

铜街子水电站新华台地滑坡群研究

王治华 孔祥怡

(中国科学院成都地理研究所 水利电力部成都勘测设计院)

四川大渡河中游末端，铜街子水电站坝轴线下游的左岸，为一片平缓的台地。因它位于四川省乐山市福祿区新华乡，故称之为新华台地。

对这片台地的成因，各家有不同看法。前期水电站的地质勘探工作者认为，新华台地是第四纪冰川融冻的产物，仅表面有塌滑现象。所以在原初步设计中，将左坝肩及主要水工建筑物均布设在新华台地上。

1980年底至1981年初，中国科学院成都地理研究所滑坡研究室受水利电力部第七工程局委托，到新华台地调查斜坡变形原因。

经地面调查和物探工作后，根据大量资料判定，新华台地由南北两个特征不同的滑坡群组成：北区滑坡群处于整体活动中；南区滑坡群由全新世晚期的一次大滑坡解体及牵引周围坡体，使其失稳而形成。目前整体已经稳定，但处于临界平衡状态，安全储备不高。

嗣后，水利电力部成都勘测设计院第三勘测队和第七工程局又做了大量的勘探及测量工作。这些工作不但进一步证实了新华台地为一老滑坡群，而且还详细地揭示了滑坡堆积和滑坡面的各种特征。据此，修改了原初步设计，采取了一系列滑坡防治措施，主要有：

- 1、主要建筑物避开危险地段。如将左坝肩移到1号沟（滑坡区以外），将导流明渠搬到河漫滩上等；
- 2、对无法避开的水工建筑物，按滑坡基础处理，采用沉井、钢板桩、挡墙等抗滑工程；
- 3、注意排水；
- 4、施工时谨慎开挖，边挖边加固。

这些措施使该电站施工得以顺利进行，避免了可能由滑坡引起的灾难性恶果。下面介绍新华台地滑坡群的初步研究。

一、地质概况

新华台地在大地构造单元上属川滇南北向构造带与四川盆地北东向构造带的交接部位，其区域构造位置在北东向紫斗村倾伏背斜东南翼，并处于南北向喻坝短轴背斜向北倾伏端。

本区受邻近震中影响，属地震波及区。地震基本烈度为7度。区内历史记载，发生5级以上的地震29次。本区及附近没有区域型大型断裂存在。

区内出露地层由老至新有：1、上二迭系峨眉山玄武岩（ $P_{2\beta}$ ），系陆相溢出之岩流，总厚度约200米，可分为五大层，各层岩相特征大致相似。自上而下可分为顶部相、内部相、底部相，原生层状节理及短粗柱状节理较发育；2、沙湾组砂页岩（ P_{2s} ），系一套内陆湖相沉积，总厚

度120—160米，自下而上可分为三大层：第一层底部为紫红色铁质粘土岩，其上为灰绿色高岭石粘土岩、灰色砂岩和薄煤层；第二层以灰绿、灰白等杂色泥岩为主；第三层灰绿色砂岩、粘土岩为主，中上部有薄层劣质煤；3、三迭系飞仙关砂岩及泥岩（ T_{1f} ），为一套滨海相碎屑沉积，厚230—250米。下部为暗紫红色粉砂岩、泥岩，上部为紫灰色中粗砂岩、泥质砂岩、砂岩中交错，层理发育，岩石坚硬，泥岩易风化崩解；4、三迭系铜街子砂岩（ T_{1t} ），紫红色、灰色岩屑砂岩、页岩、夹灰岩。

本区沙湾组及飞仙关组地层产状走向北 50° — 70° 西，倾向北东，倾角 6° — 8° ，缓倾向大渡河下游。两组主要地层（ P_{2s} ， T_{1f} ）中，节理裂隙十分发育，大致可划分为7组（如表）。

表1 新华台地基岩裂隙分组

组数	裂隙走向	裂隙倾向	倾角
1	355° — 15°	85° — 105°	57° — 88°
2	50° — 75°	140° — 165°	60° — 86°
3	80° — 105°	170° — 195°	52° — 85°
4	20° — 30°	110° — 120°	26° — 89°
5	290° — 315°	20° — 45°	41° — 89°
6	340° — 345°	70° — 75°	69° — 87°
7	290° — 310°	200° — 220°	10° — 20°

其中以裂隙走向近南北、近东西和北东—北北东向的三组最为发育；特别是近南北向的节理裂隙，其单条裂隙水平方向延伸可达50米以上，垂直方向贯通达30米左右，且裂隙密度达1—3条/米，常受卸荷影响而明显张开。

区内第四系堆积广泛发育，除大渡河冲积卵砾石夹砂层外，在台地上发育一套以砂岩、泥岩岩块为骨架，夹较多粘土、亚粘土的松散堆积层。此外，现代冲沟两侧有少量的洪积层。本段大渡河两岸阶地比较发育，右岸斜坡上至少可以见到四级平整的基座阶地及河流相砂卵石层；左岸在2号沟一带也可以看到四级阶地（图1）。

二、滑坡地貌特征

新华台地表现为明显的滑坡形态，从航片（图2）上看，前缘从2—7号沟沿大渡河宽约2公里范围，河流呈弧形向对岸凸出，坡体明显侵占河床，使河流向对岸冲刷。后缘为陡壁，台地实际上分为南北两个形态不同的滑坡群：北区陡壁呈弧形圈谷，长约1.5公里，高约100米，坡度 20° — 40° ；南区滑坡陡壁北东走向，在滑坡范围内约1公里长，100米高，坡高 30° — 50° （图2）。后壁下，从580米至440米高程，坡长约1公里，宽2公里范围为一宽阔平坦的台地。北区台地稍陡，平均坡度约 12° ；南区较缓，平均坡度约 8° 。台地表面坎坷起伏，可见到大约四级平台与陡坎相间，虽经后期夷平改造，各级平台后部仍然可见到明显的凹槽、洼地及反坡向地形。在平台中后部，多处出现双沟同源现象，特别是南区陡壁下，有大约300米长的宽阔洼地，多处积水。

南区主要滑坡方向为南60°东。下面着重介绍南区滑坡群。

三、滑坡堆积特征

(一) 新华台地坡体结构。滑坡区的地震勘探区分出四个速度层，由上至下为：

1、 $V_1=2,000$ 米/秒，据物性测试及勘探工程揭示，此速度层与表层水田、旱地耕作土及碎石夹粘土堆积层相当，该层速度稳定，在滑坡区变化很小(1,800—2,400米/秒)；

2、 $V_2=2,600-3,200$ 米/秒，该速度层与卵石夹砂或风化的砂页岩相当；

3、 $V_3=3,200-3,800$ 米/秒，该速度层与沙湾组地层相当；

4、 $V_4=4,000-4,800$ 米/秒，为本区坚硬玄武岩速度，全区都可追踪到此层，是可靠的标准界面。

据钻探、物探、竖井等所得滑坡区主剖面图如下页图3。

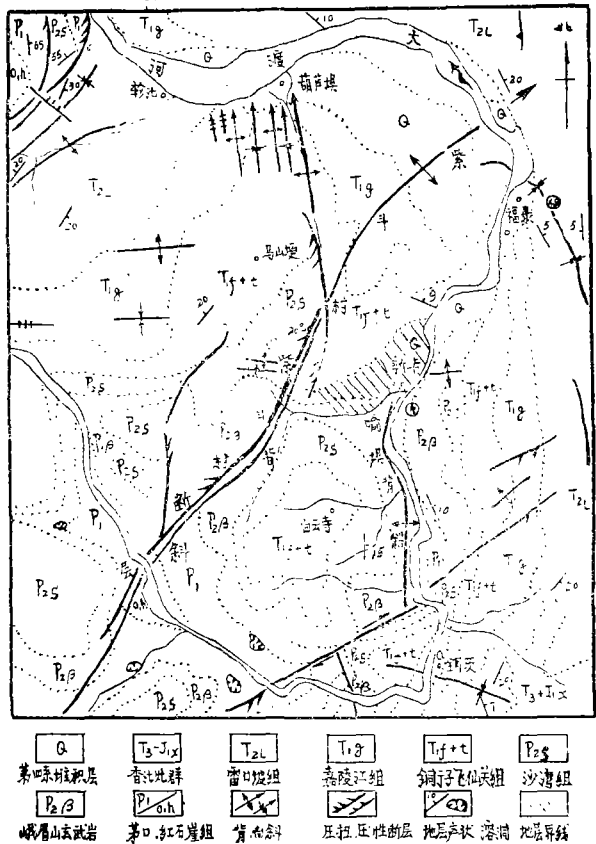


图1

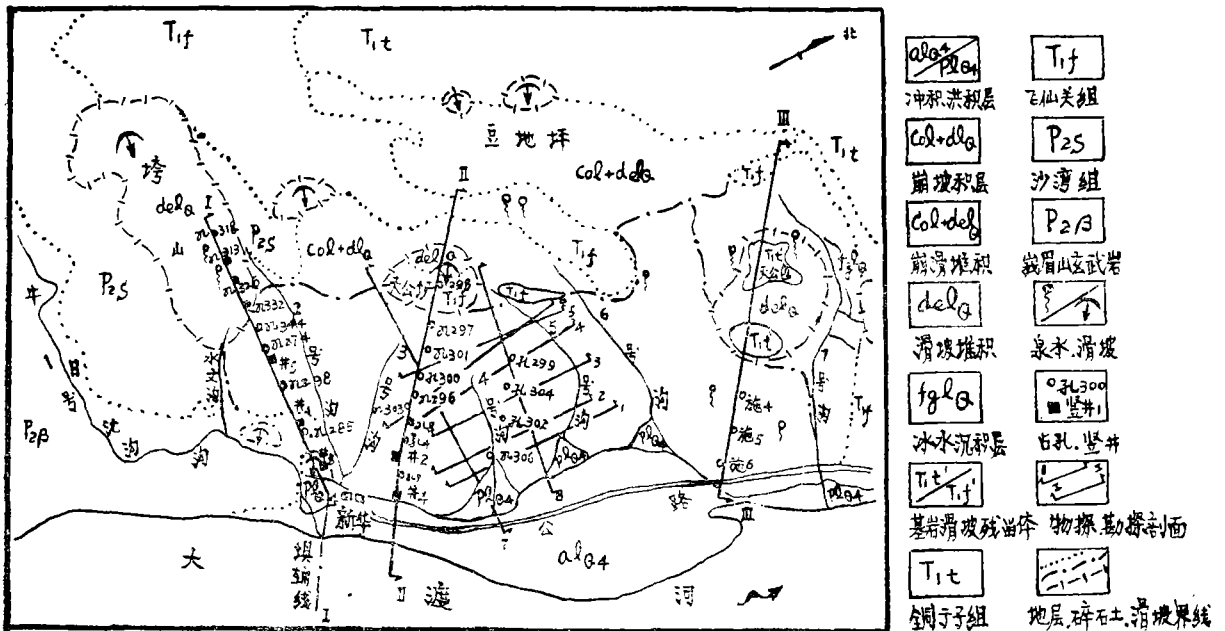


图2 新华台地平面综合地质图

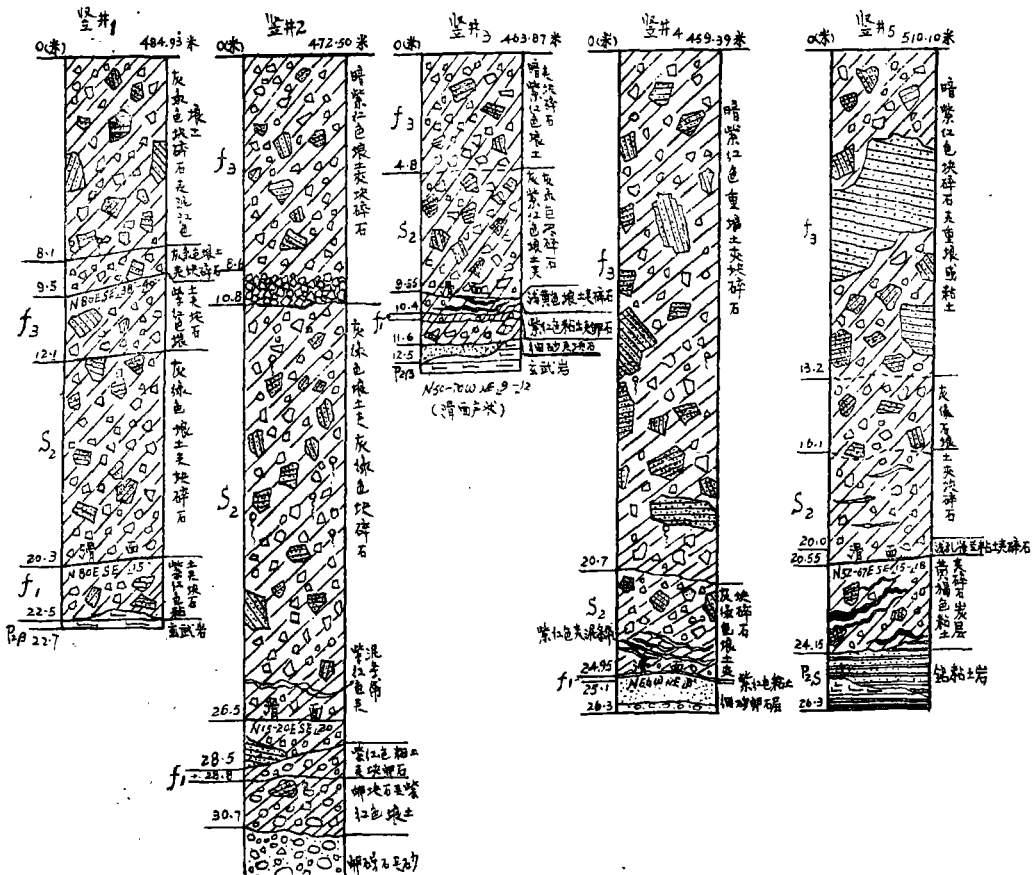


图 3

由勘探工作可知,新华台地的坡体结构如下:表面为20-50米厚的滑坡堆积物,在滑坡的前半部分,堆积物覆盖在435-445、480高程的河漫滩和阶地上,其下为峨眉山玄武岩及沙湾组砂泥岩;在坡体的后半部分,堆积物覆盖在沙湾组砂泥岩地层之上,其后为飞仙关砂岩组成的滑坡后壁。

(二) 滑坡堆积物的结构和成分。这套滑坡堆积由块碎石夹粘土、亚粘土组成,块石棱角分明,大小不一,常常架空堆积;越靠近台地上部,大块石含量越多,块石越大,越能体现母岩特征。

堆积物与母岩结构相似,在坡体的后部,堆积物为铜街子组加飞仙关组地层碎块石加粘土,在坡体前半部,堆积物有明显的层次,自下而上可为三层:

1、紫红色粘土夹块碎石层(f_1),厚0.2-10米,块石为飞仙关紫红色砂岩,具棱角,排列杂乱,一般粒径10-30厘米,大者60-80厘米。本层竖井土样经x线及差热分析,其矿物成分以水云母为主,含高岭石、蒙脱石及赤铁矿。本层与上覆碎石土层界面清晰。

2、灰绿色块碎石夹灰绿色重壤土或粘土层(S_2),厚约4-19米不等,块碎石为单一的灰绿色砂岩,表面新鲜,具棱角,排列杂乱,见架空现象,一般粒径10-20厘米,大者80-100厘米,粘土细腻,具滑感。本层成分单一纯净,为沙湾组灰绿色砂泥岩地层的破碎产物。这里井壁易坍塌,几处槽钢支撑变形。该层下部出现滑面,竖井土样测得矿物成分为水云母、高岭石、

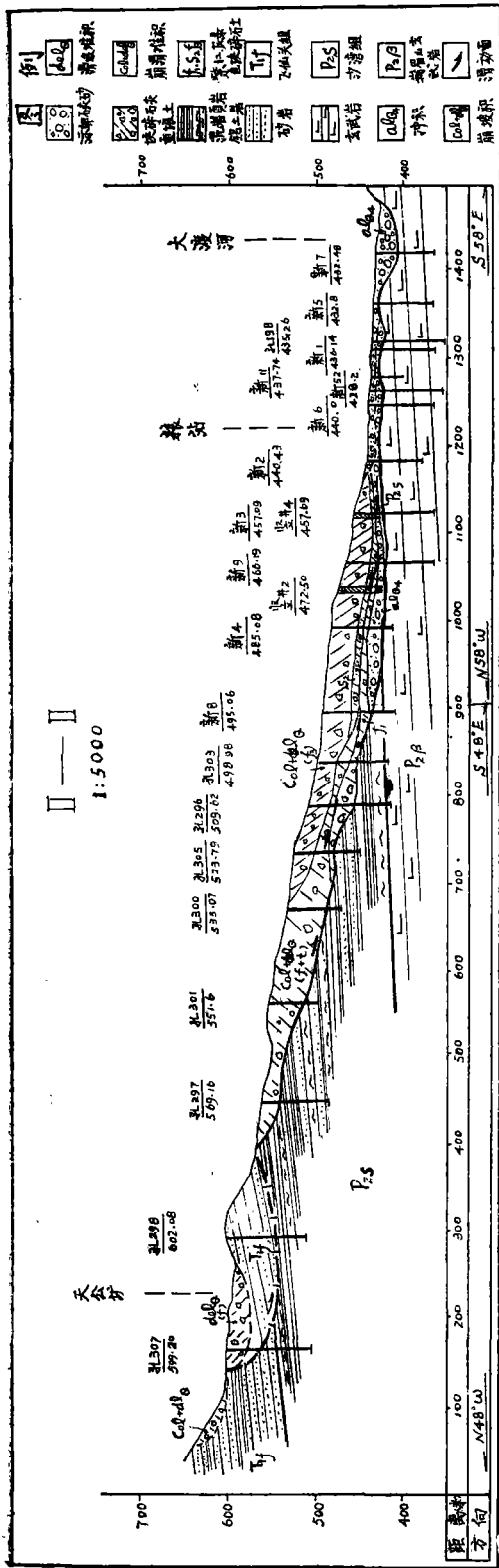


图 4

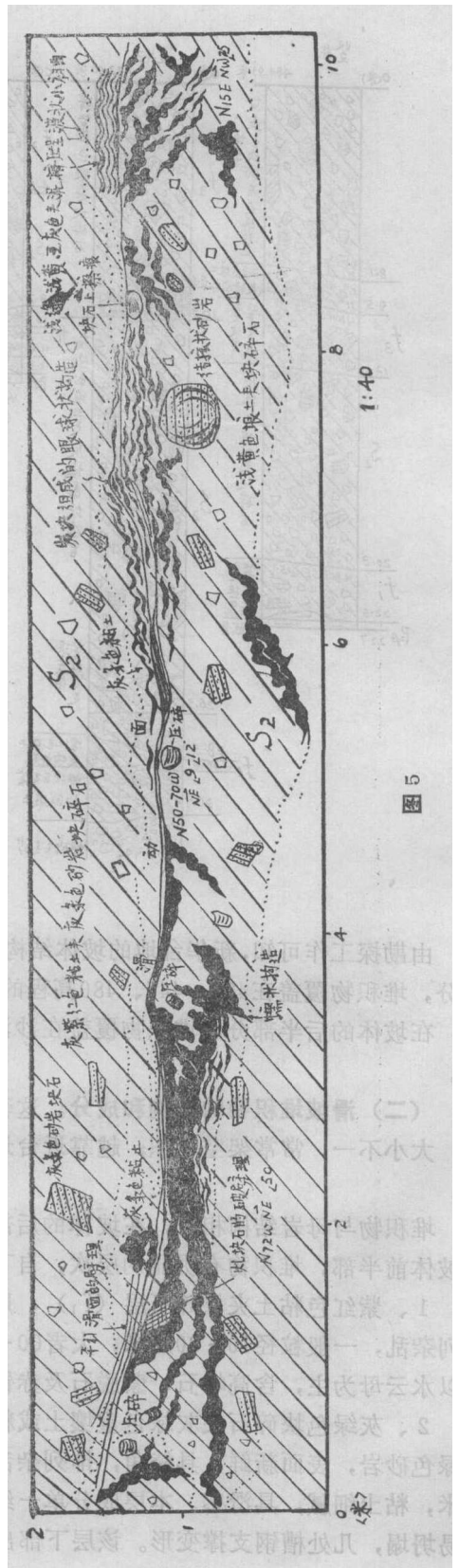


图 5

蒙脱石和石英。

3、紫红色粘土夹飞仙关组块碎石 (f_3)。该层广布斜坡表层,厚1—45米不等,块石具棱角,排列杂乱,有架空现象。局部见大块石集中,相互嵌合,一般粒径20—40厘米,大者80—100厘米,巨者200—400厘米,成份为飞仙关组砂岩。坡后有铜街子组砂岩或灰岩碎块。局部仍保留母岩的层理、垂直裂隙等结构,竖井中有囊状纯粘土出现,井壁易坍塌。此层与下覆 S_2 层界面波状起伏,关系突变。本层矿物成分与 f_1 层相似。在台地前缘只有 S_2 和 f_3 层。

(三) 滑坡堆积中的水文地质特征。新华台地处于四川盆地边缘川西北暴雨区,一般降雨天数高达190天/年,正常年降水量达1,650毫米以上,为地表水、地下水提供了丰富的来源。

台地上布有7条冲沟,2—7号沟主要发育在碎石土层内,仅2号沟切割较深,水量受大气降水补给,随降雨量变化。台地中前部水田密布,中后部有数口堰塘。

堆积物中的地下水为上层滞水,以孔隙性潜水分布。整个斜坡堆积中无统一含水层,在 f_3 层中地下水以滴状水排泄,在 S_2 层中呈细流或脉状沿碎石空隙出现。水量0.5—2升/小时,几个竖井抽水测其涌水量 $Q=0.387-0.816$ 立方米/小时。水量随深度增加而相对增加,随粘土增厚而消失。可见地下水以粘土为隔水层,滞留其上堆积物的孔隙之中,水动力条件较差。堆积层中的粘土往往饱含水分,一般天然含水量达20%左右。区内地下水除受大气降水补给外,还受后缘石灰岩中溶洞水的大量补给。

四、滑动面特征

(一) 滑动面位置。据勘探工程揭示,如剖面图所示(图3、图4)。在滑坡前部,滑面在 S_2 层的底部或者 S_2 层与 f_1 层的界面上;在滑坡前端,滑动面离砂卵石层仅几厘米。在滑坡中后部,滑动面在沙湾组砂页岩与滑坡堆积物之间。

(二) 滑动面产状及形态。5个竖井中的滑面高程与产状如下表

表2

竖井编号	高程(米)	滑面产状	
1	464.63	N80°E	SE<15°
2	446.00	N15°—20°E	SE<15°
3	454.46	N50°—70°W	NE<9°—12°
4	434.44	N60°W N84°E	NE<8° NW<9°
5	489.55	N52°—67°E	SE<15°—18°

如前所述,本区主要滑坡方向约 $S60^\circ E$ 。滑体中滑面的大部分走向与后壁走向一致,滑面倾向与主要滑坡方向一致。但在滑坡前端,由于滑坡受卵石层阻碍,滑动速度和方向改变,滑坡体向两边摆动,形成向北东和北西方向反倾的滑面。如竖井4柱状图,其滑面离砂卵石层仅15厘米;竖井3柱状图,其滑面离细砂夹卵石层约40厘米。滑面倾角由陡变缓,后缘约 30° ,中前部 $15^\circ-18^\circ$,前端剪出处仅 $8^\circ-12^\circ$ 。滑面平直、光滑,微带起伏。滑面上有明显的镜面和磨光面,擦痕细、密、短,呈线状。滑面上下附近的块石上可见蜡状粗纹擦痕,擦面上鱼鳞阶坎明显。

(三) 滑动面附近的派生构造。滑面上下部位均可见到由于遭受强烈错动、挤压而形成的派

生构造，如图6所示。滑面上部夹泥中有一系列波状褶曲，炭层及夹泥中有一系列的蠕虫状、肠状、眼球状构造，其排列方向与主滑方向一致或呈锐角相交；滑面上下粘土内有平行于滑面、形如细裂缝的张性劈理，在紧靠滑面下的煤块有与主滑面呈锐角相交的张性破劈理；滑面上下的砂岩块石被定向压碎，岩性软弱的炭层及劣质炭团被挤压错动成椭圆形，零星分布于土体内，其长轴方向平行于滑面。

(四) 滑面附近的地下水特征。滑面附近的地下水以孔隙水或孔隙性潜水形式活动，滑面为饱含水的粘土组成的不透水层，局部滑面上见有早期地下水活动的痕迹。

(五) 滑面成份。滑面分别由浅紫红色土、浅黄绿色土和绛褐色土组成，粘粒含量(<0.005) 40—50%。滑面矿物成分以水云母为主，其次为高岭石、蒙脱石等粘土矿物，另含少量赤铁矿及石英。其化学成分， SiO_2 约49%， Fe_2O_3 约14%， Al_2O_3 约17%， CaO 约1.72—3.48%， MgO 约3.84—5.15%， P_2O_5 约3.2%；另有少量的有机质及可溶盐。

(六) 滑面物性指标及力学强度(见表3、表4)。由两表可见，滑面粘土平均含水量约25%，最大值为28.8%，大多超过塑限。滑面力学强度很低。滑动带内的次生夹泥对抗剪强度起控制作用，其饱和固结快剪 $c=0.14—0.18$ 公斤/平方厘米， $\varphi=10^\circ 21'$ ；残剪 $c=0.05—0.12$ 公斤/平方厘米， $\varphi=7^\circ 40'—10^\circ 2'$ 。

五、滑坡形成机理分析

(一) 形成条件

1、岩性条件。本区出露的沙湾组砂页岩及飞仙关组砂岩、泥岩等地层，均为易滑地层。这些地层岩性软硬相间，其中的泥岩、页岩富含粘粒，遇水极易软化、泥化，使岩体强度大幅度降低。当岩体破碎以后，或在风化破碎、剥落形成的堆积物中，粘粒极易在堆积物某一层中富集，在条件适合时逐步发育成滑动面。

表3

层位	滑面岩性	含水量 W _o %	干容重 γ_d g/cm ³	比重 GS	液限 WL %	塑限 WP %	塑性指数 IP %	颗粒组成(%)				
								>20	20-2	2-0.05	0.05— 0.005	<0.005
								碎石 [mm]	砾石 [mm]	砂粒 [mm]	粉粒 [mm]	粘粒 [mm]
S ₂ /f ₁	紫红色粘土	28.3	1.59	2.80	43.1	21.3	21.8		8.5	22.5	24.0	45
"	"	22.3	1.72	2.85	42	21.8	20.2		18	23.3	16.5	42.2
S ₂ 底部	灰浅褐色夹泥	28.8	1.57	2.86	40.6	20.4	20.2		7.5	30.5	16.3	45.7
"	"	24.9	1.64	2.80	43.9	21.3	22.6		14	21	15.0	50
"	灰褐色夹泥	21.5	1.78	2.86	38.5	21.9	16.6	0.8	15.3	26.4	16.7	40.8
"	"	23.1	1.76	2.84	43.4	24.9	18.5		11.2	28.3	20	40.5
S ₂ 下部	紫红色粘土	26.4	1.57	2.84	50.2	26.0	24.2		6.7	23.3	27	43
"	"	25.2	1.59	2.84	43.1	27.3	20.8		12	26.0	14.8	47.2

2、结构条件。如前述，本区沙湾组及飞仙关地层中发育7组节理裂隙。这些裂隙都是强度很低的软弱结构面，其中特别发育的三组节理与滑坡发育直接相关，走向近南北、倾向东的陡倾裂隙（表1中的1、6组），使坡体与后缘山体分开，其中一部分成为滑坡后缘边界，走向近东西、倾向近北和近南的陡倾裂隙（第3、5组），为滑坡发育提供了侧面边界；走向近南北、倾向近东的缓倾裂隙以及部分层面，是构成本区滑坡滑动面的主要软弱结构面。

3、其它条件。由于大渡河深切，本区岸坡成为高陡斜坡，使滑坡体较易剪出。如前述，本区地表水及地下水十分丰富，水在坡体中的作用使岩石易于风化破碎，使泥页岩类软化、泥化，从而促进了滑动面形成。

（二）滑坡滑动过程及滑动方式。滑坡发生前的推测地质剖面如图6所示。该处大渡河左岸共有4级阶地，阶地基座主要由沙湾组地层构成。第一级部分基座是峨眉山玄武岩，基座之上均有几米至十几米的河流相砂卵石堆积。各级阶地和山坡上堆积有十几米至几十米崩落的以飞仙关地层为主的破碎岩块，在坡体前部也有少量沙湾组地层的坡残积碎块。越靠近山后，堆积物愈厚，块石愈大。

厚层块石堆积使下伏基岩承受重荷，加上本地降水丰富，降水很容易沿堆积物下渗到基岩，再沿着飞仙关组或沙湾组地层中十分发育的节理裂隙下渗，在重力和水的作用下，某几组软弱结构面（如前述）逐渐贯通形成滑移面（图6）。滑移面的前段和中段在沙湾组地层中发育，后段为飞仙关和铜街子组地层中的陡倾裂隙。

滑移面一旦形成，在地震、暴雨等因素触发下，其上覆厚层坚硬砂岩及其它岩层便如一个刚体，迅速将势能变为动能，快速向大渡河方向滑去。一路上辟山开道，铲平了520米高程的基座，破坏了480米高程基座以上堆积的砂卵石层，使450米基座以上的砂卵石层成为弧形，又在风化破碎的飞仙关崩坡积物上向前滑动，到达河漫滩上以后，滑坡体虽遇到了强大的抗滑力，由于滑体具有强大动能（高速、大体积），在沙卵石层上仍然滑动了约100米后才停止。这样，在滑坡前部形成了如前述自下而上的三层 f_1 、 S_2 、 f_3 ，滑坡中段及前段以飞仙关组破碎产物为主，后段为飞仙关组及铜街子组地层破碎岩块的混合物。

表4

试验仪器名称	试件说明	力学试验方法							备注	
		资料整理方法	固快抗剪断		饱和固结快剪		饱和固快残剪			
			c (kg/cm ²)	ϕ (°)	c (kg/cm ²)	ϕ (°)	c (kg/cm ²)	ϕ (°)		
中型直剪仪	原状土	图解法	平均值	0.96	19.95			0.4	12.70	竖井1—5 滑面
			小值平均	0.65	14.48			0.23	11.85	
		最小二乘法	平均值	1.12	17.42			0.67	11.18	
			小值平均	0.98	9.45					
室内小型直剪仪	重塑土	图解法	平均值	0.20	12.4			0.13	9.65	"
			小值平均	0.13	11.85			0.12	7.46	
		最小二乘法	平均值	0.24	11.67			0.15	8.97	
			小值平均							

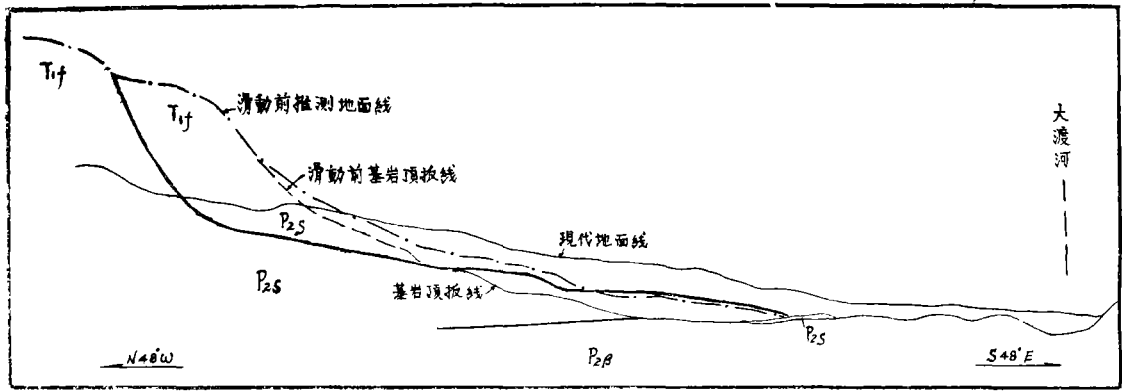


图 6

大滑坡以后，后缘飞仙关地层山坡由于突然减载并受大滑坡牵引影响，又发生了较大规模的滑坡；在大滑坡体上又发生了多次中小规模的滑动，特别大滑坡体的前缘及侧缘，这种解体更加频繁。在新华台地范围逐渐形成目前的滑坡群。

大滑坡后的多次局部滑动，使首次滑动脱离母体的岩块变得更加破碎，已难以识别原来的产状及结构。

(三) 滑坡发生时代。由以下事实推测，滑坡发生在全新世晚期：1、滑坡体前缘覆盖在435米高程左右的河漫滩上，滑坡体中后部下伏有另外三级河流阶地（据大渡河右岸及本岸2号沟阶地分布高程推测，在大约520米高程处原有另一级基座阶地）；2、 f_3 、 S_2 层中的块石较 f_1 层中的块石新鲜得多。

(四) 规模、滑速和滑距（首次滑坡）

1、规模。滑体平均长度以800米计，滑体平均宽度以1,000米计，平均厚度以35米计，估计首次大滑坡体积约3,000万立方米。

2、滑速。据下列因素判断该滑坡快速滑动：

- (1) 将大渡河向对岸推移，形成异常弯道；
- (2) 阶地被铲平或破坏；
- (3) 滑坡体内的块石破碎。

3、滑距。据沙湾组地层部分滑移后形成的 S_2 层分析，滑距大约350米。

六、稳定性分析

新华台地滑坡已经分解，进行定量计算意义不大，故仅作定性分析。

由于大规模、快速滑坡运动，滑坡体释放能量较充分；大规模滑坡后又发生多次中小规模的局部滑坡，使大滑坡解体；再加上滑坡体中前部覆盖在沙卵石层之上，沿沙卵石层整体复活的可能性很小，故新华台地整体目前是稳定的。但由于20—50米厚的滑坡堆积物包含大量粘土，且往往成层分布，又有丰富的地表水及地下水活动，其土体强度较低，故新华台地的安全储备是不高的，坡体接近临界平衡。局部滑坡很容易形成。电站施工时，不断发生小型滑坡和坍滑便是例证。

(铜街子新华台地调查组，由卢鑫樵任组长，有王治华、袁明德、陈自生、王录杰、黄大亨、王少东参加工作；并由卢鑫樵执笔编写了“对590场地的初步认识”和“对铜街子电站新华台地的初步认识”。)