

施工导流风险分析

胡志根 刘 全 著
陈志鼎 范锡峨

1.1



科学出版社
www.sciencep.com

施工导流风险分析

胡志根 刘 全 陈志鼎 范锡峨 著

科学出版社

北 京

无
TV551.1
1-531

内 容 简 介

本书系统全面地阐述了水利水电工程施工导流风险分析的理论与方法。主要内容包括:施工导流风险分析原理、施工水力学的计算、施工导流洪水的不确定性分析、导流建筑物泄水能力的不确定性分析、土石围堰度汛风险分析、过水围堰稳定性分析、水电工程施工导流方案风险评价及其工程应用实例。

本书可供水利水电工程导流设计、施工与工程管理人员以及高等院校的水利水电工程专业本科生、研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

施工导流风险分析/胡志根等著. —北京:科学出版社, 2010

ISBN 978-7-03-026563-0

I. ①施… II. ①胡… III. ①导流-风险分析 IV. ①TV551.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 017450 号

责任编辑:沈 建 / 责任校对:陈玉凤

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

涿 州 印 刷 有 限 责 任 公 司 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 2 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2010 年 2 月第一次印刷 印张: 14 1/4

印数: 1—2 500 字数: 273 000

定价: 48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

水利水电工程施工是自然客观存在和人类主观改造相互交织的复杂系统,众多不确定性因素使工程风险分析涉及主观、客观的跨学科研究领域。施工导流是水利水电工程施工的控制性项目,贯穿整个施工过程。施工导流风险分析是水利水电工程施工系统可行性评估、施工规划、设计、计划实施与工程保险的重要科学技术支撑和保证。我国从 20 世纪 80 年代开始对施工导流风险开展研究,1987 年,肖焕雄教授首先提出水利水电工程施工导流标准的“风险率”概念。20 多年来,国内外学者围绕施工导流风险率的刻画及其与施工洪水重现期的内在关系,超标洪水风险率、费用风险率和工期风险率的计算方法,施工导流风险配置与风险管理等一系列基础性科学问题开展研究,揭示了施工导流系统不确定性因素的分布特征和施工导流风险的时空分布规律,已初步建立其系统风险的辨识、估计、分析和建模的理论体系与方法,研究成果应用于三峡、溪洛渡、锦屏一级、向家坝、水布垭、糯扎渡、观音岩、鲁地拉等大型水利水电工程设计和施工中,为科学地评价水利水电工程施工过程风险和保证工程建设过程中防洪度汛安全奠定了重要的理论基础,并且取得了很好的经济效益和社会效益。

自 20 世纪 80 年代以来,武汉大学水利水电学院施工教研室开始对复杂水利水电工程施工导流系统风险开展研究,通过系统总结和科学凝练初步形成了施工导流风险分析的理论体系与方法。本书系统地介绍了施工导流风险分析的理论方法及其在水利水电工程领域的应用,共分为 6 章。第 1 章论述了施工导流风险分析的原理和计算方法;第 2 章在计算水力学的理论基础上讨论了导流建筑物泄流能力计算、围堰冲刷计算和溃堰水力计算的模型与计算方法;第 3 章在分析洪峰流量、洪水过程总量和洪水历时等施工洪水的主要不确定性因素基础上,提出了施工洪水不确定性特征的随机分布及其随机模拟方法,在对导流建筑物泄流能力特性分析的基础上,提出了泄流建筑物泄流能力随机模拟方法;第 4 章针对土石过水围堰度汛风险特性进行了系统研究,提出了土石过水围堰的护板溢-渗流稳定性和下游抗冲稳定性分析方法;第 5 章基于施工导流风险测度与多目标决策理论,提出了水电工程施工导流方案风险评价方法与导流风险配置方法;第 6 章结合典型工程应用案例,讨论了水电工程施工导流风险评价方法与应用的相关问题。

本书由胡志根、刘全、陈志鼎和范锡峨共同完成。本书的研究工作得到了国家自然科学基金(50079017、50579056、50539120)、国家“十一五”科技支撑计划(2008BAB29B02)和武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室的资助。课

题组肖焕雄、周宜红、贺昌海教授和杨磊博士对书中的有关研究作出了重要贡献。研究生胡建明、李燕群、徐森泉、吴一冯、肖群香、靳鹏、何艳军、李云辉和左勤思等参与了部分研究工作。同时,还得到了天津大学钟登华教授,中国水电顾问集团公司魏志远、余奎和常作维教授级高级工程师,中国水电顾问集团西北勘测设计研究院黄天润、郭红彦、冀培民和杨鑫平教授级高级工程师,昆明勘测设计研究院许文涛、陈及新、胡平、李仕奇和张云生教授级高级工程师,成都勘测设计研究院黄河、郑家祥、傅峥和蒲建平教授级高级工程师,中南勘测设计研究院王忠耀、文杰、吴文洪和杨尚文教授级高级工程师,华东勘测设计研究院胡赛华、吕国轩和任金明教授级高级工程师等的支持与帮助。刘自辉、孟德乾、张超、吴小伟和韩琦硕士研究生参与了图表绘制工作。科学出版社沈建编辑对著作的选题、结构体系与编辑出版等提出了有建设性的意见。本书也凝聚了他们的智慧和劳动,在此向他们表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,疏漏和不妥之处在所难免,恳请批评指正。

作 者

2009年6月

目 录

前言

第 1 章 施工导流风险分析原理	1
1.1 施工导流风险研究	1
1.2 施工风险	5
1.2.1 风险的定义	5
1.2.2 施工导流风险的定义	6
1.3 施工导流风险因素	8
1.3.1 施工洪水的随机性	8
1.3.2 导流建筑物的泄洪随机性	10
1.3.3 施工进度风险	10
1.3.4 其他随机因素	11
1.4 施工导流风险度计算方法	11
1.4.1 导流风险度计算方法	11
1.4.2 施工导流风险度的计算模型	18
1.4.3 溃堰风险计算	21
1.5 施工导流风险判别	27
1.5.1 导流系统风险率	27
1.5.2 当量洪水重现期	27
第 2 章 导流水力学计算	28
2.1 导流洞泄流水力学计算	28
2.1.1 流态判别	28
2.1.2 正常水深计算	30
2.1.3 临界水深计算	32
2.1.4 隧洞上游水位计算	33
2.2 导流底孔泄流水力学计算	34
2.2.1 无压流泄流公式	34
2.2.2 半有压流泄流公式	34
2.2.3 有压流泄流公式	34
2.2.4 考虑恢复落差影响的泄水能力计算	34
2.3 明渠泄流水力学计算	36

2.3.1	明渠均匀流	36
2.3.2	明渠非均匀流	36
2.3.3	束窄河床的水力学计算	37
2.4	挡水建筑物缺口的泄流水力学计算	41
2.5	导流建筑物联合泄流水力学计算	42
2.6	围堰冲刷水力学计算	43
2.6.1	过水围堰下游流态分析	44
2.6.2	面流消能方式的冲刷模式	46
2.6.3	围堰堰脚冲刷稳定判别分析	49
2.7	溃堰洪水演进水力学计算	50
2.7.1	一维非恒定流数值计算方法	50
2.7.2	有限体积法	53
2.7.3	有限单元法	55
第3章	施工洪水和导流建筑物泄水能力的不确定性分析	56
3.1	施工洪水不确定性分析	56
3.2	施工洪水不确定性模拟	57
3.2.1	随机变量的生成	57
3.2.2	施工洪水随机变量的融合	60
3.3	考虑实测洪水的随机施工洪水综合实例分析	62
3.3.1	实测洪水的历时分布实例分析	62
3.3.2	施工洪水随机模拟分析	63
3.4	导流建筑物泄流能力的不确定性分析	65
3.5	泄流能力的不确定性分析	65
3.5.1	泄流能力随机参数	65
3.5.2	泄流能力随机模拟与概率模型反演	69
第4章	土石过水围堰度汛风险分析	73
4.1	概述	73
4.2	土石过水围堰挡水期导流标准	74
4.2.1	过水围堰挡水期施工导流标准选择方法	74
4.2.2	现行频率分析法	76
4.2.3	不考虑历史洪水情况下挡水标准选择	78
4.3	土石过水围堰溢洪特性	80
4.3.1	概述	80
4.3.2	土石过水围堰溢洪工况与判别	81
4.4	土石过水围堰溢洪条件下护面稳定评价指标与评判	88
4.4.1	稳定评价指标	88

4.4.2	基于突变理论的堰面护板稳定性分析	89
4.5	土石过水围堰稳定性分析	91
4.5.1	护板稳定性分析	91
4.5.2	混凝土护板的失稳机理	95
4.5.3	带状混凝土护板的受力破坏机理分析	101
4.5.4	堰体渗透稳定性分析	106
4.5.5	过水围堰堰脚淘刷风险分析	117
4.6	过水围堰混凝土护板下反滤层的可靠性分析	120
4.6.1	反滤层的设计	120
4.6.2	反滤层设计的风险	121
4.7	土石过水围堰下游冲坑估计	122
4.7.1	常用的局部冲刷公式	123
4.7.2	冲刷公式	124
第5章	水电工程施工导流方案风险评价	125
5.1	概述	125
5.2	多目标决策的常用方法及相关理论	127
5.2.1	熵理论	128
5.2.2	效用理论	132
5.3	导流方案选择综合评价方法	133
5.3.1	评价指标体系	133
5.3.2	施工导流方案多目标决策方法	134
5.3.3	效用决策方法	139
5.4	施工导流标准多目标风险决策	142
5.4.1	施工导流标准决策的目标	142
5.4.2	导流标准多目标风险决策的指标分析	143
5.4.3	导流标准多目标风险决策的权重分析	145
5.4.4	基于期望效用理论的施工导流风险均衡配置	151
第6章	工程应用与分析	153
6.1	糯扎渡水电站初期导流标准多目标风险决策	153
6.1.1	工程概况	153
6.1.2	导流设计参数	154
6.1.3	糯扎渡水电站初期导流标准多目标风险决策	156
6.2	锦屏一级水电站初期导流风险分析	159
6.2.1	工程概况	159
6.2.2	导流设计参数	160

6.2.3	初期导流动态风险计算	161
6.2.4	锦屏一级水电站施工导流风险率计算成果	161
6.2.5	初期导流标准风险分析与讨论	165
6.3	鲁地拉水电站土石围堰度汛风险分析	169
6.3.1	工程概况	169
6.3.2	上下游土石过水围堰堰坡混凝土护板的稳定性分析	170
6.3.3	鲁地拉水电站上游过水围堰堰脚淘刷分析	174
6.4	向家坝水电站施工导流风险分析	175
6.4.1	向家坝水电站一期纵向围堰堰脚冲刷风险分析	175
6.4.2	向家坝水电站二期导流风险分析	177
6.4.3	向家坝水电站二期导流标准多目标风险决策	182
6.4.4	向家坝水电站中后期导流风险分析	185
6.5	观音岩水电站施工导流标准多目标决策分析	187
6.5.1	工程概况	187
6.5.2	观音岩水电站导流标准的决策目标	190
6.5.3	导流标准风险决策指标的计算方法	190
6.5.4	初拟施工导流标准备选方案	190
6.5.5	施工导流标准多目标决策计算成果及其分析	193
6.5.6	施工导流标准风险多目标决策分析的结论	197
6.6	江坪河水电站施工导流土石围堰溃堰分析	198
6.6.1	工程概况	198
6.6.2	溃堰洪水演进计算基本资料	199
6.6.3	溃堰洪水演进计算成果	202
6.7	大隆水利枢纽防洪风险图	204
6.7.1	工程概况	204
6.7.2	防洪图编制基本资料	206
参考文献		213

第1章 施工导流风险分析原理

在江河上修建水工建筑物,通过“导、截、拦、蓄、泄”等工程措施,把水流全部或部分地导向下游或拦蓄起来,保证水工建筑物的干地施工,协调施工期间通航、供水、灌溉或水电站运行等水资源综合利用要求的矛盾,解决施工过程中施工和水流蓄泄之间的矛盾,以避免水流对水工建筑物施工的不利影响。为了使水工建筑物能在干地上进行施工,需要用围堰维护基坑,将水流引向预定的泄水通道往下游宣泄。

施工导流方式,大体上可分为分段围堰法导流和全段围堰法导流。分段围堰法亦称分期围堰法,就是用围堰将水工建筑物分段、分期维护起来进行施工的方法。所谓分段,就是在空间上用围堰将建筑物分为若干施工段进行施工。所谓分期,就是在时间上将导流分为若干时期。全段围堰法导流,就是在河床主体工程的上下游各建一道断流围堰,使水流畅经河床以外的临时或永久泄水道下泄。主体工程建成或接近建成时,再将临时泄水道封堵。

淹没基坑法导流是一种辅助导流方法,在全段围堰法和分段围堰法中均可使用。山区河流的特点是洪水期流量大、历时短,而枯水期流量则很小,水位暴涨暴落、变幅很大。例如江西上犹江水电站,坝型为混凝土重力坝,坝身允许过水,其所在河道正常水位时水面宽仅40m,水深约6~8m,当洪水来临时,河宽增加不大,水深却增加到18m。若按一般导流标准要求来设计导流建筑物,不是围堰修得很高,就是泄水建筑物的尺寸很大,而使用期较短,显然不经济。在这种情况下,可以考虑采用允许基坑淹没的导流方法,即洪水来临时围堰过水,基坑被淹没,过水部分停工,待洪水退落,围堰挡水时再继续施工。这种方法,由于基坑淹没所引起的停工天数不长,施工进度可以保证,在河道泥沙含量不大的情况下,较节省导流总费用,一般是合理的。

施工导流建筑物作为临时建筑物,其运行期风险是水电工程施工导流方案选择的重要指标,是施工导流科学决策的理论基础;同时是临时工程的费用效益评价和水利水电工程成本评价的重要部分,直接影响工程预备费的计算。因此导流系统风险识别和评估对水利水电工程施工科学发展具有重要的意义。

1.1 施工导流风险研究

导流标准的选择是关系到水电工程建设投资和顺利施工的关键问题。据国外

水电建设的统计,施工导流费用约占水电总工程费用的 5%~20%,其中河床式电站约占 15%左右。我国施工导流费用,一般占总投资的 4%~15%或占主体建筑物(坝、电站)等总投资的 10%~30%。施工导流的成败,直接影响到主体工程建设。洪水漫顶垮堰,可能使工程建设严重受阻,工期大幅延长。因此,在水电工程建设中,要对影响导流标准的工程投资、建设工期、风险损失以及导流风险各个要素进行综合定量分析,做好施工导流的规划,从总体上优化导流标准。

在导流标准决策中,导流风险是重要的决策指标。1948年,Thomas提出了计算 N 年内超过标准 P 的洪水发生 K 次的概率公式。1970年,Yen给出了工程期望寿命年限内超标准洪水发生的概率计算公式,并被列入美国水文实践指南中。从本质上讲,它们都是基于每年超标准洪水发生的可能性服从贝努利分布(Bernoulli distribution)。然而,导流风险指标的确定在一定程度上还要考虑导流工程的具体条件和施工的经济性、安全性,才能明确导流工程可能承担的风险大小。在这方面不少学者做了一定的工作,给出了一些风险率模型。1983年,Lee和Mays利用条件概率公式,同时考虑水文和水力不确定性的概率模型,将实际洪峰流量 Q_L 当作荷载,泄流能力 Q_R 作抗力,通过数理统计方法确定其概率分布,采用结构可靠性的失效概率公式,推导出风险率计算模型。该模型没有考虑系统使用寿命和系统风险随时间变化的作用,而将实际洪峰流量和泄流能力看作是相互独立的与时间无关的随机变量,认为只有大于设计洪水的洪水才属于荷载,并且抗力大于设计洪水。但是系统风险率的大小是系统具有的实际泄流能力与实际洪水流量的相对大小决定的。Afshar在考虑水文随机性和水力随机性的基础上提出优化导流方案的计算方法。Borgman、Shanne和Lynn等将Poisson过程引入风险分析模型,取部分历时洪峰序列,假定在 $(0, t)$ 内洪峰个数服从齐次Poisson过程,洪峰大小服从指数分布,研究了最大超定量洪峰分布问题。1980年,Tung研究了基于风险的设计中水文的不确定性、参数的不确定性以及水力的不确定性。1999年,Futaisi和Stedinger认为水文不确定性、水力不确定性以及经济不确定性影响洪水风险的控制,提出风险决策模型。2003年,Nasir、Cabe和Hartono对施工进度安排表进行分析研究,提出了施工进度风险计算模型。2004年,Warszawski和Sacks针对传统的风险计算方法较为复杂的状况,对工程项目风险给出了实用的多因素计算方法。2006年,Humberto对Aguamilpa坝发生超标洪水上游围堰过水条件下的导流风险进行了计算。

Loucks等通过分析来水洪量与防洪库容之间的关系,得出了在一定防洪库容的情况下,不同洪量所造成的损失。Yazicigil和Houck等对入库洪水与最大库容之间的关系进行了分析,认为根据现有典型年设计洪水所计算的水库最高防洪水位,会因所选典型并不恶劣而使水库存在相当大的超校核洪水位的风险。美国陆军工程师团(United States Army Corps of Engineers, USACE)的Hagen用

相对风险指数来判别大坝风险,依靠专家判断漫顶因素和结构险情因素的风险值。

国内在1983年以来开始针对洪水风险和施工导流风险进行了系统的研究工作,1987年,肖焕雄系统论述了施工导流标准,提出了施工导流标准的“风险率”概念和导流建筑物泄洪能力风险率估计的计算方法。1989年,郭子中、徐祖信分析了开敞式溢洪道水力设计中的各种不确定性,提出了开敞式溢洪道泄洪风险的计算模型,并首次将结构可靠度计算中广泛采用的JC法用于泄洪风险的计算。1993年,肖焕雄、韩采燕将超标洪水间隔时段作为随机变量来研究超标洪水风险率,并对洪水间隔时间的概率分布做了初步研究,提出费用风险率,建立了两重随机有偿服务系统的风险率计算模型;1997年,谢崇宝、袁宏源等较全面地分析了水库防洪风险计算中存在的水文、水力及水位库容关系的不确定性,探讨了其分布及参数的确定方法,研究了水库防洪全面风险率模型应用问题。1994年,姜树海基于调洪演算和水库坝前水位变化的随机微分方程,以随机微分方程的理论为基础,建立了与水库坝前水位变化直接联系的风险率模型。1996年,唐晓阳、肖焕雄定义了风险率功能函数,提出并建立了施工导流系统设计风险率模型;孙志禹以三重随机过程理论推导了过水围堰导流工期风险率计算模型。1997年,李本强将施工洪水考虑为非齐次Poisson过程,建立了相应的瞬时风险分析模型。1998年,钟登华根据实测日径流系列建立了随机模拟模型,经统计得出各种风险率下的设计流量与超标洪水发生次数的关系。2002年,胡志根等提出利用Monte-Carlo法模拟施工洪水过程和导流建筑物泄流工况,进行施工洪水调洪演算,用统计分析模型确定不同导流标准条件下围堰运行的动态风险。2006年,胡志根等提出在期望效用损失均衡原则的指导下,引入决策者的风险态度,从而建立施工导流系统的风险分配机制。

综上所述,现有施工导流风险的研究成果大致有以下几类:

1) 只考虑水文不确定性,而未考虑水力不确定性的概率模型

早期的风险率模型主要是基于古典概率论方法,1970年Yen导出了 N 年内遭遇超标洪水的风险率模型:

$$R = (1 - P)^N \quad (1.1)$$

式中: P ——设计洪水频率;

N ——导流系统使用年限;

R —— N 年内遭遇超标洪水的概率。

美国的《确定洪水频率指南》中指出采用二项分布的风险率计算模型:

$$S(i) = C_N^i P^i (1 - P)^{N-i} \quad (1.2)$$

式中: i ——出现超标洪水的年份;

$S(i)$ —— N 年内遭遇 i 次超标洪水的概率。

上述模型计算简单,但是没有考虑水力不确定性,没有考虑建筑物泄流能力的不确定性,当然很难全面反映工程实际。

2) 同时考虑水文和水力不确定性的概率模型

这类模型将实际洪峰流量 Q_L 当作荷载,泄流能力 Q_R 当作抗力,通过数理统计方法确定其概率分布,采用结构可靠性的失效概率公式:

$$R = P\{Q_L > Q_R\} = \int_0^{+\infty} \int_{Q_R}^{+\infty} f_R(Q_R) f_L(Q_L) dQ_R dQ_L \quad (1.3)$$

式中: $f_R(Q_R)$ ——抗力概率密度函数;

$f_L(Q_L)$ ——荷载概率密度函数。

式(1.3)并没有考虑系统使用寿命和系统风险随时间变化的作用,而将实际洪峰流量和泄流能力看作是相互独立且与时间无关的随机变量,但这并不完全符合实际情况。

1983年, Lee 和 Mays 利用条件概率公式,推导出风险率计算模型为

$$R = \frac{\int_{Q_T}^{+\infty} f(r) (1 - \exp\{-L[1 - F_L(r)]\}) dr}{1 - F_R(Q_T)} \quad (1.4)$$

式中: L ——系统使用年限;

$f(\cdot)$ ——系统泄流能力概率密度函数;

$F_L(\cdot)$ ——年最大洪水的概率分布函数;

$F_R(\cdot)$ ——系统泄流能力的概率分布函数;

Q_T ——设计洪水。

式(1.4)在推导过程中,认为只有大于设计洪水的洪水才属于荷载,并且抗力大于设计洪水。但这一前提条件并不合理,因为系统风险率的大小是由系统具有的实际泄流能力与实际洪水流量的相对大小决定的。当实际泄流能力小于设计泄流能力时,即使实际洪水小于设计洪水,也可能因为洪水大于实际泄流能力而发生系统失效。

3) 基于超标洪水间隔时间的随机点过程的风险率模型

20世纪60年代, Borgman、Shanne 和 Lynn 等最早引入 Poisson 过程模型,提取部分历时洪峰序列,假定在 $(0, t)$ 内洪峰个数服从齐次 Poisson 过程,洪峰大小服从指数分布,研究了最大超标洪峰分布问题。1989年以后邓永录、徐宗学、叶守泽、肖焕雄和韩采燕等基于随机点过程理论,提出了一些风险率计算模型,但由于只考虑了水文不确定性,而未考虑系统泄流能力的水力不确定性,很难直接应用于施工导流工程实践。

1996年,肖焕雄、孙志禹等提出了同时考虑水文和水力不确定性的二重随机过程模型,较全面地反映了施工导流系统的实际情况,但要求有长期准确的水文实测资料和工程技术资料作支撑,当资料容量小而设计要求高时,可能会因为容量不

足而难以得到满意的结果。

4) 基于调洪演算和堰前水位变化的随机微分方程的风险率模型

以随机微分方程 Wiener 过程(姜树海, 1993)的理论为基础, 建立了与堰前水位变化而直接联系的随机微分方程:

$$\begin{cases} \frac{dH(t)}{dt} = \frac{[\mu_{Q1}(t) - \mu_{Q2}(H, X)]}{G(\mu_H)} + \frac{dB(t)}{G(H)} \\ H(t_0) = H_0 \end{cases} \quad (1.5)$$

式中: $H(t)$ —— 坝前水位随机过程;

$\mu_{Q1}(t)$ —— 河道来流量过程 $Q_1(t)$ 的均值函数;

$\mu_{Q2}(H, X)$ —— 泄流流量过程 $Q_2(t)$ 的均值函数;

$G(H)$ —— 坝前水位流量关系曲线;

$\frac{dB(t)}{dt}$ —— 正态分布白噪声。

式(1.5)较全面地反映了施工导流的实际情况, 但堰前水位的分布推求困难, 失效概率的计算公式还需要完善。

5) 基于 Monte-Carlo 法模拟施工导流调洪演算与堰前水位分布的风险率模型

采用随机微分方程方法求解调洪演算和堰前水位分布时, 要推求其微分方程组。对于不同水电工程的施工洪水特性, 微分方程的求解存在困难。为此, 可以利用 Monte-Carlo 方法模拟施工洪水过程和导流建筑物泄流, 通过系统仿真方法进行施工洪水调洪演算, 用统计分析模型确定施工导流的上游围堰堰前水位分布和导流系统风险。

1.2 施工风险

1.2.1 风险的定义

风险(risk)在韦氏英语辞典中则被解释为:“失去、伤害、劣势的可能性, 导致危险或损失的事与人。”

风险分析最早可追溯到公元前 3200 年, 在两河(底格里斯河、幼发拉底河)流域居住的美索不达米亚人(Mesopotamia)中有一群被称作阿斯普(Asipu)的人, 他们就人们的婚嫁、住宅选址等活动进行风险分析。而洪水的风险分析在 1963 年美国制定的防洪法(Flood Control Act)中就提出过, 设计过程中要考虑失事后果。但直至 20 世纪 70 年代, 人们对风险(risk)还了解很少。那时, 在西欧人们认为“风险管理”(risk management)就是买保险, “风险评估”(risk assessment)就是对财政支出额的模糊评判, 后来由于几场不幸的灾害, “风险分析”的观念才逐渐进入

人们的意识当中,人们开始思考,我们可以忍受的灾害概率是多少,人生命的价值有多大。1980年,美国风险分析协会(the Society for Risk Analysis, SRA)成立,并且成为不同学术团体对关于风险的思想交流的焦点论坛。此后,德国、法国、日本等发达国家的风险管理都在美国理论体系下发展起来。我国也成立了中国灾害防御协会风险分析专业委员会,并广泛地与美国风险分析协会、欧洲风险分析协会(Society for Risk Analysis-Europe, SRA-E)、日本风险分析协会(Society for Risk Analysis-Japan, SRA-J)等机构进行学术交流。

人们对某事件总有一个预期,当发生结果大于预期时称为收益;反之为损失。风险通常是指损失发生的不确定性,如果只考虑损失则这种风险称为纯粹的风险。因此,我们认为风险包括三个组成部分:事件、发生的概率和影响。风险率是指系统在规定的时间和规定的条件下,不能完成规定功能的概率,也可以表示成系统的荷载超过系统承载能力的概率,即

$$p_i = P(X < Y) \quad (1.6)$$

式中: p_i ——系统的风险率,也称失败概率;

X ——系统的抗力,即承载能力;

Y ——系统的荷载;

$P(\cdot)$ ——概率。

而可靠性分析是研究系统在规定的时间和规定的条件下,完成规定功能的概率,即系统的可靠性,即

$$p_s = P(X > Y) \quad (1.7)$$

式中: p_s ——系统的可靠度,也称安全概率。

可见风险分析和可靠性分析是分别从正反两方面去研究问题,单从概率角度分析,它们存在着互补关系,即

$$p_i + p_s = 1 \quad (1.8)$$

工程风险事件可定义为一种离散性的在未来可能出现的会对工程造成影响的事件。这可能是一个我们希望出现的事情,一个具有潜在的积极影响的机会,或是一个我们不希望出现的事情或具有潜在消极结果的威胁。

1.2.2 施工导流风险的定义

虽然风险分析方法引入水电施工界的时间较短,但施工导流风险却引起人们的普遍重视,不少国内外学者在不断地探索和研究,提出了不同的导流风险的计算模式,以为施工导流工程设计和施工提供理论支持。

(1) 导流系统在规定时间和规定条件下风险率功能函数 $Z < 0$ 的概率,称为导流系统风险率。导流系统风险率设为 R 的数学表达式为

$$R = P(Q_1 < Q_2) = P(Z < 0) \quad (1.9)$$

式中: Q_1 ——导流系统泄流能力(抗力);

Q_2 ——河道来流的洪峰流量(荷载);

$$Z = Q_1 - Q_2。$$

(2) 在规定的导流期内,天然来水量超过水库的调蓄和导流泄水建筑物的泄流能力的概率(陈凤兰等,1996)。一般采用如下计算模式:

$$P_f = P\left[\int_0^T (Q_1 - Q_2) dt > \Delta V_D\right] \quad (1.10)$$

式中: T ——水库开始滞洪到出现最高库水位的延续时间;

Q_1 ——天然来水(洪水)流量,为时间 t 的函数;

Q_2 ——泄水流量,是水库水位 z 的函数,由导流建筑物的泄流量 Q_{21} 和坝身过水流量 Q_{22} 组成, $Q_2 = Q_{21} + Q_{22}$ 。当坝身不允许过水时, $Q_{22} = 0$;

ΔV_D ——水库设计滞洪库容,由围堰或坝的上升高度或坝身过水稳定所限制的库水位所决定。

将风险表达式变形后,引入调洪计算,则施工导流风险的表达式变为

$$P_f = P(Z_{\max} > Z_D) \quad (1.11)$$

式中: $Z_{\max}$ ——一次洪水过程中库水位能达到的最高值;

Z_D ——水库设计滞洪库容所对应的水位。

式(1.11)存在两个问题:一是很难将洪水过程的不确定性引入风险计算当中,虽然在上式中包含了对洪水进行调洪演算的过程,但在调洪演算的过程中难以考虑洪水过程的不确定性;二是这种计算模式只适合于采用 Monte-Carlo 法计算,并且每计算一次就要进行一次调洪演算,增加了计算工作量。为了弥补上述计算模式的不足,引入洪峰削减系数 η , 计算模式为

$$P_f = P(Q_d < \eta Q_f) \quad (1.12)$$

式中: Q_f ——河道来流的洪峰流量;

Q_d ——导流建筑物设计流量;

η ——洪峰削减系数。

根据水文不确定性在导流风险计算中的作用,式(1.12)就是基于这样的思想提出的计算模式,但是洪峰削减系数 η 的均值和标准差是依据水文资料进行多个样本的调洪演算得到的。而在实际工程中,水文资料的样本有限,所以这种模式还不能在实际工程中很好地应用。

(3) 基于导流围堰(或挡水建筑物)挡水可靠性的施工导流风险定义。在导流过程中,我们最关心的,也是最容易观测到的是上游水位是否超过围堰堰顶。当在导流时段内,水位超过堰顶时,导流系统就不能发挥作用,即失事了。因此,施工导流系统可能失效的直接原因是,在河道来流量、泄水建筑物的下泄流量等过程的作用下,堰前水位高于堰顶高程。根据设计资料,考虑水文、水力等不确定性因

素的影响,分析上游围堰高程与上游设计水位的关系。为了判断围堰是否满足度汛要求,分析施工洪水过程和导流建筑物泄流能力,在围堰施工设计规模和一定的导流标准条件下,分析确定围堰上游水位分布和围堰的挡水高度。因此,导流系统的风险率可以定义为在规定的年限内,施工导流系统不能达到保护主体工程在预期的时间和费用内安全建成的概率。

对不允许基坑淹没的情况,风险率是指在系统使用期限内,超过系统实际泄洪能力的洪水至少发生一次的概率。对允许淹没基坑的导流系统,风险率是指在系统使用期限内,基坑淹没占的工期和损耗的费用超过某一规定限值使主体工程不能按期完成的概率。围堰(或挡水建筑物)堰前水位超过围堰设计挡水位的风险率定义为

$$R = P[Z_{up}(t) > H_{upcoffer}] \quad (1.13)$$

式中: $Z_{up}(t)$ ——上游围堰堰前水位;

$H_{upcoffer}$ ——上游围堰堰顶高程。

所以,施工导流系统的风险率也就是在围堰施工及使用期内,堰前水位超过堰顶高程的概率。为了确定上游围堰堰顶高程和堰前水位,必须综合考虑堰前的洪水水文特性、导流泄洪水力条件等不确定性。现有风险率的研究也大多针对这些因素的不确定性而建立各类风险模型。

1.3 施工导流风险因素

1.3.1 施工洪水的随机性

施工导流设计中需要解决的一个重要问题就是确定设计洪水过程,这是进行工程设计的依据。现行的导流设计在确定设计洪水过程线时,需要先在实测水文资料中找出一条典型洪水过程线,然后再根据经验频率分析得到设计洪峰流量和设计洪量以及某一频率下的设计洪水过程线。为了工程的安全,上述典型洪水过程线一般具有峰高量大、主峰靠后、不利于泄洪安全等特点。而实际发生的洪水过程却是各种各样的,洪峰位置有的靠前、有的靠后,洪峰形状也各不相同,上述不利于泄洪的典型洪水过程只是其中的一种可能。将所有的洪水过程看作总体,典型洪水过程线只是其中的一个样本,它的特征不能代表施工洪水的总体特征。若仅考虑以非常情况的典型洪水过程作为设计依据,则失之片面,实际上忽略了洪水过程对泄洪风险的影响。长期以来,洪水过程的不确定性对施工导流及泄洪风险的影响一直被认为很小而忽略不计或被认为是确定性的。

在施工导流或泄洪时,无论是围堰临时挡水,还是坝体挡水,汛期洪水来临之前,堰(坝)前水位较低,洪水被蓄留在坝前的库区。如果洪峰位置靠前,则洪峰到