

某公路滑坡成因机制及稳定性

黄 达¹, 裴向军², 张志刚³, 张永兴¹

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045 2. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059
3. 煤炭科学总院重庆研究院, 重庆 400037)

摘 要: 对某公路滑坡的变形特征、成因机制及稳定性进行了详细研究, 并提出了相应的防治措施。研究表明: 此滑坡为推移式滑坡, 坡体的地形及物质组成是滑坡发生的地质基础, 大量的降雨是滑坡发生的主要诱发因素; 滑坡在自然状态下是稳定的, 而在暴雨和地震工况下不稳定; 此滑坡防治应以加强排水措施为主, 并在前缘修筑挡墙, 同时加强监测。查明滑坡的变形特征及成因机制是滑坡灾害评价和防治的基础, 研究思路及其成果可供类似滑坡稳定性分析及灾害防治参考。

关键词: 推移式滑坡; 变形特征; 成因机制; 稳定性; 防治措施

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

中国是亚洲乃至世界上滑坡灾害最为严重的地区之一, 特别是 20 世纪 80 年代以来, 随着经济建设的恢复与高速发展及自然因素的影响, 滑坡灾害呈逐年加重趋势, 而且很多滑坡规模大、机制复杂、危害大。尤其以西部地区的云南、贵州、四川、重庆、西藏以及湖北西部、湖南西部、陕西、宁夏及甘肃等省区最为严重。1995 年以来, 滑坡造成的年均死亡人数已连续多年超过 1 000 人, 严重的滑坡灾害不仅给当地居民生命财产造成极大损失, 还摧毁相当数量的工厂和矿山, 并严重影响铁路、公路、水运及水电站等基础设施的安全运营^[1-4]。

雅砻江左岸一级支沟羊房沟的南侧谷坡中上部, 锦屏水电站对外交通公路腊窝乡段 (K48+550~K49+000) 上下两侧约 500 m 范围内发生 3 处斜坡变形: 公路上方的 1[#] 滑坡, 不稳定斜坡和公路下方的 2[#] 滑坡。这一险情威胁到冕宁县里庄区腊窝乡麻哈村五组村民的生命和财产安全, 同时影响到对外交通公路的安全施工和运行。查明滑坡的变形特征及成因机制是滑坡灾害评价和防治的基础, 本

文对潜在危害性最为严重的公路路堤下方的 2[#] 滑坡的变形特征、成因机制、稳定性评价及防治措施进行了较系统的研究。

1 滑坡体基本特征

1.1 滑坡区基本工程地质条件

滑坡区的自然斜坡为一宽缓的山脊, 在滑坡区的 NE 和 NW 侧的上下游边界处为两条自然冲沟 (图 1)。斜坡在纵剖面上为上陡、中缓、下陡的阶梯状, 斜坡上部地形坡度为 30°~50°, 中部为 0°~18°, 下部为 30°~55°, 图 2 为滑坡主滑动方向的工程地质剖面图。

坡体下伏基岩为灰黑色薄~中厚层泥炭质板岩, 弱风化, 局部强风化, 岩层产状一般为 N59°W/NE∠37°。滑坡体物质组成主要为坡残积块碎石土, 呈灰色, 厚为 3~10 m, 滑坡体中上段堆积体较厚, 前缘部分相对较薄, 块碎石母岩以大理岩和板岩为主, 块石粒径 15~30 cm, 含量 5%~10%, 碎石粒

收稿日期 (Received date): 2008-01-04; 改回日期 (Accepted): 2008-04-05.

基金项目 (Foundation item): 国家杰出青年科学基金资助项目 (50625824), 重庆大学人才引进基金资助。[Funds of nation exinious youth (50625824) and Chongqing University for introducing into person with ability inburses]

作者简介 (Biography): 黄达 (1976-), 男, 博士, 讲师, 重庆大学土木工程博士后流动站在站博士后, 主要从事岩土体稳定性评价及其灾害防治方面的教学和科研工作。[Da Huang (1976-), male, Dr. Lecturer, a post doctor in civil engineering of Chongqing university, mostly teach and study on stability of geotechnique and geohazard prevention. E-mail: hdcq@yahoo.com.cn or hdcq@126.com]

径 5~15 cm, 含量 10%~20%, 堆积体的表层块碎石含量较深部相对较多, 深部堆积体明显较表层密实, 平均天然密度约 21.1 g/cm^3 。

地下水主要为第四纪孔隙水和基岩裂隙水, 上部 Q_4 堆积体属孔隙含水层, 基岩裂隙主要赋存于板岩层理面及节理裂隙中, 现场调查没有发现基岩地层有裂隙水渗出。

1.2 滑坡形态及变形特征

1.2.1 滑坡范围、规模及形态特征

滑坡后缘位于村民房屋开裂处, 侧边界沿两侧冲沟发育, 现场没有发现明显的前缘剪出口, 但从滑坡地形及前方堆石挡墙的局部鼓胀现象, 可以判定滑坡体前缘为平缓地段上方的堆石挡墙处, 滑坡为上覆堆积体滑坡, 其变形机制为推移式滑坡, 滑坡体在平面呈“马蹄形”, 宽约 45 m, 顺坡向长约 62 m, 平均厚度约 6 m, 约 $1.7 \times 10^4\text{ m}^3$, 滑坡主滑方向方位角为 15° 。图 1 为滑坡区全景照片, 图中标出了滑坡边界及主要的变形部位。

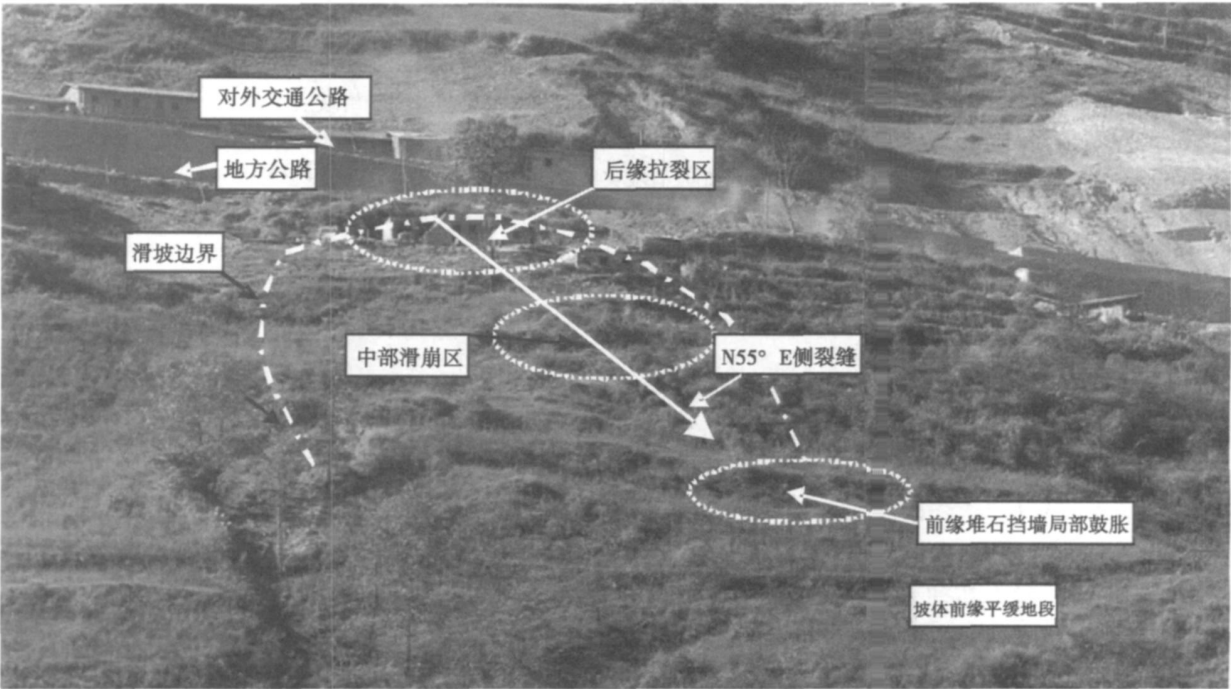


图 1 滑坡边界及主要变形分布照片

Fig.1 Photo of boundary and landslide primary deformation distribution of landslide

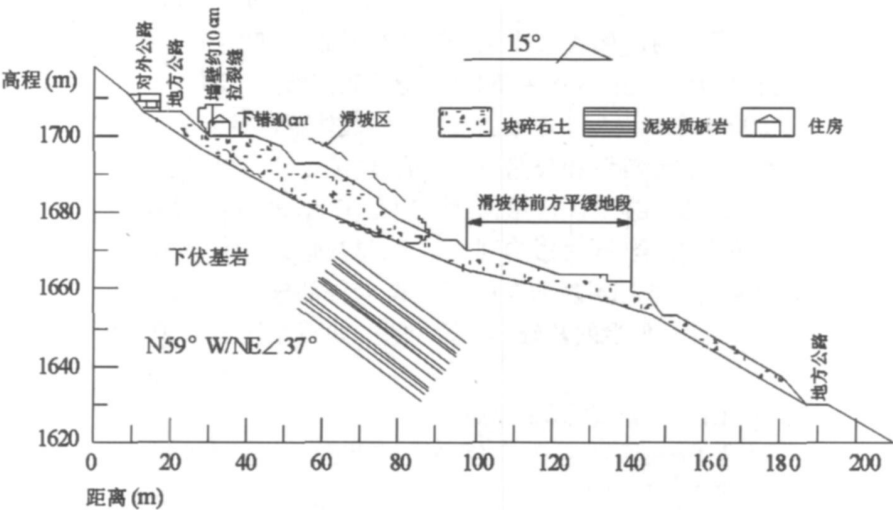


图 2 滑坡主滑方向工程地质剖面图



a- 后缘民房滑塌下错



b- NE侧羽状侧裂缝



c- 中部的局部滑塌

图 3 滑坡体主要变形迹象照片

Fig 3 Photos of primary deformation evidence of landslide

1.2.2 滑坡变形特征

滑坡体的后缘变形明显, 农房出现约 10 cm 宽的拉裂缝, NE侧的一间水泥砖砌民房已经倒塌, 房屋前方平台已经明显滑塌下错, 最大错距约 40 cm, 错后裂缝张开约 1~5 cm (图 3a); 滑坡体 NE 侧的中上部可发现走向为 $N40^{\circ}E$ 的羽裂状裂缝, 裂缝宽约 1~3 cm, 可见深度约 5~10 cm (图 3b), NW 侧的中下部可见走向为 $N55^{\circ}E$ 的裂缝, 裂缝呈间断出现, 总长约 6 m, 宽约 1~5 mm; 在滑坡的中部有一顺坡向长约 12 m, 宽约 6 m, 厚约 5 m, 方量约 $300 m^3$ 的局部滑塌 (图 3c); 滑坡体前缘没有明显剪出口, 但前缘约 2.5 m 高的堆石挡墙出现了局部的鼓胀变形现象。

2 滑坡成因

2.1 地形地貌因素

宽缓的山脊并在两侧均有冲沟存在, 而且山脊随两侧冲沟水流冲刷下切而更加凸出, 形成了一个典型的滑坡微地貌^[5] (见图 1所示)。斜坡在纵剖面呈现陡→缓→陡的阶梯状, 中部的平缓地段及平缓段上端的堆石挡墙陡坎正好提供了滑坡剪出的地形条件 (见图 1所示)。滑坡体上方微地貌近“簸箕”状, “簸箕周边” (两条公路) 高程相对较低, 形成了很好的汇水条件, 地表水正好汇集于滑坡体后方, 现场调查发现地方公路路面下方有一较深的水流冲沟 (图 4)。

2.2 坡体物质组成因素

由于滑坡体表层块碎石含量较深部相对较多, 堆积体深部较表层密实, 地表水较易渗透进入坡体并在坡体一定深度形成一个透水性相对较弱的隔水层, 致使一定深度内土体含水量较高^[6]。



图 4 滑坡体后方冲沟照片

Fig 4 Photo of gully behind landslide

2.3 降雨因素

滑坡区降雨具有两个特点: 1. 降雨集中。降雨主要集中在 5 至 10 月, 尤以 6~9 月更为集中, 这四个月的降雨量占全年总量的 79%, 多年平均雨日 153.8 d, 5~9 月占全年降水日数的 67.6%。2. 降雨季节降雨量较大。据气象资料统计, 多年平均降水量为 1 139.6 mm, 最大年降水量为 1 420.7 mm, 最小年降水量为 928.3 mm。

大量的降雨、不利的微地貌和特殊的坡体物质



图 5 滑坡体上渗水

Fig 5 Saturated soils on the landslide

组成使得地表水容易汇集和渗透,致使坡体一定深度处于饱水状态。图 5 为滑坡体表层渗水照片。

2.4 人类活动因素

目前区内主要人类工程活动为在建的锦屏电站对外交通公路、乡村公路、农耕及农户居住等。

交通公路路堤高约 5 m,路基宽 8.5 m,路面宽 7.5 m,水泥混凝土路面,路堤及路基填筑为就地取的块碎石土,重力式挡墙为 M10 水泥砂浆砌石墙。按照图 6 的边坡开挖及路堤填筑施工设计图,可以计算出路堤修筑的加载量。计算时开挖土体重度为 21.12 kN/m^3 ,挡墙重度为 26 kN/m^3 ,填筑的路堤土体重度 23 kN/m^3 ,水泥混凝土重度 25 kN/m^3 。计算出单位(1 m)长度开挖和填筑重量分别为:开挖土体重量约 42.43 t,填筑重量约 67.39 t。因此公路修筑在单位长度上增加重量约 24.96 t。现场调查表明:在建的公路和其下方的乡村公路均未出现变形现象,说明现今的滑坡体位于交通公路路堤下方,路堤加载没有作用在滑坡体上,而且路堤加载量不大,对滑坡稳定性影响相对较小。

公路施工用水及滑坡体后缘居住农户的生活用水的排放量不大,但对滑坡具有促进作用;滑坡体的东侧有一块耕地,这种开垦种植有利于地表水的下渗。人类活动最为显著的影响是滑坡体上方的两条公路改变了地表水的汇流路径,使得滑坡体后方形成一个集中汇水区。

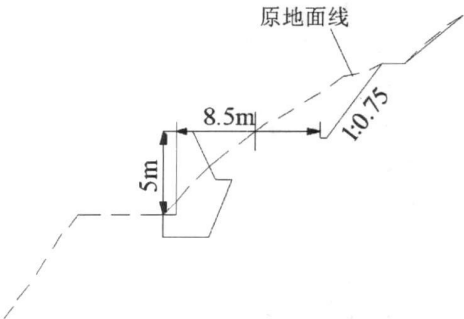


图 6 滑坡体上方公路施工剖面图

Fig. 6 Construction profile of road upside landslide

2.5 综合分析

上述的各滑坡因素分析说明:坡体的地形及物质组成特征是滑坡发生的地质基础,大量降雨是滑坡的主要诱发因素,施工及生活用水的不适当排放是滑坡的促进因素,而上方的公路路堤加载对滑坡稳定性影响很小。据当地居民反映,滑坡附近没有施工单位居住,只有施工搅拌机排水,而且搅拌机已

撤离现场近半年时间,这种施工排水量是不足以造成滑坡的,但其排出的水量使得斜坡堆积体较长时期处于一种较高的含水状态,致使堆积体的力学特性有所降低,到暴雨时期,使得堆积体处于饱水状态,力学参数急剧降低,致使坡体失稳。

3 数值模拟及稳定性分析

3.1 数值模拟分析

为了进一步了解斜坡的变形规律,运用大型岩土数值分析软件 FLAC 对其进行了模拟分析。

计算选取滑坡主滑方向剖面,见图 2 所示。边界条件均采用法向位移约束。岩土体物理力学参数见表 1 所示。

1 岩体的物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of the rock mass

岩土体	密度 (kg/m^3)	变形模量 (GPa)	抗拉强度 (kPa)	凝聚力 (kPa)	摩擦角 ($^\circ$)	泊松比
堆积层	2 100	0.46	40	10	24	0.35
基岩	2 600	5.00	1 000	120	42	0.25
路基	2 700	30.00	3 200	2 700	55	0.20

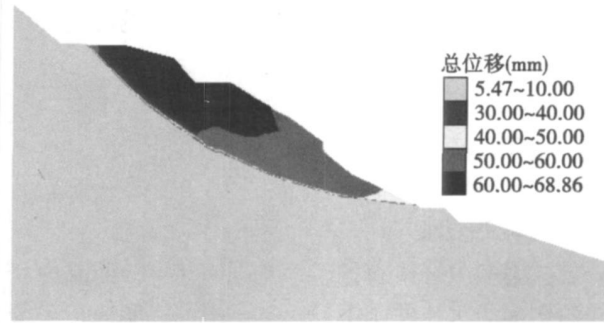


图 7 斜坡总位移等值线云图

Fig. 7 Contour of total displacement of slope

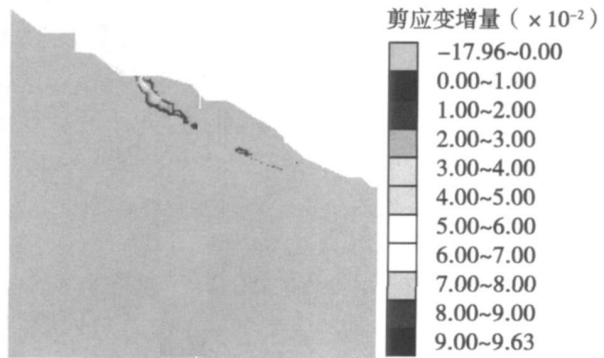


图 8 斜坡剪应变增量云图

Fig. 8 Contour of shear strain increment of slope

从图 7 斜坡总位移等值线云图可以看出, 边坡变形与前面工程地质分析得出的结论基本一致, 滑坡体的变形是从后缘到前缘逐渐减小的, 说明滑坡为推移式滑坡变形。

从图 8 的剪应变增量变化图可以看出, 滑坡体后缘剪应变增量较大, 这与推移式滑坡机理一致, 而且与滑坡现场的后缘拉裂变形吻合。

3.2 稳定性计算

采用边坡稳定性计算软件 GeoSlope 进行稳定性计算。根据滑坡变形方向, 选取沿滑坡主方向 N15°E 剖面。为了解交通公路修建是否对斜坡稳定有一定的影响, 对现今地形 (见图 2) 和交通公路开挖前原地形剖面分别进行计算, 并进行对比分析。

岩土体物理力学参数与表 1 一致。当考虑暴雨工况时: 饱水堆积层重度 22 kN/m³、c 取 8kPa φ 取 23°。

根据边坡的地质环境条件, 拟定如下三种计算工况: 工况 1(天然状态): 仅考虑边坡岩土体的自重作用, 计算时采用天然状态下的 c 、 φ 值, 地下水位以上采用坡体的天然容重, 地下水位以下采用坡体的饱水容重; 工况 2(天然 + 地震): 在工况 1 的基础上, 考虑地震的影响。场区地震基本烈度为 VI 度, 设计设防地震烈度为 VII 度, 水平地震系数为 0.2, 垂直地震系数为 0.1; 工况 3(暴雨): 在工况 1 的基础上, 考虑持续降雨的情况。按这三种工况, 从后缘拉裂缝点分别进行斜坡最危险滑面搜索并计算其稳定性。

表 2 稳定性计算结果

Table 2 Calculation result of stability of landslide

剖面	计算方法	计算工况		
		工况 1	工况 2	工况 1
原地形	一般条分法	1. 127	0. 754	0. 938
	毕肖普法	1. 203	0. 811	0. 974
	简布法	1. 160	0. 769	0. 952
	M - P 法	1. 203	0. 816	0. 985
	平均值	1. 173	0. 788	0. 962
现地形	一般条分法	1. 065	0. 702	0. 916
	毕肖普法	1. 105	0. 736	0. 980
	简布法	1. 081	0. 711	0. 944
	M - P 法	1. 118	0. 751	0. 981
	平均值	1. 092	0. 725	0. 955

图 9 为最危险滑面搜索结果, 从图中可以看出, 滑坡体的前缘剪出口位于斜坡中部平缓地段上方堆石挡墙附近。表 2 的稳定性计算结果表明: 滑坡体在天然状况下是稳定的, 在暴雨和天然情况下均会失稳。对外交通公路堤加载后, 滑坡体稳定性系数有所降低, 但这并不是斜坡失稳的主要原因。

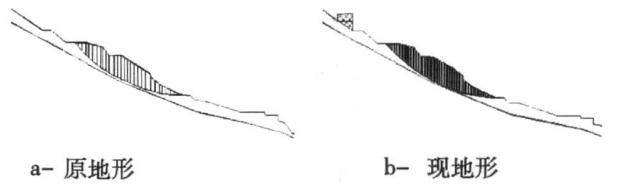


图 9 最危险滑面搜索结果

Fig 9 Searching results of most hazardous sliding plane

4 滑坡防治措施

前面的滑坡成因及稳定性分析表明, 降雨是诱发此滑坡的主要因素。由于此滑坡可能引起交通安全运行和滑坡体下方村民的财产及生命安全, 因此我们提出以下防治措施。

- 1. 加强监测。设立人工观测, 特别是暴雨时期。在滑坡体的中部及前缘部位埋设测斜仪。
- 2. 加强排水措施。合理的排水措施是治理该滑坡的关键。在滑坡体上方建排水沟, 截断上部地表水流, 同时充填后缘拉裂隙, 防治地表水继续下渗。
- 3. 修筑挡墙。在滑坡体前缘修筑混凝土或石砌挡墙, 且挡墙内多设排水孔。

5 结论

滑坡灾害防治, 只有在查清了滑坡成因或变形机制的基础上, 才能很好地进行防治设计。本文对锦屏电站对外交通公路路堤下方某一滑坡的成因机制及稳定性进行了详细的分析, 并提出相应的防治对策, 得出如下结论:

- 1. 此滑坡是多种因素共同作用的结果: 地形及滑坡体的物质组成特征是滑坡的地质基础, 大量降雨是滑坡的诱发因素, 施工及生活用水的不适当排放是滑坡的促进因素;
- 2. 此滑坡为推移式滑坡变形机制。滑坡体在天然状态下是稳定的, 而在暴雨或地震工况下将会失稳;

3. 此滑坡防治应以加强排水措施为主, 并在前缘修筑挡墙, 同时加强监测。

参考文献 (References)

- [1] Hunag Runqiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th Century [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(3): 434~454 [黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制 [J]. 岩石力学与工程学报, 26(3): 434~454]
- [2] Duan Yonghou. Geohazard present situation, development tendencies and countermeasures in western China [J]. *Review of Economic Research*, 2000 58(2): 12~18 [段永侯. 中国西部地质灾害现状、趋势和对策 [J]. 经济研究参考, 2000 58(2): 12~18]
- [3] Jiang Chengsong. Geohazard present situation and its prevention measure in China [J]. *Chinese Geology*, 2000 (4): 3~5. [蒋承崧. 中国地质灾害的现状与防治工作 [J]. 中国地质, 2000, (4): 3~5]
- [4] Yin Yueping. A review and vision of geological hazards in China [J]. *Scientific and Technological Management of Land and Resources*, 2001, 18(3): 26~29 [殷跃平. 中国地质灾害减灾回顾与展望 [J]. 国土资源科技管理, 2001, 18(3): 26~29]
- [5] Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian, Wang Lansheng. Principles of Engineering Geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994 308~338 [张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理 [M]. 北京: 地质出版社, 1994 308~338]
- [6] Tian Bin, Tong Fuguo, Dai Huichao. Stability analysis of Gushu Bao landslide in Qingjiang River with nonlinear finite element method during rainfall [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005 24(Suppl. 2): 5301~5307 [田斌, 童富果, 戴会超. 降雨条件下清江古树包滑坡体稳定性有限元分析, 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增 2): 5301~5307]

Study on the Formation Mechanism and Stability of a Landslide of a Highway

HUANG Da¹, PEI Xiangjun², ZHANG Zhigang³, ZHANG Yongxing¹

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

3. Chongqing Branch, China Coal Research Institute, Chongqing 400037, China)

Abstract The landslides are most primary geo-hazards of a mountainous area in China. In this paper, the deformation characteristics, formation mechanism and stability of a landslide of a highway are researched in detail, and measures of prevention and cure are put forward. The researches show: the landslide belongs to thrust load caused landslide; the landform and material buildup is geological conditions of the landslide; and abundant rainfall is primary induction factor of the landslide; the landslide is stable under nature conditions, but not stable under rainstorm or earthquake conditions; the measures of prevention and cure of the landslide give priority to drainages, and retaining wall on foreland of the landslide is built, and monitoring measures are enhanced. It is base of landslide hazards appraisal and prevention that deformation characteristics and formation mechanism of landslide are found out; the research ideas and findings can be referred when the stability and preventions of similar landslide are investigated.

Key words thrust load caused landslide; deformation characteristics; formation mechanism; stability; measures of prevention and controlling