

文章编号:1001-4179(2013)17-0072-04

基于事件树分析法的大坝可能破坏模式分析

董建良¹, 吴欢强², 傅琼华¹

(1. 江西省水利科学研究院, 江西 南昌 330029; 2. 广东珠荣工程设计有限公司, 广东 广州 510635)

摘要: 水库大坝一旦失事, 势必对下游地区造成重大生命财产威胁。运用事件树分析法原理, 以油罗口水库大坝洪水荷载作为初始事件, 对大坝可能的破坏模式及其溃坝概率进行了分析和计算。结果表明, 该水库大坝最大可能破坏模式为坝体管涌破坏, 且溃坝风险远大于安全可接受值, 上述结论与水库大坝存在的主要病险问题具有较强的吻合性。研究结论在一定程度上为水库管理单位预防溃坝事件的发生提供了理论依据。

关键词: 事件树; 破坏模式; 溃坝概率; 油罗口水库大坝

中图分类号: TV698 **文献标志码:** A

江西省是一个水利大省, 水库众多, 数量居全国各省第二位。这些水库是全省防洪体系与水利基础设施的重要组成部分, 在防洪、灌溉、供水、发电和改善生态环境等方面发挥着巨大的作用。但由于先天建设不足、后期管理不善等问题, 曾发生过多次溃坝事故, 给人民生命财产造成重大损失。

油罗口水库下游 10 km 为大余县城及南康市, 涉及 0.25 万 hm^2 农田及京九铁路、赣韶高速、323 国道等重要设施, 地理位置十分重要。2004 年的油罗口水库大坝安全鉴定认为, 该水库大坝为“三类坝”, 即属于病险水库大坝。为保证水库大坝的安全运行, 对油罗口水库进行破坏分析研究, 事先判断可能的破坏方式, 是十分必要的。

1 水库大坝溃坝概率分析方法

水库大坝溃决概率计算一般采用历史资料统计法和事件树法。至于其他方法, 如可靠度理论, 由于其复杂性以及所需计算参数很难获得, 实际应用起来困难, 只有对非常重要的大坝进行详细的定量分析时才采用。而历史资料统计法对于不同的水库, 没有太大的可参照性和可借用性, 因此, 本文决定采用事件树法对油罗口水库大坝的溃坝概率进行分析。

1.1 事件树法基本原理

事件树分析方法(Event Tree Analysis, 简称 ETA)

是一种按时间顺序进行分析的方法^[1], 即应用逻辑演绎法和图表法, 对给定的初因事件, 分析可能导致的各种事件序列的发生概率, 从而评价事件的风险。在事件树分析方法中, 事件树可表示为二元树, 即每个节点代表事件成功或失败的可能性。

对于某一座水库大坝来说, 事件树分析法是指从某一荷载状态出发, 采用追踪方法对构成大坝的各要素进行逻辑分析, 分析在该荷载状态下大坝的可能溃决失事路径, 从而构造相应的事件树以评价大坝总体的溃决概率。“所有可能的荷载”, 在非汛期, 包括正常高水位以下可能出现的各种水位荷载, 在汛期, 包括汛限水位或可能遭遇的设计洪水、校核洪水甚至更大洪水。在具体计算分析中应根据水库的实际运行情况, 确定几个特征水位, 使其能够代表“所有可能的荷载”。这些水位出现的概率是不同的。针对某一水位荷载, 分析溃决事件发展的过程, 形成溃决路径, 并对每个过程发生的可能性采用专家经验法等赋予某一概率值, 得出该水位荷载作用下这一溃决路径发生的概率。用以上方法可依次分析出该水位荷载作用下其他溃决路径及发生概率。

1.2 事件树分析法步骤^[2]

(1) 计算每种荷载状态下每条溃决路径的溃坝概率, 即各个环节发生的条件概率的乘积。设在某水位下大坝某一溃决模式中各环节的条件概率分别为

$P(i, j, k), i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, s$ 。其中, i 为库水位荷载, j 为破坏模式, k 为各环节。第 i 种荷载、第 j 种溃坝模式下大坝溃决的概率 $P(i, j)$ 为

$$P(i, j) = \prod_{k=1}^s P(i, j, k) \quad (1)$$

(2) 同一荷载状态下的各种破坏模式一般并不互斥, 因此同一荷载状态溃决的条件概率应采用 de Morgan 定律计算。设第 i 个荷载状态下有 n 个溃决模式: A_1, A_2, \dots, A_n , 其概率分别为 $P(i, 1), P(i, 2), \dots, P(i, n)$, 则 n 个溃决模式发生的概率 $P(A_1 + A_2 + A_n)$ 为

$$\max(P_1, P_2, \dots, P_n) \leq P(A_1 + A_2 + \dots + A_n) \leq 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) \quad (2)$$

de Morgan 定律就是上式中事件并集概率的上限。 $P(A_1 + A_2 + \dots + A_n)$ 即为第 i 种荷载下的大坝破坏概率 $P(i)$ 。

(3) 对所有特征水位逐一重复上述步骤, 即可以得到所有可能荷载下的所有可能溃决路径和溃决概率。由于一般情况都认为不同荷载状态下的各条件概率是互斥的, 因此大坝溃决概率等于各种荷载状态下溃决概率之和, 即:

$$P = P(1) + P(2) + \dots + P(n) \quad (3)$$

2 工程实例分析

2.1 油罗口水库工程概况^[3]

油罗口水库位于江西省赣州市大余县城以西 10.0 km 的章江上游, 集水面积 557 km², 总库容 1.19 亿 m³, 是一座以防洪为主, 兼有供水、发电、灌溉等综合效益的大(二)型水库。水库正常蓄水位 220.00 m, 设计水位 222.29 m(500 a 一遇), 校核洪水位 223.70 m(5 000 a 一遇)。工程于 1969 年动工兴建, 1971 年基本建成, 后虽经多次加固处理, 但由于种种原因, 水库一直带病运行, 远未能发挥设计效益, 并对下游造成巨大的威胁。

2.2 可能破坏模式分析

影响油罗口水库大坝安全的因素较多, 根据现场掌握的油罗口水库大坝存在的病险问题, 结合武汉大学编制完成的《江西省赣州市大余县油罗口水库大坝安全评价报告》, 参照前人总结的我国大坝主要破坏模式^[4], 对造成水库大坝破坏的初始事件进行逐一筛选, 考虑将洪水作为可能导致水库大坝破坏的初始事件做进一步的破坏分析研究, 并按照破坏原因和机理, 归纳出了如下几种破坏路径状况。

(1) 状况 1。由坝体渗漏引起溃决, 其破坏路径

为: 坝体集中渗漏→继续大渗漏→渗漏发展成管涌→干预失败→坝体溃决; 坝体集中渗漏→继续小渗漏→渗漏发展成管涌→干预失败→坝体溃决; 坝体集中渗漏→继续大渗漏→渗漏发展成管涌→干预失败→坍塌/坝顶沉陷溃决; 坝体集中渗漏→继续小渗漏→渗漏发展成管涌→干预失败→边坡失稳漫顶溃决。

(2) 状况 2。由坝基渗漏引起溃决, 其破坏路径为: 坝基集中渗漏→继续大渗漏→坝基冲刷发展→干预失败→坝体溃决; 坝基集中渗漏→继续小渗漏→坝基冲刷发展→干预失败→坝体溃决; 坝基集中渗漏→继续大渗漏→坝基冲刷发展→干预失败→坍塌/坝顶沉陷溃决; 坝基集中渗漏→继续小渗漏→坝基冲刷发展→干预失败→边坡失稳漫顶溃决。

(3) 状况 3。由坝基渗漏引起溃决, 其破坏路径为: 坝体边坡逐渐破坏→形成管涌→管涌发展→干预失败→坝体溃决; 坝体边坡逐渐破坏→形成管涌→管涌发展→干预失败→边坡失稳漫顶溃决。

(4) 状况 4。由发电引水隧洞渗漏引起溃决, 其破坏路径为: 发电引水隧洞集中渗漏→继续大渗漏→渗漏发展→干预失败→坝体溃决; 发电引水隧洞集中渗漏→继续小渗漏→渗漏发展→干预失败→坝体溃决。

(5) 状况 5。由溢洪道渗漏引起溃决, 其破坏路径为: 溢洪道翼墙集中渗漏→继续大渗漏→渗漏发展→干预失败→坝体溃决; 溢洪道翼墙集中渗漏→继续小渗漏→渗漏发展→干预失败→坝体溃决。

2.3 各可能破坏模式年溃决概率分析

根据油罗口水库大坝可能破坏模式分析结果, 结合洪水重现期, 本文采用手工划分法把洪水重现期划分为 6 种荷载状态。根据破坏路径构造各分支事件树, 利用事件树分析法, 计算同一荷载状态下各种破坏的溃决概率, 然后计算该荷载状态下的溃决概率, 最后得到洪水条件下大坝的溃决概率, 见表 1。

表 1 油罗口水库大坝溃决概率

荷载状态 (以洪水重现期表示)	频率	破坏模式	
		破坏概率	年溃坝概率
5000 ~ 10000a	f_1	p_1	$f_1 p_1$
1000 ~ 5000a	f_2	p_2	$f_2 p_2$
500 ~ 1000a	f_3	p_3	$f_3 p_3$
100 ~ 500a	f_4	p_4	$f_4 p_4$
50 ~ 100a	f_5	p_5	$f_5 p_5$
1 ~ 50a	f_6	p_6	$f_6 p_6$

注: $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6$ 为各洪水荷载状态下各可能破坏模式溃坝概率之和; $f_1 p_1, f_2 p_2, f_3 p_3, f_4 p_4, f_5 p_5, f_6 p_6$ 为各洪水荷载状态下各可能破坏模式年溃坝概率之和。

每种洪水荷载状态发生概率 f_1, f_2, \dots, f_6 为该洪水

频率范围内洪水出现概率,见表2。

表 2 各洪水重现期区间频率计算结果

洪水重现期/a	洪水频率	库水位/m	洪水频率区间	平均库水位/m	f
1	1	218.50	1/1 ~ 1/50	219.69	0.9801
50	0.02	220.88	1/50 ~ 1/100	221.10	0.0100
100	0.01	221.31	1/100 ~ 1/500	221.80	0.0080
500	0.002	222.29	1/500 ~ 1/1000	222.50	0.0010
1000	0.001	222.71	1/1000 ~ 1/5000	223.21	0.0008
5000	0.0002	223.70	1/5000 ~ 1/10000	223.91	0.0001
10000	0.0001	224.12			

$\sum f = 1.0$

这里以 10 000 ~ 5 000 a 一遇洪水荷载状态为例,构造了各种可能破坏模式的事件树,如图 1 ~ 3 所示(部分事件树略)。

图 1 ~ 3 中,“发生”系指开始形成集中渗漏并开始冲刷;“继续”系指继续冲刷;“发展”系指冲刷通道扩大,形成管涌;“干预”系指人工干预成功,“未干预”系指未采取人工干预或人工干预失败;“溃决”系指在未采取人工干预或人工干预失败情况下溃决。

事件树各环节条件概率 $P(i,j,k)$ 的计算,首先应找出导致这一环节事件发生的全部因素,后依据李雷等提供的我国大坝破坏事件发生的定性描述和概率对应表^[2],把各种因素对事件的影响大小转换成概率,利用各种因素之间的关系及发生的概率,计算出各环节的条件概率。

通过对事件树的整理分析,应用 de Morgan 定律,10 000 ~ 5 000 a 一遇洪水荷载状态下各种破坏模式的年溃坝概率见表 3。

表 3 10 000 ~ 5 000 a 一遇洪水下各种破坏模式年溃决概率

破坏模式	破坏概率	年溃坝概率
坝体管涌	2.393×10^{-2}	2.393×10^{-6}
坝基管涌	6.985×10^{-3}	5.675×10^{-7}
边坡破坏后管涌	4.032×10^{-4}	4.032×10^{-8}
发电引水隧洞管涌	6.637×10^{-7}	6.637×10^{-11}
溢洪道管涌	3.191×10^{-7}	3.191×10^{-11}
塌陷/超高不足	7.828×10^{-3}	7.828×10^{-7}
边坡失稳后漫顶	6.745×10^{-5}	6.745×10^{-9}

以上计算仅针对 10 000 ~ 5 000 a 一遇洪水事件,

其余洪水荷载状态下计算方法完全相同,只是事件树中各子事件赋值概率不一样,由于篇幅有限,这里不再累赘。将各洪水荷载状态下相同破坏模式的年溃决概率相加,可得到各种破坏模式总的年溃决概率。经整理分析,油罗口水库大坝各种破坏模式的年溃决概率见表 4。

从表 4 可知:① 该水库大坝洪水引起的年溃坝概率为 2.36×10^{-3} ,远大于大坝安全所能接受的值 10^{-4} 或 2×10^{-4} ^[5],具有除险加固的必要性。② 该水库大坝最有可能发生的破坏模式为坝体管涌产生的破坏,其次为坝基管涌产生的破坏,与《江西省赣州市大余县油罗口水库大坝安全评价报告》评价鉴定结论大坝坝身、坝基和两岸坝肩漏水较为严重具有较强的吻合性。除险加

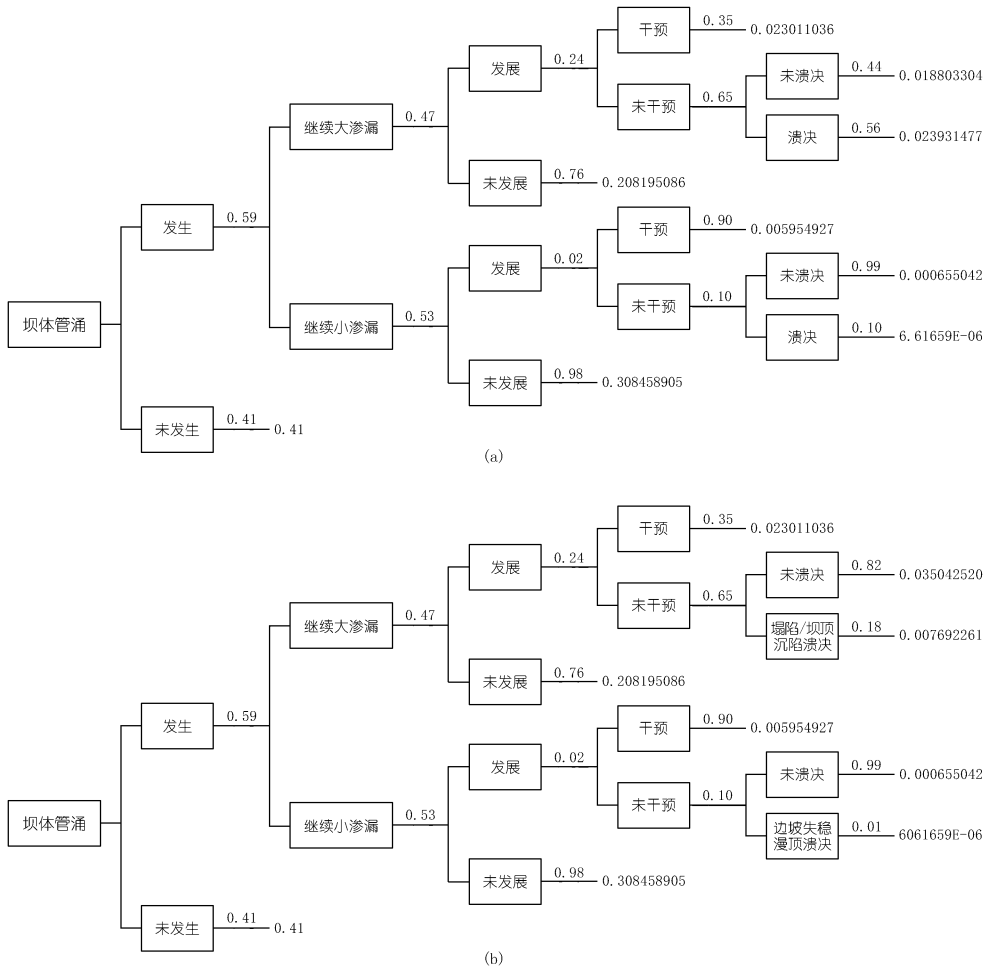


图 1 坝体管涌破坏事件树

表 4 油罗口水库大坝各种溃坝模式的年溃决概率

破坏模式	年溃坝概率	所占百分比/%	破坏模式	年溃坝概率	所占百分比/%
边坡失稳后漫顶	7.864×10^{-6}	0.333	塌陷/超高不足	4.929×10^{-4}	20.857
坝体管涌	1.515×10^{-3}	64.090	溢洪道失事	1.506×10^{-8}	0.001
坝基管涌	3.099×10^{-4}	13.114	发电引水隧洞失事	2.673×10^{-8}	0.001
边坡破坏后管涌	3.793×10^{-5}	1.605	合计	2.360×10^{-3}	100

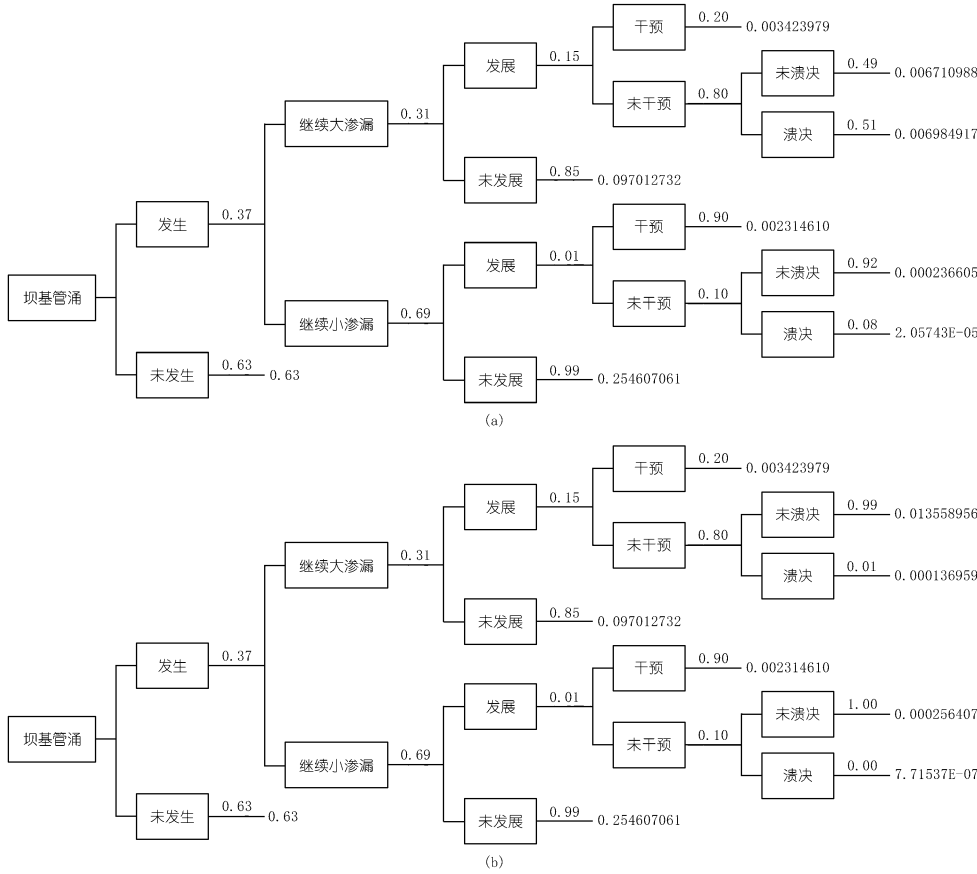


图 2 坝基管涌破坏事件树

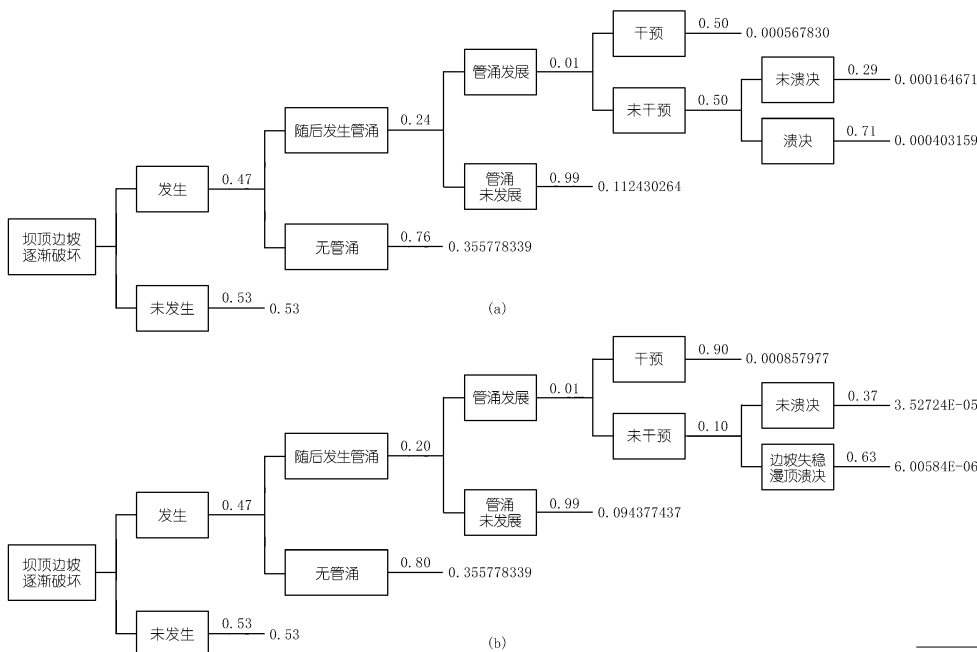


图 3 坝顶边坡逐渐破坏事件树

固前坝体渗漏隐患部位应特别引起水库管理单位的高度重视,严格落实好日常的安全检查及维护工作。

3 结语

随着经济社会的发展,水库大坝安全与公共安全更加息息相关,水库安全已成为公众关注的焦点。通过本文的分析,在一定程度上为油罗口水库大坝管理单位有重点、有目的地组织制定水库大坝日常管理、维护和防洪减灾工作提供了技术依据,从而有助于提高水库大坝的安全管理水平及应对突发事件和溃坝灾害防控能力,降低溃坝事件的发生,保证下游生命和财产安全,维持社会经济可持续发展。

参考文献:

- [1] 曾声奎,赵廷弟,张建国,等. 系统可靠性设计分析教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2001.
- [2] 李雷,王仁钟,盛金保,等. 大坝风险评级及风险管理[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- [3] 周和清等. 江西省大余县油罗口水库除险加固工程初步设计[R]. 武汉:长江勘测规划设计研究院,2005.
- [4] 彭雪辉. 风险分析在我国大坝安全上的应用[D]. 南京水利科学研究院硕士学位论文,2003.
- [5] 马福恒. 病险水库大坝风险分析与预警方法[D]. 河海大学博士学位论文,2006.

(编辑:郑毅)

(上接第 75 页)

Possible failure mode analysis for a dam based on event tree analysis methodology

DONG Jianliang¹, WU Huanqiang², FU Qionghua¹

(1. Jiangxi Provincial Institute of Water Sciences, Nanchang 330029, China; 2. Guangdong Zhurong Engineering Design Co., Ltd, Guangzhou 510635, China)

Abstract: Once dam – break occurs, it would threat downstream people's life and property severely. The flood load of Youluokou Reservoir is considered as an initial event, then the possible failure mode and break possibility of the dam is analyzed by the event tree analysis methodology. The results show that the most possible failure mode is identified as dam piping and the responding dam – break possibility is much higher than the acceptable standard. The analysis results are in well accordance with the realistic dangerous problems of the dam and provide a theoretic basis of dam – breaking prevention for the reservoir administrative department.

Key words: event tree; failure mode; dam – breaking possibility; Youluokou Reservoir

(上接第 79 页)

Simulation research on hydraulic characteristics of conical X – shaped flaring gate piers in lock chamber

XUE Yang, XU Jianrong, PENG Yu, XU Lingjun

(Hydrochina Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to accurately simulate the flow field of hydraulic structures, 3 – D numerical simulation was carried out for flood discharge and energy dissipation process of conical X – shaped flaring gate piers in a hydropower project by using Coupled Level Set and VOF (CLVOF) method and RNG $k - \varepsilon$ turbulent model. The variation laws of flow pattern, water surface profile, velocities and pressure distributions in lock chamber with conical X – shaped flaring gate piers were obtained. The results of numerical simulation were compared with the model test data and good agreement was found, which verifies the reliability of CLVOF method.

Key words: CLSVOF method; RNG model; conical X – shaped flaring gate piers; discharge through surface hole

(上接第 86 页)

Discussion on design of runoff plot in soil and water conservation experiment

XIE Songhua^{1,2}, FANG Shaowen², WANG Nong²

(1. Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang 330029, China)

Abstract: Runoff plot test is a principal method for research of soil and water conservation, and also the main approach of runoff sedimentation measurement. The pros and cons analysis is conducted for the planned construction of runoff plot according to relevant national soil and water conservation specifications. The main part of a runoff plot, located in eco – science and technology park of Jiangxi Province, including boundary ridge, collecting channel, diversion tube/flume, collecting tank/pool, and flow – dividing box/tank are designed specifically. The paper proposed the principles in design of runoff plot: improving the accuracy and decreasing the error of tests; saving construction materials and cutting down project costs; reducing the difficulty of construction and enhancing construction quality; as well as being conducive to post observations and lessening operating costs.

Key words: soil and water conservation; runoff plot; plot design; Jiangxi Province