

# 雅砻江普斯罗坝址深部裂缝带成因的探讨

李<sup>1</sup>, 李愿军<sup>2</sup>, 杨美娥<sup>1</sup>, 赵东芝<sup>1</sup>

(1. 中国地震局地质研究所, 北京 100029; 2. 武汉大学土木建筑工程学院, 武汉 430072)

**[摘要]** 雅砻江普斯罗坝址在工程勘探过程中, 发现了深部裂缝带, 裂缝带位于100~200 m深处, 与地表有巨厚的完整岩体相隔, 产状与该区的一组NE向断裂基本一致; 断层物质的最新形成年龄为2.7~9万年, 裂缝面上有水平、斜向和上下擦痕, 表明深部裂缝带可能是断裂带新活动的结果。断裂新活动所产生的地震波, 受到疏松破碎带的阻挡, 导致深部裂缝带出现。这一成因机制, 在地下核爆炸和岩石动力学的试验观测中有所证实。

**[关键词]** 雅砻江普斯罗坝址; 深部裂缝带; 卸荷和重力滑塌; 活断层

**[中图分类号]** V475; V476 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742 (2007) 03-0011-10

近年来, 在我国西部地区的工程建设中, 多次发现山体中深部裂缝带的存在, 但对其成因, 认识很不一致。这次在普斯罗坝址所发现的深部裂缝带, 产生在中生代大理岩和砂板岩中, 规模宏大, 宽数十米, 长1 km多。产状与区内的NE向断裂基本一致。埋于地表下100~200 m深处, 与地表卸荷带之间有巨厚的完整岩体相隔。其成因有人认为是卸荷所致, 有人认为是重力滑塌所致, 笔者则认为是断层新活动的结果。由于我国西部是强震特别活跃的地区, 又是水利工程建设重点区。因此查明深部裂缝带的成因至关重要。若是卸荷或重力滑塌, 采取一般工程地质措施即可; 若是断层新活动, 坝址必须避开, 并要采取一定的抗震措施。

## 1 深部裂缝带简介

雅砻江河谷在普斯罗沟附近地表出露的基岩主要是中、上三迭统变质大理岩和砂板岩, 前者厚约600 m, 是坝区主要建筑物的基岩; 后者厚约400 m, 在左岸坝基的中高程出露。总体地层产状 $N0^{\circ}\sim 30^{\circ}, E/NW, \angle 25^{\circ}\sim 45^{\circ}$ , 河谷深切, 相对高差千余米, 坡度上缓下陡, 介于 $35^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 之间<sup>[1]</sup>。深部裂缝带分布于雅砻江左岸, 已知长约千余米。隐

伏于山体内部, 从岸坡地表水平向山体内深约50~300 m的范围, 均有分布。垂直分布于1 650~1 931 m高程之间, 在1 720 m以下的几个平洞内已很少见到, 该处雅砻江江面标高为1 640 m左右, 成都勘测设计院认为深部裂缝向下就没有了<sup>[2]</sup>。深部裂缝带受断层和伴生节理控制, 断层中见有煌斑岩脉侵入, 断层优势产状为 $N40^{\circ}\sim 70^{\circ}, E/SE, \angle 50^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 或 $N0^{\circ}\sim 30^{\circ}, E/SE, \angle 50^{\circ}\sim 65^{\circ}$ , 整体延伸方向与岸坡呈 $30^{\circ}$ 左右的斜交, 其活动性质列于表1 (据文献[3]中表5整理)。表中f<sub>1</sub>右行错距70~90 m<sup>[4]</sup>, 最新活动年龄为9万年。

单条裂缝沿走向方向延长几米至200 m不等, 但无论顺走向方向还是沿倾斜方向都是有限的, 延伸一定距离后, 都会以不同方式尖灭消失, 在软弱岩层界面处终止, 呈羽状裂隙消失或呈密集节理消失 (图1~图8, 徐锡伟摄)。

在部分深部裂缝的裂面上存在摩擦镜面、擦痕阶步, 有水平擦痕、斜擦痕或擦槽, 位移数厘米到十余厘米, 也有的为下掉或逆冲位错。以上图片所示, 裂缝应是构造活动的产物, 而与卸荷和重力滑脱的破碎物绝然不同。

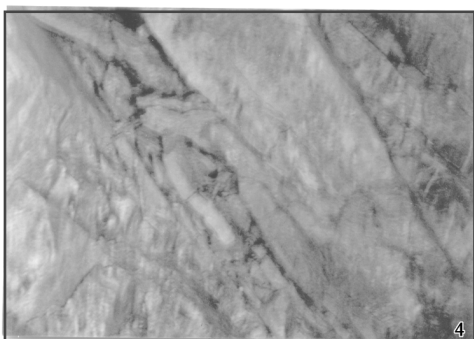
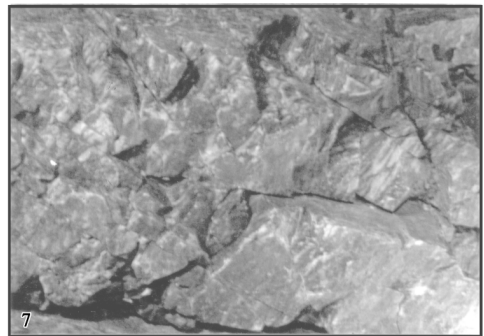
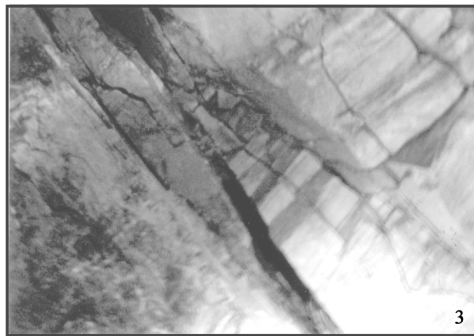
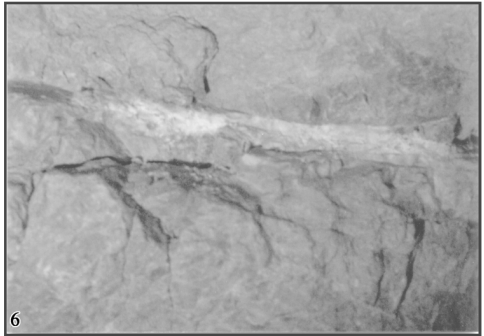


图1 两组裂缝交叉，一组延伸较长（平行层面），另一组较短；图2 两组裂缝呈“X”交叉形式，裂面平直；图3 两组裂缝倾向与岩层倾向相反，错断成透镜体；图4 裂缝有的平直（中部），有的呈雁列（左右两侧），将岩块错碎呈菱形作辫状排列；图5 坚硬岩体中的多条裂缝作剪切破裂，形成大大小小的菱形或透镜状碎块；图6 羽状的张扭性小裂隙（右旋错动）；图7 山体内部深部裂缝形成空洞，有的引起地层作不同的位错；图8 裂缝中有尖锐的菱形小块作线状排列剪切位错

Fig.1 Two fracture sets intersect, one extends longer (parallel to the stratification) than another; Fig.2 Two fracture sets show as "X" type, and the fracture planes straight; Fig.3 Two fracture sets and the rock formation, their dips are reversal, and faulted to lens; Fig.4 Some fracture-planes are straight (middle part), another (left and right sides) exhibit as en echelon arrangement. Faulted rock come out the lozenge-shaped and the plaiting arrangement; Fig.5 Shear fracture zone is made of many cracks, in the form of diamond or lens-like shaped; Fig.6

Pinnate tensile-shear plane (right-lateral displacement); Fig.7 In the inner mountain some part of deep fissure zone showed strata-dislocations and disjunctive holes; Fig.8 Sharply rhombus mass display a linear range of shear dislocation

表1 普斯罗坝址左岸深部裂缝带中一些断裂和裂缝的活动性质

Table 1 Active features of some faults and deep fissure zones in the left bank of Pusiluo Dam

断裂(F)和 裂缝(SL) 编号	产状 (走向/倾向/倾角)	长度/m	力学性质	运动历史	最新活动年代/ $10^4$ a	采样地点
$f_5$	$N40^\circ\sim 50^\circ E/SE\angle 70^\circ\sim 80^\circ$	1 800	右行错距:70~90 m 地表断距:30 m 左右 右行兼逆冲	平移→逆冲→ 拉张	TL14.9±1.6 ESR20.5 TL9.0±1.1 ESR16.6 TL25.8±2.6 ESR27.9	RD18 # 90 m RD18 # 90 m RD12 # 85 m
SL <sub>15</sub>	$N45^\circ\sim 80^\circ E/SE\angle 40^\circ\sim 63^\circ$	>1 000	水平右旋	水平右旋	TL>Q	PD16 上游 支酮 110 m
$f_8$	$N30^\circ\sim 40^\circ E/SE\angle 60^\circ\sim 75^\circ$	1 400		挤压→挤压→ 挤压		
$f_1$	$N36^\circ\sim 52^\circ E/SE\angle 79^\circ\sim 88^\circ$	左岸 600 右岸 100		右旋走滑→正 断位错		
$f_9$	$N60^\circ\sim 70^\circ E/NW\angle 70^\circ\sim 80^\circ$	300		右旋走滑→右 旋逆冲→逆冲		

裂缝共约百余条,按单条裂缝的张开度,分为4级:Ⅰ级 $\geq 20$  cm,Ⅱ级 $< 20 \geq 10$  cm,Ⅲ级 $< 10 \geq 3$  cm,Ⅳ级 $< 3$  cm;总的张开宽度累计达数米到十余米。裂缝在各区发育程度不一:坝基部位最微弱,规模不大,变形不强,分布零星,多数为Ⅲ级、Ⅳ级裂缝,形成的松弛岩体带,宽度一般2~6 m,最大12 m;位于1 650~1 900 m高程的变质砂岩和板岩边坡中的裂缝规模大,变形强,形成的松弛带宽度达10~20 m;位于泄洪雾化区边坡大理岩中的发育最强,形成的松弛岩体宽度可达24 m,58 m和83 m,水平埋深变浅<sup>[4]</sup>。

裂缝的平面分布呈菱形块体串接方式,裂缝间的衔接关系,呈锯齿状、平行状、雁列式。深部裂缝沿走向出现张开段和闭合段相间现象。对裂缝SL<sub>15</sub>的追踪调查显示,张开段约占总长度比例的40.5%,闭合段占59.5%<sup>[5]</sup>。

深部裂缝形成后,在张开段中常形成石英脉,方解石脉,石灰华和少量钙膜或堆积的岩屑,裂缝闭合段多为构造岩、断层泥等。充填物中出现的错碎石英粉和压碎钙华,年龄分别为2.7~4万年和3.1万年<sup>[5]</sup>,应是代表一次最新活动的年代。

## 2 有关卸荷说和重力滑塌说的要点

成都勘测设计院认为:“坝址左岸深部裂缝带是在雅砻江逐步下切过程的不同阶段,岸坡卸荷造成的。雅砻江在Ⅲ级阶地形成以后,下切速度增高,是斜坡卸荷变形的重要时期。岸坡卸荷变形,是岸坡自重应力与构造应力复合应力场卸荷的结果。 $f_5$ 、 $f_8$ 断层对卸荷起到了重要的次生边界作

用”<sup>[3]</sup>。另一些研究者认为:“普斯罗沟左岸边坡所发育的深裂缝是高应力条件下,坝址区所在的三滩向斜岩体,在河谷下切过程中,岩层回弹滑塌拉裂形成的”<sup>[3]</sup>。经综合分析这些专题研究成果后,卸荷说的最终结论是:“坝区左岸深部裂缝是在左岸特定的高边坡地形、地质构造、高地应力环境和岩性组合条件下,伴随河谷的快速下切过程,边坡高应力发生强烈释放、分异、重新分布,而在原有构造结构面基础上,卸荷张裂所形成的一套边坡深卸荷拉裂裂隙体系”<sup>[3]</sup>。

## 3 对卸荷说及重力滑塌说的几点质疑

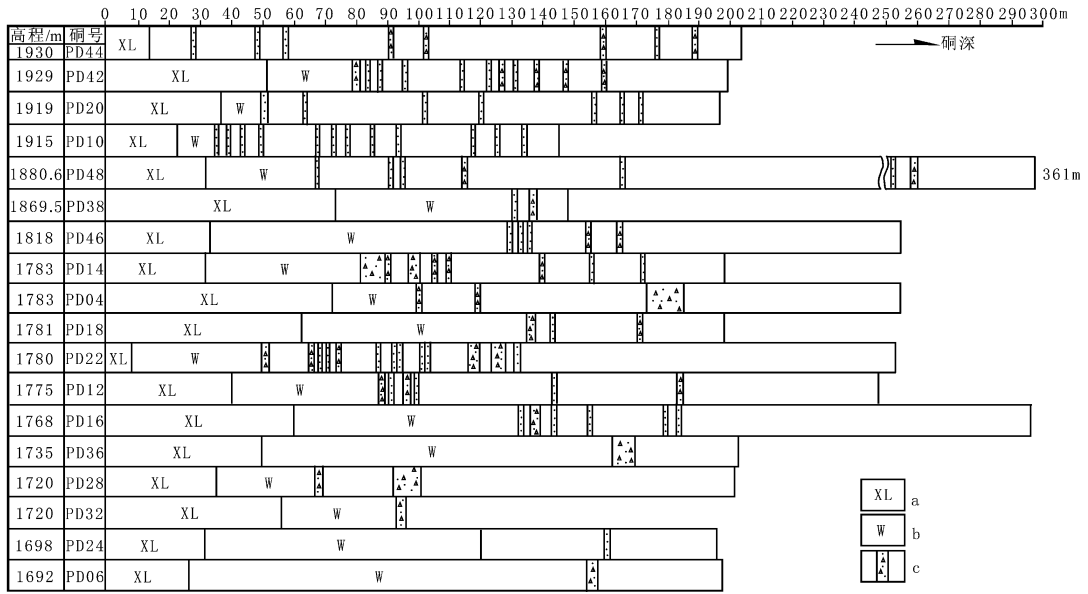
### 3.1 深部裂缝带的空间分布很特殊

地表卸荷顾名思义是地表减轻了荷载,应力调整产生裂隙,裂隙的分布应大致平行地表,并向深处逐渐减少而消失;已知本区的地表卸荷带厚约30~50 m,基本与地表一致,但本区的深部裂缝带的产出却作约60°的倾斜。

值得注意的是本区的深部裂缝带与地表的卸荷带之间还存在有几十米至上百米厚的完整大理岩体,因此,说裂缝带是卸荷形成,在力学上很难解释。如坝区左岸所有不同高程平硐,由硐口向山体内作的横剖面表明,都可分出3个带:**a.**近地表的卸荷裂隙带,平均厚约50 m;**b.**中部为新鲜完整的无裂隙岩体带,离地表深10 m到百余米;**c.**深部裂缝带宽约数十米到200~300 m(图9)。

卸荷作用是渐进的过程,这里三个带没有任何渐变关系,如何解释?

### 3.2 卸荷成因的疑点



a—卸荷裂隙带；b—新鲜完整无裂隙分布带；c—深部裂缝带

图 9 普斯罗沟坝址左岸平硐剖面示意图

Fig.9 A sketch map showing the geological profiles of the adites in the left bank of Pusiluo Dam

雅砻江河谷于十几万年前开始形成，到Ⅲ级阶地开始快速下切，已经经历了近 10 万年，该时期形成的宏伟河谷，较之快速下切所形成的河谷大数十倍，为何早期的巨大卸荷未形成深部裂缝，而竟等到 10 万年后，才作应力调整，这在力学上难以解释。

Ⅲ级阶地所形成的河床，深约 60 m，宽约 70 余 m，而且充满了水体，卸荷量是极有限的，即或

卸荷引起应力的调整，也应是在Ⅲ级阶地下方的河床附近形成裂缝带，但根据平硐和钻探得知，那里已没有深部裂缝了。深部裂缝带的分布反而位于Ⅲ级阶地以上的 200 m 范围内，而且在山体内部 100~300 m 的深处。60 m 深及 70 m 宽河床的卸荷，能引起 200~300 m 厚的山体撑开吗？力学上难以解释（图 10）。

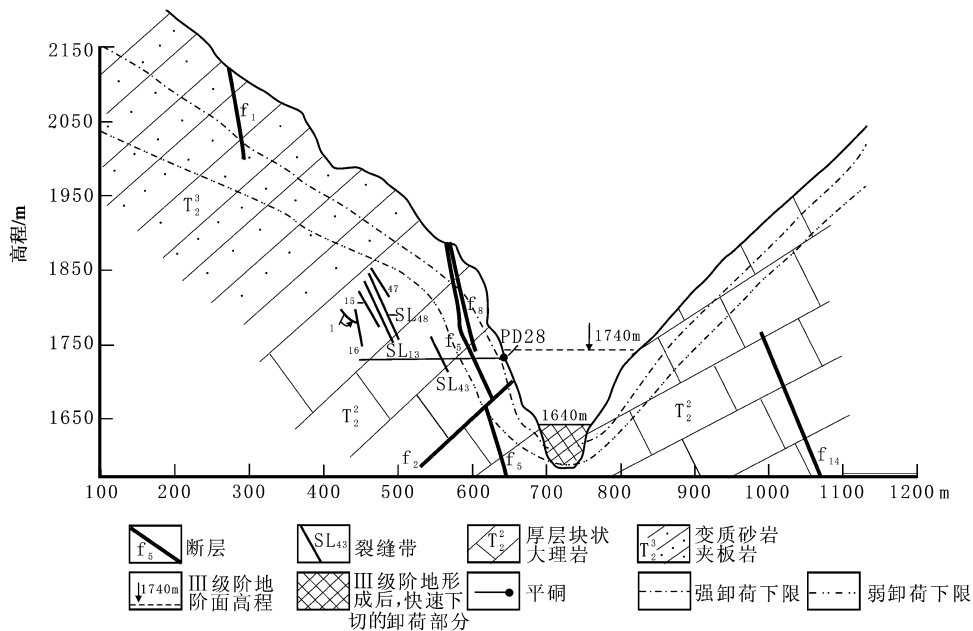


图 10 工区地质构造剖面示意图<sup>[5]</sup>

Fig.10 Scheme of the geological structural profile at the dam-site

### 3.3 滑塌说的疑点

重力滑塌说认为，当软弱结构面或地层，面临自由空间（这里指雅砻江河谷），可因重力而滑塌。但事实是，深部裂缝带分布于  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  等多条断层之间顺断层的产状向深部延展（图 10），在裂缝形成前，没有临空滑塌的自由空间，处在山体内如何能滑塌呢？又如何能产生数十米厚的裂缝带？再则卸荷滑塌也不会在岩石裂面上产生诸多的水平擦痕和位移。

滑塌说者还认为，Ⅲ级阶地形成（距今 3~4 万年）后，雅砻江迅速下切，岸坡变陡，岩体沿软弱结构面重力滑塌。事实上这里的软弱岩层（砂板岩、页岩）的层面是向山体内倾斜的，滑塌只会引起挤压，而不会引起张裂产生深部裂缝。再则，燕山运动形成的向斜，距今已时隔 1 亿多年，向斜岩

体早已固化，其后若无强大的构造力，仅以河谷下切，能使岩层回弹滑塌吗？

### 3.4 深部裂缝带形成时代的矛盾

深部裂缝带到底何时形成，有说 13 万年前；有说雅砻江发育前；有说Ⅲ级阶地形成 3~4 万年后，河流快速下切才发育的；更有说裂缝中充填的石英脉形成年龄为 60 多万年<sup>[3]</sup>，也就是说在 60 万年前就已形成。总之，说法众多，互相矛盾。但在可行性报告中多次提到裂缝面很新鲜，风化现象不明显，这与卸荷的概念矛盾。相反却正好说明这些裂缝可能同时形成，而且时代是比较新的。总之年龄应作进一步确定。

### 3.5 深部裂缝作雁列式排列，显示水平滑移特征

平硐中深部裂缝的内部结构编录图显示，裂缝作菱形、锯齿状、雁列式排列（图 11、图 12）。

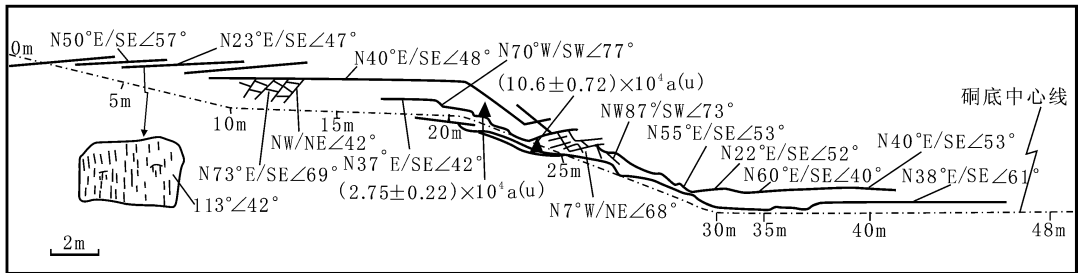


图 11 PD14sz 平硐 0~48 m SL24 内部结构（硐底）编录图<sup>[4]</sup>

Fig.11 A documentation map of PD14sz adit section 0~48 m (adit footwall), showing the internal texture of deep fissure zone SL24

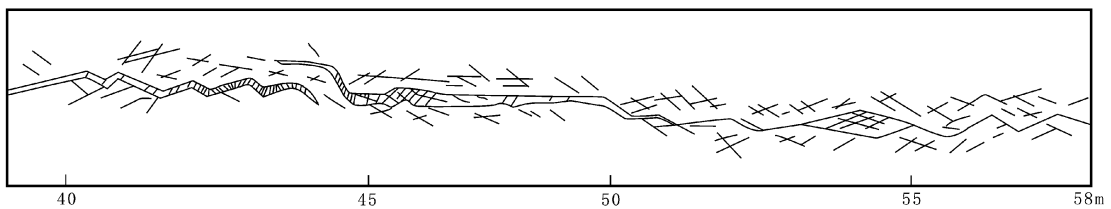


图 12 PD14xz 平硐 39~58 m SL24 追踪张裂隙内部结构（硐顶）编录图<sup>[4]</sup>

Fig.12 A documentation map of PD14xz adit section 39~58 m (adit roof) showing trace tensile fracture of the fissure SL24

单条裂隙可由次级甚至更次级雁列节理组成<sup>[5]</sup>；坚硬岩层中的裂缝在延伸到软弱岩层界面处尖灭消失，是典型的水平挤压产物，卸荷和重力滑塌是很难形成这种结构的。

### 3.6 深部裂缝带与 $f_1$ , $f_2$ , $f_3$ 断裂带存在成因上的依附关系

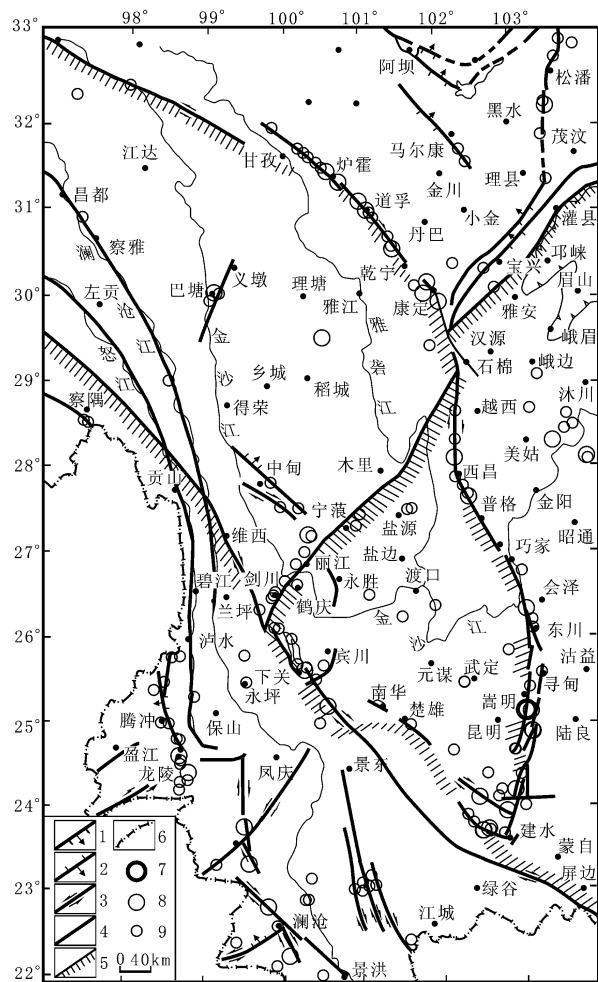
雅砻江大河湾 140 余公里长的峡谷区，都是类

似的变质岩系，岸坡陡立，有的几近直立，若是河流快速下切，引起卸荷、重力滑塌、造成深部裂缝，则这种裂缝应在全部河谷区普遍出现，为何仅局限在坝址左岸 1 km 多的范围内而其余部分均未发现呢？如坝址右岸经硐探、钻探已得到证实没有深部裂缝，这显然是深部裂缝带与该地段的  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  断裂带的存在有关。

### 4 深部裂缝带地震成因之我见

#### 4.1 区域构造背景

坝区位于川滇菱形断块的内部。川滇菱形断块被几条强震带所围限，东部为鲜水河—安宁河断裂带—则木河—小江断裂带，西部为金沙江—红河断裂带，带上强震频发（图 13）。菱形断块中部，被 NE 向的大断裂拦腰截断，这是一条大地构造分界线，一条深大断裂带<sup>[6]</sup>，一条强震发生带，该断裂西起剑川—丽江向 NE 过宁蒭，正好对着工区的锦屏山—小金河断裂带，后者延至冕宁之北的小相

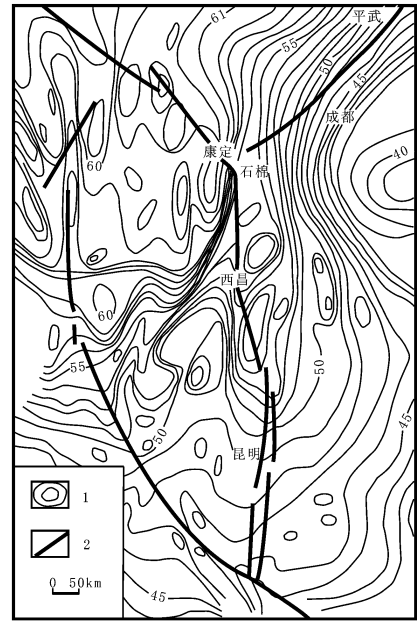


1—张性断裂；2—压性断裂；3—走滑断裂；4—推测断裂；5—断块边界；6—国界；7— $M \geq 8$ ；8— $M7.0 \sim 7.9$ ；9— $M6.0 \sim 6.9$

图 13 川滇菱形断块活动断裂和强震震中分布图 (据中国地震局地质研究所, 2000)

Fig.13 Distributions of active faults and strong earthquake epicenters in the Sichuan-Yunnan rhombic block (from Institute of Geology, China Seismological Bureau, 2000)

岭，与鲜水河—安宁河断裂带相会，值得注意的是，有煌斑岩类等基性岩浆的贯入，反映该断裂带切穿地壳；它又是一条地壳厚度等值线密集带，表明垂直此线，幔坡从东向西陡降 5 km（图 14）。更



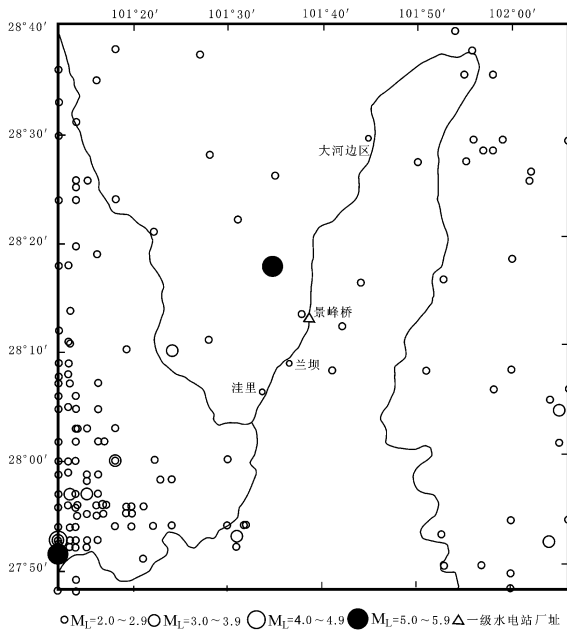
1—地壳厚度等值线 (km)；2—主要断裂

图 14 研究区附近地壳厚度分布<sup>[7]</sup>

Fig.14 Thickness of earth-Crust in the study area

重要的是，沿断裂带从剑川过丽江到锦屏山强震很多，如剑川发生 6.8 级地震，丽江 7.0 级，宁蒭发生 6.7 级强震。几个强震发生地点之间，均有活断层相连，应是一条强震发生带。工区位于在这条断裂带上，地震活动性如何评定？应引起严重关注。有人认为锦屏山断裂与区域性拦腰截断的 NE 向大断裂带并不相连，同时锦屏山工区（或雅砻江大河湾内）没有活断层、没有古地震、也没有历史地震的记载、仪器记录微震也很少。这是不确切的，这里要提出的是，强震发生断层，在很长的延伸范围内，有的作单一的断层，有的分成数条，有的作雁列式排列，并不一定连成一线。至于没有历史记载，这点须要说明的是，1965 年笔者在该区调查时，大小凉山地区还很落后，原始森林刀耕火种，那能有历史记录！大河湾地区至今还没有地震台，最近的地震台在冕宁和九龙，距工区 60 多公里（据前四川省地震局长韩渭滨告知，2006 年初），微震是很难记录到的，所以大河湾地震记录是不全的。但是在最近年代里还是记录到 11 次小震，其中最大者为 3.7 级（图 15），说明本区断层已有活

动，应是不争的事实，值得重视。



(历史地震记录  $M \geq 4.7$ ; 仪器记录地震  $M_L \geq 2.0$ ;  
1970 年 1 月 ~ 2002 年 11 月)

(据四川省地震局; 2004 年 9 月 7 日)

图 15 近场历史地震震中及现代仪器记录地震分布图

Fig. 15 The distributions of epicentral of history earthquakes and instrumental earthquakes in the adjacent area of dam-site

### 4.2 两个大河湾的对比

我国长江两个著名的大河湾，一个是金沙江大河湾，一个是雅砻江大河湾。前者破坏性地震累累发生，已知有数条平行 NE 向断裂存在（图 16）。

后者也有 4 条断裂存在，见下述，因此两条大河湾的形成很可能与断层的新活动有关。

### 4.3 雅砻江大河湾内 4 条断裂带的新活动

雅砻江大河湾包围了整个的锦屏山，锦屏山为 NE 向的复式背斜，宽约 10 余公里。由中、上三迭统动力变质的大理岩、砂板岩组成。背斜内有同方向断裂带 4 条，自 E 向 W 为：**a.** 大河湾东雅砻江断裂带，以马头山—周家坪断裂为代表；**b.** 甘家沟—大铺子—民胜乡断裂带；**c.** 鸡纳店—老庄子梁子西坡断裂带；**d.** 大河湾西雅砻江断裂带，以锦屏山—小金河断裂为代表。

1) 东雅砻江断裂带以马头山—周家坪断裂为代表，断裂带北起庐宁，基本顺雅砻江，过里庄南延，在里庄以南的花岗岩、正长岩及大理岩都受到

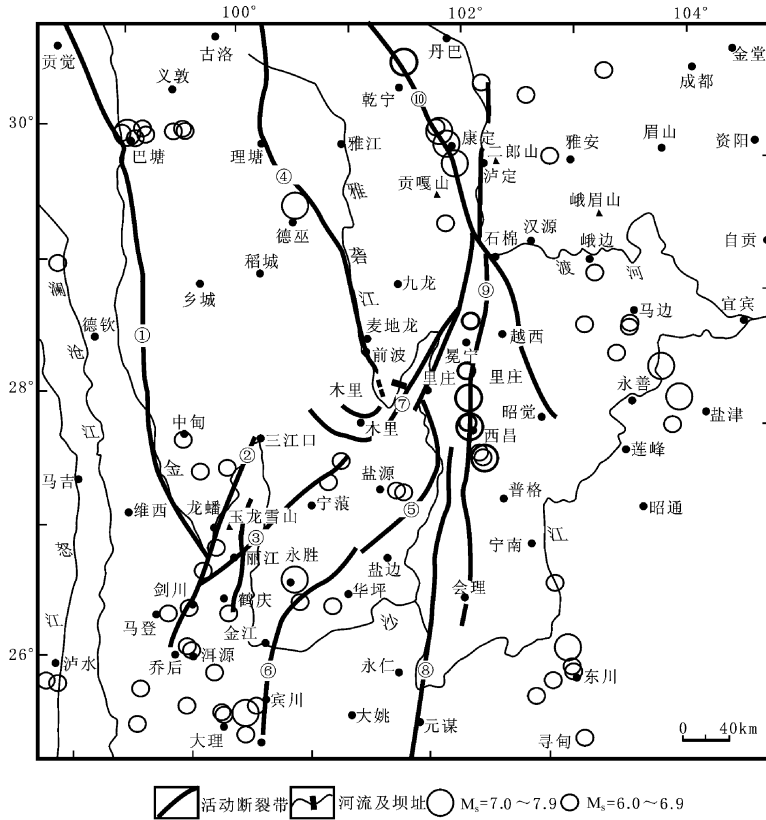
强烈挤压，岩石十分破碎，节理、劈理、小断裂十分发育。后期侵入的岩脉，也经受了强烈的挤压破碎。在庐宁以北雅砻江Ⅲ级阶地被错断，从里庄向北经上下垭口、麦地乡、冉新沟口，到冕宁与鲜水河、安宁河断裂带相接。在金银社牙骨台、里庄等地附近均见有小面积的昔格达层，厚约 200 多米。昔格达层沉积前这些地方已有较低的地势，此等现象表明在该断裂带上近期有较强的上下差异活动。从上下垭口至雅砻江边，以及沿江一带岩石都十分破碎，而且未经胶结。昔格达层经受了构造变动，在金银社牙骨台可以见到昔格达层与燕山期火成岩呈断层接触，有粗大的未胶结的断层角砾岩，测年结果为 3~4 万年<sup>[1,2]</sup>。

2) 甘家沟—大铺子—民胜乡断裂带，北起手爬子东侧，经甘家沟、大铺子到民胜乡继续向南延伸。沿断裂带存在一条负地形带，长约 8 km 的甘家沟，呈直线状，河谷深切，两侧陡崖耸立。在老庄子沟口的断崖见有很深的斜冲擦痕，向 N20°，E 方向倾斜，倾角 40°~50°，另外在断层带上还发育有构造透镜体、镜面和石英脉穿插。沿断裂带断续分布有第四纪角砾岩，角砾岩中有明显的陡坎，在大铺子多级陡坎自西向东逐级降低，形成了数个角砾岩台阶，各级台阶均以陡坎相接并发育了许多与陡坎方向一致的裂缝，这些裂缝和陡坎有的切断了角砾岩中的砾石，裂面陡立，其上有清晰的上下擦痕，陡坎和裂缝的延伸方向基本上和下伏断层的产状一致。值得注意的是第四纪砾石被剪断，代表瞬间强力错断，应是古地震的遗迹<sup>[1]</sup>。

3) 鸡纳店—老庄子梁子西坡断裂带。北起手爬经羊房村东，南延到苏那、瓜别一带呈 N15°30'，E 方向延伸，与甘家沟—大铺子—民胜乡断裂带仅一岭之隔。是老庄子背斜西翼的一条断层，两者发育历史和活动性均很类似。断层东侧大理岩形成明显的大断层崖，绵延达几十公里在断层接触处也常形成显著的负地形带，并且发育了第四纪角砾岩台阶及角砾岩中的同方向裂缝。

上述 2) 和 3) 这两条断裂在中更新世（距今约 30 万年）有过活动，前人都是认同的。在卫星影象解释中，它们的活动性仅次于安宁河断裂带，与马头山—周家坪断裂带相当。此两断裂与坝址的垂直距离为 4~5 km。

4) 大河湾西雅砻江断裂带，以锦屏山—小金河断裂为代表。在解放沟横穿断层的平硐中，可见



①—金沙江断裂带；②—剑川断裂带；③—丽江—剑川断裂带；④—甘孜—理塘断裂带；⑤—金河—箐河断裂带；⑥—程海断裂带；⑦—锦屏山—小金河断裂带；⑧—磨盘山—绿汁江断裂带；⑨—安宁河断裂带；⑩—鲜水河断裂带

图 16 雅砻江与金沙江两个大河湾区活动断裂带及中强地震分布图

Fig.16 Distributions of active fault zones and epicenters of moderate-strong earthquakes located at the two large bends of Yalong River and Jinsha River

断层产状  $N38^{\circ}, E/NW, \angle 78^{\circ}$ ，断层破碎带宽 4 m。主要为断层角砾和断层泥，后者热释光年龄为 17 万年左右，但是否还会有更新的活动，对坝区却是一个关键性问题。现考虑到坝区深部裂缝带中石英碎粉和方解石压碎粉末，测年为 2.7~4 万年，另外，虽断层通过处 III 级阶地未被错断，但这不能排除曾发生过  $M \leq 6$  级地震的可能（因小于 6 级的地震在地表不一定产生破裂）。从文献 [1] 可知，大河湾西雅砻江断裂带的新活动是存在的。锦屏山—小金河断裂大致从小金河向北东通过洼里、三滩、健美、新星乡、窝普乡等地。在野外不同地段所见到的构造近期活动表现有：**a.** 解放沟口灰岩内发育的几条疏松断裂破碎带，窄的仅见滑动擦面，宽的可达十几米，且形成多级灰岩陡坎，由多条正断层组成；**b.** 一些地层沿层面的破碎、滑动等现象也十分普遍而强烈，尤其在三滩江边剖面，沿 NW 及 NEE 两组剪切面的次级小断裂也很发育，这与

坝区深部裂缝带的菱形结构类似；**c.** 洼里至矮子沟一段，雅砻江两岸边坡并不特别陡峭，但两侧均分布了很多大滑坡体，这可能是沿断裂发生过古地震所致；**d.** 坝区左岸深部裂缝带向 NNE 延伸到鸡纳店西，那里沿断层线砂板岩因上下拖引直立，呈现石柱状排列，石柱顶部弯折，状如“鞠躬打礼”，这种现象也见于工区，在我国西南强震地区如永胜和建水沿强震发生断层该现象亦均有所见；因此认为，深部裂缝带的分布，从现在坝址的左岸，可能越过雅砻江直通到锦屏山鸡纳店西坡。**e.** 大河湾西雅砻江断裂带，从工区向西南延伸接小金河断裂，后者是“木里弧形断裂带”（木里弧的顶端实际上是一条东西向的断裂带）东部的一条<sup>[1]</sup>，后者的最新活动年代为距今 2 万年左右 [被切割的 III 级阶地砂层，热释光年龄为  $(2.05 \pm 0.16)$  万年]<sup>[8]</sup>。并在 1980 年木里县城西南发生了 5.8 级地震，据查与 NNE 向的断层密切有关，值得注意。



综上所述：雅砻江大河湾内的4条断裂带，走向近似，均为NNE—NE，东边的1) 2) 两条倾向SE，西边的3) 4) 两条倾向NW，此4条断裂带又彼此相距甚近；集中在锦屏山E—W宽10余公里范围内，应属于同一构造体系，具有类似的活动性质和年代。

这里要提出工区深部裂缝带所在的 $f_1$ ， $f_2$ ， $f_3$ ……断层向NNE延伸，可到鸡纳店西坡，越过了雅砻江河谷，它的倾向是向东南的，正好与锦屏山—小金河断裂呈共轭关系，可能在深部相交，成为后者的分支断裂。

大河湾东西两侧雅砻江河谷的横剖面十分相象，均作漏斗状位于复背斜的两翼，两翼又都有NE向的活动断裂带发育，可以推断它们的新活动是相似的。

#### 4.4 深部裂缝带可能是附近断裂带地震活动的结果

前文提到深部裂缝与 $f_1$ ， $f_2$ ， $f_3$ 断裂的依附关系值得关注。这里更要说明它们是有多期的新活动的断裂，活动年代为25.8万年，14.9万年和9万年（表1）和2~4万年（据压碎石英和方解石及Ⅲ级阶地的数据），其中 $f_2$ 右行错距可达70~90m，至少经历剪切—平移、逆冲、拉张三次活动，断层由松散岩屑、角砾及泥质物组成<sup>[4]</sup>。这些都是强烈活动的标识。在造成 $f_2$ 活动的强地应力作用下，深部裂缝可能同时或随后亦就形成了。至于造成工区这组断裂和裂缝的强大应力来源，笔者认为可能和锦屏山—小金河断裂产生中强地震有关，因锦屏山—小金河断裂离工区只有2km，倾向NW与工区的 $f_2$ 等断裂走向相同，而后者倾向SE，前者倾向NW两者呈共轭，可能在西雅砻江河谷的深部相交。

#### 4.5 地下核爆炸对已存断层的影响

自1957年美国进行地下核爆炸以来，世界上已进行了千余次地下核试验，每次试验都是一次人为的地震活动。封闭式地下核试验产生的破坏现象与天然地震有许多相似之处，这为我们探讨深部裂缝带成因提供了参考<sup>[8]</sup>。

地下核爆炸的一个重要现象，即引起已存在的断层发生位错和张裂，形成的张裂缝沿断层走向长达几十米至几百米，宽在几十厘米至上百厘米。断层上盘上升，下盘下降，上下盘陡坎高差一般为几十厘米，甚至上百厘米。通常断层上盘岩体破坏

比下盘严重。在一次当量十万吨级核试验时，一条N85°，E/SE， $\angle 70^\circ$ 的断层，爆炸后发现上下盘位错达2m，产生的张裂缝宽几十厘米不等<sup>[9]</sup>。以上这些现象与深部裂缝带的情况多么相似！

#### 4.6 深部裂缝带的形成机制

锦屏山—小金河断裂带位于川滇菱形断块的内部，强大的构造应力引起本区NE向断层的新活动作水平走滑，具有压扭性质。由于断层的活动引发地震，地震产生弹性应力波遇到断层破碎带两侧相对完整的岩体时，一部分作为入射波在岩体中形成压应力，另一部分为反射波在反方向上形成拉应力。当这两种波以相反方向相互扫过时，形成拉张状态这或可解释锦屏山—小金河断裂带发生地震，可以牵动工区 $f_2$ 等断层活动；又因工区河岸很陡， $f_2$ 等断层与岸坡大致平行，面临河谷，自由临空，地震时的横波正好与岸坡垂直，形成拉张力而生成深部裂缝带。

## 5 结语

深部裂缝带的成因可有不同认识，但因事关国家大型水工建设和人民的生命安全，故必须研究清楚，才能放心。不然一旦发生问题，将永远愧对祖国人民，故呼吁不同认识者齐心协力，共同探讨，希望能针对上述提出的几点质疑做进一步的研究。解决以下几个关键性问题，认识就可统一。

1) 请国内外权威单位核实或重作 $f_2$ 断层的年代测试，好在成勘院已绘有 $f_2$ 断层构造分带剖面图（PD64平硐76~82m下游壁）<sup>[3]</sup>，按图采样测试工作量不大，就能得出工区断层新活动的关键性结论。另外，深部裂缝内充填的石英和钙华压碎粉末，测年结果为2.7~4万年，锦屏山穿山平硐的西口断层泥，测年结果为3~4万年，两者亦需再做一次复查扞验，以确定工区顺雅砻江是否存在活动断裂带；

2) 深部裂缝是否地震成因的另一个关键性问题，是距坝址向东2km的锦屏山—小金河断层，是否有新活动？争论很大，所幸该断层也已挖出很好的剖面，用了多种方法进行测年，但只公布了一个年龄数据，17.76万年，也应重新多做一些。这对判断是否为断层新活动而引起附近断层（ $f_2$ 等）应力的调整释放，至关重要。这里重申卸荷说、重力滑塌说和地震成因说都应做深入研究，以取得共识。学术争论可以争数年乃至上百年，但作为工

程,却不能任其争鸣下去,应只争朝夕,加速工作,将风险降到最小。据成勘院领导告知,现已将坝址移离深部裂缝带 300 m,这是令人欣慰的明智之举。

#### 参考文献

- [1] 中国科学院地质所,昆明地球研究所,中国科学院地理所西南分所.锦屏地区及其外围地壳活动性与地震地质条件的研究总结报告[R].1967
- [2] 国家电力公司成都勘测设计研究院.雅砻江锦屏一级水电站可行性研究报告(综合说明)[R].2003
- [3] 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院.雅砻江锦屏一级水电站普斯罗沟坝址左岸深部裂缝成因研究概况(汇报材料)[R].2005
- [4] 国家电力公司成都勘测设计研究院.雅砻江锦屏一级水电站可行性研究报告,3.工程地质[R].2003.65~126
- [5] 国家电力公司成都勘测设计研究院,成都理工大学.雅砻江锦屏一级水电站可行性研究报告,工程地质专题2.坝段岩石及构造研究专题报告[R].2003.118~162
- [6] 李愿军.“深部裂缝带”一种新的地震构造样式[J].中国工程科学,2006,8(4):12~18,45
- [7] 晏贤富.云南及邻区深部地质构造[J].地质学报,1981,(1)
- [8] 中国地震局地质研究所.雅砻江锦屏二级水电站场地地震参数研究报告[R].2003
- [9] 中国人民解放军总装备部军事训练教材编辑工作委员会.地下核爆炸现象学概论(上册)[M].北京:国防工业出版社,2002

## Discussion on the Origin of Deep-fissure Zones at the Site of Pusiluo Dam, Yalongjiang River

Li Ping<sup>1</sup>, Li Yuanjun<sup>2</sup>, Yang Meie<sup>1</sup>, Zhao Dongzhi<sup>2</sup>

(1. Institute of Geology, China Seismological Bureau, Beijing 100029, China;

2. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

[Abstract] The deep fissure zones have been discovered during the engineering investigation at Pusiluo dam-site, Yalongjiang River. The zones, located 100-200 meters beneath the ground, are separated by thick uninterrupted rock mass between the ground gravity unloading zone and the fissure zone. The occurrence of the deep fissure zone is similar to that of a group of NE directional faults in this area. The newest fault gouge was developed 27-90 thousand years ago and had horizontal, oblique, up-down scratches on the fissure surface. All these observable facts indicate that the deep fissure zone was perhaps caused by the recent activity of the faults, which generated seismic waves and created the deep fissure zone when the stress of waves was larger than rock's tensile strength. The genesis of deep fissure zone has been observed in the ground nuclear explosion and rock dynamics experiment.

[Key words] Pusiluo dam-site; Yalongjiang River; deep fissure zone; gravity unloading and gravity gliding; active fault