

# 川藏公路龙胆溪 1<sup>#</sup> 滑坡的演变

张晓燕

(四川省交通厅公路局, 四川 成都 610041)

**摘 要:** 特大型滑坡如同其它事物一样经历着从发育、成长到灭亡以致循环往复的演变过程。本文从代表性的川藏公路龙胆溪特大型滑坡的发育机理研究出发, 分别通过地质力学模型试验、数值计算、工程结构与滑坡的相互作用分析、大规模立体原位测试等多种手段, 模拟、数据展现和结构调控了该滑坡的发育演变过程。为藏区的减灾环保和我国西部建设的发展作一些科学的储备。

**关键词:** 雪域高原; 特大型滑坡; 演变

**中图分类号:** P642.22

**文献标识码:** A

二郎山是进入高原藏区的首座关隘, 这里发育的滑坡, 为川藏公路特大型滑坡的特有形式, 具一般和高原藏区两类大型滑坡的双重特征, 即不仅同一般地区那样气候湿润、雨水多、人类活动干扰强, 而且像高原藏区那样海拔高、天气寒冷、新构造活动性强、河流切割深<sup>[1]</sup>、规模大、性质复杂<sup>[2]</sup>、成群出现。如仅仅在二郎山隧道东西引道旁, 就发育着 14 个不同性质的滑坡及崩塌体<sup>[3]</sup>, 其中规模最大且具代表性的是龙胆溪滑坡。本文以该滑坡的研究为例, 探求其演变的内在规律。

龙胆溪 1<sup>#</sup> 滑坡位于 29°59'16"E, 102°01'43"E 二郎山隧道东引道, 老龙胆溪滑坡下游 1 km 处, 海拔 1 860 ~ 2 045 m 分上、下两级, 东、西两滑坡, 规模约 5 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, 属特大型牵引式破碎岩石滑坡。1997 年滑坡失稳, 经治理后再次进入平静期。

## 1 滑坡发生机理

滑坡发生的关键取决于以下适宜的地质基础<sup>[3]</sup>: NE65°和 NW20°走向的构造面分别决定了滑坡的后缘和侧界; 约 25°倾角的滑面形成了滑坡失稳的底界; 松散的坡体物质在新近 3 期大的构造作用下变得破碎软弱<sup>[4]</sup>, 加上地下水的作用和 1997—07

特大暴雨对滑面的浸泡软化以及龙胆溪泥石流对坡脚的巨大冲刷作用, 由此形成龙胆溪 1<sup>#</sup> 滑坡。

滑坡发生机理体现在滑坡母体(大型错落体)和滑坡本身两种形式内和包括母体诞生、滑坡发育、再造直至暴发共计 4 个过程中:

1. 母体诞生过程, 经过漫长岁月, 河谷深层下切, 山体坡脚失去支撑产生大型错落体;
2. 发育生长过程, 此时雨水下渗, 前沿冲刷, 错落体渐趋不稳并在错落带内发育滑动面;
3. 重复再造过程, 随着持续冲刷下切, 使部分坡体失稳, 待稳定后再受冲, 如此循环往复;
4. 暴发失稳过程, 此时处于极限状态的坡体在特大暴雨和前缘泥石流冲刷下, 彻底复活, 从而形成龙胆溪 1<sup>#</sup> 滑坡。

## 2 模型试验模拟演变

为了寻求龙胆溪 1<sup>#</sup> 滑坡的发生、发展规律及其对抗滑工程施加后的响应, 我们用地质力学模型试验模拟其演变。在研究中<sup>[3]</sup>, 我们选定有代表性的 1<sup>#</sup> 滑坡 VI—V 断面作为模拟试验的原型, 以 2000—07 的状态为建模依据, 制作 1:50 室内试验模型, 重现滑坡发生发展的过程。根据现在和将来可能出现

收稿日期(Received date): 2002-06-15; 改回日期(Accepted): 2003-08-20.

基金项目(Foundation item): 中国科学院知识创新项目(KZCX3-SW-323)(1)资助。[Supported by Knowledge Innovation Program of CAS(KZCX3-SW-323(1))]

作者简介(Biography): 张晓燕(1958-), 女, (汉族)四川成都人, 高级工程师, 主要从事西部公路建设方面和环境方面的研究。[Zhang Xiaoyan (1958-), female, the Han nationality, born in Chengdu, Sichuan province, senior engineer, research fields mainly covering highway construction in Chinese western region and mountain environmental protection]

的情况,设计了2种状态、3种工况。状态一是工程实施前的自然坡体状态,重现随外界条件(3种工况)的改变,研究滑坡发生机理和发展趋势;状态二是研究施加治理工程措施后,3种工况下滑体的稳定性、工程效果及其应力、变形情况。

状态一的3种工况分别为:

工况一,分两次向滑带注水,模拟雨水入渗软化滑带对坡体的影响;

工况二,开挖部分河床和坡脚,以模拟泥石流及龙胆溪水对坡脚的冲刷;

工况三,继续向滑带注水,模拟滑坡恶化发展。

试验模型中各相似系数有如下关系

$$C_E = C_\sigma = C_T = C_r \cdot C_l$$

$$C_\epsilon = C_\mu = 1$$

等式中相似系数  $C$  的下标,分别为弹模( $C_E$ )、应力  $C_\sigma$ 、强度  $C_T$ 、容重  $C_r$ 、尺寸  $C_l$ 、应变  $C_\epsilon$  及泊松比  $C_\mu$ 。

## 2 1 自然状态下滑坡变形试验分析

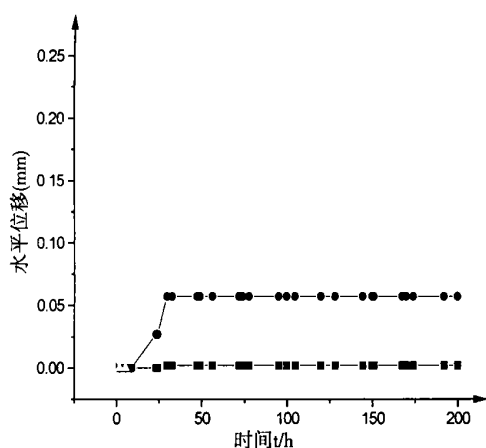


图1 不同位置3点在各工况下的位移曲线

Fig. 1 Displacement curve of monitoring points

在状态一的3种工况下,将埋置深度由浅到深的3点  $H_1-H_3$  位移实验结果绘于图1,从中可以看出,坡体的水平位移随工况的变化基本呈现出增加的趋势,位移变形主要发生于浅层风化岩体和中层滑带以上的区域内。活动体牵动部分相对位移最大。

图1中一三工况的位移增长较大,说明降雨对边坡的稳定破坏起到了关键的作用,而泥石流的冲刷对坡体状态进一步恶化起到了促进的作用,而且有滞后和加剧变形的特征。实际坡体失稳过程中,

上述过程交替反复,最终引发坡体的大规模失稳。

## 2 2 抗滑结构状态下滑坡试验分析

本抗滑工程措施主要包括抗滑桩,锚索框架等。

滑坡在自然位移比较大的情况下,自设置了抗滑工程后显著变小,尤其是在桩的有效范围更加明显。主要变形区已由原来的整个坡体转化为桩前没有实施工程的外边坡上,由此引起的松弛区范围也明显减小,滑带位移也是如此,并逐步趋于更小(见图2)。

工况3是最不利的情况,此时桩前岩体大量坍塌溜走,桩后坡体出现较大变形,所以保持坡脚河岸防护工程的良好状态,和深部排水工程是非常必要的。

对结构分析表明,抗滑结构有效地抑制了坡体变形,对滑坡的稳定起到了积极的作用。

## 3 数值计算

为了更好地研究滑坡发生发展的机理、寻求失稳破坏机理的理论支持,我们仍以1#滑坡西条主轴断面为原型,利用ANSYS大型有限元软件,依次对滑坡的演变过程以及与此有关的塑性区的发展、结构内力的变化进行数值计算<sup>[3]</sup>。

在计算中,岩土体的本构关系均采用Drucker-Prager屈服准则,此屈服准则对Mohr-Coulomb准则给予近似,并对Von Mises屈服准则予以修正。

其屈服面不随材料的逐渐屈服而改变,因此没有强化准则,然而其屈服强度随着侧限压力(静水压力)的增加而相应增加,其塑性行为被假定为理想弹塑性。其等效应力  $\sigma_e$  的表达式为

$$\sigma_e = 3\beta\sigma_m + \left[ \frac{1}{2} \{S\}^T [M] \{S\} \right]^{\frac{1}{2}}$$

式中  $\sigma_m = \frac{1}{3} \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$  为平均应力或静水压力;  $\{S\}$  = 偏差应力;  $\beta$  = 材料常数;  $[M]$  = Mises屈服准则中的  $[M]$ 。

经过修正后的Mises屈服准则,考虑了静水应力分量的影响,静水应力(侧限压力)越高,则屈服强度越大。材料  $\beta$  的表达式为

$$\beta = \frac{2\sin\varphi}{\sqrt{3}(3-\sin\varphi)}; \text{其中 } \varphi = \text{内摩擦角。}$$

材料的屈服参数定义为

$$\sigma_y = \frac{6C\cos\varphi}{\sqrt{3}(3-\sin\varphi)}$$

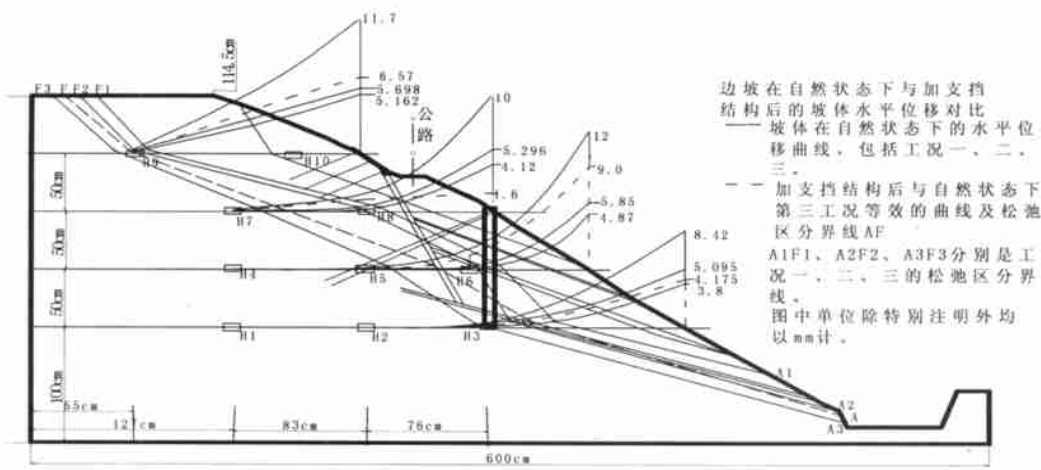


图2 自然状态和加抗滑结构状态第三工况的坡面位移

Fig. 2 Slope surface displacement under third engineering stage in the states including nature and control engineering structure

式中  $C$  = 粘聚力。

屈服准则的表达式为

$$F=3\beta\sigma_m+\left[\frac{1}{2}\{S\}^T\{M\}\{S\}\right]^{\frac{1}{2}}-\sigma_y=0$$

当材料的参数  $\beta, \sigma_y$  给定后, 其屈服面为一圆锥面, 此圆锥面是六角形的摩尔—库仑屈服面的外切圆锥面。

在这次有限元计算模型中, 大部分区域的岩体采用四节点四边形单元来模拟, 其位移模式为双线性位移模式, 并且相邻单元公共节点上有相同的位移值, 从而保证了两个相邻单元在其公共边界上位移的连续性。对于交界处极不规则区域岩体采用的6节点三角形单元, 位移函数取完全的二次多项式, 单元边界上位移按二次抛物线分布, 3个公共节点保证了相邻单元位移的连续性。

从两种状态数值计算结果显示(见图3):

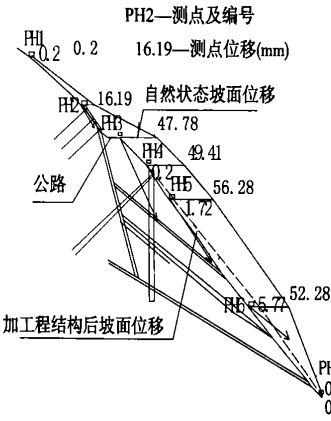


图3 两种状态的坡面位移

Fig. 3 Slope surface displacement in two states

1. 自然状态下坡体变形的部位主要集中于公路附近及其下部, 位移矢量的方向从上至下由斜向坡面逐渐转变为顺滑带指向坡面。第二三工况中, 深层滑带水平位移增加速率较快; 坡体塑性区经历了一个逐渐发展扩大的过程, 岩体的破坏首先始于表面松散层、竖向滑并由浅层、中层滑带到深层滑带。

2. 抗滑结构的施加有效地阻止了公路附近岩体的变形, 变形、破坏部位发生转移。平面上, 主要变形区转至桩外侧; 立面上, 从浅层滑带到深层滑带的滑移依次减小。塑性区首先破坏的是滑带及桩侧岩体, 桩后岩体的塑性区基本维持在第一工况的水平。

3. 从坡体在两种状态下的变形、位移情况来看, 抗滑结构既有效地阻止了上部岩体对下部岩体的推压作用, 也切断了下部岩体对上部岩体的牵引作用, 对稳定滑坡体起到良好的作用; 从第二状态岩体塑性区的发展变化规律来看, 第一状态下出现大量塑性单元的桩后岩体在第二状态下没有出现塑性的迹象, 这表明加抗滑结构以后桩后岩体受力状态更加合理。

由上说明, 合理的工程结构是人为调控坡体演变的有效而理想的方法。

4 原位数据测试

为了真实地了解1<sup>#</sup>滑坡的演变规律, 专门建立了大规模立体原位监测系统, 该系统包括锚索抗滑桩全长的土压力、结构主筋应力、锚索预应力、抗滑桩全长位移、框架结构受力以及地表位移等全方位现场原位监测<sup>[3]</sup>。规模之大手段之全, 在国内交通系统是前所未有的。

1<sup>#</sup>滑坡自 1997—07—03 开始复活, 其西条滑坡近 200 m 范围整体下沉 1.68 m。1998 年再次开始活动, 仅深部滑面位移自 1998—04 ~ 10 就达 100 mm, 到 11 月已达 232 mm, 其中的有些监测孔因位移过大而先后在滑带处被剪断。

从各种位移监测资料看, 1<sup>#</sup>滑坡发展变化过程规律性很好, 极具代表性, 特别是治理工程施工前后反应非常敏感。这种规律性集中体现在施工前后变形由快向慢的转变, 工程区内外和雨旱季由大到小的变化; 而且总体上体现多滑带发育、阶段性变化和牵引式运动 3 大特征。

从变形阶段看: 滑坡于 1997—07 ~ 09 和 1998—07 ~ 10, 经历了两个快速变形期; 1999 年变形相对较缓(原因一是该年雨量相对较小, 二是部分整治工程已实施); 2000 年继续变形, 但当 2001 年滑坡主体整治工程实施并完工后, 各种变形开始减速以至逐渐消失。

5 工程设计与调控

2000 年底, 龙胆溪 1<sup>#</sup>滑坡滑面已近贯通, 公路受到严重破坏, 交通难以维持, 大规模滑动随时都有可能发生。正在这一特大型滑坡将以彻底的崩溃来结束其生命的时候, 交通部门果断决策, 实施整治措施, 通过采取合理工程, 避免了灾害的发生, 使曾经威胁公路安全的大滑坡终于沿着人们期望的演变轨迹再次进入新一轮平静期。

表 1 和表 2 分别显示了滑坡体演变过程中坡体与结构的耦合、变位于内力的转变过程以及随时间的变化规律<sup>[3]</sup>。这一切充分说明了整治工程措施对滑坡演变过程的调控作用。

表 1 5 号普通抗滑桩河侧钢筋计测量值

Table 1 The value of reinforced bar meter of 5<sup>#</sup> pile

年 份	2001 年		2002 年	
深度(m)	7 月 9 日	8 月 30 日	8 月 14 日	9 月 28 日
2.0	1.2	1.2	4.55	5.36
4.5	7.26	-18.68	—	—
7.0	3.51	-44.3	-44.91	-44.82
9.5	7.15	-121.25	—	—
12.0	5.28	-62.31	-66.06	-65.46
14.5	5.44	-97.51	-99.92	-100.0
17.0	2.42	—	—	—

注: “—” 为压力, 其余是拉力, 单位: kN

表 2 8 号抗滑桩锚索力(kN)及剩余百分比

Table 2 The anchor rod force and residual percentage of 8<sup>#</sup> control pile

日 期	1 号	2 号	3 号	百分比 (%)
	锚索力	锚索力	锚索力	
2001.12.16	1 200.00	1 200.00	1 200.00	
2001.12.24	1 083.01	1 045.74	1 120.33	90
2002.3.24	977.20	1 005.70	942.10	81
2002.9.28	960.29	989.55	925.97	79

图 7 真实地展现了锚索抗滑桩在吸收坡体位移中的外力响应。

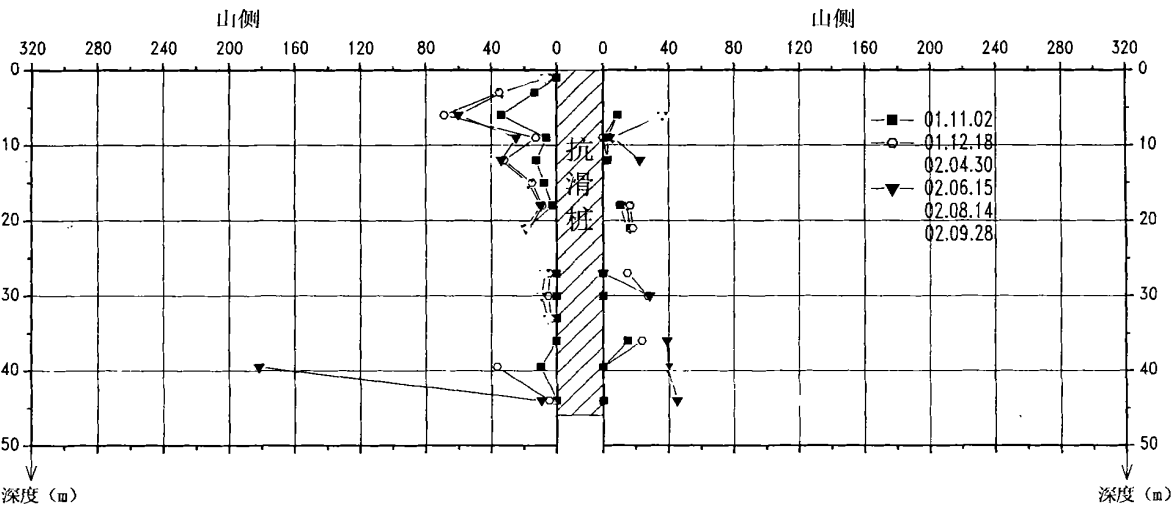


图 7 8 号抗滑桩土压力分布图(kN)

Fig. 7 Distribution of soil pressure of 8<sup>#</sup> control pile

## 6 结论与建议

1. 川藏公路龙胆溪特大型滑坡体除具一般滑坡体性质外, 集中表现三大特性: ①规模巨大; ②母体本身也是一强活动体; ③具活体发育特征, 有很好的演变规律。

2. 川藏公路龙胆溪特大型滑坡体, 发育于人为扰动小、高海拔、高寒冷地区, 自风化属性明显, 发育比较成熟, 敏感性很强, 往往已处于生命的终期, 随时都有失稳暴发的可能。

3. 坡体物质松散, 变形由浅入深, 没有固定的滑面, 拖带性恶化扩展是该类特大型滑坡的主要演变特征之一。

4. 融雪、降雨与河流切割是特大型滑坡的主要激发条件, 由此决定了病害体发育演变的周期性与时段性。

5. 植被与环境保护工作对藏区的持续性发展<sup>[5]</sup>尤为重要, 但鉴于滑坡体本身的不稳定性与地域的恶劣条件, 其实实施应首先以约束发育、固坡稳定为前提。

6. 在绕避方案不可取的情况下, 合理的工程措施是调控特大型滑坡演变的有效而理想的办法。

## 参考文献 (References):

- [1] Zheng Mingxin et al. The kinds of landslide and their formation mechanism in Gannan section along Jingjiu railway. Proceeding of the symposium on landslides and debris flow[C]. Lanzhou: Lanzhou university press, 1998. 106 ~ 109. [郑明新等. 京九线赣南段滑坡类型及其成因分析[C]. 兰州: 兰州大学出版社, 1998. 106 ~ 109]
- [2] Wang Quancui. An analysis of effect Factors of landslide. Proceedings of the 1994 international workshop and field investigation on geological disaster[C]. Lanzhou: Gansu science and technology press, 1996.
- [3] Li Shude. The temporal and special distribution of landslide and debris flow disasters in China[J]. *Research of soil and Water Conservation*, 1999, 6(4): 33 ~ 37. [李树德. 中国滑坡、泥石流的时空分布特点[J]. 水土保持研究, 1999, 6(4): 33 ~ 37.]
- [4] Northwest branch, China Academy of railway sciences. Research on mechanism and control engineering technology of 1<sup>#</sup> landslide in Qian a-long section Long Sichuan-Tibet highway [R]. [中铁西北科学研究院. 川藏公路前龙段滑坡机理及整治技术研究[专题研究报告]]
- [5] Xie Gao di et al. The economic evaluation of grassland ecosystem services in Qinghai-Tibet plateau [J]. *Journal of Mountain Sciences*, 2003, 21(1): 50 ~ 55. [谢高地等. 青藏高原高寒草地生态系统服务价值评估[J]. 山地学报, 2003, 21(1): 50 ~ 55.]

# Evolution of Long-Dan-Xi Landslide along Sichuan-Tibet Highway

ZHANG Xiao-yan

(Sichuan Provincial Highway Administration Bureau, Chengdu 610041 China)

**Abstract:** Huge landslide as other thing undergo a evolution process from development, growth to death. Based in mechanism research on behalf of Long-Dan-Xi 1<sup>#</sup> landslide located in Sichuan-Tibet highway, through geology mechanics test, numerical analysis, interrection of engineering structure and landslide body, as well as in situ tests to model, study, datum display and control the development and evolution process of huge landslide hazards. To provide the science and technology reserve for reduce disaster and environment protect as well as vivacious development of west China construction.

**Key words:** snow region plateau; huge landslide; evolution