

溃坝泥石流灾害与水土流失

杨其文 李德基

(四川省丰都县水电局 中国科学院成都地理研究所)

一、引言

为了充分开发利用水资源和水能,发展灌溉、发电、防洪、供水、航运和水产养殖等目的而筑坝蓄水,全国修建了许多水库。通常,只要设计无误,严格按规范要求要求进行施工并实行科学的管理,这些水库是能够保证安全运用的。但是,在一些难以预料的自然或人为的偶然因素作用下,如战争破坏,强烈地震,库区内发生大规模山崩、滑坡,或遭遇超过设计标准的特大暴雨洪水的袭击等等,以致大坝失事,则溃坝洪水将以超过设计标准数倍、十多倍甚至几十倍的大流量和高流速下泄,吞没下游两岸的土地、房舍、田园、道路、桥梁、建筑物等生产与生活设施,造成人民生命和财产的巨大损失。一些建在流域上游的山区中小型水库,由于水源充足,沟床比降很陡,流水的动能很大,沟床及两岸山坡有大量松散固体物质补给,溃坝洪水将演变为泥石流或高含沙水流,造成爆发性水土流失灾害,淤塞沟道,污染环境,影响流域及邻近下游地区的生态平衡。由之而引起的继发性水土流失问题将持续相当长的一段时间,对遭受破坏的生态环境的恢复极为不利。1974年四川丰都县八一水库溃坝失事就是一例。该坝溃决失事导致严重的爆发性水土流失,大量泥沙、石块被输送到龙河并进入长江。其后,坝下游沿河两岸崩塌、滑坡及沟床冲刷作用比以往急剧增加,造成长时期的继发性水土流失。

二、八一水库溃坝失事前

八一水库位于四川省丰都县丛实区龙河乡境内。水库建在长江南岸龙河流域暨龙河的高桥

2、不论对于需要治理的滑坡或是需要监测的滑坡,都可埋设电阻应变测管,能够得到预报和设计的重要参数,通过实测得到的滑动面准确性高,实测的滑坡推力比估算的滑坡推力精确可靠;

3、采用新的环氧防水层配方,外贴片有效期在3—5年,内贴片有效期在7—10年左右,对滑坡的长期观测是适用的;

4、这种新技术应用时间不太长,有关应变测管同滑坡共同变形机理,防水层的老化问题,贴片长度和贴片距离,都要进一步实践和研究,希望有关科研单位和生产单位共同努力,使这一新技术得到发展和完善。

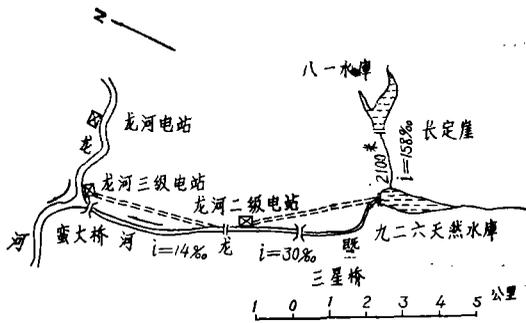


图1 八一水库地理位置图

沟上。坝址处海拔约920米,控制流域面积为1.98平方公里,距暨龙河与龙河汇口处约11.4公里(图1)。该土坝为粘土心墙式,坝身用红褐色粉质砂土填筑,心墙为粘聚性较低的砂质粘土,坝基为侏罗系砂页岩互层。设计坝高30米,库容100万立方米;1971年建成蓄水,实际坝高为26米,库容75万立方米。由于筑坝所采用的坝身填土料的级配不良,不均匀系数在10以下,即粒级比较均匀的粉质砂土,不易碾压密实,孔隙度较大,内摩擦角较小,因而抗

渗及稳定性均较差。在渗透水的潜蚀作用下容易液化。用砂质粘土填筑心墙的抗渗性亦较差,施工中随坝高降低粘土心墙未按设计高度填筑,只做了坝高的2/3,其余约1/3坝高的上部心墙被减掉了。加之施工排水处理不当——坝基开挖时露出一小股地下水,原应排到坝的下游却反被引入水库——从而在水库蓄水后形成渗流管涌的通道。这些因素给水库造成了隐患。而水库运用中管理不当,措施不力,终于导致了这场溃坝灾害的发生。

如上所述,水库蓄水后下游坝坡便有渗水出露,时间越长,蓄水位越高,渗水量越大,逸出点也随着抬高,以至管理人员检查时用竹竿可毫不费力地插入土层1.0—1.5米深,可见下部坝体已经被渗漏水所饱和、掏空了。由于对病害认识不足,既未立即控制水库蓄水位,又未及时采取上游防渗、下游排导等措施进行处理,以至在溃坝之前下游坝坡由于基础管涌和流土而形成大的孔洞,致使检查人员陷入管涌坑中。1974年9月19日下游坝坡开始整体滑动,坝身中段出现宽1厘米、长20多米的裂缝。之后,虽立即采取了挖除饱和土体,回填裂缝,迅速排放库内蓄水和降低上游库水位等一系列紧急措施,但杯水车薪,为时已晚。由于坝坡已经滑动,填缝无济于事。因渗透压力较大,饱和土体内的积水一时排不走,滑坡体无法稳定,仍继续下滑。每日下滑约13厘米。上部受牵引滑裂面延伸到坝顶,连续8天之后于9月26日早上8点30分,土坝突然溃决失事。

事后,对溃坝原因及灾情进行了调查。1978年9月和1979年3月,因开发利用九二六水库再次进行了调查。1981年夏季全省遭受特大洪灾,丰都县不少地方有山洪泥石流发生,我们从研究泥沙灾害与水土流失的关系出发,再次对八一水库溃坝灾害进行总结分析。溃坝前水库最大蓄水量为70万立方米,经过紧急排放后土坝溃决时的蓄水量为40万立方米。溃坝缺口宽52.2米,最大水深达22.48米,平均水深为17.22米(图2),历时15分钟库水全部泄完,属于“瞬时全溃”的类型。

据水库管理人员和其他目击者讲述,溃决时坝下游洪水位高达10米多,洪流夹带坝体土方和下游沟床中的大量土石,被冲垮了的两岸山坡,以及陡崖崩落中的巨石奔腾咆哮而下,经过长定崖处吼声震天,两岸剧烈震动。洪流中的泥浆、碎石飞溅天空,红色泥雾、泥浆雨遮天蔽日(当日天晴)。沿沟岸20多米宽处,

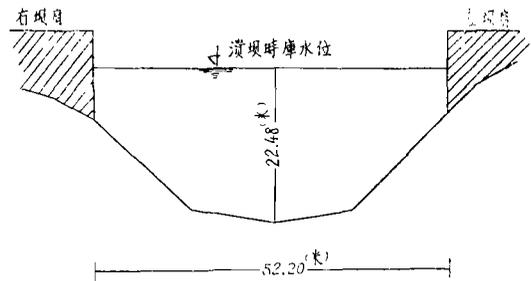


图2 八一水库实测溃坝过水断面

因洪流冲击造成岸坡垮塌，房屋亦被冲走，距沟岸100多米远的山坡上房屋开裂，重达70多吨的巨石随洪流冲击翻滚而下，坝址下游到支沟汇入暨龙河口2.1公里长的距离属于溃坝泥石流的形成一流通段，沿途地土、房屋、林木、电杆等全被冲没。泥石流抵达支沟与暨龙河汇口处，由于立波（泥石流龙头）冲击方向与暨龙河流向正交，河岸受冲击后垮塌。继因流向折转、沟床纵坡中150%减缓至30%，河道断面加大，泥石流流速骤减，致使其中所含大量巨石、泥沙迅速停积，形成天然水力冲填坝一座，后称九二六水库（这样的事例过去还很少见），库容约140万立方米。其后，被削减了的洪峰顺暨龙河干流而下，沿途因河槽展宽，沟床纵坡减缓至30—14%，导致流速减小，夹沙能力降低，沟道发生冲淤交替和以淤为主的演变过程。愈往下游流体的容重愈小，含沙量也愈小，经龙河进入长江处已不是泥石流而是典型的高浓度含沙洪水了。

总计，这场溃坝事故中有7户人家被全部冲光，死亡5人，毁房、圈34间，耕地97亩，幸而暨龙河两岸是尚未开垦、无人居住的荒山，否则损失将会更加严重。

三、产生暴发性的水土流失

根据溃坝时的水库蓄水量、溃流过水断面与泄流过程历时等基本资料，加上坝址处最大溃坝流量的调查资料，可以算出溃坝时坝址处的最大洪峰流量为3,180立方米/秒和泄流过程线（图3）如下：

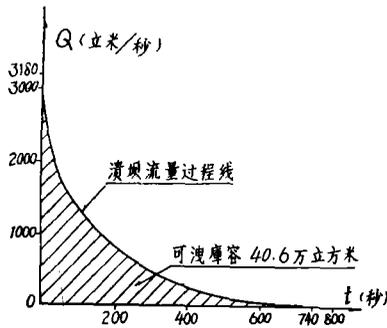


图3 坝址处溃坝流量过程线

由泄流过程 $Q \sim t$ 曲线可得，溃坝时可泄库容为40.6万立方米，泄流过程历时为12.3分钟，均与实际调查资料，即溃

坝前水库蓄水量40万立方米、水库泄空时间15分钟相符。

水库溃决时位于主沟槽部分的坝体冲刷殆尽，仅两岸局部坝肩土体幸存，损失土方约12万立方米。根据溃决总水量与坝体损失的总土方量算得洪流中土的体积含量为15.6%，流体的平均容重为1.25吨/立方米，相当于稀性泥流的容重值。

坝址下游至九二六水库处，沟段长2.1公里，沟床由海拔920米降到588.2米，总落差为331.8米，沟道的平均纵比降达158%。这个数值大大超过泥石流形成的起比降（或谓泥石流流动到堆积的临界比降）50%，使洪水有可能转变为泥石流。溃坝洪流下泄时不断加速，高速流将两岸坡耕地表土全部冲光，平均冲刷深度在1米以上，悬崖陡壁亦被冲跨，造成多处沟岸崩塌和滑坡体。据调查估算，该段沟道在溃坝过程中输移的土石方有32.5万立方米之多（其中耕地损失土壤6.5万立方米，沟底及沟岸冲走土石方26万立方米）。由于这部分土石加入洪流，使流体中土石的体积含量增加到43.6%，平均容重达1.70吨/立方米，已属于典型的粘性泥石流。

按流动过程逐段推算，并以调查洪痕（泥位）资料及断面流量资料复核，浓稠的泥石流行至高桥沟汇入暨龙河汇口处的流速高达22米/秒，沿支沟直冲暨龙河左岸，其立波（龙头）冲击方向将长约30米的一段砂质泥岩冲垮，泥石流骤然减速，致使流体中所含大量砂土、巨石停积下来，形成九二六天然水力冲填坝一座，最大坝高达15米。溃坝洪流过后，该天然坝聚水成湖，使暨龙河断流315日，水库回水长2.5公里，库容140万立方米。坝体密实稳定，蓄水多年至今未见有显著渗漏现象发生。

根据现场调查，由泥痕测得泥石流的泥位波高 $h = 6.1$ 米，溃坝洪流演进至暨龙河汇口处的流速

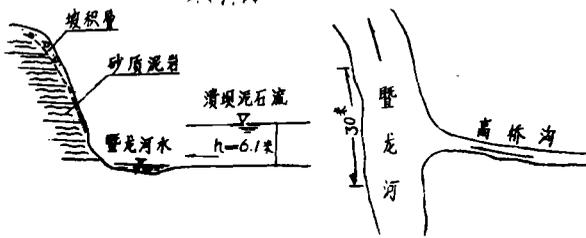


图4 高桥沟和暨龙河汇口处泥石流冲击作用示意图

方米； q —泥石流的单宽流量（立方米/秒·米）； h —实测泥石流龙头高度（米）； v —泥石流龙头流速（米/秒）。

如上所述，在溃坝时短暂的15分钟内，坝体被冲走的土方量达12万立方米，溃坝洪流沿高桥沟传播，在暨龙河以上2.1公里沟段又输移土石方32.5万立方米。即在半小时内，从坝址到九二六水库区间0.1平方公里的狭小范围内，强烈的冲刷—搬运作用就输移了44.5万立方米的土石方，按加权平均容重1.80吨/立方米（求加权平均容重时，坝体填土容重取1.60吨/立方米，耕地土壤取1.4吨/立方米，沟底及岸坡土石采用2.0吨/立方米），换算总重量为80.1万吨。分析溃坝泥石流过程中的水土流失：

1、该侵蚀量和小流域面上的一般性水土流失相比，相当于石柱水文站以上龙河流域（控制流域面积898平方公里，为八一水库控制流域面积的454倍）多年平均输沙量4.5万吨的2倍；按龙河流域年侵蚀模数451吨/平方公里换算，溃坝泥石流过程的侵蚀总量约等于八一水库控制流域面积1.98平方公里888年的来沙量。

2、由八一水库至九二六水库区间，溃坝泥石流换算的侵蚀模数为801万吨/平方公里，为龙河流域年侵蚀模数451吨/平方公里的17,760倍。丰都县全境有水土流失面积277万亩，全年流失土壤1,731万立方米，折合2,423万吨，侵蚀模数为13,120吨/平方公里。溃坝泥石流为丰都全县山地侵蚀模数的610倍。

3、由八一水库至九二六水库区间，在溃坝泥石流作用历时30分钟内，经换算所得侵蚀强度为4,450吨/平方公里·秒，为当年7月8日龙河最大日平均输沙率5,760公斤/秒相应侵蚀强度6.4公斤/平方公里·秒的70万倍。

由此可见，因水库溃坝泥石流引起的暴发性水土流失，发生突然，时间短暂，含沙浓度很高，因此一次水土流失总量、侵蚀模数和侵蚀强度都十分惊人。

四、溃坝引起的继发性水土流失和环境污染

丰都县地跨长江两岸，位处长江三峡以上的腹地，多年平均年降水量为1,100毫米，一般年份为900—1,300毫米，具有春雨、伏旱、秋绵、冬旱的气候特点。暴雨多发生在夏秋之际。全县水土流失面积达277万亩，每亩地面年平均流失土壤6.25立方米（相当于地表侵蚀量9毫米深），属于四川省水土流失比较严重的山区。

八一水库溃坝后，坝址下游沿沟（河）两岸产生多处新的滑坡、崩塌体。原有的老滑坡和堆积地段，由于沟床冲刷和泥石流过境时产生强烈震动，使岸坡的平衡状态遭到破坏，老滑坡体受

$v = 22$ 米/秒，计算出该泥石流龙头作用于暨龙河左岸单位长度上的冲击力达511.6吨/米（图4）。

根据长江流域规划办公室水文资料计算公式为

$$f = \frac{p}{g} qv = \frac{p}{g} hv^2$$

式中： f —单位宽度上的泥石流冲击力（吨/米）； p —泥石流容重采用1.70吨/立

震下移，后缘向两岸内侧延伸至数百米远，裂缝宽达10—15厘米，直到1979年3月我们再次进行调查时，滑坡体仍未稳定下来。在洪水、常流水、地下水以及暴雨径流的作用下，继发性滑坡和岸坡崩落（塌）时有发生，尤以每年雨季中发生洪水时更甚，多为高含沙水流或泥浆流，即使进入旱季后，沟中的常流水亦较以往浑浊。可见八一水库以下的支沟段及下游暨龙河的输沙量有明显增大的趋势。由溃坝泥石流所形成的九二六水库，原有140万立方米库容，因逐年淤积，加之库岸再造，塌岸、崩落大量土石，导致库容日渐减小。据实地调查测算，10年来库容已淤积过半，达80多万立方米。设若上游来沙与库岸再造各占水库淤积量的一半，据以推算九二六水库以上流域的侵蚀模数约为24,000吨/平方公里，为1974年龙河流域侵蚀模数1,140吨/平方公里的21倍。这表明八一水库溃坝后，流域在近10年中的继发性水土流失问题是相当严重的。

这场溃坝灾害，在坝体及沿程沟床提供的总土石方达44.5万立方米中，约有25万立方米为沙泥质细颗粒物，即占总体积的56.2%，其余19.5万立方米为砾石和大块石，占总体积的43.8%。自九二六水库以下，前者多随高含沙洪水悬移输送，经龙河进入长江，沿途污染水源，破坏水产资源，恶化生态环境；后者在11.4公里长的暨龙河段就地停积，或沿沟作推移运动时使该段沟道发生冲淤交替和以淤为主的演变过程，造成两岸漫滩或河岸的强烈冲刷和河道淤积。据目击者介绍，八一水库溃坝时正值秋旱季节，河中平水流量较小，溃坝洪流过境时使暨龙河中富于营养的软骨鱼遭浩劫，沿龙河一带鱼鳖在浑浊之泥浆中狼狈逃窜，死亡不计其数。事后，暨龙河断流315天，泥浆、砂石、漂木、杂草及动物残骸等遍河皆是，沿沟（河）一带的耕地遭洗劫后成了无人耕种的荒滩，留下沙石磷磷，难以恢复。九二六天然水库淹没了沿河100多亩耕地，给当地群众的生活造成了许多困难。为防止九二六水库再次造成溃坝洪水，县水电局派人将水库炸开一个缺口放水，以避免溃坝灾害重演。由上可知，水库溃坝后在相当长的一段时间里不仅给当地人民的生产和生活带来许多困难，还对自然环境起了相当大的破坏作用。

五、结 语

我国在解放以后30多年中，兴修了数以万计的各种水库，其中大多数中小型水库位于山区，其挡水建筑物多系采用当地材料筑成的土坝或土石混合坝。山区地形陡峻，风化岩土等松散固体物数量较多而且相对集中，水库蓄水以后水源充足，这样一来泥石流形成所需三个基本条件业已具备。因而一旦水库溃坝，势将产生大规模泥石流或高含沙洪水对下游造成严重的灾害，甚至在灾后相当长的一段时期里还会有继发性水土流失为害的问题，继续污染环境，影响生态平衡。从保护水土资源和生态环境来说，这是一个值得引起重视的问题，也是今后建设、开发山区资源和能源方面应予充分注意并及时加以解决的一个突出的问题。据四川省防汛指挥部办公室统计，1981年四川省特大暴雨洪灾中，全省垮坝失事的水库有59座之多；1949—1974年25年间，全国中小型水库垮坝累计达2,246座，平均每年约90座；1975年垮坝253座（钱正英1975年12月在全国防汛水库安全会议上的讲话）。这些水库溃坝失事不仅使灾情扩大，而且其所产生的暴发性水土流失和继发性水土流失危害，损失掉大量肥沃的土壤，破坏了农业生产的基本条件，导致农业减产；同时还污染江河水源，破坏水产资源，影响生态环境。这些损失难以直接用经济价值估算，因而容易被人忽视。但实际上它的后果严重，影响深远。这里，我们仅以八一水库溃坝为例，论述和分析了溃坝泥石流灾害的全过程，造成这种灾害的原因及其与水土流失的关系，盼能引起水利、水土保持、农业、林业和环境保护等部门，对这一问题的进一步重视，以便采取更为有效的防治措施，力求避免溃坝泥石流灾害的发生，或设法将灾害的损失降到最低限度。