

# 天生桥二级水电站工地滑坡成因分析

夏其发 陆家佑

(水利电力部水利水电科学院)

## 一、前言

天生桥滑坡位于广西隆林县坝索村南盘江右岸一级残留阶地后缘,是由于在天生桥二级水电站首部枢纽进水口拦沙坎上游右岸修建挡土墙时发生的。滑坡发生于1985年12月24日下午3时23分,总方量为7,000余立方米,属于坐滑式滑坡类型的堆积层滑坡。

影响边坡失稳的主要因素是:

- 1、堆积层底部与基岩面之间,分布有一层砂质淤泥层,成为滑床;
- 2、地表水及地下水的活动,使砂质淤泥层常处于饱和状态;
- 3、基坑开挖后,坡脚的坡度一般达到 $50^\circ$ 以上,并使砂质淤泥层形成临空面;
- 4、坡顶部位堆碴以及动荷载的冲击影响。

这次滑坡的产生是上述四种因素综合作用的结果,动荷载的冲击是主要触发因素。

## 二、滑坡区的地质背景及工程地质条件

(一) **地质背景**。滑坡区位于尼拉背斜南翼、坝盘复向斜的北翼及 $F_0$ 断层的下盘。背斜、向斜的轴向近东西,岩层总的走向为北西西,倾向南西,即倾向上游偏向河床,倾角一般为 $30^\circ-50^\circ$ ;  $F_0$ 断层走向北东,倾向南东,倾角 $85^\circ$ ,压扭性,顺河流发育(图1)。

基岩主要由中三迭统边阳组( $T_{2b}$ )与江洞沟组( $T_{2j}$ )的灰岩与砂岩、页岩组成,边阳组与江洞沟组系同生异相,所以左岸以灰岩为主,右岸则为砂岩、页岩夹灰岩。第四系覆盖层主要由冲积的砂质粘土,砂卵砾石及淤泥,崩坡积的块石、碎石及粘土等组成;前者分布在河漫滩及一级阶地,后者分布在山坡及一级阶地的后缘。

(二) **工程地质条件**。滑坡区位于天生桥峡谷与坝索峡谷之间的河湾凹岸。峡谷深切而狭窄,相对高差达600米以上;河湾段长约1.1公里,河谷开阔约500米左右,发育有漫滩与一级阶地。一级阶地的阶面高程为642米左右,高出枯水期河水位约22米,其左岸阶地宽阔平整,最宽约200米,后缘陡崖下为崩坡积的块石所堆积;右岸由于洪坡积物的堆积,并受到河流的冲刷,残存的阶面宽不到30米,台面欠整齐,后缘斜坡由基岩与崩坡积物组成,坡高大于400米,自然坡度 $25^\circ-40^\circ$ 。斜坡发育有9条冲沟,自上游到下游分别为1—9号冲沟。由于冲沟切割与斜坡变形作用,坡面地貌呈鼻梁状山包和凹槽相间出现。滑坡区就位于6号冲沟上游150米残留的一级阶地后缘(图1)。

滑坡地段的工程地质岩组,自上至下为:

第四系覆盖层主要由冲坡积与人工堆积物组成(图2上):

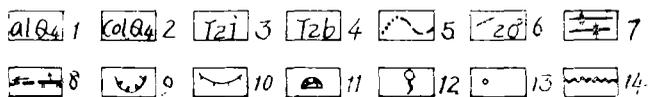
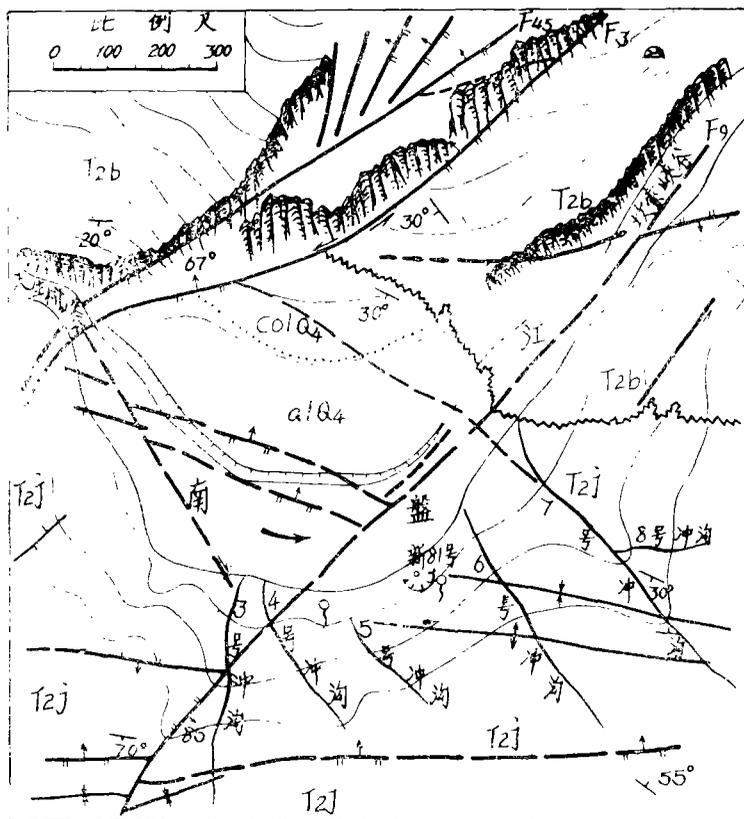
- 1、人工堆积的碎石夹土,厚约7米;
- 2、坡积的砂质粘土夹碎石,厚3—15米;
- 3、冲积的中细砂,厚10—11米;
- 4、冲积的亚砂土夹碎石,厚3.38米;
- 5、冲积的灰黑色砂质淤泥,厚3.82米;
- 6、冲积的砂卵石,厚约2.0米。

各层的力学参数,据水利电力部贵阳勘测设计院计算结果如表1。基岩主要为中三迭统江洞沟组的页岩夹砂岩及少量灰岩,弱风化层厚7.36米,基岩面倾向河床偏上游,岩面倾角约20°。

(三)水文地质条件。滑坡区的年平均气温13°—20.5℃,多年平均降水量为1,145毫米,暴雨多集中在6—9月。洪水期最高河水位为631.46—634.62米,枯水期的最低河水位为620.4—621.1米。常年河水位高程为621米左右。

表1

土料名称	容重( $\gamma$ ) ( $t/m^3$ )	摩擦系数 ( $f$ )	摩擦角 ( $\phi^\circ$ )	凝聚力( $C$ ) ( $t/m^2$ )
人工堆筑土	1.85	0.4	21.8	2.0
坡积土	1.85	0.4	21.8	0.0
中细砂	1.85	0.33	20.8	3.0
砂质淤泥	1.85	0.18	10.2	3.5
砂卵石	1.90	0.45	24.22	0.0



1—冲积砂卵石; 2—崩塌积块石夹粘土; 3—砂岩、页岩夹灰岩; 4—灰岩夹页岩; 5—地层界线; 6—地层产状; 7—背斜向斜; 8—断层; 9—滑坡体; 10—一级阶地; 11—溶洞; 12—泉水; 13—钻孔及编号; 14—相变带。

图1 天生桥地质略图

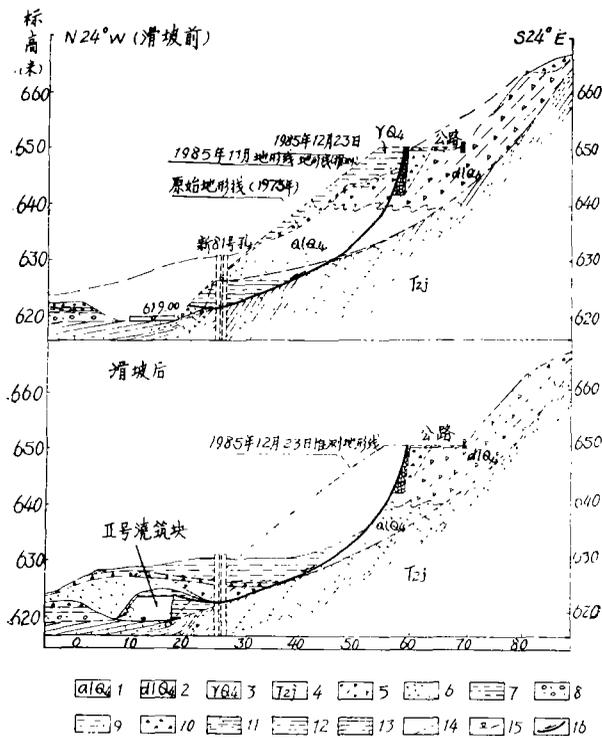


图2 天生桥滑坡(前后)地质剖面图

- 1—第四系冲积层；2—第四系坡积层；3—第四系人工堆积；4—三迭系江洞沟组；5—粘土夹块石；6—中细砂；7—砂质淤泥；8—卵砾石及砂；9—弃碴；10—人工堆积；11—砂岩；12—页岩；13—灰岩；14—岩层界线；15—地下水位(推测)；16—滑动面。

滑坡地段的地下水，主要来自地表水及基岩裂隙水补给，洪水期还受到河水的影响。基岩裂隙水多埋藏在强风化带内。地表水主要来自6号冲沟，经常有水顺公路面向上游方向排泄，而滑坡体顶部路面较低(高程约650米)，又是一段填方路基，故地表水多从此渗入地下流入滑坡体内。同时在滑坡体下游约20米、高程625米处有泉水流出，流量随季节变化。又据1982年11月的新81号钻孔，在终孔时测得的地下水位为623.27米。从这点可以说明，当时的地下水位应高于砂质淤泥层的顶面。

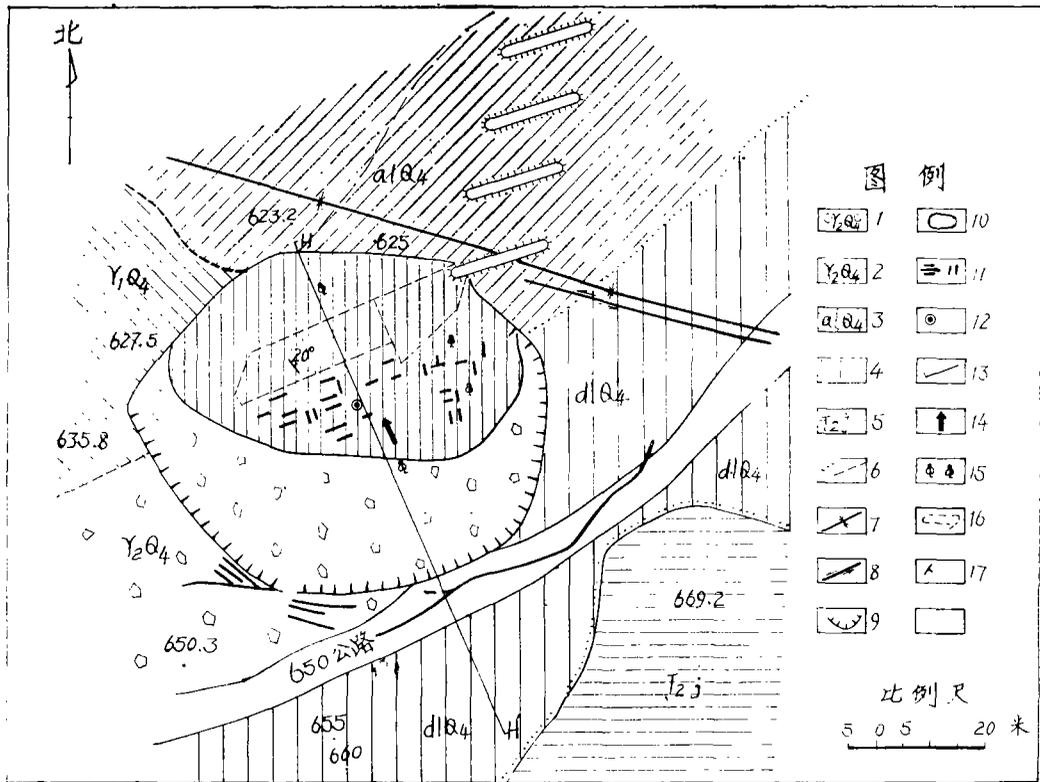
### 三、滑坡前后边坡各种条件的变化

滑坡时，正值该区的旱季，所以在12月1—24日降雨仅2次，共6毫米。据广西、云南两省区的地震记录，在此期间该区未发生有感地震，所以说该滑坡未受到降雨和地震的影响。同时也未受到本地区施工爆破的影响(因滑坡发生在放炮时间之前7分钟)。

滑坡前(指1985年11月以前)，坡顶高程为645米，自然边坡的坡度，上部(指新81号孔以上部位)约30°；下部(指新81号孔以下部位)小于15°；到12月20日由于堆碴，坡顶高程高到650米，比原来增高5米，坡度增大到40°以上(图2上)。到12月23日，基坑继续开挖到619—620米高程时，斜坡坡脚的坡度一般都大于50°，同时基坑在排水，使得斜坡的地下水位猛降，由626米左右(指位于淤泥层顶部)降到620米左右，并见到淤泥层下部的砂卵石层中有清水流出；到24日下午3时23分发生了滑坡。

滑坡发生前，在12月20日由于受到300米以外放炮的影响，松散堆碴坡的表层曾发生过400立方米的坡面塌滑。虽然在塌滑后加强了边坡变形的监视，但并没有设立半固定的标尺或标桩，也没有采用仪器监测，仅由安全人员用目视的方法监视。滑坡前虽有征兆，但限于简陋的观测手段和方法，要在松碴边坡上发现滑移或拉裂的迹象是困难的。

滑后的滑体平面似椭圆形，长约63米，宽约36米，最大厚度约10米，滑落高差约20米，滑坡总方量约7,115立方米(见图3)。据地物的最大滑距(约50米)与方向分析，其主滑方向约北西25°。滑后在坡顶公路面上发现有一条宽1—5厘米的张裂缝，裂缝呈弧形锯齿状，与下面滑坡体轮廓基本相似，表明公路部分路基已发生变形。在后缘滑壁上有明显的滑痕。



1—弃碴；2—人工堆积；3—冲积物；4—坡积物；5—三迭系江洞沟组；6—地层界线及推测界线；7—一向斜；8—平移断层；9—滑坡后缘线；10—滑坡体；11—滑坡体上的横向纵向裂缝；12—新81号钻孔；13—剖面线；14—滑坡方向；15—滑坡前后的大树位置；16—挡墙设计轮廓线；17—岩层产状。

图2 天生桥滑坡区平面地质图

#### 四、滑坡成因分析

(一) 滑坡稳定计算。滑坡发生后，在滑坡堆积体内取灰黑色砂质淤泥土样做了饱和快剪试验，其 $f=0.18$ ， $c=0.35$ 公斤/平方厘米；并由水科院岩土所，在贵阳院提供的计算参数和剖面，采用堆碴和不堆碴、挖坡和不挖坡的组合进行不同滑面形式的计算。关于地下水影响，因无具体资料，故在计算中未考虑。图4与表2的稳定计算方法，采用水科院陈祖煜同志所编“土石坝边坡稳定分析程序《STAB》”进行。计算结果见表2。计算结果表明，在坡顶没有堆碴的情况下，基坑开挖切坡脚与不切坡脚的安全系数，分别是0.966和1.006，均在1.0左右，说明已处于临界稳定状态。在有堆碴的情况下，稳定安全系数降为0.923和0.933以下，即失稳状态。

(二) 造成滑坡的主要因素分析。我们认为，这次滑坡主要是由于坡脚存在着砂质淤泥层、地表水和地下水活动、基坑开挖、边坡顶部增加荷载等综合因素造成的。

1、灰黑色砂质淤泥层的影响。据新81号钻孔资料，在625.99—622.17米高程有一层厚3.82米的灰黑色砂质淤泥。据滑坡后的资料分析，该层呈透镜状分布，向岸边方向直接覆盖在基岩面之上，向河床方向，其下部有一层厚约2米的砂卵石层；其下伏的基岩面是一个倾向河床的斜面，倾角约 $14^\circ$ ，形成不利的滑面（图2下）。砂质淤泥层底面高程622.17米经常浸在水下，在这种

表2

天生桥滑坡稳定计算结果表 (浦琬华、陈祖煜制)

计算剖面图号	稳定计算方法	土料名称	r		$\phi$ (°)	r t/m <sup>2</sup>	状态 计算方法	有堆碴		无堆碴	
			t/m <sup>2</sup>	r				不挖坡	挖坡	不挖坡	挖坡
4-1	根据滑裂面形状可以认为滑裂面是一圆弧,用毕肖普方法、瑞典圆弧法和改良瑞典圆弧法进行计算(计算坐标见图1)。圆中心在计算座标中是: x = 47.0, y = -18.0	新堆土	1.85	0.40	(21.8)	2.0	毕肖普法	0.848	0.829	0.971	0.947
		旧堆土	1.85	0.40	(21.8)	2.0	瑞典圆弧法	0.809	0.793	0.940	0.919
		坡积土	1.85	0.40	(21.3)	0.0	改良瑞典圆弧法	0.838	0.818	0.964	0.938
		砂土	1.85	0.38	(20.3)	3.0					
		砂质粘土	1.85	0.18	(10.2)	3.5					
		河卵石、砾石、河砂	1.90	0.45	(24.22)	0.0					
4-2	滑裂面形状是非圆弧的,用改良瑞典法及摩根斯顿—波赖斯方法。	新堆土	1.85	0.40	(21.8)	2.0	改良瑞典法	0.933	0.923	1.006	0.996
		旧堆土	1.85	0.40	(21.3)	2.0	摩根斯顿—波赖斯法	0.917	0.909	0.989	0.981
		坡积土	1.85	0.40	(21.8)	0.0					
		砂土	1.85	0.38	(20.8)	3.0					
		砂质粘土	1.85	0.13	(10.2)	3.5					
		河卵石、砾石、河砂	1.90	0.45	(24.22)	0.0					

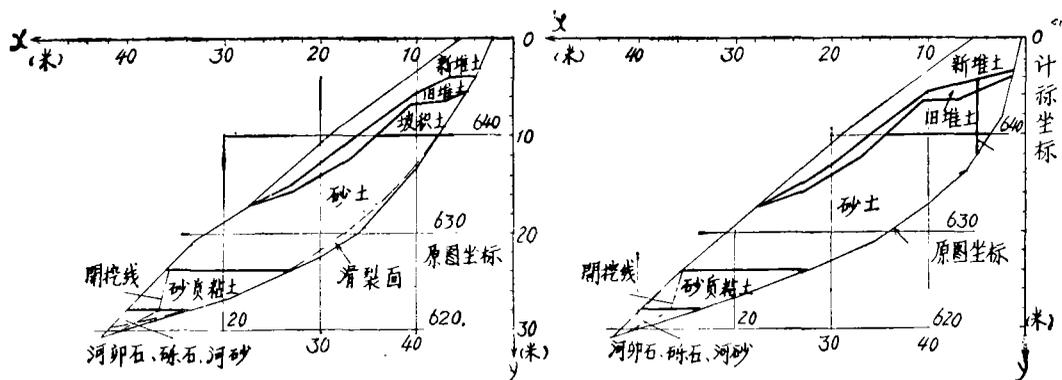


图4 稳定计算剖面

情况下,该层的力学指标较低,就滑后在滑体内所取的土样试验结果,其值仅为 $f = 0.18, c = 0.35$ 公斤/平方厘米。若在饱水状态下,其值应更低。同时在约30米高的边坡土体压力下,以及坡脚开挖、排水等,使边坡条件改变,堆积体所受的应力已超过土体极限强度,而产生剪切破坏,遂导致滑坡。据滑坡目击者供述:“滑坡体似洪水从溢流坝面过水一样,越过混凝土浇筑块”,滑坡堆积体前缘越过基坑13米(图2下、图3)。并据事后开挖剖面揭示,滑坡堆积体层次分明,其上下层位排列顺序与新81号钻孔的柱状剖面近似,底部滑面应在砂质淤泥层底部与基岩接触的斜面。所以砂质淤泥的存在是形成滑坡内在的主要因素。

2、地下水和地表水的影响。从该区的水文地质条件分析,地下水主要来自6号冲沟地表水的补给,6号冲沟经常有水向滑坡区漫流,并渗入地下。滑坡前河水位为623.76米,坡脚又经常受地下水浸泡,使砂质淤泥层经常处于饱和状态,增加了土体容重,降低了土体的力学强度,对边坡稳定造成威胁。当基坑开挖排水,切断土层坡脚后,改变了地下水出逸比降,增加了对砂质

# 新滩滑坡的变形发育和临阵预报

骆培云

(湖北省岩崩调查处)

## 一、新滩滑坡的变形发育阶段

(1) **潜伏孕育阶段(1964年秋以前时间)**。新滩滑坡的物质成分为崩坡积物。姜家坡以下(包括姜家坡)广为耕地和柑橘林。新滩滑坡的早期形变,要反映到地表是难以察觉的。直到1964年秋季,姜家坡地表出现明显的形变之前,新滩滑坡上段的变形,是堆积物深部碎屑物的缓慢位移和调整(也即蠕变),是潜伏在地表下进行的。这并非说没有反映到地表,而是这个阶段的形变量有限,加之是松散的堆积体,在地表不易被察觉。由于滑体深部物质的变化,已经孕育着滑坡的产生。我们称这一阶段为新滩滑坡的潜伏孕育阶段。

(2) **明显发育阶段(1964—1980年)**。由于深部物质的调整和位移增大,同时不断地向地表逼近,并加大形变量。由于地表上松散堆积体的间隙调整已达到最大量,就使得受深部物质位移和调整的最大地段(也即最薄弱地段),不断地形变的积累,地表就展现出形变特征。1964年秋季降雨后,九盘山、广家崖发生了10多万立方米的岩崩之后,在姜家坡西侧出现了一条长450米、宽淤泥层的动水压力,进一步恶化了边坡稳定条件。

3、**基坑开挖切断坡脚的影响**。基坑开挖面积约500平方米,深度3—8米,在基坑开挖还没有切断坡脚和砂质淤泥层时,边坡还处于临界稳定状态;到23日基坑全部挖完后,砂质淤泥层全被切割临空。据基坑竣工图,坡脚开挖坡度为 $27^{\circ}$ — $72^{\circ}$ ,一般均大于 $50^{\circ}$ ,使坡脚阻力解除。这也是造成滑坡的外界因素之一。

4、**坡顶堆碴与动荷载的影响**。在基坑开挖前边坡顶部堆了碴,使原来的坡顶增高了5米,坡度由原来的 $30^{\circ}$ 改变为 $40^{\circ}$ ,而坡脚的坡度又大于 $50^{\circ}$ ,使整个滑坡体上部荷载猛增(图2上)。同时在滑坡前采用15吨自卸汽车自坡顶向溜槽倾倒混凝土,对坡顶又增加了冲击动荷载。滑前刚倾倒了两车混凝土,受堆碴静荷载与汽车倒混凝土的动荷载的冲击影响,破坏了边坡的临界稳定状态,触发了边坡的滑动。这是外界的主要触发因素。

## 五、结束语

这次滑坡虽然规模不大,但却给人们造成了惨痛的教训。从其地形、地貌条件来看,是不具备滑坡条件的;从地层岩性上看,在坡脚部位虽分布有一层砂质淤泥(勘测单位定为砂质粘土)透镜体,但由于建筑物是一座高度不大(20—30米)的护岸挡土墙,因而被人们所忽视,从而发生了不应该发生的滑坡事故。所以我们认为,在边坡开挖过程中,不论其规模大小,都应该重视其边坡的地质结构和稳定条件,采取合理的施工对策,方能收到安全施工,保证工程质量的效果。