

# 金沙江向家坝库区崩滑灾害的环境效应\*

胡卸文 陈明东 刘汉超 黎克武

(成都理工学院工程地质研究所 610059)

**提 要** 金沙江向家坝库区长约150km的沿江地带,共发育102个变形破坏体(含滑坡、崩塌和变形体),总体积 $15.65 \times 10^8 \text{m}^3$ 。据统计岸坡变形破坏密度 $D$ 和模数 $E$ 分别达0.34个/km和 $524.93 \times 10^4 \text{m}^3/\text{km}$ 。对崩滑灾害所处的环境特征研究表明,滑坡、崩塌与所在地质岩性、地质构造、地形条件、岩体结构特征及近期河流地质作用等环境因素共同作用有关。

**关键词** 金沙江 向家坝库区 滑坡 崩塌 赋存环境

大量崩滑灾害的发生及发展,除与外界因素(如地震、特大暴雨等)有关外,重要的是与所处的地质环境条件(又称“环境场”)密切相关,而这种赋存环境具体可引伸为地质岩性、地质构造、岩体结构类型及河流地质作用等诸个环境因素。系统研究崩滑灾害与这些环境因素的相互关系,不仅能对其成因作出剖析,而且对预测它的发生乃至进行预防和工程治理都具有重要的理论和指导意义。以拟建的金沙江向家坝水电站库区102个岸坡变形破坏体为研究实例,系统阐述这些灾害与各环境因素的相关性。

## 1 岸坡变形破坏体的发育分布状况

实地调查表明,向家坝库区岸坡变形破坏十分发育,在库区长约150km的沿江地带,岸坡变形破坏体数目102个,总体积 $15.65 \times 10^8 \text{m}^3$ 。岸坡变形破坏密度 $D$ 为0.34个/km,变形破坏模数 $E$ 为 $524.93 \times 10^4 \text{m}^3/\text{km}$ 。在102个变形破坏体中,滑坡、崩塌及变形体分别占64个,29个和9个(表1),可见无论从数量,还是发育规模,均表明库区以滑坡最为发育,崩塌次之。

根据库区变形破坏体的发育规模,可将其划分为五类,即巨型、大型、中型、较小型和小型(见表1)。库区巨型滑坡有2个,大型、中型、较小型及小型变形破坏体分别为32,42,20,6个。

进一步对表1所列数据作统计(图1),表明库区变形破坏体从数量上以大中型为主,并大致呈对称正态分布;从规模上则以大型和巨型最为发育,其体积百分比呈不对称正态分布。由此可见,无论是数量或者是规模,区内以大中型变形破坏最为发育。

从库区变形破坏体的空间分布上看,左岸共47个,总体积 $5.27 \times 10^8 \text{m}^3$ ,其 $D$ 和 $E$ 分别为0.315个/km和 $353.56 \times 10^4 \text{m}^3/\text{km}$ ;右岸55个,总体积 $10.38 \times 10^8 \text{m}^3$ , $D$ 和 $E$ 分别是0.369个/km和 $696.31 \times 10^4 \text{m}^3/\text{km}$ 。上述数据显示左、右两岸的变形破坏密度相近,但右岸的发育规模明显大于左岸。

\* 国家自然科学基金资助项目(项目号:49272153)资助。

本文收稿日期:1995-11-01,改回日期:1996-06-12。

表 2 和图 2 表明了库区不同岸段变形破坏发育状况,从中也可看出,库区下游岸坡变形破坏要比上游相对发育,其中又以坝区和绥江县城—新市镇为最发育地段,其次是Ⅱ坝线—屏山县城岸段.

表 1 向家坝库区变形破坏分类统计表

Table 1 Classification and statistics of landslides and rockfalls in Xiangjiaba Reservoir area

规模等级 (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )	滑 坡		崩 塌		变形体		变形破坏体总计	
	个数	体积	个数	体积	个数	体积	总个数	D(个/km)
	占总个数 (%)	占总体积 (%)	占总个数 (%)	占总体积 (%)	占总个数 (%)	占总体积 (%)	总体积	E(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /km)
巨型 (>10000)	2 3.12	53040.00 40.37	—	—	—	—	2 53040.00	0.007 177.93
大型 (1000—10000)	26 40.62	67428.00 51.32	5 17.24	11198.20 62.12	1 11.12	6000.00 84.76	32 84626.20	0.107 283.88
中型 (100—1000)	24 37.50	10535.70 8.03	16 55.17	6592.55 36.58	2 22.22	1012.50 14.31	42 18140.75	0.141 60.85
较小型 (10—100)	10 15.63	364.74 0.28	7 24.14	226.70 1.26	3 33.33	60.60 0.86	20 652.04	0.067 2.19
小型 (1—10)	2 3.12	12.81 0.01	1 3.45	7.05 0.04	3 33.33	4.83 0.07	6 24.69	0.020 0.08
累计	64 100	131381.25 100	29 100	18024.50 100	9 100	7077.93 100	102 156483.58	0.342 521.58

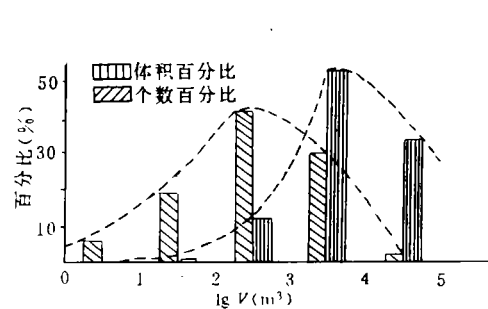


图1 变形破坏体个数与体积统计直方图  
Fig. 1 Statistical histogram of deformed or failed rock mass quantity and their volumes on bank slopes

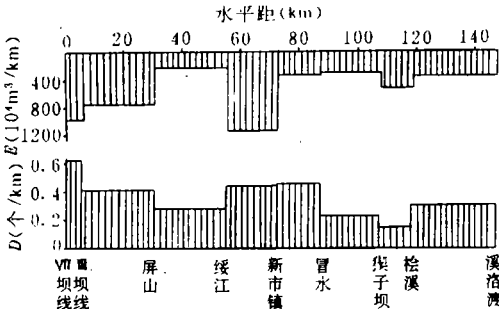


图2 库区岸坡变形破坏发育分布状况图  
Fig. 2 The distribution of deformed and failed rock masses on bank slopes in Xiangjiaba Reservoir

表 2 库区岸坡变形破坏发育分布统计表

Table 2 The distribution of deformed and failed rock masses on bank slopes in Xiangjiaba Reservoir area

岸 段 名 称	岸线长度(km)	变形破坏数目(个)	体积(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )	D(个/km)	E(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /km)
Ⅵ坝线—Ⅰ坝线	11.3	7	10951.60	0.619	969.168
Ⅰ坝线—屏山县城	50.7	21	10951.60	0.619	969.168
屏山县城—绥江县城	49.6	14	11718.44	0.282	236.250
绥江县城—新市镇	34.1	15	38477.15	0.440	1128.360
新市镇—冒水	28.9	13	10915.35	0.450	377.690
冒水—獐子坝	42.7	10	13455.23	0.234	315.100
獐子坝—桧溪	20	3	10504.88	0.150	525.240
桧溪—溪落渡	60.8	19	21956.20	0.313	361.120
整个库区	298.1	102	156483.58	0.342	524.930

2 岸坡变形破坏的环境效应

岸坡变形破坏是多种内外环境因素综合作用的结果,为了掌握库区岸坡变形破坏的形成和演化规律,以便提出合理的预防和治理措施,有必要对这种崩滑灾害与其所赋存的环境诸要素进行相关分析,得出环境对岸坡变形破坏综合效应的基本规律.

2.1 与地层岩性的相关性

据调查,向家坝库区岸坡基岩地层出露较为齐全,除石炭系(C)缺失外,从寒武系(Є)到侏罗系(J)均有不同程度的出露,从岩性组合可将库区岸坡基岩地层归纳为碎屑岩岩组、碳酸盐岩组和火山岩岩组三大类. 碎屑岩岩组包括侏罗系( $J_{2m}, J_{2s}, J_{1-2s}$ )、三迭系( $T_{3s}, T_{1f+t}$ )和志留系( $S_{1f}$ )地层;火山岩岩组仅有二迭系峨眉山玄武岩( $P_2\beta$ )地层,其余均属碳酸盐岩组. 统计结果表明(表3),不同地层的岸坡变形破坏程度也不相同,侏罗系自流井组( $J_{1-2s}$ )、二迭系乐平组( $P_{2f}$ )、寒武系下统( $Є_1$ )地层  $D$  最高,分别为0.805,0.732和0.909(个/km). 而  $E$  则以侏罗系沙溪庙组( $J_{2s}$ )、自流井组( $J_{1-2s}$ )、志留系龙马溪组( $S_{1f}$ )为最大,分别为905.060,1166.852和958.125( $10^4m^3/km$ ).

表3 岸坡变形破坏与地层关系统计表

Table 3 Correlative statistics of deformed or failed rock masses and their stratum on bank slopes

岩性组合	地层代号	出露长度(m)	数目(个)	体积( $10^4m^3$ )	$D$ (个/km)	$E$ ( $10^4m^3/km$ )	$R$
碎屑岩岩组	$J_{2s}$	25.25	6.0	4107.30	0.238	162.665	0.200
	$J_{2s}$	70.15	20.0	63490.35	0.285	905.066	0.545
	$J_{1-2s}$	14.90	12.0	17386.10	0.805	1166.852	0.943
	$T_{3sj}$	70.70	28.0	20369.20	0.396	288.107	0.341
碳酸盐岩组	$T_{2f}$	33.85	5.0	6923.85	0.148	204.540	0.159
	$T_{1f}$	41.05	4.0	7966.03	0.097	194.057	0.137
碎屑岩岩组	$T_{1f+t}$	53.80	7.5	7846.93	0.139	145.854	0.140
碳酸盐岩组	$P_{2f}$	2.05	1.5	482.58	0.732	235.405	0.504
火山岩岩组	$P_{2\beta}$	16.35	3.0	6199.26	0.183	378.487	0.263
碳酸盐岩组	$P_1$	20.45	5.5	11127.97	0.269	544.150	0.381
	$S_{2s}$	8.30	1.0	1534.50	0.120	184.880	0.145
碎屑岩岩组	$S_{1f}$	4.80	2.5	4599.00	0.521	958.125	0.697
碳酸盐岩组	$O_{2+3}$	3.60	0.5	864.00	0.139	240.000	0.179
	$O_1$	3.90	1.5	865.25	0.385	221.859	0.307
	$Є_{3c}$	6.85	1.5	1495.20	0.219	218.277	0.214
	$Є_{2s}$	2.75	1.5	1112.06	0.545	404.385	0.473
	$Є_1$	1.10	1.0	125.00	0.909	113.636	0.549

为了综合反映岸坡变形破坏与地层的相关性,这里提出综合关系值  $R$  的计算公式

$$R_i = (D_i/D_{max}) \cdot a + (E_i/E_{max}) \cdot b \quad (0 < R_i \leq 1),$$

式中  $D_i, E_i$  分别指某地层岸坡变形破坏密度和模数;  $D_{max} = \text{Max}(D_i), E_{max} = \text{Max}(E_i)$ ;  $a, b$  为权重系数,这里分别取0.5.

按上述计算式所得的综合关系值见表3. 可见侏罗系  $J_{1-2s}$  地层是库区岸坡变形破坏最易发生的地层,其  $R=0.943$ ;其次是志留系  $S_{1f}$ 、二迭系  $P_{2f}$  和寒武系  $Є_1$ 、侏罗系  $J_{2s}$  地层,相应  $R$  分别为0.697,0.549,0.504和0.545. 岸坡变形破坏与地层的上述关系,归根结底还是由其岩性及组合控制. 从表3还可看出,碎屑岩岩组的岸坡变形破坏强度要明显大于

碳酸盐岩组。其原因是:由碎屑岩岩组构成的岸坡,往往含有大量泥岩夹层和炭质页岩与煤层的软弱层面,而库区碳酸盐岩组和火山岩岩组的整体强度较高,则常构成高陡的峡谷岸坡。正是由于碎屑岩岩组中软弱层带(面)的存在,其强度特性差,而易使岸坡失稳<sup>[1]</sup>。

2.2 与地质构造的关系

2.2.1 褶皱区岸坡变形破坏的发育规律

据区域地质构造格局,将库区分成4个背斜单元和5个向斜单元(表4)。表中黄毛坝背斜区的岸坡变形破坏最为发育,其次是屏山向斜和绥江向斜区。从总体上看,发育在向斜和背斜区的岸坡变形破坏体数分别为43,59(个),累计体积分别为 $5.10\times 10^8\text{m}^3$ 和 $10.55\times 10^8\text{m}^3$ , $D$ 分别为0.388个/km和0.315个/km, $E$ 分别为 $459.600\times 10^4\text{m}^3/\text{km}$ 和 $563.640\times 10^4\text{m}^3/\text{km}$ 。由此可见,向斜区和背斜区岸坡变形破坏密度大致相同,但发育在向斜区的岸坡变形破坏体规模比背斜区大,从变形破坏类型上看,向斜区以滑坡为主,且规模较大,如库区规模上亿立方米的滑坡(珍珠坝和东爷庙滑坡)都分别产生在绥江和屏山向斜中;而在背斜区却以崩塌最为常见。

表 4 褶皱区岸坡变形破坏发育状况统计表  
Table 4 The distribution of landslides and rockfalls in folded belt

褶皱名称	轴 向	沿江出露长度(km)	数目(个)	累计体积( $10^4\text{m}^3$ )	$D$ (个/km)	$E$ ( $10^4\text{m}^3/\text{km}$ )
向家坝背斜	75°	16.9	8	10954.76	0.473	648.21
屏山向斜	70°	59.7	25	42817.38	0.419	717.21
龙桥背斜	350°	14.4	4	3087.53	0.278	214.41
绥江向斜	355°	54.6	20	42792.46	0.366	783.74
一龙背斜	15°	29.0	13	10915.35	0.448	376.39
芭蕉滩背斜	355°	42.2	10	13455.23	0.237	318.84
桧溪向斜	330°	30.3	5	10729.67	0.165	354.11
黄毛坝背斜	335°	8.4	8	12556.20	0.952	1494.78
永盛向斜	85°	42.6	9	9175.00	0.211	215.38

2.2.2 与岩层倾角的关系

由于库区出露地层均属层状结构,故地层中的原始层面(软弱层面)往往构成岸坡变形破坏的主控面,而这些层面所起作用的大小又主要取决于岩层面向临空方向的倾角。统计结果表明,顺向坡中以滑坡为主,而逆向坡中则以崩塌为主。在顺向坡地层中,大型滑坡大多发生于 $\alpha<20^\circ$ 的范围内。在对长江三峡顺层斜坡的数值模拟表明<sup>[2,3]</sup>,当 $\alpha$ 为 $10^\circ\text{--}20^\circ$ 时,岸坡的蠕变深度达到最大值,这一结论可以解释上述岩层倾角范围内顺层坡的变形破坏规律。在逆向坡中,崩塌、滑坡则主要集中于 $\alpha$ 为 $10^\circ\text{--}20^\circ$ 的范围内。

2.3 与地形条件的关系

研究表明,地形条件也是岸坡变形破坏的一个重要环境因素,其中岸坡坡角( $\beta'$ )和坡高( $H$ )是反映地形条件的基本参数。

2.3.1 与岸坡坡角的关系

统计结果表明,岸坡变形破坏主要发育在坡角 $\beta'$ 为 $10^\circ\text{--}50^\circ$ 范围内(图3),崩塌主要发育在 $\beta'$ 为 $35^\circ\text{--}50^\circ$ 的岸坡中,由此可得出坡角 $\beta'$ 为 $35^\circ$ 作为产生崩塌的下限值,也即相

当于松散体的自然休止角。现场调查还发现,当 $\beta' > 50^\circ$ 时,主要以小规模分散的方式产生崩落,事实上库区现存的较大型崩塌堆积体,也正是多次崩塌堆积的结果。

图3还显示出 $\beta'$ 为 $25^\circ$ — $40^\circ$ 是滑坡发育的相对密集区,且以中型滑坡居多。 $\beta'$ 为 $10^\circ$ — $20^\circ$ 则以中—大型滑坡为主,当 $\beta' > 45^\circ$ 时,一般很少见滑坡发育,故可以将 $\beta' = 45^\circ$ 作为发生滑坡的坡角上限值。

### 2.3.2 与坡高的关系

统计资料表明,岸坡变形破坏与坡高关系也较密切。岸坡变形破坏主要发育在坡高 $H$ 为100—800m的范围内,且坡高与变形破坏体体积的对数值有良好的线性关系,其关系式为

$$H = 200(\lg V - 5 \pm 1.05) (H < 600\text{m}),$$

式中  $H$  为坡高; $V$  为变形破坏体体积。

### 2.4 岸坡变形破坏与河流冲刷作用的关系

库区两岸其发育的64个滑坡,除少数几个滑坡剪出口高于洪水位外,大部分滑坡的剪出口均位于金沙江洪、枯水位变动带内,说明这些滑坡的发生与近期河流冲刷作用有密切的关系,同时也表明库区金沙江河谷在I级阶地形成以来为滑坡相对活跃期。

库区内金沙江蜿蜒曲折,与岩层走向构成了不同的夹角。岸坡变形破坏与河流走向和岩层走向的夹角大小,也间接反映出河流冲刷作用对岸坡变形破坏的影响。调查表明,岸坡变形破坏主要发生在河流走向与岩层走向的夹角为 $0^\circ$ — $25^\circ$ 和 $50^\circ$ — $90^\circ$ 范围内。

## 3 结 论

通过对拟建的金沙江向家坝水电站库区,所发育的滑坡、崩塌和变形体成因及其环境场研究,表明这些灾害的发生与其所处岸坡的基本环境因素有如下相关特点:

1. 由侏罗系自流井组等碎屑岩岩组组成的岸坡,发生崩塌、滑坡的可能性及破坏强度明显大于由三迭系嘉陵江组等碳酸盐岩岩组构成的岸坡。

2. 向斜区和背斜区的岸坡变形破坏密度大致相同,但发育在向斜区的崩滑体规模要大于背斜区;向斜区主要以滑坡为主,而背斜区则以崩塌最为常见。

3. 地形条件也是岸坡发生崩塌灾害的一个重要因素。统计表明,岸坡变形破坏主要发育在坡角 $10^\circ$ — $50^\circ$ 的范围内,而崩塌主要发育在 $\beta'$ 为 $35^\circ$ — $50^\circ$ 的岸坡内; $\beta'$ 为 $25^\circ$ — $40^\circ$ 则是滑坡发育的相对密集区。

4. 大多数滑坡剪出口均位于金沙江洪、枯水位变动带内,表明这些滑坡的发生与近期河流水动力条件密切相关,同时也反映出库区金沙江河谷在I级阶地形成以来为滑坡等灾害的相对活跃期。

5. 崩滑灾害的形成乃至发生并不是上述某一环境因素单独作用所致,而是相互作用

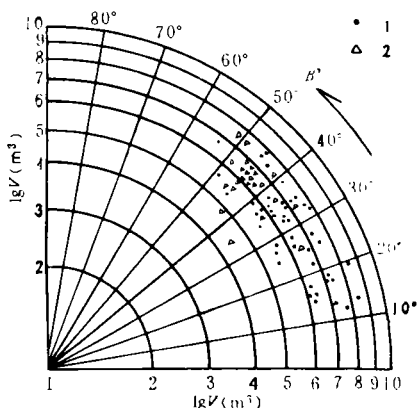


图3 岸坡变形破坏体积( $V$ )与坡角( $\beta'$ )相关散点图

Fig. 3 Correlative map of landslides or rockfalls and their slopes angles

而表现出的综合效应,它们是崩滑发生的充分条件. 正确认识崩滑灾害的这种环境效应,将有助于认识崩塌和滑坡的形成机理,并提出相应的治理和预防措施.

### 参 考 文 献

- [1] 张倬元等. 工程地质分析原理. 北京:地质出版社,1994. 308—383.
- [2] 地矿部成都水文中心等. 长江三峡工程库岸稳定性. 北京:科学出版社,1992. 86—99.
- [3] K. M. Liu. On the sliding-bending model of rockmass deformation and failure on slope, Proceedings of Vth International Symposium on Landslide, Swiss, 1988. 112—117.

## ENVIRONMENTAL EFFECT ON GEOLOGICAL HAZARD OF LANDSLIDES AND ROCKFALLS IN XIANJIABA RESERVOIR AREA, JINSHA RIVER

Hu Xiewen   Chen Mindong   Liu Hanchao   Li Kewu  
(*Chengdu Institute of Technology   Chengdu   610059*)

### Abstract

Comprehensive investigation and systematic research on the deformation and failure of rock mass on the bank slopes in Xiangjiaba Reservoir area of Jinsha River have been conducted. It has been found that there are 102 landslides, rockfalls and deformed rock masses occurred on the 150km long valley slopes along Jinsha River from Xiangjiaba upstream to Xiluodu. The total volume of them is about  $15.65 \times 10^8 \text{m}^3$ . The average linear density of deformation and failure is  $0.34 \text{km}^{-1}$  and average linear modulus of deformation and failure is about  $524.93 \times 10^4 \text{m}^3/\text{km}$ .

Through investigation its evident that these landslides, rockfalls are correlated with their structural types of bank slopes, stratas rock property, geological structure, topographic change and recent geological function of river.

**Key words**   Jinsha River, Xiangjiaba Reservoir Area, landslide, rockfall, environmental effect