

学校编码: 10384

密级_____

学号: 25320121151703

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

降雨和冻融作用下边坡破坏的三维正则化
高效无网格模拟研究

Three dimensional efficient regularized meshfree
simulations of slope failure induced by rainfall and freeze-
thaw processes

孙明

指导教师姓名: 王东东 教授

专业名称: 工程力学

论文提交日期: 2015年4月

论文答辩日期: 2015年5月

2015年4月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘 要

边坡失稳破坏是一类常见的自然灾害形式。边坡破坏诱发的因素很多，其中尤以降雨引发的滑坡灾害最为突出。同时，随着西部大开发的深入，寒冷地区冻融作用导致的边坡破坏也日益受到重视。然而，边坡失稳涉及到土体骨架、水(冰)、空气等多相耦合即相互作用，是一个复杂的非饱和土体大变形损伤破坏过程，需要借助精确高效的数值方法进行分析、预测和预防。本文利用无网格法仅采用节点离散、适于大变形分析的优点，着重研究了降雨及冻融影响下边坡破坏的三维高效无网格数值模拟方法。

本文首先针对降雨诱发边坡破坏问题，从守恒定律出发讨论了边坡非饱和土体的多相耦合控制方程及其等效积分弱形式。为了提高计算效率和解决边坡损伤破坏中由应变软化导致的离散敏感性问题，文中采用稳定节点积分和二次应变光滑方法，构造了变形和孔隙水压力的二次应变光滑无网格离散形式，详细推导建立了降雨诱发边坡破坏模拟的三维稳定节点积分正则化大变形无网格模拟方法。对于地震引发的边坡破坏，该方法也可将地震作用作为体力荷载进行分析。随后，针对冻融作用下的边坡破坏问题，文中考虑了土体骨架、水、冰、气四相作用，导出了各相的耦合控制方程和对应的变分形式，并采用稳定节点积分和二次应变光滑无网格离散方法，发展了模拟边坡冻融破坏的三维高效无网格法。文中系列算例表明所提三维无网格法对降雨和冻融作用下边坡破坏的计算结果和实验结果有较好的吻合度，能够有效模拟降雨和冻融因素作用下边坡动态破坏的演化过程，可为滑坡灾害的分析、预测和预防提供可靠的理论依据。

关键词： 三维无网格法，边坡，降雨，冻融，耦合作用，损伤破坏，正则化二次应变光滑

Abstract

Slope failure is one of the most frequently occurred natural disasters. Among many factors causing slope failure, rainfall is widely recognized as a major driving force. Meanwhile, with the rapid development in China western regions, the slope failure caused by the freeze-thaw processes of the water in the slope also become an important issue that deserves thorough investigation. However, the slope failure is a complex process including the coupling and interaction of soil skeleton, water (ice), and air. Thus usually it is hard to analytically study this problem and consequently numerical methods are preferred to analyze, predict and prevent such failure. In this thesis, the advantage of node-based meshfree method on large deformation is fully employed to develop a three dimensional efficient regularized meshfree approach for reliable simulations of slope failure induced by rainfall and freeze-thaw processes.

Firstly, the governing equations of unsaturated soil for the rainfall-induced slope failure are discussed in detail within the framework of balance laws. In order to improve the computational efficiency and regularize the discretization related material instability, the two-level strain smoothing technique with the stabilized conforming nodal integration is invoked to develop meshfree approximations for the soil deformation and water pressure fields, and construct the three dimensional efficient regularized meshfree algorithm for the simulation of rainfall induced slope failure. It is noted that the investigation of earthquake induced slope failure can be incorporated into the present framework via putting the earthquake inertia into the body force term. Secondly, the governing equations for the freeze-thaw triggered slope failure are derived based upon the balance laws, where four phases, namely, soil skeleton, water, ice, and air are considered. Subsequently, the corresponding three meshfree algorithm is again designed by employing the two-level strain smoothing strategy. Numerical examples show reasonably good agreement between the simulation results and the experimental or in-situ observations, which demonstrate that the proposed meshfree approach is capable of effectively simulating the dynamic slope failure problem induced by rainfall and freeze-thaw processes and provide a useful tool for the analysis, prediction and prevention of slope failure.

Key Words: Three dimensional meshfree method, slope, rainfall, freezing and thawing,

coupling, damage and failure, regularized two-level strain smoothing formulation

厦门大学博硕士学位论文摘要库

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
第一章 绪论	1
1.1 引言.....	1
1.2 无网格法的发展概况.....	2
1.3 本文选题背景.....	4
1.4 本文主要内容.....	5
第二章 无网格法基本理论	7
2.1 无网格形函数.....	7
2.2 伽辽金无网格法的基本列式.....	9
2.3 无网格法的空间积分方法.....	10
2.4 应变二次光滑与正则化无网格离散方法.....	13
2.5 小结.....	14
第三章 三相耦合土体控制方程与三维正则化无网格分析方法.....	15
3.1 土的三相物理性质.....	15
3.1.1 土的成分.....	15
3.1.2 达西定律.....	17
3.1.3 有限变形的物质描述.....	18
3.2 控制方程.....	19
3.2.1 质量守恒与连续方程.....	20
3.2.2 线动量守恒与运动方程.....	23
3.3 伽辽金弱形式.....	25
3.4 无网格离散.....	26
3.4.1 无网格近似.....	26

3.4.2 时间离散.....	29
3.4.3 Drucker-Prager 强度准则和损伤模型.....	30
3.4.4 客观增量时间积分方法.....	31
3.5 小结.....	34
第四章 降雨诱发边坡破坏的三维无网格模拟.....	37
4.1 梯形边坡降雨诱发破坏的无网格模拟与实验对比	37
4.1.1 梯形边坡的实验结果.....	37
4.1.2 梯形边坡的数值模型.....	38
4.1.3 梯形边坡的数值模拟结果.....	40
4.2 边坡破坏实例模拟.....	43
4.2.1 边坡破坏实例—洋宝地滑坡.....	43
4.2.2 洋宝地滑坡数值模拟.....	44
4.3 地震作用下的边坡破坏模拟.....	47
4.4 小结.....	52
第五章 冻融诱发边坡破坏模拟的三维正则化无网格法.....	53
5.1 冻土的物理性质.....	53
5.2 控制方程.....	55
5.3 伽辽金弱形式.....	58
5.4 无网格离散.....	60
5.5 时间离散.....	62
5.6 数值模拟.....	63
5.7 小结.....	67
第六章 结论和展望	69
6.1 结论.....	69
6.2 展望.....	70
参考文献	71

致 谢.....	78
作者攻读硕士学位期间发表的论文	80

厦门大学博硕士学位论文摘要库

Contents

Abstract in Chinese.....	I
Abstract in English	II
Chapter 1 Introducion.....	1
1.1 Introduction	1
1.2 Overview of Meshfree Method	2
1.3 Motivation of the Thesis.....	4
1.4 Objective and Scope of the Thesis.....	5
Chapter 2 Meshfree Approximation Theory.....	7
2.1 Meshfree Shape Funcion	7
2.2 Basic Equations of Galerkin Meshfree Method	9
2.3 Quadrature Schemes	10
2.4 Regularized Two-level Strain Smoothing Meshfree Method.....	13
2.5 Concluding Remarks	14
Chapter 3 Coupled Three-phase Governing Equations and Three Dimensional Regularized Meshfree Analysis.....	15
3.1 Properties of Soil	15
3.1.1 Soil Ingredients	15
3.1.2 Darcy's Law.....	17
3.1.3 Material Description of Large Deformation	18
3.2 Governing Equations	19
3.2.1 Balance of Mass.....	20
3.2.2 Balance of Linear Momentum.....	23
3.3 Weak Form	25
3.4 Meshfree Discretization	26

3.4.1 Meshfree Approximation	26
3.4.2 Time Discretization	29
3.4.3 Drucker-Prager Plasticity Model and Damage Model	30
3.4.4 Incrementally Objective Time Integration Algorithm	31
3.5 Concluding Remarks	34
Chapter 4 Three Dimensional Meshfree Simulations of Rainfall Induced Slope Failure.....	37
4.1 Meshfree Simulations of Trapezoid Slope Failure Induced by Rainfall and Comparision Between Simulations and Experiments	37
4.1.1 The Experimental Results of Trapezoid Slope.	37
4.1.2 Computational Model of Trapezoid Slope.	38
4.1.3 The Numerical Results of Trapezoid Slope	40
4.2 Meshfree Simulation of Yangbaodi Landslide	43
4.2.1 Yangbaodi Landslide	43
4.2.2 Numerical Simulation	44
4.3 Meshfree Simulation of Slope Failure Induced by Earthquake	47
4.4 Concluding Remarks	52
Chapter 5 Three Dimensional Regularized Meshfree Analysis for Slope Failure Induced by Freeze-thaw in Soil	53
5.1 Properties of Frozen Soil	53
5.2 Governing Equations	55
5.3 Weak Form	58
5.4 Meshfree Discretization	60
5.5 Time Discretization.	62
5.6 Numerical Simulations.	63
5.7 Concluding Remarks	67
Chapter 6 Conclusions.....	69

6.1 Summary	69
6.2 Future Research	70
Reference.....	71
Acknowledgments	78
List of Publicatios.....	80

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第一章 绪论

1.1 引言

我国幅员辽阔，在享受着大自然丰富自然资源的同时，也承受着各种地质灾害所带来的巨大损失。边坡失稳就是最常见的灾害之一，边坡失稳具有突发性强，破坏力巨大，持续时间短等特点，沿途破坏乡村、城镇，淹没道路桥梁，摧毁大坝、房屋，往往对受灾区域造成严重的损失。而边坡失稳的诱发因素多种多样，有自然因素，如暴雨，霜冻等；也有人为因素，如隧道桥梁的开挖，采矿，乱砍乱伐等；也有次生灾害诱发的边坡失稳，如洪涝灾害，地震等都可能诱发边坡失稳。

在我国，统计数据表明^[1]边坡失稳爆发的诱因主要是持续降雨、暴雨，特别是短时特大暴雨。尤其在我国东南沿海省份，边坡失稳爆发的时间规律具有明显的季节性，一般多发生在多雨的夏秋季节，同时伴随着台风，降雨强度在短时间内非常大，极易引发滑坡。对于降雨诱发边坡失稳的研究有着极其重要的地位。2008年5.12汶川地震^[2]是我国建国以来最严重的自然灾害之一，其中地震产生的堰塞湖，同样有着边坡失稳的可能性。而在地震灾区，震区松散的坡体使得边坡失稳的几率暴增，而暴雨将使脆弱的山体产生滑移，形成山体滑坡。

另一方面，我国是世界上第三大冻土大国，冻土地区的边坡主要受到冻胀、冻融的影响而发生失稳破坏。冻土可以分为多年冻土和季节性冻土，季节性冻土中土体的成分随着季节发生变化，其强度随着成分的变化而变化，因此冻土地区的边坡失稳也多呈现出季节性。冻土地区边坡的破坏通常是由土中冰的逐渐融化累积而引发的。随着西部大开发的深入，冻土的研究逐渐得到了学者们的重视。冻土中由于存在土、冰、水、空气四相，并且存在冰与水两相之间的转换，是一门及其复杂的多学科综合问题。

边坡失稳产生滑移，根据边坡的构成，滑移的坡体含有不同成分的粘性土、

石块, 水, 固体物质所占比例达 10%~80%, 固体物质含量越高, 滑坡越突然, 破坏力也越大。边坡失稳过程是一个多相耦合非线性损伤破坏过程, 一般很难通过解析求解来分析, 因而数值模拟成为解决该问题的有效途径。但是, 即使采用数值方法来模拟边坡破坏, 同样涉及边坡土体的大变形的损伤破坏和流固耦合的相互作用等问题, 这些都是数值模拟中的热点和难点。另外, 如何实现多因素影响下复杂的三维边坡破坏模拟也是数值模拟的一个核心问题。

目前应用最为广泛的数值模拟方法为有限元方法^[3], 被广泛应用于各种土木、机械、以及航空等领域。但是传统有限元法在求解裂纹扩散问题、大变形等问题时会产生网格畸变, 会导致计算精度明显下降, 甚至计算中断。虽然重新划分网格能在部分情况下解决上述问题, 但是重新划分网格需要花费大量的时间, 降低了计算的效率。另外, 边坡破坏过程中的应变软化也会引发有限元模拟的网格敏感性问题。因而, 最近二十多年无网格法^[4]得到了快速发展。无网格法只需要将问题的空间区域离散成节点, 通过各节点的位置信息建立形函数, 不需要各节点之间的拓扑连接关系, 十分适合用于大变形损伤破坏分析。迄今, 众多学者提出了多种特色各异的无网格方法^{[5]-[13]}。

1.2 无网格法的发展概况

无网格法起源于 20 世纪 70 年代的光滑质点流体动力学方法(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH)^{[14]-[18]}, 特别是 1992 年 Nayroles 等人^[19]提出扩散元法(Diffuse Element Method, DEM)、1994 年 Belytschko 等人^{[20]-[23]}提出伽辽金无网格法(Element-Free Galerkin Method, EFG)、1995 年 Liu 等人^{[24],[25]}提出再生核无网格法(Reproducing Kernel Particle Method, RKPM)后, 无网格法经历了一个快速发展时期, 众多学者提出了各具特色的无网格法。依据数值积分类型, 无网格法大致可以分为三类:

(1) 伽辽金无网格法

伽辽金无网格法采用等效积分弱形式进行区域离散, 需要采用背景网格进行区域积分。这类方法包括扩散元法(Diffuse Element Method, DEM, 1992)^[19]; 伽

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

廈門大學博碩士論文摘要庫