 |
| B5-B5' | 人工填土 | 19.5 | 20.5 | 1.064 | 1.023 |

4) 库水位的变化

由于三峡库区蓄水发电的需要和雨季降水的影响,三峡库区的水位每年都要经历一个涨落的过程。在库水位变化的过程中,库岸的稳定性都会受到较大的影响。库水位在枯水期保持在一个较低的水平,在降雨和水库蓄水等的作用下,库水位将逐步升高,岸坡的地下水位也相应升高,使得部分土体由天然状态转为饱和状态,土体的物理力学参数降低^[7];

当库水位由洪水位降回枯水位时,库岸土体会形成地下水浸润线,产生相应的渗流压力,加上土体自身性质和孔隙水压力等的改变,库岸稳定性进一步降低,最终发生破坏(见图3)。

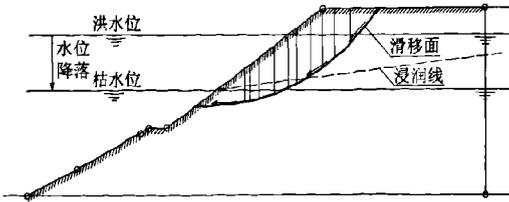


图3 库水位降落引起库岸地下水位变化

库水位变化的持续时间和速率直接对库岸地下水位的变幅也有影响,随之产生的渗流压力、静水压力也有一定的区别^[8]。在库水位相同变幅的情况下,快升或慢降对地下水水位的影响更大,也对库岸的稳定性更加不利。

库水位变化的过程一般是在汛期伴随着降水作用完成的,因此在暴雨的叠加作用下,库岸稳定性将受到更大的影响^[9]。根据东段库岸库水位变化和常年汛期的实际情况,将模拟的工况1(天然状态)和工况6(50年一遇洪水位降至常年洪水位+20年一遇暴雨)的结果进行对比分析发现,工况6的库岸稳定系数要明显小于工况1(见表4)。因此,库水位变化和降水的联合作用对于库岸稳定性有较大的影响。

表4 东段库岸工况1和工况6模拟计算稳定系数表

| 剖面号 | 工况1稳定系数 | 工况6稳定系数 |
|--------|---------|---------|
| 4-4' | 1.113 | 1.106 |
| 5-5' | 1.236 | 1.219 |
| B4-B4' | 1.205 | 1.191 |
| 6-6' | 1.122 | 1.099 |
| B5-B5' | 1.061 | 1.063 |

2.2 人为因素

人为因素是指由于人类活动对库岸造成的影响。人为因素种类很多,不同地区的表现形式也大不相同。根据现场实际调查,该库岸的人为影响主要表现在库岸上部的公路荷载和不合理堆填^[10]。

1) 公路荷载

将库岸近似看作涉水边坡,在其上部堆放荷载,将加大库岸土体发生滑坡破坏的可能性,对库岸的稳定性十分不利。公路荷载由于是车辆行驶造成的,是一种动荷载,因此不能简单以静荷载加以计算。根据现场实际观测计算,将东段库岸涉及的公路荷载定为120 kPa。在工况1的条件下,分别模拟

计算了有、无公路荷载两种情况下的库岸稳定系数,比较发现两者稳定系数相差较大,甚至部分剖面在有公路荷载处于基本稳定状态,而无公路荷载时处于稳定状态(见表5)。

表5 东段库岸工况1条件下公路荷载对稳定系数影响对比表

| 剖面号 | 稳定系数(安全系数为1.15) | |
|--------|-----------------|--------|
| | 不存在公路荷载 | 存在公路荷载 |
| 4-4' | 1.371 | 1.113 |
| B3-B3' | 1.759 | 1.239 |
| 5-5' | 1.354 | 1.236 |
| B4-B4' | 1.590 | 1.205 |
| 6-6' | 1.170 | 1.122 |
| B5-B5' | 1.583 | 1.064 |

2) 不合理堆载

对自然岸坡进行不合理的人为改造,会诱发岸坡失稳。将生活垃圾和建筑垃圾无规则的堆放在天然岸坡上,相当于对岸坡施加荷载,特别是其不经处理直接堆积在自然岸坡上形成杂填土,稳定性极差,若在其他不利因素的共同作用下,极易发生塌岸破坏。由于不合理排污形成的冲沟在库水位涨落和降水的联合作用下,也易发生边坡塌方。

3 各因素敏感性分析

利用正交设计对库岸影响因素进行敏感性分析,以得到各因素对库岸稳定性的影响程度。正交表选用 $L_{18}(3^7)$ 型,共选取七个因子,分别是:反应降水作用的土体重度参数(A);反应滑动面的粘聚力(B)和内摩擦角(C);反应外部水体变化的库水位变化参数(D)及反应人为作用的公路荷载参数(E);另两个为反应试验系统误差的空白列(1#和2#)。

土体参数参照5-5'剖面实际填土值,粘聚力(B)和内摩擦角(C)分别为实际值的±25%,库水位变化参数(D)选取三种不同的库水位可不同程度的覆盖滑动面(因子各水平参数见表6)。

为了充分考虑试验中的各类误差,在本次设计中选用正交试验的方差分析法,显著性水平选取 $\alpha=0.10$ 和 0.01 。如果 $F_{\alpha}^{\Delta} > F_{\alpha,0.1}^{\Delta} = 10.92$,则该因子影响高度显著; $F_{\alpha,0.1}^{\Delta} > F_{\alpha}^{\Delta} > F_{\alpha,0.10}^{\Delta}$,则该因子影响显著; $F_{\alpha,0.10}^{\Delta} > F_{\alpha}^{\Delta}$,则该因子影响不显著。

利用理正岩土软件对正交设计各方案进行计算,所得结果见表7。通过对结果的分析(见表8)可得出库水位变化参数和土体内摩擦角两因子对库岸稳定性有显著影响,而公路荷载、土体粘聚力影响较显著和土体重度参数影响不显著。

表6 因子水平表

| 水平 | 降水参数(A) | | 粘聚力(B) | | 内摩擦角(C) | | 库水位变化参数(D)/m | 公路荷载参数(E)/kPa |
|----|----------------------------|----------------------------|---------|-----------|----------|------------|--------------|---------------|
| | 天然重度/(kN·m ⁻³) | 饱和重度/(kN·m ⁻³) | 粘聚力/kPa | 水下粘聚力/kPa | 内摩擦角/(°) | 水下内摩擦角/(°) | | |
| 1 | 18.5 | 19.5 | 9.0 | 5.5 | 19.0 | 11.5 | 198.31 | 120 |
| 2 | 19.5 | 20.5 | 12.0 | 8.0 | 25.0 | 15.0 | 195.00 | 80 |
| 3 | 20.5 | 21.5 | 15.0 | 10.5 | 31.0 | 18.5 | 186.50 | 40 |

表7 正交设计方案和计算结果

| 方案 | A | B | 1 [#] | C | D | E | 2 [#] | F _s |
|----------------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|----------------|----------------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.831 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1.227 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1.930 |
| 4 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1.143 |
| 5 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1.737 |
| 6 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 0.967 |
| 7 | 3 | 1 | 2 | 3 | 3 | 2 | 3 | 1.643 |
| 8 | 3 | 2 | 3 | 1 | 1 | 3 | 1 | 0.886 |
| 9 | 3 | 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1.240 |
| 10 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1.345 |
| 11 | 1 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 | 1.346 |
| 12 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 | 1.117 |
| 13 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 | 1.123 |
| 14 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 | 1.010 |
| 15 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 | 1.713 |
| 16 | 3 | 1 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1.374 |
| 17 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1.162 |
| 18 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1.087 |
| K ₁ | 7.796 | 7.459 | 7.435 | 6.127 | 6.086 | 7.309 | 7.599 | |
| K ₂ | 7.693 | 7.368 | 7.934 | 7.814 | 7.052 | 8.057 | 7.277 | |
| K ₃ | 7.392 | 8.054 | 7.512 | 8.94 | 9.743 | 7.515 | 8.005 | |

表8 正交设计分析表

| 影响因素 | 平方和S | 自由度f | 均方和 \bar{S} | F-值 | 显著性 |
|-----------------------|----------|------|---------------|-------|-----|
| 降水参数(A [△]) | 0.01469 | 2 | 0.007345 | | |
| 粘聚力(B) | 0.046272 | 2 | 0.023136 | 1.67 | |
| 内摩擦角(C) | 0.668156 | 2 | 0.334078 | 24.12 | ★★ |
| 库水位变化参数(D) | 1.197127 | 2 | 0.598563 | 43.21 | ★★ |
| 外路荷载参数(E) | 0.049761 | 2 | 0.024881 | 1.80 | |
| e | 0.068418 | 4 | 0.017104 | | |
| e [△] | 0.083108 | 6 | 0.013851 | | |

注: F_{0.10}(2,6)=3.46 F_{0.01}(2,6)=10.92

库水位变化所形成的渗流压力及淘蚀作用对于库岸稳定性的影响最大。因此,禁止对库水位以下岸坡的破坏和对高水位期敏感地段的监测显得尤为重要。此外,土体物理力学参数中内摩擦角的影响要大于粘聚力和土体重度,由于填土的此类参数是通过大面积剪切试验得出的,因此,在类似条件下要

加强原位测试的准确性,特别是饱和状态下测试过程的准确性,以得到更加符合实际情况的参数合理评价库岸稳定性。

4 结论

1)影响库岸稳定性的主要因素,为自然因素和人为因素两种,探讨了各影响因素的作用机理。

2)运用正交设计方法和边坡计算软件对各种因素的影响程度进行了模拟分析,得出了不同因子水平的库岸稳定系数。

3)结合各因子作用机理和正交试验结果,得出库水位变化和土体内摩擦角对库岸稳定性影响显著,属于敏感性较强的因子,并对该因子涉及的试验和取值问题提出了建议。

参考文献

[1] 张年学,盛祝平,孙广忠,等. 长江三峡库区顺层岸坡研究[M]. 北京:地震出版社,1993.

[2] 张苏民,张旷成. 滑坡稳定性验算中几个问题的探讨[J]. 岩土工程技术,2008,22(6):271-276.

[3] 李 晓,张年学,廖秋林,等. 库水位涨落与降雨联合作用下滑坡地下水动力场分析[J]. 岩土力学与工程学报,2004 23(21):3714-3720.

[4] 宋 岳,段世委,陈文书,等. 官厅水库塌岸影响因素分析[J]. 水利水电工程设计,2004,23(1):34-37.

[5] 孙东晖,刘建磊. 三峡库区土门子滑坡变形破坏机制分析[J]. 岩土工程技术,2008,22(5):267-270.

[6] 能道焜. 四川宣汉天台滑坡的变形位移特征及形成机理[J]. 岩土工程技术,2008,22(4):198-202.

[7] 王志旺,杨 健,张保军,等. 水库库岸滑坡稳定性研究[J]. 岩土力学,2004,25(11):1837-1840.

[8] 时卫民,郑颖人. 库水位下降情况下滑坡的稳定性分析[J]. 水利学报,2004(3):76-80.

[9] 邵 江,许吉亮. 一种断层影响基岩滑坡的失稳机理和稳定性分析[J]. 岩土工程技术,2008,22(6):299-303.

[10] 程江涛,刘 莉. 基于Verhuist模型的滑坡位移预测研究及其程序化实现[J]. 岩土工程技术,2008,22(5):217-222.