

# 许卡滑坡的影响因素及其稳定性分析

古彦超<sup>1</sup>, 崔亚昆<sup>2</sup>

(1. 长安大学公路学院, 西安 710064; 2. 成都理工大学环境与土木工程学院, 成都 610059)

**摘要:**滑坡作为一种常见地质灾害,会给人们的生活和经济带来很大的危害。结合地质勘察资料及室内实验成果,分析及总结影响滑坡稳定的因素,并通过钻孔和探槽等勘探手段确定深部滑动面位置,对滑坡的稳定性进行计算,了解目前滑坡体的稳定状态。针对处于不稳定状态的滑坡体,提出滑坡危害的防治措施,旨在为滑坡的防治以及类似工程中滑坡的稳定性评价提供理论指导。

**关键词:**滑坡;稳定性分析;防治措施

**中图分类号:**P642.22

**文献标志码:**A

## 引言

滑坡是斜坡的岩土沿着某一破坏面(或软弱面)整体向下滑动的现象,是一种常见的不良地质现象,常会给经济和生活带来巨大的危害<sup>[1-3]</sup>。很多滑坡现象是由人为因素造成的,与人类的工程活动息息相关。滑坡既有自然属性,又有社会、经济及环境等属性。随着经济的快速发展、城市化进程的不断加快,滑坡及其危害问题日益突出<sup>[4-5]</sup>。甘洛县南接美姑、越西,西与石棉为邻,北与汉源相望,有凉山北大门之称,许卡滑坡一旦滑坡发生,将威胁到当地多人生命财产安全,以及部分耕地和林地损失,潜在经济损失在360万元以上。因此,对许卡滑坡的影响因素及稳定性进行分析具有重要的意义。

## 1 工程概况

胜利乡麦地村星光组许卡滑坡位于四川省凉山彝族自治州甘洛县,地理位置:东经102°43'15.4",北纬29°02'45.73"。该滑坡两侧以剪切裂缝为界,后缘以长大拉陷错落位置为界,前缘为通村公路上方与居民区相交陡坎处。滑坡宽约140 m,长约130 m,平均厚约5.5 m,总体积约8.16万m<sup>3</sup>。许卡滑坡处于中-低山地貌区,根据勘查区所在的位置判断,该滑坡位于一个斜坡体上,

斜坡体东北高西南低,自东北向西南倾斜特征,地形坡度15°-22°,后侧较陡,斜坡体后缘和中下部有多处、不连续的基岩出露。斜坡坡向190°-210°,岩层产状300°∠5°。由于滑坡新近有明显变形破坏,边界清晰明确。居民区主要集中在滑体的下部,中后部斜坡主要用于农业耕地,另外,有一条碎石乡村公路由滑坡前缘外侧穿过。

## 2 滑坡的影响因素及变形破坏机制

许卡滑坡现阶段变形主要表现在中上部多处陷落裂缝、错台和两侧剪切裂缝、开挖陡坎处微张变形以及中下部居民区房屋、地面开裂。从现场调查与分析,影响灾害体稳定的因素主要有5个方面:

(1) 坡体结构:斜坡地表物质较松散,使得雨水、地表水易于大量入渗,增加坡体自重,并破坏土体结构。而下部泥岩及砂岩隔水效果较好,能形成相对隔水层,加之表层岩体相当破碎,岩体中节理裂隙发育,易在基覆面附近形成软弱面。

(2) 地形地貌:滑坡所处斜坡高度约50 m,平均宽度近70 m,长度接近于65 m,平均坡度15°-22°,后部斜坡坡度可达25°以上,这种地形较陡、汇水面广的斜坡地形地貌条件,加剧斜坡不稳定性,可导致滑坡的形成。

(3) 水的因素:降雨是影响坡体稳定的自然因素中

收稿日期:2014-10-28

作者简介:古彦超(1988-),男,河南南阳人,硕士生,主要从事岩土与隧道工程方面的研究,(E-mail)285618582@qq.com

最经常发生和最活跃的因素,是滑坡的重要触发因素。地表水的影响主要除降雨汇集的地表水外,还包括滑坡体上居民农耕灌溉用水。一方面由于坡体表面排水不畅,造成局部低洼地带形成积水,直接浸泡表层土层,使得土体自重增加,增大下滑力;另一方面由于表层土体物质结构松散,孔隙度大,雨水入渗充满裂隙或空隙时,形成静水压力;当出现水头差时,形成动水压力,由于水的作用,急剧改变岩土体的受力情况;再者,由于雨水渗入,弱化岩体,泥化软化滑带导致粘着力降低。这些都造成滑面的抗剪强度降低,甚至完全丧失抗剪能力,导致坡体失稳,从而形成滑坡。

(4)地震因素:地震是导致滑坡生成的重要因素。在 2008 年“5·12”汶川地震和 2013 年“4·20”芦山地震中,甘洛县也产生强烈震感,该滑坡在地震中坡体发生剧烈晃动,造成后缘裂缝增大,中后部局部出现垮塌、错台,房屋裂缝扩增。

(5)人类工程活动:在勘查区范围内及附近,人类工程经济活动包括开挖建房、农田耕作。开挖建房多位于公路上侧滑坡体上,对滑坡体前缘卸荷效益明显,促使临空面附近土体受压膨胀变形,在开挖线附近形成次级滑面。并且农田耕作位于滑坡中部位置,使得土地台阶化,促进了地表水的入渗。人类工程经济活动对地质环境的影响与改变较强,是构成影响该滑坡稳定性的重要条件。

综合分析许卡滑坡形成的各种影响因素,其中地层岩性、地形地貌和地质构造组成是其内在影响因素,而强降雨(连续降雨)、开挖加载是造成该坡体破坏的主要因素。从变形破坏机制看,在降雨情况下,雨水汇集,造成堆土段自重增加,在水压力作用影响下,土体下滑力迅速增大,坡体出现变形迹象,导致坡体失稳,从而形成滑坡。滑坡整体表现为坡体在雨水、开挖等加载作用下,挤压下部产生变形,总体呈现后侧强烈,前侧缓缓的推移式破坏特征。

### 3 滑坡稳定性计算

#### 3.1 综合分析

综合勘查现场特征,许卡滑坡坡体结构为小型土质推移式滑坡,滑坡主滑段为沿着基覆界面滑动,通过勘察资料对滑坡形成机制进行分析,并通过钻孔和探槽等勘探工作对深部滑动面位置进行确定后,对滑坡的稳定性进行计算。计算主要包括以下三个部分:

(1)对许卡滑坡覆盖层整体滑动的可能性、规模及稳定性进行计算(按勘探剖面 1-1'、2-2'、3-3'进行计算)。

(2)针对居民区后部坡度较陡、多处错台垮塌,对勘

探剖面 1-1'、2-2'、3-3'的次级滑动面的稳定性进行计算(次级滑面后缘为错台裂缝,房屋后部开挖陡坎处作为剪出口,进行自动搜索最不稳定潜在滑面,进行滑坡中后部稳定性计算)。

(3)针对滑坡左侧中上部土体蠕滑,造成房屋墙体下沉变形和水泥地面开裂,对该处房屋次级滑坡进行自动搜索最不稳定潜在滑面,进行局部稳定性计算,计算剖面为 6-6'剖面。

#### 3.2 计算模型与工况

##### 3.2.1 计算模型的选取

根据现场工程地质测绘结果以及钻探剖面揭示,计算模型主要选取许卡滑坡 1-1'剖面、2-2'剖面、3-3'剖面及 6-6'剖面(图 1-图 4)进行。本次稳定性计算主要以验算滑坡整体稳定性为主,其中,(为滑体,土的成分主要为粉质粘土夹碎石;(为滑带;(为基岩,主要是成分为砂岩。

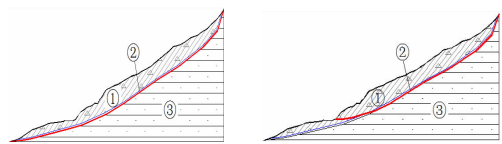


图 1 1-1'剖面整体与上部次级滑坡计算模型图

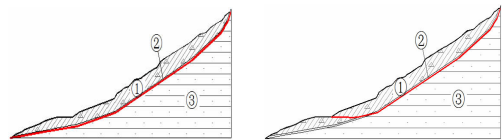


图 2 2-2'剖面整体与上部次级滑坡计算模型图

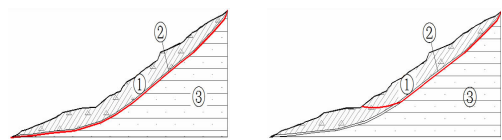


图 3 3-3'剖面整体与上部次级滑坡计算模型图

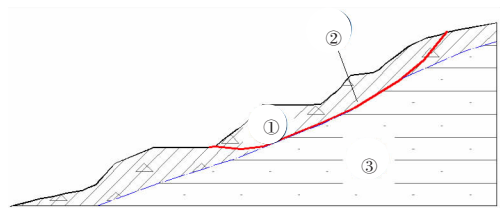


图 4 6-6'剖面次级滑坡计算模型图

##### 3.2.2 安全等级确定及设计安全系数

根据《滑坡防治工程设计与施工技术规范》的相关规定,许卡滑坡防治工程等级为Ⅲ级,暴雨强度重现期按 50 年设计,地震工况校核。相应设计荷载组合见表

1. 地震基本烈度调整为Ⅶ度。

表1 防治工程设计荷载组合及设计安全系数

工况类型	工况编号	荷载组合	最小安全系数
设计工况	工况Ⅰ	自重	1.15
	工况Ⅱ	自重+暴雨	1.05
校核工况	工况Ⅲ	自重+地震	1.05

### 3.3 计算方法与参数选取

#### 3.3.1 计算公式选取

根据现场工程地质测绘结果以及钻探剖面揭示,许卡滑坡后缘出现了较明显的下错,前缘出现明显的膨胀和墙体裂缝,其前缘剪出口位于居民房前,滑面形状为折线形,根据现场地质判断,本次稳定性计算分析主要以此为依据进行(图5),计算目的主要验证现状滑坡整体的稳定性。计算采用理正软件进行计算。

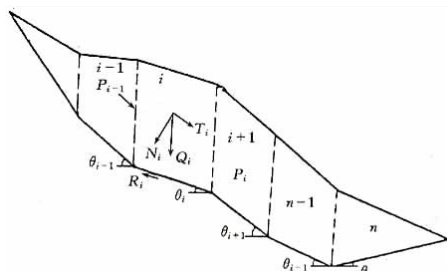


图5 折线型法计算图

折线型滑动稳定性系数计算:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (R_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} (T_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + T_n}$$

$$\psi_j = \cos(\theta_i - \theta_{i+1}) - \sin(\theta_i - \theta_{i+1}) \tan \varphi_{i+1}$$

$$\prod_{j=i}^{n-1} \psi_j = \psi_i \cdot \psi_{i+1} \cdot \psi_{i+2} \cdots \psi_{n-1}$$

$$R_i = N_i \tan \varphi_i + c_i l_i$$

$$T_i = W_i \sin \theta_i + P_{wi} \cos(\alpha_i - \theta_i) + Q_i \cos \theta_i$$

$$N_i = W_i \cos \theta_i + P_{wi} \sin(\alpha_i - \theta_i) - Q_i \sin \theta_i$$

$$W_i = V_{iu} \gamma + V_{id} \gamma' + F_i$$

$$P_{wi} = \gamma_w i V_{id}$$

$$i = \sin \alpha_i$$

$$Q_i = 0.25 K_H W_i$$

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

式中:

- $F_s$ —滑坡稳定性系数;  $\psi_i$ —传递系数;
- $R_i$ —第  $i$  计算条块滑体抗滑力(kN/m);
- $T_i$ —第  $i$  计算条块滑体下滑力(kN/m);
- $N_i$ —第  $i$  计算条块滑体在滑动面法线上的反力(kN/m);
- $C_i$ —第  $i$  计算条块滑动面上岩土体的粘结强度标准

值(kPa);

$\varphi_i$ —第  $i$  计算条块滑带土的内摩擦角标准值( $^\circ$ );

$l_i$ —第  $i$  计算条块滑动面长度(m);

$\theta_i$ —第  $i$  计算条块底面倾角( $^\circ$ );

$\alpha_i$ —第  $i$  计算条块地下水流线平均倾角,取浸润线与滑面倾角平均值( $^\circ$ );

$W_i$ —第  $i$  计算条块自重与建筑等地面荷载之和(kN/m);

$P_{wi}$ —第  $i$  计算条块单位宽度的渗透压力,作用方向倾角为  $\alpha_i$  (kN/m);

$V_{iu}$ —第  $i$  计算条块单位宽度岩土体的浸润线以上体积( $m^3/m$ );

$V_{id}$ —第  $i$  计算条块单位宽度岩土体的浸润线以下体积( $m^3/m$ );

$\gamma'$ —岩土体的浮容重( $kN/m^3$ );

$\gamma_{sat}$ —岩土体的饱和容重( $kN/m^3$ );

$F_i$ —第  $i$  计算条块所受地面荷载(kN);

$Q_i$ —第  $i$  计算条块所受地震力(kN/m)。

#### 3.3.2 计算参数选取

##### (1) 重度选择

根据现场和室内试验资料结果,确定滑坡稳定性和滑坡推力计算中所采用的重度值为:

土体的天然重度  $\gamma = 19.50 \text{ kN/m}^3$  (现场大重度试验)

土体的饱和重度  $\gamma_w = 20.10 \text{ kN/m}^3$  (室内土工试验)

砂岩的天然重度  $\gamma = 22.30 \text{ kN/m}^3$  (室内岩石试验)

砂岩体的饱和重度  $\gamma_w = 24.20 \text{ kN/m}^3$  (室内岩石试验)

##### (2) 土体抗剪强度参数( $c, \varphi$ 值)

本次室内实验结果,由于取样的代表性及分析测试的误差,土体  $c, \varphi$  值与传统值存在误差,因此本段滑坡分析主要以类比、反演方式确定相关参数。

##### ① 类比分析结果

根据甘洛县地勘勘察报告,薄层含碎块石粉质粘土滑坡土体抗剪强度参数取值见表2。

表2 土体类比抗剪强度参数值

滑坡名称	天然抗剪强度		饱和抗剪强度	
	C/kPa	$\Phi/^\circ$	C/kPa	$\Phi/^\circ$
地勘勘察报告	13.2	17.5	10.2	13.1

##### ② 实验取值

取样方法采取干钻取芯,并及时用封口胶包裹、上蜡密封,贴好标签,妥善保存于阴凉干燥处及时送检,采样数量和质量均满足要求。实验取值主要通过一系列现场实验和室内实验获得,现场通过环刀法对粉质粘土夹碎石的天然密度进行测量,基岩岩块的密度通过容积换算法获得,通过公式换算获得粉质粘土夹碎石和基岩

岩块的饱和密度。采用室内直剪实验获得基岩岩块和粉质粘土夹碎石的  $c$  和  $\varphi$  值见表 3。

表 3 计算参数试验值

岩土类型	$\gamma/(\text{kN/m}^3)$		$c/\text{kPa}$		$\varphi/^\circ$	
	天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和
滑体(粉质粘土夹碎石)	19.50	20.10	19.33	16.10	9.00	11.28
基岩(砂岩)	23.50	24.80	4410	2950	49.67	44.19

③ 反演分析

以滑坡体 2-2'剖面(上部)作为反演分析剖面,该次级滑坡在 2013 年 7 月暴雨期间发生后部滑体垮塌下坐,滑坡中部房屋变形,以稳定性接近临界状态,暴雨工况下稳定性系数取接近 1.0(0.998)进行参数反演分析。

根据《滑坡防治工程勘查规范》(DZ/T 0218—2006)第 12.3.2 条可知,滑带土抗剪强度参数反演计算(给定内聚力  $c$  反求  $\varphi$  值):

$$\varphi = \arctan \frac{F \sum W_i \sin \alpha_i - cL}{\sum W_i \cos \alpha_i}$$

式中:

- $F$ —稳定性系数;
- $W_i$ —第  $i$  计算条块自重;
- $P$ —地面动载荷( $\text{kN/m}$ );
- $c$ —滑带土内聚力( $\text{kPa}$ );
- $\varphi$ —滑带土内摩擦角( $^\circ$ );
- $L$ —滑动面长度( $\text{m}$ );
- $\alpha_i$ —第  $i$  条块滑面倾角( $^\circ$ ),反倾时取负值。

(3) 综合取值

对于许卡滑坡岩土体物理力学指标,在类比参考周边其他项目勘察报告中相关参数以及经验数据取值的基础上,结合 2-2'剖面反演分析结果,基岩参数选取以试验值为准,覆盖层和滑体天然重度参数选用现场大重度试验成果,其余参数选取反演分析成果,参数选取综合确定见表 4。

表 4 计算参数选取

岩土类型	$\gamma/(\text{kN/m}^3)$		$c/\text{kPa}$		$\varphi/^\circ$	
	天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和
滑体(粉质粘土夹碎石)	19.50	20.10	14.50	12.40	19.10	15.80
基覆面滑体(粉质粘土夹碎石)	19.50	20.10	12.80	11.20	17.10	13.70
基岩(砂岩)岩体	22.30	24.20	450	320	38.50	33.60

3.4 滑坡稳定性计算与结果分析

3.4.1 评价标准

根据《滑坡防治工程勘查规范》(DZ/T0218-2006)和《滑坡防治工程设计与施工技术规范》(DZ0240-

2004),滑坡稳定性状态按稳定系数分四级。

(1) 滑坡稳定状态根据滑坡稳定系数确定(表 5)。

表 5 滑坡稳定状态划分

滑坡稳定系数 $F_s$	$F_s < 1.00$	$1.00 \leq F_s < 1.05$	$1.05 \leq F_s < F_{st}$	$F_s \geq F_{st}$
滑坡稳定状态	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

注: $F_{st}$ 为安全系数(防治工程级别为Ⅲ级时,暴雨强度重现期  $N$  按 50 年设计,地震工况校核,工况 1、工况 2、工况 3 最小安全系数分别为 1.15、1.05、1.05)。

(2) 当某一工况条件下滑坡稳定系数大于或等于安全系数时,滑坡在该工况下的稳定性视为满足要求。

3.4.2 滑坡稳定性评价

采用理正软件进行计算,对许卡滑坡剖面 1-1'、2-2'和 3-3'进行滑坡整体稳定性计算,并进行主探勘剖面上部次级滑动剖面稳定性和左侧房屋上部土体 6-6'剖面稳定性计算,计算结果及稳定状态评价见表 6。

表 6 剖面整体稳定性计算表

剖面	工况	稳定系数	稳定状态
1-1'剖面整体	工况 1(自重)	1.169	稳定
	工况 2(自重+暴雨)	1.045	欠稳定
	工况 3(自重+地震)	1.102	基本稳定
1-1'剖面上部	工况 1(自重)	1.146	基本稳定
	工况 2(自重+暴雨)	1.004	欠稳定
	工况 3(自重+地震)	1.077	基本稳定
2-2'剖面整体	工况 1(自重)	1.175	稳定
	工况 2(自重+暴雨)	1.054	基本稳定
	工况 3(自重+地震)	1.087	基本稳定
2-2'剖面上部	工况 1(自重)	1.156	稳定
	工况 2(自重+暴雨)	0.998	不稳定
	工况 3(自重+地震)	1.042	欠稳定
3-3'剖面整体	工况 1(自重)	1.219	稳定
	工况 2(自重+暴雨)	1.047	欠稳定
	工况 3(自重+地震)	1.122	基本稳定
3-3'剖面上部	工况 1(自重)	1.184	稳定
	工况 2(自重+暴雨)	1.014	欠稳定
	工况 3(自重+地震)	1.088	基本稳定
6-6'剖面	工况 1(自重)	1.225	稳定
	工况 2(自重+暴雨)	1.027	欠稳定
	工况 3(自重+地震)	1.106	基本稳定

表 6 结果与滑坡现状的变形特征基本吻合,滑坡在工况 2(自重+暴雨)条件下无论是整体还是上部滑体稳定性均较差,因此,须采取措施进行防治,且暴雨因素为许卡滑坡目前发展变形最主要的影响因素。

4 滑坡的防治措施

根据勘查结果,在分析滑坡机理和进行滑坡稳定性计算评价的基础上,提出“抗滑桩+裂缝夯填”结合的综合治理方案<sup>[6-10]</sup>。抗滑桩拟布置在居民密集区后部,坡体开挖陡坎处;另一排抗滑桩布置于滑坡左侧居民后部陡坎处,防治滑坡局部的变形破坏;同时对滑坡中后部

裂缝进行封填,防止裂缝进一步扩展造成降雨下渗。

在滑坡治理工程正式实施之前,建议当地政府及主管部门对滑坡体采取以下应急措施:

(1)严禁在滑坡及其周边区域(尤其是滑坡前缘)进行各种不利于滑坡体稳定的取土、耕作、开挖等活动。

(2)严禁开展对滑坡体加载的活动,如在滑坡上种植增大滑体风荷载的高大树种,限制在滑坡上布设增加滑体风荷载的物品;对滑坡体上的建筑活动应严格限制。

(3)对滑坡实施长期的动态监测,在雨季和雨雪连绵时段,必须进一步加强对滑坡的监测,派专人加强对滑坡前缘、陡坎、后壁、裂缝、地下水出露等情况的巡查,发现异常及时通知当地居民、行人紧急避险。

(4)制定切实可行的地质灾害防治管理措施,加强对滑坡的管理。

## 5 结论

(1)查明了滑坡变形的形成机制和稳定性影响因素,斜坡地表物质较松散,主要为粉质粘土夹碎块石,土体渗透性好。尤其是2013年7月连续高强度暴雨对于滑坡体的稳定性造成了不利影响,加剧了其滑动变形。

(2)滑坡目前变形迹象比较明显,后缘下错、拉裂缝增多、中后部垮塌下错、中部房屋变形明显。从变形破坏机制看,前期表现为坡体在雨水、地震等加载作用下,挤压下部产生变形,形成上部变形强烈下部逐缓的典型推移式滑动。目前滑坡正处于蠕滑变形阶段。

(3)滑坡稳定性评价采用了折线法对可能的潜在滑动面进行稳定性计算与评价,以最不利的沿岩土界面产生折线型滑动为滑动面,经计算,滑坡整体在天然工况

下处于基本稳定状态,暴雨工况和地震工况下处于欠(临界)稳定或不稳定状态。滑坡一旦失稳,将危及到滑坡体中下部居民生命财产安全。因此,对该滑坡采取一定的工程措施是紧迫且必要的。

## 参考文献:

- [1] 胡俊杰,邓荣贵.峨眉九里滑坡形成机理及滑坡稳定性研究[J].路基工程,2014(1):84-94.
- [2] 王鼎,王兰民.河谷地区黄土地震滑坡特征与影响因素分析[J].岩土工程学报,2013,35(1):434-438.
- [3] 谷天峰,王家鼎,王念秦.吕梁机场黄土滑坡特征及其三维稳定性分析[J].岩土力学,2013,34(7):2009-2016.
- [4] 殷跃平.汶川八级地震地质灾害研究[J].工程地质学报,2008,16(4):433-444.
- [5] 陶国新,洪文之.滑坡对宁果公路的危害及防治对策[J].水文地质工程地质,1995(5):29-31.
- [6] 裴来政,葛永刚,周小军,等.震后次生山地灾害对山区道路的危害及防治体系[J].西南科技大学学报,2010,25(4):44-48.
- [7] 崔鹏,韦方强,陈晓清.汶川地震次生山地灾害及其减灾对策[J].中国科学院院报,2008,23(4):317-323.
- [8] Thompson G E.Porous anodic alumina: fabrication, characterization and applications[J].Thin solid films,1997,297(1):192-201.
- [9] 殷坤龙.滑坡灾害预测预报[M].武汉:中国地质大学出版社,2004.
- [10] 鲁聪,汪刚,侯国强.碎石土滑坡变形机理及稳定性分析[J].路基工程,2014(2):15-23.

## Analysis of Influencing Factors and Stability of Xuka Landslide

GU Yanchao<sup>1</sup>, CUI Yakun<sup>2</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** As a common geological disaster, landslide will bring great harm to people's lives and the economy. Combined with Geological survey data and the results of laboratory experiments, the factors influencing landslide stability are analysed and summarized, and the position of deep sliding surface is determined by some exploration methods such as drilling and trenching, the stability of landslide is calculated, and the current state of landslide stability can be understood. In connection with landslide of unstable state, some prevention measures about landslide hazard are put forward, which aims to provide theoretical guidance for landslide prevention and landslide stability evaluation of similar engineering.

**Key words:** landslide; stability analysis; prevention measures