

麻荣永  
陈立华 著

# 堤防岸坡稳定与堤型 结构优化分析方法



科学出版社

014010227

U656  
05

# 堤防岸坡稳定与堤型结构 优化分析方法

麻荣永 陈立华 著



科学出版社

北京



北航

C1696737

U656  
05

## 内 容 简 介

本书主要介绍了国内外岩土材料特性和本构模型研究的进展情况;堤防岸坡稳定性分析评价研究的进展情况;广义塑性力学理论、模糊数学和灰色理论等;基于三轴试验的堤防岸坡滑坡体岩土材料的工程特性及其本构模型;基于模糊数学和灰色理论的堤防岸坡稳定分析评价方法;堤防工程典型的结构形式及其优化分析方法;堤防岸坡滑坡体的处理方法及生态护坡技术。

本书可供水利水电工程、岩土工程、建筑工程、安全与环境等专业的本科生、研究生和从事水利水电工程规划、设计、施工和管理的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

堤防岸坡稳定与堤型结构优化分析方法/麻荣永,陈立华著. —北京:科学出版社,2013

ISBN 978-7-03-036842-3

I. ①堤… II. ①麻…②陈… III. ①防波堤-边坡稳定-研究  
IV. ①U656.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 039677 号

责任编辑:刘宝莉 孙 芳 / 责任校对:张小霞  
责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京彩虹伟业印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2013 年 6 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013 年 6 月第一次印刷 印张:16 1/2

字数:320 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

堤防在人类文明发展中担负着重要的角色。近年来,我国南北方各地经常发生洪涝灾害,在经过洪水考验、取得抗洪斗争胜利的同时,也暴露了水利工程建设中存在的诸多问题,特别是堤防工程,在洪水大流量、高水位、长时间浸泡的严峻考验下,险象环生、险情不断。我国很多重要城市和 3000 多万公顷农田都处在江河的中下游和沿海地区,需要依靠堤防的保护。据统计,堤防保护面积虽不到全国总面积的 10%,但所保护的耕地占 30% 以上,保护的人口占 50% 以上,保护区内的农业产值约占全国产值的 60%,工业产值占全国产值的 70% 以上。因此,一旦大江大河发生特大洪水,引起改道性的溃堤决口,后果将不堪设想。1998 年,长江流域、松花江流域发生特大洪水之后,党中央、国务院高度重视堤防工程建设,加大堤防工程建设的投入,全国各地都在新建、扩建、加高、加固城市堤防。

大量堤防的建设在给城市带来安全的同时,也给堤防工程的安全管理带来了新的问题和挑战。城市防洪堤的破坏形式包括漫顶、滑坡、堤身失稳、堤基失稳、岸坡失稳等多种形式。其中,岸坡失稳是城市堤防工程建设中经常见到的主要灾害之一。由于堤防是建设在河岸两边天然斜坡上,岸坡的失稳将导致堤防工程的破坏。随着人类活动的日益频繁,工程边坡稳定问题越来越突出,岸坡的失稳将直接影响到堤防工程的安全。因此,本书将深入研究堤防岸坡的稳定问题,为堤防工程的设计和管理提供科学现实的依据,对于节约工程投资和确保工程防洪安全具有重要意义。

首先,本书以南宁市防洪堤岸坡岩土材料为研究背景,基于广义塑性力学理论,通过试验方法建立城市防洪堤岸坡岩土材料的弹塑性本构模型。根据城市防洪堤岸坡岩土材料的特性,对典型堤段的岸坡岩土材料进行了试验研究。为了消除原状土样应力结构、应力历史等复杂因素对试验结果的影响,试验采用重塑土样。试验严格按照规范的方法制备土样,采用应变控制式三轴试验系统完成了有关试验工作,并通过对试验结果的分析比较,获取了岸坡土体本构模型的基本参数及弹塑性屈服面形式。采用试验拟合屈服面的方法,拟合得到湿陷体积屈服面和湿陷剪切屈服面,并且详细地探讨了屈服面中有关参数的确定方法。

其次,本书引入了模糊数学理论和灰色系统理论,对南宁堤防工程的岸坡稳定性进行了模糊多属性、多层次综合类比评价;对南宁市堤防工程某堤段的 6 个岸坡分 4 种破坏形式,对 12 个影响因子分别作了模糊-灰色相关分析,找出了对各种相应破坏形式影响最大的数个因子,作为以后工程管理、治理的参考依据;用灰色预

报模型对广西梧州市河西堤防工程的沉降变形进行了预报。研究表明,模糊系统理论和灰色系统理论在城市堤防工程中的应用是恰当且实用有效的,具有良好的前景。模糊多属性、多层次综合分析对防洪堤岸坡稳定是恰当且实用的,能快速、准确地对防洪堤进行评价。模糊-灰色关联因素分析对指导防治措施有着实际的工程意义;运用模糊-灰色综合类比的方法分别针对不同破坏形式的不同因子作相关类比,找出其中影响最大的因子,为防洪堤稳定防护治理作出快速诊断提供了一种新方法。用灰色预报模型对堤防工程的沉降变形进行预报是可行的。

再次,致灾因素中普遍存在随机不确定性因素,给灾害的科学预测预报工作带来很大的困难,这已成为公认的难题。因此,在防灾减灾工作中,一方面应加强重要灾害点的监测工作,掌握其演化规律,从而做出有科学根据的预测预报,达到减灾的目的;另一方面,为减轻堤防岸坡失稳灾害还应采取必要的对策和措施,包括工程措施和非工程措施,对堤防岸坡进行保护和防护,以防止堤防岸坡失稳、堤防工程破坏而导致灾害的发生。因此,本书介绍了堤防岸坡失稳的防治方法和生态护岸的新技术。

最后,在防灾减灾工程实践中,堤防工程包括河堤工程和海堤工程等,这是被采用得最为广泛的工程形式之一。由于工程量大而面广,堤防工程的投资非常巨大。因此,如能在保证工程安全的前提下,选择合理的堤型结构并优化堤型结构断面,必将可以节省一大笔工程投资,产生巨大的社会效益。本书以广西海堤工程为例,探讨堤型结构的选择和堤型结构断面优化的分析方法,并说明堤型结构的优化效果。工程实际中,绝大部分河堤和海堤都是土石堤,所以,它们的结构断面及其优化分析方法是相似的。

自2000年以来,作者先后主持完成了广西水利科技攻关项目:“广西海堤堤型结构研究”、“城市防洪堤岸坡稳定性研究”和“广西河流生态整治工程运用研究”,本书就是根据这三个科技攻关项目相关的研究成果撰写而成的。在项目研究过程中,研究生陈春、黄汉球、戴思奇、徐如海等给予了大力协助,并参加了部分章节的编写,在此对他们的工作表示衷心的感谢!同时,对参考文献的作者致以诚挚的谢意!

限于作者水平,虽然对堤防岸坡的稳定性和堤型结构作了比较系统的研究,但由于所研究问题的复杂性,研究工作还有待深入,分析方法还有待完善,因此,书中难免有疏漏之处,敬请读者批评指正。

作者

2012年5月于广西大学

# 目 录

## 前言

|                                        |    |
|----------------------------------------|----|
| 第 1 章 概述                               | 1  |
| 1.1 引言                                 | 1  |
| 1.2 国内外岩土材料本构模型研究概况及发展趋势               | 4  |
| 1.2.1 岩土材料本构模型研究概况                     | 4  |
| 1.2.2 岩土材料本构模型研究的发展趋势                  | 7  |
| 1.3 国内外边坡稳定性分析研究概况及发展趋势                | 8  |
| 1.3.1 边坡稳定性分析研究概况                      | 8  |
| 1.3.2 边坡稳定性分析研究发展趋势                    | 11 |
| 1.4 模糊数学和灰色系统理论在边坡稳定性分析中的应用            | 13 |
| 1.4.1 模糊理论在岸坡稳定中的应用成果                  | 13 |
| 1.4.2 灰色理论在岸坡稳定分析中的应用                  | 14 |
| 1.5 岸坡稳定分析方法                           | 16 |
| 1.5.1 分析方法的概况                          | 16 |
| 1.5.2 确定性分析方法                          | 16 |
| 1.5.3 不确定性分析方法                         | 24 |
| 1.5.4 边坡稳定性研究展望                        | 27 |
| 1.5.5 分析方法评价                           | 27 |
| 第 2 章 基于塑性力学理论的岩土应力-应变关系               | 29 |
| 2.1 传统的塑性力学理论                          | 29 |
| 2.2 广义的塑性位势理论                          | 31 |
| 2.3 适于岩土材料的广义塑性力学屈服面理论                 | 33 |
| 2.4 适于岩土材料的广义塑性力学硬化定律                  | 35 |
| 2.5 广义塑性力学中适于岩土材料的应力-应变关系              | 36 |
| 2.5.1 广义塑性力学中适于岩土材料的弹塑性柔度矩阵            | 36 |
| 2.5.2 广义塑性力学中适于岩土材料的 $[D_{ep}]$ 的一般表达式 | 38 |
| 第 3 章 堤防岸坡滑坡体岩土特性试验分析方法及本构模型的建立        | 40 |
| 3.1 堤防岸坡滑坡体岩土材料的三轴试验分析                 | 40 |
| 3.1.1 试验设备及三轴剪切试验的原理                   | 40 |
| 3.1.2 土样的制备和饱和                         | 43 |

|            |                               |            |
|------------|-------------------------------|------------|
| 3.1.3      | 试验步骤                          | 44         |
| 3.1.4      | 试验过程                          | 45         |
| 3.1.5      | 试验成果                          | 49         |
| 3.2        | 堤防岸坡滑坡体岩土材料各向等压试验(静水压力试验)     | 66         |
| 3.3        | 土样的变形特性和强度参数                  | 68         |
| 3.4        | 本构模型参数试验                      | 70         |
| 3.4.1      | 弹性常数的确定                       | 70         |
| 3.4.2      | 屈服面求解与加卸载准则                   | 73         |
| 3.5        | 基于广义塑性力学理论的堤防岸坡滑坡体岩土材料弹塑性本构模型 | 77         |
| 3.6        | 本构模型的验证                       | 79         |
| <b>第4章</b> | <b>堤防岸坡稳定分析中的模糊数学理论基础</b>     | <b>81</b>  |
| 4.1        | 模糊集合论基础                       | 81         |
| 4.1.1      | 模糊集合的概念                       | 81         |
| 4.1.2      | 模糊集合的运算                       | 82         |
| 4.1.3      | 模糊集合的分解定理                     | 86         |
| 4.1.4      | 模糊集合扩张原理与模糊数                  | 88         |
| 4.1.5      | 隶属函数的建立                       | 93         |
| 4.1.6      | 模糊集合的贴近度与模糊度                  | 98         |
| 4.1.7      | 模糊模式识别                        | 101        |
| 4.1.8      | 可能性理论                         | 103        |
| 4.2        | 模糊关系与模糊聚类分析                   | 103        |
| 4.2.1      | 模糊关系及其运算                      | 103        |
| 4.2.2      | 模糊关系的性质                       | 105        |
| 4.2.3      | 模糊等价关系与传递闭包                   | 106        |
| 4.2.4      | 模糊相似关系                        | 107        |
| 4.2.5      | 模糊矩阵                          | 108        |
| 4.2.6      | 模糊图                           | 109        |
| 4.2.7      | 模糊聚类分析                        | 112        |
| 4.3        | 模糊综合评价                        | 115        |
| 4.3.1      | 模糊映射与模糊变换                     | 115        |
| 4.3.2      | 模糊综合评价方法                      | 116        |
| <b>第5章</b> | <b>堤防岸坡稳定的模糊多属性、多层次综合评价方法</b> | <b>118</b> |
| 5.1        | 堤防工程特点及分类                     | 118        |
| 5.1.1      | 堤防工程的特点                       | 118        |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 5.1.2 堤防工程的分类 .....               | 119 |
| 5.2 南宁市堤防工程概况 .....               | 119 |
| 5.2.1 区域地质概况 .....                | 119 |
| 5.2.2 堤防工程现状 .....                | 121 |
| 5.2.3 堤防岸坡发生滑坡灾害情况 .....          | 122 |
| 5.3 防洪堤岸坡稳定的设计方法 .....            | 125 |
| 5.4 防洪堤岸坡稳定的影响因素分析 .....          | 126 |
| 5.5 堤防岸坡稳定的模糊多属性、多层次综合评价 .....    | 127 |
| 5.5.1 工程概况 .....                  | 130 |
| 5.5.2 岸坡稳定系数计算 .....              | 131 |
| 5.6 南宁市堤防岸坡模糊语言评价 .....           | 133 |
| 5.6.1 一级评价 .....                  | 133 |
| 5.6.2 二级综合评价 .....                | 135 |
| 第6章 灰色系统理论及其在堤防岸坡稳定分析中的应用 .....   | 139 |
| 6.1 灰色系统的数据处理与灰关联分析 .....         | 139 |
| 6.1.1 灰色系统的描述 .....               | 139 |
| 6.1.2 数据处理的累加生成法与累减生成法 .....      | 140 |
| 6.1.3 灰关联分析方法 .....               | 141 |
| 6.2 灰色聚类方法 .....                  | 142 |
| 6.2.1 灰色关联聚类方法 .....              | 143 |
| 6.2.2 灰类白化权函数聚类方法 .....           | 143 |
| 6.3 灰色系统建模方法 .....                | 145 |
| 6.3.1 GM(1,1)模型 .....             | 145 |
| 6.3.2 GM(1,N)模型 .....             | 152 |
| 6.3.3 GM(2,1)模型 .....             | 153 |
| 6.3.4 GM(n,h)模型 .....             | 155 |
| 6.3.5 灰色流变模型 GRM(n,h) .....       | 155 |
| 6.3.6 GM(0,h)模型及 GAM(0,h)模型 ..... | 156 |
| 6.3.7 灰色斜率关联度分析模型 .....           | 156 |
| 6.4 灰色预测 .....                    | 158 |
| 6.5 堤防岸坡稳定影响因素的灰关联分析 .....        | 160 |
| 6.5.1 堤防岸坡稳定的影响因素分析 .....         | 160 |
| 6.5.2 南宁市堤防岸坡稳定影响因素的灰关联分析 .....   | 162 |
| 6.5.3 南宁市堤防岸坡稳定灰关联分析结果评价 .....    | 167 |
| 6.6 堤防岸坡稳定灰色综合类比评价方法 .....        | 169 |

|             |                            |            |
|-------------|----------------------------|------------|
| 6.6.1       | 灰色综合类比评价方法                 | 169        |
| 6.6.2       | 南宁市堤防岸坡稳定的灰色综合类比评价         | 170        |
| 6.6.3       | 综合类比评价分析                   | 175        |
| 6.7         | 堤防岸坡稳定性灰色预报方法              | 176        |
| 6.7.1       | 预报模型的选择及预报步骤               | 176        |
| 6.7.2       | 梧州市河西防洪堤西江段工程变形灰色预测        | 177        |
| <b>第7章</b>  | <b>岸坡失稳的类型及模糊-灰色相关分析方法</b> | <b>183</b> |
| 7.1         | 岸坡失稳的原因及类型                 | 183        |
| 7.2         | 失稳因子的模糊-灰色相关分析             | 183        |
| 7.2.1       | 滑坡的模糊-灰色相关分析               | 184        |
| 7.2.2       | 塌坡的模糊-灰色相关分析               | 186        |
| 7.2.3       | 崩坡的模糊-灰色相关分析               | 188        |
| 7.2.4       | 剥落的模糊-灰色相关分析               | 191        |
| 7.3         | 成果分析                       | 193        |
| <b>第8章</b>  | <b>岸坡失稳的防治方法与生态护岸技术</b>    | <b>194</b> |
| 8.1         | 岸坡失稳的防治方法                  | 194        |
| 8.1.1       | 非工程防治措施                    | 194        |
| 8.1.2       | 工程防治措施                     | 195        |
| 8.2         | 生态护岸技术                     | 200        |
| 8.2.1       | 生态护岸功能及其设计技术               | 200        |
| 8.2.2       | 生态护岸型式                     | 201        |
| <b>第9章</b>  | <b>堤型结构的选择及断面优化分析方法</b>    | <b>214</b> |
| 9.1         | 广西海堤结构选择的合理性分析             | 214        |
| 9.1.1       | 堤型结构选择                     | 215        |
| 9.1.2       | 堤身坡比                       | 216        |
| 9.1.3       | 外坡护坡结构                     | 217        |
| 9.2         | 广西海堤堤型结构断面优化分析             | 218        |
| 9.2.1       | 断面优化数学模型                   | 218        |
| 9.2.2       | 结构断面优化数学模型的求解方法            | 223        |
| 9.2.3       | 结构断面优化实例                   | 225        |
| 9.3         | 海堤结构优化效果分析                 | 227        |
| 9.3.1       | 海堤护坡坡比、护坡及垫层厚度的优化效果        | 227        |
| 9.3.2       | 堤型结构方案优化效果分析               | 232        |
| 9.3.3       | 堤型断面护坡材料的优化效果              | 242        |
| <b>第10章</b> | <b>结语</b>                  | <b>244</b> |
|             | <b>参考文献</b>                | <b>247</b> |

# 第 1 章 概 述

## 1.1 引 言

由于人类生存和发展的原因,城市往往靠近大江大河。大江大河既为城市发展提供了不可缺少的水资源,也给城市发展带来了持续不断的洪水灾害。我国城市基本分散布置于沿海、沿湖、沿江及山区河谷盆地,洪涝水害频发,损失严重。

城市是人口集中、历史文化积淀最丰富、人文景观最多的地方,也是经过多年发展积累起来的物质财富最集中的地方,无论从生存还是发展角度考虑,其安全因素始终是第一位的。但是,随着生态环境的恶化,气温升高,洪水频繁发生,泥沙淤积,行洪断面面积被挤占,河道洪水位不断抬高,洪水灾害对城市安全的威胁也越来越大。建设城市防洪工程、防御和减少洪水灾害是城市社会经济可持续发展的必然要求。堤防工程是城市防洪工程体系的重要组成部分,大量堤防工程的建设对保障城市人民的生命财产安全和城市的社会经济发展起到了十分关键的作用。

堤防工程是沿河、渠、湖、海岸或行洪区、分洪区、围垦区的边缘修筑的挡水建筑物,它是人类在与洪水作斗争的实践中使用最早,而且至今仍被广泛采用的一种重要防洪工程。在江河两岸修筑堤防,可以束缚洪水,将洪水限制在行洪道内,使同等流量的水深增加,行洪流速增大,有利于泄洪排沙,使水流顺流入海,防止河水、湖水、海潮的漫溢及泛滥造成灾害。在湖泊周围修建堤防,可以控制汛期洪水水位,限制淹没面积,同时增加湖泊蓄水调洪能力,减轻江河防洪负担。在沿海滩地筑堤,可以阻挡风浪及抗御海潮对低洼地区的袭击,增加陆地面积。在沿渠两侧筑堤,可以减少沟渠占地面积,增加输水能力。在水库周围修建堤防,可以减少水库蓄水的淹没面积,降低淹没损失。

根据堤防的筑堤位置,堤防分为河(江)堤、湖堤、海堤、渠堤、库堤等;根据堤防的作用,堤防可分为防洪堤、防涝堤、防浪堤、防潮堤等;根据堤防的重要性,堤防又可分为干堤、支堤、民堤等;根据堤防的建筑材料,堤防又可分为土堤、钢筋混凝土堤和圪土防洪墙等;根据堤防保护对象的大小及重要性,堤防又可分为一般堤防和重要堤防。

堤防工程要求堤线平顺,河堤还要适应河势流向,避免急弯和局部突出,尽可能少占耕地、少迁村庄。堤线尽量选在地势较高、土质较好的地段,以减少筑堤的

工程量。堤距是江河两岸堤线之间的距离。堤距与堤顶高程密切相关:在同一设计流量下,堤距窄,水位将抬高,堤顶就要高些;堤距宽,水位低,则堤顶高程可建得低些。堤距既要使河流有足够宽度的行洪断面,能通过设计的洪峰流量,又要保证堤防安全。堤防的横断面一般为梯形或复式梯形。堤顶宽度主要考虑防洪抢险、物料堆存和交通运输的要求。堤防边坡设计根据洪水持续时间,要进行渗透、稳定分析计算,在地震区还要考虑抗震要求。

堤防工程是人们防御洪水灾害的主要工程措施之一,在历次的抗洪灾害中发挥了重要作用。但在取得抗洪斗争胜利的同时,也暴露了水利工程建设中存在的诸多问题,尤其是堤防工程,在大流量、高水位、长时间洪水浸泡的严峻考验下,险情不断。在1998年长江流域、松花江流域发生特大洪水之后,党中央、国务院高度重视堤防工程建设,加大堤防工程建设的资金投入。

大量的堤防建设在给城市带来安全的同时,也给堤防工程的安全管理带来了新的问题和挑战。

城市防洪堤的破坏包括漫顶、滑坡、堤身失稳、堤基失稳、岸坡失稳等多种形式,其中,岸坡失稳是城市堤防工程建设中经常见到的主要灾害之一。随着人类活动的日益频繁,工程边坡失稳影响到堤防工程的安全的问题越来越突出。本书将深入研究堤防岸坡的稳定问题,不仅为堤防工程的设计和管理提供理论依据,也为节约工程投资和确保工程防洪安全提供技术支撑。

首先,堤防岸坡失稳的因素分外部因素和内部因素两类。外部因素可能是自然环境的恶化、人类生产生活活动的影响或设计的不合理等;内部因素则取决于土体自身的物理力学特性。土体自身的物理力学特性的严格分析方法包括三个组成部分,首先要建立描述土性状的模型,明确是作为线性弹性体还是非线性弹性体,或是弹塑性体;第二,要确定该模型所需的参数;第三,要建立将该模型用于解决实际问题的计算方法。实际工程中,土的应力-应变关系是很复杂的,具有非线性、弹塑性、黏塑性、剪胀性、各向异性等,同时,应力路径、强度发挥度以及土的状态、组成、结构和温度等均对其有影响。目前,岩土力学的研究大都是针对某种类型的土,而较少应用于具体的工程。

本书以南宁市防洪堤岸坡岩土材料为研究背景,基于广义塑性力学理论,通过试验方法建立城市防洪堤岸坡岩土材料的弹塑性本构模型,并详细探讨了屈服面中有关参数的确定方法。

其次,由于我国堤防工程地基多为第四系松散沉积物,其物质组成、分布及厚度变化大,可以说堤防岸坡的稳定问题归根到底就是土质边坡的稳定问题。目前,土质边坡稳定分析方法主要有二维极限平衡法和弹塑性有限元分析法。二维极限平衡法以对滑体进行条分并考虑静力平衡条件为出发点,依据对条块间作用力的不同考虑方式,以及是否同时考虑力和力矩的平衡条件。二维极限平衡法又可分

为瑞典圆弧法、分块极限平衡法和 Janbu 法等。弹塑性有限元分析法由于对滑体地质条件的复杂性及认识的局限性,往往使计算的基础——地质模型及本构关系的明确存在着一定的偏差,而且由于计算参数选取与实际存在一定误差,影响了计算结果的精度。因此,一般数值计算的结果往往只能供设计参考。在工程设计过程中,土坡稳定性分析采用较多的还是极限平衡法,客观上讲,极限平衡法都还是一个粗糙的综合“近似”方法。因为在求解中要人为地引入一些假定条件,不同的假定会得到不同的结果,所以,并不存在一个对边坡稳定问题的“精确解”,甚至在实际工程中出现“边坡安全系数大于规范规定的岸坡发生破坏,而小于规范规定的岸坡却稳定的现象”。可见,尽管边坡稳定问题已有了一百多年的研究历史,但仍存在许多未被人类认识的领域。突破传统的确定论的思维方式,充分考虑由各种因素引起的不确定性是边坡稳定性研究的发展趋势。

另外,堤防岸坡的土体是由性质非常复杂的地质介质构成的,主要表现在:①土体是非均质体,具有众多的节理、层理;②土体受力前就有初始受荷,边坡稳定性受到复杂卸荷和加荷的直接影响;③边坡工程无法进行原型试验,边坡性质呈强烈的不确定性,这种不确定性包括随机性、模糊性、灰色性以及未知性;④土体稳定性分析从本质上讲都是三维问题;⑤从实验室取得的试样数据往往不能直接应用于工程。因此,岸坡稳定性分析是一种数据有限的问题分析,并且存在着强烈的不确定性,是存在着部分已知、部分未知的不确定性系统。所以,我们可以将其视为灰色系统。

因此,本书引入了模糊数学理论和灰色系统理论,对南宁堤防工程的岸坡的稳定性进行了模糊多属性、多层次综合类比评价;并用灰色预报模型对广西梧州市河西堤防工程的沉降变形进行了预报。研究表明,模糊系统理论和灰色系统理论在城市堤防工程中的应用是恰当而实用有效的,具有良好的前景。

再次,滑坡、崩塌、塌坡、剥落等堤防岸坡失稳是危害人民生命和经济建设事业的一种常见的自然人为灾害,它在特定的地质地理环境中形成,并受降雨、地震、人为活动等诸因素影响。因此,堤防岸坡失稳的形成和分布既与地理地质环境条件有关,又与社会发展、经济建设有关;致灾因子既有自然因素的一面,又有人为因素的一面。由于堤防工程的大量建设,人为致灾作用越来越明显,越来越强烈,从而导致滑坡、崩塌、泥石流灾害日益加重、愈演愈烈、频繁发生。鉴于致灾因素中普遍存在随机不确定性因素,给灾害的科学预测预报工作带来很大的困难,这已成为公认的难题。

堤防工程是整个防洪工程体系的基础,是防洪的重要屏障,在我国防洪工作中具有极其重要的地位。在堤防工程防灾减灾工作中,为了能及时发现和处理堤防的险情隐患,更好地保障堤防安全:一方面应加强重要灾害点的监测工作,建设堤防安全监测系统,研究堤防安全问题的演化规律,建立科学的预测预报;另一方面,

为减轻堤防工程灾害,尤其是堤防岸坡失稳灾害,还应采取必要的工程措施,对堤防岸坡进行保护和防护,以防止堤防岸坡失稳。本书将重点介绍堤防岸坡失稳的防治方法和生态护岸的新技术。

如能在保证工程安全的前提下,选择合理的堤型结构并优化堤型结构断面,不仅能产生巨大的社会效益,还可以节约工程的直接投资。本书将以广西海堤工程为例,探讨堤型结构的选择和堤型结构断面优化的分析方法,并说明堤型结构的优化效果。

## 1.2 国内外岩土材料本构模型研究概况及发展趋势

### 1.2.1 岩土材料本构模型研究概况

#### 1. 国外研究方面

土是一种应用广泛的工程材料,但其变形和强度却较其他工程材料复杂得多。因为土是不连续体,由不同粒状的固体颗粒组成。土的变形与强度特性由颗粒接触面的性质以及颗粒接触面上的位移与变形所决定。

为了估计外荷在土体中引起的应力与位移,首先应了解该处的应力-应变关系,然后根据边界条件进行分析。但很久以来,限于计算上的困难以及对土的认识不够,一直是人为地将变形与强度分开来计算,即一类是计算变形和位移的问题,另一类是计算引起土体破坏的最大荷载或最大应力的问题。实际上,土的变形是在初始应力状态开始就连续发生的,直到破坏。由于人为地简化成只讲变形而不考虑局部发生屈服的影响,或只讲破坏而不管发生的变形如何,使得分析的结果往往不符合实际情况。

过去很长一段时期内,国外许多专家、学者在试验的基础上,通过材料宏观的应力-应变曲线关系来确定岩土材料的本构关系。先后提出了土体破坏条件、滑移面概念,建立了滑移线法和极限平衡法。以后又将其发展形成了较完善的岩土滑移线场方法与极限平衡法。在极限平衡法的基础上又发展了土的极限分析法,尤其是上限法。不过,上述方法都是基于正交流动法则进行的。滑移线法与极限平衡法只研究力的平衡,未涉及土体的变形与位移。

20 世纪 50 年代后半期,英国帝国学院的 Skempton、Bishop 和 Henkel 等及挪威岩土研究所北捷鲁姆等各自制作了性能良好的三轴剪力仪,发表了重要的研究成果,但对于土的应力-应变关系问题却注意得很少,认识也不够深刻。这是因为当时是用数学解析方法计算土的应力与应变,将土当做线性弹性体已经很复杂了,不可能用比较符合实际情况的复杂模型求解,所以,很少有人注意如何从土工试验得到更符合土的特性的本构关系。

1957~1995年,国外在岩土材料的应力-应变关系方面的研究取得了很大进展。首先,指出了平均应力与体应变会导致岩土材料的体积屈服,需在 Mohr-Coulomb 锥形空间屈服面上再加上一簇帽子屈服面,此后,又提出了剑桥黏土的弹塑性本构模型,开创了岩土实用计算模型<sup>[1]</sup>。

随着计算技术的发展和应用大型数字计算机解决土工中的问题,使采用非线性的以至弹塑性的应力-应变关系式成为了可能,在研究土的变形和稳定方面有了突破,这些成就是由应力-应变模型的理论研究、参数测定的试验研究、计算方法的研究以及原位观测几方面努力所取得的。1969年,第七届国际土力学及基础工程会议已有专门论述应力-应变关系和强度特性问题的报告,其后的第八届(1973年)及第九届(1977年)国际土力学及基础工程会议都有关于这个专题的总报告。这表明过去人为分割开的变形与强度问题现在能够结合起来考虑了,而且进展很快<sup>[2]</sup>。

20世纪70年代,人们发现单屈服面理论不能反映应力增量对塑性应变增量方向的影响;关联流动法则不仅不符合岩土实际情况,还会出现过大的体胀。

1982年,人们总结了当时弹塑性理论的发展,提出了包含多重屈服面、单屈服面相适应与不相适应流动法则的统一表达式,被称为广义塑性力学(generalized plasticity)<sup>[3]</sup>。

1986年,人们提出了考虑主应力轴旋转的平面模型,并用试验进行了验证<sup>[4]</sup>。

1989年,人们通过试验证实,岩土类材料不遵守关联流动法则和 Druker 公设<sup>[5]</sup>。

1995年,人们通过试验证实,岩土塑性应变增量的方向不仅与应力有关,还与应力增量密切相关。这表明岩土材料不具有塑性应变增量方向与应力唯一性的假设,亦即不遵守传统塑性势理论。岩土材料塑性应变增量的方向不仅取决于应力状态,还主要取决于应力增量<sup>[6]</sup>。

## 2. 国内研究方面

目前,国内研究比较成熟的是不考虑应力洛德角影响的双屈服面模型,其中,椭圆-抛物线双屈服面模型是典型代表,其体积屈服面是做了某些改进的修正剑桥模型,能较好地反映与体积压缩有关的体积变形。

1980年,有学者提出了不考虑应力洛德角影响的双屈服面模型,又叫“南水”双屈服面模型<sup>[7]</sup>。

1985年,有学者对土的三维本构关系进行了探讨与验证,指出塑性应变增量方向与应力增量方向会发生偏离,这表明土体存在 $\theta_0$ 方向的塑性应变<sup>[8]</sup>。

1988年,有学者在第二届全国岩土力学数值分析与解析方法学术讨论会上提出了广义塑性位势的理论,在双屈服面与多重屈服面理论中对传统塑性位势理论

做了修正,从理论上较好解决了非关联法则随意假设势面的缺点,尤其是应用张量定律导出了广义塑性位势公式,提出塑性应变增量的方向不仅与应力有关,还与应力增量有关<sup>[9]</sup>。

1994年,郑颖人<sup>[10]</sup>通过试验拟合求得三个塑性主应变等值面为屈服面。

1998年,刘元雪等<sup>[11]</sup>通过应力分解,把应力增量分解为共轴应力分量与旋转应力分量(即应力主轴旋转产生的应力分量),并导出了旋转应力增量与绕主应力轴旋转的旋转角增量 $d\theta$ 之间的关系,然后按广义塑性位势理论建立了考虑应力主轴旋转的广义塑性位势公式。把塑性应变分为共轴部分与旋转部分,旋转部分需采用6个应力分量作塑性势。

1998年,杨光华<sup>[12]</sup>在多重势面理论的基础上提出了建立在应变空间的、简单的、可以反映土的剪胀性的本构模型,并在三峡二期围堰的应力变形计算和复合地基分析中应用。

2000年,郑颖人等<sup>[13]</sup>通过试验证实,岩土塑性应变增量的方向不仅与应力有关,还与应力增量密切相关,表明岩土材料不具有塑性应变增量方向与应力唯一性假设,亦即不遵守传统塑性势理论。

2000年,段建立与郑颖人<sup>[14]</sup>建立了一种基于广义塑性力学的硬化剪胀土模型,依据中密砂的实验得出由两段屈服曲线组成的S形屈服曲线。在低剪应力状态下产生体缩,高剪应力状态下产生体胀,两段屈服曲线具有相反的法线方向。

2000年,有学者通过对重庆红黏土的真三轴试验指出,应力水平低时,应力增量方向与塑性应变增量方向不发生偏离;应力水平高时,两者出现偏离,但偏离角不大。因此,可以近似认为偏离角是常量,即 $q$ 方向的塑性剪应变与 $\theta_\sigma$ 方向的塑性剪应变近似成比例。由此可以说明, $q$ 方向上的剪切屈服面与 $\theta_\sigma$ 方向剪切屈服面相似,只是大小不同,如果略去 $p$ 的影响,就能把三维问题化作二维问题,从而使计算更为简便<sup>[15]</sup>。

2000年,孔亮等<sup>[16]</sup>以广义塑性力学为建模理论,建立了一个能考虑应力洛德角影响的土体三屈服面模型。

2001年,陈瑜瑶等<sup>[17]</sup>以试验结果为依据,拟合出了重庆红黏土与福建标准砂的体积屈服面和剪切屈服面。

2003年,周葆春等<sup>[18]</sup>根据广义塑性力学原理,直接从三轴试验的试验数据拟合天然砂土的屈服面,给出了天然砂土的两个屈服面(剪切屈服面和体积屈服面),并结合数值算例,初步验证了双屈服面表达式的合理性。

虽然弹塑性模型在国内外的研究已经取得了一定的成果,并在工程应用中进行了有益的尝试,但是,由于其本身及土体材料的复杂性,无论是在理论还是实践方面,均有待不断提高与完善,特别是在结合区域性特征土体的应用研究方面,值得进一步的探索与尝试。

### 1.2.2 岩土材料本构模型研究的发展趋势

分析土的变形与稳定问题有两类方法:一类是工程设计上仍然采用的各种简化的和经验的方法;另一类是根据较严格的应力-应变关系和强度特性的研究建立普遍的本构关系进行计算。

理想模型应能描述在任何荷载条件下和任何时间下的变形,强度则是应力-应变关系的上限,但这种普遍适用的模型很复杂且还没有建立。所以,实际上常用的是变形与时间无关的模型,变形与时间有关的模型包括固结模型和蠕变模型,还有将固结与蠕变结合起来考虑的流变模型;弹性应力-应变模型又分为线性与非线性两种。这些模型各有其局限性,用于解决不同的工程问题。对某一特定的问题来说,首选的模型应是计算结果可靠而又最简单的模型。

基于传统塑性位势理论的单屈服面模型是当前应用最广的一种模型,如剑桥模型、Desai 系列模型、Lade 新模型都属于这一种。虽然这种模型应用很广,但具有上述单屈服面模型的种种缺点。有的作局部修正,如采用非关联流动法则,这对剪胀现象虽然有所修正,但由于没有从根本上解决问题,有时还会带来更大的误差。

鉴于单屈服面模型存在的问题,双屈服面模型在国内外得到了应用。双屈服面模型有两类:①一类基于传统塑性位势理论的推广,采用了两个屈服面。其中一个为塑性体应变的等值面,称为体积屈服面;另一个为塑性剪应变的等值面,称为剪切屈服面。这类模型能较好地反映剪切变形和体积屈服,并不再服从塑性应变增量方向与应力的唯一性假设,但它仍具有采用关联流动法则和不考虑应力洛德角影响等缺点。采用关联流动法则意味着体积屈服面会引起剪切变形,而剪切屈服面会引起体积变形,这就违背了上述两类屈服面原有的物理意义。②另一类是所谓不服从塑性位势理论的双屈服面模型,这一类模型以“南水”双屈服面模型为代表,在理论上较为完善,实用效果也较好,但没有考虑应力洛德角的影响。如果采用非关联流动法则,那么,上述两类模型都是遵循广义塑性位势理论的。

多重屈服面模型采用多个屈服面,上述第一类双屈服面模型就是其中的特例,郑颖人曾导出多重屈服面的系统公式。不过,按广义塑性位势理论,屈服面个数应为三个,并应采用非关联流动法则。文献[4]中,刘元雪和郑颖人等通过试验拟合,求得三个塑性主应变等值面为屈服面,并求出塑性矩阵,这一模型完全符合广义塑性位势理论。

多重塑性势面模型也基于广义塑性位势理论,但它只引入塑性势面,不引用屈服面,通过试验拟合直接求得比例系数,而不再借助屈服面。

大量土工试验表明,纯应力洛德角变化(应力路径为 $\pi$ 平面上的圆周)或纯主应力轴旋转(三主应力值不变)会导致土体出现明显的塑性变形;在不排水情况下,甚至会导致土体破坏。然而,当前常用的一些岩土模型中,尚不能充分反映这一实

际情况。许多岩土工程存在着主应力轴偏转与应力洛德角变化问题;有许多荷载,如地震、交通、大海潮汐等常会导致土体主应力轴旋转。因而主应力轴旋转是必须考虑的岩土工程的力学问题。由于这一问题至今尚未妥善解决,已成为一些岩土工程失事的原因。郑颖人及其学生研究建立了能考虑主应力轴旋转在内的广义塑性力学理论体系,提出了一种简单实用的能考虑主应力轴旋转的实用方法。

广义的土体主应力轴旋转包括两类:①一类是应力的三个主值不变而主应力轴方向发生变化;②另一类是主应力轴方向、球应力  $P$  与广义剪应力不变,而应力洛德角发生变化,即应力路径为  $\pi$  平面上的圆周运动,也就是  $\pi$  平面上的主应力轴旋转。按目前采用的岩土塑性理论,前者是无法考虑的,而后者是可以考虑的。不过,当前常用的一些岩土模型中,为使模型简化,较多的是略去了应力洛德角变化的影响。

### 1.3 国内外边坡稳定性分析研究概况及发展趋势

#### 1.3.1 边坡稳定性分析研究概况

边坡包括了天然斜坡和人工边坡,边坡稳定性问题的分析包含了两个相互联系的基本任务:一方面要对与人类工程活动有关的天然斜坡或已建成的人工边坡的稳定状况、演化趋势及成灾可能性做出评价和预测;另一方面要为设计合理的边坡、制定有效的边坡整治措施提供依据。边坡的失稳和成灾总是与它的变形破坏相联系的。早在 19 世纪中叶,西方国家首先开展对滑坡现象的研究,但在初期只限于对滑坡现象的观测;直至 20 世纪 20~50 年代,瑞典和挪威才率先分别成立国立土木研究所对滑坡稳定问题进行研究,期间世界各国对滑坡的研究还只是零星和片段的;第二次世界大战后,各国经济大发展和国土开发利用,以及工程建设领域的不断扩展,遇到的滑坡逐渐增多,促使滑坡的研究系统而深入。而我国对滑坡的系统研究是自新中国成立后才开始的。

##### 1. 国际研究方面

1776 年,法国工程师提出了计算挡土墙土压力的方法,标志着土力学雏形的产生<sup>[19]</sup>。

1857 年,英国学者在假设墙后土体各点处于极限平衡状态的基础上建立了计算主动和被动土压力的方法。Rankine 和 Coulomb 在分析土压力时采用的方法后来被推广到地基承载力和边坡稳定分析中,形成了一个体系,这就是极限平衡法<sup>[20]</sup>。之后,又有人提出了圆弧滑面分析法,即最初的瑞典圆弧法。20 世纪 30~40 年代是瑞典圆弧法逐渐完善和改进的时期,如 Fellenius、Taylor、Bishop 等提出的方法。