

土木工程科技创新与发展研究前沿丛书

国家自然科学基金(41502294)、北京市自然科学基金(8164070)等联合资助

# 滑坡渐进破坏模糊随机可靠性

## ——以土石混合体滑坡为例



王宇◇著

中国建筑工业出版社

与发展研究前沿丛书

国家自然科学基金 (41502294)、北京市自然科学基金 (8164070) 等  
联合资助

# 滑坡渐进破坏模糊随机可靠性 ——以土石混合体滑坡为例

王 宇 著

中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

滑坡渐进破坏模糊随机可靠性——以土石混合体滑坡为例/王宇著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2019. 1  
(土木工程科技创新与发展研究前沿丛书)  
ISBN 978-7-112-23031-0

I. ①滑… II. ①王… III. ①滑坡-研究 IV. ①P642. 22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 275580 号

本书以一典型土石混合体滑坡为例, 系统分析了滑坡推移式渐进破坏的力学特征及表现形式, 将可靠性理论与模糊数学有机结合, 同时考虑了滑坡物理力学参数和失稳事件的模糊随机性, 建立了具有渐进破坏面的滑坡模糊随机可靠度模型; 在此基础上, 详细研究了滑坡局部破坏的产生、扩展至破坏的渐进过程; 并结合颗粒流离散元数值模拟手段印证了渐进破坏模糊随机可靠性分析的合理性, 再现了滑坡渐进失稳过程。

本书可供工程地质、岩土工程、采矿工程及相关领域的科研人员、工程技术人员、研究生和高年级本科生参考使用。

责任编辑: 聂伟 王跃

责任校对: 焦乐

## 土木工程科技创新与发展研究前沿丛书 滑坡渐进破坏模糊随机可靠性——以土石混合体滑坡为例

王宇著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京佳捷真科技发展有限公司制版

北京京华铭诚工贸有限公司印刷

\*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 11 $\frac{1}{4}$  字数: 222 千字

2019 年 1 月第一版 2019 年 1 月第一次印刷

定价: 49.00 元

ISBN 978-7-112-23031-0

(33115)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

## ■ 前 言 ■

滑坡不仅是一种自然灾害，同时也是一种严重的工程地质灾害，其发生和发展受限于地质条件和自然营力的作用，同时也受到人类工程活动的显著影响。大型滑坡规模大、机理复杂，脱离母岩滑移过程中形成较大的势能差，常常造成一系列的复合地质灾害，产生链式反应，典型的灾害链为崩→滑→流一体的链式反应地质灾害。由此看来，滑坡地质灾害严重影响了人民的生命安全和财产安全，给整个社会带来重大的伤亡和损失。因此，滑坡工程的稳定可靠性问题一直是，也将必定是岩土工程领域的重点研究课题。

在滑坡的稳定可靠性分析领域，存在的问题主要有：①基于滑坡瞬间破坏机理的稳定性分析方法（如单值稳定系数法、传统可靠性分析法等）都建立在传统的极限平衡基础上，在进行滑坡稳定性计算时，强调的是滑坡稳定性单值整体指标的求解，常用的评价滑坡稳定性的指标有整体稳定系数  $F_S$ 、整体破坏概率  $P_f$  及滑坡整体的可靠度指标  $\beta$  等。在这些指标的求解过程中，假设破坏沿着假定滑动面发生连续的整体滑动，认为稳定性局部指标与整体指标相同，沿整个滑面没有变化，这种分体思路实质上割裂了滑坡的孕育→变形→失稳破坏的内在演化规律，即滑坡的渐进破坏演化模式。②传统方法在对滑坡稳定性进行评价时，忽略了滑坡系统的模糊性，总是基于人为主观判断进行计算模型的简化。在建立稳定可靠性函数关系时，函数中仅涉及对稳定性起控制性的主要参变量。通过计算稳定系数功能函数，当功能函数为零时得到相应的数值解，用它们来对滑坡进行稳定性评价。这种做法，显然是不妥当的，其评价结果的人为因素较大，不同人的评价结果差别很大，所以采用这些精确的计算方法一般情况下是不恰当的。深入研究证明：模糊性所体现的不确定性比其随机性更深刻、更具有普遍意义。③可靠性观念基于二值逻辑基础，它反映了人们的精确思维模式，将复杂的、模糊的系统可靠性问题简单地视为精确的数学问题并不能真实地反映客观实际，特别是在岩土工程中，不是所有的不确定性都是随机的，基于认知的不完全信息导致的不确定性就不能用概率理论来处理。精确性与复杂性互克原理表明，随着滑坡系统复杂程度的不断加大，人们对其稳定性作出精确而有意义的判断呈现出很大程度的相斥特性。因此，对于滑坡这样一个复杂的系统，单纯用可靠性理论评价是不够的，有必要发展既考虑随机性又考虑模糊的评价方法，即模糊随机可靠性分析方法。

鉴于上述问题，本书研究土石混合体滑坡（又称“堆积体滑坡”）渐进破坏



的时空发展特点,采用区别于可靠性理论的模糊随机理论,以河南省嵩县白河土石混合体滑坡为例,通过建立滑坡变形演化阶段地表裂隙的发育特征,研究白河滑坡分区变形特征,判别其渐进破坏模式;分析滑坡基本特征、滑带土特征及滑坡渐进破坏影响因素,阐述其渐进破坏机理;采用随机-模糊处理方法确定计算模型的模糊随机变量;基于岩土体的空间变异性,考虑参数的相关性,以模糊随机变量为基本变量建立滑坡渐进破坏的模糊极限状态方程;通过对岩土工程隶属函数选取原则、不同类型隶属函数的应用进行讨论,选取符合滑坡变形特征的隶属函数,对渐进破坏极限状态方程进行模糊化处理,建立具有二维渐进破坏面的滑坡模糊随机可靠度模型;在此基础上,研究滑坡局部破坏的产生、扩展至破坏的渐进过程;结合颗粒流离散元数值模拟手段印证渐进破坏模糊随机可靠性分析的合理性,再现滑坡渐进破坏过程。本书的研究成果和结论为滑坡风险评价理论提供了一些新的思路和方法。通过对滑坡孕育→发生→发展→破坏全过程的合理把控,不仅对滑坡防灾减灾具有非常重要的现实意义,同时也为滑坡的预测预报提供了理论依据与技术支持。

本书共7章。第1章介绍了本书的研究背景、学科进展及主要内容,第2章论述了滑坡渐进破坏特征及力学成因机制,第3章论述了可靠性理论及模糊数学基本理论,第4章论述了模糊随机可靠性分析方法,第5章论述了降雨作用下滑坡渐进破坏演化机制,第6章采用细观数值计算方法再现了土石混合体滑坡渐进破坏运动全过程,第7章为结论与展望。

本书得到了国家自然科学基金项目(41502294)、北京市自然科学基金项目(8164070)、博士后面基金项目(2015M571118)、博士后特别资助基金项目(2016T90134)、北京科技大学人才基金项目和中央高校基本科研业务项目(2302017FRF-TP-17-027A1)的资助,并得到中国建筑工业出版社的大力支持,在此一并致谢!

限于作者水平,书中难免有欠妥之处,恳请读者不吝指正。

王宇

2018年8月于北京

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 滑坡渐进破坏机理国内外研究现状	4
1.2.1 滑坡渐进破坏研究与稳定可靠性分析理论的结合	5
1.2.2 滑坡渐进破坏的物理力学机制研究	7
1.2.3 渐进破坏特征结合滑坡预测预报研究	10
1.3 本书研究内容	10
参考文献	11
第 2 章 滑坡渐进破坏特征及力学成因机制	16
2.1 滑坡渐进破坏模式分析	16
2.1.1 基于变形特征及受力特点的滑坡类型划分	16
2.1.2 基于地面裂缝的滑坡渐进破坏类型识别	17
2.2 滑坡渐进破坏失稳机理研究	22
2.2.1 推移型滑坡失稳机理	24
2.2.2 牵引型滑坡失稳机理	26
2.2.3 土石混合体滑坡失稳机理	27
2.3 河南白河土石混合体滑坡灾害概况	31
2.3.1 滑坡区地理位置与交通情况	31
2.3.2 河南白河水文气象	33
2.3.3 滑坡区区域地质背景	33
2.3.4 滑坡结构特征	38
2.3.5 滑体特征	39
2.3.6 滑带特征	40
2.3.7 滑床特征	41
2.3.8 滑坡水文地质特征	42
2.3.9 滑坡分区及变形特征	42
2.4 白河滑坡渐进破坏特征分析	49
2.4.1 滑坡渐进破坏变形特征	49
2.4.2 白河滑坡渐进破坏的影响因素分析	50
2.4.3 白河滑坡渐进破坏成因分析	52
2.5 白河滑坡渐进破坏机制分析	53

参考文献 .....	55
<b>第 3 章 可靠性理论及模糊数学理论简介 .....</b>	<b>57</b>
3.1 可靠性理论简介 .....	57
3.1.1 极限状态方程 .....	58
3.1.2 可靠指标与破坏概率 .....	58
3.2 模糊集合论基础 .....	60
3.2.1 模糊集合的概念 .....	60
3.2.2 模糊集合的运算定律 .....	61
3.2.3 模糊集合分解定理 .....	63
3.2.4 模糊数 .....	64
3.2.5 模糊度 .....	64
3.2.6 隶属函数的建立 .....	64
3.3 岩土工程隶属函数的建立 .....	71
3.3.1 岩土工程中隶属函数的构造 .....	71
3.3.2 滑坡工程中常用隶属函数 .....	73
参考文献 .....	78
<b>第 4 章 模糊随机可靠性分析方法研究 .....</b>	<b>81</b>
4.1 可靠性分析在滑坡工程系统中的局限性 .....	81
4.2 基于模糊性与随机性相统一的分析模型 .....	81
4.3 确定力学参数的模糊随机方法 .....	82
4.3.1 岩土体力学参数的随机性和模糊性 .....	82
4.3.2 岩土参数的模糊处理方法 .....	83
4.4 确定极限状态方程的模糊随机方法 .....	88
4.4.1 极限状态方程的模糊性 .....	88
4.4.2 极限状态方程模糊性处理 .....	88
4.5 模糊随机可靠度计算方法概述 .....	89
4.6 基于显式功能函数的滑坡模糊随机可靠度研究 .....	89
4.6.1 基于稳定系数隶属函数的滑坡模糊随机可靠性分析 .....	90
4.6.2 基于模糊极限状态方程的滑坡可靠度分析 .....	90
4.7 基于隐式功能函数滑坡模糊随机可靠度研究 .....	92
4.7.1 基于 RSM 法与模糊随机理论的滑坡可靠性分析 .....	92
4.7.2 滑坡可靠性分析的 FUZZY-PEM 法 .....	95
4.7.3 滑坡可靠性分析的最大熵方法 .....	98
参考文献 .....	104

<b>第 5 章 降雨作用下滑坡渐进破坏演化机制</b> .....	106
5.1 滑坡渐进破坏分析模型 .....	106
5.1.1 条分法基本原理 .....	107
5.1.2 考虑孔隙水压力的条块安全余量功能函数确定 .....	108
5.1.3 降雨条件下条块安全余量功能函数确定 .....	110
5.2 滑坡渐进破坏过程及模糊破坏概率计算 .....	112
5.2.1 模糊随机变量的选取 .....	112
5.2.2 局部破坏模糊概率计算 .....	113
5.2.3 渐进破坏的扩展破坏过程 .....	115
5.2.4 扩展破坏模糊概率计算 .....	116
5.2.5 滑坡渐进破坏的模糊概率推导 .....	118
5.3 白河滑坡渐进破坏模糊随机可靠性分析 .....	118
5.3.1 滑坡地下水非稳定渗流模拟 .....	118
5.3.2 滑坡渐进破坏模糊概率计算分析 .....	120
5.4 滑坡模糊可靠性评价的单一指标评判方法 .....	137
5.4.1 改进的响应面模型 .....	138
5.4.2 设计变量优化的理性运动极限 .....	140
5.4.3 滑带功能函数优化模型的建立 .....	143
5.4.4 基于改进响应面法的滑坡稳定性评价 .....	146
参考文献 .....	152
<b>第 6 章 白河滑坡渐进破坏运动过程模拟</b> .....	154
6.1 颗粒流程序 PFC <sup>2D</sup> 简介 .....	154
6.1.1 颗粒流法的基本思想 .....	155
6.1.2 颗粒流法的特点 .....	155
6.2 平行粘结接触本构模型介绍 .....	156
6.3 数值计算及结果分析 .....	158
6.3.1 颗粒离散元模型细观参数标定方法 .....	158
6.3.2 白河滑坡岩土体试样试验 .....	159
6.3.3 计算模型的建立 .....	160
6.3.4 模拟结果及分析 .....	162
参考文献 .....	165
<b>第 7 章 结论与展望</b> .....	166
7.1 结论 .....	166
7.2 展望 .....	167
参考文献 .....	169

### 1.1 研究背景及意义

滑坡是山区及丘陵地区常见的地质灾害,是与地震、火山并列的全球性三大地质灾害之一。滑坡作为一种严重的自然灾害,它常中断交通、堵塞河流、摧毁厂矿、掩埋村庄;同时,滑坡又是一种工程地质灾害,其发生和发展受限于地质条件和自然营力的作用,也受到人类工程活动的显著影响。大型滑坡规模大、突发迅速,脱离母岩滑移过程中形成较大的势能差,常造成一系列的复合地质灾害,产生链式反应,典型的灾害链为崩→滑→流一体的链式反应地质灾害,给社会带来重大的伤亡和损失。

我国是世界上滑坡灾害最为严重的国家之一。20 世纪以来,灾难性滑坡频繁发生,其中比较典型的有宁夏海原地震滑坡(1920.12.16)、四川岷江叠溪滑坡(1933.8.25)、云南禄劝滑坡(1965.11.22)、四川唐古栋滑坡(1967.6.8)等。进入 20 世纪 80 年代,我国大型滑坡进入了一个新的活跃期,相继发生了长江鸡扒子滑坡(1982.7.18)、甘肃洒勒山滑坡(1983.3.17)、长江新滩滑坡(1985.6.12)、重庆中阳村滑坡(1988.1.1)、四川华蓥溪口滑坡(1989.7.10)、云南昭通头寨沟滑坡(1991.9.23)、云南元阳老金山滑坡(1996.6.1)、贵州岩口滑坡(1996.7.18)、西藏波密易贡滑坡(2000.4.9)、云南兰坪滑坡(2000.9.3)、长江三峡千将坪滑坡(2003.7.13)、四川丹巴滑坡(2005.2.18)、四川“5·12”汶川大地震特大型滑坡(2008.5.12)及青海“4·14”玉树地震(2011.4.14)特大型滑坡等。这些滑坡以其规模大、危害大等特点著称。正是因为滑坡灾害的严重性及机理复杂性,滑坡问题研究已经成为岩土工程与地质工程领域的热点问题,它推动了滑坡稳定性分析与评价理论及其治理方法不断向前发展。对滑坡的稳定性进行准确评价是治理滑坡和防灾减灾的重要前提,因此,滑坡稳定性分析与评价一直是岩土工程领域的重点研究课题。

在滑坡风险性评价中,大致经历了三个阶段。第一阶段是传统单值分析方法即稳定系数法,这种方法基于刚体极限平衡法,属于确定性计算方法,具有较长的工程应用历史和广阔的工程应用领域,基于这种方法岩土工程师积累了大量的工程经验,然而这种确定性方法最大的不足是忽略了滑坡的随机不确定性和相关

性。第二阶段是将可靠性理论引入到滑坡的稳定性评价中去,这样做可有效地解决滑坡系统内的不确定性和相关性,可以有效地给出边坡的失稳程度、工程风险等级,为边坡工程防治提供技术支持,针对不同的边坡治理方案进行比对寻优,支护设计时不同的设计方法直接关系着工程的损失及效益,这时候就有一个最优化设计,即寻找一种将损失减少到最小,但可以创造最大效益的支护方案,然而传统的单值稳定系数法,基于极限平衡法,则不能给出边坡的风险效益评估。第三阶段是将模糊数学与可靠性理论相结合来研究滑坡的稳定可靠性,将滑坡事件作为一种模糊事件,通过模糊概率分析来评价滑坡的稳定性。这些方法大多建立在传统的极限平衡基础上,关注衡量滑坡可靠性的整体指标,假设破坏沿着假定滑动面发生连续的整体滑动,沿滑动面的稳定可靠性指标(如稳定系数、可靠性指标、破坏概率等)为一个常值。然而,大量滑坡失稳工程实例表明,在剪切滑移过程中,滑坡上不同条块间的岩土强度、法向应力、切向应力、孔隙水压力等以差异荷载分布在滑面上,由此可以判断,滑动面上不同点处的可靠性指标是变化的,并不是一个定值。

然而,大量理论研究和工程实践都表明,滑坡失稳现象并不是滑动面上各点在同一时间一起达到极限状态的,斜坡的破坏是由局部到整体不断蠕变、扩展的过程,以至于形成整个贯通的滑动面。滑坡渐进性变形的现象,在野外滑坡长期监测及室内模型试验的对比研究中都可以得到证实,坡体的破坏存在一个由发生、发展到失稳的过渡过程,不可能是一次性突变而成的。不同的阶段,滑坡渐进破坏的表现形式有所差异,破坏初期发生于滑坡后缘较早出现的拉张裂缝,并形成向下错动的陡坎,随着坡体蠕动的进一步发展,坡体上不同点下滑速度不同,导致两侧羽状裂缝的形成,滑坡体局部破坏逐渐向整体方向扩展。局部破坏发生后,如果不能采取及时有效的支护措施,随着裂缝进一步扩展,最终将导致整体滑面的贯通;若在裂缝出现的初期采用一些抗滑结构物对坡体进行支挡,可以终止破坏发展的趋势,使坡体达到长期的稳定状态。通常情况下,局部破坏产生的拉张裂缝等迹象很明显,任其自然发展将导致滑坡变形失稳。然而,少数情况下,局部破坏宏观迹象并不明显,没有宏观的表现形式,这时由于降雨、开挖坡脚等原因,坡体内产生应力集中或应力分异现象,扩展破坏在坡体内已慢慢发展,渐进失稳已经开始了。因此,以往的相关分析理论忽略了滑坡破坏的渐进过程<sup>[1]</sup>,单单认为是滑坡是瞬间一次性破坏,往往与实际情况不符。

在滑坡瞬间破坏分析中,基于经典可靠性理论研究滑坡的方法大多建立在传统的极限平衡基础上,在进行滑坡稳定性评价时,强调的是滑坡稳定性单值整体指标的求解,常用的指标有滑坡整体的稳定系数  $F_s$ 、整体破坏概率  $P_f$  及滑坡整体的可靠度指标  $\beta$  等。在这些指标的求解过程中,假设破坏沿着假定滑动面发生连续的整体滑动,认为局部指标与整体指标相同,沿整个滑面没有变化。事实

上, 滑面上各点应力及岩体强度等并非均匀分布, 外界作用如水渗透等也是非均匀的, 因此滑面上各点的破坏概率(可靠指标)是不同的。极限平衡法, 无论是定值的或是概率的, 都将土体视为一整体, 破坏面上每个土条的安全系数或破坏概率都相等, 都等于整个土坡的安全系数或破坏概率, 这种分析思路实质上割裂了滑坡的孕育→变形→失稳破坏的内在演化规律。

滑坡的稳定性分析是研究滑坡机理、滑坡预测预报及防治的基础。滑坡的稳定性受多种因素的影响, 实际工程中, 影响滑坡稳定性的不确定性因素不可避免地掺杂进去, 这些因素包括滑坡的破坏机理、分布荷载、岩土体的性质等。按因素的诱因可将这些不确定性因素分为如下几种: 数理统计分析的随机性, 地质力学模型抽象的随机差异性, 岩土体物理力学参数及因经验判断不足所引起的不确定性。一般来说, 不确定因素包括岩土体物理力学性质本身所固有的自然变异性、原位试验及室内试验误差带来的不确定性、土层(岩层)地质剖面及与岩性分界线的不确定性、作用荷载大小和方向的不确定性、模型函数选取的不确定性、土工试验样本数量不足引发的不确定性等。我们可以将这些不确定性因素归纳为两种, 一种是随机不确定性, 主要体现在荷载条件、地质环境、不同的施工环境与条件等; 另一种是模糊不确定性, 主要体现在岩土体分类、边坡的变形破坏特征、岩土的物理力学参数等。应用传统方法对滑坡稳定性进行评价时, 忽略滑坡系统的模糊性, 总是基于人为主观判断进行模型简化。建立稳定可靠性函数关系时, 函数中仅涉及对稳定性起控制作用的主要参变量, 通过计算稳定系数功能函数, 当功能函数等于零时得到相应的数值解, 用它们来对滑坡进行稳定性评价, 这种做法, 显然不妥, 评价结果人为因素较大, 不同人的评价结果差别很大, 所以基于精确计算方法的滑坡可靠性评价是不准确的。深入研究证明: 模糊性所体现的不确定性比其随机性更深刻、更具有普遍意义。

另外, 可靠性观念基于二值逻辑基础, 它反映了人们的精确思维模式, 将复杂的、模糊的系统可靠性问题简单地视为精确的数学问题并不能真实地反映客观实际, 特别是在岩土工程中, 不是所有的不确定性都是随机的, 基于认知的不完全信息导致的不确定性就不能用概率理论来处理。滑坡工程中, 首先, 由于斜坡岩土体的分类具有模糊性, 地层之间的界限并不是绝对的; 其次, 滑坡的变形破坏特征也具有模糊性(滑坡岩土体从弹性变形到塑性变形无明显的标志, 坡体从完好到受损, 到破坏, 都是渐进的过程); 最后, 斜坡岩土体的力学参数具有模糊性。由模糊数学创始人 Zadeh 提出的精确性与复杂性互克原理告诉我们, 随着滑坡系统复杂程度的不断加大, 人们对其稳定性作出精确而有意义的的能力也相应降低, 直到趋于某一阈值, 一旦超过该值, 我们作出的精确而有意义的判断呈现出很大程度的相斥特性<sup>[2]</sup>。因此, 对于滑坡这样一个复杂的系统, 单纯用可靠性理论评价是不够的, 有必要发展既考虑随机性又考虑模糊的评价方法, 即模糊随



机可靠性分析方法。

鉴于上述问题,本书从滑坡渐进破坏的时空发展特点出发,采用区别于可靠性理论的模糊随机理论探讨研究,以河南省嵩县一土石混合体滑坡为例,分析滑坡区工程地质条件、滑带土特征及滑坡渐进破坏影响因素,阐述其渐进破坏机理;采用随机-模糊处理方法确定模型随机变量;基于岩土体的空间变异性,考虑参数的相关性,以模糊随机变量为基本变量建立了滑坡渐进破坏的模糊极限状态方程;选取隶属函数对渐进破坏极限状态方程进行模糊化处理,建立具有二维渐进破坏面的滑坡模糊随机可靠度模型。在此基础上,研究滑坡局部破坏的产生、扩展至破坏的渐进过程;结合颗粒流离散元数值模拟手段印证渐进破坏模糊随机可靠性分析的合理性,再现滑坡渐进破坏过程。

通过这一研究,可较系统地分析坡体内局部破坏的产生、扩展以及整体滑动破坏的过程,对如何预防滑坡的发生,滑坡发生后如何进行处治以保证滑坡稳定,具有重要的现实意义。如果掌握了滑坡渐进破坏的规律,在滑坡变形的某个阶段采取相应的加固或安全措施,就可以避免或者减少灾害的发生。

## 1.2 滑坡渐进破坏机理国内外研究现状

Terzaghi<sup>[3]</sup> (1936) 在研究土质边坡稳定问题时首次提出土体渐进破坏的概念。他应用应力分异性理论和抗剪强度的重新分布理论,阐述土体材料由初始强度向塑性流动转变的渐进破坏状态。Skempton<sup>[4]</sup> (1964) 指出土体发生破坏时并非在整个滑面同时出现塑性区,而是变形始于局部,并逐渐贯穿形成整个滑裂面。Skempton (1966)、Bishops (1966)、Bjerrum (1966) 和 Romani (1972) 等针对边坡渐进破坏的机理进行了研究探讨,首先将边坡稳定性计算与渐进性破坏机理结合起来<sup>[5-7]</sup>。Skempton (1966) 基于超固结黏土裂缝的模拟研究,分析了该类边坡长期稳定的特征,并指出超固结黏土裂缝边坡的破坏始于局部,滑动面的形成不是一蹴而就的,而是具有渐进扩展的特征。边坡破坏部分的抗剪强度由峰值快速下降至残余强度,他指出造成这一结果的原因是裂缝黏土的应变软化特性。Bjerrum (1967) 指出滑体在疲劳荷载作用下,表现出一定的应变软化特征,他深入研究了边坡渐进破坏发生的机制,建立了开挖边坡渐进破坏的力学模型,提出用“转移概率”来研究边坡渐进破坏稳定性。澳大利亚的 Chowdhury 教授做了不少研究工作,他从 1978 年陆续发表了一系列的文章研究边坡渐进破坏过程,1982 年他将黏聚力和摩擦系数假定为独立的随机变量,建立了从坡脚开始,破坏向上发展在空间上连续的渐进性破坏简单的计算模型,之后对边坡渐进破坏的机理作了相关阐述<sup>[8-10]</sup>。



渐进破坏机理研究主要是指从材料的强度特征（如应变软化和蠕变软化等），岩土介质的空间变异特性，坡体应力分布不均匀以及外荷载作用的局部性等方面分析斜坡的渐进破坏。滑坡渐进破坏力学机制的研究可以总结为以下几点：①当前的渐进破坏研究已经不仅仅局限于传统应变软化特征的黏土，而是拓展至几乎所有岩土介质（边（滑）坡，坝肩岩体<sup>[11-13]</sup>，破裂岩体<sup>[14-16]</sup>，黄土斜坡<sup>[17]</sup>，砂土<sup>[18]</sup>，接触面<sup>[19-25]</sup>等）。②引起渐进破坏的扰动因素十分复杂，主要包括：应力应变场的不均匀分布、岩土材料的强度软化（应变软化、饱水软化、蠕变软化及损伤软化等）；岩土介质的空间变异性及软弱夹层<sup>[26,27]</sup>、裂隙<sup>[28]</sup>、结构面的存在；外荷载作用（如水的作<sup>[29,30]</sup>、开挖爆破等<sup>[31,32]</sup>）及动态性边界条件的限制及改变、局部应力释放及转移等。③滑坡渐进破坏实质上已经演变成具有时间和空间两层含义的复杂概念。时间尺度上认为滑坡破坏并不是瞬间发生的，而是经历了起始变形、变形发展直至整体破坏的持续过程。空间上认为滑坡破坏不是整体同时发生的，虽然有时从外观看起来如此，而是经历了局部变形破坏，应力转移，破坏扩展传递，破裂面贯通，滑坡整体失稳的空间过程。

在几十年的工程实践分析及室内滑坡机理的研究、野外滑坡的长期监测过程中，边坡渐进破坏的理念逐渐被国内外广大学者所认可，渐进破坏模式是滑坡失稳破坏的真实过程，反映了滑坡渐进破坏现象的客观性和普遍性。大量专家学者对滑坡渐进破坏机理已经做了较深入的研究，并得出了一系列非常有学术价值的成果。目前基于滑坡渐进破坏的研究现状可以总结为以下三个方面：一是借助刚体极限平衡法，研发可用于分析渐进破坏特性的理论方法及判据，并由此拓展到滑坡工程的随机分析、稳定概率及可靠性分析等方面；二是综合地质调查、室内滑坡机理试验、数值模拟手段、物理模拟以及解析力学等手段研究滑坡的渐进破坏过程，从滑坡渐进破坏的物理力学机制方面进行研究；三是将滑坡渐进性破坏机制与滑坡预测预报理论相结合，研究滑坡发生的时间空间规律，并作出正确合理的预测。

### 1.2.1 滑坡渐进破坏研究与稳定可靠性分析理论的结合

Bjerrum (1967) 最早提出边坡的整体稳定分析的条块破坏转移概率的观点。Chowdhury (1982) 将黏聚力和摩擦系数假定为独立的随机变量，建立了从坡脚开始，破坏向上发展在空间上连续的渐进性破坏简单的计算模型，计算了边坡渐进破坏的可靠度。王家臣<sup>[33]</sup> (1992) 从三维观点出发，对边坡的渐进破坏进行了系统研究，他提出渐进破坏是沿着临界滑面在空间上连续发展的过程，以抗剪力与剪力之差定义安全余量，用破坏转移概率判别破坏区的渐进扩展，对某露天煤矿的滑坡实例进行了计算分析，其结果与实际观测及边坡破坏的机理试验有很好的 consistency。刘爱华<sup>[34]</sup> (1994) 将渐进破坏概念引入到边坡稳定可靠性评价

中,从渐进破坏的力学机制出发,归纳出边坡渐进破坏模式的二维方程,较为合理地解释了边坡破坏后,力学参数由峰值强度降低至残余强度的原因,通过该模型同时用一次性破坏分析方法以及有限元数值模拟手段对比分析,模拟结果表明,渐进破坏模型可用于界定边坡的破坏范围并进行稳定性较核。周前祥<sup>[35]</sup> (1996) 基于岩体的空间变异性,采用刚体极限平衡法,通过构造安全余量隶属度函数,得到了边坡渐进破坏形式的二维计算模型,对边坡稳定性随机可靠性公式进行了相应推导。谭文辉<sup>[36]</sup> (1997) 提出边坡破坏的特性,并基于这一观点,将岩土的空间变异性应用到计算模型中,构造了边坡渐进破坏的三维计算函数,通过对某一工程实际的计算分析,并与二维渐进破坏计算模型的计算结果对比,表明三维分析能够很好地描述边坡破坏的过程,三维模型计算结果更能反映边坡渐进破坏的特征。余清仔等<sup>[37]</sup> (1998) 对水的侵蚀、硫化矿物的氧化性等对边坡渐进破坏的不同程度的影响作了详细分析,并对德兴铜矿岩体边坡渐进破坏模式进行了分析。Miao & Ma<sup>[38]</sup> (1999) 基于 Maxwell 流变模型,考虑岩土介质的流变特性,对常规的简 Janbu 法进行了改进,系统探讨了具有渐进破坏特征边坡的影响因素。王庚荪<sup>[39]</sup> (2000) 基于边坡渐进破坏特征,引入一种新的接触单元对滑动面上接触摩擦状态进行模拟,分析了边坡的渐进破坏过程及稳定性,为了克服模拟过程迭代时间长、耗费机时等缺点,运用紧缩技术进行模拟分析,结果表明,常规的不考虑破坏渐进性的计算模拟得出的稳定系数较考虑渐进特性的模拟方法大 5%~10%。杨庆等<sup>[40]</sup> (2000) 以白云鄂博铁矿的主矿边坡为例,引入经济决策理论,采用渐进可靠性计算方法,对边坡的主要影响因素进行了系统的研究,并考虑到该主矿边坡的特点对其收效进行了评价。李伟<sup>[41]</sup> (2000) 通过分析膨胀土地区路基出现的病害,包括路基下沉、坍塌、纵裂、溜坍以及边坡滑动等,提出了一种边坡渐进破坏的极限分析方法。刘忠玉<sup>[42]</sup> (2002) 考虑了土体的流变效应,采用 Maxwell 松弛模型,考虑到了土质边坡渐进破坏的应变软化性,提出时间安全系数概念,并用它来评价边坡的稳定性。李杰<sup>[43]</sup> (2002) 基于边坡稳定性分析剩余推力法,考虑了滑带土的流变特性,建立了滑坡的地质力学模型,为形象地描述滑坡渐进破坏发展的力学过程,通过数值手段进行破坏机理的研究,并指出一个可靠的边坡稳定性分析方法应该考虑到渐进性破坏的影响。吴小将等<sup>[44]</sup> (2003) 认为黏土土坡渐进破坏主要与硬黏土强度的逐步丧失有关,强度丧失的机理可以分减胀软化、损伤软化和减压软化三种。谢支钢<sup>[45]</sup> (2003) 为有效地模拟边坡渐进破坏的力学过程,采用接触摩擦弹簧计算单元。数值模拟结果表明,把土体视为应变软化材料,土体破坏后仍有一定的残余强度,比将土体当成脆性材料,破坏后土体抗剪强度降为 0,所得到的稳定系数要小 5%~10%,在考虑材料的变异性时,稳定系数对残余强度影响较为敏感。涂帆等<sup>[46]</sup> (2004)、吉锋<sup>[47]</sup> (2004) 也进行了大致相同的研究,它们使用的方法基

本相同,在土的抗剪强度参数的变异性及相关性的基础上,用传统可靠性分析方法研究土坡渐进破坏问题。杨庆<sup>[48]</sup> (2005)详细阐述了土工格栅加筋边坡渐进破坏二维可靠性分析的基本原理和分析方法,并采用 Monte-Carlo 随机模拟方法对三种不同的均质黏性土加筋边坡进行了渐进破坏可靠性计算。吴晓明<sup>[49]</sup> (2006)结合可靠性双指标准则,分别研究了均质土坡的脆性渐进破坏,应变软化渐进破坏问题。昭江<sup>[50]</sup> (2007)基于降雨作用影响的边坡破坏特征,推导了工程中应用的降雨入渗深度计算公式,并通过工程实例,证明了公式的合理性,在此基础上,给出了考虑降雨入渗作用下边坡渐进性破坏的变形特点与成因机理。Zhang 等<sup>[51]</sup> (2007)在传统条分法的基础上,提出了一个能考虑土体的应变协调平衡的简化模型来评价应变软化边坡的稳定性,认为不仅土的抗剪强度(如黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$ )制约了边坡的稳定性,而且土的应力应变在一定程度上也对土坡的稳定性造成一定的影响。江学平等<sup>[52]</sup> (2007)运用概率分析的方法求解局部破坏概率,论证了渐进破坏概率分析的可行性,最后提出了治理边坡渐进失稳的主要措施。肖莉丽等<sup>[53]</sup> (2011)采用渐进破坏力学模型和 Monte-Carlo 概率原理,以巴东县枣子树坪滑坡为例,对库水位变动和降雨两种工况下的滑坡局部稳定性进行了分析研究。

### 1.2.2 滑坡渐进破坏的物理力学机制研究

室内滑坡机理试验研究及大量滑坡实例的长期观测都证明了边坡破坏的真实过程,国内外许多学者在这方面进行了相关研究。Palmer&Rice<sup>[54]</sup> (1972)在室内分析试验的基础上,基于力学模型法研究了边坡滑动面的形成过程,通过模型试验证明,超固结黏性土坡在长期的地应力作用下安息固结,边坡局部破坏出现裂缝后,因为土体间胶结性强,经过若干年后边坡才会发生整体失稳,反映了黏性土坡渐进破坏的力学过程。刘祖典等<sup>[55]</sup> (2004)研究了黏性土在不同固结状态下的强度指标变化规律,解释了滑坡渐进破坏的影响因素,认为当坡体中的局部剪应力大于土的局部抗剪强度时,渐进破坏力学模式才逐渐表现出来,土体的  $\sigma$ - $\epsilon$  具有很大的峰残强度比(峰值强度比残余强度),应力-应变曲线为软化型,并指出由于土体软化性和渐进失稳的影响,在有结构强度的黄土或超固结黏性土中在土体滑动的瞬时,具有较低的强度,该强度值才是滑坡发生破坏的实际强度值,位于峰值强度和残余强度之间。卢肇均<sup>[56]</sup> (1999)总结了黏性土抗剪强度研究的现状,综合论述了抗剪强度方面的四个重要问题,指出滑面上土体的强度值由峰值强度降为残余强度时滑坡发生渐进性破坏,对于这一类受应变软化材料制约的边坡,应重点分析材料峰值后阶段的强度特性。Bedoui<sup>[57]</sup> (2009),运用<sup>10</sup>Be 测年技术,对法国阿尔卑斯山区的深层岩质滑坡进行了系统调查,发现该滑坡的渐进变形已持续了超过 1 万年,滑坡存在明显的三个阶段蠕变变形。

Domfest 等<sup>[58]</sup> (2008) 通过深部位移原位试验、监测数据、地质勘查以及反演分析等手段深入研究了美国科罗拉多河南岸一缓倾基岩岸坡的分块渐进破坏特征,发现该地区滑坡分块渐进破坏已持续了 20 余年,并揭示了滑面的抗剪强度随时间而衰减的规律。秦四清<sup>[59]</sup> (1993)、刘汉东<sup>[60]</sup> (1996)、黄润秋<sup>[61]</sup> (1997)、金小萍<sup>[62]</sup> 分别通过物理模型试验研究滑坡的渐进破坏过程,将其应用于边坡失稳时预报理论与方法中。马崇武<sup>[63]</sup> (1999) 基于流变学中土体流变理论,建立了滑坡分析过程中的流变力学模型,然而由于计算模拟时需提前指定滑坡的初始破坏部位(坡脚或坡顶),该模型的推广受到一定的限制。Leroueil<sup>[64]</sup> (2001) 构造了边坡物理模型,对边坡不同破坏部位的力学机制进行了较为系统的研究,对具有应变软化土体材料边坡的渐进破坏过程进行了数值模拟,再现了边坡局部破坏、发展、失稳的全过程。芮勇勤<sup>[65]</sup> (2002) 借助基于岩石破裂与失稳过程仿真的 RFP A2D 程序,通过对一发育软弱夹层的边坡渐进破坏力学过程进行仿真模拟,再现了该类边坡局部破坏→发展→破坏的全过程,分析了滑坡渐进破坏的变形特点及形成机制,并对边坡的防治规律进行了探讨,同时得出具有复杂结构边坡的变形破坏是一些简单机理演化的结果这一结论。胡启军<sup>[66]</sup> (2005) 结合理论研究、数值模拟和模型实验分析了长大顺层边坡的渐进滑移失稳机理,针对不同的防治措施,通过对渐进破坏的数值分析,并提出了有效的治理措施。王永刚<sup>[67]</sup> (2006) 对双层反翘滑坡渐进破坏的力学模糊及时效特点进行分析,根据滑坡渐进破坏过程的定量分析,建立了“叠合梁”、“多层薄板”的渐进破坏力学模型,基于渐进破坏力学机制,研究了滑坡的蠕滑时效效应。Urciuoh<sup>[68]</sup> (2007) 认为滑坡岩土体通常表现出应力集中或应力分异状态,因为降雨作用等触发的外滑坡外边界条件的改变加速了坡内岩土体应力集中,从这一点可以说明,所有边坡的变形失稳最初都是产生于局部,随着岩土塑性区的发展转移而形成贯通的滑面。唐芬等<sup>[69]</sup> (2008) 认为边坡的破坏是一个累积破坏过程,由于含水量变化以及应变的累积,土体的强度参数  $c$ 、 $\varphi$  以不同速度发生衰减,从而形成剪切带,随着剪切带的不断延伸,最终导致边坡破坏,采用后勤工程学院研制的石结构面直剪仪,着重对土的强度特性及  $c$ 、 $\varphi$  作用机理进行了深入探讨。Liu<sup>[70]</sup> (2009) 构造了一个既能满足应力平衡条件,同时也能满足应变协调条件的一维力学模型,解释了材料应变软化特性对边坡的渐进破坏力学行为的影响,该模型可给出边坡渐进破坏时作用于滑动面上的应力-应变曲线,求解边坡破坏时的应力解析解。邹宗兴等<sup>[71]</sup> (2012) 提出了大型顺层岩质滑坡渐进破坏地质力学模型,通过应用于重庆武隆县鸡尾山滑坡中,模型能很好地体现滑坡渐进破坏过程中滑带力学参数的时效性及空间变异性特点。马俊伟<sup>[72]</sup> (2016) 从滑坡变形演化的角度,采用室内模型试验、野外监测和理论分析相结合的手段,收集了滑坡演化过程中的力学、物理状态参量,揭示出滑坡地质系统演化过程的多场

信息演化、迁移规律；引入经典数据挖掘算法，建立了多场耦合作用模式下，滑坡变形演化与外部诱发因素多维关联规则，构建了滑坡变形演化多场信息阈值判据。为考虑位移因素对滑坡渐进性发育的影响，王振<sup>[73]</sup>（2016）在传统 Janbu 法的基础上，提出了滑坡稳定性简化评价方法，初步考虑了滑带岩土体的抗剪能力与剪切位移的关系，针对推移式滑坡，所提出的方法可有效模拟边坡从开始破坏到最终滑动面贯通的发育过程。

正是因为滑坡渐进破坏力学机制的复杂性，较真实的反演边坡渐进从局部发生到贯穿整个边坡的过程比较困难。然而，通过与数值模拟技术相结合，利用工程中常用的数值仿真模拟软件（如 FLAC 2D/3D、DDA、UDEC、3DEC、RFPA 等）可达到较为理想的效果，研究成果十分丰富。鲁群志<sup>[74]</sup>（1999）采用 DDA 软件，基于非连续变形分析方法模拟分析了矿山边坡变形破坏的渐进破坏过程，DDA 方法可真实地反映出边坡的运动破坏过程，采用该方法研究边坡渐进性失稳破坏力学模式具有一定的学术参考意义。程谦恭等<sup>[75]</sup>（2000）基于有限元数值模拟方法，建立了与边坡实际情况相符的力学地质模型，采用弹塑性与黏弹-黏塑性本构方程，模拟再现了高边坡岩体破裂、变形、破坏及失稳前后锁固段岩体渐进性破坏的机制和过程，探讨了高压水流作用下滑坡启程剧动的破坏机理。谭文辉<sup>[76]</sup>（2000）同时进行了岩质边坡渐进破坏的物理模拟和数值模拟，数值模拟分析借助于 FLAC 有限差分软件，两种计算方法得到了较好的一致结果，再现了边坡由坡脚和坡顶开始向中间贯通的过程。张鹏等<sup>[77]</sup>（2003）提出了基于渐进破坏特征的边坡稳定性有限元分析方法，进行稳定性分析时，岩土强度参数在破坏前后分别采用峰值强度和残余强度，并对考虑渐进破坏特征假定时与整体极限平衡法计算结果的误差进行了对比分析。Eberhardt<sup>[78]</sup>（2004）结合运用不连续介质模型、有限元模型及离散元模型等三种不同的数值模拟手段，对瑞士阿尔卑斯山附近的 Randa 岩质滑坡展开深入的模拟研究，阐明了滑坡的渐进破坏模式并对其启动机制进行了探讨。王志伟<sup>[79]</sup>（2005）采用应变硬化（软化）遍布型节理本构模型，综合考虑峰值强度与残余强度的共同作用，开展裂缝性黏土边坡渐进性破坏的 FLAC 数值模拟，模拟结果表明，坡脚处首先出现应力集中，然后坡顶出现沿拉裂缝的剪性屈服，进而应变集中区分别从坡底与坡顶向中间扩展，同时应变率集中区也有所加宽。陈亚军等<sup>[80]</sup>（2006）指出岩质边坡中发育大量裂缝，这些裂缝是经过不同程度损伤形成的，通过对裂缝进行数理统计分析，引入虚拟节理模型，凭借二维离散元分析程序 UDEC2D，模拟研究了节理岩质边坡仅在自重场作用下的渐进破坏规律，通过理论分析与数值计算，总结了单组节理岩体边坡渐进破坏特征。董倩等<sup>[81]</sup>（2010）在分析崩塌堆积体稳定性影响因素的基础上，采用 FLAC 内嵌 fish 程序语言对崩塌堆积体边坡的渐进性破坏过程进行仿真模拟分析，清晰地揭示了崩塌堆积体边坡渐进破坏的演化过