

防洪堤的结构风险评估理论及其应用

汇报人：吴兴征

中国水利水电科学研究院防洪减灾研究所

水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心



主要内容

- 1 课题提出的意义
- 2 堤防结构风险分析的理论基础
- 3 堤防结构风险分析系统的开发
- 4 系统应用实例及解决的问题
- 5 结构风险分析的局限性
- 6 几个有待深入研究的问题

1 课题提出的意义 (1)



1 课题提出的意义 (2)

- 98大洪水中长江干堤发生险情9000多处，抢险高峰时投入670多万人，充分暴露了我国防洪工程险情多、风险大、抗洪抢险手段落后、技术含量低等问题
- 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”的传统被动的防洪方式，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

1 课题提出的意义 (3)

- 随着人类社会经济的不断发展，堤防从无到有并不断加高加固，但堤防不可能无限制地加高，堤防越高其溃决后的后果就越严重，也会破坏区域景观，因此客观存在并需要确定一个最优的高度，传统的安全系数方法无法解决或不能很好地解决该问题（大坝的洪水资源化）

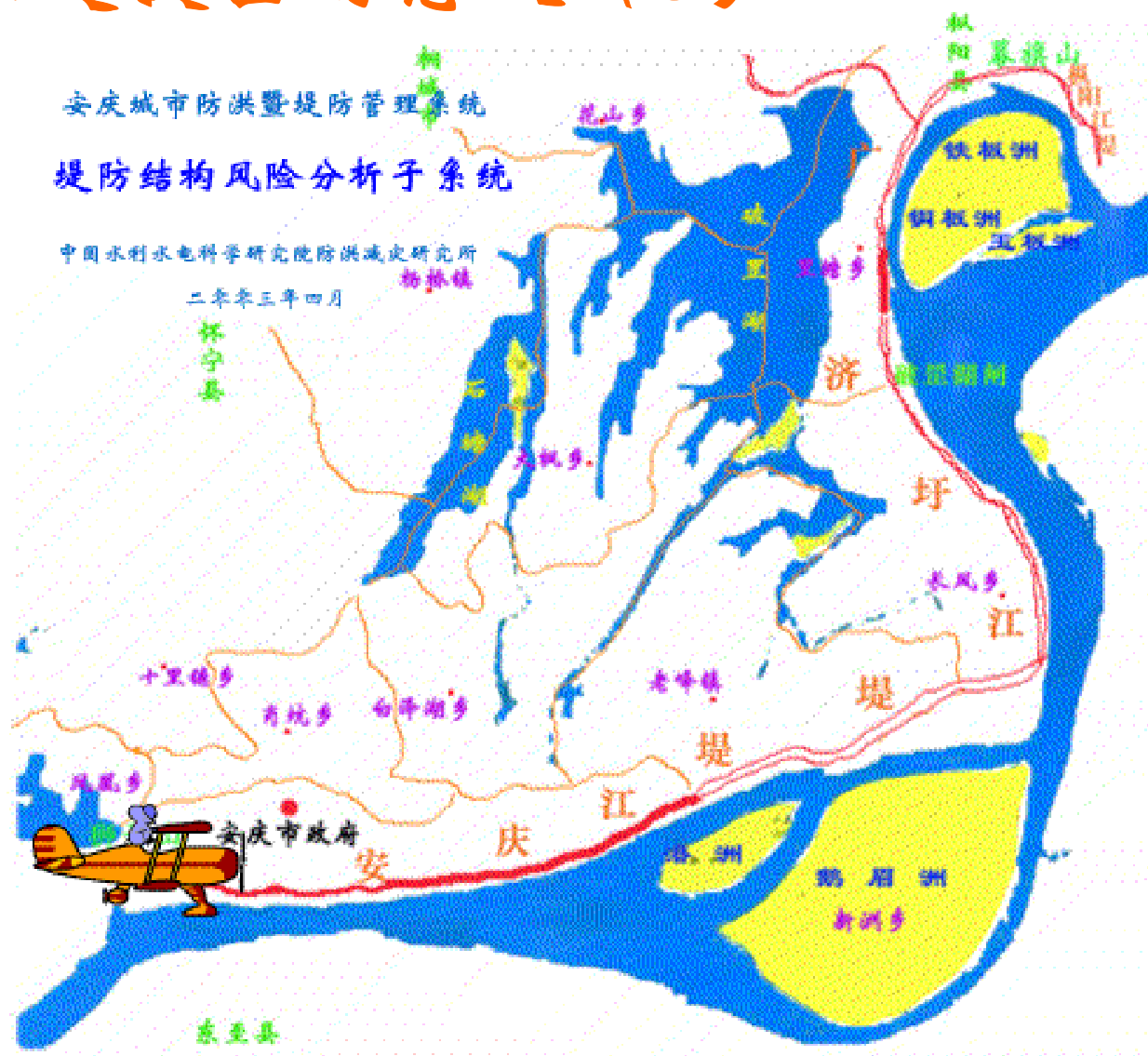
从理论上讲，防洪构筑物保护着他们的家园，但这种保护绝不是100%安全的，问题在于多大的风险是可以接受的，这是历来需要工程技术人员回答的一个问题。在一定程度上，我们保护自身不受洪水侵害要综合权衡社会经济条件、资金投入及预期收益。

1 课题提出的意义 (4)



基于可靠性理论的风险评估方法将结构的多种参数作为随机变量，可根据不同堤防结构重要性程度采取相应设计，具有其先进性和科学性。并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。

1 课题提出的意义 (5)



主要内容

- 1 课题提出的意义
- 2 堤防结构风险分析的理论基础
- 3 堤防结构风险分析系统的开发
- 4 系统应用实例及解决的问题
- 5 结构风险分析的局限性
- 6 几个有待深入研究的问题

2 堤防风险分析的理论基础 (1)

结构风险评估的主要概念定义

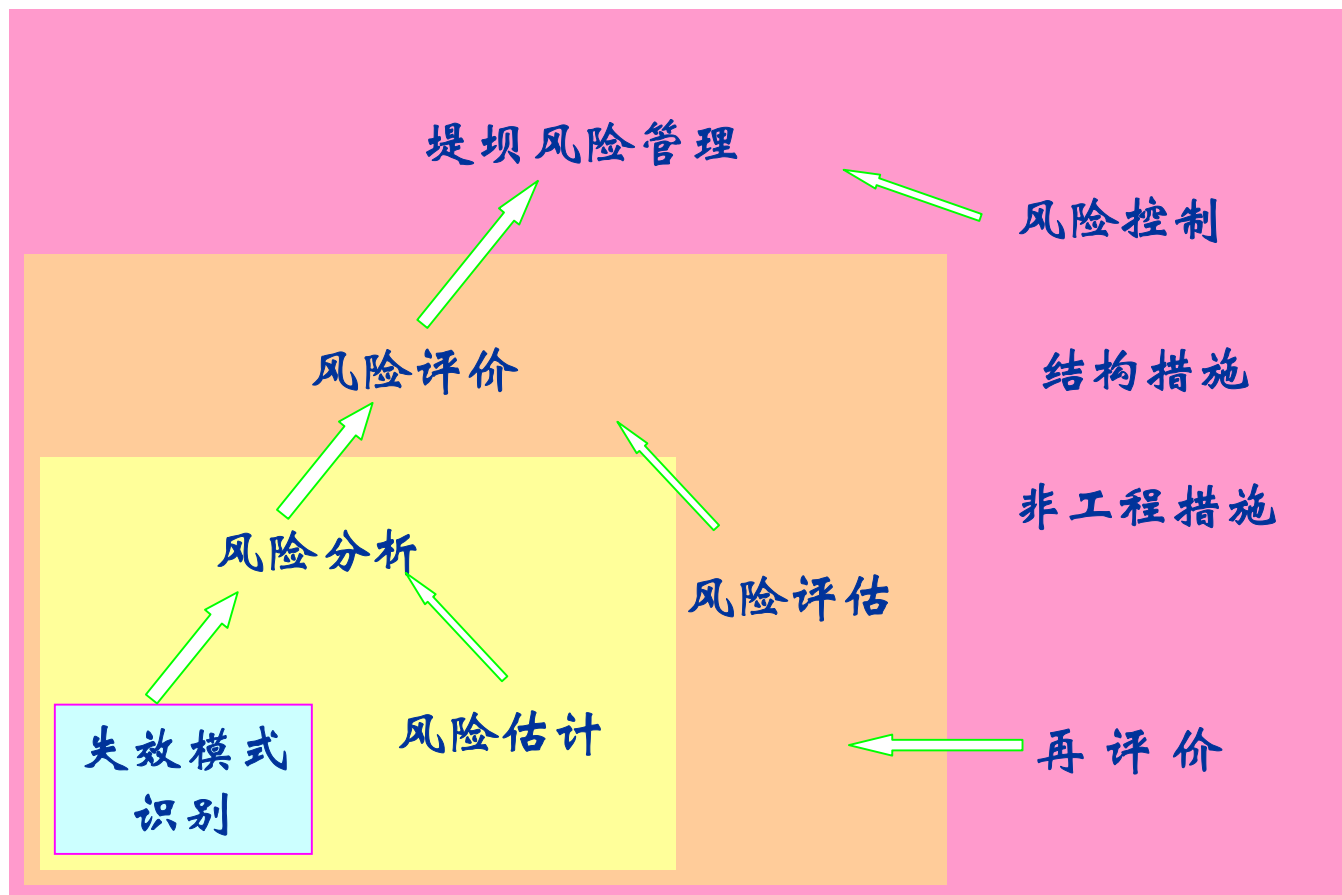
风险分析 (Risk analysis) 是以失效风险估计为手段, 主要对失效原因和失效后果进行计算;

风险评价 (Risk evaluation) 则依据一定的技术标准或准则对堤坝的安全级别进行定性或定量判别, 它是针对具体险情发生的概率和可能造成后果的严重程度、性质等进行定量评价。

风险评估 (Risk assessment) 是二者的综合反映, 它是进行堤坝风险管理 (Risk management) 和决策支持的必要手段和技术条件。

一个区域内的洪灾概率是所有单元 (包括典型堤坝断面和穿堤建筑物) 的失稳概率的组合, 这里重点评述防洪堤坝风险分析技术。

2 堤防风险分析的理论基础 (2)



风险评估和风险管理各组成部分之间的关系

2 堤防风险分析的理论基础 (3)

⌘ 指水工程结构设计、施工和管理养护工程中，及存在的各种危及堤防工程安全的不确定性因素

结构风险评估的主要研究内容

(1) 洪水、风浪、土工参数的随机分布规律和分布参数的随机性，即“作用”和“抗力”的不确定性；

(2) 风险模型的建立、风险的计算方法和计算手段；

(3) 各种因素对风险影响程度的灵敏度分析；

(4) 既能被社会公众所接受又具有较好的经济效益的风险标准；

(5) 将系统理论、失效树、事件树分析手段应用于防洪工程系统之中求解总风险。

上述研究要素组成风险链，在进行风险评估时，要对链中的每个环节作具体分析和评价。

2 堤防风险分析的理论基础 (4)

结构风险评估的主要分析方法

失效模式和后果分析法 (Failure Modes and Effects Analysis, FMEA)

失效树分析法 (Fault Tree Analysis, FTA) 又称

因果树分析

事件树分析法 (Event Tree Analysis, ETA) 又称

决策树分析

2 堤 决策

5) -

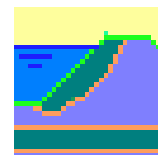
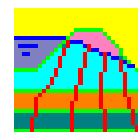
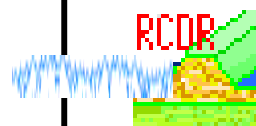


2 堤防风险分析的理论基础 (4) - 主要失稳模式

模式	大坝	长江	本研究考虑的主要失稳模式
管涌	38	54.5	√
漫顶	30		√
内坡失稳		15	√
外坡失稳	15		√
内坡侵蚀		10	
外坡侵蚀			
溢流			

2 堤防风险分析的理论基础 (7) - 极限状态方程

失稳模式	极限状态方程
漫顶	$z_1 = h_0 - h_w - h_s - e$
管涌	$z_2 = \gamma_{nk} d_{ks} - \gamma_w h_{ap} + \gamma_{sb} t_{sb}$
滑动	$z_3 = F_{SL} - 1 = M_r / M_o - 1$



2 堤防风险分析的理论基础 (8) - 结构风险率的计算

⌘ 荷载 Z ; 承载力 $\hat{Z}$

⌘ 两个随机变量是相互独立的

⌘ 结构风险率

$$R = P(Z \geq \hat{Z}) = \iint_{Z \geq \hat{Z}} f_Z(Z) f_{\hat{Z}}(\hat{Z}) dZ d\hat{Z}$$

⌘ 离散化

2.4 堤防风险分析的理论基础 (9) - 算例

两个典型算例

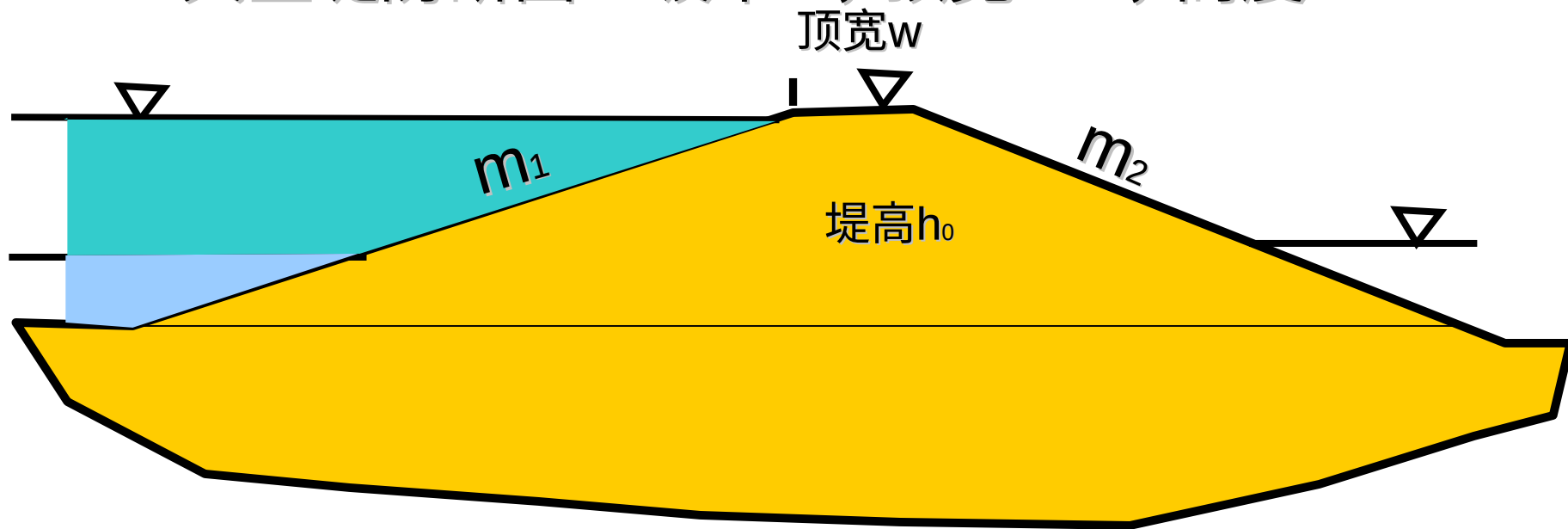
均质堤防——探讨变动几何参数和土工参数对渗透破坏、边坡稳定的影响

斜墙式堤防——探讨变动几何参数和土工参数对漫顶、管涌、边坡稳定的影响

可靠性计算---一次二阶矩法；Monte Carlo法

2.4 堤防风险分析的理论基础 (10) - 算例

典型堤防断面：坡率3；顶宽7m；高度10m

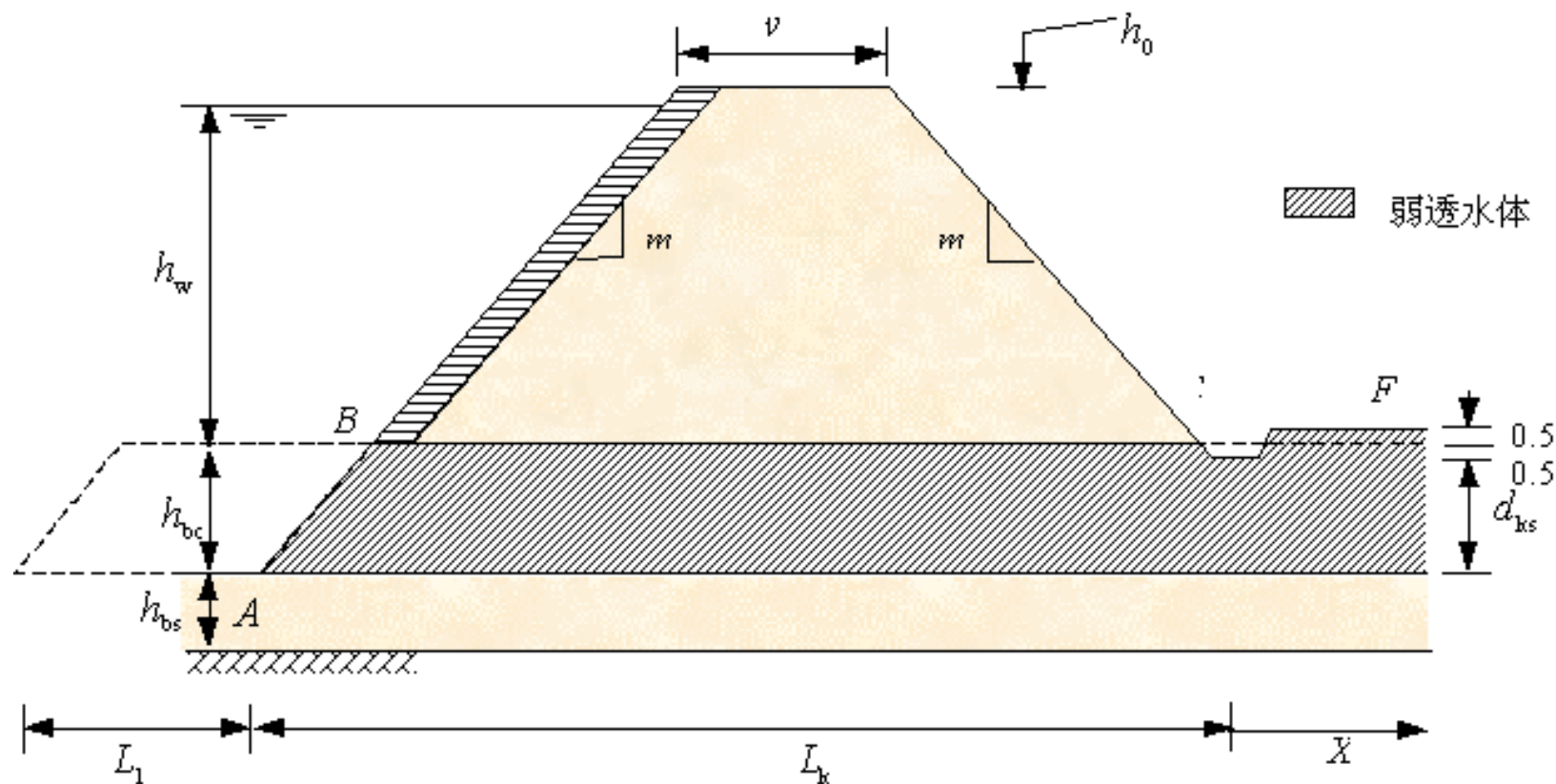


均质堤身堤防断面示意图

2.4 堤防风险分析的理论基础 (11) - 算例

- ⌘ 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的风险均增加

2.4 堤防风险分析的理论基础 (12) -算例



斜墙式堤防断面示意图

2.4 堤防风险分析的理论基础 (13) -算例

几何设计参数和土体渗透系数对堤防管涌可靠度的敏感性分析表明：

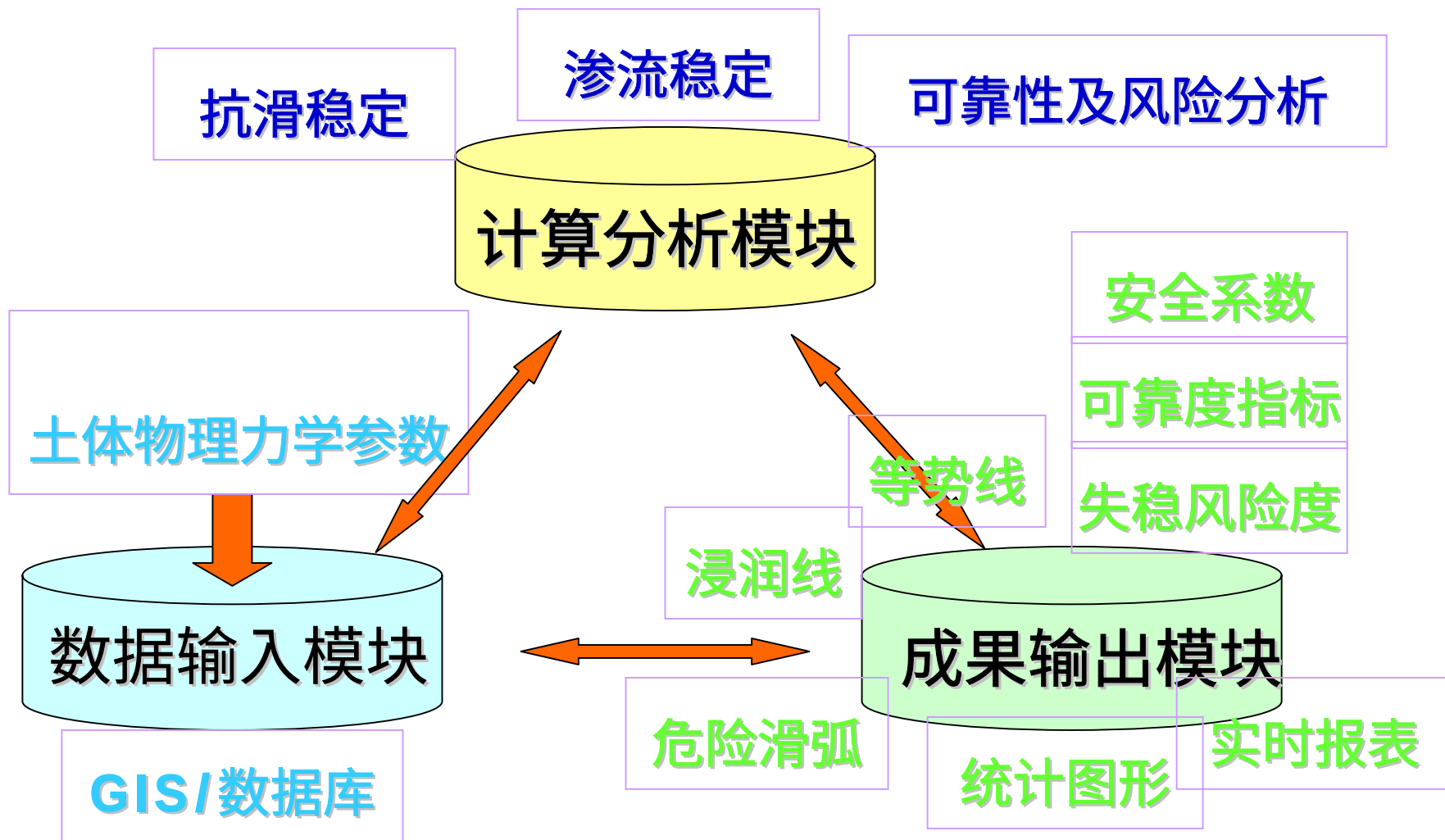
- 1) 堤防坡率、堤顶宽度、堤基粘土层厚度、前滩地宽度、堤后压盖厚度和宽度等变量的增大，堤基渗透稳定的可靠性指标增大；
- 2) 堤基粘土层和砂土层渗透系数的增加，堤基渗透稳定可靠性指标减小

算例的计算成果表明，提出的计算模型是可靠的，可以用于全堤段的堤防结构风险评估中

主要内容

- 1 课题提出的意义
- 2 堤防结构风险分析的理论基础
- 3 堤防结构风险分析系统的开发
- 4 系统应用实例及解决的问题
- 5 结构风险分析的局限性
- 6 几个有待深入研究的问题

3 堤防安全评价系统的开发 (1)



3堤防安全评价系统的开发 (2)

安庆城市防洪
系统由干堤、
水闸等组成



3堤防安全评价系统的开发 (3)

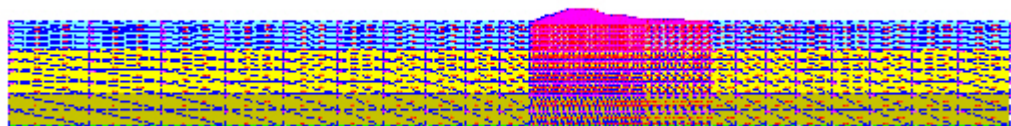


堤防断面组成

实际 → 概化 → 理想

3堤防安全评价系统的开发 (4)

堤段网格剖分



堤段渗流计算



堤段稳定分析



采用确定性数学和非确定性数学相结合的方法对堤防工程进行综合评价，基于数据库后台支持，主要分为三大模块：边坡稳定分析、渗透稳定分析、可靠度与风险分析。结合安庆江堤五十余个典型断面的数据资料，实时分析不同的洪水位下堤段发生失稳的风险水平，系统的开发将有助于传统经验型的堤防安全评价和管理方法向预测型的风险管理体系转变。

3堤防安全评价系统的开发 (5)

堤段可靠度计算

安庆堤防工程可靠度计算

控制参数	随机变量	常数	相关系数	计算成果
				Value
Beta				1.6942
Pfailure				.045118

对于随机变量

	NO. 1
ALFA	-.9998718
Sqalfa	.9997436
DbetavsDu	.1593
DbetavsDsigma	-.2698

对于常数

	NO. 1
DbetavsDpar	-1.693294E-04

计算模式

☐ 上游稳定

☒ 下游稳定

☐ 渗流稳定

水位级数

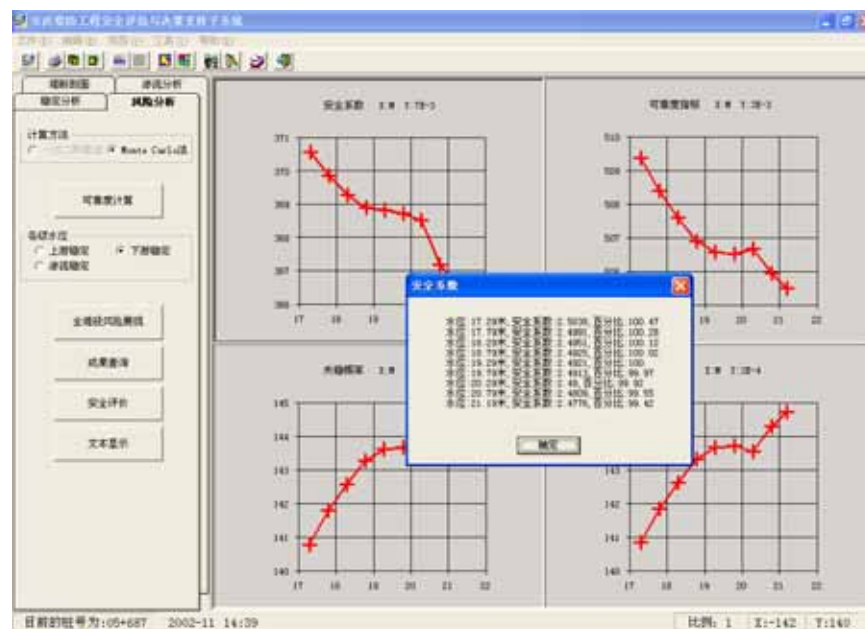
5

堤段计算

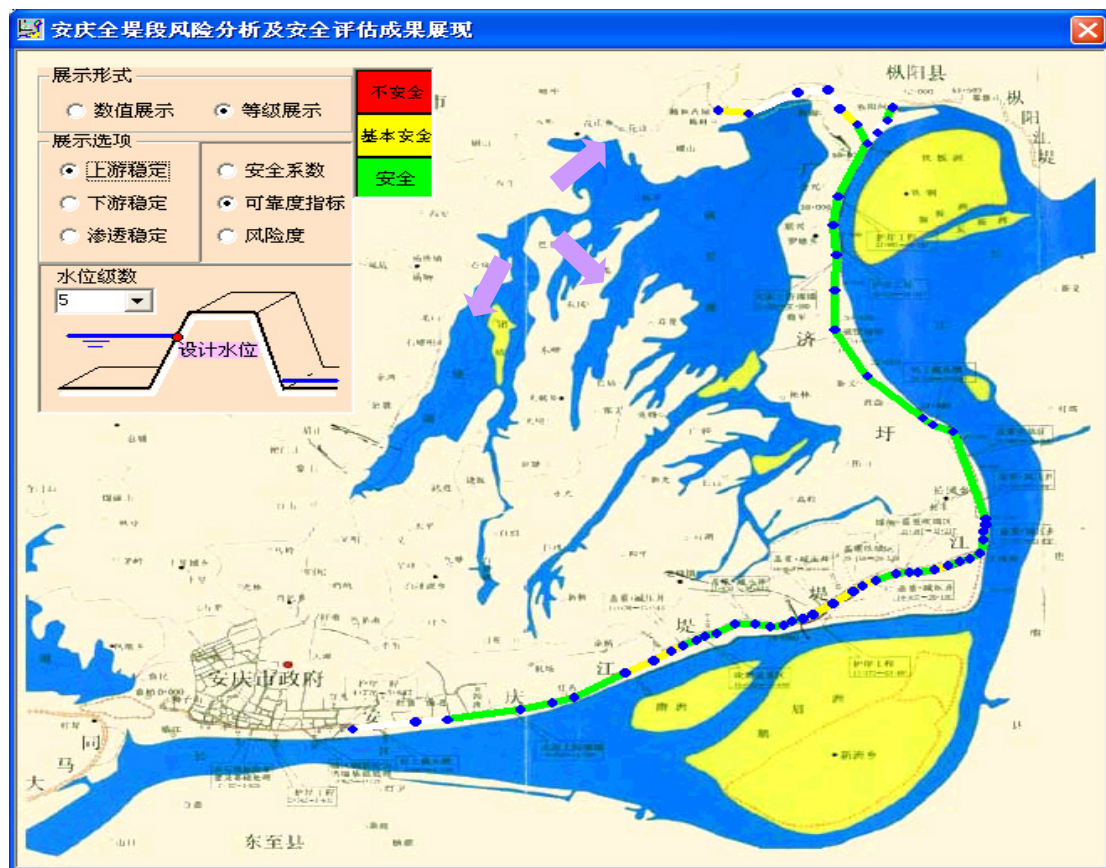
退出

05+687

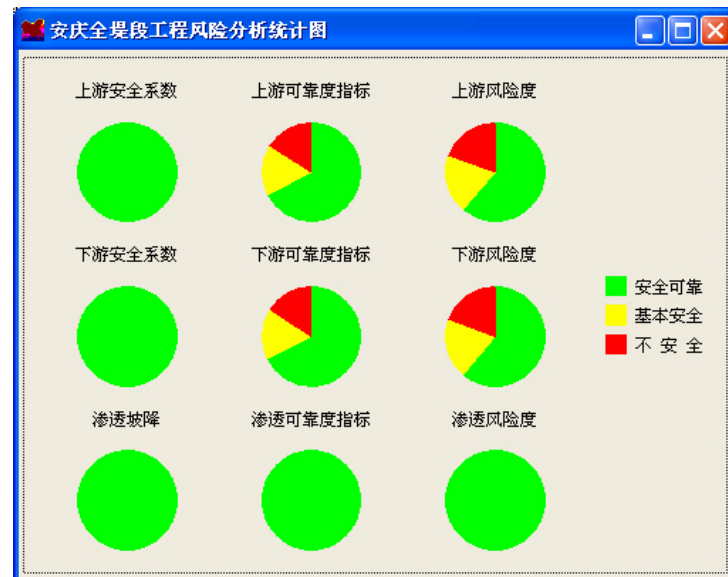
不同洪水位指标展示



3堤防安全评价系统的开发 (6)



GIS底图上评估指标展示



评估统计饼图

提交全堤段的动态风险图。按照一定的标准将堤段划分为不同的安全等级，并根据分析成果，

3堤防安全评价系统的开发 (7)

工程风险评估简明报表

缩放 100%

工程风险评估简明报表

水位级数: 1

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	40405	0	800	29765	5970	5470	28315	8220	4670
百分比 /%	98.06	0	1.94	72.24	14.49	13.28	68.72	19.95	11.33

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	29065	6670	5470	28865	7670	4670
百分比 /%	100	0	0	70.54	16.19	13.28	70.05	18.61	11.33

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

页: 1

评估统计报表

全堤段安全评估成果查询

起始桩号 05+687

终止桩号 M5+248

水位级数 1

展示选项

☒ 上游稳定

☒ 安全系数

☒ 下游稳定

☒ 可靠度指标

☒ 渗透稳定

☒ 风险度

评估等级 A

搜索

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
M5+248	19.2	4.5803	3.9686	.000035637	2.6647	
最大值	21.1900	4.5803	4.9397	0.0535	4.3892	
最小值	19.2000	1.7231	1.6050	0.0000	0.9809	
平均值	20.5574	2.7291	3.8457	0.0035	3.0825	
标准差	0.5381	0.5277	0.8827	0.0109	0.6821	

评估成果查询

根据分析成果，从已有的预案库中给出相应的加固整治措施或防范对策。系统的开发将有助于传统经验型的堤防安全评价和管理方法向预测型的风险管理体系转变。

3 堤防



主要内容

- 1 课题提出的意义
- 2 堤防结构风险分析的理论基础
- 3 堤防结构风险分析系统的开发
- 4 系统应用实例及解决的问题
- 5 结构风险分析的局限性
- 6 几个有待深入研究的问题

4 系统分析成果—解决三个方面的问题

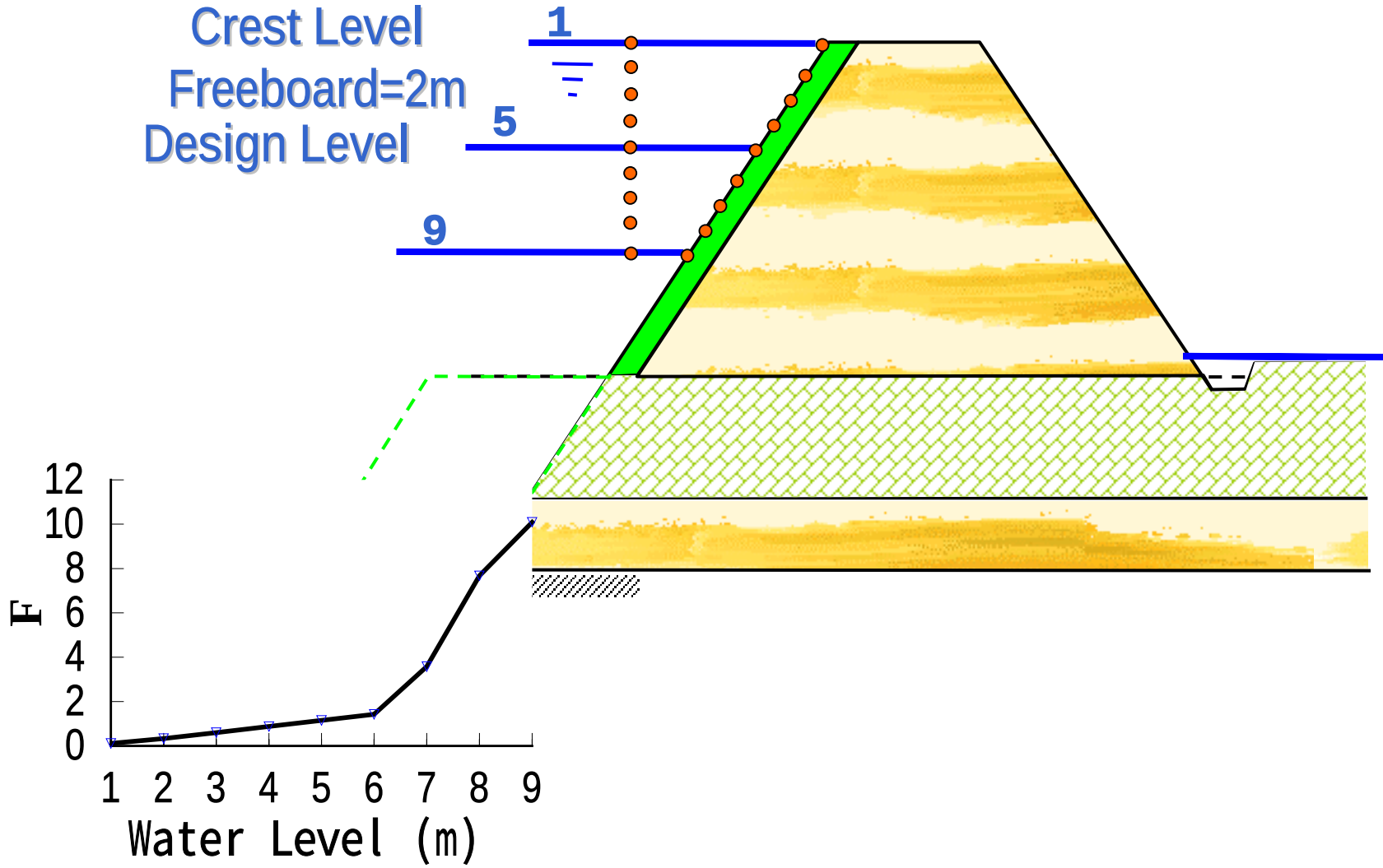
一、汛限水位的调整对结构安全影响

二、全堤段结构失稳风险图的绘制

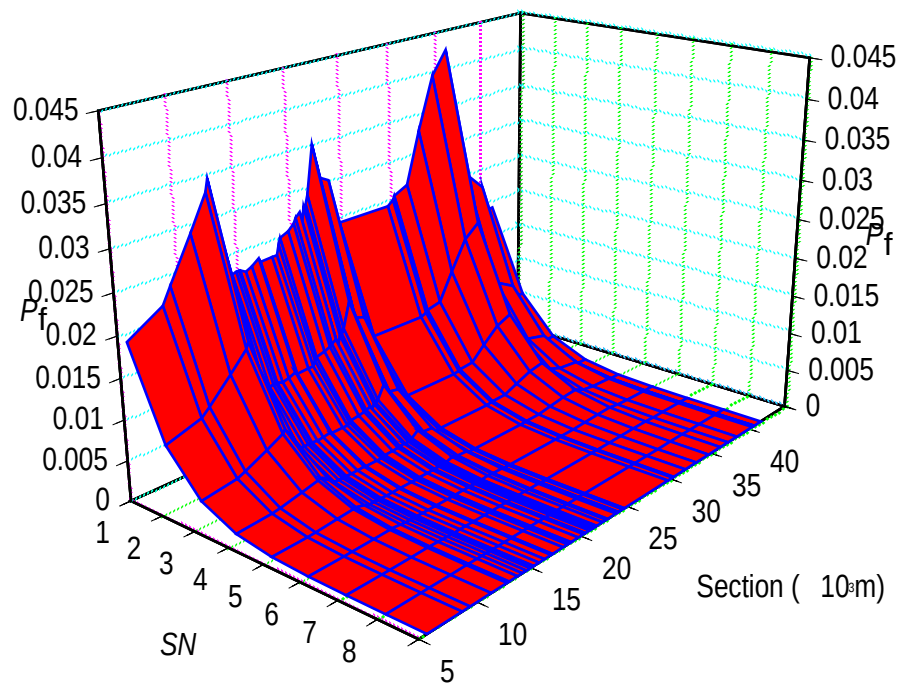
三、基于可靠性理论的堤坝概率设计方法

Water levels

Crest Level
Freeboard=2m
Design Level



4 系统分析成果 (2)

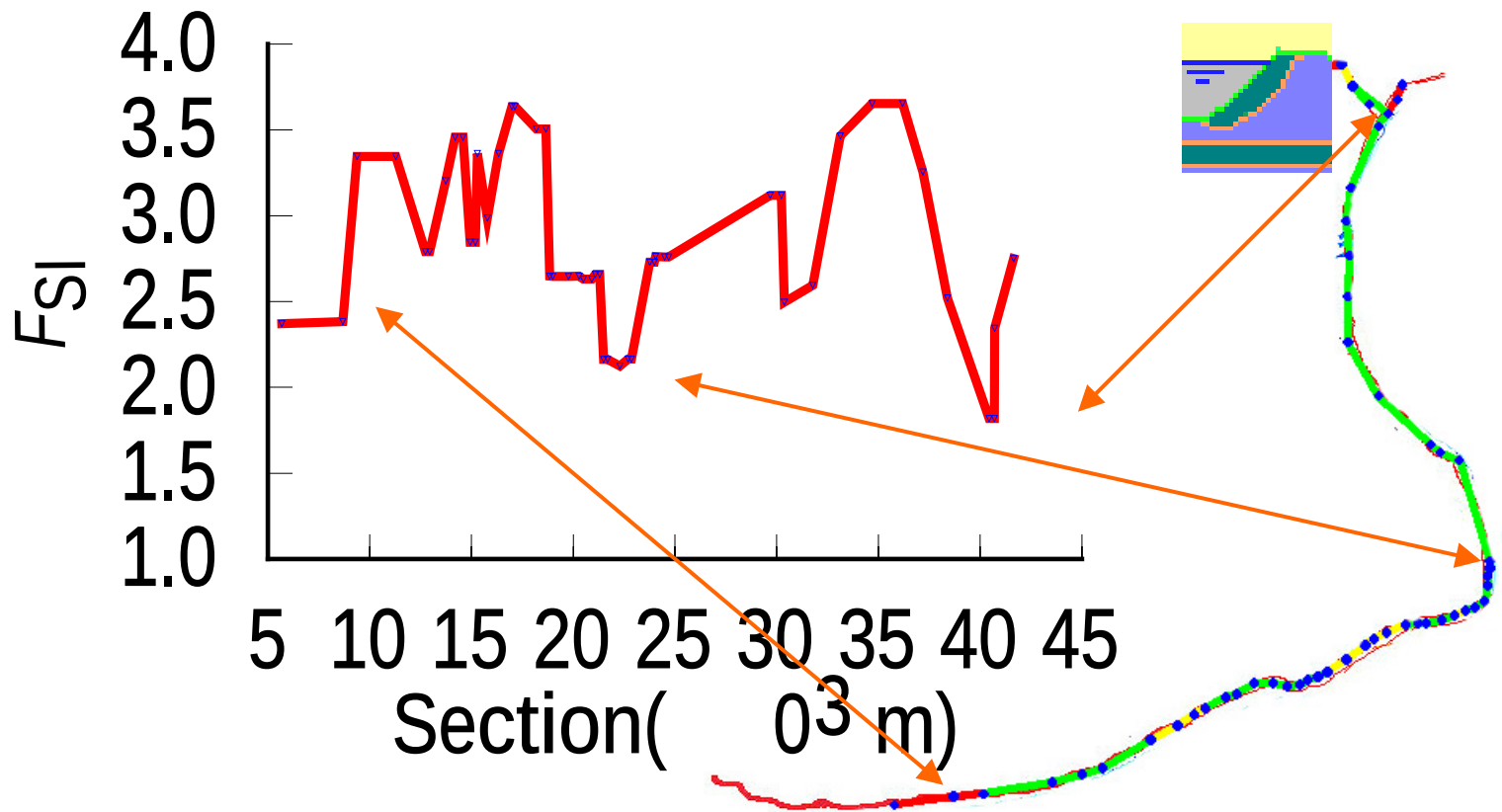


4 系统分析成果 (3)

一、汛限水位的调整对结构安全影响

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，水位每降低0.5m，风险度平均降低1至2个量级。

4 系统分析成果 (4)



内坡的安全系数的分布

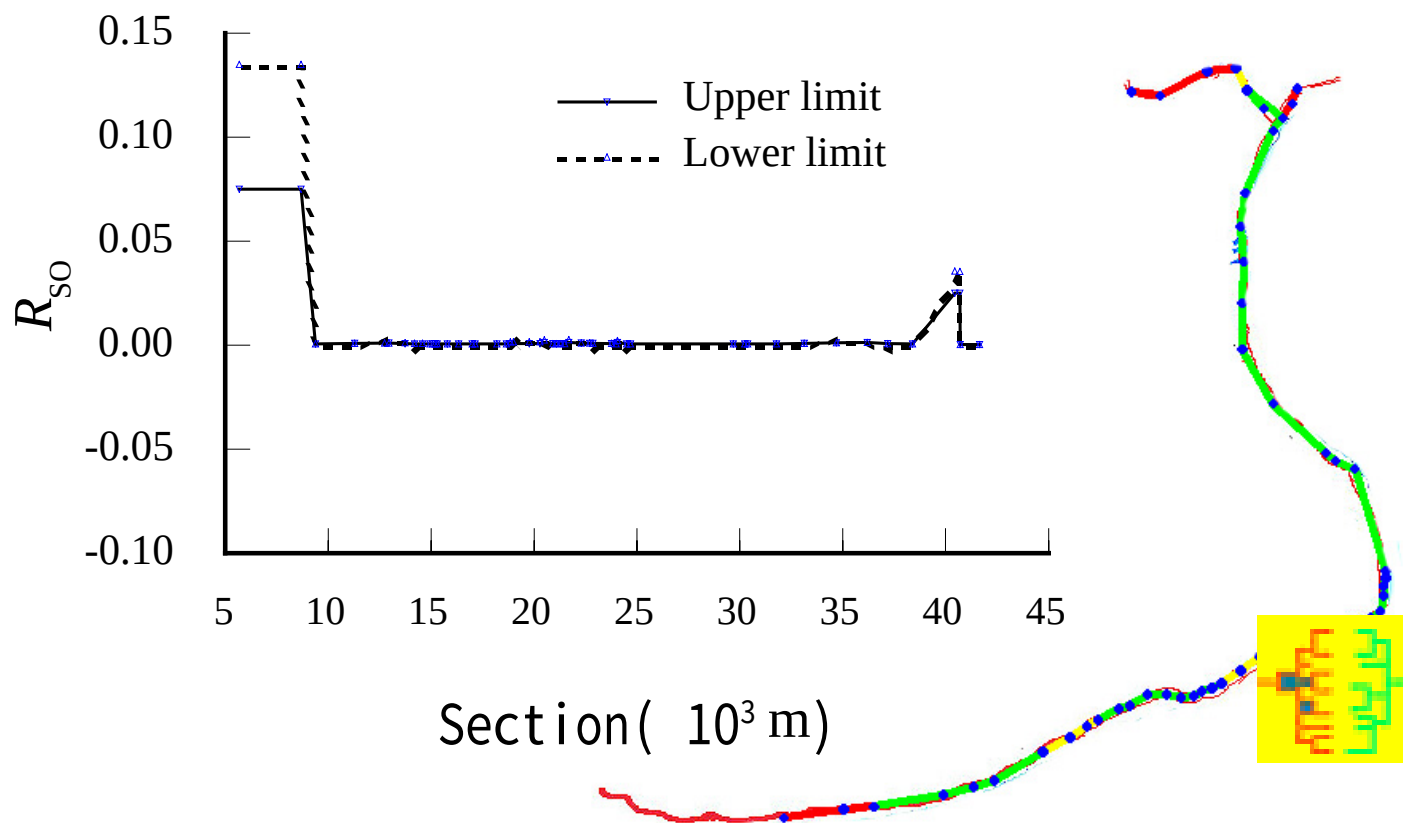
4 系统分析成果 (5)

二、全堤段结构失稳风险图的绘制

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 系统分析成果 (6)

二、全堤段结构失稳风险图的绘制



4 系统分析成果 (7)

三、基于可靠性理论的堤坝概率设计方法

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 $\times$ 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, 将每个结构物和堤防的各个剖面全面考虑在内的整个防洪体系的失事概率, 因此该方法是全系统的整体性设计方法

最终实现由超频洪水法向洪灾概率法过渡

主要内容

- 1 课题提出的意义
- 2 堤防结构风险分析的理论基础
- 3 堤防结构风险分析系统的开发
- 4 系统应用实例及解决的问题
- 5 结构风险分析的局限性
- 6 几个有待深入研究的问题

5 风险分析技术的主要局限性

- 1) 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。
- 2) 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坝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。

6 几个值得深入研究的问题

- 1) 将优化理论与可靠性计算相结合确定堤防的最优目标可靠度
- 2) 土性的自相关性，随机变量的互相关性以及土工参数的空间变异性值得在系统的完善中深入讨论
- 3) 堤防在高洪水位和降雨入渗双重作用下是最为不利的极限荷载条件，降雨入渗和水位骤降等方面的研究进展，为最终实现结构风险的实时评估和预测提供理论支持
- 4) 系统的应用推广

谢谢各位

谢谢各位同仁

谢谢
光临

谢谢
光临





It is still developing---

Welcome you to enjoy this study---

contact me:

xingzhengwu@163.com