

镇胜高速公路晴隆古滑坡成因特点及防治对策

刘正梁^{1,2}, 孔纪名^{1*}, 周勇³

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院研究生院, 北京 10049

3. 贵州省交通规划勘察设计研究院, 贵州 贵阳 550001)

摘要: 以镇胜高速公路晴隆县 K85线路建设中所诱发新滑坡为例, 分析了古滑坡体发育特征和新滑坡成因特点, 表明了古滑坡的地质特殊类型对公路建设的危害。研究结果表明, 晴隆古滑坡具有地貌隐蔽性、岩性复杂多样和对环境改变响应敏感等特征, 复活的新滑坡是在古滑坡的基础上受公路施工切坡和降雨诱发而形成的。在确定影响滑坡稳定的主要控制因素和失稳机理的基础上, 分析和评价了不同工况条件下的稳定性, 并根据古滑坡特殊地质条件, 提出了进行分级开挖、逐级治理滑坡的防治对策。

关键词: 高速公路; 古滑坡; 成因特点; 稳定性分析; 防治对策

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

滑坡是山岭重丘区公路经常遇到的一种自然灾害^[1]。滑坡一旦发生, 会给公路及其沿线设施造成严重损坏, 同时危及施工人员及附近居民的安全。镇(宁)胜(境关)高速公路是国家“五纵七横”国道主干线上海至云南瑞丽高速公路的一段, 镇胜高速公路是一条贯通东西部的交通大动脉, 它的兴建, 将促进公路沿线的经济发展。晴隆滑坡地处贵州高原西南部山区镇胜高速公路 K85+420 m~K85+920 m段路, 全长 500 m。根据钻探资料及现场调查判断该区域为一古滑坡群, 晴隆滑坡就是在镇胜高速公路施工影响下复活并产生了新的多级滑坡, 因此通过对古滑坡的变形机理、成因特点和稳定性进行深入分析, 提出切实可行的综合整治措施, 掌握斜坡的变形破坏规律, 可以对类似地质条件下的滑坡防治研究工作提供借鉴。

1 古滑坡体发育特点及危害

晴隆古滑坡位于贵州省黔西南布依族苗族自治

州晴隆县沙子镇光明村, 滑坡基本呈南北向展布, 沿主滑方向长 170~240 m, 东西向宽 500 m, 滑体厚 5~29.5 m, 体积约 $154 \times 10^4 \text{ m}^3$, 为一大型滑坡(图 1)。滑坡坡面平均坡度为 15° , 滑坡体中部为一宽缓坡地, 斜坡下部为 320 国道, 坡体受切割较严重, 滑坡表面为耕地。坡面覆盖层较厚, 勘察期间未见滑动迹象, 根据对当地老乡的调查访问, 该滑坡于 20 世纪 70 年代发生过滑动, 近 30 年来坡体存在缓慢蠕动的迹象, 但未发生过大的变形位移。

古滑坡经过地质构造作用和位移变形, 滑坡区岩性复杂多样。古滑坡区出露地层为二叠系上统龙潭组(P_{21})煤系地层, 由泥质粉砂岩、炭质泥岩、粉砂质泥岩组成, 表部全风化层厚约 2.0~5.0 m, 中层强风化层厚 1.0~18.5 m, 底层中风化层钻探揭示深度为 4.0~10.0 m。各层岩性: 滑坡覆盖层为第四系残坡积层(Q_4^{dt+el})为粉砂质粘土夹碎石, 厚 1.5~12.5 m, 基岩由粉砂质泥岩、炭质泥岩、泥质粉砂岩夹透镜状煤层组成。据区域地质资料, 滑坡区位于六盘水断陷台地边缘, 普安旋扭构造变形区法郎

收稿日期(Received date): 2008-03-04; 改回日期(Accepted): 2008-07-05.

基金项目(Foundation item): 交通部西部交通建设科技项目《西部地区公路地质灾害监测预报技术研究》(2003-318-802-01)资助。
[Supported by Item of Study on Monitoring and Forecast of Road Geological Hazards in Western China(No. 2003-318-802-01).]

作者简介(Biography): 刘正梁(1982-), 男(汉族), 湖南衡阳人, 硕士研究生, 主要研究方向: 边坡变形破坏规律及工程防治。[Liu Zhengliang (1982-), male born in Hengyang, Hunan, master candidate, mainly engaged in research of slide destroy regularity and engineering prevention.] E-mail: lzlsru@163.com

*通讯作者(Correspondence author): 孔纪名, 研究员, 主要从事边坡变形破坏规律及工程防治研究。[Kong Jinming (1956-), male, Professor specialized on slide destroy regularity and engineering prevention.] E-mail: jming@imde.ac.cn

向斜南翼,地层呈单斜产出,次级褶皱发育,地层起伏大,地层倾向 $320^{\circ}\sim 340^{\circ}$ 、倾角 $24^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 。

古滑坡区位于山体斜坡中部,水文地质条件简单,地表水系不发育,主要靠大气降水补给,受季节影响较大。山间沟谷雨季为地表水的汇流排泄通道,无常年径流。区内地下水主要为基岩裂隙水,坡体上泉水出露,流量受季节影响大,约 $0.5\sim 5.0\text{ L/min}$ 常年有水。

古滑坡在地貌上具有隐蔽性,公路选线设计时没有进行绕避。由于对地质条件及历史地质灾害的重视程度不足,公路施工开挖斜坡造成了古滑坡的复活并在坡体的前缘出现 3 个复活的新滑坡(见图 1)。其中,Ⅰ[#]滑坡位于 $K85+750\text{ m}\sim +885\text{ m}$ 段,滑坡长约 117 m 平均宽 120 m 滑体平均厚约 11 m 滑坡前缘与滑坡后壁相对高差 46 m 主滑方向为 112° ,推算滑坡体积约 $15\times 10^4\text{ m}^3$;Ⅱ[#]滑坡位于 $K85+600\text{ m}\sim +725\text{ m}$ 段,滑坡长约 110 m 平均宽 100 m 滑体平均厚约 12 m 滑坡前缘与滑坡后壁相对高差 48 m 主滑方向为 143° ,推算滑坡体积约 $13\times 10^4\text{ m}^3$;Ⅲ[#]滑坡位于 $K85+460\text{ m}\sim +605\text{ m}$ 段,滑坡长约 180 m 平均宽 130 m 滑体平均厚约 12 m 滑坡前缘与滑坡后壁相对高差 54 m 主滑方向为 111° ,推算滑坡体积约 $30\times 10^4\text{ m}^3$ 。

根据现场勘测资料及监测数据,自 2005—08 公路施工以来, $K85+550\text{ m}\sim K85+720\text{ m}$ 段斜坡出现多条纵向贯通性裂缝,缝宽 $0.04\sim 0.2\text{ m}$ 同时在

该段坡体上布置的部分监测孔被滑动面剪断,右侧边坡的古滑坡出现明显的复活,出现整体滑坡。同年 10 月又发生了下边坡滑坡,地表出现开裂现象,位于下边坡位置的 320 国道边沟受滑坡挤压发生变形,严重危及国道的安全运营和滑坡周围施工人员的安全。

2 高速公路建设对复活滑坡稳定性影响与诱发作用

2.1 高速公路建设对复活滑坡稳定性影响

2.1.1 道路工程切坡对滑坡的影响

人工切坡形成高陡临空面,破坏了坡体的自然平衡条件,在自重力的作用下,极易沿软弱结构面产生应力松弛,逐渐形成整个坡体的下滑条件。由于兴建的高速公路为双幅封闭路,单幅路宽 12.5 m 并且公路采用路堑的形式从古滑坡区通过,开挖工程量较大,最大挖深近 17 m 同时将在路基右侧形成高 $14\sim 40\text{ m}$ 的边坡。根据图 1,古滑坡区斜坡中部为一宽缓坡地,高速公路建设所诱发的 1[#]、2[#]和 3[#]滑坡后缘基本位于公路路基附近,表明公路施工对复活滑坡稳定性的影响很大。切坡开挖后导致右边坡临空,由于斜坡覆盖层堆积厚度大及结构松散,古滑坡区原稳定状态被破坏,斜坡将顺坡面滑动,全、强风化岩体也将发生剪切破坏,岩层将沿层面发生滑动,形成新的滑坡。

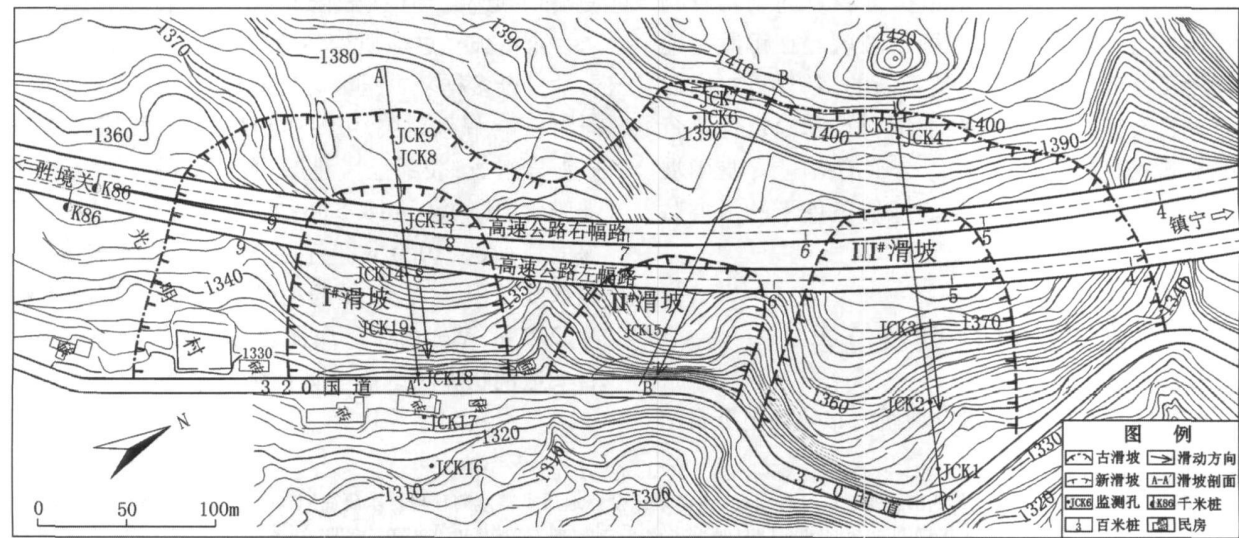


图 1 晴隆滑坡平面示意图

Fig 1 Schematic plan of Qingling landslide

2.1.2 施工爆破对滑坡的影响

在路堑边坡施工中,一般先进行松动爆破,然后再机械开挖。施工爆破产生的震动波在岩土体和地下水中迅速传播,使岩土体和地下水产生剧烈震动。强烈的人工爆破震动直接削弱了斜坡岩土体的强度,产生“松动效应”。同时,爆破激活孔隙水压力增加,对岩土体渗透变形起促进作用。

2.2 诱发作用

地层岩性、地质构造是滑坡发生发展的内在因素^[2-4]。古滑坡区受区域构造影响,地层呈单斜状产出,由于煤系地层受风化、剥蚀作用形成结构较为松散的碎石土及粘性土等残留于坡面,古滑坡区覆盖层最厚,主要为含粉砂质粘土、碎石土,结构松散,完整性差。公路施工开挖边坡,煤系地层裸露于地表后,在各种外营力地质作用的影响下,风化速度急剧加快,风化裂隙不断向深部发展,岩体完整程度逐渐降低,为滑坡的形成提供了物质基础。

降雨是滑坡产生的诱发因素。古滑坡体为碎石土,主要由粉砂质粘性土及碎石组成,结构松散。从岩土体结构特征分析,在自然状态下,土体力学强度较高。由于公路工程建设,开挖坡体形成临空面,改变了地表形态。施工期间,在大气降水的作用下,地表径流下渗坡体,一方面改变了岩土体滑动面的物理力学性质,特别是基岩表面及粘性土,遇水饱和后呈软塑状,构成软弱结构面(带),从而降低了斜坡的稳定性;另一方面随着地下水位补给的增加,导致滑体中的动水压力激增,动水压力和孔隙水压力又使滑面抗剪强度降低,导致斜坡变形和破坏。

综上所述,晴隆滑坡是在古滑坡的基础上因高速公路修建时切坡不当,破坏了山体的自然平衡而诱发复活的。同时原地表植被和粘性土层被人工开挖,煤系地层直接裸露于地面,其表部风化极为严重,风化裂隙发育,结构松散,为降水提供了良好的入渗通道。在降雨的作用下,大量水体的渗入不仅增加了岩土体的重度,而且在透水性不同的泥质粉砂岩、炭质泥岩、粉砂质泥岩强风化层与中—微风化层的结合部位大量聚集,使得该处的岩土体不断被软化,摩擦系数减少,粘聚力降低,进而产生了滑移。

3 公路扰动条件下复活滑坡的稳定性分析与评价

3.1 复活滑坡稳定性计算

公路建设在古滑坡前缘诱发了 3 处新滑坡,滑

坡稳定性计算以 I^天 滑坡为例。滑坡的稳定性计算采用折线型滑动面计算公式,剩余下滑力计算按不平衡推力传递系数法。根据复活滑坡结构特征及形成机理,在稳定验算分析区内选取具代表性的剖面,依据滑坡体后缘平台上裂隙出露情况及前缘滑舌的出露面,确定边坡滑动主轴断面的位置,根据实际钻探结果确定已滑边坡的滑动面。按自然状态、自然状态+人工切坡和降雨工况进行稳定性验算分析。计算参数应用现场相似模拟和工程勘察试验成果(表 1、表 2)。

表 1 滑动面抗剪强度指标

Table 1 The physic and mechanic parameter of the layer

| 重度 (kN/m ³) | | 天然状态 | | 饱和状态数 | |
|-------------------------|------|---------|-------|---------|-------|
| 天然状态 | 饱和状态 | C (kPa) | φ (°) | C (kPa) | φ (°) |
| 22.5 | 25.0 | 8.3 | 17.7 | 12.5 | 9.2 |

表 2 岩体抗剪强度指标

Table 2 The physic and mechanic parameter of the bedrock

| 岩性 | 重度 (kN/m ³) | C (kPa) | φ (°) |
|-------|-------------------------|---------|-------|
| 强风化粉砂 | 26 | 40 | 16 |
| 中风化粉砂 | 27.5 | 45 | 25 |

滑坡稳定系数 K

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

式中 R_i 作用于第 i 条块滑动面上的抗滑分力, kN/m; T_i 作用于第 i 条块滑动面上的滑动分力, kN/m; ψ_j 为第 i 块段剩余下滑力传递至第 i+1 块段的传递系数 (j=i)。

滑坡计算以 I^天 滑坡 A—A' 主滑断面 (见图 2) 为例,计算结果见表 3。

表 3 稳定性系数计算结果

Table 3 Computational results of slope stability

| 计算剖面 | 稳定性系数 | | |
|------|-------|-------------|------|
| | 自然状态 | 自然状态 + 人工切坡 | 降雨状态 |
| A—A' | 1.02 | 0.85 | 0.95 |
| B—B' | 1.08 | 0.83 | 0.82 |
| C—C' | 1.15 | 0.94 | 0.89 |

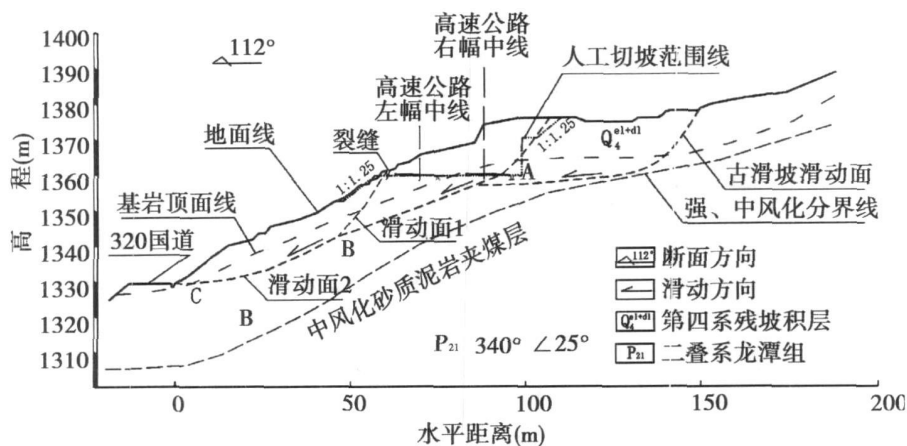


图 2 I 滑坡主滑断面图
Fig 2 Main cross section of the landslide I

3.2 复活滑坡稳定性评价

根据稳定性计算结果(表 3),晴隆古滑坡在天然状态下处于基本稳定或稳定状态;在自然状态 + 人工切坡下处于失稳状态;在降雨条件滑坡也处于失稳状态。由此可见,晴隆古滑坡在天然状态下就处于极限状态并有蠕滑,在人工切坡或降雨条件下,斜坡稳定性都明显降低。

总之,考虑到开挖坡体已破坏了边坡的平衡状态,坡体内形成潜在不利滑动面,坡面多处形成裂缝,剪出口明显,在地下水及大气降水的浸润作用下,加上不当的堆载作用,滑动面的抗剪强度会继续降低,可能发生大的滑动,危及建设中的高速公路的安全。因此,在实际的工程施工中,要制定科学的施工组织管理办法,尽量避免因不合理的施工引起滑坡变形加剧。

4 古滑坡的分级防治方法

晴隆古滑坡体对环境改变响应敏感,因此,治理此滑坡采用的是分级开挖、逐级治理的综合防治方法。其优点是:1. 新建公路以路堑的形式通过古滑坡体,对公路的左幅路和右幅路进行分级开挖,减少单项工程规模,减少工程量,避免诱发新的滑坡;2. 可以根据实际情况合理地分配滑坡剩余下滑力,建设有效的抗滑支挡工程;3. 分级治理古滑坡,减少工程施工对滑坡体的扰动,有利于维持古滑坡体的稳定,确保工程的安全开展;4. 有利于做到一次根治不留后患的防治滑坡原则,减少后期工程维护费用。

则是从上至下,分级开挖,逐级治理,主要的抗滑支挡工程分三级布设。结合实际情况,鉴于古滑坡体厚度大,计算滑动剩余下滑力较大,滑坡体的剪出口位于坡脚 320 国道的路基排水沟附近,滑坡的滑动面为强风化砂质泥岩夹煤层,滑面下覆基岩中风化层埋深较大,地基承载力较低。因此,在综合评选后,治理此滑坡的抗滑支挡结构优先采用抗滑桩。同时,为了克服普通抗滑桩的不足之处,在桩身顶部设置预应力锚索,从而形成锚索与抗滑桩的联合体。预应力锚索通过桩身对滑体主动施加了一个相当大的预应力,可显著改善结构物的受力条件。由于这种受力状态减少了预应力锚索抗滑桩桩周应力,因此,可使桩截面小、桩身短、配筋少,并使桩周围围岩易于满足桩对侧向承载力的要求^[5 6]。

以治理 I 滑坡为例,高速公路从复活滑坡体后缘通过(图 3)并且公路路基位于滑动面之上,施工切坡会在古滑坡体前缘产生临空面,降低斜坡的稳定性。因此,为了减小工程施工对古滑坡体的扰动,减少开挖量,避免因工程施工加速古滑坡体的变形,第三级预应力锚索抗滑桩布置在右幅路路基右侧,即图 3 的 A 位置。为了使第二级预应力锚索抗滑桩承受较大的下滑力,在结构设计时,可以忽略桩后的被动土压力,主要考虑桩前下滑力起控制设计作用。因此,结合滑坡主滑断面图,在选取第二级治理滑坡工程敷设具体位置时,可以将抗滑工程放置在上、下层滑动面的交汇处,即图 3 的 B 位置。由于第二级抗滑支挡结构分担了大部分的下滑力,考虑到坡脚作业场地的限制,相对而言,第一级抗滑支挡结构物的规模就能得到显著的缩小。因此,在不影响 320 国道正常通车的情况了,就可以采用常规的

抗滑挡土墙抵抗剩余下滑力, 所以第一级治理滑坡位置可以设在 320 国道边沟一侧, 即图 3 的 C 位置。附属工程包括护坡及截排水沟。工程具体布设情况

参见图 3。II[#]和 III[#]复活滑坡采用类似的分级开挖, 预应力锚索抗滑桩逐级治理滑坡方案。

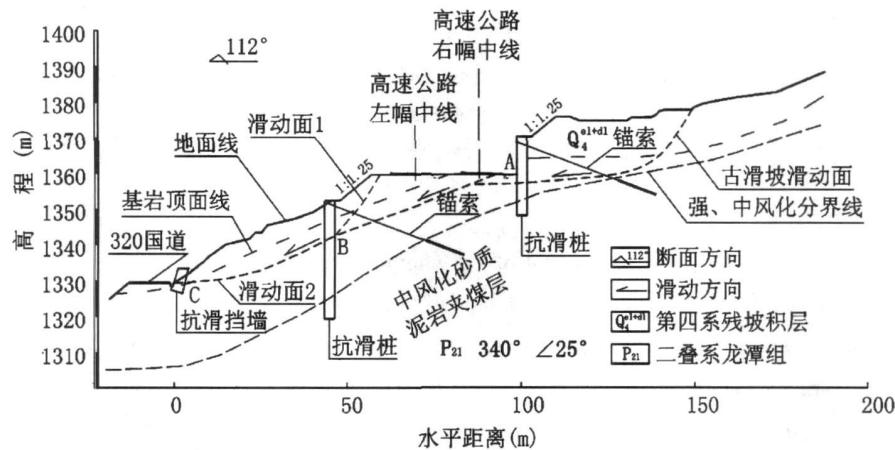


图 3 I[#] 滑坡工程治理方案剖面示意图
Fig 3 Vertical section of the landslide I with engineering treatment

5 结语及建议

- 1. 晴隆古滑坡发育于煤系地层中, 由于公路建设开挖斜坡, 使滑坡前缘路堑边坡高陡, 斜坡应力失衡, 是诱发滑坡的主要因素。特殊的地层岩性、地质构造是该滑坡形成的内在因素, 而降雨则是滑坡失稳的外在激发条件。
- 2. 该滑坡在天然状态下处于基本稳定或稳定状态; 在滑坡前缘开挖边坡, 自然状态斜坡不稳定; 在降雨条件斜坡不稳定。
- 3. 治理大型古滑坡应该遵循分级开挖、逐级治理原则, 减小工程施工对滑坡体的扰动, 维持滑坡体的稳定, 确保施工安全。在滑坡的治理过程中, 应考虑砂质泥岩的风化影响, 采用动态设计。
- 4. 山区公路工程通过古滑坡地带, 应作好灾害勘察工作, 为其整治加固设计及施工提供可靠的工程地质依据。

参考文献 (References)

[1] Ma Huimin Wang Gongxian . Zhou Depei. Example of High Slope Disease Control in the Mountainous Areas[M]. Beijing: China Communication Press, 2006 5 ~ 7 [马惠民, 王恭先, 周德培. 山区高速公路高边坡病害防治实例 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2006 5 ~ 7]

[2] Shi Jinxu Tang Hongmei Li Ming et al. Study on formation mechanism and control measures of the landslide of Xiang Jiapo in Yunnan highway. J. Road 2006 8 12 ~ 16 [石晋旭, 唐红梅, 李明, 等. 滇黔高速公路向家坡滑坡成因及防治对策研究 [J]. 公路, 2006 8 12 ~ 16]

[3] Xu Yunfeng. Formation mechanism and control measures of the landslide of Chenzhou, Hunan province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control 2006 17 (3): 165 ~ 166 [许云峰. 湖南省郴州市梨树山滑坡的成因机制及防治 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006 17 (3): 165 ~ 166]

[4] Ren Weizhong Chen Hao. Model testing research on deformation and fracture mechanism of landslide and its harnessing engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2005 24 (12): 2136 ~ 2141 [任伟中, 陈浩. 滑坡变形破坏机理和整治工程的模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005 24 (12): 2136 ~ 2141]

[5] Hu Zhiyi. Application of anti-sliding piles with prestressed cable in treatment of instability slope [J]. Jiangxi Nonferrous Metals 1999 13 (2): 1 ~ 4 [胡志毅. 预应力锚索抗滑桩在失稳斜坡治理中的应用 [J]. 江西有色金属, 1999 13 (2): 1 ~ 4]

[6] Hu Huamin Hu Jiegang Yu Min et al. Application of anti-sliding piles with prestressed cable retaining structure in treatment of high slope landslide in Liuzhai Shuren Highway Guangxi Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control 2006 17 (3): 150 ~ 153 [胡华敏, 胡杰刚, 俞敏, 等. 桩锚支护体系在广西寨一任二级公路高边坡治理工程中的应用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006 17 (3): 150 ~ 153]

Formation Characteristics and Control Measures of the Ancient Landslide of Qinglong in Zhenning-Shengjingguan Highway

LIU Zhengliang^{1,2}, KONG Jinling¹, ZHOU Yong³

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process CAS Chengdu 610041 China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences Beijing 100049 China

3. Guizhou Communication Planning and Prospecting Design Academy Investigating and Design Research Institute Guiyang 550001, China)

Abstract Taking the landslide of Qinglong along K85 in Zhenning-Shengjingguan highway as an example in this paper the development characteristic of the ancient landslide and the formation mechanism of the new landslides were discussed and it reveals the ancient landslide with special geological type is harmful for the highway construction. The result shows the landslide of Qinglong has the characteristics of hiding landform complex lithological and being sensitive to the environment change the new landslides evolved from the ancient landslide was induced by engineering excavation during the period of highway construction and rainfall. In the end the stability under different conditions was analyzed and evaluated based on the main control factors and sliding mechanism of the landslide. The countermeasures of excavating and controlling by stage of landslide were given according to the special geological of the ancient landslide.

Key words highway ancient landslide formation characteristics stability analysis preventive treatment

《山地学报》来稿要求(二)

为了便于国外数据库的检索,如果是中文参考文献,应附上对应的英文。连续出版物及其析出文献作者不超过3人全部列出,作者之间加逗号;作者超过3人只列前3位,后加“等”字。例举如下:

a 期刊著录格式[序号]作者.文章题目[J].原出版物名称,年,卷(期),起止页码

中文:

[1] Zha Baiping Yao Yonghui Mo Shenguo et al. Digital spectra of altitudinal belts and their hierarchical system[J]. Journal of Mountain Science 2002 20(6): 660~665 [张百平,姚永慧,莫中国,等.数字山地垂直带谱及其体系的探索[J].山地学报,2002 20(6): 660~665]

外文:

[2] Thompson LG Yao Tandong Davis M E et al. Tropic climate instability the Last Glacial Cycle from a Qinghai-Tibetan Plateau Ice Core[J]. Science 1997 276 1 821~1 825b 专著著录格式[序号]主要责任者.书名[M].出版地:出版者,出版年.起止页码

中文:

[3] Shi Yafeng Huang Maohuan Yao Tandong et al. Glaciers and Their Environments in China[M]. Beijing Science Press 2000 1~410 [施雅风,黄茂桓,姚檀栋,等.中国冰川与环境[M].北京:科学出版社,2000 1~410]

c 论文集著录项目、格式和符号

[序号]作者.析出文章题目[A].见:编著者.论文集名[C].出版地:出版者,出版年.起止页码

中文:

[4] Fan Jie Industrial restructuring and regionaleconomic development[A]. In Lu Dadao et al. Regional Development of China [C]. Beijing The Commercial Press 2001. 71~76 [樊杰.产业结构调整与区域经济发展[A].见:陆大道,等.中国区域发展报告[C].北京:商务印书馆,2001. 71~76]

d 学位论文著录格式和符号

[序号]作者.标题[D].保存地:保存者,年份.

其他引用论文的著录格式,请参考近期刊发表的文章.