

209 国道许家湾滑坡的成因及治理对策

张季如^{1, 2}, 李明海³, 尹光辉²

(1. 武汉大学土木工程学院, 湖北 武汉 430070; 2. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070;

3. 湖北省恩施自治州公路管理局, 湖北 恩施 445000)

摘 要: 结合许家湾滑坡灾害点的地质背景资料和现场勘察结果, 从滑坡区的地貌、区域地质构造、地层岩性、土壤特性、水文地质特征以及人类工程活动等方面分析滑坡成因机制。指出同向多层次结构的边坡类型、山高坡陡及地表水汇集走廊的地貌特征、发育多组密集节理的区域地质构造、软硬互层的地层岩性、土体的残余强度特性等是滑坡形成的内因; 而人为削坡、强降雨和破坏植被营造水耕梯田等人类活动所造成的流水浸蚀, 是滑坡形成的诱发因子。基于滑坡稳定性的定量计算, 确定了采用抗滑挡土墙、格构式地梁和垫梁组成抗滑系统, 并布置了由树枝笼渗沟构成的排水系统等工程治理措施。现场监测结果表明滑坡治理措施卓有成效。

关键词: 许家湾滑坡; 成因分析; 稳定性计算; 工程治理;

中图分类号: P642. 22

文献标识码: A

209 国道许家湾滑坡(K 1971+656~696)由 1988 年改建时开挖路堑形成, 公路由坡脚处改从斜坡中部通过, 将自然斜坡分为上下两部分。经历 1989 年 6~8 月的雨季后, 下部斜坡(路崖一侧)基本稳定, 上部斜坡土体开始下滑, 地形突变部位首先下陷和产生多条张裂缝, 与路线方向成 30°延伸, 裂缝长 20~40 m, 宽 100~300 mm, 下错位移 300 mm, 可探得裂缝深度 3~4 m。持续降雨数周后, 局部土体坍塌并堆积于公路一侧。此后虽多次修筑挡土墙加固, 但并未有效缓解下滑趋势。据统计在 1990 年底竣工通车后的 5 a 时间里, 斜坡坍塌多次, 滑体体积累计达 12 660 m³, 致使挡土墙严重破坏, 路基变形阻断交通¹⁾。根据 1998 年雨季后的现场复核, 滑坡仍在继续活动, 给正常交通运输带来严重威胁。因此, 有必要对许家湾滑坡的成因和稳定性进行分析评价, 并制定相应的治理措施。

1 地质背景

滑坡区地处鄂西南山区宣恩盆地, 四周地势 SE

高、NW 低, 最高峰位于 SE 向海拔约 1 750 m 的观音山, 最低点在 NE 向海拔约 400 m 的勇洞河下游。山脉走向沿 NE—SW 向展开, 河谷深切, 呈构造剥蚀岩溶、构造侵蚀中—低山地貌景观。

滑坡区内气候温和湿润, 四季分明, 年平均气温 16℃左右, 谷地与山峰之间温差较大, 垂直变化明显。6、7、8 月为雨季, 降水量约占年降水量 1456 mm 的 41%。受地质构造与地形地貌控制, 区内发育枝状水系, 主要河流有牛草河和勇洞河。勇洞河由南向北横贯滑坡区, 汇集区内大气降水和地下水泄入清江。

滑坡区地层全区分布志留系(S)、石炭系(C)、二迭系(P)和三迭系(T), 局部出露奥陶系(O)和白垩系(K)。第四系(Q)零星分布于低洼地带, 岩性以坡、残积粘土为主, 含岩屑碎石块, 厚度变化大。

滑坡区位于新华厦系湘黔边境褶皱带北端, 由于受长阳 EW 向构造的影响, 构造线方向往东偏转。具体表现为一系列 NE 向褶皱和压扭性断裂, 及其与之直交或斜交的张扭性或扭性断裂。断裂平面分

收稿日期(Received date): 2002—09—20; 改回日期(Accepted): 2002—12—18。

基金项目(Foundation item): 交通部科技攻关项目(85—02—11)资助。[Supported by the key project of Communication Ministry]

作者简介(Biography): 张季如(1964—), 男(汉族), 湖南溆浦人。2002 年在武汉理工大学土木工程与建筑学院获博士学位, 现为武汉理工大学副教授, 从事环境岩土工程和工程地质等教学和科研工作。TEL: 027—87651786, E-mail: zhangjr@public.wh.hb.cn

[Dr. ZHANG Ji—ru (1964—), from Xupu Hunan province, Associate prof. in Wuhan University of Technology]

1) 209 国道许家湾滑坡工程地质勘察报告。湖北省第二地质大队, 1995。

©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

布大致平行, NE 向延伸, 褶皱轴向 35° 。背斜核部出露 S 系, 向斜核部为 T 系, 翼部岩层倾角 30° , 向核部倾角变陡。

滑坡区共出露 S 系、T 系巴东组一段(T_2b^1)和 T 系巴东组三段(T_2b^3)三个隔水层组。含水层组为溶洞裂隙、裂隙溶洞和基岩裂隙三种类型, 以碳酸盐岩溶含水层为主, 其次为基岩裂隙含水层。以注入式补给为主, 渗入式补给为辅, 因而决定了地下水具有动态变化大, 受降水控制显著的特点。地下水埋藏在彼此独立的岩溶管道和裂隙通道中, 大部分为无压自流水, 局部具有承压水特征。储水空隙即为径流通道, 在断裂带、岩相变化带、向斜盆地和褶皱轴部形成富水带, 以暗河、溶洞泉形式集中排泄, 汇入河谷排入清江。该区的地震基本烈度为 V 度。

2 滑坡体概况

滑体平面近似腰果状, 长 116 m, 宽 44.3 m, 表面呈阶梯状, 滑体下部呈折线状, 垂直厚度 1~9 m, 计算表明滑体总体积 32240m^3 。滑体后缘以滑坡壁为界, 前缘以公路挡土墙为界, 两侧以局部浅切冲沟为界, 物探显示冲沟为基岩裂隙并充水的界线。滑体后缘的滑坡壁高 0.1~0.2 m, 因滑动位移差异形成略向后倾斜的三个错动平台, 致使第三台阶上的树木产生倾斜。后由人工填塞错动裂缝, 整平台阶。

滑体后缘开始破裂的地方, 延伸平面呈直线形, 延伸总长 10 m 左右, 裂开宽度 100 mm, 滑体下错位 0.1~0.2 m。滑体后缘东南角上可见 2 条张裂缝, 呈不规则波浪形, 近似与坡面平行延伸, 断续分布, 缝宽 2~8 mm, 延伸长 5~8 m。滑体地表可见 4 条张裂缝, 平面呈弧形和直线形, 延伸长 10~60 m, 裂缝宽 100~150 mm, 可见深度 0.2~0.65 m, 此外, 据物探成果推测有 13 条 NW—SE 及 NE—SW 向裂缝。NW—SE 向裂缝与滑动方向一致, 延伸长 20~110 m; NE—SW 向裂缝宽 20~120 m, 延伸方向近似同斜坡面走向, 横切整个滑体。两组裂缝分布于地形变化处, 并与基底构造节理方向相同。由于受挡土墙的作用, 滑体前缘挤压形成 18 条扇状张裂缝, 裂缝宽 5~100 mm, 呈锯齿状。

3 滑坡成因分析

3.1 地貌特征

滑体西部为一条近 20° 走向山脊, 为局部地表分水岭, 最高处位于北端山顶, 高程近 800 m, 向东呈单面斜坡($30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 走向, 倾向 $120^{\circ}\sim 130^{\circ}$), 接东部坡脚处浅切冲沟, 最低高程 661 m, 相对高差 139 m。斜坡在 NE 向接坡立谷, 谷接陡崖。坡面由西向东呈直线状接阶梯状边坡, 边坡结构类型为同向多层结构, 构成了土体良好的前临空面, 对产生顺层滑动有利, 因而边坡结构类型不利于斜坡稳定。此外, 地形在滑体南为一条 60° 转 130° 的山梁, 北为一条 50° 转 120° 的山梁, 二者构成了滑体表面的局部分水线, 致使在滑体中部形成了一个地表面流汇集带, 水流的排泄通道为 2 条近 100° 走向线切冲沟, 恰与滑体南北两侧边线吻合, 向滑体外排泄汇入坡立谷中。因此, 斜坡上陡下缓的地貌条件, 为滑坡发生提供了较高的势能, 决定了滑体处于地表面流的汇集排泄通道上, 地表面流对滑体具有冲蚀作用, 水流下渗后增加土体自重和软化土体, 同时携带陡坡部位的残坡积土沉积于坡度较缓的部位, 加大滑体的荷载而导致滑坡。

3.2 区域地质构造

滑坡构造位置处于宣恩紧闭向斜 NW 翼近轴部位置, 向斜轴向约 45° , 延伸长 20 km, 核部地层为 T_2b^3 泥岩和砂岩层; 两翼地层为 T_2b^2 灰岩层、 T_2b^1 泥岩和砂岩层。翼部岩层产状 $\angle 30^{\circ}$, 倾向分别为 NW 和 SE。滑体表层出露 Q^{del} 残坡积土(I 层), 下伏基岩(II 层)为单斜岩层构造, 产状 $130^{\circ}\sim 140^{\circ}\angle 50^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 。基岩层中发育多组构造节理, 产状 $25^{\circ}\angle 13^{\circ}$ 和 $225^{\circ}\angle 85^{\circ}$, 延伸长度 3 m。多组节理将岩层切割为棱形块体, 局部构造节理密集, 致使岩层切割为碎裂状, 这就很容易发生滑坡。

3.3 地层岩性

滑坡体表层(I 层)的残坡积土为紫红色含砂粒和碎石的粘土, 土石比 7:3, 碎石粒径 8~12 cm, 稍湿、可塑—硬塑状态, 中压缩性, 分布于整个滑坡区。II 层为 T_2b^1 紫红色粉砂质泥岩、泥岩与紫红色泥质粉砂岩互层, 依据风化程度划分为强风化(II_1)、中风化(II_2)和微风化(II_3)层。由于 I、II 层差异风化, 结果使软弱的粘土层与下部岩层界面成为吸水层和相对隔水层, 容易发育成滑动面而发生残坡积土层滑坡。上层粘土在干湿交替下出现大量裂隙, 整体性遭到破坏, 成为滑动面之上的滑坡体, 而下部相对致密坚硬的岩层成为滑坡的基底(滑床)。软硬互层的地层一旦层面倾斜, 极易发生顺层面的土体

滑坡。

3.4 土壤特性

残坡积土干时坚硬开裂,湿时软弱,表现出一定的裂隙粘性土特征。从残坡积土在排水条件下反复直剪试验结果来看,其应力应变关系属加工软化型。即随着剪切变形的增加,残坡积土的抗剪强度增大到峰值强度,随后降至残余强度值,粘聚力下降较大。与峰值强度相比,残余强度的内摩擦角降低 2° ,粘聚力下降41.7%。据钻孔资料分析,土样在擦痕面上的粘土颗粒沿滑动方向呈定向排列,并发现擦痕面上的抗剪强度与残余强度接近。因此,对这种残余强度现象可解释为沿剪切面两侧有一层薄层细颗粒的结构排列,由原来的非空间性随着剪应变的增加而逐渐转化为沿剪切方向定向性,抗剪强度随之降低。

残余强度特性对边坡的稳定性有很大影响。由于斜坡中沿滑动面剪应变的发展不是各处均衡,往往在滑动面上某些点发生较大的剪应变,而在其它地方剪应变发挥还较小,造成沿滑动面上剪应力分布亦不均匀,滑动面上各点不可能同时发生破坏。但由于该层粘土具有明显的残余强度特征,则在大剪应变处,土体的剪应力达到峰值强度,破坏首先在这些点发生。随着剪应变加大,这些点的强度降低,从而带动滑动面上其它点也相继达到破坏后强度又降低,因此,斜坡的破坏过程是从点逐渐发展起来的。现场监测结果验证了上述分析结论,由于残坡积土的强度变化极大,雨时降低,旱时上升,滑体时滑时停缓慢移动,表现出渐进性破坏特征,最后经过一定的时间,导致斜坡突然坍塌,并在暴雨季节坍塌的现象十分突出。

3.5 水文地质特征

滑坡南侧坡立谷排泄浅层基岩裂隙水,形成季节性溪沟,主要的排泄点为一间歇性泉水,流量0.45 L/s,动态不稳定,旱季连晴10~15 d枯竭,故滑坡北侧裂隙水不会流入滑坡区内;南侧受分水线阻隔,侧向径流补给也是微弱的。滑坡四周无稳定水源,主要的补给源为大气降水。由于斜坡后缘及分水岭处为第四系土层,厚度较薄,不足以阻止降水的下渗补给基岩裂隙水,且滑坡在地表产生的张裂缝,破坏了表层隔水层的完整性,地表面流注入式补给地下水,以致在下部滑坡前舌地带出露间歇性泉眼,流量0.08 L/s。

地下水径流方向受地形与裂缝及基底构造裂隙

控制,大体由NW向SE方向径流。与主滑方向基本一致,径流通道为基岩裂隙与裂缝,径流距离短。地下水特点为就地补给就地排泄,受降水强度的影响极大。因此,虽然滑坡区地下水仅有基岩表层风化裂隙水,储量小,且依延伸较好的构造裂隙进行贯通,但降水渗入量充沛时,仍具有一定的潜蚀作用,尤其是I、II土层之间透水性差异明显,地下水沿接触面的活动相对强烈,加剧了斜坡沿该界面的滑动。

3.6 人类工程活动

公路改建时由原坡脚处改从斜坡中部通过,采取大规模机械化施工方法,挖掘宽度15 m,深度达2~3 m,将自然斜坡分为上下两段。结果是上段斜坡的坡脚开挖成垂直的临空面,改变了斜坡自然平衡条件,滑坡体失去下部支承是导致滑坡的诱发因子。这一结论可从下段斜坡稳定性尚好得到验证。这种大面积铲除和破坏滑坡体前缘地表植被的施工方法,以及滑坡体后缘的林木被毁改作水耕梯田,植被破坏严重,也是形成滑坡的触发因素。在雨季,上坡较大的集水面源源不断地灌溉中、下部的梯田。一旦地表开裂,地表水就随着裂隙渗入地下,一直下渗到岩土界面上,使滑动面成为富水层,加剧了滑坡的活动并促发山体滑坡。

4 滑坡治理对策

4.1 稳定性计算与评价

许家湾滑坡类型为浅—中层牵引式土质滑坡,规模中等。滑动面为第I、II土层的界面,滑动面呈折线状。根据滑动面的倾斜方向,将土体分为下滑段与阻滑段。依据滑动面的形状,在滑体主断面上将滑坡分为A1、A2、A3和A4共四个计算段,其中A1为滑坡后缘至ZK2钻孔,A2为ZK2至ZK1段,A3为ZK1至ZK3段,A4为ZK5至滑体前缘(图1)。

综合室内试验成果,滑坡稳定性计算中的滑动面抗剪强度参数为 $c=18.2\text{ kPa}$, $\varphi=13.8^{\circ}$ 。采用多种方法评价斜坡稳定性^[1],并利用有限元方法模拟斜坡在开挖过程中的稳定性状况^[2]。其中采用剩余推力法计算的结果表明,A3、A4段滑动最为显著,A1、A2段受前缘滑动的牵引,整个滑体稳定安全系数 $K=1.04$,可见目前滑坡处不稳定状态。考虑安全系数 $K=1.25$,计算得出作用于下部挡土墙上的剩余下滑力为414.1 kN/m,作为抗滑工程的

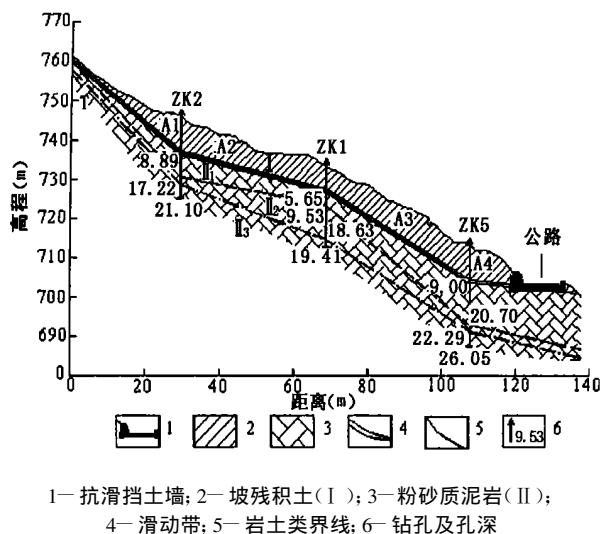


图1 滑坡体主断面图

Fig. 1 The main profile of Xujiawan landslide (A—A)

设计依据。

4.2 支挡系统

从许家湾滑坡区地形地貌特征、地下水活动特点来看,地貌条件相对简单,含水层比较单一,地下水类型属浅层构造,风化裂隙水量小,补给源主要是大气降水,因此,滑坡治理的施工时间尽可能避开雨季。山区石材资源丰富,按照因地制宜的方针,支挡方案考虑选择石砌挡土墙。抗滑系统采用挡土墙、格构式地梁和垫梁组合共同平衡下滑力,由计算下

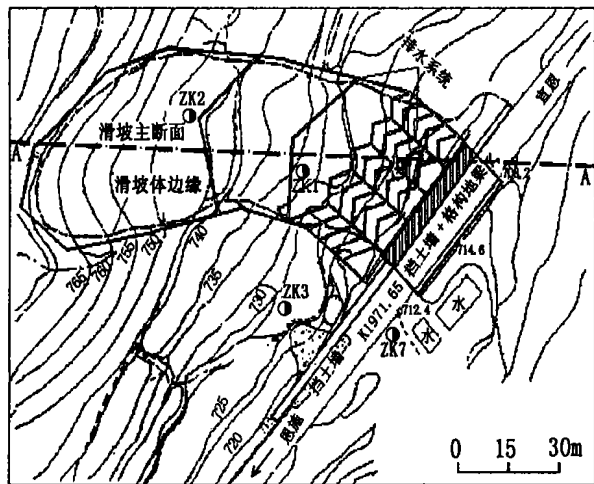


图2 滑坡工程治理设计平面图

Fig. 2 Plane map of the treatment design for Xujiawan landslide

滑力确定挡土墙截面尺寸。由于滑坡形态是不规则的三维几何体,最大下滑力是按滑坡主断面计算的,显然挡土墙各截面均按最大下滑力设计是不经济

的。距离主断面两侧越远,下滑力越小,挡土墙截面尺寸就越小。若定义某断面计算下滑力与最大下滑力的比值为该处挡土墙截面面积的递减系数,计算结果表明,该系数随距主断面的距离线性减小^[3]。

工程中拆除旧挡土墙,选择2种截面面积的挡土墙沿滑坡主断面(K 1971+676 m)对称设置,主断面两侧20 m范围内挡土墙采用格构式地梁作水平支撑(图2)。格构地梁和挡土墙基础分10 m段为一阶梯,后一阶梯较前一阶梯提高基底标高0.75 m。各段之间设置变形缝,挡土墙上设1~2道滤水孔,其余部位的挡土墙不做水平支撑。

4.3 排水系统

山区灌木资源丰富,为减轻滑体重量,采用经防腐处理的树枝,捆绑成树枝笼埋入排水沟,地下水可经过树枝间的缝隙排出。在距公路挡土墙45 m范围内的滑坡前缘,纵向布置6条排水沟,间距8 m。横向5条排水沟与纵向排水沟呈W形相连,扩大了排水沟的覆盖面积(图2)。考虑支挡结构排水困难,沿挡土墙顶增加一道排水沟。此外,沿滑体周界设置截洪沟,在滑体中部也设置二道截洪沟。考虑滑坡所在地区的暴雨强度资料,各排水沟截面尺寸由地下水的计算流量确定。

209国道许家湾滑坡治理工程竣工后经历了2000—07罕见暴雨的考验,最大日降雨量约180 mm。虽然在该公路沿线许多边坡坍塌失稳,许家湾滑坡原址未见异常现象。2001年的三次现场复核表明,支挡结构状况良好,排水系统工作正常,整个滑坡治理工作取得明显成效。

参考文献(References):

- [1] Zhang Jiru, Peng Bo, Ying Guanhk: Analysis method of slopes stability under different stress — peth. *Journal of Wuhan University of Technody*, 2000, 22(4): 108~110 [张季如, 彭波, 尹光辉. 不同条件下土坡稳定分析方法的选择[J]. 武汉工业大学学报, 2000, 22(4): 75~77.]
- [2] Zhang Jiru. Finite element simulation and stability analysis of slope excavation. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(6): 843~847 [张季如. 边坡开挖的有限元模拟和稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 843~847.]
- [3] Yin Guanghui, Li Minghai. Design and construction of braced systems of slide in Xujiawan. *Journal of Wuhan University of Technoby*, 1999, 21(sup): 108~110. [尹光辉, 李明海. 宣恩许家湾滑坡支挡系统的设计与施工[J]. 武汉工业大学学报, 2000, 21(sup): 108~110.]

Formation Cause Analysis of Xujiawan Landslide in the No. 209 National Road and Its Treatment

ZHANG Ji-ru^{1,2}, LI Ming-hai³, and YIN Guang-hui³

(1. School of civil Engineering Wuhan University, Wuhan 430070 China; 2 School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070 China; 3 Enshi State Highway Bureau, Enshi 445000 China)

Abstract: Combining with the geology background information and the field survey of Xujiawan landslide, the causes of the landslide formation are analyzed from geomorphology, hydrogeology, geological structure, stratum, soil properties and human engineering activity. The results show that the factors, such as the slope type with the same direction, the geomorphologic characteristic with steep slope and funneling the surface water, stratum of interactive rock and soft soil, the geological structure of multilayer joint planes, characteristic of residual shear strength of soil, etc., are the mainly geological factors. The cutting slope, water erosion due to rainstorm, vegetation breakage and paddy terrace, are the inducements. Based on the calculation of quantitative evaluation on its stability, the engineering measures of stabilizing the landslide are carried out. This measures include a braced system consisted of anti-slide retaining wall, case foundation beam and beam cushion, and a drainage system consisted of seepage-drains formed by bunch of tree branch. The results of field observation indicate the effect of landslide treatment is satisfactory.

Key words: Xujiawan landslide; cause of landslide formation; stability calculation; landslide treatment