特征水位下区域堤防工程的结构风险分析

中国水利水电科学研究院

二零零四年六月

项目编号：WH-2004-2-002

项目名称：特征水位下区域堤防工程的结构风险分析

委托单位：中国水利水电科学研究院

承担单位：中国水利水电科学研究院防洪减灾所

报告审定：程晓陶

报告审核：丁留谦

报告校核：陆吉康

项目负责：吴兴征　丁留谦

主要参加人：吴兴征　丁留谦 孙东亚 张金接 赵进勇 黄永健 许晓彤 王艳艳

报告编写：吴兴征　丁留谦　张金接

摘 要

在高洪水位下，区域堤防工程的结构失稳的致灾因子、特征水位与失稳模式的关系、提高特征水位的可行性等均是值得深入研究的课题。

综合考虑历史险情、堤防地质条件和工程质量、防护对象的级别、防汛工作的水平，结合研究堤段的暴雨特征、洪水特性及年最高洪水位拟定防洪特征水位，以此作为结构风险分析的资料基础。

在对国内外堤坝工程结构风险评估的研究现状和发展趋势作简要陈述和分析的基础上，针对堤防结构发生失稳模式（漫顶、上游边坡滑动、下游边坡滑动、管涌）分别建立极限状态方程，进而得到均质堤防结构失稳的风险模型，以某典型均质堤防断面为算例，探讨了堤防几何形状（不同对不同边坡坡率、顶宽和高度）、土工参数（内摩擦角、粘聚力、渗透系数）对失稳概率的影响。

基于建立的多个堤防断面（全堤段）结构失稳风险计算模型，以长江重点险工段安庆堤段为研究对象，整理了多级高洪水位下五十多个断面的多种安全评价指标，即多种计算模式（上游边坡稳定、下游边坡稳定、堤段渗透稳定、漫顶稳定）及其相应的安全性指标（安全系数、可靠度指标、风险度）。根据特定的技术标准，给出全堤段安全评价各项安全评估指标的统计特征及分布规律。

考虑下游堤防保护区的经济因素，初步探讨了最优特征水位的确定问题。

计算结论对于堤防加固决策和防洪特征水位的调整具有一定的指导意义。

关键词：堤防 特征水位 结构风险 失稳 可靠性 全堤段

目 录

第一章 前 言 1
1.1 课题提出的意义 1
1.2 课题国内外研究现状述评 2
1.2.1 国外研究进展 2
1.2.2 国内研究进展 4
1.3 完成的主要研究工作 5
第二章 特征水位的统计分析 7
2.1 洪水特性分析 7
2.1.1 暴雨特征 7
2.1.2 洪水特征 7
2.2 洪水累积频率分析 8
2.3 防洪特征水位的设定 11
第三章 可靠性计算原理及结构失稳机制 12
3.1 计算原理 12
3.2 漫顶失稳机制 14
3.3 管涌失稳机制 17
3.4 边坡整体失稳机制 18
第四章 单个堤段的结构风险分析方法 19
4.1 计算原理 19
4.1.1 风险计算模型 19
4.1.2 失稳概率的计算方法 21
4.2 几何形状参数对结构风险的影响 21
4.3 土工参数统计量的敏感性分析 23
第五章 安庆堤防工程地质特征及评价 26
5.1 地质概况 26
（1）地形地貌 26
（2）地层岩性 26

（3）地质构造与地震 27
（4）外动力地质现象 27
5.2 堤身填土组成及工程特性 27
（1）堤身现状 27
（2）堤身隐患 27
（3）堤身填土组成及工程特性 28
5.3 堤基地质结构分类及工程地质特征 29
（1）堤基地质结构分类标准 29
（2）堤基地质结构分类 30
（3）工程地质分段和评价 30
5.4 98 大洪水前存在的主要工程地质问题 34
（1）渗透稳定问题 34
（2）岸坡稳定问题 34
（3）深层堤基滑动问题 35
（4）地基不均匀沉降问题 35
5.5 计算分析中采用的土工参数值 35
第六章 区域堤防工程的结构风险分析 37
6.1 全堤段的结构风险分析模型 37
6.2 安庆堤防圈的组成及其工程特点 38
6.3 全堤段各级水位下安全指标的统计特征 40
6.3.1 漫顶 40
6.3.2 边坡整体滑动 41
6.3.3 管涌 42
6.4 不同水位下全堤段安全评估指数的分布情况 43
6.4.1 漫顶 44
6.4.2 边坡整体滑动 45
6.4.3 管涌 47
6.5 失稳概率的组合 50
6.6 全堤段安全评估成果的分析与评价 56
6.6.1 安全等级的分类 56
6.6.2 加固预案的设定 57
6.6.3 特征水位与洪灾损失的关系 58
6.7 安全评估软件的开发及功能介绍 58

第七章 结论与建议 61
7.1 结论 61
7.2 建议 62
主要参考文献 64

第一章 前 言

1.1 课题提出的意义

在国内，堤防安全评价在汛期采用较多的是人工巡堤查险，由于人工查险效率低，并且只有当险情发展到一定程度时才能被发现，使抢险局面十分被动。随着社会经济的发展，堤防在整个防洪体系中所承担的任务越来越重，其经受高水位考验的频率越来越高。1998 年长江流域的特大洪水后，中央投入了数百亿元国债资金用于堤防加固工程建设。其中大江大河干支流的一、二级堤防达标 1.4 万 km，从而使这些江河堤防的防洪能力得到明显提高。因此客观上需要对防汛特征水位进行调整。从理论上讲，防洪工程保护着我们的家园，但这种保护绝不是 100%安全的，问题在于多大的风险是可以接受的，或者什么样的风险是不可接受的，这是历来需要工程技术人员回答的一个问题，事实上即便是在设计洪水位下，绝对的安全并不存在。在一定程度上，我们保护自身不受洪水侵害要综合权衡社会经济条件、资金投入及预期收益。

长期以来，水利科技工作者试图建立合理、科学和有效的堤防安全性设计与评价方法。起初，一直以安全系数作为水利工程的评价指标。然而，安全系数只是一个由确定的信息得到的一个定值，它未能考虑设计变量中客观存在的变异性。如地质条件愈复杂，荷载和土体参数的变异性愈大，那么安全储备就越小[1]。可见，安全系数的大小并不能完全确切地表征工程的安全程度。因此，国内权威人士指出[2]：“如果不考虑设计参数的不确定性，结构的精确分析所能取得的效益将被粗略的经验性安全指标所淹没”。因此，考虑堤防工程中的土层分布及土工参数、荷载、几何尺寸、计算模型等不确定性因素，加强可靠性计算和风险分析的研究尤为必要。

基于可靠性理论方法，针对堤防在不同高洪水位下发生多种失稳形式的风险度进行预测，提出可能发生的险情类型及范围，提前预报可能发生的险情，并为险情危害程度的判别和辅助决策提供依据。这可有效地避免人为盲目性，合理评估工程病险的严重程度和修复标准。为此，国内学者指出，防洪减灾长治久安保障的根本在于首先要从单纯依靠“百万大军上大堤”的传统被动防洪方式，向切实依靠科学技术的完善预警机制的

现代主动防洪方式的转变[3][4]，进而探讨经济社会发展新时期适合中国国情的泛滥允许型的治水模式[5]。这种在国家公共政策的作用下，向河流提供更多空间而提高其行洪能力的做法是明智的。如何采用风险决策方法，科学地确定堤防的设防标准，是当前防洪工程迫切需要解决的重要课题。这里从工程结构可靠性理论的角度，对区域堤防工程的安全度进行系统复核。尽管目前的研究水平，距实时评估和预测堤防的安全状况还有相当的路程，但其发展前景是无可置疑的。

1.2 课题国内外研究现状述评

采用概率途径方法并不意味着否定常规的方法，它是常规确定性方法的发展和补充。在充分借鉴危及公众健康和安全的航空、航天、核电等重大领域已有成果的基础上，以概率理论为基础的可靠性设计和安全评价方法在国内外均得到较快的发展，这为土工构筑物的设计和评估开辟了新的领域。由于土体材料的复杂性，岩工工程可靠度的研究发展落后于结构可靠度，国内外均如此。

1.2.1 国外研究进展

从 1972 年开始，每四年一届召开统计学和概率论在土工和结构工程方面应用的国际学术会议，在这个会议的论文集上发表了不少研究成果。由国际标准化组织岩土工程技术委员会主持编制的国际标准（草案）中规定采用极限状态设计原则和分项系数方法，并对各级岩土工程提出了可靠性指标的建议值，这是岩土工程中可靠性研究进入实用阶段的标志。

在 1989 年国际水利学协会大会和讨论会上，堤坝的风险问题成为与会者颇为关注的一个热点。1991 年召开的国际水利学研究协会大会上专门召开关于可靠性和风险分析讨论会，极大地促进了这一领域的研究发展。2000 年国际大坝会议论文集中的 76 专题中有较详细的论述[6]，并发布了国际大坝委员会大坝安全专业委员会公报——风险评估在大坝安全管理中的应用[7]。

由于特殊的地理和地形条件，荷兰防洪系统的研究和管理处于国际前沿。1979 年，荷兰防洪设施技术咨询委员会（TAW）专门设立了从事“概率方法”研究的工作组[8]，针对防洪建筑物失事概率、经济损失评估方法及其影响因素和防范对策，根据风险（概率×损失）最小的原则，提出基于可靠性和优化理论的概率设计方法，使传统的设计理

论得到发展。该设计方法以保护区可以接受的洪灾概率为基础，以防洪体系中每个结构物和各个堤防断面为研究对象，考虑同一结构物的多种失稳模式，提出整个防洪系统失事概率的计算方法，并应用于其设计导则中[9, 10]。在此基础上，从 1992 年开始，政府资助 Delft 技术联营体发起了一个旨在采用风险理论全面评估堤防圈的计划[11, 12]。该项目的投资巨大，最终实现由超频洪水法向洪灾概率法过渡（超频洪水法通常假定堤防结构自身是足够坚固的；洪灾概率法可以考虑由于其他原因的破坏，比如护岸工程破坏、边坡滑动、堤身渗透破坏或堤基管涌、穿堤建筑物的破坏等）。洪灾概率法的最新研究进展是值得关注的研究方向。

荷兰的研究经验表明，堤防工程安全性评价不是一个静态事件，而是一个连续的动态过程。荷兰的国家法律要求每 5 年进行一次详细的堤防检查和安全性评价，政府每 5 年颁布与安全标准有关的水力边界条件[13]。荷兰学者 Vrijling 建议了可接受风险的洪水风险水平[12, 14]。

澳大利亚的堤坝的设计导则中提出了概率设计和风险分析方法[15, 16]。国内学者介绍了澳大利亚在大坝风险评价方面的法规与指南情况，如风险人口分析、溃坝影响评价、风险准则、群坝风险分析等[17]。1995 年 Salmon 和 Hartford 提出了大坝安全风险评估的要点[18]，指出了风险评估应提供的成果，对公众可接受的风险标准进行了研究。但没有指出进行风险评估时不确定性因素的处理方法和失事概率的计算方法。Salmon 等在回顾了传统的大坝安全分类方法的基础上，着重介绍了加拿大的大坝安全准则和 B. C. Hydro 公司的容许风险标准及其风险分析过程，并以此论述了风险在大坝安全监测和管理中的作用[19]。Foster 等人采用事件树方法计算了堤坝的管涌失稳概率[20]。一些学者研究了大坝发生液化的风险[21, 22]。

此外，风险分析技术在一些实际工程的设计和加固中得到了应用。比如，Ale 给出荷兰在重大灾害处置方面风险管理的发展历史和应用现状[23]。Bowles 等人给出采用投资风险评价方法应用于美国 17 座大坝的加固规划[24]。Krenzer 也给出风险分析技术用于大坝决策的实例[25]。Nederend 报道了将复杂的拦潮闸系统分解为多个子系统研究了启闭及失效的概率，用于指导工程设计[26]。

针对多个堤段的分析，在不断研究和完善区域堤防工程风险管理理论的基础上，荷兰已经提出了用于堤防圈可靠性分析的程序系统 PC-Ring[6, 27]。它考虑了堤防圈内所有结构物的主要堤防破坏模式。新的计算方法和软件系统已成功应用于四个堤防圈的安全评估中找到了每个堤防圈的险情控制因素和最薄弱的结构物[28, 29]，后继的几年中将陆续

完成所有堤防圈（53 个）的安全评估。

1.2.2 国内研究进展

20 世纪九十年代，中国在结构可靠度的研究与应用方面做了大量工作并取得了卓越的成效。1994 年制定和颁布了《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》，其后按此标准修订了《水工混凝上结构设计规范》、《水工建筑物抗震设计规范》、《水工建筑物荷载设计规范》，所有这些工作为今后在水库大坝安全管理领域中开展和推广风险评估技术奠定了良好的基础。

中国力学学会岩土力学专业委员会于 1983 年初在同济大学举行了《概率论与统计学在岩土工程的应用》专题学术座谈会，并于同年夏在长春召开了岩土力学参数的分析与解释讨论会，推动了这项研究的开展[30]。已有的研究内容涉及地基承载力、土坡稳定、地基沉降和桩基等多个方面，文献[1]就这几个专题全面介绍了我国岩土工程可靠度可行性研究攻关组的研究成果。

针对防洪堤坝的结构风险研究，文献[31, 32]就防洪工程风险决策和可靠性基本问题进行了探索，是国内较早开展这方面研究的。学者们的研究多是针对堤坝的单一失稳模式进行的，比如漫顶风险[33, 34, 35, 36, 37, 38, 39]和堤坡的滑动失稳概率计算[40, 41, 42, 43, 44]。1999 年，章志强、王卓甫、杨高升等对影响长江南京段防洪堤结构稳定不确定性作了初步分析，提出了考虑多种失稳模式的防洪堤工程失稳风险计算的数学模型，选择典型概化断面计算了长江南京段防洪堤结构失稳风险的大小[45]。王卓甫等研究了均质防洪堤堤坡稳定和渗透稳定的结构风险计算模型[46]。吴兴征等结合二元堤基上的斜墙式堤防给出了考虑多种失稳机制的概率设计方法[47, 48]。并通过变动设计参数探讨了土工统计参数和堤防几何形状对漫顶、渗透稳定、岸坡稳定可靠度指标或失稳风险的影响[49, 50]。依据现行堤防设计和安全管理规范[51, 52]，采用常规定值安全系数法和可靠性方法，以可视化开发语言，基于数据库后台支持，开发图形化界面的堤防安全评价系统[53, 54]。结合长江干堤某典型堤段，初步给出了全堤段安全复核与风险评价的计算结果[55]。堤坝风险评估和险情预测是一项涉及多学科的工程设计工作，一些算法，如边坡稳定和渗流分析及与之相关的可靠性分析要给定土工参数和边界条件，需由专业的技术人员方可完成。相关软件系统的开发将会促进专业模型的推广与普及，同时可使设计人员将更多的时间和精力用于方案比选。

朱勇华等采用一次二阶矩方法，推导了不透水堤基均质土堤、透水堤基均质土堤和

双层地基均质土堤渗透破坏风险率的计算公式，建立了边坡失稳破坏风险率的计算模型，综合考虑了防洪堤的漫顶破坏风险、渗透破坏风险和滑动失稳破坏风险率[56]。李青云针对堤顶高程和断面基本一致的单元堤段视为基本单元堤段，考虑了堤防工程的多种破坏形式、失稳概率，并初步进行了堤防工程失事后果相结合的风险分析[57]。

姜树海等讨论了大坝的允许风险概念及防洪允许风险范围[58]。在阐述大坝风险率和生命损失评估方法的基础上，介绍了运用允许风险进行大坝防洪安全决策的方法。

在求得堤坝失稳概率和工程失事后果进行估算的基础上，引入社会经济影响因子，结合保护区的重要程度，李雷等提出一种评价土石坝综合安全度的初步方法[59]，可动态反映出病险水库除险加固的必要性，这对有关主管部门决策具有参考价值。阎维明等应用最优控制理论，提出了城市防洪堤坝适时适度维护的经济决策模型[60]。张俊芝等讨论了堤防工程加高加固的三类加固决策模型[61]。杨庆等人在进行边坡二维渐进性破坏可靠性分析的基础上，把经济决策理论引入边坡的经济分析中，结合边坡工程的具体特点对边坡进行了投资—效益风险性分析[62]。

1.3 完成的主要研究工作

本课题紧跟国际该学科的研究前沿，以长江堤防安庆段为例，就特征水位下堤防工程进行结构风险分析（边坡稳定性、渗透稳定性、漫顶等失稳模式），筛选出致灾因子，并提出合理的堤防适时维护方案，可为合理设定河道防洪标准提供科学依据。主要完成的研究工作如下：

1）对洪水要素进行初步统计分析，主要通过统计堤防多年最高洪水位的资料，初步拟定特征洪水位，以此作为结构风险分析的资料基础。

2）基于可靠度理论，对各类力学模型（基于极限平衡原理的堤坡滑动稳定分析、基于解析法的渗流场分析）在同一典型堤段下进行可靠性分析，探讨几何设计参数和土工参数对相应结构失稳概率的影响。

3）假定堤防结构的失稳风险度主要与洪水位相关，基于全堤段结构风险分析模型，对某一区域（比如以安徽安庆段）的堤防在不同洪水位下的风险分析情况进行评价，整理了五十多个断面的各级水位下多种评估指标（安全系数、可靠度、失稳风险）的统计特征，得到了评估指标的沿堤段的分布情况。

4）采用面向对象的程序设计语言 Visual Basic 和面向对象的数据库平台 SQL Server

开发堤防信息可视化查询和安全评估分析系统，以最直观的方式为设计和技术管理工程师服务。

5）对堤防工程出现的险情及其影响因素进行系统总结分析的基础上，初步讨论各种险情的机理与洪水位的统计关系，找出统计规律。结合区域堤防工程保护区的洪灾淹没损失，初步研究提高特征水位带来的风险与减少防汛投入之间的关系，为确定最优的防汛特征水位提供理论支持。

第二章 特征水位的统计分析

防汛特征水位是划分防汛工作不同阶段和部署防汛人力、物力等的重要依据，一般包括设防水位、警戒水位和保证水位。防汛特征水位直接关系到防汛投入。综合考虑历史险情、堤防地质条件和工程质量、防护对象的级别、防汛工作的水平等，拟定防洪特征水位（设防水位、警戒水位和保证水位）的比选方案，对洪水要素进行初步统计分析，给出堤防年最高洪水位频率分布，以此作为结构风险分析的资料基础。

2.1 洪水特性分析

以下以安庆市防洪系统为例，进行历史洪水位的统计分析。安庆江堤及广济圩江堤所在的长江安庆河段和太子矶河段，地处长江下游，其洪水主要来自中上游。长江流域的洪水由暴雨形成，洪水过程与暴雨相应。

2.1.1 暴雨特征

安庆江堤及广济圩江堤所保护区地处中纬度地带和北亚热带南缘，具有季风明显、四季分明、气候温和、雨量适中、无霜期长、梅雨显著等特点。保护区多年平均降水量1389.2mm。年际间降水量变化较大，最多年 1954 年达 2294.2mm，最小年 1978 年为758.5mm。受季风影响降水主要集中在 4～7 月，约占全年降水量 58.3%。

长江中下游日暴雨笼罩面积大多在 4 万 km^2 以上，有 23%的时间在 8～14 万 km^2，14 万 km^2 以上的占 3%，最大的是 1954 年 6 月 25 日的暴雨面积达 20 余万 km^2。对于长江下游而言，灾害性暴雨主要有两种类型：一是全流域性暴雨，上中下游雨季提前或延后，持续交叠，暴雨出现频繁，雨区范围大，导致干支流洪水严重遭遇，形成全流域的大洪水，如 1954 年、1988 年和 1998 年；二是区域性暴雨，在长江干支流某些地区发生面积较广、强度大的集中性暴雨，形成特大集中性洪水。

2.1.2 洪水特征

长江下游干流承泄上游及中、下游干支流的洪水，5～10 月为汛期、一般 7～8 月水

量最大，洪峰出现的机会最多，是长江中下游的主汛期。

大通站汛期洪量中 81.8%洪水来自汉口以上（汉口站控制面积约占大通面积的87%），鄱阳湖水系的面积占大通面积的比重不足 10%，但其汛期来水量平均占大通的15%左右。30d、60d 总入流组成：大通站 30d、60d 总入流多年平均分别为 1559 亿 m^3、2780 亿 m^3，地区组成以干流汉口以上来量为主，汉口以上来量占大通总入流的77.1%、79.2%，鄱阳湖水系次之，分别占大通总入流的 16.5%、14.9%，汉口～大通区间（不含鄱阳湖水系）分别占大通总入流的 6.4%、6.0%。

一般情况下，流域内各地雨期相错，减小了洪水遭遇的机会，不同区域暴雨在不同时间产生的洪水一般都能通过湖泊水库的调蓄顺利下泄，不致发生严重的洪灾。但是如果下游雨季延后或上游雨季提前，长江干支流相继降雨，强度大，历时长，干支流洪峰接踵而来，易形成峰高量大的全流域型特大洪水，如 1931 年、1954 年、1998 年等洪水及历史上的 1788 年洪水。另外，如果某区域发生强度特大的持续暴雨，暴雨区内河流同时发生洪水，可形成洪峰特别高，洪量也较大的区域性大洪水，如 1983 年的洪水。

2.2 洪水累积频率分析

安庆水文站多年记录（从 1924 年至 1998 年）得到的年最大洪水位如表 2.1 所列。

表 2.1 安庆水文站的年最大洪水位

排序	水位	年份	频率	累积频率
1	18.74	1954	1	0.014493
2	18.5	1998	2	0.028986
3	18.05	1999	3	0.043478
4	17.95	1983	4	0.057971
5	17.89	1995	5	0.072464
6	17.55	1996	6	0.086957
7	17.28	1949	7	0.101449
8	17.08	1973	8	0.115942
9	17.07	1931	9	0.130435
10	16.98	1977	10	0.144928
11	16.95	1980	11	0.15942
12	16.88	1969	12	0.173913
13	16.79	1948	13	0.188406
14	16.73	1992	14	0.202899
15	16.65	1962	15	0.217391
16	16.58	1968	16	0.231884
17	16.52	1991	17	0.246377
18	16.43	1988	18	0.26087
19	16.4	1993	19	0.275362
20	16.36	1974	20	0.289855

排序	水位	年份	频率	累积频率
21	16.34	1937	21	0.304348
22	16.32	1976	22	0.318841
23	16.31	1989	23	0.333333
24	16.19	1955	24	0.347826
25	16.18	1970	25	0.362319
26	16.07	1964	26	0.376812
27	16.07	1990	26	0.376812
28	16.04	1994	28	0.405797
29	16.03	1933	29	0.42029
30	16.02	1982	30	0.434783
31	15.94	1935	31	0.449275
32	15.91	1924	32	0.463768
33	15.91	1975	32	0.463768
34	15.86	1952	34	0.492754
35	15.85	1997	35	0.507246
36	15.61	1926	36	0.521739
37	15.45	1932	37	0.536232
38	15.43	1967	38	0.550725
39	15.4	1987	39	0.565217
40	15.33	1946	40	0.57971
41	15.32	1956	41	0.594203
42	15.18	1984	42	0.608696
43	15.07	1958	43	0.623188
44	14.91	1957	44	0.637681
45	14.9	1927	45	0.652174
46	14.9	1930	45	0.652174
47	14.9	1950	45	0.652174
48	14.87	1959	48	0.695652
49	14.84	1947	49	0.710145
50	14.78	1966	50	0.724638
51	14.71	1979	51	0.73913
52	14.66	1971	52	0.753623
53	14.66	1986	52	0.753623
54	14.57	1981	54	0.782609
55	14.33	1965	55	0.797101
56	14.29	1936	56	0.811594
57	14.2	1929	57	0.826087
58	14.09	1951	58	0.84058
59	13.99	1985	59	0.855072
60	13.91	1953	60	0.869565
61	13.84	1961	61	0.884058
62	13.81	1978	62	0.898551
63	13.72	1934	63	0.913043
64	13.47	1960	64	0.927536
65	13.14	1963	65	0.942029
66	12.71	1925	66	0.956522
67	12.68	1972	67	0.971014
68	12.4	1928	68	0.985507

由此可得到年最大洪水位的统计特征，如图 2.1 所示。可看出，水位服从正态分

布，其统计均值为 15.59m，标准差为 1.51。

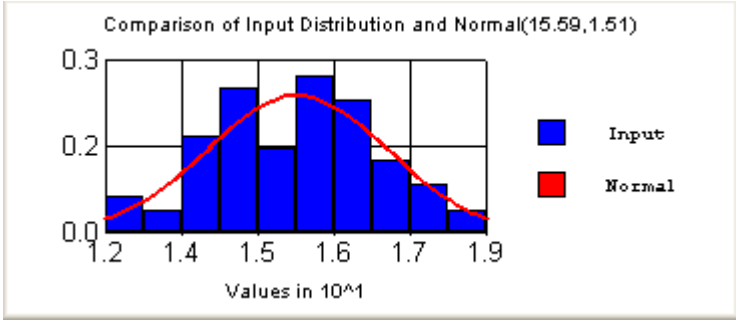
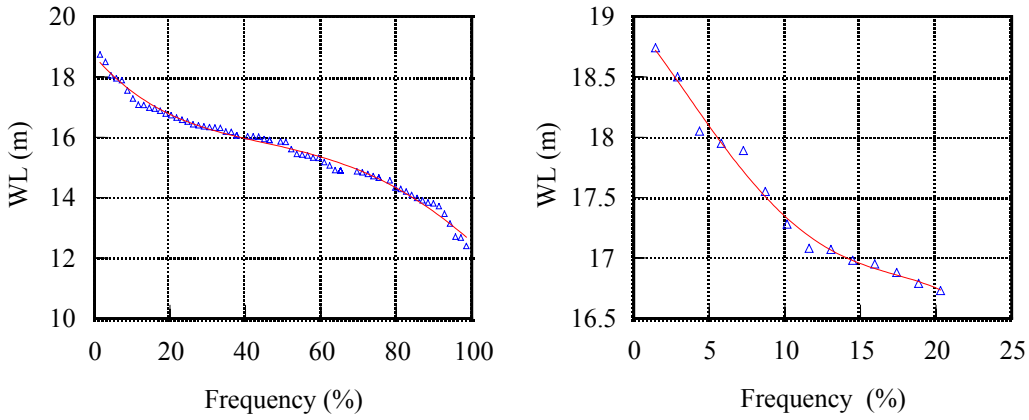


图 2.1 洪水位的统计特征



(a) (b)

图 2.2 洪水位频率分布曲线的适线

图 2.2(a)给出累积频率和年最大水位之间的关系，采用最小二乘法可以得到分布散点的最佳多项式方程，如下式：

$$y = 18.6748 - 14.227x + 28.669x^2 - 28.2219x^3 + 7.63999x^4 \quad (2\text{-}1)$$

对于累积频率较小的情况下，如图 2.2(b)所示，通过拟合曲线可以得到下述方程：

$$y = 18.9491 - 0.146054x - 0.0101275x^2 + 0.00114167 * x^3 - 2.7244E^{-5} * x^4 \quad (2\text{-}2)$$

因此，安庆江堤各级水位的发生频率和重现期如图 2.3 所示，具体的数值如表 2.2 所列。一般说来，当前的设计方法是基于超频洪水法或特定的重现期，比如 5、10、20、50、100 和 200 年。这里通过线性插值可以得到不同设计重现期的水位。同样，不同设计洪水位下相应的重现期如表 2.3 所列。

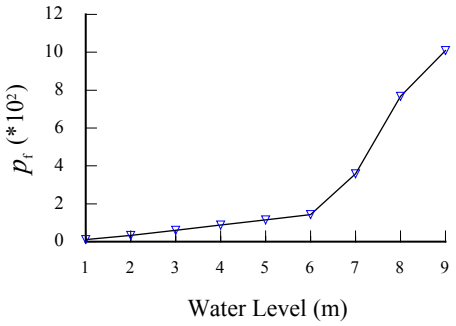


图 2.3 每级水位的发生频率

表 2.2 每级水位的发生频率和重现期

排序	水位	频率	重现期(年)
1	21.19	0.001094	914
2	20.79	0.003281	305
3	20.29	0.006016	166
4	19.79	0.00875	114
5	19.29	0.011485	87
6	18.79	0.014219	70
7	18.29	0.035749	28
8	17.79	0.076726	13
9	17.29	0.100912	10

表 2.3 不同设计频率下的洪水位

设计标准	重现期	5	10	20	50	100	200
	发生频率	20	10	5	2	1	0.5
设计水位		16.36	17.29	17.89	18.5	19.64	20.53

2.3 防洪特征水位的设定

综合考虑洪水位的出现概率和结构失稳概率，并考虑到不同洪水位下经济损失的差异，假设在洪水水位较低时（相当于 10 年一遇），即使发生洪水，损失非常小，在进行结构风险计算时可以忽略不计。因此将从堤顶高程以下每隔 0.5m 为一级，共计 9 级水位，作为本项研究的洪水位范围。应指出，通常人们谈及的警戒水位（可能对防洪工程或当地人民生命财产与重要设施等构成威胁，必须开始警戒并防备的既定水位值）和危险水位（可能对防洪工程、沿江主要建筑物及集中居民区等构成灾害性的威胁）等，皆在本研究论及的范围之内。

第三章 可靠性计算原理及结构失稳机制

3.1 计算原理

工程结构可靠性常用的计算方法，主要有一次二阶矩法、改进一次二阶矩法、JC法、Monte Carlo 法等。其中：一次二阶矩法和改进一次二阶矩法对变量的分布型式要求十分苛刻，分布型式只有为正态分布时，才能得到精确的结果，否则只能得到偏差较大的结果；而 JC 法和 Monte Carlo 法则通俗易懂，又不受随机变量分布规律限制，计算精度高，广泛为国内外工程界所采用，两者中 Monte Carlo 法解题思路更为清晰简单，且能求解出非线性极限状态方程的失稳概率和可靠指标。因此 Monte Carlo 法对于极限状态函数形式较为复杂的堤防可靠性分析较为适用。它又被称为随机模拟法或统计试验法，基本原理[63]如下：

（1）随机抽样方法

先在(0,1)区间上产生均匀分布随机数。可采用的方法有乘同余法、混合同余法等，其中混合同余法的递推公式为

$$\begin{aligned} x_i &= (\lambda x_{i-1} + C) \qquad (\mathrm{mod}\, M) \\ r_i &= x_i / M \qquad (i = 1,2,\cdots,n) \end{aligned} \tag{3-1}$$

式中：λ、x_0、C 和 M 为选定的常数。式（3-1）表示 $\lambda x_{i-1} + C$ 除以 M 的余数为 x_i，将其再除以 M 即得(0,1)上均匀分布的随机数 r_i。

将随机数序列 $\{r_i\}$ 转换为 (a,b) 区间上的均匀分布随机数序列 $\{R_i\}$

$$R_i = a + (b-a) r_i \tag{3-2}$$

采用反函数法将均匀分布随机数 $\{r_i\}$ 转换为符合某一指定概率分布的随机数。其前提是经验分布的反函数存在，否则采用随机变量函数法。

设 X 为具有分布函数 $F_X(x)$，且反函数 $F_X^{-1}(x)$ 存在的连续随机变量，r 是均匀分布随机变量 R（分布函数为 $F_R(r)$）的值。若给定累计概率 $F_X(x) = r$，则有

$$x = F_X^{-1}(r) \tag{3-3}$$

若已知$\{r_i\}$，则可得符合$F_X(x)$的随机数序列：

$$x_i = F_X^{-1}(r_i) \quad (i = 1,2,\cdots,n) \tag{3-4}$$

（2）Monte Carlo 模拟法的基本步骤

统计确定与可靠性分析有关的各基本变量（如材料参数、荷载等）的概型分布及其分布参数；

对所有基本变量按统计特征进行第一次随机采样，将其代入极限状态方程式，获得第一次模拟结果；

重复n次独立随机采样，进而估算失稳概率。

（3）Monte Carlo 模拟法的结果和精度

在工程结构可靠性分析中，设极限状态方程式$Z = g(X_1, X_2, \cdots, X_n)$，其失稳概率为

$$P_{\mathrm{f}} = P(g(X_1, X_2, \cdots, X_n) \le 0) \tag{3-5}$$

式中：X_i为基本随机变量（如材料性能，结构尺寸及外来荷载的作用），借助随机抽样对基本变量赋值时，计算结果只有$g(\cdot) > 0$和$g(\cdot) \le 0$两种可能，故可定义指标函数：

$$I(g(X_1, X_2, \cdots, X_n)) = \begin{cases} 1, g(\cdot) \le 0 \\ 0, g(\cdot) > 0 \end{cases} \tag{3-6}$$

根据伯努利大数定理及正态分布随机变量的特性得到的失稳概率P_{f}为

$$\hat{P}_{\mathrm{f}} = \frac{1}{N}\sum I(g(X_1, X_2, \cdots, X_n) \le 0) = \frac{M}{N} \tag{3-7}$$

式中：M为次模拟计算中$g(\cdot) \le 0$的总次数。

Monte Carlo 模拟法不仅可按式（3-7）计算失稳概率，还可根据模拟计算结果拟合出功能函数的分布形式，据以估计其一、二阶矩$\hat{\mu}_x$和$\overline{\sigma}_x^2$。进而按下式近似计算可靠度指标β

$$\beta = \frac{\overline{\mu}_x}{\overline{\sigma}_x} \tag{3-8}$$

Monte Carlo 模拟法的误差一般可用$\hat{\mu}_x$表示。功能函数值Z越离散，误差将越大。当模拟次数充分大时，已经证明由模拟结果样本求得估计值的标准差与模拟次数的平方根成反比。因此，加大模拟次数可望提高模拟精度，特别是当计算得到的失稳概率较小时。一般要求 Monte Carlo 法的样本数必须大于引起一次$Z\langle 0$所需的平均样本数的 100 倍，即$N \ge 100/P_{\mathrm{f}}$次时，可满足精度要求。

随机变量的分布类型可以采用下述分布类型：1）Deterministic（确定性）；2）Uniform（均匀分布）；3）Gauss(Normal)（标准正态分布）；4）Lognormal（对数正态分布或极值 III 型分布）；5）Exponential（指数分布）；6）Gamma（γ 分布）；7）Gumbel-Maximum（极值 I 型分布）；8）Gumbel-Minimum（极值 I 型分布）；9）Frechet-Maximum（极值 II 型分布）；10）Weibull-Minimum（最小威布尔分布）；11）Rayleigh（瑞利分布）；12）Truncated Normal（截尾分布）等。

堤坝失稳概率通常由广义强度 R 小于广义荷载 S 的概率定义。对于堤坝的漫顶而言，“荷载”是堤坝前库水位，“强度”为坝顶高程。在一定的洪水位下，假定堤坝失稳形式为边坡滑动（包括地基）失稳和渗透变形失稳。对于边坡稳定而言，“荷载”为作用于堤体的滑动力矩，“强度”为抗滑力矩。对于渗透稳定而言，“荷载”为渗流比降，“强度”为临界渗透比降。由此，建立各种失效机制的极限状态方程是十分重要的。

3.2 漫顶失稳机制

防洪水位是确定堤顶高程的决定性因素，通常根据工程当地气象资料、断面资料以及堤防等级，进行水面线的推算，计算风浪爬高、风壅增水高度，确定安全超高，最终进行堤顶高度的安全复核。设防洪堤发生漫顶的极限状态方程 z_1 为

$$z_1 = h_0 - h_{\mathrm{w}} - h_s - e \tag{3-9}$$

式中：h_s 为波浪爬高；e 为风壅高度。

由于影响堤顶高程的因素很多，如堤基沉降。考虑到施工精度及竣工后固结沉降等因素，为保持设计高程，在设计时需预留沉降量。假定堤顶高程 h_0 服从正态分布，在一定堤段内预留沉降量超过 0.1m 的概率小于 2%，由正态分布的表达式可得

$$\frac{h_{\mathrm{d}} - h_0}{\sigma_{h_0}} = 1.96 \tag{3-10}$$

式中：h_{d} 为堤防的竣工后高程。由式（3-10）可得

$$\sigma_{h_0} = 0.1/1.96 = 0.051 \tag{3-11}$$

根据通常的经验，最高洪水位 h_{w} 假定服从指数分布，取 $\mu_{h_{\mathrm{w}}} = 8.34\mathrm{m}$，$\sigma_{h_{\mathrm{w}}} = 0.9$。波浪爬高 h_s 假定服从正态分布，并取 $\delta_{h_s} = 0.69$ [38]。

根据文献[51]代入蒲田波浪要素公式计算波高的均值 μ_h

$$\frac{g\mu_h}{V^2}=0.13\text{th}\left[0.7\left\{\frac{gh_\text{a}}{V^2}\right\}^{0.7}\right]\times\text{th}\left\{0.0018\left[\frac{gF}{V^2}\right]^{0.45}\left[0.13\text{th}\left[0.7\frac{gh_\text{a}}{V^2}\right]^{0.7}\right]^{-1}\right\} \tag{3-12}$$

式中：μ_h——波高的均值（m）；V——计算风速，取为 18m/s；F——风区长度，取 2000m；h_a——水域的平均水深，取为 10.5m。

波浪爬高为

$$\mu_{h_s}=\frac{K_\Delta K_V\sqrt{\mu_h\lambda}}{\sqrt{1+m^2}} \tag{3-13}$$

式中：m 为堤防的坡率；$K_\Delta=0.75\text{-}1.0$，可取 0.85；$K_V=1.0\text{-}1.3$，可取 1.1；μ_λ 为波长的均值。

$$\mu_\lambda=\frac{g\mu_T^{\ 2}}{2\pi}\text{th}\frac{2\pi h_\text{a}}{\mu_\lambda} \tag{3-14}$$

式中：μ_T 为周期的均值（s），且 $\mu_T=4\sqrt{\mu_h}$。

由上述各式可得：$\mu_{h_s}=0.638$；$\sigma_{h_s}=\delta_{h_s}\cdot\mu_{h_s}=0.69\times0.638=0.4395$。

风壅高度为

$$e=\frac{KV^2F}{2gh_\text{a}}\cos\alpha\approx\frac{KV^2F}{2gh_\text{a}} \tag{3-15}$$

式中：风向夹角 α 取 0^0；K 为综合摩阻系数，取 3.6×10^{-6}。

考虑到水文分析中观测资料的有限性，实际工程中根据堤防的等级要设置一定的安全加高值，未计及。

表 3.1 给出长江干堤安庆段各断面与漫顶相关的基本变量，如堤顶高程，堤身高度，设计水位，设计水位，风区长度，平均水深和波长。

表 3.1 输入的基本变量

堤段	堤顶高程 /m	下游水位 /m	堤身高度 /m	设计水位 /m	水深 /m	风区长度 /m	平均水深 /m	波长 /m
5687	21.29	14.5	6.69	19.29	4.79	4790	12	8.12407
8687	21.29	14.5	6.69	19.29	4.79	4790	12	9.19916
9387	21.18	14	7.08	19.18	5.18	5180	12	9.76672
11287	21.18	14	7.08	19.18	5.18	5180	12	11.3782
12737	21.08	14.13	6.85	19.08	4.95	4950	12	12.3259
12942	21.08	14.13	6.85	19.08	4.95	4950	12	12.6985
13737	21.07	14.8	6.17	19.07	4.27	4270	12	10.9319
14187	21.06	14.5	6.46	19.06	4.56	4560	12	9.19916
14587	21.06	14.5	6.46	19.06	4.56	4560	12	9.19916
14937	21.04	13.54	7.4	19.04	5.5	5500	14	9.23668
15187	21.04	13.54	7.4	19.04	5.5	5500	15	9.25112
15287	21.03	14	6.93	19.03	5.03	5030	15	9.25112
15787	21.01	12.87	8.04	19.01	6.14	6140	15	9.04702
16337	21.03	14	6.93	19.03	5.03	5030	15	9.25112
16987	20.98	14	6.88	18.98	4.98	4980	15	9.44921
17137	20.98	14	6.88	18.98	4.98	4980	15	9.25112
18187	20.96	14.7	6.16	18.96	4.26	4260	15	9.25112
18647	20.96	14.7	6.16	18.96	4.26	4260	15	9.25112
18837	20.95	14	6.85	18.95	4.95	4950	15	9.64173
18987	20.92	14	6.82	18.92	4.92	4920	15	9.82907
19757	20.92	14	6.82	18.92	4.92	4920	15	10.0116
20287	20.88	14	6.78	18.88	4.88	4880	15	10.1895
20487	20.88	14	6.78	18.88	4.88	4880	15	10.3632
20904	20.88	14	6.78	18.88	4.88	4880	15	10.5328
21087	20.88	14	6.78	18.88	4.88	4880	15	10.0116
21292	20.88	14	6.78	18.88	4.88	4880	15	10.6987
21487	20.85	14	6.75	18.85	4.85	4850	15	10.6987
21682	20.85	14	6.75	18.85	4.85	4850	15	11.0198
22287	20.8	13.8	6.9	18.8	5	5000	15	12.4531
22687	20.77	13.8	6.87	18.77	4.97	4970	15	11.7687
22857	20.77	13.8	6.87	18.77	4.97	4970	15	11.328
23757	20.69	13.8	6.79	18.69	4.89	4890	15	11.0198
23987	20.69	13.8	6.79	18.69	4.89	4890	15	9.25112
24037	20.69	13.9	6.69	18.69	4.79	4790	15	9.25112
24487	20.78	12.9	7.78	18.78	5.88	5880	15	9.25112
24687	20.78	12.9	7.78	18.78	5.88	5880	15	9.44921
29687	20.64	12.9	7.64	18.64	5.74	5740	14	9.23668
30237	20.64	12.9	7.64	18.64	5.74	5740	13	9.41562
30387	20.64	12.7	7.84	18.64	5.94	5940	12	9.58289
31787	20.58	12.7	7.78	18.58	5.88	5880	12	9.76672
33137	20.58	12.7	7.78	18.58	5.88	5880	12	11.5211

堤段	堤顶高程 /m	下游水位 /m	堤身高度 /m	设计水位 /m	水深 /m	风区长度 /m	平均水深 /m	波长 /m
34687	20.51	12.7	7.71	18.51	5.81	5810	12	12.9374
36187	20.51	12.7	7.71	18.51	5.81	5810	12	13.5045
37187	20.44	12.7	7.64	18.44	5.74	5740	12	10.9319
38387	20.44	12.7	7.64	18.44	5.74	5740	15	9.25112
40439	20.31	8	12.21	18.31	10.31	10310	15	8.1597
40687	20.31	8	12.21	18.31	10.31	10310	15	6.82659
40709	20.29	9.7	10.49	18.29	8.59	8590	15	6.82659
41644	20.26	9.7	10.49	18.26	8.56	8560	16	6.83152
M0000	19.3	10.9	8.3	18.3	7.4	7400	0	0
M0948	19.3	10	9.2	18.3	8.3	8300	0	0
M1748	19.3	11	8.2	18.3	7.3	7300	0	0
M2448	19.3	10	9.2	18.3	8.3	8300	0	0
M3548	19.3	10.5	8.7	18.3	7.8	7800	0	0
M5248	19.3	10.5	8.7	18.3	7.8	7800	0	0

注意：风速为 18m/s^2，重力加速度为 9.81m/s^2，Kd=0.85，Kv=1.1。

3.3 管涌失稳机制

当堤身或堤基表层土所承受的渗透力过大时就可能发生渗透变形和破坏，在此统称为管涌破坏。对于一些堤防而言，评价渗透的安全性可由土体承受的渗透水力坡降与土层的临界渗透坡降进行比较得到：

$$F_{SP} = J_c / J \tag{3-16}$$

式中：J_c 为土体的临界渗透坡降；J 为土体的渗透坡降，可由有限单元法或解析法计算得到。当采用有限单元法进行渗流计算时，采用自动剖分方法进行渗流域的剖分，土体采用三角形单元或四边形单元。不同级水位下的初始自由面由出逸点与上游水面线与堤身交点确定，通过压缩或拉伸的方法得到单元结点坐标。只需给定超单元边界类型信息，可自动提取已知的水头或流量边界结点，具体的计算过程可参见文献[64][65]，此不赘述。当采用解析法求解土体的渗透坡降时，对渗流场作某些假定和简化，根据规范[51]建议的方法计算出不同水位下背水侧堤坡的出逸点高度，然后估算渗径，进而计算各种不同水位下的渗透坡降。水力学解法一般仅能得到渗流截面上平均的渗流要素，但因其计算简便在实际工程中被广泛采用。从精度而言，水力学解法也能满足工程需要。

根据土力学理论和试验，防洪堤土体的临界渗透坡降与土质颗粒的大小、颗粒级配及结构、孔隙率、容重、施工质量等因素有关，而这些因素均具有不确定性。为了简化

分析计算，直接讨论土质临界渗透坡降的不确定性，这里假定土体的临界坡降服从正态分布。

3.4 边坡整体失稳机制

对于某一桩号的堤防边坡稳定分析而言，计算方法多采用基于极限平衡分析的安全系数法，比如简化毕肖普法或瑞典圆弧法。当不计各土条之间条间力的影响时，可推得简化毕肖普法的安全系数公式为：

$$F_{\mathrm{SL}} = M_{\mathrm{r}} / M_{\mathrm{o}} = \frac{\sum \frac{1}{m_{\alpha i}} \left[c_i' b_i + \left(W_i - u_i b_i \right) \tan \varphi_i' \right]}{\sum W_i \sin \alpha_i} \tag{3-17}$$

式中：$m_{\alpha i} = \cos \alpha_i + \frac{\tan \varphi_i' \sin \alpha_i}{F_{\mathrm{SL}}}$。可见，式（3-17）两边均有未知数，采用普通迭代法求解。根据堤段几何信息，自动给定最危险圆心的搜索范围。并采用最优化方法搜索最危险滑裂面位置（假定切入地基 0.6m）。不同水位下堤身的浸润线由渗流分析得到。

则堤坡稳定的极限状态方程为

$$Z_3 = F_{\mathrm{SL}} - 1 \tag{3-18}$$

第四章 单个堤段的结构风险分析方法

4.1 计算原理

结构风险有别于水文风险和水流风险，它指防洪堤坝在设计、施工和管理运用过程中由于材料和几何组成等各种危及结构安全的不确定性因素引发的构筑物不能完成预定功能的概率及由此所产生的后果。与其他风险的定义类似，某一防洪堤坝的结构风险可表示为失稳概率及其后果的函数：

$$\overline{R} = f(P_{\mathrm{f}}, C) = \sum_{i=1}^{N} P_{\mathrm{f}i} \cdot (R_{\mathrm{f}i} / P_i) \cdot (L_i + M_i + E_i) \qquad (4\text{-}1)$$

式中：$\overline{R}$ 是风险度；P_{f} 是失稳概率，$P_{\mathrm{f}i}$ 是某种失稳模式的概率，$R_i / P_{\mathrm{f}i}$ 为在相应原因事件发生情况下发生垮坝失事的概率；C 是对应的失稳后果或风险损失，常用相应于失稳概率的损失期望值表示，通常将其分为生命损失 L_i、经济损失 M_i 和环境恶化 E_i 等。N 为堤防失事的原因事件总数。开展溃堤损失计算更为侧重于细致的资料调查和整理，这里将风险分析的重点放在失稳概率的讨论上。

堤坝失稳概率通常由广义强度（或抵抗力）R 小于广义荷载（或荷载作用）S 的概率定义。具体的广义强度和广义荷载的定义已在上一章节中给出。

4.1.1 风险计算模型

在大多数情况下，堤防结构破坏分析仅需比较抵抗力 R 和荷载作用 S 这两个值。此时，可靠性函数可表示为

$$Z = R - S \qquad (4\text{-}2)$$

则

$$\overline{R} = P(R < S) = \iint_{Z<0} f_{R,S}(r,s)\mathrm{d}r\mathrm{d}s \qquad (4\text{-}3)$$

式中：$f_{R,S}(r,s)$ 是荷载 S 和强度 R 的联合概率密度函数。显然，直接采用式（4-3）计算失事概率是极为困难的。考虑到荷载 S 主要由上游水位的不确定性所决定，而强度 R 主

要由堤防土体的物理力学特性所决定，所以可以认为两者是相互独立的随机变量。式（4-3）可写为

$$P\{Z<0\}=\int_{-\infty}^{\infty}\left(\int_{0}^{s}f_R(r)\mathrm{d}r\right)f_S(s)\mathrm{d}s=\int_{-\infty}^{\infty}F_R(s)f_S(s)\mathrm{d}s \tag{4-4}$$

式中：$f_R(r)$ 和 $f_S(s)$ 分别为 R 和 S 的概率密度函数。$f_R(r)f_S(s)\mathrm{d}r\mathrm{d}s$ 则是 R 位于 r 和 $r+\mathrm{d}r$ 之间，同时 S 位于 s 和 $s+\mathrm{d}s$ 之间的概率。

由分部积分，公式（4-3）中的双重积分可被简化为单重积分

$$P\{Z<0\}=\int_{0}^{\infty}\left\{\int_{0}^{s}f_R(r)\mathrm{d}r\right\}f_S(s)\mathrm{d}s=\int_{0}^{\infty}F_R(s)f_S(s)\mathrm{d}s \tag{4-5}$$

式中：$F_R(s)$ 是抗力 R 的累积分布函数。

利用概率组合的方法可以间接估算 $\overline{R}$ 。设荷载 S 与上游水位 H 的联合概率密度函数为：

$$f_{H,S}(s,h)=f(s\mid h)f_0(h) \tag{4-6}$$

式中：$f(s\mid h)$——给定某一水位 h 下荷载 s 的条件概率密度函数；

$f_0(h)$——堤防上游水位概率密度函数。

于是利用全概率公式即可得荷载的概率密度函数为：

$$f(s)=\int_{-\infty}^{\infty}f(s\mid h)f_0(h)\mathrm{d}h \tag{4-7}$$

上式中，从理论上看，H 在 $-\infty$ 到 ∞ 之间变化，实际上，堤防的上游水位 $H>0$，即应为正值，而且有一定变化幅度。将（4-7）代入式（4-3）加以整理可得：

$$\overline{R}=P(S>R)=\int_{r}^{\infty}\left[\int_{-\infty}^{\infty}f(s\mid h)f_0(h)\mathrm{d}h\right]\mathrm{d}s=\int_{0}^{\infty}\left[\int_{r}^{\infty}f(s\mid h)f_0(h)\mathrm{d}h\right]\mathrm{d}s \tag{4-8}$$

令 $F_s(h)=\int_{r}^{\infty}f(s\mid h)\mathrm{d}s$，则有

$$\overline{R}=P(S>R)=\int_{h_1}^{h_2}F_s(h)f_0(h)\mathrm{d}h \tag{4-9}$$

式中：h_1——计算堤防失稳风险时规定的最低水位值；

h_2——计算堤防失稳风险时规定的最高水位值。

式（4-9）即为堤防的失稳风险模型。为避免对该式直接积分求解的困难。可采用离散化数值积分的方法求解。把荷载概率密度曲线上 $S\le h_2$ 的部分分成 N 段，则有：

$$\begin{aligned}\overline{R} &= P(S>R)=\int_{h_1}^{h_2} F_s(h)f_0(h)\mathrm{d}h \\ &= \sum_{i=1}^{N}\Delta F_0(\overline{h}_i)\overline{F}_s(h_i)\end{aligned} \tag{4-10}$$

式中：$\Delta F_0(\overline{h}_i)$ 是洪水位频率曲线第 i 段区间概率；N 是洪水位频率曲线计算段数。$F_s(h)$ 是相应于某一水位 h 的荷载大于强度的概率；$\overline{F}_{\mathrm{S}}(h_i)$ 是第 i 段区间内荷载大于强度的概率均值。

假定失稳事件是相互独立的且仅仅考虑边坡滑动和管涌两种失稳模式，则可将堤防边坡失稳风险度 R_{SL} 和渗透变形失稳风险度 R_{SP} 分别讨论，然后计算堤防总体失稳风险度 $\overline{R}$。即

$$\overline{R} = R_{\mathrm{SL}} + R_{\mathrm{SP}} \tag{4-11}$$

4.1.2 失稳概率的计算方法

式（4-10）中的 $\overline{F}_{\mathrm{s}}(h_i)$ 积分式难以得到解析解。因为 $F_s(h)=\int_r^{\infty} f(s\,|\,h)\mathrm{d}s$ 中的 $f(s\,|\,h)$ 是一极其复杂的函数。根据可靠性理论，经过分析对比现有的计算失稳概率的方法，选用前述的 Monte Carlo 方法求解。

4.2 几何形状参数对结构风险的影响

基于上述理论模型，以均质堤为算例，假定其上下游坡率 m_1、m_2 均为 3，顶宽 w 为 7m，高度 h_0 为 10m，上下游水位分别记为 H_{uw}、H_{dw}。在某一洪水位（以堤防高度以下 0.5m 定义）下，探讨几何形状对结构风险的影响，即对不同边坡坡率、顶宽和高度的堤防结构失稳风险进行比较分析。以下变动某一几何参数分析时，其它参数取为典型断面的值。计算表明，堤防下游坡发生边坡失稳的风险明显大于上游坡，约大 40%，故以下仅给出堤防下游坡的风险度。

1)下游坡率

图 4.1 给出下游坡率 m_2 变化时堤防发生失稳的风险度。由图可以看出，随着堤防下游坡率的增加，堤防发生边坡失稳的风险和渗透变形失稳的风险均显著降低，实际工程中通过适当放缓堤坡或设置戗台，以增强堤身（基）抵抗渗流破坏的能力，这在理论上

是合理的，但这会增加工程造价。

2)堤防顶宽

图 4.2 给出顶宽 w 分别为 4m、6m、7m、8m 和 10m 时堤防发生失稳的风险。可以看出，边坡发生失稳的风险随着 w 的变化不甚明显，而发生管涌的风险性明显降低，显然与渗径的增加相关。

3)堤防高度

图 4.3 给出不同堤防高度 h_0 下堤防发生失稳的风险。由图可见，随着堤防高度的增加，发生边坡失稳和渗透变形失稳的风险均增加。边坡失稳风险增加的原因有两点：其一是对于所考虑的顶高和坡角而言，随着堤高的增加，所考虑洪水位相应升高，使得堤身浸润线较高，进而影响滑动面的位置；其二是当顶高增加时，滑动力矩的增加显著快于抗滑力矩的增加。不同高度下渗透变形失稳风险增加的原因在于，下游坡出逸点高度的增加量相对上游水位的增加量较小，计算得到的渗透坡降增加。

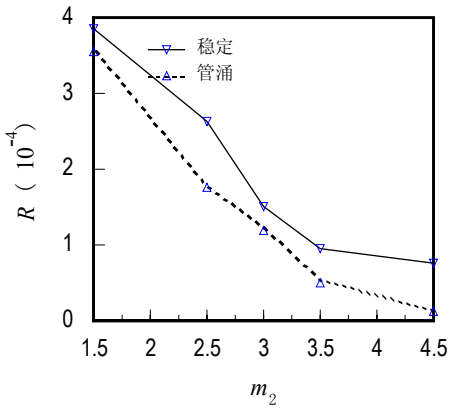


图 4.1 下游坡率对 R 的影响

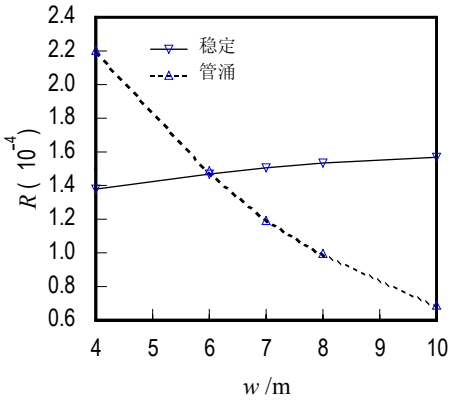


图 4.2 顶宽对 R 的影响

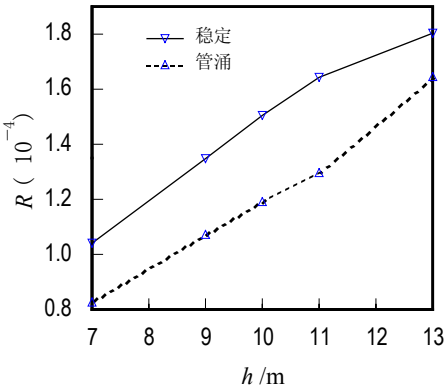


图 4.3 高度对 R 的影响

以上是给定某一洪水位并形成稳定渗流情况下，对临水侧和背水侧堤坡进行稳定分析和对堤身进行渗透变形风险分析的结果。事实上，堤防通常在不同的洪水位下工作，考虑洪水位的随机变化规律，可得到洪水位由 8.0m 至堤防高程 10.0m 时的典型堤防断面的总的结构风险为 0.328%。

4.3 土工参数统计量的敏感性分析

以下主要讨论土工参数统计量的变化对可靠性指标 β 的影响。当变化其中某一参数时，其它参数均取表 4.1 中的数值。

表 4.1 土工参数的统计特征

随机变量	符号	名称和单位	分布	均值	标准差
x_1	c	粘聚力（kPa）	正态	12.54	2.8
x_2	ϕ	内摩擦角（^{0}）	正态	21.58	3.5
x_3	γ	土的天然容重（kN/m^3）	正态	18.84	3.1
x_4	J_c	临界坡降	正态	0.55	0.093

（1）c、ϕ 的均值和变异系数对 β_s 的影响

图 4.4、图 4.5 分别为一组 $\mu_c \sim \beta_s$ 和 $\mu_\phi \sim \beta_s$ 关系曲线。可靠性指标 β_s 受 c、ϕ 均值

影响的程度不一样，其中μ_c较敏感。图 4.6、图 4.7 分别为一组δ_c～β_s和δ_ϕ～β_s关系曲线。β_s受c、ϕ变异系数影响的程度也不一样，其中δ_c较敏感，而δ_ϕ的变化对β_s的影响不大。

计算表明，土体容重γ的均值和标准差的变化对结构风险的影响不大，可将其作为确定性参数。

（2）临界渗透坡降J_c的均值和标准差对β_p的影响

图 4.8、图 4.9 分别为一组μ_J～β_p和δ_J～β_p关系曲线。可见，临界坡降J_c的统计参数显著地影响可靠性指标β_p。土的临界渗透坡降与土的颗粒组成和结构、不均匀系数、容重和施工等因素有关。因此，在堤防的建设中，合理地选择土质类型并控制施工质量是极其重要的。

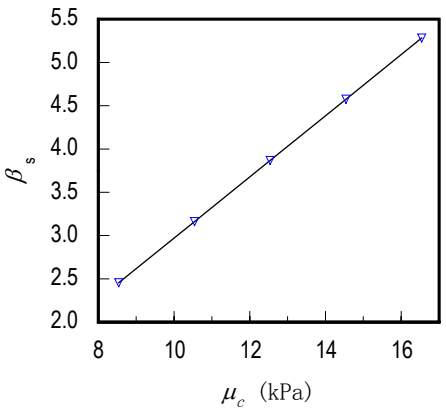


图 4.4 μ_c ~ β_s 关系

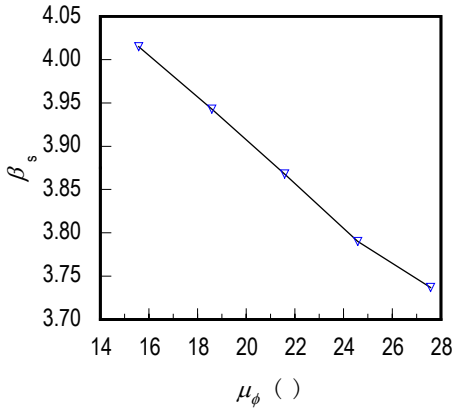


图 4.5 μ_ϕ ~ β_s 关系

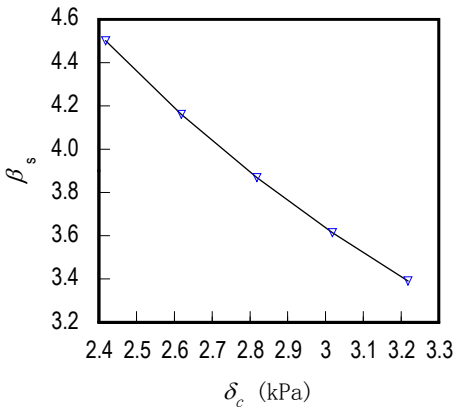


图 4.6 δ_c ~ β_s 关系

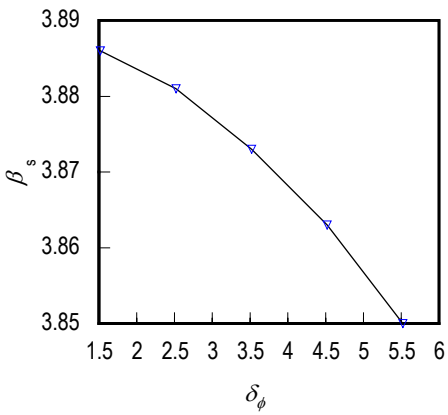


图 4.7 δ_ϕ ~ β_s 关系

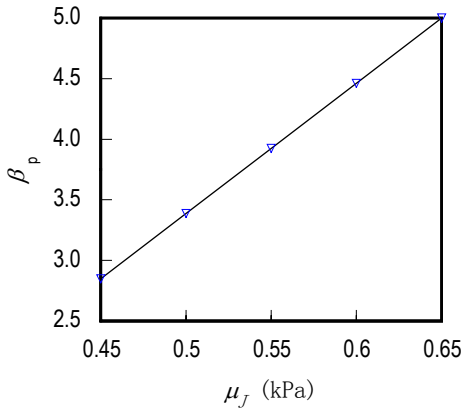


图 4.8 $\mu_J \sim \beta_p$ **关系**

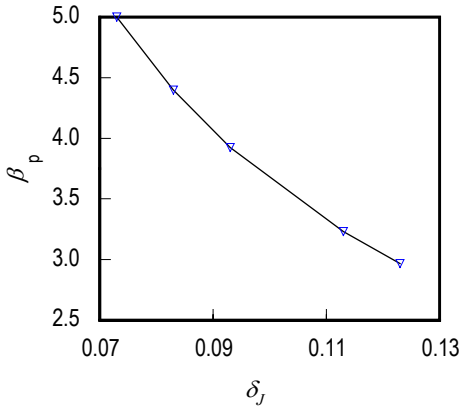


图 4.9 $\delta_J \sim \beta_p$ **关系**

综上所述，均质堤防的计算表明，抗剪强度指标c、ϕ的统计参数和分布类型对边坡失稳的可靠性指标β_s具有一定的影响，且μ_ϕ较μ_c敏感，而δ_ϕ较δ_c敏感；当c、ϕ均服从正态分布时，β_s值最小。同时，土体渗透坡降的统计参数对渗透变形失稳的可靠性指标β_p具有显著的影响。

堤防几何形状的变化对β_s和β_p均具有一定的影响。堤防上、下游坡率的变化仅对相应的上、下游边坡的边坡失稳风险具有较大的影响，坡率的增加，延长了渗径，使发生管涌的风险降低。宽度的增加仅对堤防的渗透变形影响较大，对边坡失稳风险影响不大。随着堤防高度的增加，发生边坡失稳和渗透变形失稳的风险均增加。

与已有相关文献的对比分析表明，计算模型和计算程序是可行的。

第五章 安庆堤防工程地质特征及评价

解放前安庆江堤千疮百孔，水患不断。建国以来经过对堤防的加高加固建设，使其防洪能力有了一定的提高，但仍存在防洪标准低，堤身断面不足，堤身和堤基存在不同隐患。有些堤段堤外无滩，水流贴岸，顶冲淘刷堤脚，引起江岸崩塌，尽管在崩塌段实施了一些应急护岸工程，但限于力度不够，险工险段崩岸险情时有发生，直接威胁着堤防安全。1998 年大洪水后，对安庆江堤、广济圩江堤、安庆市城市防洪工程按防御“五四”型洪水进行除险加固。据此，将广济圩江堤(18+837～40+439)和梅林隔堤由 II 级提高到 I 级堤防，广济圩江堤 40+439～43+689 仍为 II 级堤防。长江委对安庆及广济圩江堤护岸和部分堤段防渗工程实施了相应的加固工程。

这里简要介绍安庆防洪体系的组成及其工程特点，1998 年大规模加固前的主要工程地质问题，主要给出全堤段分析中采用的土工计算参数。以其作为区域堤防工程安全评价的资料基础。

5.1 地质概况

（1）地形地貌

长江自西向东进入本区后，经前江圩改向北流，经过枞阳进入枞阳江堤改向东流，本区内丁马段历史上曾溃口。本区为冲积平原，地势西北高东南低，地面高程 11~17m。安庆市、枞阳县城附近有大龙山、幕旗山、白鹤峰等低山丘陵，大龙山为区内最高点，山顶高程 699m。

沿干堤两侧湖泊、渊塘、沟渠分布广泛，较大湖泊有破罡湖、莲花湖。在距堤脚 300m 范围内分布大小渊塘共有 214 处，其成因多属筑堤时取土坑塘、河流废道及古河流出口通道等。梅林堤外临长河，内临花山湖、破罡湖，堤内脚分布有大小渊塘共 29 处。

（2）地层岩性

安庆江堤及广济好江堤沿堤线多为第四系冲沉积层，第四系地层为粉质粘土、重粘

土、粉质壤土、壤土、砂壤土、粉细砂层、砂卵砾石层，厚度 35.0～50.0m，相对不透水白垩系红砂岩顶部高程-19.4～-39.44m。

梅林隔堤堤身主要由粉质粘土、粉质壤土等组成，堤基主要由粉质粘土，重(中、轻)粉质壤土，淤质土，细砂透镜体等组成。

（3）地质构造与地震

安庆江堤及广济圩江堤位于扬子准地合下扬子台褶，挽近期新构造运动以间歇性升降运动为主。根据《中国地震烈度区划图》(1990 年版)，本区基本地震裂度为 VI 度。

（4）外动力地质现象

主要外动力地质现象为崩岸，其发育与长江河道的摆动和迎流顶冲有关。

5.2 堤身填土组成及工程特性

（1）堤身现状

安庆江堤与广济圩江堤桩号 3+626～4+726 段为钢筋险防洪墙，桩号 2+102～3+626 段为浆砌块石防洪墙，桩号 0+960～1+277 段和 4+726～5+687 段无堤防，莲花湖段有 1.15km 的堤段为以山代堤段，其余均为土堤。

土堤堤身一般为人工素填土，填土厚度一般 4.20～7.80m，堤顶为堤顶公路，高程 17.43～21.34m，堤顶宽 3.40～9.00m，42+370～43+689 段堤顶为枞阳县城沿江公路，堤顶宽一般大于 20m。堤顶公路路基为厚 0.3～0.5m 的杂填碎（块）石土。堤身平均高出地面 4.20～7.00m，外边坡 1:3～1:6，除莲花湖段外，堤内均设有内戗台，戗台坡比 1:3～1:5。

堤身土体主要由粉质粘土和粉质壤土构成，局部堤段夹砂壤土、粉细砂，其中立新圩堤上部为人工杂填土，结构较疏松。

（2）堤身隐患

安庆江堤及广济圩江堤 1870 年、1954 年分别于桩号 8+587～8+837（荷花塘）及 10+487～10+887（五四溃口）段溃口。

1998 年汛期有较多地段出现堤内坡散浸险情，浸润线出逸点较高，如荷花塘、民兵

路下、汪家墩、郑家村、马窝、夹厢圩、长风上堤公路、大王庙上、新义等段，散浸堤段长度 10.37km，占全线土堤长度的 20.7%。从平面位置来看，堤身散浸主要分布桩号 8+690～23+387 段及桩号 26+487～30+387 段。

上述险情的发生均与堤身质量有关，主要表现是堤身填土中砂性土含量较高和填土的密实度较差。据钻孔资料统计，堤身砂性土钻探进尺占堤身土钻探总进尺的比例较高，一般为 6%～7%，大者近 20%（桩号 11+000～15+980 段）。

（3）堤身填土组成及工程特性

（1）0+000～0+960 段

堤身填土主要由粉质粘土、粉质壤土组成，上部有杂填土分布于高程 13.40～17.80m 以上，厚 2～6m，标贯击数 1.3～4.6 击，一般 3 击，室内试验渗透系数 4.96×10^{-5}～5.3×10^{-2}cm/s。粉质粘土：天然含水率 22.2～30.7%，干密度 1.48～1.64g/cm^3，比重 2.72，塑性指数 16.0～20.5；粉质壤土：天然含水率 32.5%，干密度 1.44g/cm^3，比重 2.72，塑性指数 18.2。此外在堤身中还有少量壤土、砂壤土和粉细砂，其分布极不均一，多呈透镜体分布在堤身表层或混杂在杂填土及粉质粘土、粉质壤土中。本段堤身杂填土钻探进尺占堤身钻探总进尺的 41.2%。

（2）1+277～2+102 段

堤身填土主要由粉质粘土、粉质壤土组成，天然含水率 27.5～31.5%，干密度 1.40～1.46g/cm^3，比重 2.68～2.69，塑性指数 15.0～17.0。

（3）5+687～11+000 段

堤身填土组成主要为粉质粘土和粉质壤土。粉质粘土：天然含水率 19.0～27.3%，干密度 1.48～1.65g/cm^3，比重 2.73～2.74，塑性指数 15.5～21.3；粉质壤土：天然含水率 21.9～28.0%，干密度 1.52～1.65g/cm^3，比重 2.72～2.73，塑性指数 17.6～22.8。

（4）11+000～15+980 段

堤身由粘土、粉质粘土、粉质壤土、壤土及少量砂壤土和粉细砂组成。粘土：天然含水率 26.7～35.8%，干密度 1.38～1.58g/cm^3，比重 2.73，塑性指数 21.5～28.1；粉质粘土：天然含水率 21.7～40.1%，干密度 1.31～1.68g/cm^3，比重 2.72，塑性指数 16.4～29.8；粉质壤土：天然含水率 18.2～35.4%，干密度 1.38～1.61g/cm^3，比重 2.70，塑性指数 16.4～20.7；壤土：天然含水率 15.2～21.1%，干密度 1.54～1.65g/cm^3，比重 2.69，塑性指数 13.1。

（5）15+980～18+837 段

堤身组成为重粉质壤土、（重）壤土、砂壤土、粉质粘土及薄层状或团块状粉细砂。砂壤土一般分布在堤顶 1.0～2.0m 的范围内，多呈干燥疏松状。重粉质壤土、壤土，多呈硬塑至可塑状，天然含水率 19.2%，干密度 1.59g/cm^3，比重 2.69，塑性指数 13.3～16.5；粉质粘土（少量粘土）多呈可塑状，天然含水率 28.8%，干密度 1.51g/cm^3，比重 2.72，塑性指数 20.80。

（6）18+837～24+000 段

堤身填土主要有粘土、粉质粘土、壤土、粉质壤土及少量粉细砂和砂壤土。粘土：天然含水率 26.5～41.2%，干密度 1.27～1.59g/cm^3，比重 2.72；粉质粘土：天然含水率 26.4～39.5%，干密度 1.30～1.56g/cm^3，比重 2.71；粉质壤土：天然含水率 26.8～38.7%，干密度 13.2～15.7g/cm^3，比重 2.71；壤土：天然含水率 18.4～27.8%，干密度 1.53～1.81g/cm^3，比重 2.69。堤身土还含有少量砂壤土或粉细砂。

（7）24+000～43+689 段

堤身填土主要有粉质粘土、粘土、重粉质壤土及少量粉细砂和砂壤土。粉质粘土：天然含水率 25.3～40.1%，干密度 1.31～1.58g/cm^3，比重 2.71；粘土：天然含水率 28.4～38.3%，干密度 1.34～1.47g/cm^3，比重 2.72；重粉质壤土：天然含水率 26.4～37.0%，干密度 1.35～1.54g/cm^3，比重 2.71。

（8）M0+000～M6+296（梅林隔堤）段

堤身填土主要有粉质粘土、粘土、重粉质壤土及少量粉细砂和砂壤土薄层。天然含水率 21.2～47.36%，干密度 1.17～1.72g/cm^3，比重 2.72。

5.3 堤基地质结构分类及工程地质特征

（1）堤基地质结构分类标准

长江委综合勘测局编制的《长江中下游堤防工程地质勘察技术要求》中规定，长江中下游堤防堤基分为三大类、五个亚类。分述如下：

单一结构类（I）：分二个亚类

I1：（单粘性土类）：堤基由粘土、粉质粘土组成，抗渗条件好，堤岸耐冲稳定。

I2：（单砂性土类）：堤基为砂性土，厚度不等，或上部粘性土厚度小于 2m，抗渗

条件差，易崩岸，是汛期险工险段。

双层结构类（II）：分三个亚类

II1：上部粘性土厚度一般 2～5m，下部砂层厚，堤岸抗冲性与堤基抗渗性较差，汛期易出险情。

II2：上部砂层厚度大于 5m，下部砂层厚度大，在粘性土无破坏的情况下抗渗性好。

II3：上部砂层厚度小于 15m，下部粘性土厚度大，堤岸抗冲性与堤基抗渗性均较差。

多层结构类（III）：由厚度一般小于 2m 的粘土、粉质粘土、壤土、砂壤土或卵砾石呈互层或夹层透镜状组成的复杂结构堤基，抗渗性取决于表层粘性土的厚薄及砂壤土、砂卵砾石层间水力联系，江岸易冲刷。

（2）堤基地质结构分类

据勘察资料，依据上述堤基地质结构分类标准，安庆江堤、广济圩江堤及梅林隔堤堤基地质结构主要有 I1、I2、II1、II2 和 III 类。

统计表明 I1 类堤基 11 段，堤段总长度 9.546km，占堤防长度的 19.10%；I2 类堤基（单一砂性土堤基）仅一段，堤段长 537m，占堤防长度的 1.07%；II1 类堤基 1 段，堤段总长度 4.59km，占堤防长度的 7.16%；II2 类堤基 9 段，堤段长度 26.79km，占堤防长度的 54%；III 类堤基 5 段，堤段总长度 8.522km，占堤防长度的 17.05%。

（3）工程地质分段和评价

堤防工程地质分段是以堤基地质结构和堤基、堤身存在的主要工程地质问题为基本依据，结合堤内外的渗透边界条件，如外滩宽度、堤内渊塘、决口冲刷坑等，此外还考虑堤段历史上险情发生情况等因素将堤防划分为工程地质条件好的（A）、较好的（B），较差的（C）和差的（D）四类堤段。各类堤段划分特征如下：

A 类堤段：为 I1 类（单粘住土结构基岩）堤基或依靠山体或残丘岗地挡水，一般为宽或较宽外滩，抗冲刷能力强，堤防元渗透稳定和岸坡稳定问题。该类堤段长 1.682km，占全堤长 3.37%。

B 类堤段：主要为 II2 类（上部较厚粘性土下部砂性土结构）堤基，外滩一般较宽，堤内发育有少量的渊塘，堤防元严重散浸、管涌险情发生。该类堤段长

29.806km，占全堤长 59.63%。

C 类堤段：主要为 II1 类、III 类（上部较薄粘性土下部砂性土结构、多层结构类）堤基，表层有不均匀的杂填土，虽覆盖层稍厚但表层有堤内外贯穿的砂壤土层或覆盖层不太厚，抗渗条件较差，外滩一般较窄，堤内外渊堵较发育且深度较大，深泓贴岸，存在部分岸坡稳定问题，险情较多。该类堤段长 3.879km，占全堤长 7.76%。

D 类堤段：主要为 I2 类、II3 类、III 类（单砂性土结构、上部砂性土下部粘性土结构、多层结构类）堤基，一般为窄外滩或无外滩，堤内渊塘发育，抗渗条件差或存在滑坡问题：岸坡迎流顶冲，岸坡稳定条件差，崩岸现象严重：堤防有较严重的散浸、管涌险情发生，险情较多，危及堤身安全。该类堤段长 14.618km，占全堤长 29.24%。

安庆江堤、广济圩江堤及梅林隔堤的堤防工程地质分段及评价详见表 5.1。

表 5.1 安庆江堤及广济圩江堤、梅林隔堤堤防工程地质分段评价表

堤防类别	分段桩号	长度（km）		占总长 %	地层结构	工程地质评价
A	4+726～5+687	0.961	1.682	3.37	主要为下更新统老粘土，表部有 4.0m 左右素填土(或杂填土)，其下为粉质粘土粉质壤土、无砂层	该段堤基主要为基岩或 Q2 老粘土，强度高，抗冲刷能力强，无渗透变形之虑，工程地质条件好，1998 年汛期为发生任何险情
	42+18～42+477	0.288			主要为红砂岩，表层有厚度小于 1.0m 的残积土和杂填土	
	43+237～43+440	0.203				
	M4+748～M4+978	0.230			主要为基性亲入岩(花岗岩)，表层有厚度小于 1.0m 的残积土和杂填土	
B	0+000～0+960	0.960	9.744	59.51	表层粉质粘土厚近 20 米，其下为厚 12m 细砂层，不透水顶板高程-21m	堤基土主要为弱透水性的第四系全新统粉质粘土、粉质壤土、砂层埋藏较深或无砂层，不透水顶板高程较高。该堤段岸滩多较宽，仅 35+750~36+990 堤段无外滩及部分堤段外滩较窄，受水迎流顶冲，深泓逼近，存在岸坡稳定问题。1998 年汛期险情主要为散浸，局部有清水漏洞，需对部分堤基进行处理，梅林隔堤羊叉脑~大湾段 1996~1999 年发生散浸险亲情 1 处.。
	1+277～2+102	0.825			上部为 10m 厚粉质粘土，下部为 15.0m 左右砂壤土，粉砂层透镜状分布，不透水顶板高程 4.78～2.40m	
	5+687～11+287	5.600			表部为厚 15m 左右粉质粘土、粉质壤土层，下部为砂砾石层，不透水顶板高程-10~-20 左右	
	23+387～40+439	17.052			表部为厚 20 余米的粉质粘土、粉质壤土，局部为透镜状淤质粘土，下部为厚 17.40m 的砂、砂砾石层，不透水顶板高程－21.60m 左右	
	40+439～42+189	1.750			表部为厚 20 余米的粉质粘土、粉质壤土(夹淤质粘土层)，下部为厚 10m 左右的砂、砂砾石层，不透水顶板高程-20m 左右	
	42+477～43+237	0.760			湖积粉质壤土、粉质粘土，厚近 10m，其下为淤泥质粘土，厚 13m，无砂层	
	43+440～43+689	0.249			湖积粉质壤土、粉质粘土，厚近 10m，无砂层	
	M0+000～M2+548	2.548			堤基土层上部以粉质壤土、粉质粘土、粘土为主，厚度 21.40~24.10m，下部为粉细砂层，厚度 3.10~5.10m	

表 5.1 安庆江堤及广济圩江堤、梅林隔堤堤防工程地质分段评价表

堤防类别	分段桩号	长度（km）		占总长%	地层结构	工程地质评价
C	0+960~1+277	0.317	3.941	7.88	堤基表层为厚 5m 的杂填土，其下为粉质壤土	0+750~1+277、2+102~4+726 堤段表层为杂填土，此类土空隙大、强透水，且强透水砂砾石层分布高，同时存在软弱淤质类土，极易引起不均匀沉陷，历史险情为 1991 年浆砌石防洪墙开裂，1983 年钢筋砼防洪墙倾斜、开裂，梅林隔堤大湾段堤身填筑质量差，1996~1999 年发生大小散浸险情 7 处。
	2+102~3+626	1.524			堤基表层为厚 4~6m 的杂填土，其下为厚 0.2~8.20m 左右的粉质壤土层(局部缺失)，厚 2.40~18m 左右的砂砾石层，部偷税红砂岩顶板高程 6.68~6.12m	
	3+626~4+726	1.100			堤基表层为厚 2.4~7.9m 的杂填土，其下为厚 4.0~8.1m 左右的砂性土夹少量透镜状粉质壤土、透镜状分布的含砾粉质壤土，厚 4.2~9.3m 的砂砾石层，不透水顶板高程-3.10m	
	M2+548~M3+548	1.000			堤基主要由黄褐、灰色粉质壤土、粉质粘土组成，厚度 7.30~19.80m，基岩分布高程-15m	
D	11+287~16+072	4.785	14.618	29.24	弱透水层复盖 8~15m，表层砂壤土、粉砂层出露，复盖层夹杂细砂薄层极具层理性，下部为近 50m 厚的强透水砂层、砂砾石层。	本段岸滩多为窄外滩，一般宽度 60~80m，存在岸坡稳定问题。堤内 100~200m 范围内顺堤多有渊塘。堤基上部为较薄的粉质粘土、粉质壤土，下部为深厚的粉细砂，易产生渗透破坏。本段工程设施有 70 余根减压井，但各段效果不一。1998 年汛期该类堤段多处发生险情。梅林隔堤南河口段、花山湖段堤基存在淤泥质粘土，1996~1999 年发生散浸险情 5 处，滑坡险情 3 处。该堤段工程地质条件差，应对堤基进行处理。
	16+072~18+837	2.765			弱透水层复盖 10m 左右，复盖层为粉质壤土、粉质粘土、夹细砂薄层，具层理性，下部为近 50m 厚的强透水砂层、砂砾石层	
	18+837~23+387	4.550			弱透水层复盖 2~4m 左右，其下为深厚的砂层、砂砾石层。	
	M3+548~M4+748	1.200			堤基主要由黄褐、灰色粉质壤土、粉质粘土、淤泥质粘土组成，厚度 11.30~18.10m，淤质粘土分布厚度 1.60~4.50m	
	M4+978~M6+296	1.318			堤基主要由黄褐、灰色粉质壤土、砂壤土、淤泥质粘土组成，淤泥质粘土分布厚度 2.0~8.0m。	

5.4 98 大洪水前存在的主要工程地质问题

（1）渗透稳定问题

安庆江堤、广济圩江堤及梅林隔堤在汛期和 1998 年大水时均多处出现险情，一些堤段不同程度存在渗透稳定问题，发生较多的是堤身及堤基渗漏、散浸与管涌。分析渗漏、散浸与管涌发生的原因主要与汛期高水头，堤身填土碾压不密实或不均匀、孔隙比较大或夹有砂壤土、极细砂薄层，堤基岩性、性状、地质结构，外滩宽度、河流切割深度等条件有关。渗漏、散浸与管涌是抗渗条件较差的堤防（堤身、堤基）段在汛期高水头作用下产生渗流和渗透变形的结果。表 5.2 给出安庆堤段在 1998 年出现的险情描述和主要处理措施。

表 5.2 安庆堤段 1998 年堤防险情及处理措施

编号	堤段	桩号	险情	时间	水位	描述	处理措施
1	广济圩	03+000	管涌	6 月 28 日	18.33	离堤脚 70m 处石化港贮公司油罐区墙脚排水沟内冒清水，孔径约 7cm；7 月 3 日，在 3+003 处离堤脚 11 石化港贮公司输油管底下发生管涌，经查管下有一直径为 50cm，深约 1.5m 的深坑。	砂石料压渗，并做压渗平台，派专人值班观察
2	广济圩	09+050	管涌	8 月 3 日	18.49	距堤脚 260m 的水塘中发现 2 处管涌，直径 15cm，并可见 4 个砂环连成一片，面积达 30m2；并在距堤 50m 处发现一户两层楼房四周地基开裂，最大裂缝 1cm，房屋最大沉陷 45cm。	管涌采取砂性土填塘盖重，房屋沉陷未处理
3	广济圩	17+100	管涌	8 月 4 日	18.46	距堤脚 90m 一面积约 5 亩水塘中有 3 处管涌。	围井导滤
4	广济圩	27+416	渗漏	6 月 28 日	17.43	涵箱第二节伸缩缝顶部冒水，每小时大约 4-5 立方；7 月 4 日伸缩缝与围墙结合部冒清水，每小时约 4-5m^3。	派人观察

（2）岸坡稳定问题

安庆江堤与广济圩江堤及梅林隔堤段河岸除部分为基岩岸坡外，大部分岸段均为第四系二元结构的冲洪积物组成，岸坡土体的抗冲性一般较差，部分岸段在长江水流冲刷及侧蚀作用下已产生岸坡崩塌、岸线后退，对堤防安全已构成直接威胁，故岸坡稳定问题是本段堤防的主要工程地质问题之一。

（3）深层堤基滑动问题

广济圩江堤桐城段，莲花湖个别堤段，梅林隔堤大湾、南河口、闸西等处堤基均存在有性状较差的淤质粘土，存在堤基滑动的可能。

（4）地基不均匀沉降问题

城区防洪墙段墙下地基为杂填土，其杂填土结构松散，分布又极不均匀，在高水位下，墙基压应力分布不均匀，松散且不均匀地基上作用不均匀荷载，易产生不均匀沉降，对刚性防洪墙的结构不利。

5.5 计算分析中采用的土工参数值

98 年大洪水后，结合长江干堤加固项目的实施，该堤段主要的加固项目有：堤身加高培厚，建防洪(浪)墙，修建堤脚内外平台、堤身锥探灌浆、护坡、防汛公路、填塘盖重、减压盲沟、新建减压井、垂直防渗墙、护岸及堤内盖重区水系恢复等工程。同时，对该段堤防进行了大规模的地质勘察活动，进行了大量的室内土工试验和原位测试，以查明土体的各种物理力学特性[66][67]。试验与研究结果表明，堤（墙）基壤土、粉质壤土及粉质粘土一般呈可塑状态，透水性较弱，具中等压缩性；淤泥质粉质粘土、淤泥质粉质壤土一般呈软塑～流塑状，含水率较高，孔隙比较大，属高压缩性、弱透水性土；砂壤土多呈松散～稍密状，透水性较强；粉细砂层呈中等密实状，透水性较强。城区防洪墙段人工杂填土的物理力学性质及渗透特性极不均一。

土体的物理力学指标建议值，物理指标按室内试验成果平均值提出，力学指标按试验成果结合工程地质类比提出，渗透指标按室内渗透试验和钻孔注水试验成果综合提出。计算分析中采用的土工参数值如表 5.3 所列。

表 5.3 土体物理力学指标建议值

地层代号	岩性	含水量	干密度	孔隙比	饱和度	塑性指数	压缩系数	凝聚力	内摩擦角	承载力	渗透系数
		w	ρ_d	e	S_r	I_p	a_{1-2}	c	ϕ	f_k	k
		%	g/cm^3		%		MPa^{-1}	kPa	0	kPa	cm/s
rQ	堤身素填土	25.89~31.5	1.42~1.57	0.74~0.89	94~100	15.0~17.0	0.29~0.36	22.4~34.5	12.6~18.8		7.04E-4 ~6.14E-5
	堤身素填土										4.96E-5 ~5.30E-2
rQ	堤身素填土	26.03~31.6	1.43~1.52	0.75~0.88	90~100		0.41~0.64			120~140	5.17E-5 ~3.69E-4
a1Q4	表层砂壤土	25~33.1	1.34~1.61	0.92~1.04	87~100		0.15~0.29	1~18.7	30~33.5	140	1×10-3
	粉质粘土	29.6~37.6	1.22~1.48	0.86~1.01	97~100	12.4~18.6	0.37~0.45	15.6~28.3	12.5~21.6	130~160	2.59E-6 ~1.96E-7
	粉质壤土/壤土	32.8~38.6	1.31~1.45	0.89~1.08	97~100	11.4~16.5	0.39~0.55	11.5~15.9	11.5~20.5	150	1.29E-5 ~6.31E-6
	淤泥质粘土	23.8~77.6	1.32~1.52	0.76~2.21	74~100	8.5~40.5	0.2~3.03	6~30	4.3~18.8	60~80	1.01E-8 ~7.25E-6
	砂壤土	30.4~33.8	1.40~1.43	0.85~0.90	100		0.40~0.81	8~14.5	8.5~16	140	8.45E-5 ~1.84E-4
	粉细砂		1.37~1.48	0.79	100					150	6.16E-3 ~2.04E-4
Q1	粘土	17.1~29.6	1.71	0.62			0.16~0.34	32	14.6	260~300	5.85E-6 ~1.37E-8

第六章 区域堤防工程的结构风险分析

在前述章节对单个堤段进行计算与分析的基础上，基于全堤段结构风险分析模型，根据加固设计报告对整个堤段 55 个典型断面的各种失稳模式进行计算，并系统地给出分析成果。

6.1 全堤段的结构风险分析模型

对一个流域而言，在某种程度上是一个串联体系，破坏总是从最薄弱的堤防开始，如果该堤防是经济发达地区，则造成的损失会更大，某一地区（假定经济不发达）设立过高的防洪标准不仅造成经济上的浪费，还可能对其他地区的防洪造成危害。同时，某一地区或某一水库的防洪标准应与整个流域的防洪标准相适应。采用可靠理论及其风险分析的方法对群坝进行风险分析可有效地确定资金流向[17, 68]。

鉴于土石堤防的工作条件十分复杂，对其安全分析和评价已从单一失稳模式发展到多模式，从单一堤段发展到多堤段的综合分析与评价[69]。以下给出全堤段的结构风险分析模型。

设有 m 个相互独立的随机变量组成堤防广义强度 R，有 n 个相互独立的随机变量组成堤防广义荷载 S，且荷载 S 与强度 R 的联合概率密度函数 $f_{RS}(r,s)$，则堤防总失稳概率 P_{fT} 为

$$P_{\mathrm{fT}}=\int_0^{\infty}\int_0^{S} f_{RS}(r,s)\mathrm{d}r\mathrm{d}s \tag{6-1}$$

在目前的技术条件下，要得出 $f_{RS}(r,s)$ 的解析表达式是十分困难的。因此，堤防总失稳概率 P_{fT} 的求解无法直接由式（6-1）进行，而只能依据结构可靠度理论中的近似概率法来求解。

在近似概率法中，失稳概率只是针对堤防某一堤段的一个断面在特定破坏形式下失稳而言的，如前一章节中所述。因此，要求出总的堤防失稳概率 P_{fT} 还需对其作进一步分解，即分解为：某一失效模式的单项失稳概率 P_{fM}、某一堤段各单项失稳概率 P_{fS}、全

堤段失稳概率 P_{fT}。堤防结构构件（堤段断面）发生特定形式破坏的单项失稳概率 P_{fM} 为[70]：

$$P_{fM} = \varphi(\beta) \tag{6-2}$$

式中：$\varphi(\cdot)$ 为标准正态分布函数，β 为表征结构可靠程度的可靠指标。

某一堤段各单项失稳概率 P_{fS} 的集合为：

$$P_{fS} = P(M_1 \cup M_2 \cup \cdots \cup M_j \cup \cdots \cup M_k) \tag{6-3}$$

式中：M_j 表示堤段在第 j 种破坏形式下导致堤防失事的事件，所对应的堤防单项失稳概率为 $P_{fMj}(j = 1,2,\cdots,k)$，$k$ 为造成该堤段失事的可能破坏模式数。如何考虑多种失稳模式之间的相关性是值得深入研究的课题。

则各堤防段的总失稳概率 P_{fT} 可由各个堤段的失稳概率 P_{fS} 组合得到：

$$P_{fT} = P(E_1 \cup E_2 \cup \cdots \cup E_i \cup \cdots \cup E_l) \tag{6-4}$$

式中：E_i 表示堤防第 i 个堤段失事的事件，所对应的堤段的失稳概率为 $P_{fEi}(i = 1,2,\cdots,l)$，$l$ 为堤段数。通常情况下，整个堤防圈的“强度”由最薄弱点所决定的。亦即最危险点对计算结果具有最大的影响，并不是每个薄弱点对于整个洪灾概率具有同等的影响。根据堤段间的相关程度，计算各种破坏类型沿长度方向的概率组合。在此基础上求取各破坏模式的综合效应，即整个串联系统的总的失事概率，通常采用一般界限法[6, 71]得到。

6.2 安庆堤防圈的组成及其工程特点

这里以长江下游的安庆市堤防作为典型研究区域。安徽省安庆江堤及广济圩江堤位于长江下游的北岸，西起狮子山，东至幕旗山，全长约 49.985km，其中包括防御菜子湖洪水的梅林段（起自羊叉脑至飞鹅头）堤长 6.296km，系保护安庆市城区、郊区和枞阳县、桐城市部分地区的长江防洪屏障。境内地势起伏，自东向西逐渐增高，呈三级阶梯，东南大片圩区地面高程 10～15m，西北山丘地面高程 20~700m，其间杂以 15～50m 残丘，地形破碎，岗冲起伏，沟港迂回。

安庆市位于安庆江堤及广济圩江堤的保护区内，地处长江下游的左岸，地理位置东径 117°02′、北纬 30°31′。城市防洪圈东临菜子湖，西依皖河，南环长江干流，北靠大龙山。总面积 391.7km^2，其中：山丘区 151.60km^2，占 39%；圩区 168.7km^2，占 43%；湖

区 71.4km^2，占 18%。

保护区的西南端有皖河入长江口，东北有菜子湖及长河。为防御菜子湖流域洪水威胁，修建梅林隔堤，堤长 6296m，梅林堤地处菜子湖流域下游，外靠长河、内濒破罡湖，是安庆市区与菜子湖流域的分界线。菜子湖流域洪水经长河于枞阳闸注入长江。保护区内无较大的支流，区内仅有 10 余条小河流，汇流入破罡湖。

安庆防洪系统的边界如图 6.1 所示。由于地图的左侧和右上部为高地或山川。吴淞高程+18m 等高线代表了洪水几乎不可能到达该区域。在曲线所划定的范围内，一旦发生堤防溃决，洪水将到达保护区。本报告高程均为吴淞高程，吴淞高程=黄海高程+1.94(m)。桩号起点为市区立新圩狮子山脚。

图 6.1 安庆城市防洪系统的边界条件

如图 6.1 所示，有七种主要的防洪构筑物（措施）组成了整个安庆城市防洪体系。表 6.1 中列出了五种类型的堤防和两个主要水闸。

为讨论特定水位下区域堤防工程的结构风险，五种类型的堤防均假定为均质的，不

考虑附属穿堤建筑物的影响。一些水闸及结构物的信息需要结合后继项目进一步整理与分析。防洪系统的其他部分认为是足够安全的。

表 6.1 安庆防洪系统的主要组成部分

组成	桩号		长度 (m)	堤防类型	百分比 (%)
	起点	终点			
A	000+000	05+687	5,687	钢筋混凝土防洪墙、基础处理的均质堤防	11.26
B	05+687	14+500	8,813	水泥土心墙均质堤防	17.45
C	14+500	28+180	13,680	后方压盖或减压井均质堤防	27.08
D	28+180	45+000	16,820	均质堤防	33.31
E	M0+000	M5+000	5,500	均质堤防	10.89
F	05+687			新金家闸	
G	33+201			破罡湖水闸	

由上述计算原理和系统设计思路，对位于长江下游北岸的安庆江堤及广济圩江堤进行了全堤段风险分析。

6.3 全堤段各级水位下安全指标的统计特征

6.3.1 漫顶

针对高洪水位下堤段发生险情的类别，从堤顶高程以下每隔 0.5m 为一级，共计算 9 级水位。将在一定水位下每个堤段的安全指标进行求和可得其统计均值。图 6.2 表明在不同水位下的可靠性指标情况。由图可见，可靠度指标随着水位的增加而线性增加。设计水位（第五级）下整个堤段的平均可靠度指标为 3.29。当水位几乎等于堤顶高程时，计算得到的可靠度指标为 1.97。

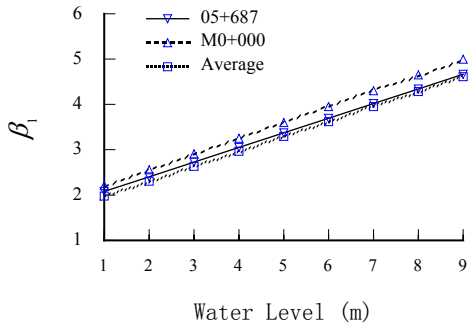


图 6.2 各级水位下全堤段及子堤段 05+687 和 M0+000 的漫顶可靠度指标

图 6.3 给出各级水位下全堤段发生漫顶的失稳概率。由图可见，失稳概率随着水位的增加而快速减小，第五级水位后，概率值已经变得相当小。第一级水位和第五级水位下的失稳概率分别为 0.0247 和 0.000546。显见，通过加高堤防高度是减少堤坝漫顶风险的有效措施。

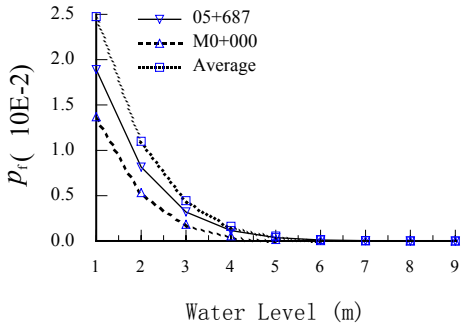


图 6.3 水位下全堤段及子堤段 05+687 和 M0+000 的发生漫顶的概率

6.3.2 边坡整体滑动

图 6.4、图 6.5 和图 6.6 分别给出堤防在各级水位下上游和下游堤坡稳定分析得到的安全系数、可靠度指标和失稳风险度。由图可见，随着水位的逐级降低，使得堤身浸润线降低，进而影响滑动面的位置，堤坡的安全系数和可靠度指标大致呈线性增加，而失

稳的风险度也在逐步降低。且由于下游坡压盖等因素的影响，堤防上游坡的安全性指标比下游坡的明显要小。

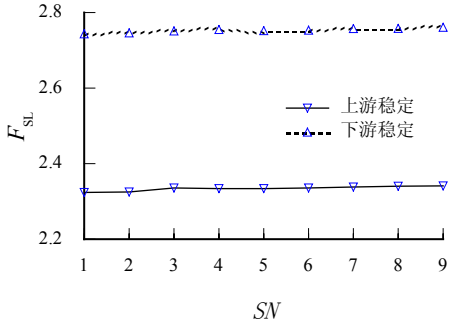


图 6.4 各级水位下的边坡稳定安全系数

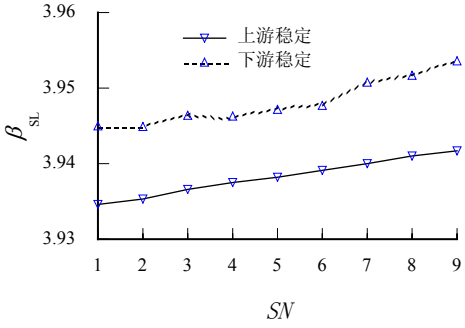


图 6.5 各级水位下的边坡稳定可靠度指标

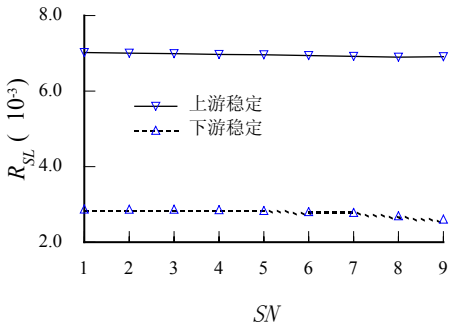


图 6.6 各级水位下的边坡失稳风险度

6.3.3 管涌

图 6.7、图 6.8 和图 6.9 分别给出堤防在各级水位下堤身渗透稳定的安全系数、可靠度指标和失稳风险度。可见，随着水位的逐级降低，堤身的渗透坡降减小，相应的安全系数和可靠度指标增加明显，失稳风险度显著降低，到达一定的低水位后，风险度几乎降为零。

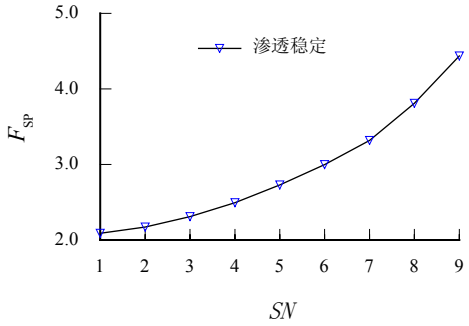


图 6.7 各级水位下的渗透稳定安全系数

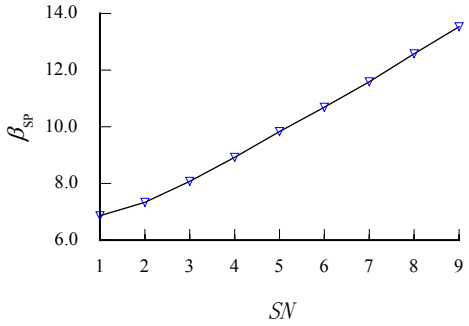


图 6.8 各级水位下的渗透稳定可靠度指标

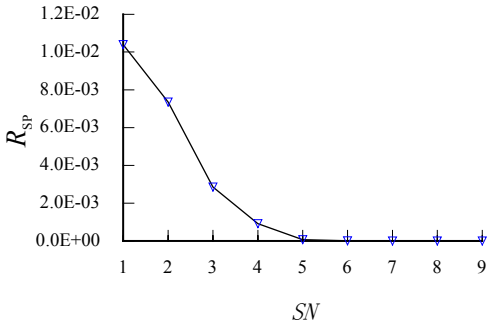


图 6.9 各级水位下的渗透失稳风险度

全堤段风险分析的成果表明：五十余个典型断面的各项评估指标均能达到设计规范的要求，出现险情的风险度较低，尤其是渗透失稳。在设计水位下，上游边坡失稳的风险度为 0.696×10^{-2}；而在第一级水位下，边坡失稳的风险度为 0.702×10^{-2}，水位每降低 0.5m，风险度平均降低 0.02%。在设计水位下，渗透失稳的风险度为 7.13×10^{-5}；而在第一级水位下，渗透失稳的风险度为 1.04×10^{-2}，水位每降低 0.5m，风险度平均降低 76.84%。可见，江堤按一定的标准进行加高培厚或防渗加固后，合理地修订防汛特征水位是可行的。

6.4 不同水位下全堤段安全评估指数的分布情况

图 6.10 给出设计水位沿着各堤防断面的分布情况。

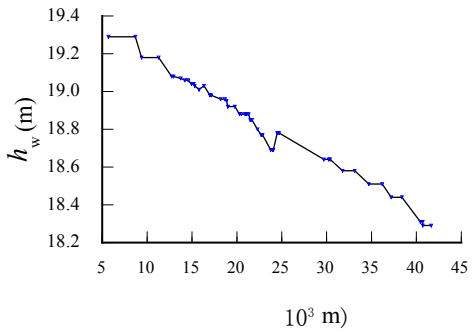


图 6.10 全堤段的设计水位的分布

6.4.1 漫顶

图 6.11 和图 6.12 分别给出全堤段在各级水位下漫顶的可靠度指标和失稳概率。由于风区长度、波长、平均水深和风向的影响，在特定水位下各子堤段的评估指标的差异是相当明显的。下列子堤段的失稳概率比其他堤段的略大，即桩段 34+687 和桩段 36+187 以及桩段 22+287。

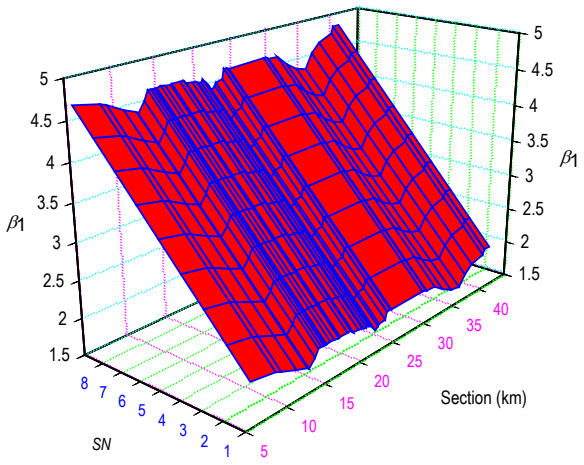


图 6.11 不同水位下的漫顶可靠度指标全堤段的分布情况

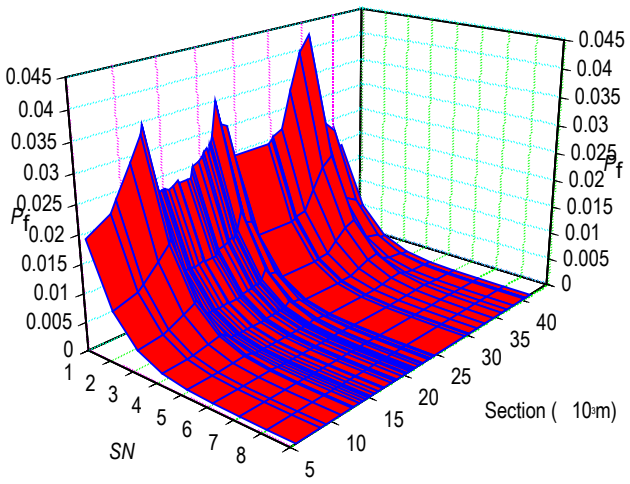


图 6.12 不同水位下漫顶失稳概率沿全堤段的分布情况

6.4.2 边坡整体滑动

设计水位下全堤段上游坡和下游坡整体稳定安全系数的分布如图 6.13 所示。由图可见，各典型断面的安全系数存在较明显的差异，其统计方差为 0.55。上游坡的安全系数低于下游坡的安全系数，但是其分布趋势是相当接近的。在高洪水位期，堤防上游坡的一些防护措施应该加强。

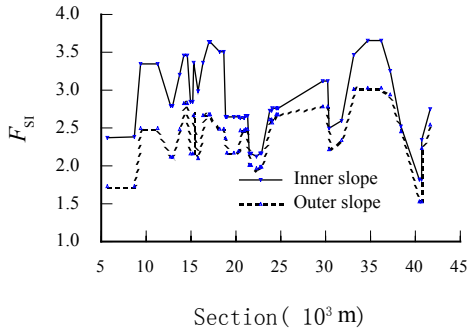


图 6.13 设计水位下的上下游边坡安全系数的分布

设计水位下堤防上游和下游整体稳定的可靠度指标和失稳概率的分布情况如图 6.14 和图 6.15 所示。由图可见，尽管不同堤段之间存在较大的差异，上游坡和下游坡的结果间的差异相当小。原因在于堤身，尤其是上下游坡的土体的强度参数假定是一致的。通过比较图 6.14 和图 6.13 可见，由于在可靠性理论中考虑了土工参数的变异性，两种方法计算得到的结果是不一致的。可以看出，边坡稳定分析得到的最危险子堤段为 05+687 和 08+687 以及 40+439 和 40+687。

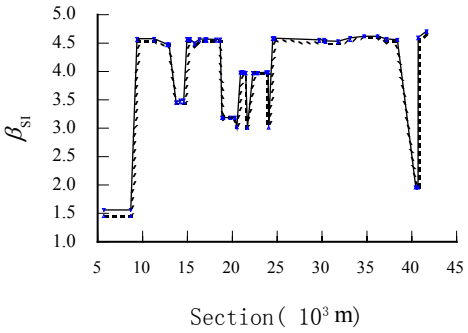


图 6.14 设计水位下上游坡和下游坡边坡整体稳定的可靠度指标的分布

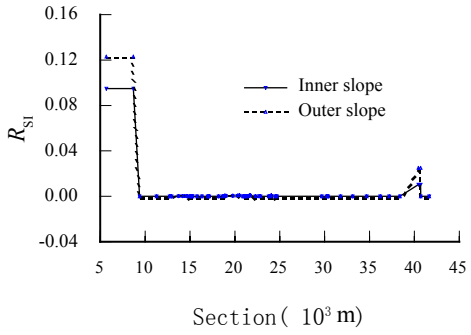


图 6.15 设计水位下堤防上游坡和下游坡边坡整体稳定的风险度的分布

6.4.3 管涌

设计水位下全堤段的管涌安全系数、可靠度指标和风险度分别如图 6.16、图 6.17 和图 6.18 所示。可以看出，一些子堤段的安全指标是相当近似的。通过比较图 6.16 和图 6.17 可以看出，二者的分布趋势是近乎一致的，可能的原因是土体渗透系数的变异性对管涌可靠度指标影响较小所致。最为薄弱的堤段是 40+439 和 40+687，管涌的可靠度指标为 3.16。

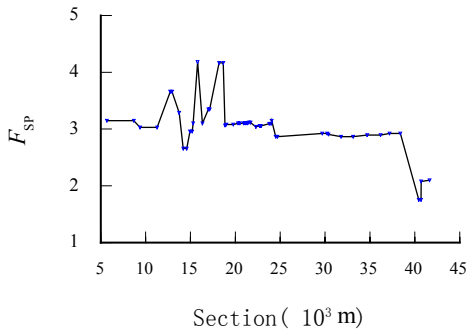


图 6.16 设计水位下堤段管涌安全系数的分布

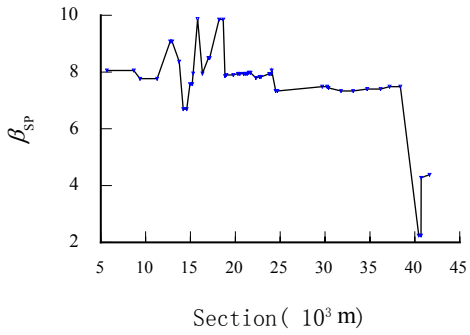


图 6.17 全堤段设计水位下管涌可靠度指标的分布

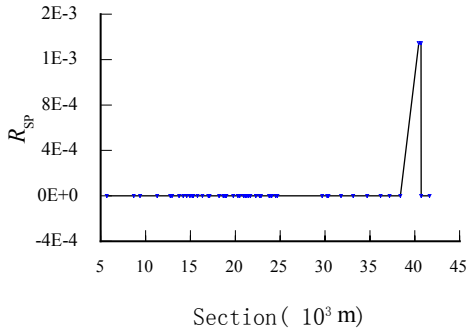


图 6.18 全堤段设计水位下管涌风险度的分布

表 6.2 列出了设计水位下全堤段各种失稳模式安全指标的分布情况。

表 6.2 设计水位下全堤段各种失稳模式安全指标的分布

	上游坡边坡稳定			下游坡边坡稳定			管涌			漫顶	
Section	SF1	RI1	RD1	SF2	RI2	RD2	SF3	RI3	RD3	RI4	RD4
05+687	2.37	1.5615	0.094814	1.730	1.4515	0.12296	3.148611	8.0584	4.22E-26	3.372	3.73E-04
08+687	2.383	1.5615	0.094814	1.730	1.4515	0.12296	3.148611	8.0584	4.22E-26	3.3075	4.71E-04
09+387	3.345	4.5777	9.64E-07	2.497	4.5469	2.6782E-06	3.029444	7.7651	2.21E-24	3.273	5.32E-04
11+287	3.345	4.5777	9.64E-07	2.497	4.5469	2.6782E-06	3.029444	7.7651	2.21E-24	3.1709	7.60E-04
12+737	2.792	4.4775	1.55E-06	2.120	4.4592	0.000004046	3.660778	9.0778	1.46E-32	3.1072	9.45E-04
12+942	2.792	4.4775	1.55E-06	2.120	4.4592	0.000004046	3.660778	9.0778	1.46E-32	3.0828	1.03E-03
13+737	3.205	3.4603	0.000111	2.482	3.4455	0.00028097	3.287222	8.3664	5.66E-28	3.1987	6.90E-04
14+187	3.457	3.4927	9.82E-05	2.827	3.4519	0.00027437	2.655333	6.6944	1.23E-18	3.3075	4.71E-04
14+587	3.457	3.4927	9.82E-05	2.827	3.4519	0.00027437	2.655333	6.6944	1.23E-18	3.3075	4.71E-04
14+937	2.847	4.5724	9.89E-07	2.161	4.5506	2.6314E-06	2.955611	7.5744	2.68E-23	3.3049	4.75E-04
15+187	2.847	4.5724	9.89E-07	2.161	4.5506	2.6314E-06	2.955611	7.5744	2.68E-23	3.3046	4.76E-04
15+287	3.362	4.5707	9.96E-07	2.668	4.5439	2.7172E-06	3.102944	7.9484	1.89E-25	3.3048	4.75E-04

	上游坡边坡稳定			下游坡边坡稳定			管涌			漫顶	
Section	SF1	RI1	RD1	SF2	RI2	RD2	SF3	RI3	RD3	RI4	RD4
15+787	2.987	4.4979	1.41E-06	2.101	4.4733	0.000003789	4.1812	9.8624	4.73E-38	3.3159	4.57E-04
16+337	3.362	4.5707	9.96E-07	2.668	4.5439	2.7172E-06	3.1029	7.9484	1.89E-25	3.3048	4.75E-04
16+987	3.636	4.5664	1.02E-06	2.681	4.5382	2.7916E-06	3.3470	8.4911	9.45E-29	3.2929	4.96E-04
17+137	3.636	4.5664	1.02E-06	2.681	4.5382	2.7916E-06	3.3470	8.4911	9.45E-29	3.3047	4.76E-04
18+187	3.505	4.5647	1.03E-06	2.487	4.5368	2.8098E-06	4.1652	9.8478	6.04E-38	3.3028	4.79E-04
18+647	3.505	4.5647	1.03E-06	2.487	4.5368	2.8098E-06	4.1652	9.8478	6.04E-38	3.3028	4.79E-04
18+837	2.648	3.189	0.000293	2.365	3.1809	0.0007235	3.0658	7.8604	6.2E-25	3.2788	5.21E-04
18+987	2.646	3.1891	0.000293	2.172	3.1818	0.00072129	3.0808	7.8971	3.79E-25	3.2659	5.46E-04
19+757	2.646	3.1891	0.000293	2.172	3.1818	0.00072129	3.0808	7.8971	3.79E-25	3.2545	5.68E-04
20+287	2.649	3.1893	0.000293	2.195	3.1818	0.00072133	3.1012	7.9411	2.09E-25	3.2454	5.87E-04
20+487	2.630	3.0217	0.000516	2.466	3.017	0.001258	3.1012	7.9411	2.09E-25	3.2334	6.12E-04
20+904	2.631	3.9832	1.40E-05	2.466	3.977	0.000034405	3.1012	7.9411	2.09E-25	3.2231	6.34E-04
21+087	2.660	3.9835	1.39E-05	2.483	3.9774	0.00003434	3.1012	7.9411	2.09E-25	3.2562	5.65E-04
21+292	2.66	3.9835	1.39E-05	2.483	3.9774	0.00003434	3.1012	7.9411	2.09E-25	3.2129	6.57E-04
21+487	2.161	3.9764	1.44E-05	2.009	3.9639	0.000036354	3.1167	7.9777	1.27E-25	3.2117	6.60E-04
21+682	2.161	3.0165	0.000525	2.009	3.007	0.0013001	3.1167	7.9777	1.27E-25	3.1911	7.09E-04
22+287	2.124	3.9752	1.44E-05	1.967	3.9633	0.000036445	3.0413	7.7944	1.5E-24	3.0953	9.83E-04
22+687	2.164	3.976	1.44E-05	1.986	3.9643	0.000036293	3.0559	7.8311	9.19E-25	3.139	8.48E-04
22+857	2.164	3.976	1.44E-05	1.986	3.9643	0.000036293	3.0559	7.8311	9.19E-25	3.1679	7.68E-04
23+757	2.731	3.9867	1.38E-05	2.614	3.9819	0.000033699	3.0961	7.9337	2.31E-25	3.1869	7.19E-04
23+987	2.731	3.9867	1.38E-05	2.614	3.9819	0.000033699	3.0961	7.9337	2.31E-25	3.2997	4.84E-04
24+037	2.763	3.0779	0.000428	2.572	3.0094	0.0012901	3.1486	8.0584	4.22E-26	3.2997	4.84E-04
24+487	2.759	4.5871	9.21E-07	2.681	4.5653	2.4536E-06	2.8653	7.3324	5.84E-22	3.3007	4.82E-04
24+687	2.759	4.5871	9.21E-07	2.681	4.5653	2.4536E-06	2.8653	7.3324	5.84E-22	3.2889	5.03E-04
29+687	3.119	4.5579	1.06E-06	2.784	4.5338	2.8499E-06	2.9211	7.4864	8.31E-23	3.2991	4.85E-04
30+237	3.119	4.5579	1.06E-06	2.784	4.5338	2.8499E-06	2.9211	7.4864	8.31E-23	3.2872	5.06E-04
30+387	2.495	4.5372	1.17E-06	2.217	4.5155	0.000003108	2.9044	7.4424	1.46E-22	3.2765	5.26E-04
31+787	2.595	4.5323	1.20E-06	2.340	4.5113	3.1699E-06	2.8654	7.3324	5.84E-22	3.2648	5.48E-04
33+137	3.464	4.5917	9.01E-07	3.013	4.551	2.6265E-06	2.8654	7.3324	5.84E-22	3.1492	8.19E-04
34+687	3.653	4.6191	7.90E-07	3.032	4.6167	0.000001918	2.8928	7.4057	2.32E-22	3.0525	1.14E-03
36+187	3.653	4.6191	7.90E-07	3.032	4.6167	0.000001918	2.8928	7.4057	2.32E-22	3.0138	1.29E-03
37+187	3.255	4.5752	9.75E-07	2.943	4.5565	2.5587E-06	2.9211	7.4864	8.31E-23	3.1861	7.21E-04
38+387	2.523	4.5569	1.06E-06	2.454	4.549	2.6512E-06	2.9211	7.4864	8.31E-23	3.2976	4.88E-04
40+439	1.818	1.9596	0.010274	1.528	1.9543	0.024963	1.7559	2.24	0.001344	3.3647	3.83E-04
40+687	1.818	1.9596	0.010274	1.528	1.9543	0.024963	1.7559	2.24	0.001344	3.4466	2.84E-04
40+709	2.344	4.5974	8.77E-07	2.235	4.5802	2.2852E-06	2.0776	4.2743	1.04E-08	3.4478	2.83E-04
41+644	2.750	4.7094	5.09E-07	2.544	4.695	1.3119E-06	2.0980	4.3843	4.55E-09	3.4464	2.84E-04
M0+000	1.991	3.5714	7.29E-05	2.09	3.1534	0.00079521	2.3046	5.3743	1.07E-12	3.6019	1.58E-04
M0+948	2.005	2.8493	0.0009	1.238	2.8255	0.0023261	3.3166	8.4251	2.45E-28	3.6019	1.58E-04
M1+748	1.703	1.8028	0.014662	1.476	1.793	0.035961	3.0665	7.8604	6.2E-25	3.6019	1.58E-04
M2+448	1.919	2.9498	0.000653	1.691	2.9334	0.0016521	2.5237	6.2397	1.89E-16	3.6019	1.58E-04
M3+548	3.186	3.1043	0.000392	1.700	3.2084	0.00065771	4.4293	10.177	2.2E-40	3.6019	1.58E-04
M5+248	1.583	4.3461	2.84E-06	1.692	3.8888	0.000049663	3.1625	8.0877	2.82E-26	3.6019	1.58E-04

SF：安全系数；RI：可靠度指标；RD：风险度(洪灾概率)。

根据设计水位下全堤段各评估指数的分布情况可得到最危险的子堤段。对于漫顶失稳，最危险的子堤段 34+687，36+187 和 22+287。对于管涌失稳，最薄弱的堤段是 40+439 和 40+687，其相应的可靠度指标为 2.24。对于边坡滑动失稳，最薄弱的子堤段是 05+687 和 08+687 以及 40+439 和 40+687。可见，滑动失稳模式对于该堤段的整个失稳概率具有重要影响。

6.5 失稳概率的组合

各子堤段的多种失稳机制，如漫顶、管涌、整体失稳和水工结构物（将在后续的研究中给出）的失稳概率可以得到。如果这些失稳模式的至少一种发生，则认为堤防的主要功能丧失，基于前述的全堤段结构风险评估模型，每一堤段的总失稳概率可采用串联系统得到：

$$\mathrm{P}\{\text{section fails}\} = \mathrm{P}\left\{Z_1 < 0 \text{ or } Z_2 < 0 \text{ or } Z_3 < 0 \text{ or } Z_4 < 0\right\} \qquad (10\text{-}1)$$

这里 Z_1<0 表示上游坡边坡滑动失稳； Z_2<0 表示下游坡边坡滑动失稳； Z_3<0 表示堤段发生管涌失稳； Z_4<0 表示堤段发生漫顶失稳。

由此，基本下边界和上边界可以由下式给出：

$$\max_P\{Z_i < 0\} \le P\{\text{section_fails}\} \le \sum_{i=1}^{4} P\{Z_i < 0\} \qquad (10\text{-}2)$$

这里给出堤段 05+687 的组合失稳概率的计算结果，如表 6.3 所列。

类似的可以得到其他堤段的组合失稳概率，如表 6.4 所列。

表 6.3 子堤段 05+687 的组合失稳概率

序号	水位	重现期 (years)	组合失稳概率				组合失稳概率	
			下游边坡失稳	上游边坡失稳	管涌	漫顶	下边界	上边界
1	21.19	914	0.0596	0.0414	7.939E-14	1.89E-02	0.0596	0.1199
2	20.79	305	0.0595	0.0413	4.548E-15	8.16E-03	0.0595	0.1090
3	20.29	166	0.0594	0.0412	1.376E-17	3.21E-03	0.0594	0.1038
4	19.79	114	0.0593	0.0412	3.57E-21	1.15E-03	0.0593	0.1016
5	19.29	87	0.0592	0.1230	5.486E-26	3.73E-04	0.1230	0.1826
6	18.79	70	0.0591	0.1175	6.089E-31	1.10E-04	0.1175	0.1767
7	18.29	28	0.0589	0.0409	5.463E-36	2.92E-05	0.0589	0.0999
8	17.79	13	0.0588	0.0832	4.216E-41	7.04E-06	0.0832	0.1419
9	17.29	10	0.0589	0.0829	1.388E-47	1.54E-06	0.0829	0.1418

表 6.4 各堤段的组合失稳概率

	RT	914	305	166	114	87	70	28	13	10
级数	WL	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Upper	5.96E-02	5.95E-02	5.94E-02	5.93E-02	7.50E-02	1.18E-01	5.89E-02	8.32E-02	5.89E-02
05+687	Lower	1.20E-01	1.09E-01	1.04E-01	1.02E-01	1.35E-01	1.77E-01	9.99E-02	1.42E-01	5.89E-02
	MinSF	1.712	1.714	1.728	1.730	1.730	1.728	1.728	1.732	1.736
	Upper	5.96E-02	5.95E-02	5.94E-02	5.93E-02	7.50E-02	1.18E-01	5.89E-02	8.32E-02	5.89E-02
08+687	Lower	1.23E-01	1.10E-01	1.04E-01	1.02E-01	1.35E-01	1.77E-01	9.73E-02	1.42E-01	5.89E-02
	MinSF	1.712	1.714	1.728	1.730	1.730	1.728	1.728	1.732	1.736
	Upper	2.36E-02	1.05E-02	4.28E-03	1.58E-03	5.32E-04	1.62E-04	4.49E-05	1.12E-05	2.54E-06
09+387	Lower	2.36E-02	1.05E-02	4.28E-03	1.58E-03	5.36E-04	1.66E-04	4.85E-05	1.48E-05	3.48E-06
	MinSF	2.481	2.483	2.510	2.504	2.498	2.496	2.495	2.498	2.500
	Upper	2.89E-02	1.33E-02	5.63E-03	2.17E-03	7.60E-04	2.42E-04	7.03E-05	1.85E-05	4.41E-06
11+287	Lower	2.89E-02	1.33E-02	5.63E-03	2.17E-03	7.64E-04	2.46E-04	7.39E-05	2.21E-05	5.35E-06
	MinSF	2.481	2.483	2.510	2.504	2.498	2.496	2.495	2.498	2.500
	Upper	3.31E-02	1.56E-02	6.71E-03	2.64E-03	9.45E-04	3.08E-04	9.14E-05	2.46E-05	6.02E-06
12+737	Lower	3.31E-02	1.56E-02	6.72E-03	2.65E-03	9.50E-04	3.14E-04	9.70E-05	3.02E-05	7.56E-06
	MinSF	2.115	2.115	2.141	2.126	2.121	2.118	2.115	2.115	2.115
	Upper	3.46E-02	1.64E-02	7.14E-03	2.83E-03	1.03E-03	3.38E-04	1.01E-04	2.76E-05	6.85E-06
12+942	Lower	3.46E-02	1.64E-02	7.15E-03	2.84E-03	1.03E-03	3.44E-04	1.07E-04	3.32E-05	8.39E-06
	MinSF	2.115	2.115	2.141	2.126	2.121	2.118	2.115	2.115	2.115
	Upper	2.78E-02	1.27E-02	5.29E-03	2.00E-03	6.90E-04	2.81E-04	2.80E-04	2.79E-04	1.10E-04
13+737	Lower	2.82E-02	1.31E-02	5.68E-03	2.39E-03	1.08E-03	6.08E-04	4.52E-04	4.05E-04	1.14E-04
	MinSF	2.464	2.466	2.478	2.480	2.482	2.482	2.482	2.485	2.488
	Upper	2.24E-02	9.85E-03	3.94E-03	1.43E-03	4.71E-04	2.74E-04	2.72E-04	2.75E-04	9.71E-05
14+187	Lower	2.28E-02	1.02E-02	4.31E-03	1.80E-03	8.43E-04	5.12E-04	4.08E-04	3.81E-04	9.91E-05
	MinSF	2.806	2.808	2.825	2.825	2.827	2.826	2.824	2.925	2.962
	Upper	2.24E-02	9.85E-03	3.94E-03	1.43E-03	4.71E-04	2.74E-04	2.72E-04	2.75E-04	9.71E-05
14+587	Lower	2.28E-02	1.02E-02	4.31E-03	1.80E-03	8.43E-04	5.12E-04	4.08E-04	3.81E-04	9.91E-05
	MinSF	2.806	2.808	2.825	2.825	2.827	2.826	2.824	2.925	2.962

	RT	914	305	166	114	87	70	28	13	10
级数	WL	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Upper	2.26E-02	9.93E-03	3.97E-03	1.44E-03	4.75E-04	1.42E-04	3.82E-05	9.29E-06	2.05E-06
14+937	Lower	2.26E-02	9.93E-03	3.97E-03	1.44E-03	4.79E-04	1.46E-04	4.18E-05	1.29E-05	3.02E-06
	MinSF	2.141	2.149	2.173	2.166	2.161	2.162	2.162	2.164	2.167
	Upper	2.26E-02	9.94E-03	3.98E-03	1.44E-03	4.76E-04	1.42E-04	3.82E-05	9.30E-06	2.05E-06
15+187	Lower	2.26E-02	9.94E-03	3.98E-03	1.44E-03	4.79E-04	1.46E-04	4.18E-05	1.29E-05	3.02E-06
	MinSF	2.141	2.149	2.173	2.166	2.161	2.162	2.162	2.164	2.167
	Upper	2.26E-02	9.95E-03	3.98E-03	1.45E-03	4.75E-04	1.42E-04	3.82E-05	9.27E-06	2.04E-06
15+287	Lower	2.26E-02	9.95E-03	3.98E-03	1.45E-03	4.79E-04	1.46E-04	4.19E-05	1.29E-05	3.02E-06
	MinSF	2.651	2.653	2.686	2.674	2.669	2.667	2.665	2.667	2.530
	Upper	2.22E-02	9.71E-03	3.87E-03	1.40E-03	4.57E-04	1.35E-04	3.62E-05	8.74E-06	1.91E-06
15+787	Lower	2.22E-02	9.72E-03	3.88E-03	1.41E-03	4.62E-04	1.40E-04	4.14E-05	1.39E-05	3.32E-06
	MinSF	2.091	2.091	2.104	2.104	2.101	2.095	2.091	2.091	2.092
	Upper	2.26E-02	9.95E-03	3.98E-03	1.45E-03	4.75E-04	1.42E-04	3.82E-05	9.27E-06	2.04E-06
16+337	Lower	2.26E-02	9.95E-03	3.98E-03	1.45E-03	4.79E-04	1.46E-04	4.19E-05	1.29E-05	3.02E-06
	MinSF	2.651	2.653	2.686	2.674	2.669	2.667	2.665	2.667	2.530
	Upper	2.33E-02	1.03E-02	4.13E-03	1.50E-03	4.96E-04	1.48E-04	4.00E-05	9.72E-06	2.14E-06
16+987	Lower	2.33E-02	1.03E-02	4.13E-03	1.50E-03	5.00E-04	1.52E-04	4.38E-05	1.35E-05	3.14E-06
	MinSF	2.663	2.665	2.686	2.688	2.681	2.679	2.678	2.569	0.754
	Upper	2.28E-02	1.00E-02	4.00E-03	1.45E-03	4.76E-04	1.41E-04	3.79E-05	9.17E-06	2.01E-06
17+137	Lower	2.28E-02	1.00E-02	4.00E-03	1.45E-03	4.79E-04	1.45E-04	4.17E-05	1.29E-05	3.01E-06
	MinSF	2.663	2.665	2.686	2.688	2.681	2.679	2.678	2.569	0.754
	Upper	2.29E-02	1.01E-02	4.03E-03	1.46E-03	4.79E-04	1.42E-04	3.81E-05	9.22E-06	2.02E-06
18+187	Lower	2.29E-02	1.01E-02	4.03E-03	1.46E-03	4.82E-04	1.46E-04	4.19E-05	1.30E-05	3.03E-06
	MinSF	2.470	2.472	2.508	2.493	2.488	2.487	2.485	2.488	2.491
	Upper	2.29E-02	1.01E-02	4.03E-03	1.46E-03	4.79E-04	1.42E-04	3.81E-05	9.22E-06	2.02E-06
18+647	Lower	2.29E-02	1.01E-02	4.03E-03	1.46E-03	4.82E-04	1.46E-04	4.19E-05	1.30E-05	3.03E-06
	MinSF	2.470	2.472	2.508	2.493	2.488	2.487	2.485	2.488	2.491
	Upper	2.41E-02	1.07E-02	4.31E-03	1.57E-03	7.24E-04	7.21E-04	7.19E-04	7.17E-04	2.90E-04
18+837	Lower	2.51E-02	1.17E-02	5.33E-03	2.59E-03	1.54E-03	1.17E-03	1.05E-03	1.02E-03	2.92E-04
	MinSF	2.361	2.363	2.358	2.364	2.365	2.365	2.380	2.384	2.387
	Upper	2.49E-02	1.11E-02	4.47E-03	1.64E-03	7.21E-04	7.19E-04	7.19E-04	7.17E-04	2.90E-04
18+987	Lower	2.59E-02	1.21E-02	5.49E-03	2.66E-03	1.56E-03	1.18E-03	1.05E-03	1.02E-03	2.92E-04
	MinSF	2.162	2.164	2.167	2.170	2.172	2.175	2.177	2.180	2.183
	Upper	2.54E-02	1.14E-02	4.61E-03	1.70E-03	7.21E-04	7.19E-04	7.19E-04	7.17E-04	2.90E-04
19+757	Lower	2.64E-02	1.24E-02	5.63E-03	2.72E-03	1.58E-03	1.18E-03	1.06E-03	1.02E-03	2.93E-04
	MinSF	2.162	2.164	2.167	2.170	2.172	2.175	2.177	2.180	2.183
	Upper	2.61E-02	1.17E-02	4.75E-03	1.75E-03	7.21E-04	7.20E-04	7.18E-04	7.16E-04	2.90E-4
20+287	Lower	2.71E-02	1.27E-02	5.77E-03	2.77E-03	1.60E-03	1.19E-03	1.06E-03	1.02E-03	2.93E-04
	MinSF	2.189	2.192	2.195	2.192	2.195	2.195	2.205	2.208	2.211
	Upper	2.67E-02	1.20E-02	4.90E-03	1.82E-03	1.26E-03	1.26E-03	1.25E-03	1.25E-03	5.12E-04
20+487	Lower	2.85E-02	1.38E-02	6.68E-03	3.60E-03	2.39E-03	1.96E-03	1.82E-03	1.78E-03	5.15E-04
	MinSF	2.471	2.473	2.482	2.463	2.467	2.467	2.487	2.490	2.492
	Upper	2.73E-02	1.23E-02	5.04E-03	1.88E-03	6.34E-04	1.94E-04	5.37E-05	3.41E-05	1.38E-05
20+904	Lower	2.73E-02	1.23E-02	5.09E-03	1.93E-03	6.82E-04	2.42E-04	1.02E-04	6.13E-05	1.68E-05
	MinSF	2.471	2.473	2.482	2.463	2.467	2.467	2.487	2.490	2.492

	RT	914	305	166	114	87	70	28	13	10
级数	WL	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Upper	2.55E-02	1.14E-02	4.61E-03	1.70E-03	5.65E-04	1.70E-04	4.64E-05	3.41E-05	1.38E-05
21+087	Lower	2.55E-02	1.14E-02	4.66E-03	1.75E-03	6.13E-04	2.18E-04	9.44E-05	5.93E-05	1.63E-05
	MinSF	2.455	2.457	2.462	2.466	2.483	2.487	2.470	2.473	2.475
	Upper	2.78E-02	1.26E-02	5.18E-03	1.94E-03	6.57E-04	2.02E-04	5.62E-05	3.41E-05	1.38E-05
21+292	Lower	2.78E-02	1.26E-02	5.23E-03	1.99E-03	7.05E-04	2.50E-04	1.04E-04	6.20E-05	1.70E-05
	MinSF	2.455	2.457	2.462	2.466	2.483	2.487	2.470	2.473	2.475
	Upper	2.80E-02	1.27E-02	5.21E-03	1.95E-03	6.60E-04	2.03E-04	5.63E-05	3.61E-05	1.42E-05
21+487	Lower	2.81E-02	1.28E-02	5.26E-03	2.00E-03	7.11E-04	2.54E-04	1.07E-04	6.44E-05	1.74E-05
	MinSF	2.002	2.003	2.006	2.008	2.010	2.011	2.013	2.015	2.016
	Upper	2.91E-02	1.33E-02	5.50E-03	2.07E-03	1.30E-03	1.30E-03	1.30E-03	1.29E-03	5.21E-04
21+682	Lower	3.09E-02	1.51E-02	7.33E-03	3.90E-03	2.53E-03	2.04E-03	1.88E-03	1.83E-03	5.25E-04
	MinSF	2.002	2.003	2.006	2.008	2.010	2.011	2.013	2.015	2.016
	Upper	3.51E-02	1.65E-02	7.09E-03	2.77E-03	9.83E-04	3.17E-04	9.28E-05	3.61E-05	1.43E-05
22+287	Lower	3.52E-02	1.66E-02	7.14E-03	2.82E-03	1.03E-03	3.68E-04	1.43E-04	7.50E-05	2.02E-05
	MinSF	1.960	1.961	1.964	1.966	1.967	1.975	1.971	1.972	1.974
	Upper	3.25E-02	1.51E-02	6.35E-03	2.44E-03	8.48E-04	2.68E-04	7.66E-05	3.60E-05	1.42E-05
22+687	Lower	3.26E-02	1.52E-02	6.40E-03	2.49E-03	8.98E-04	3.18E-04	1.27E-04	7.01E-05	1.89E-05
	MinSF	1.985	1.987	1.989	1.991	1.987	1.980	1.997	1.998	2.000
	Upper	5.96E-02	5.95E-02	5.94E-02	5.93E-02	7.50E-02	1.18E-01	5.89E-02	8.32E-02	5.89E-02
22+857	Lower	3.09E-02	1.42E-02	5.94E-03	2.28E-03	8.19E-04	2.89E-04	1.18E-04	6.75E-05	1.82E-05
	MinSF	1.985	1.987	1.989	1.991	1.987	1.980	1.997	1.998	2.000
	Upper	3.01E-02	1.37E-02	5.65E-03	2.12E-03	7.19E-04	2.21E-04	6.15E-05	3.39E-05	1.36E-05
23+757	Lower	3.01E-02	1.37E-02	5.70E-03	2.17E-03	7.67E-04	2.69E-04	1.09E-04	6.29E-05	1.71E-05
	MinSF	2.609	2.598	2.610	2.615	2.614	2.618	2.625	2.628	2.631
	Upper	2.41E-02	1.05E-02	4.17E-03	1.50E-03	4.84E-04	1.41E-04	3.73E-05	3.39E-05	1.36E-05
23+987	Lower	2.41E-02	1.05E-02	4.22E-03	1.55E-03	5.32E-04	1.89E-04	8.50E-05	5.63E-05	1.55E-05
	MinSF	2.609	2.598	2.610	2.615	2.614	2.618	2.625	2.628	2.631
	Upper	2.41E-02	1.05E-02	4.17E-03	1.50E-03	1.29E-03	1.29E-03	1.23E-03	1.22E-03	4.25E-04
24+037	Lower	2.58E-02	1.22E-02	5.89E-03	3.22E-03	2.20E-03	1.86E-03	1.69E-03	1.66E-03	4.27E-04
	MinSF	2.594	2.581	2.573	2.573	2.572	2.599	2.629	2.631	2.633
	Upper	2.37E-02	1.04E-02	4.12E-03	1.48E-03	4.82E-04	1.42E-04	3.75E-05	8.95E-06	1.93E-06
24+487	Lower	2.37E-02	1.04E-02	4.12E-03	1.48E-03	4.86E-04	1.45E-04	4.09E-05	1.22E-05	2.84E-06
	MinSF	2.666	2.672	2.675	2.679	2.682	2.684	2.687	2.690	2.693
	Upper	2.43E-02	1.07E-02	4.26E-03	1.54E-03	5.03E-04	1.49E-04	3.96E-05	9.50E-06	2.06E-06
24+687	Lower	2.43E-02	1.07E-02	4.26E-03	1.54E-03	5.06E-04	1.52E-04	4.30E-05	1.28E-05	2.97E-06
	MinSF	2.666	2.672	2.675	2.679	2.682	2.684	2.687	2.690	2.693
	Upper	2.43E-02	1.06E-02	4.20E-03	1.50E-03	4.85E-04	1.41E-04	3.71E-05	8.74E-06	1.86E-06
29+687	Lower	2.43E-02	1.06E-02	4.20E-03	1.50E-03	4.89E-04	1.45E-04	4.07E-05	1.24E-05	2.90E-06
	MinSF	2.774	2.778	2.780	2.776	2.784	2.784	2.791	2.794	2.797
	Upper	2.49E-02	1.09E-02	4.34E-03	1.56E-03	5.06E-04	1.48E-04	3.91E-05	9.27E-06	1.98E-06
30+237	Lower	2.49E-02	1.09E-02	4.34E-03	1.56E-03	5.10E-04	1.52E-04	4.27E-05	1.29E-05	3.02E-06
	MinSF	2.774	2.778	2.780	2.776	2.784	2.784	2.791	2.794	2.797
	Upper	2.54E-02	1.12E-02	4.47E-03	1.61E-03	5.26E-04	1.55E-04	4.10E-05	9.77E-06	2.10E-06
30+387	Lower	2.54E-02	1.12E-02	4.47E-03	1.61E-03	5.30E-04	1.59E-04	4.52E-05	1.40E-05	3.24E-06
	MinSF	2.244	2.246	2.248	2.249	2.218	2.265	2.256	2.258	2.260

	RT	914	305	166	114	87	70	28	13	10
级数	WL	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Upper	2.63E-02	1.16E-02	4.64E-03	1.68E-03	5.48E-04	1.61E-04	4.28E-05	1.02E-05	2.20E-06
31+787	Lower	2.63E-02	1.16E-02	4.64E-03	1.68E-03	5.52E-04	1.65E-04	4.71E-05	1.45E-05	3.37E-06
	MinSF	2.327	2.320	2.336	2.315	2.340	2.326	2.345	2.348	2.351
	Upper	3.29E-02	1.51E-02	6.30E-03	2.39E-03	8.19E-04	2.54E-04	7.13E-05	1.80E-05	4.13E-06
33+137	Lower	3.29E-02	1.51E-02	6.30E-03	2.39E-03	8.22E-04	2.57E-04	7.48E-05	2.12E-05	5.01E-06
	MinSF	3.002	3.005	3.008	3.011	3.014	3.023	3.020	3.024	3.028
	Upper	3.96E-02	1.88E-02	8.12E-03	3.19E-03	1.14E-03	3.67E-04	1.07E-04	2.83E-05	6.79E-06
34+687	Lower	3.96E-02	1.88E-02	8.12E-03	3.19E-03	1.14E-03	3.70E-04	1.10E-04	3.09E-05	7.56E-06
	MinSF	3.021	3.024	3.027	3.030	3.033	3.036	3.040	3.044	3.049
	Upper	4.25E-02	2.04E-02	8.94E-03	3.56E-03	1.29E-03	4.24E-04	1.27E-04	3.42E-05	8.35E-06
36+187	Lower	4.25E-02	2.04E-02	8.94E-03	3.56E-03	1.29E-03	4.27E-04	1.30E-04	3.68E-05	9.12E-06
	MinSF	3.021	3.024	3.027	3.030	3.033	3.036	3.040	3.044	3.049
	Upper	3.13E-02	1.42E-02	5.80E-03	2.15E-03	7.21E-04	2.18E-04	5.95E-05	1.46E-05	3.23E-06
37+187	Lower	3.13E-02	1.42E-02	5.80E-03	2.15E-03	7.25E-04	2.22E-04	6.30E-05	1.81E-05	4.19E-06
	MinSF	2.931	2.933	2.936	2.940	2.943	2.946	2.948	2.952	2.955
	Upper	2.52E-02	1.10E-02	4.31E-03	1.53E-03	4.88E-04	1.40E-04	3.63E-05	8.40E-06	1.75E-06
38+387	Lower	2.52E-02	1.10E-02	4.31E-03	1.53E-03	4.91E-04	1.44E-04	4.00E-05	1.20E-05	2.80E-06
	MinSF	2.446	2.447	2.450	2.453	2.455	2.457	2.459	2.464	2.463
	Upper	2.51E-02	2.51E-02	2.50E-02	2.50E-02	2.50E-02	2.49E-02	2.49E-02	2.48E-02	1.01E-02
40+439	Lower	5.80E-02	4.50E-02	3.90E-02	3.66E-02	3.56E-02	3.53E-02	3.51E-02	3.50E-02	1.01E-02
	MinSF	1.524	1.525	1.526	1.528	1.529	1.527	1.529	1.531	1.532
	Upper	2.51E-02	2.51E-02	2.50E-02	2.50E-02	2.50E-02	2.49E-02	2.49E-02	2.48E-02	1.01E-02
40+687	Lower	5.44E-02	4.33E-02	3.83E-02	3.63E-02	3.55E-02	3.52E-02	3.51E-02	3.50E-02	1.01E-02
	MinSF	1.524	1.525	1.526	1.528	1.529	1.527	1.529	1.531	1.532
	Upper	1.90E-02	7.79E-03	2.87E-03	9.52E-04	2.83E-04	7.51E-05	1.78E-05	3.78E-06	8.36E-07
40+709	Lower	1.90E-02	7.79E-03	2.87E-03	9.55E-04	2.86E-04	7.82E-05	2.09E-05	6.87E-06	1.55E-06
	MinSF	2.228	2.229	2.231	2.233	2.235	2.237	2.239	2.241	2.243
	Upper	1.91E-02	7.84E-03	2.89E-03	9.58E-04	2.84E-04	7.54E-05	1.78E-05	3.78E-06	7.16E-07
41+644	Lower	1.91E-02	7.84E-03	2.89E-03	9.60E-04	2.86E-04	7.72E-05	1.96E-05	5.55E-06	1.20E-06
	MinSF	2.538	2.539	2.541	2.543	2.544	2.546	2.548	2.550	2.552
	Upper	1.37E-02	5.32E-03	1.84E-03	7.98E-04	7.95E-04	7.91E-04	7.89E-04	7.87E-04	6.92E-05
M0+000	Lower	1.46E-02	6.20E-03	2.71E-03	1.44E-03	1.03E-03	9.03E-04	8.70E-04	8.59E-04	6.95E-05
	MinSF	1.986	1.986	1.988	1.989	1.991	1.993	1.994	1.996	1.998
	Upper	1.37E-02	5.32E-03	2.34E-03	2.33E-03	2.33E-03	2.32E-03	2.31E-03	2.30E-03	8.81E-04
M0+948	Lower	1.70E-02	8.57E-03	5.08E-03	3.80E-03	3.38E-03	3.26E-03	3.21E-03	3.19E-03	8.82E-04
	MinSF	1.236	1.237	1.237	1.238	1.238	1.239	1.239	1.240	1.240
	Upper	3.62E-02	3.61E-02	3.61E-02	3.60E-02	3.60E-02	3.59E-02	3.59E-02	3.58E-02	1.45E-02
M1+748	Lower	6.46E-02	5.62E-02	5.26E-02	5.11E-02	5.08E-02	5.06E-02	5.05E-02	5.04E-02	1.45E-02
	MinSF	1.463	1.464	1.466	1.460	1.477	1.472	1.442	1.442	1.474
	Upper	1.37E-02	5.32E-03	1.84E-03	1.66E-03	1.65E-03	1.65E-03	1.64E-03	1.63E-03	6.35E-04
M2+448	Lower	1.60E-02	7.64E-03	4.16E-03	2.89E-03	2.46E-03	2.33E-03	2.29E-03	2.28E-03	6.35E-04
	MinSF	1.686	1.687	1.688	1.690	1.691	1.693	1.694	1.696	1.697
	Upper	1.37E-02	5.32E-03	1.84E-03	6.59E-04	6.58E-04	6.56E-04	6.54E-04	6.55E-04	3.88E-04
M3+548	Lower	1.48E-02	6.38E-03	2.89E-03	1.62E-03	1.21E-03	1.09E-03	1.05E-03	1.04E-03	3.88E-04
	MinSF	1.697	1.697	1.699	1.700	1.701	1.703	1.704	1.702	1.707

	RT	914	305	166	114	87	70	28	13	10
级数	WL	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Upper	1.37E-02	5.32E-03	1.84E-03	5.72E-04	1.58E-04	4.95E-05	6.30E-03	4.88E-05	2.79E-06
M5+248	Lower	1.38E-02	5.37E-03	1.89E-03	6.25E-04	2.11E-04	9.13E-05	6.34E-03	5.33E-05	3.08E-06
	MinSF	1.582	1.582	1.581	1.582	1.583	1.583	3.539	1.590	1.615

假定整个堤段由 55 个单独子堤段组成的串联系统组成。堤段的总失稳概率可由下式计算得到：

$$\mathrm{P}\{\text{dike fails}\}=\mathrm{P}\left\{Z_1<0 \text{ or } Z_2<0 \text{ or } Z_3<0\cdots \text{or } Z_{55}<0\right\} \tag{10-3}$$

这里 $Z_1<0,...and\ _Z_{55}<0$ 表明堤段 1 到 55 破坏。

上下边界可由下式得到：

$$\max_P\{Z_i<0\}\le P\{\text{dike_fails}\}\le\sum_{i=1}^{55}P\{Z_i<0\} \tag{10-4}$$

根据方程(10-3)可得不同设计重现期的总失稳概率，如表 6.5 所列，也可参见图 6.19。由图可见，在较低的洪水位下，全堤段的总体失稳概率变化不大，当洪水位大于设计洪水时，其失稳概率明显增加。

表 6.5 全堤段的总失稳概率

序号	水位	重现期 (years)	总失稳概率	
			下限	上限
1	21.19	914	1.7042	1.4716
2	20.79	305	0.9474	0.7702
3	20.29	166	0.5862	0.4347
4	19.79	114	0.4306	0.2924
5	19.29	87	0.4382	0.2718
6	18.79	70	0.5017	0.3405
7	18.29	28	0.3450	0.2246
8	17.79	13	0.4232	0.2654
9	17.29	10	0.1578	0.1577

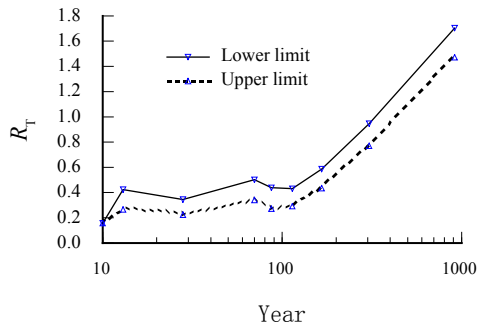


图 6.19 不同洪水重现期下上限和下限

根据这一思想，设计洪水为下全堤段各种失稳模式的最大和最小安全系数的分布如图 6.20 所示。可见，漫顶失稳是主要的失稳形式。假如不考虑漫顶失稳，图中也给出了考虑其他失稳形式的安全系数的分布，这与其他最大和最小安全系数分布曲线的趋势明显不同。

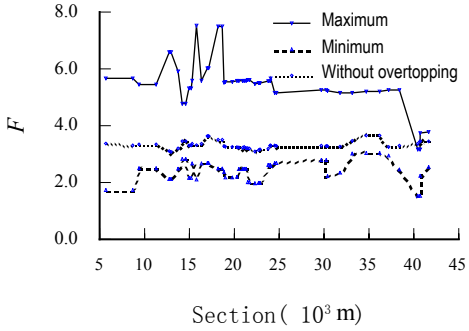


图 6.20 全堤段的安全系数的上限和下限分布

图 6.21 表明设计水位下洪灾概率的上限和下限。一些堤段的上限和下限是非常接近的，这表明一种失稳模式对总失稳概率起主要作用。

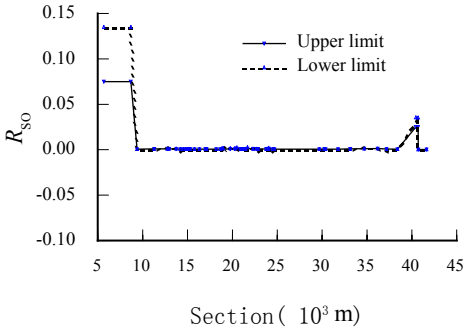


图 6.21 全堤段的洪灾概率的上限和下限分布

6.6 全堤段安全评估成果的分析与评价

6.6.1 安全等级的分类

可见，对一些堤段在特定洪水位下可得到多种安全评价指标，即多种计算模式（上游边坡稳定、下游边坡稳定、堤段渗透稳定、漫顶稳定）及其相应的安全性指标（安全

系数、可靠度指标、风险度）。由此可以根据适当的技术标准将堤段进行安全等级分类。表 6.6 列出了每种失稳模式的不同等级的技术标准。这些值可结合当地的一些评估原则进行适当调整。

表 6.6 安全评估的技术标准

分类	定义	边坡滑动			管涌			漫顶	
		SF	RI	PI	SF	RI	PI	RI	PI
A	安全	>1.5	>3.8	<1.0E-5	>3.0	>3.8	<1.0E-5	>3.8	<1.0E-5
B	基本安全	1.3~1.5	3.0~3.8	1.0E-5 ~1.0E-3	2.0~3.0	3.0~3.8	1.0E-5 ~1.0E-3	3.0~3.8	1.0E-5 ~1.0E-3
C	不安全	<1.3	<3.0	>1.0E-3	<2.0	<3.0	>1.0E-3	<3.0	>1.0E-3

备注：SF---安全系数；RI---可靠度指标；PI---洪灾概率

参照水库大坝安全评价导则[52]，综合考虑各专项安全指标进行堤防安全评价，安全等级划分采用如下标准和规则。安全性指标均达到 A 级的，安全等级为 A 级；安全性指标达到 A 级和 B 级的，安全等级为 B 级；安全性指标中有一项（含一项）以上是 C 级的，安全等级为 C 级。各项安全性指标中有一至二项是 B 级，其余的均达到 A 级，且堤防的工程质量及运行管理优良的，可考虑将其定义为 A 级堤防。用户可根据工程实际确定等级划分标准。

6.6.2 加固预案的设定

水灾一旦发生，无疑使建筑物——人类活动的场所遭受损坏或破坏。受灾害破坏后长期以来仅凭经验主管地判断修复加固的方法。加固或修复以后常常有三种效果：一是措施得当，满足要求；二是措施过头，造成浪费，并有可能影响建筑物的使用功能或使用时间；三是措施不足，致使受损构件承载能力仍然不足，留下安全隐患。如何科学地诊断灾后结构的受损程度，确定其残余承载力和合理地加以修复加固，目前已成为有关工程技术人员所关心的问题。

当堤防安全等级为 B 级和 C 级时，根据计算结果从预案库中找出相应的加固预案。目前，系统中的预案主要有：

预案一：加强江水位、堤身沉降及河床冲淤变化的观测，堤防上游坡及护岸进行加固。预案二：修建堤脚平台，加强盖重防护。预案三：加强管涌观察或减压井观测，对堤基进行防渗加固。

6.6.3 特征水位与洪灾损失的关系

由前述计算得到的最薄弱堤防断面为溃口断面，根据溃口处的流量过程以及安庆市的地形条件，近似框定洪水淹没范围和淹没水深[64]。结合安庆市现状社会经济发展状况调查资料（2001 年），在对 1954 年和 1998 年安庆市洪水损失统计资料进行分析的基础上，初步运用已有的较为成熟的损失评估模型计算了基于不同洪水位的洪水淹没经济损失[72]。

在确定淹没区的洪水风险时，假定洪水风险区在不同洪水位下的洪灾概率等于超洪水位的概率与溃口处该洪水位下堤防结构失险概率之积。计算得到的不同洪水位下洪灾概率及洪灾损失参见表 6.7。由此计算得到洪灾风险为 95 万元/年。通过初步研究提高特征水位带来的风险与减少防汛投入之间的关系，从而得到最优的防汛特征水位。另据安徽水利信息网报道，安庆市对长江干支流主要控制站防汛特征水位进行了调整，警戒水位在原有基础上普遍调高 60-70cm。

表 6.7 不同洪水位下洪灾概率及洪灾损失计算结果

洪水位（米）	(1)	17.29	18.29	18.79	19.29	20.79	21.19
超洪水位频率	(2)	0.100	0.036	0.014	0.010	0.003	0.001
结构失稳概率	(3)	0.1578	0.3450	0.4382	0.5017	0.9474	0.9832
洪灾概率	(4)=(2)×(3)	0.0158	0.0124	0.0061	0.0044	0.0028	0.001
经济损失(万元)	(5)	3175.7	3969.14	5152.23	6707.11	13420	21949.6

将堤防的结构风险与洪水本身出现的水文风险相结合，并考虑损失在不同洪水位下的差异的方法不失为一种更科学、更符合我国洪灾特点的方法，一方面，当洪水位未达到设计水位时，就存在淹没的风险，而且占有一定比例。

6.7 安全评估软件的开发及功能介绍

根据设计要求和计算理论，依据堤坝安全评价的工作流程，以 Visual Basic 作为开发语言，利用 Win32API 调用辅助编程，开发图形化界面的多指标体系的堤防结构风险评价系统。其功能模块主要有数据库设计与实现、计算模型的选择和方法实现、计算工况与边界条件的处理等。依据现行堤防设计和安全管理规范，系统开发中综合采用了常规定值安全评估模型和基于可靠性理论的风险评估模型。应用实践表明，这是建立堤防工程多指标评价体系的一种新途径。

对于某一典型堤段而言，系统以图形方式显示以下内容：1）在不同水位下由边坡稳

定分析得到的最危险滑裂面位置。2）网格剖分后节点和单元编号情况，并以不同颜色标识堤体不同材料分区。3）由渗流计算得到的某洪水位下的浸润线和等势线情况，当给定该堤段的水位降落曲线后，还可进行非稳定渗流计算。4）可靠性分析的参数输入和结果显示，如图 6.22 所示。5）不同级水位下的安全评价指标（安全系数、可靠度指标和风险度）变化曲线，如图 6.23 所示。

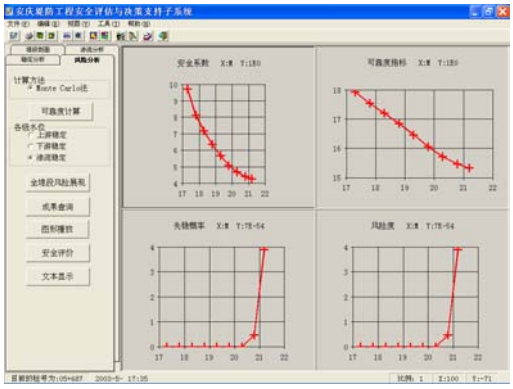


图 6.22 堤段可靠性分析的参数输入和结果显示 图 6.23 堤段各级水位下的安全评价指标变化曲线

对于堤段的安全评价与展现形式，除某一典型堤段的横向展示外，可在 GIS 电子地图上进行全堤段的平面展示。图 6.24 给出江堤多个典型断面的全堤段安全评价情况，可选择按照安全等级或计算数值进行展示与查询。图 6.25 给出全堤段安全评价各项指标的统计饼图。根据安全评价的成果，按照一定的标准和规则将堤防工程的区段划分为不同的安全等级[52]，从已有的预案库中提出相应的加固整治措施或防范对策。

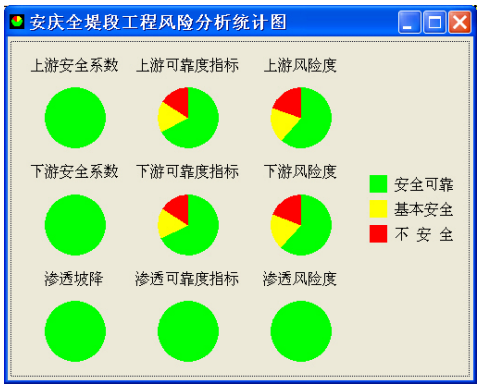


图 6.24 某城市全堤段安全评价情况　　**图 6.25 全堤段安全评价成果统计饼图**

此外，数据报表模块完成原始数据查询报表输出和计算结果数据查询报表输出，各种报表已制成标准格式，如图 6.26 所示，可方便地调用系统的内部函数进行某堤段评估成果的统计分析（如最大值、最小值、平均值、标准差及变异系数等）。图 6.27 表明一些堤段的评估指数属于 B 级的具体堤段桩号。系统可通过修改堤防土工参数和边界条件等输入数据进行不同加固方案的比较分析。

工程风险评估简明报表

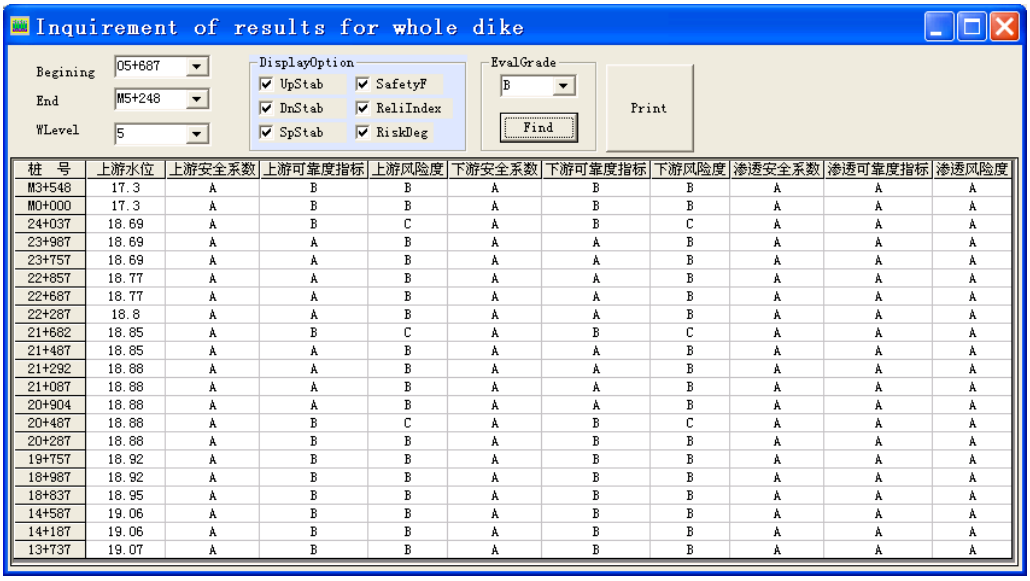
水位级数: 5

上游稳定	安全系数			可靠度指标			风险度		
等级类型	A级	B级	C级	A级	B级	C级	A级	B级	C级
堤段长度/M	41205	0	0	27665	6970	6570	25137	8026	8042
百分比/%	100	0	0	67.14	16.92	15.94	61	19.48	19.52

下游稳定	安全系数			可靠度指标			风险度		
等级类型	A级	B级	C级	A级	B级	C级	A级	B级	C级
堤段长度/M	41205	0	0	27665	6970	6570	25137	8026	8042
百分比/%	100	0	0	67.14	16.92	15.94	61	19.48	19.52

渗流稳定	安全系数			可靠度指标			风险度		
等级类型	A级	B级	C级	A级	B级	C级	A级	B级	C级
堤段长度/M	41205	0	0	41205	0	0	41205	0	0
百分比/%	100	0	0	100	0	0	100	0	0

图 6.26 结构风险评估简明报表



桩号	上游水位	上游安全系数	上游可靠度指标	上游风险度	下游安全系数	下游可靠度指标	下游风险度	渗透安全系数	渗透可靠度指标	渗透风险度
M3+548	17.3	A	B	B	A	B	B	A	A	A
M0+000	17.3	A	B	B	A	B	B	A	A	A
24+037	18.69	A	B	C	A	B	C	A	A	A
23+987	18.69	A	A	B	A	A	B	A	A	A
23+757	18.69	A	A	B	A	A	B	A	A	A
22+857	18.77	A	A	B	A	A	B	A	A	A
22+687	18.77	A	A	B	A	A	B	A	A	A
22+287	18.8	A	A	B	A	A	B	A	A	A
21+682	18.85	A	B	C	A	B	C	A	A	A
21+487	18.85	A	A	B	A	A	B	A	A	A
21+292	18.88	A	A	B	A	A	B	A	A	A
21+087	18.88	A	A	B	A	A	B	A	A	A
20+904	18.88	A	A	B	A	A	B	A	A	A
20+487	18.88	A	B	C	A	B	C	A	A	A
20+287	18.88	A	B	B	A	B	B	A	A	A
19+757	18.92	A	B	B	A	B	B	A	A	A
18+987	18.92	A	B	B	A	B	B	A	A	A
18+837	18.95	A	B	B	A	B	B	A	A	A
14+587	19.06	A	B	B	A	B	B	A	A	A
14+187	19.06	A	B	B	A	B	B	A	A	A
13+737	19.07	A	B	B	A	B	B	A	A	A

图 6.27 安全等级为 B 级的查询结果

第七章 结论与建议

7.1 结论

结构风险评估是近年来发展起来的新兴研究领域和国际前沿课题，课题组紧跟这一较新的研究领域，在对国内外堤坝工程结构风险评估的研究现状和发展趋势作简要陈述和分析的基础上，针对堤防结构发生失稳模式：漫顶、上游边坡滑动、下游边坡滑动、管涌，结合现有堤防设计规范，分别建立了各模式的极限状态方程，提出均质堤防结构失稳的风险模型及全堤段风险评估模型及综合概率的求解方法。针对防汛工作的特殊性及各类信息处理方式、数据种类和应用特点，依据现行堤防设计和安全管理规范，结合实际的区域堤防工程进行了风险评价。课题的研究成果是土工可靠性在实用化上的一次有益尝试和具有较大实用价值的基础性探索。堤防结构风险分析计算原理及其成果的全堤段展现等多项技术都是在行业应用软件中首次使用，有助于将传统经验型的堤防安全评价和管理方法转变为预测型的风险管理体系。主要研究结论如下：

（1）基于建立的结构风险分析模型，以均质堤为算例，上下游坡率 m_1、m_2 均为 3，顶宽 w 为 7m，高度 h_0 为 10m，探讨了堤防几何形状（不同对不同边坡坡率、顶宽和高度）、土工参数（内摩擦角、粘聚力、渗透系数）对失稳概率的影响。计算表明，抗剪强度指标 c、ϕ 的统计参数和分布类型对边坡失稳的可靠性指标 β_s 具有一定的影响，且 μ_ϕ 较 μ_c 敏感，而 δ_ϕ 较 δ_c 敏感；当 c、ϕ 均服从正态分布时，β_s 值最小。同时，土体渗透坡降的统计参数对渗透变形失稳的可靠性指标 β_p 具有显著的影响。堤防几何形状的变化对 β_s 和 β_p 均具有一定的影响。堤防上、下游坡率的变化仅对相应的上、下游边坡的边坡失稳风险具有较大的影响，坡率的增加，延长了渗径，使发生管涌的风险降低。宽度的增加仅对堤防的渗透变形影响较大，对边坡失稳风险影响不大。随着堤防高度的增加，发生边坡失稳和渗透变形失稳的风险均增加。

（2）对一个区域防洪系统而言，某种程度上是一个串联体系，破坏总是从最薄弱

的堤防开始，亦即最危险点对计算结果具有更大的影响。为此，根据安庆防洪堤加固设计资料，进行了高洪水位下多个堤段的安全复核。计算成果表明：五十余个典型断面的各项评价指标均能达到设计规范的要求，出现险情的风险度较低，尤其是渗透失稳。在设计水位下，上游边坡失稳的风险度为 0.696×10^{-2}；而在第一级水位下，边坡失稳的风险度为 0.702×10^{-2}，水位每降低 0.5m，风险度平均降低 0.02%。在设计水位下，渗透失稳的风险度为 7.13×10^{-5}；而在第一级水位下，渗透失稳的风险度为 1.04×10^{-2}，水位每降低 0.5m，风险度平均降低 76.84%。

（3）多级水位下全堤段安全指标的分布情况表明：由特定水位下某一失稳模式的多种评估指标（安全系数、可靠度指标和风险度）沿堤段的分布表明，各堤段发生管涌、漫顶失稳的可能性非常小。临水侧边坡滑动失稳是主要的失稳模式，子堤段 05+687~08+687 以及 40+439~40+687 是最容易发生边坡失稳的堤段，这些堤段可以作为发生溃口点用于后继的洪水演进和经济损失评估。

（4）根据全堤段风险评估模型，整理得到不同设计重现期和总体失稳概率。计算表明，在较低的洪水位下，全堤段的总体失稳概率变化不大，当洪水位大于设计洪水时，其失稳概率明显增加。且堤段的某一种失稳模式对总失稳概率起主导作用。

（5）通过初步研究提高特征水位带来的风险与减少防汛投入之间的关系，从而得到最优的防汛特征水位。进一步研究应将安全和经济的矛盾统一起来，以分析论证适宜的河道堤防设防标准和加固方案。

（6）利用 Win32API 调用辅助编程，基于数据库后台支持，开发了基于常规方法和可靠性理论的多种评估指标的安全评价软件系统，将其应用于长江干堤的安庆堤段的现代化安全管理中。开发了图形化界面的堤防安全评价系统，实现了模型方法—数据库—GIS 的一体化集成，提高了模型可视化程度。将与有限元、可靠性有关的知识隐藏起来，用户的使用空间限于简单的查询与干预，这会促进专业模型的推广与普及，可使设计人员将更多的时间和精力用于方案比选和优化。

7.2 建议

从理论上讲，防洪构筑物保护着人们的家园，但这种保护绝不是 100%安全的，问题在于多大的风险是可以接受的，或者什么样的风险是不可接受的，这是历来需要工程技术人员回答的一个问题，事实上绝对的安全并不存在。在一定程度上，我们保护自身

不受洪水侵害要综合权衡社会经济条件、资金投入及预期收益。允许风险水平的确定是该项技术难以推广的主要原因所在。其一是其计算得到的风险度量值相当小，通常是-4到-6 量级，输入参数略有变化，会导致计算结果的较大波动；其二是评估标准与所在地区的政治、经济和文化的发展紧密关联，制定统一的标准尚有困难。

人们往往认为风险越小越好，事实上减少风险是要付出代价的。无论减少危险发生的概率还是采取防范措施使发生造成的损失降到最小，都要投入资金和技术。通常的做法是将风险限定在一个合理的、可接受的水平上，根据影响风险的因素，经过优化，寻求最佳的投资方案，即堤防的安全要求与溃防的后果成比例。根据当地的实际情况，由政府立法机构与堤防安全管理机构共同研究制定出与本国发展水平相适应的风险控制标准。这除了考虑人员伤亡、构筑物损坏和财产损失外，环境污染和对人健康潜在危险的影响也是一个重要因素。风险可接受准则的表述形式很多，安全系数是传统表示方法，以安全指标、失稳概率或风险率等进行表述较为普遍。

此外，由于已有传统分析方法已应用多年，全新的风险评估技术在堤防失稳概率的计算和溃决引起的生命损失估计尚未被完全接受。综合采用常规定值安全评估模型和基于可靠性理论的风险评估模型当前是建立堤防工程多指标评价体系的一种新途径。本报告的研究是在堤防结构风险领域一次有益的尝试，在堤防土工参数的自相关性、土工随机场理论、对高洪水位或降雨入渗等条件下堤防边坡的失稳、穿堤建筑物的风险评价技术等研究内容需要深入探讨。

随着计算机技术的发展和数据处理手段的提高，基于 GIS 地理图形图像处理、地理空间分析、综合的统计计算、建模分析等功能，防洪堤防结构风险评估模型在数据处理与展示技术方面会得到较好发展。进一步结合一些典型堤段的结构风险评估，在校核和比选已有计算模型和求解理论的基础上，逐步完成多个区域堤防工程的安全复核，进而编制堤段的结构失稳风险图，找到防洪堤防的薄弱点或制约瓶颈，是全面提高堤防设计、管理、投资决策水平的合理途径。

主要参考文献

1. 包承刚, 高大钊, 张庆华. 地基工程可靠度分析方法研究[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社，1997.
2. 国家自然科学基金委员会. 自然科学学科发展战略调研报告 (水利学科)[R]. 北京: 科学出版社，1994.
3. 李青云, 张建民. 长江堤防工程风险分析和安全评价初论[J]. 中国软科学, 2001, (4): 112-115.
4. 陈厚群. 把握机遇、直面挑战---对水利科技发展战略浅见[R]. 水利科技发展战略高层论坛. 2003-08-14.
5. 程晓陶. 探讨人与自然良性互动的治水模式---二论有中国特色的洪水风险管理[J]. 水利发展研究. 2002. (1): 7-10.
6. Robin Fell, David S. Bowles, Loren R. Anderson etc. The status of methods for estimation of the probability of failure of dam for use in quantitative risk assessment[C]. In proceedings of the 20th ICOLD Congress on Lardge Dams, 2000, Beijing, Question 76-R 15 Vol.1, 213-235.
7. ICOLD Bulletin. Risk assessment in dam safety management[R]. http://icold-cigb.net/saf.pdf. 2000.
8. CUR Report 141. Probabilistic design of flood defences[R]. Vergeer, G.J.H., (editor), 1990. ISBN 90 376 00093.
9. Harrie K.T. Kuijper. Pilarczyk K W. Dikes and revetments-design maintenance and safety assessment[M]. Delft: Hydraulic Engineering Division, 1998.
10. KAJJPER H, VRIJLING J. Probabilistic approach and risk analysis[A]. Krystian W. Pilarczyk, Dikes and Revet-ments-Design Maintenance and Safety Assessment[C]. Netherlands: A. A. Balkema, Rotterdam 1998.
11. Center for civil engineering research and codes technical advisory committee on water defences[R]. Probability design of flood defences. ISBN 90 376 0009 3 CUR Pothus 420 2800 A K Gouda, the Netherlands, June 1990.
12. Vrijling, J.K. Probabilistic design of water defence systems in the Netherlands, Reliability Engineering and System safety, 2001, 74, 337-344.
13. Sjaakde Wit. 荷兰筑堤技术的发展[R]. 见: 99 中荷水管理研讨会论文集, 北京, 1999, 408-414.
14. Vrijling, J. K., Hengel, W. van, and Houben, R.J. Acceptable risk as a basis for design. Reliability engineering and system safety. 1998, 141-150.
15. [美]L.德克斯坦, [德] E.J.勃兰特. 水资源工程可靠性与风险[M]. 吴媚玲, 王俊德译. 北京: 水利电力出版社, 1993.
16. DUCKSTEIN L, PLATE E J. Engineering reliability and risk in water resources[M]. London: Martines Nijhoff Publishers, 1987.
17. 匡少涛, 李雷. 澳大利亚大坝风险评价的法规与实践[J]. 水利发展研究, 2002, 2(10): 55-59.
18. Salmon G M, Hartford D N D. Risk analysis for dam safety[J]. International Water Power & Dam Construction. 1995, 47(3): 42-47.
19. Salmon, G.M., Cattanach, J.D., and Hartford, D.N.D.. Measuring and managing the safety at wahleach dam, Proceedings of the Canadian dam safety conference, Canadian dam safety association, 1996, 150-164.
20. Foster M.A. and Fell R. Use of event trees to estimate the probability of failure of embankment dams of piping. ICOLD Congress, Beijing, 2000, Vol 1, 237-260.
21. Hartford, D.N.D. Risk analysis in Geotechnical earthquake engineering, state of the art and practice for embankment dams, Proceedings of the 4th International conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering, 2001, San Diego, University of Missouri-Rolla.
22. Lee, M.K., Lum, K.Y., and Hartford, D.N.D. Calculation of the seismic risk of an earth dam susceptible to liquefaction, Geotechnical special publication, 1998, No. 75, ASCE, Geo Institute, Dakoulas, Yegian and Holts (Eds.), Vol.2, 1451-1460.
23. Ale, B.J.M. Risk assessment practices in the Netherlands. Journal of safety science. Elsevier, 2002, 40: 105-126.
24. Bowles, D.S., Parsons, A.M., Anderson, L.R., and Glover, T.F. Portfolio risk assessment of SA water's Large dams,

ANCOLD Bulletin, 1999, No. 112.

25. Krenzer H. The use of risk analysis to support dam safety decision and management[A]. ICOLD. The proceedings of 21th International Congress on Large Dams[C]. Beijing: the International Commission on Large Dams, 2000. 799-801.
26. Nederend, J.M., Probabilistic design of the storm surge barrier in the new waterway, Holland, Proceedings of the 13th ESREDA seminar, industrial application of structural reliability theory, Paris, France, 1997.
27. Vrijling, J.K, P.H.A.J.M. Van Gelder. Probabilistic design of flood defences [IHE–Lecture Notes], Delft, 2003.
28. TAW (Technical advisory committee for water retaining structures, flooding risks, a study on probabilities and consequences, the Netherlands, 2000.
29. Lassing B.L., Vrouwenvelder A.C.W.M., Waarts P.H. Reliability analysis of flood defence systems in the Netherlands, European Safety and Reliability Conference ESREL 2003, Masstricht, The Netherlands. --- Bedford and Van Gelder (eds), Swets & Zeitlinger, Lisse, ISBN 90 5809 5517. 1005-1013.
30. 高大钊编著. 土力学可靠性原理[M]. 中国建筑工业出版社, 1989.
31. 李清富, 江见鲸. 城市防洪工程风险决策方法[J]. 灾害学, 1995, 10(1): 14-17.
32. 李清富, 江见鲸. 城市防洪系统可靠性基本问题的探讨[J]. 灾害学, 1994, 9(4): 14-18.
33. 梁在潮, 李泰来. 江河堤防防洪能力的风险分析[J]. 长江科学院院报, 2001, 18(2): 7-10.
34. 李国芳, 黄振平, 章志强, 叶松. 长江防洪堤南京段设计洪水位风险分析[J]. 河海大学学报, 1999, 27(2): 23-27
35. 朱元生生 长江南京段设计洪水位的风险分析[J]. 水文, 1989, (5): 8-15.
36. 傅湘, 纪昌明. 水库汛期调度的最大洪灾风险率研究[J]. 水电能源科学. 1998, 16(2): 12-15.
37. 李兵. 海堤漫坝风险分析研究[D]. 广西大学硕士学位论文. 2002.
38. 蒋昕晖, 金双彦. 江河防洪堤的概率设计[J]. 华北水利水电学院院报, 2000, 21(2): 11-13, 17.
39. 肖义, 郭生练, 周芬, 熊立华, 王才君. 基于风险分析的大坝设计洪水标准研究[J]. 水力发电, 2003, 29(11): 6-9.
40. 姚耀武, 陈东伟. 土坡可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(2): 80-87.
41. 范可旭, 朱勇华. 长江中游典型防洪干堤滑动失稳风险分析[J]. 水利水电快报, 2002, 23(11): 15-17.
42. 王平, 刘东升. 简单土坡稳定可靠度计算方法的研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(4): 494-498.
43. 李强, 管昌生. 库岸滑坡稳定可靠性分析中若干规律的探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 999-1002.
44. 刘玉恒, 麻荣永, 吴彰敦. 土坝滑坡风险计算方法研究[J]. 红水河, 2001, 20(1): 29-32.
45. 章志强, 王卓甫, 杨高升. 长江堤防工程的失稳风险分析[J]. 河海大学学报, 1999, 27(2): 18-21.
46. 王卓甫, 章志强, 杨高升. 防洪堤结构风险计算模型探讨[J]. 水利学报, 1998, (7): 64-67.
47. 吴兴征, 丁留谦, 张金接. 防洪堤的可靠性设计方法探讨[J]. 水利学报. 2003, (4): 87-93.
48. Wu Xingzheng, Ding Liuqian, Sun Dongya. Research on Probabilistic Design Method of Flood Defences. International Association for for XXX IAHR Congress. THESSALONIKI, GREECE, 2003.
49. Wu Xingzheng, Zhang Jinjie, Ding Liuqian. Structure Risk Analysis with Slope Stability and Seepage of Dike at High Flood Level. International Association for XXX IAHR Congress. THESSALONIKI, GREECE, 2003.
50. 吴兴征, 丁留谦, 张金接. 蒙特卡罗法在堤防工程中的应用研究[A]. 2002 年防洪抗旱减灾论文选集[C]. 黄河水利出版社, 2002. 215-225.
51. 中华人民共和国水利部国际合作与科技司编. 堤防工程技术标准汇编[M]. 中国水利水电出版社, 2000.
52. 中华人民共和国行业标准 SL258-2000. 水库大坝安全评价导则[M]. 中华人民共和国水利部, 2001.
53. 吴兴征, 丁留谦, 张金接. 堤防安全评估系统的设计与实现[J]. 人民长江, 2003, (6), 55-56.
54. 吴兴征, 丁留谦, 孙东亚. 基于可靠性理论的堤防安全评估系统的开发[J]. 水利水电技术, 2003, V34, (11): 88-90.
55. 吴兴征, 赵进勇. 堤防的结构风险分析理论及其应用[J]. 水利学报, 2003, (8): 79-85.
56. 朱勇华, 郭海晋, 徐高洪. 防洪堤防洪综合风险研究[J]. 中国农村水利水电, 2003, (7): 11-14.

57. 李青云. 长江堤防工程安全评价的理论和方法研究[D]. 清华大学博士学位论文, 2002.
58. 姜树海, 范子武. 大坝的允许风险及其运用研究[J]. 水利水运工程学报, 2003, (3): 7-12.
59. 李雷, 盛金保. 土石坝安全度综合评价方法初探[J]. 大坝观测与土工测试 1999, 23(4): 22-28.
60. 阎维明, 孙峰, 刘季. 城市防洪堤坝适时维护的经济决策方法[J]. 灾害学, 1994, 9(2): 22-26.
61. 张俊芝, 高延红, 王立. 基于可靠度的堤防工程加高加固决策模型[J]. 工程力学, 1999, (增): 661-665.
62. 杨庆, 焦建奎, 栾茂田, 师大寨. 边坡可靠性与经济风险性分析及其应用[J]. 工程地质学报, 2000, 8(1): 86-90.
63. 黄克中, 毛善培. 随机方法与模糊数学应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 1987.
64. 中国水利水电科学研究院 安庆城市防洪暨堤防管理系统技术开发总报告(WH-2003-2-002) 中国水利水电科学研究院防洪减灾研究所 2003.4
65. 毛昶熙. 渗流计算原理与应用. 中国水利电力出版社. 1990.
66. 安徽省安庆市水利水电勘察院 工程地质勘察报告 2000.
67. 水利部天津水利水电勘测设计研究院. 安徽省安庆江堤及广济圩江堤加固工程初步设计报告[R]. 2001.
68. 陈进, 黄薇. 防洪工程系统风险分析方法探讨[J]. 长江科学院院报. 2001, 18(5): 37-40.
69. 吴中如, 顾冲时, 沈振中等. 大坝安全综合分析和评价的理论、方法及其应用[J]. 水利水电科技进展, 1998, 18(3): 2-6.
70. 何金平, 李珍照. 大坝安全改造方案多目标风险决策方法[J]. 海河水利. 1998, (1): 20-22.
71. 吴世伟编著. 结构可靠性分析[M]. 人民交通出版社, 1990.
72. Wang Yanyan. Risk on flood risk assessment method In Delft, 2003.
73. WU xingzheng. Probabilistic Risk Analysis and Safety Evaluation of Dikes. Case study: Structural Safety assessment with Multi-criteria evaluation on Anqing Dikes in China In Delft, 2003.