

# 堤防工程设计-施工-运营全过程风险评估与管理框架

蒋水华<sup>1</sup>, 黄中发<sup>1</sup>, 甘小艳<sup>2</sup>, 黄劲松<sup>1</sup>, 黄浩智<sup>2</sup>

(1. 南昌大学建筑工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 江西省河道湖泊管理局, 江西 南昌 330009)

**摘要:**提出了基于霍尔三维结构的堤防工程系统分析模型,建立了堤防工程设计-施工-运营全过程风险评估及管理的技术框架,阐明了风险分析中范围界定、风险因子识别及分析的工作要点,探讨了危险性分析中堤防失事破坏的3种原因,论述了适用于不同阶段的堤防溃决风险率计算方法及风险评估方法;并且针对不同阶段开展了堤防工程风险评价与效益分析,讨论了风险调控方案选择与对策实施及动态监测、信息反馈的技术流程与实施要点。拟定的堤防工程全过程风险评估及管理工作流程和技术方案有望在工程实践中逐步得到应用和发展完善。

**关键词:**堤防工程;溃决风险;风险率;全过程风险评估;风险管理

**中图分类号:**TV871      **文献标志码:**A      **文章编号:**1006-7647(2020)02-0042-08

**Risk assessment and management framework for dike engineering during whole process of design-construction-operation**//JIANG Shuihua<sup>1</sup>, HUANG Zhongfa<sup>1</sup>, GAN Xiaoyan<sup>2</sup>, HUANG Jinsong<sup>1</sup>, HUANG Haozhi<sup>2</sup>(1. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. Jiangxi Provincial Channel and Lake Administration, Nanchang 330009, China)

**Abstract:** A system analysis model for dike engineering based on Hall three-dimensional structure was proposed and a technical framework for risk assessment and management of dike engineering during the whole process of design-construction-operation was established. The scope definition in risk analysis, identification of risk factors and working key points in risk factors analysis were clarified. Three key reasons for dike-break in the risk analysis were addressed. The methods for calculating the risk rate and assessing the dike-break risk applicable to different stages were discussed. The risk evaluation and benefit analysis of dike engineering corresponding to different stages were analyzed. The technical processes and implementation points for solution selection and countermeasures for risk control, dynamic monitoring and information feedback were also discussed. The obtained workflows and technical solutions for risk assessment and management of the dike engineering during the whole process of design-construction-operation are expected to be gradually applied and developed in practice.

**Key words:** dike engineering; dike-break risk; risk rate; whole process risk assessment; risk management

堤防工程全过程风险管理体系是对堤防工程传统管理方式和管理理念的全新挑战,也是目前提倡水利工程标准化管理的另一种模式,符合当前水利部门在水利战略和治水思路上的重大转变要求,是科学发展观对水利工程管理的客观要求。目前国内外关于堤防工程风险管理开展了一些有益的研究工作。如徐卫亚等<sup>[1]</sup>提出了场地砂土地震液化和堤防失事综合风险分析的数学模型,以及堤防风险管理的概念。周兴波等<sup>[2]</sup>阐述了确定可接受风险标准的基本原则和方法。吴兴征等<sup>[3]</sup>从堤防安全运行管理角度出发建立了边坡稳定和渗透稳定的风险评估模型,并应用于长江部分堤段风险评估中。邢

万波等<sup>[4]</sup>建立了洪水漫溢、漫顶失事概率计算模型,进而计算秦淮河堤防失事概率。丁丽<sup>[5]</sup>在拟定堤防风险因子的基础上构建堤防工程风险分析模型,进而对堤防工程风险进行评价。谢捷等<sup>[6]</sup>建立了海堤的安全评价指标体系。黄黎明等<sup>[7]</sup>将大数据成功应用到水利工程质量风险管理中。向衍等<sup>[8]</sup>研究了土石坝的长效服役风险管理。Lendering等<sup>[9]</sup>考虑堤防水位、维修河道对地质水文的影响、历史荷载三方面建立了失效概率模型,并利用荷兰圩田进行实例验证。Rosidi<sup>[10]</sup>编写了土堤的地震风险评估程序。Schweckendiek等<sup>[11]</sup>提出了一种基于贝叶斯推理的方法来更新不确定性,并着重研究了

堤防的失效破坏机理。Hui 等<sup>[12]</sup>探讨了堤防漫顶和渗透破坏风险评价问题。Zhang 等<sup>[13]</sup>建立了基于贝叶斯网络洪水作用下人类生命脆弱性模型,用于估计堤防失事死亡率。综上可知,目前国内外关于堤防工程风险的研究几乎没有从堤防全过程来管理风险以及进行风险评价及风险管理。堤防的溃堤失事的很大一部分原因是在设计阶段和施工阶段没有做好风险调控,从而留下了安全隐患。再者,堤防工程在全过程内的各个阶段风险评价方法、风险对象都有差异性,为了有效地调控堤防工程风险,十分必要建立堤防工程全过程风险管理模型。

为此,本文从设计、施工和运营 3 阶段来建立堤防工程全过程风险管理模型。在设计阶段进行风险管理,获得的风险信息可有效反馈和指导设计工作的要点;施工阶段进行风险管理,可有效减少事故的发生和提高施工的质量;在运营阶段对风险进行管理可加强维护监测工作和提高预警的有效性。通过对堤防全过程风险的层层调控,可大大降低失事可能性和失事后果,对堤防工程风险评估和管理具有重要的工程应用价值。

### 1 堤防工程设计-施工-运营全过程风险管理框架

根据堤防工程系统的特征,以堤防工程风险管理理论为指导,以有效控制堤防工程溃决风险为目标,可以从堤防工程全过程进行风险控制<sup>[14-15]</sup>,考虑到堤防工程在每个阶段的风险评估及决策存在较明显的差异性,可将由时间维、知识维和逻辑维组成的霍尔 3 维立体结构<sup>[16]</sup>与堤防工程系统有机结合,建立基于霍尔 3 维结构的堤防工程系统风险管理模型。其中时间维是指堤防开始规划设计直至堤防到达年限退役,将其划分为设计、施工和运营 3 个阶段;知识维是为控制堤防工程风险而进行的风险管理的工程信息、专业知识、管理技能、管理决策等;逻辑维是针对堤防工程风险从分析到评估再到控制 3 个方面的逻辑过程,将其分为风险分析、风险评估和 risk 决策。这种风险评估和风险管理最大的特点就是能够开展周期性评估管理,使得每个阶段的风险信息得到有效传递,决策成果相互支撑,有助于将风险控制在可接受标准范围内。动态的风险评估和风险管理可以提高风险评估的精度,提高管理决策的可靠性,使得堤防工程全过程风险管理持续、系统 and 专业化。

Fell 等<sup>[17]</sup>提出的国际滑坡风险管理理论框架已成功应用于工程边坡和自然斜坡的滑坡风险评估及管理,主要由定义分析范围、危险性分析和后果严

重性分析 3 部分组成,融合堤防全过程风险评估思维,判断损失是否在容许范围内,进行风险评价和效益分析,制定相关的风险调控对策,最后建立反馈机制形成动态的风险管理。本文借鉴该风险管理框架建立的堤防工程全过程风险管理框架如图 1 所示。

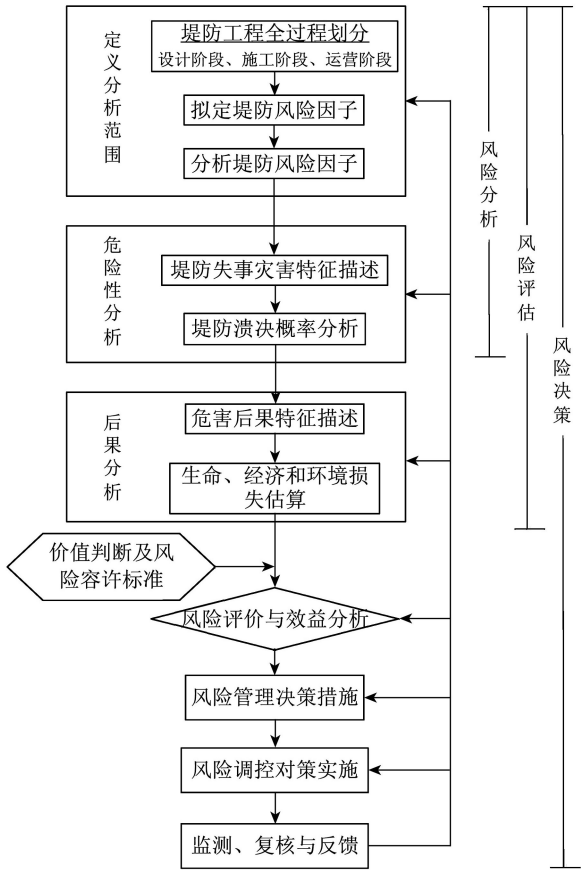


图 1 堤防工程全过程风险管理框架

### 2 堤防工程风险分析

#### 2.1 分析范围

##### 2.1.1 全过程划分

在堤防工程设计、施工和运营阶段的风险严重程度不同,风险源、影响因子、风险损失以及风险调控措施都有所不同,风险分析的对象、环境和方法也有较大的差异,所以要清楚堤防处于哪一阶段,再实时收集风险资料,明确风险对象,有针对性地进行风险分析,对症下药,实现对风险的有效控制。

##### 2.1.2 风险因子识别

堤防工程各个阶段都有风险因子。在设计阶段,地质勘察不到位导致堤防施工或运营时出现险情、堤线堤型选择不当、防渗设施设计不到位(如防渗体)以及其他结构设计达不到规范要求,导致堤防不满足防洪灌溉要求,各种材料参数、渗透参数等达不到抗冲、抗压和抗渗要求。在施工阶段,施工不

规范、碾压土石方参数达不到要求、防渗体施工不合格、土石材料规格不符、设计文件、隐蔽部位施工不合格等风险因子将直接影响堤防质量。在运营阶段,监测不到位、工程隐患发现不及时、隐患扩大、加固维养滞后、缺少预警系统以及无抢险组织等,将导致溃堤后抢险不及时,造成损失扩大。将堤防本身特点与堤防在各个阶段的功能特点结合起来,并且借鉴相关堤防风险因子研究成果<sup>[5]</sup>,识别的堤防全过程风险因子如图2所示。

2.1.3 风险因子量化

堤防风险因子对堤防的影响程度不同,一般来说,可分为定性因子和定量因子,定量因子可能含有“极大型”因子、“极小型”因子、“居中型”因子和“区间型”因子<sup>[5]</sup>。在风险分析模型中,“极大型”因子是指该因子的取值越大,风险度越高,其他因子以此类推。为了保证各风险因子对堤防风险评价的一致性,就需要对风险因子进行量化,采用丁丽<sup>[5]</sup>提出的风险因子量化方法来量化风险因子,得到堤防综合风险因子,再根据如表1判断堤防风险度。

2.2 危险性分析

2.2.1 失事灾害特征描述

确定完分析范围之后,需要收集信息描述堤防灾害特征。信息编录是堤防工程风险评估和管理的首要工作,也是基础性工作,主要包括工程基础信

息、风险因子信息、工程治理信息、承灾对象信息、风险评估信息和风险调控信息,将这些信息收集并用来系统描述灾害特征。在堤防工程全过程各个阶段内收集的信息各有侧重。在规划设计阶段,边坡信息以工程勘察信息、规划设计方案和风险调控预案为主,信息并不详尽。在施工建设阶段,基本信息得以补充和校核,并结合施工反馈信息和监控量测信息,重点开展设计方案调整和风险的动态评估与管理。在运营服务阶段,在全面掌握堤防工程设计施工信息后,侧重于运营风险的监控、养护及风险管理相关信息的更新。进行堤防工程全过程信息数据库持续更新,实现各阶段信息的共享和传递,有望显著提高堤防工程风险管理水平。

2.2.2 失事概率计算

堤防工程出现水文失事,一般是由于堤防高度过低或洪水水位过高所致。堤防发生漫顶破坏的原因可能有:①堤防工程等级较低,设计堤顶高程本身较低;②堤防沉降过大导致堤防高度不达标;③堤防施工质量不达标,未达到设计标准;④出现超标准洪水;⑤河道行洪断面缩窄。

堤防失事有3种主要形式,即水文失事风险、渗透破坏失事风险和堤坡失稳风险<sup>[19]</sup>。堤防发生溃决破坏大多是由渗透破坏所致,渗透破坏失事主要分为堤身和堤基两大类。堤身类有散浸、漏洞和集中渗流;堤基类有泡泉、土层隆起、浮动、膨胀、流土、

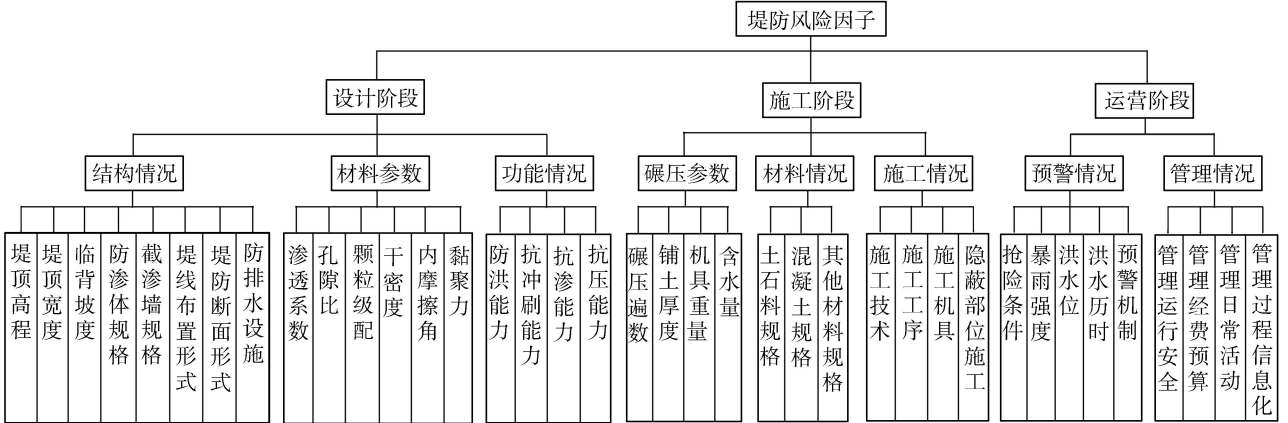


图2 堤防工程全过程风险因子

表1 堤防工程风险等级及风险度

| 风险等级 | 风险度       | 含义                                                                         | 风险损失  |
|------|-----------|----------------------------------------------------------------------------|-------|
| 很危险  | [0.9,1.0] | 按现行规程、规范、标准和设计要求,堤防工程存在危及安全的严重缺陷,汛期运行中出现重大险情的数量众多,须立即采取除险加固措施              | 不可容忍区 |
| 危险   | [0.7,0.9) | 堤防工程的功能和实际工况不能完全满足现行的规程、规范、标准和设计的要求,可能影响堤防工程的正常使用,在汛期险情数量较多,需要进行安全性调查,确定对策 | 过渡区   |
| 较安全  | [0.5,0.7) | 各项监测数据及其变化规律处于正常状态,在设计洪水水位下,按照常规的运行方式和维护条件可以保证堤防工程的安全性                     | 可接受区  |
| 安全   | <0.5      | 堤防工程的实际工况和各种功能达到了现行规程、规范、标准和设计的要求,只需正常的维修保养即可保证其安全运行                       |       |

接触冲刷和接触流失等多种形式的管涌。堤身或堤基发生渗透破坏的主要原因是随着汛期水位的升高,背水侧堤身或堤基的渗透出逸比降超过抗渗临界比降,造成渗透破坏<sup>[20]</sup>。

堤防失稳包含局部失稳和宏观失稳两个方面,主要表现为跌窝、裂缝、脱坡、崩岸、滑坡和地震险情等类型<sup>[19]</sup>。堤防局部或整体滑坡会导致堤防失事,根据断裂滑动的位置,滑坡发生在退水期高水位或发生崩塌的河岸段,背水侧滑坡发生在汛期高水位或发生渗流破坏的岸段。岸坡崩塌主要发生在临水坡滩地坡度较陡的堤段<sup>[19]</sup>。

从安全性的角度出发,结合堤防工程的风险分析实践和处理方法,假设单元堤段的破坏模式相互独立,单元堤段的失事综合风险率  $P_f$  为<sup>[18]</sup>

$$P_f \approx P_{\text{渗透}} + P_{\text{水文}} + P_{\text{失稳}} \tag{1}$$

式中:  $P_{\text{水文}}$  为水文失事概率;  $P_{\text{失稳}}$  为堤坡失稳概率;  $P_{\text{渗透}}$  为渗透破坏概率。

为了有效计算堤防失事综合风险率,目前比较常见的失效概率分析方法主要有:

**a. 历史记录法<sup>[20]</sup>。**通过长期的堤防工程安全监测与统计分析,得到不同类型的失效概率;也可根据堤防灾害的洪水位与失效概率关系来推测可能发生的灾害概率。由于历史数据可能缺失,该方法主要适用于运营阶段的长期监控。

**b. 工程类比法<sup>[20]</sup>。**基于相似区域已有堤防工程灾害数据资料,结合堤防工程分级系统和专家经验,进行工程类比分析,得到相应类型和规模的堤防灾害发生概率,该方法具有很强的区域性,在各个阶段都有较强的适用性。

**c. 可靠度分析方法。**可靠度分析可考虑土体物理力学参数的不确定性,将土体参数视作为随机变量。其中蒙特卡洛模拟方法解题思路最为清晰简单,又不受随机变量分布类型的限制,计算精度高,被国内外工程界广泛应用<sup>[21]</sup>。由于岩土参数的概率分布可以从勘察资料中进行统计分析获取,以及基于极限平衡或随机有限元分析的计算量非常大,近年来发展起来的非侵入式随机有限元法在堤防规划设计阶段逐步得到应用<sup>[22]</sup>。

2.3 后果严重性分析

2.3.1 风险定性估算

目前通常采用失事概率与后果的乘积来评价风险的大小。通常高概率事件与低概率事件的影响程度相差很大,虽然失事概率与后果的乘积可能相同,但是可能得出相反的结论。因此,考虑堤防失事概率与后果严重度级别设置的一致性,得出风险评价

标准,如表 2 所示。表 2 中 H 类为“不可接受”的风险,须立即采取除险加固措施;M 类为“有条件可容许”的风险,进行风险评价,加固处理后,需要对安全性做出论证;S 类为“有条件的可接受”的风险,经过管理和特定处理措施后,工程达到安全标准;L 类为“可接受”的风险,只需正常的维修养护即可保证其安全运行。此标准既可以作为风险评估的初步评判标准,也可作为定性评价方法的风险标准<sup>[5]</sup>。

表 2 风险评价标准

| 可能性  | 风险严重程度 |    |     |    |     |
|------|--------|----|-----|----|-----|
|      | 轻微     | 一般 | 较严重 | 严重 | 极严重 |
| 非常可能 | S      | M  | M   | H  | H   |
| 有时   | L      | S  | M   | H  | H   |
| 极小   | L      | L  | S   | M  | H   |
| 不可能  | L      | L  | S   | M  | M   |

根据表 2,需要为随机风险分析模型和风险因子组合的风险分析模型的评估结果设定风险等级。借鉴美国肯务局对风险定性描述与定量概率间的转换表<sup>[23]</sup>,拟定了风险定量概率与风险定性评价之间的转换表<sup>[5]</sup>如表 3 所示。表 3 中风险度表示风险因子组合风险评价模型计算结果;概率表示随机风险分析模型计算结果。

表 3 风险定量概率与风险定性评价之间的转化

| 定性描述 | 可能性       |       |
|------|-----------|-------|
|      | 风险度       | 概率    |
| 非常可能 | [0.9,1.0] | 0.99  |
| 有时   | [0.7,0.9) | 0.50  |
| 极小   | [0.5,0.7) | 0.10  |
| 不可能  | <0.5      | 0.001 |

2.3.2 风险定量评估

堤防失事风险定义为堤防失事综合风险率和堤防失事损失后果的乘积<sup>[21]</sup>,其中生命损失按下式定量估算:

$$R_L = P_f L \tag{2}$$

式中:  $R_L$  为每年溃堤生命损失风险;  $L$  为潜在的生命损失人口数,单位为人。计算堤防溃决造成的潜在生命损失人口数  $L$  主要有累计加权法、F-N 线法和经验公式法等 3 种方法<sup>[24]</sup>。

经济损失分为直接损失和间接损失两类,直接损失为堤防本身和附属建筑物等基础设施的损失,间接损失为淹没造成的其他损失,溃坝经济损失风险  $R_D$  可由下式进行计算<sup>[24]</sup>:

$$R_D = (D_{\text{corps}} + D_y + D_c + D_k + D_s + D_{\text{gg}}) P_f \tag{3}$$

式中:  $D_{\text{corps}}$  为农作物经济损失;  $D_y$  为渔业经济损失;  $D_c$  为家畜受灾经济损失;  $D_k$  为工矿业经济损失;  $D_s$  为商业经济损失;  $D_{\text{gg}}$  为基础设施经济损失。

目前关于堤防堤坝溃决造成的环境损失研究很

少,故推荐何鲜峰等<sup>[24]</sup>提出的定量评估方法,采用与 F-N 线法类似的 F-E 线来评估环境损失,该方法将环境影响因子量化为货币价值,进而计算其发生概率:

$$P_E(x) = 1 - F_E(x) = \int_x^\infty f_E(x) dx = P(E > x) \quad (4)$$

式中: $P_E(x)$ 为环境损失超过  $x$  的概率; $F_E(x)$ 为每年环境损失小于  $x$  的概率分布函数; $f_E(x)$ 为每年环境损失的概率密度函数。

2.3.3 全过程风险评估方法

在设计阶段,可利用定性估算方法在宏观上大致判断堤防风险等级,通过风险评价矩阵和风险定量概率与风险定性评价之间的转化表来估测风险严重程度,并进行排序,指导设计工作的侧重点以及需要采取的技术。虽然定性估量方法比较粗略,但可针对堤防渗透破坏、堤坡失稳和漫顶等破坏模式,制定相对应的工程加固设计,降低堤防失事概率,也可对重点部位、隐蔽部位分区设计并加强技术深度,因此在数据不足时,可以考虑采用定性评估方法。相比之下,定量评估方法更加科学合理,但工作量庞大,需要数据较多,难度也较高。如果对病险堤防进行加固设计,此时资料数据比较全面,可以提取风险因子并量化堤防综合风险因子,参考表 1 判断风险度,根据风险等级选择加固设计技术深度,再采用定量评估方法计算出堤防失事概率,侧重考虑水文失事、渗透失事破坏和堤坡失稳等,计算堤防失事可能造成的生命、经济和环境损失,这就可准确判断失事风险源,以及损失的轻重缓急,并有针对性地对堤防危险性较大的部位进行加固设计。

在施工阶段,受施工现场条件、降雨等因素的影响,采用定量方法评估风险难度较大,故采用定性评估方法结合施工过程中的监测动态反馈分析,随着风险评估数据不断更新与完善,可逐步提高定性评估的精度,以防止和控制施工事故和损失。

在运营阶段,堤防各个方面的信息比较全面,可开展周期性的动态监测分析,定性分析堤防存在的风险,发现潜在风险源,并据此对堤防进行风险定量评估,针对加固维养所需经费制定投放计划,调控堤防失事风险,确保堤防发挥其经济效益和社会效益。

3 设计-施工-运营全过程风险管理决策

3.1 设计阶段的风险管理决策

3.1.1 风险评价和效益分析

设计阶段的风险评价和效益分析主要从设计方案的成本、潜在的财产损失和建设成本经费来分析方案的合理性,比选最佳方案。由于堤防的危害体

主要是洪水、溃堤造成的损失可以模拟出来。引入风险判别标准,建议采用 ANCOLD 风险标准结合我国实际情况制定出符合我国堤坝的风险标准<sup>[24-25]</sup>,其中包括生命、经济和环境风险标准,以此来判断风险是否在容许范围内。风险评价和效益分析的主要内容包括:①通过设计资料结合历年洪水数据利用软件估计风险损失,判断堤防总体风险度,合理选择堤型、堤线、断面和防排水设施设计方案,避免重大堤防灾害;②针对堤防水文失事(漫顶、漫溢等)、渗透破坏和堤坡失稳 3 大破坏模式,设计具体有针对性的降低堤防失事概率的工程措施,并制定总体风险调控方案;③对堤段进行风险分级,将重点堤防或堤段作为风险调控对象,并组织专项治理方案论证,降低风险损失。

3.1.2 风险调控对策

设计阶段的风险调控对策主要从规避风险、降低危险性和降低灾害后果 3 个方面来考虑,拟定一系列风险调控对策如图 3 所示。

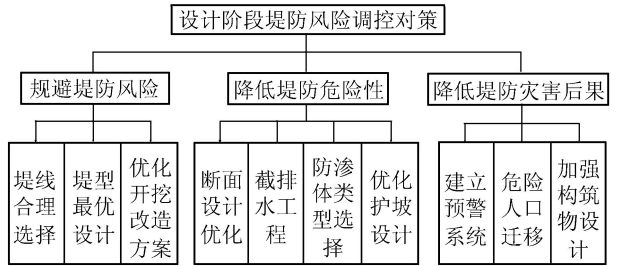


图 3 设计阶段风险调控对策

3.1.3 风险决策的实施、动态监测与反馈机制

风险决策可在工程可行性研究阶段、施工图阶段和规划设计阶段实施。在可行性研究阶段,堤防的堤线堤型优化还有很大的空间,需要根据堤防工程防洪目标、经济目标及社会效益选择最优的设计方案,并做好堤防断面设计比选,防排水工程等设计方案的论证工作。在施工图阶段,在设计方案优化的基础上,制定详细的堤防动态监测方案和风险调控预案。在规划设计阶段,在设计方案审查过程中,充分考虑专家经验,对堤防风险调控方案进行有效复核和反馈分析。

3.2 施工阶段的风险管理决策

3.2.1 风险评价和效益分析

在堤防施工阶段,设计方案已经定型,施工过程中主要可能造成人身伤害和经济损失,堤防工程很少变更设计方案,所以可根据设计阶段引入的风险容许标准来指导这一阶段的风险调控,此时要优化施工方案,动态调整施工方案。这个阶段风险评价和效益分析的主要内容有:①动态监测复核施工数据是否与设计方案一致,实时把控风险状态,及时调

整风险控制方案;②需将安全生产培训落实到3类人员(施工企业主要负责人、项目负责人和专职安全生产管理人员),技术交底到班组一线施工员;③重点堤防或堤段需要重点监控,防范溃堤事件发生。

3.2.2 风险调控对策

施工阶段的风险调控对策主要从降低危险性、降低灾害后果和转移风险3个方面来考虑,拟定的风险调控对策如图4所示。

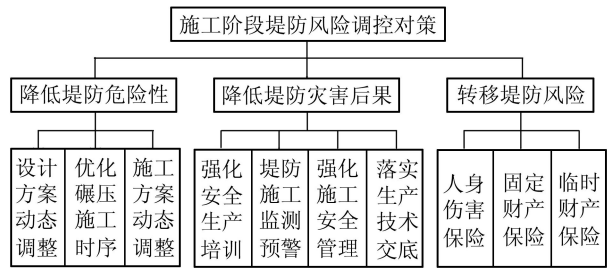


图4 施工阶段风险调控对策

3.2.3 风险决策的实施、动态监测与反馈机制

在施工阶段,主要通过施工过程中收集到的信息动态调整施工方案,保证施工按时按量完成的同时,有效调控风险。为了更好地制定风险调控对策,需要各个参建方以及专家协同实施,这样才能全面反映堤防风险状态。由于堤防大多属于碾压土石堤,碾压工作质量直接关系到整个堤防工程的质量,碾压参数的准确确定和碾压试验的准确率等都降低堤防风险有重要作用,要动态监测堤防施工数据,及时发现并反馈风险数据,进而进行风险调控。

3.3 运营阶段的风险管理决策

3.3.1 风险评价和效益分析

堤防工程的运营阶段也就是堤防发挥经济效益的阶段,此时堤防自身和周边的环境相比于施工阶段更稳定,灾害体主要是洪水和其他自然灾害,一旦堤防失事,造成的生命、经济和环境损失将不可估量,所以在此阶段有必要引入风险标准,采用何鲜锋等<sup>[24]</sup>风险标准的F-N线法结合我国实际制定的风险标准,制定适合我国堤防工程实际的风险标准,以此来指导风险评价和效益分析。这个阶段的风险评价和效益分析内容主要有:①开展周期性堤防风险调查与评估,对堤防风险分级,划分重点堤防和一般堤防;②对堤防进行周期性安全隐患排查,制定检修频率,养护活动经费投入到位;③建立堤防工程预警系统,评估加固补强工作的合理性和有效性,评估实施效益,并且可借鉴蔡尊等<sup>[26]</sup>研究成果制定堤防综合预警系统;④实施应急抢险组织等管理措施,防止灾害进一步扩大。

3.3.2 风险调控对策

运营阶段的风险调控对策主要从降低危险性、

降低灾害后果和转移风险3个方面来考虑,拟定的风险调控对策如图5所示。

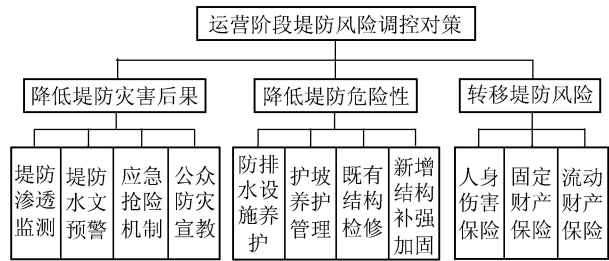


图5 运营阶段风险调控对策

3.3.3 风险决策实施、动态监测与反馈机制

运营阶段的风险调控是长期的,借鉴王浩等<sup>[27]</sup>提出的经常性监控量测与检修维护、专业化定期诊断与专项维护以及专家级预警与抢险加固为一体的路堑边坡三级风险监测管理体系来制定堤防工程风险管理决策体系:①进行经常性监控量测与检修养护,即堤防管理部门通过日常周期性的检查巡视和一些简单监测手段或工具监控堤防安全隐患,降低风险发生概率。②进行专业化定期诊断与专项维护,即聘请专业的岩土监测公司采用科学的渗透、水文、失稳监测仪器和检测方法来评估堤防风险,判断堤防稳定状态,提出堤防加固方案,并和相关管理部门一起论证方案的可行性;③进行专家级预警与抢险加固,即堤防管理部门同堤防专家对堤防安全状态进行分析,制定应急预案和应急抢险制度与方案,并出具相关加固方案,以防止堤防失事破坏灾害的进一步扩大。

4 鄱阳湖区长乐联圩堤防工程风险评估

鄱阳湖区长乐联圩<sup>[28]</sup>位于江西省北部,南昌县东部,抚河故道与抚河尾闾之间,西北至抚河故道右岸,南至抚河左岸及青岚湖,东至金溪湖及南湖。长乐联圩原堤线长100.97 km,2007年实测长度为97.1 km。圩堤保护面积248.9 km<sup>2</sup>,保护农田178.1 km<sup>2</sup>,保护水面17.3 km<sup>2</sup>,保护人口21.0万人,其中农业人口20.0万人;非农业人口1.0万人。2007年圩内工、农业总产值70731万元,其中工业产值60038万元,农业产值10693万元。粮食产量16.78万t,水产品1.136万t,油料0.4723万t。保护区内有昌万公路、乐温高速公路等重要基础设施。

定性分析风险严重性主要是量化堤防工程风险因子,如图2所示,具体风险因子量化方法参照文献[5],将量化结果对照表3来判断后果严重性及其概率,可得长乐联圩风险因子组合风险评价模型结果(风险度)为0.68,由表3可知其定性描述为可能性极小,概率为0.1,对照表1风险等级可知该堤防

较安全,处在可接受范围区。

定量分析风险严重性过程如下:根据长乐堤防工程设计及风险率分析得到  $P_{\text{水文}} = 1.52 \times 10^{-7}$ 、 $P_{\text{渗透}} = 2.39 \times 10^{-6}$ 、 $P_{\text{失稳}} = 2.13 \times 10^{-6}$ ,通过式(1)计算堤防失事概率  $P_f = 4.54 \times 10^{-6}/a$ 。采用经验公式的方法计算  $L=1$  人,通过式(2)计算生命风险  $R_L = 4.54 \times 10^{-6}$  人/a,查 F-N 线法表征的生命风险标准图处于可接受区,说明溃堤造成的生命损失风险严重性较小,经统计经济损失为 2.0015 亿元。通过式(3)计算得到经济风险  $R_D = 0.9087$  万元/a,查 F-N 线法表征的经济风险标准图处于不可容忍区,说明经济风险严重较大。另外由于环境损失涉及范围广、数据不足等原因,因而没有针对生态环境作风险严重性定量分析。

由定性评估中堤防全过程风险因子量化结果可知,该堤防还是较安全的,处在可接受范围,可针对各阶段较大的风险因子进行着重把控,降低各阶段的风险。在设计阶段优化堤线堤型,根据堤防工程防洪目标、经济目标及社会效益选择最优的设计方案,并做好堤防断面设计比选等工作<sup>[29-30]</sup>;在施工阶段严抓施工质量,全程动态监测保证各项施工参数和试验的准确性;在运营服务阶段做好预警和监测工作以及维护保养工作。由定量评估可知堤防溃堤造成的生命损失在可接受范围内,故可通过提前预警减少生命损失,而经济损失在不可接受范围,针对经济损失部分可采取提高堤防保护范围内的建筑物防洪等级、提前撤离和风险转移等措施。

5 结 语

本文提出了基于霍尔三维结构的堤防工程系统风险管理模型,将堤防工程设计、施工及运营阶段风险管理活动有机结合,构建了堤防工程全过程风险评估及管理技术框架,论述了不同阶段风险评估及管理的若干技术细节问题。利用该技术框架既可以相对独立地完成堤防工程风险分析、评估及管理流程,实现堤防工程风险调控阶段性目标,同时可以实现不同阶段风险评估信息的联动和风险管理活动的前后有效衔接,从而达到在设计阶段预测和规避风险,施工阶段防范和降低风险,运营阶段监测和管控风险的总体目标。最后,以鄱阳湖区重点堤防长乐联圩为例,阐述了本文所拟定的堤防工程全过程风险评估及管理工作流程,结果表明该技术方案有望在工程实践中逐步得到应用和发展完善。

参考文献:

[ 1 ] 徐卫亚,邢万波,魏文白,等. 堤防失事风险分析和风

险管理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006,25 (1): 47-55. (XU Weiya, XING Wanbo, WEI Wenbai, et al. Risk analysis and risk management for levees failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 47-55. (in Chinese))

[ 2 ] 周兴波,周建平,杜效鹤,等. 我国大坝可接受风险标准研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34 (1): 63-72. (ZHOU Xingbo, ZHOU Jianping, DU Xiaogu, et al. Study on risk acceptance criteria for dams in China[J]. Journal of Hydroelectric Engineering. 2015, 34(1): 63-72. (in Chinese))

[ 3 ] 吴兴征,赵进勇. 堤防结构风险分析理论及其应用[J]. 水利学报, 2003, 34(8): 79-85. (WU Xingzheng, ZHAO Jinyong. Theory of structure risk analysis for levee and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003,34(8): 79-85. (in Chinese))

[ 4 ] 邢万波,徐卫亚,王凯,等. 外秦淮河堤防水文失事风险分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34 (3): 262-266. (XING Wanbo, XU Weiya, WANG Kai, et al. Risk analysis of hydrological failures of levees in external Qinhuai River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2006, 34 (3): 262-266. (in Chinese))

[ 5 ] 丁丽. 堤防工程风险评价方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.

[ 6 ] 谢捷,龚政,陈永平,等. 海堤安全评价指标体系的构建及应用[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(2): 59-63. (XIE Jie, GONG Zheng, CHEN Yongping, et al. Establishment and application of index system for seawall safety assessment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36 (2): 59-63. (in Chinese))

[ 7 ] 黄黎明,张可,龚寻,等. 大数据视角下水利工程质量风险管理[J]. 水利经济, 2017, 35 (6): 66-70. (HUANG Liming, ZHANG Ke, GONG Xun, et al. Management of quality risk of water conservancy projects from perspective of big data[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2017, 35(6): 66-70. (in Chinese))

[ 8 ] 向衍,盛金保,刘成栋,等. 土石坝长效服役与风险管理研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(5): 86-94. (XIANG Yan, SHENG Jinbao, LIU Chengdong, et al. Research progress in long-term service and risk assessment of earth-rockfill dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38 (5): 86-94. (in Chinese))

[ 9 ] LENDERING K, SCHWECKENDIEK T, KOK M. Quantifying the failure probability of a canal levee[J]. Georisk, 2018, 12(3): 203-217.

[ 10 ] ROSIDI D. Seismic risk assessment of levees[J]. Civil Engineering Dimension, 2007, 9(2): 57-63.

- [11] SCHWECKENDIEK T, VROUWENVELDER A. Updating piping reliability with field performance observations[J]. Structural Safety, 2014, 47: 13-23.
- [12] HUI R, JACHENS E, LUND J. Risk-based planning analysis for a single levee [J]. Water Resources Research, 2016, 52(4): 2513-2528.
- [13] ZHANG L M, XU Y, LIU Y, et al. Assessment of flood risks in Pearl River Delta due to levee breaching [J]. Georisk, 2013, 7(2): 122-133.
- [14] 周创兵. 水电工程高陡边坡全生命周期安全控制研究综述[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6): 1081-1093. (ZHOU Chuangbing. A prospect of researches on life-cycle safety control on high-steep rock slopes in hydropower engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(6): 1081-1093. (in Chinese))
- [15] 金伟良, 钟小平. 可持续发展工程结构全过程设计理论体系研究[J]. 中国工程科学, 2012, 30(3): 100-107. (JIN Weiliang, ZHONG Xiaoping. Sustainable development-oriented design theory of engineering structures in whole life-cycle [J]. Engineering Science, 2012, 30(3): 100-107. (in Chinese))
- [16] 谭跃进. 系统工程原理[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [17] FELL R, HO K K S, LACASSE S, et al. A framework for landslide risk assessment and Management[C]//HUNGR O, FELL R, COUTURE R, et al, Landslide Risk Management. London: Taylor and Francis, 2005: 3-26.
- [18] 王洁. 堤防工程风险管理及其在外秦淮河堤防中的应用[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [19] 刘亚凤, 孟宪双, 张本秋. 堤防的渗透破坏类型及其除险加固措施[J]. 防渗技术, 2002, 8(4): 43-44. (LIU Yafeng, MENG Xuanshuang, ZHANG Benqiu. Types of seepage damage of dikes and their reinforcement measures [J]. Technique of Seepage Control, 2002, 8(4): 43-44. (in Chinese))
- [20] COROMINAS J, MOYA J. A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes [J]. Engineering Geology, 2008, 102(3): 193-213.
- [21] 高延红, 张俊芝. 堤防工程风险评价理论及应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- [22] 李典庆, 肖特, 曹子君, 等. 基于高效随机有限元法的边坡风险评估[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 1994-2003. (LI Dianqing, XIAO Te, CAO Zijun, et al. Slope risk assessment using efficient random finite element method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(7): 1994-2003. (in Chinese))
- [23] USBR. Best practices in dam and levee safety risk analysis [M]. Washington, DC: US Department of the Interior, Bureau of Reclamation and US Army Corps of Engineers, 2015.
- [24] 何鲜锋. 全逸峰. 大坝运行风险评价理论及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2014.
- [25] 孙东亚, 解家毕, 姚秋玲. 堤防工程失事概率分析方法及溃决模式研究[J]. 中国防汛抗旱, 2010, 20(2): 25-28. (SUN Dongya, XIE Jiabi, YAO Qiuling. Study on probability analysis method and breakdown mode of dike engineering [J]. China's Flood Control and Drought Resistance, 2010, 20(2): 25-28. (in Chinese))
- [26] 蔡尊, 王昭升, 朱思宇, 等. 土石坝风险实时评估与综合预警模型[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(4): 57-63. (CAI Qian, WANG Zhaosheng, ZHU Siyu, et al. A real-time risk assessment and synthetical early warning model of earth and rockfill dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(4): 57-63. (in Chinese))
- [27] 王浩, 豆红强, 谢永宁, 等. 路堑边坡全过程风险评估及管理的技术框架[J]. 岩土力学, 2017, 38(12): 3505-3516. (WANG Hao, DOU Hongqiang, XIE Yongning, et al. A technical framework for life cycle risk assessment and management of highway cut slopes [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(12): 3505-3516. (in Chinese))
- [28] 蒋水华, 黄中发, 江先河, 等. 堤防工程标准化管理体系风险评估方法研究[J/OL]. 长江科学院院报: 1-8. [2019-06-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20190509.1102.014.html>. (JIANG Shuihua, HUANG Zhongfa, JIANG Xianhe, et al. Research on Risk Assessment Method of Standardization Management System of Dike Engineering [J]. Journal of Yangtze River Science Research Institute: 1-8. [2019-06-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20190509.1102.014.html>. (in Chinese))
- [29] 段红东, 李发鹏, 王建平, 等. 青岛大沽河生态堤防工程建设经验挖掘分析[J]. 水利经济, 2019, 37(6): 41-45. (DUAN Hongdong, LI Fapeng, WANG Jianping, et al. Experience of ecological embankment projects of Dagu River in Qingdao [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019, 37(6): 41-45. (in Chinese))
- [30] 傅蜀燕, 欧斌, 林志祥, 等. 相似单元堤段模糊聚类分析[J]. 水利经济, 2018, 36(3): 6-9. (FU Shuyan, OU Bin, LIN Zhixiang, et al. Fuzzy clustering analysis of similarity unit embankments [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(3): 6-9. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-05-08 编辑: 郑孝宇)