

中尼公路友谊桥滑坡的发育特征分析

张小刚¹, 强 巴²

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 西藏自治区交通科学研究所, 西藏 拉萨 850000)

摘 要:友谊桥滑坡位于中尼公路樟木口岸至国界友谊桥之间, 中尼公路(中国境内)最末尾一段。友谊桥滑坡每年雨季时常造成断道, 严重地威胁公路的运营和口岸通道的开发。根据地貌形态、坡体结构以及坡体稳定性等因素综合分析, 友谊桥滑坡为一处巨型的古滑坡。首次古滑坡活动后, 在该区域又多次发生次级的滑动, 友谊桥现代滑坡病害发育在古滑坡的背景中, 具有多期、多层、多条、多块、多级的特点。

关键词:中尼公路; 友谊桥滑坡; 发育特征

中图分类号:X4

文献标识码:A

中尼公路是当前我国通往尼泊尔王国唯一陆上通道, 整个线路从上海起经拉萨至尼泊尔王国首都加德满都。友谊桥滑坡位于中尼公路樟木口岸至国界友谊桥之间, 中尼公路(中国境内)最末尾一段。此段公路横穿喜马拉雅山脉, 地质构造复杂, 山体破碎, 地形陡峻, 公路沿线山地灾害极为发育。友谊桥滑坡每年雨季时常造成断道, 严重地威胁公路的运营和口岸通道的开发。

1 研究区环境概况

中尼公路樟木~友谊桥路段自樟木口岸沿波曲河左岸蜿蜒展布, 于中尼友谊桥出境。在 8.5km 路线上设置了 5 处回头展线, 形成了自上而下的 6 层公路(研究中分别称为 1、2、3、4、5、6 线公路)。公路海拔高程自 2 300 m(樟木镇)急降至 1 770 m(友谊桥)。两岸山峰海拔高程平均约 3 600 m, 相对高程约 1 800 m。波曲河经研究区坡脚由北向南流过, 河道较顺直。右岸(对岸)谷坡坡度较大, 近于直立。研究区内谷坡(左岸)坡度 30°~50°, 植被茂密, 古木参天, 直立挺拔。波曲河常年流水, 河床宽度仅 8~10 m, 河床纵坡却达 9%~10%。

滑坡区出露的基岩地层为前震旦系达莱玛桥组

(Anzd)。岩性为灰白色、灰黑色二云母片麻岩、黑云母石英片岩夹白灰色石英岩以及黑色黑云母片岩、二云母片岩等。地层倾向 35°~45°, 倾角 30°~40°。区内分布的第四系(Q)地层主要为残坡积物、崩积物、滑坡堆积物、泥石流堆积物以及冲洪积物。

在地质构造上, 滑坡区位于印度洋板块与欧亚板块的接触带上, 喜马拉雅结晶基底复式背斜北翼, 山体褶皱强烈、断裂发育, 地震活动频繁。

滑坡区位于北纬 32°, 喜马拉雅山脉南坡, 受到印度洋季风的控制, 属温湿的海洋性气候区。全年的大多数时间, 水气沿波曲河谷自南向北推进。由于遇到喜马拉雅山脉阻挡并抬升, 在喜马拉雅山脉南坡形成气旋雨、地形雨等多雨区, 年降水量多达 2 500~3 000 mm, 是西藏境内少有的暴雨中心。降水多集中在 6~10 月, 占年降水量的 76.8%。丰富的降水成为当地诱发崩塌、滑坡、泥石流的重要因素。此外, 波曲河上游地区时常发生突发性的冰湖溃决, 酿成异常洪水和泥石流, 进而诱发下游地区谷坡失稳。

2 友谊桥滑坡的发育特征

根据地貌形态、坡体结构以及坡体稳定性等因

收稿日期(Received date): 2003-11-30。

作者简介(Biography): 张小刚(1966-), 男, 四川人, 副研究员, 主要从事滑坡研究。[Zhang Xiaogang(1966-), male(Han), born in Sichuan, associate professor, major in research of Landslide.]

素综合分析,友谊桥滑坡为一处巨型的古滑坡。首次古滑坡活动后,在该区域又多次发生次级的滑动,使得友谊桥滑坡具有多期、多层、多条、多块、多级的特点(图 1)。

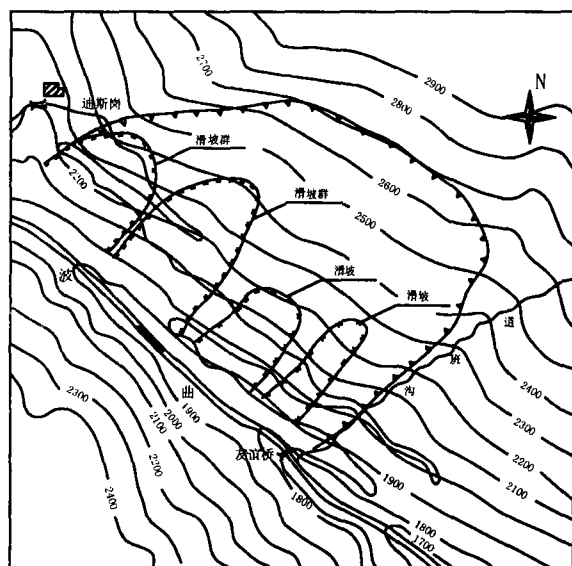


图 1 友谊桥滑坡平面图

Fig. 1 Plane graph of Youyiqiao landslide

2.1 古滑坡特征

首次古滑坡属岩质滑坡。在平面上,滑坡呈矩形。滑坡体后部位于扎马日岗山的顶峰之下(海拔 3 501m),至波曲河床的直线距离约 840m,高程降至 1 700m,相对高差约 1 800m,地面坡度 56%。该滑坡体沿波曲河宽度 1 600m,滑坡面积约 2.2km²。按滑坡体平均厚度约 150m 来估算,首次古滑坡的体积约为 3.2 亿 m³,实为罕见的超巨型滑坡体。滑动方向与波曲河斜交,偏向上游,为 310°。

在首次古滑坡的中后段,滑坡体的右侧边界线为一条沿 315°方向展布的陡崖。陡崖高约 150~200m。它严格受到走向为 315°的构造线的控制。

首次古滑坡的左侧边界大体上沿地层走向展布,因拉张作用而发育成为一条较顺直的沟谷。在左侧界沟可以清楚地看出,该界沟的左岸为完整而稳定的基岩坡体,坡面即为基岩层面。界沟的右岸坡体则由岩块堆砌而成,变形十分突出。

2.2 古滑坡稳定性评价

古滑坡的滑体主要由岩块组成,表部有坡积物及洪积物。除了在公路的内边坡上见有松动的孤石之外,从整体上看,古滑坡体处于稳定状态。其原因

有:1. 首次古滑坡的滑坡体前缘已滑至河底,并直抵对岸陡崖。如今的波曲河实际上是在首次古滑坡的滑坡舌之上流过,河床内的巨型块石乃是构成滑坡舌的岩块。即滑坡体前方的自由空间已不复存在。2. 构成首次古滑坡体的巨型岩块彼此镶嵌、相互咬合,使得滑坡体仍具备一定的完整性和稳定性。3. 构成首次古滑坡体的巨型岩块之间成为地下水的良好通道,有利于排泄。

3 现代滑坡的发育特征

3.1 现代滑坡基本特征

友谊桥古滑坡的原始结构仅在坡体上段还可见到,其下段经过了后期改造,许多地方发生了现代滑坡。研究中将已经解体但仍具有相同性质的一组现代滑坡体归于一个滑坡(群)。沿波曲河流向划分为 4 个滑坡(群),即 1[#]滑坡群、2[#]滑坡群、3[#]滑坡和 4[#]滑坡。它们的规模、包含滑坡体数量、发生位置、活动性、危害方式、危害程度均有差异(表 1)。

3.1.1 1[#]滑坡群的基本特征

1[#]滑坡群分布于老滑坡右部,由 6 个小型滑坡体组成,1 线公路通过 1[#]滑坡群后壁处,1 线公路内边坡即为滑坡后壁。壁高 50m,斜长 70m。在平面上,1[#]滑坡群长 510m,平均宽 410m,按平均厚度为 20m 计算,体积为 430 万 m³。

1[#]滑坡群是由 1981-06-12 波曲河支沟长藏坡沟冰湖溃决洪水冲蚀坡脚而诱发的古滑坡局部复活结果。1983 年波曲河上游堰塞湖溃决洪水(水头仅次于 1981 年洪水)再次冲蚀坡脚,坡脚失稳牵引了 1[#]滑坡群的中后部坡体下滑,加剧了滑坡活动。

1[#]滑坡群在滑动过程中,分解为多个块体。其变形活动有如下特点:①具有自前而后分级、分块逐步滑动的性质。②滑坡体的前后、左右的错裂、陡坎已经相互连通,边界清晰。发育阶段成熟,正处于剧滑阶段。③滑坡体直抵河床。河宽 10m 左右。前缘稳定性直接受到河水影响,发生大面积坍塌(含 4 处小型滑塌体),直径达 2~3m 的巨型块石及碎石夹杂着树木时有滚落。坍塌范围内的高差 40~50m,地面坡度达 50°左右。④组成滑坡体的物质结构松散。⑤滑坡体内富含地下水并多处出露,汇成小溪。⑥公路病害严重。随着前缘不断的滑塌,牵引中、后部滑动,造成公路大幅度下沉、错断。⑦滑坡后缘一带发育的几条天然冲沟的流水直接灌入本

滑坡群之内,恶化了稳定性,不仅加剧了滑坡后壁坡面的后退,而且也促使滑坡物质很容易地转化为坡面泥石流。

表 1 中尼公路樟友段滑坡(群)要素表
Table 1 The Factors of landslide group in Zhang-you section of China - Nepal Highway

编号	地面坡度 (°)	长度 (m)	宽度 (m)	平均厚度 (m)	体积 (万 m ³)	后壁高度 (m)	前缘坍塌 高度(m)	边壁错距	备注
1	35~45	510	410	20	430	40~50	60~80	4~6m,右侧高	前缘有 4 处坍塌,泉水成溪,局部出露基岩。
2	35~40	560	350	20	390	1~2	6~10	右侧为老错坎,高 1~3m;左侧无明显错动	剪出口位于高出河床 40~50m,有少量地下水出露。
3	35~40	400	280	10	110	3~4	0		至前部转化为泥石流或碎屑流。
4	25~30	460	130	10	59	3~4	2~3		在海拔 1930m 以下转化为泥石流。

3.1.1 2#滑坡群的基本特征

2#滑坡群在平面上呈长条形,紧邻 1#滑坡群,前缘达波曲河边。2#滑坡群长 560m,均宽 350m,按平均厚度 20m 计算,2#滑坡群体积为 390 万 m³。其变形活动有如下特点:1. 具有明显的纵向分级解体发育过程。后缘发育有长 5~20m 的三条地表裂缝,错距 1~2m,并有树干被拉裂的现象。中部也发育有两处错裂坎,高差 2m。表明 2#滑坡群新近仍在活动。2. 2#滑坡群前缘出露于波曲河的平水位之上,形成一道高 3~4m 的陡坎。陡坎上有地下水渗出,巨砾岩块时有塌落。3. 2#滑坡群的右侧边界可见明显的错动壁,长 350m,错距 2m。左侧以一条小冲沟为界,无明显变形迹象。4. 2#滑坡群对 1、2、3 线公路都产生了较大的危害。

3.1.3 3#滑坡群的基本特征

3#滑坡位于 2#滑坡群南侧。在平面上呈长条形,长 400m,均宽 280m,按平均厚度 10m 计算,体积为 110 万 m³。滑坡前缘至波曲河边。其变形活动主要表现在后缘发展迅速。1988 年 12 月,滑坡后缘位于 3 线公路内边坡上部(海拔 2 050m),时隔一年,滑坡后缘已发展到海拔 2 100m,即上升了 50m。现滑坡后缘已达海拔 2 250m 左右。3#滑坡的活动直接危害了 3 线、4 线、5 线公路,主要表现为后壁坍塌,掩埋了公路,并产生了 2 级高 2~3m 的错台。

3.1.4 4#滑坡群的基本特征

4#滑坡位于 3#滑坡南侧,古滑坡的左部。在平面上 4#滑坡呈狭长的窄条状,后缘不断向上发展,目前已达海拔 2 280m 一带。滑坡体长 460m,宽

130m,按平均厚度 10m 计算,体积为 59 万 m³。其变形活动有如下特点:1. 滑坡活动明显地具有牵引性质。2. 滑坡解体明显,滑体破碎。尤其是在 4 线公路一带,4#滑坡与 3#滑坡连接在一起。二者的分界线仅能从公路路基下沉幅度和残留植被的差异才可加以区分。3. 4#滑坡的后山上,残留有典型的滑坡后缘洼地。洼地中有巨型块石充填。有的块石间隙深不见底。块石之间还夹有为数不少的枯木。滑坡洼地景观说明现代滑坡病害确实是在古滑坡背景中发展起来的。4. 3#滑坡的活动危害 3、4、5 线公路,以路基沉陷为主,沉陷幅度达 3~6m,形成 3 级错台,高 3~4m。

3.2 现代滑坡的发育特征分析

现代滑坡病害发育在古滑坡的背景中,近些年滑动剧烈的现代滑坡与古滑坡相比,具有以下一些特点:

- (1)现代滑坡主要分布在古滑坡区域的下段。滑坡体后缘海拔多在 2 200m~2 300m 以下,前缘延伸至波曲河边一带。
- (2)滑坡体规模普遍较小。据物探资料分析,滑坡厚度多在 25m 以内。
- (3)滑坡活动直接受到波曲河水位涨落的影响,尤其容易受到异常洪水的诱发。
- (4)滑坡体中的细颗粒成分明显增多,岩块变小,所见岩块以 1m 左右者居多。除见有坡积物、崩积物、滑积物之外,还混有洪积物和冲积物。滑坡堆积物的内聚力一般为 7~24kPa,内摩擦角一般为 28°~37°,工程地质强度较低(表 2,3)。
- (5)滑坡具有明显的分级、分条、分块特征。

(6)多具有牵引滑动的性质。

(7)滑坡体内的地下水丰富,并时有出露。

表 2 友谊桥滑坡物理力学性质

Table 2 The physical and mechanical properties of Youyiqiao landslide

编号	含水量 A (%)	含水量 B (%)	含水量 C (%)	密度 Sr (%)	比重 Gs	饱和度 Sr (%)	孔隙率 n (%)	孔隙比 e0	压缩模量 Es (MPa)	抗剪强度					
										A		B		C	
										内摩擦角 (°)	内聚力 C (kPa)	内摩擦角 (°)	内聚力 C (kPa)	内摩擦角 (°)	内聚力 C (kPa)
1	14.9	17.1	21.2	170	2.73	48	46	0.845	11.53	31.0	24	33.2	19	35.2	21
2	12.9	16.3	19.7	1.80	2.73	49	42	0.712	12.23	33.2	18	35.3	16	37.1	19
3	18.0	22.7	25.3	1.91	2.73	72	41	0.687	14.06	28.3	16	29.8	15	31.3	17
4	17.6	21.2	25.1	1.80	2.72	62	44	0.777	12.69	32.9	8	35.1	7	37.2	9

表 3 友谊桥滑坡粒度分析

Table 3 Grain composition of Youyiqiao landslide

编号	颗 粒 组 成 百 分 比 (%)					
	砾 粒		砂 粒		粉 粒	
	>20m 粒径	20~2m 粒径	2~0.5m 粒径	0.5~0.25m 粒径	0.25~0.074m 粒径	0.074~0.05m 粒径
1	24.1	39.9	5.9	13.3	11.9	4.9
2	21.6	57.2	6.0	11.0	3.9	0.3
3	37.6	28.4	13.5	16.1	4.2	0.2
4	36.7	28.3	25.8	8.0	0.9	0.3

4 结论

友谊桥滑坡位于中尼公路樟木口岸至国界友谊桥之间,中尼公路(中国境内)最末尾一段。友谊桥滑坡每年雨季时常造成断道,严重地威胁公路的运营和口岸通道的开发。

根据地貌形态、坡体结构以及坡体稳定性等因素综合分析,友谊桥滑坡为一处巨型的古滑坡。首次古滑坡活动后,在该区域又多次发生次级的滑动,使得友谊桥滑坡具有多期、多层、多条、多块、多级的特点。首次古滑坡属岩质滑坡,体积约为 3.3 亿 m³。滑动方向与波曲河斜交,偏向上游,为 310°。古滑坡目前整体处于稳定状态。

友谊桥现代滑坡病害发育在古滑坡的背景中。沿波曲河流向可将已经解体但仍具有相同性质的现

代滑坡分为 4 个滑坡(群),即 1[#]滑坡群、2[#]滑坡群、3[#]滑坡和 4[#]滑坡。它们的规模、包含滑坡体数量、发生位置、活动性、危害方式、危害程度均有差异。4 个滑坡群都是由于波曲河洪水冲蚀坡脚,诱发古滑坡局部复活形成的。其中,1[#]滑坡群体积为 430 万 m³,2[#]滑坡群体积为 390 万 m³,3[#]滑坡体积为 110 万 m³,4[#]滑坡体积为 59 万 m³。

参考文献(References):

- [1] Tang Bangxing, Li Xianwen, Wu Jishan, et al.. Disasters and Measures of torrential flood, Debris Flow and Landslide [M]. Beijing: Science Press. 1994 [唐邦兴,李宪文,吴积善,等.山洪泥石流滑坡灾害及防治.北京:科学出版社,1994]
- [2] Liang Guangmo, Chen Zunlan, Zhang Xiaogang et al.. Mitigation of Hazards in Nie-You Section of China-Nepal Highway [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press. 2003 [梁光模,程尊兰,张小刚,等.中尼公路聂友段公路病害整改对策研究.成都:四川科学技术出版社,2003]

(本文英文摘要下转第 160 页)

Strategy on Safe-project of Water-damaged Roadbed along River in Mountain Area of Southeast Tibet

——Taking the Section of Zhongba Section of Chuan-Zang
Highway as an Example

CHENG Zun-lan^[1], LIANG Guang-mo^[2], ZHANG Zheng-bo^[2]

(1. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Water Conservancy Ministry,
Chengdu 610041 China*; 2. *Institute of Tibet Communication Science, Tibet 850000 China*)

Abstract: According to special characters in Southeast Tibet where high mountain and steep slope, rushing current, crassitude sediment on riverbed, and water-damaged roadbed exist, the paper put forward creatively the safe-project system of roadbed along river including two design print, which are sheet stone-concreted counterfort (take prefabricate board-concreted or boulder-anchored as the foundation) and caisson-style or boulder-anchored style counterfort, and some key technical problems in dealing with roadbed project along river in mountain area are discussed.

Key Words: roadbed; water-damage; safety-project; caisson-style; boulder-anchored style

~~~~~  
(上接第 142 页)

## Analysis of Development Characteristics of Youyiqiao Landslide along China-Nepal Highway

ZHANG Xiao-gang<sup>1</sup>, QIANG Ba<sup>2</sup>

(1. *Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041 China*;  
2. *Tibet Traffic Institute, Lhasa 850000 China*)

**Abstract:** Youyiqiao landslide is located at the last section which is the region between Zhangmu and Youyiqiao along China – Nepal Highway in China. Youyiqiao landslide endangers severely highway especially during rainy season every year and influents the development of port passage. Based on the analysis of landform, structure of land body and stability of slope, it can draw a conclusion that Youyiqiao landslide is a giant ancient landslide. After the first landslide activities, the slope has occurred repeated second – sliding. Youyiqiao landslide is a modern landslide which is of the characteristics of multiphase, multilayer, multistripe, multipart, multigrade.

**Keyword:** China-Nepal Highway; Youyiqiao landslide; development characteristics