

断续节理岩体的无网格 流形方法和实验研究

作者: 李树忱

专业: 固体力学

导师: 程玉民



上海大学出版社

· 上海 ·

2004 年上海大学博士学位论文

断续节理岩体的无网格 流形方法和实验研究

作 者： 李树忱
专 业： 固体力学
导 师： 程玉民

上海大学出版社
· 上海 ·

Shanghai University Doctoral Dissertation (2004)

A Meshless Manifold Method and Test Scheme for Fractured Rockmass

Candidate: Li Shuchen

Major: Solid Mechanics

Supervisor: Prof. Cheng Yumin

Shanghai University Press

• Shanghai •

上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查，确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单：

主任：**嵇 醒** 教授，同济大学航空航天与力学学院 200092

委员：**贺鹏飞** 教授，同济大学航空航天与力学学院 200092

张 武 教授，上海大学计算机学院 200072

马 杭 教授，上海大学力学系 200072

刘廷章 教授，上海大学 200072

导师：**程玉民** 教授，上海大学 200072

评阅人名单:

嵇 醒	教授, 同济大学航空航天与力学学院	200092
匡震邦	教授, 上海交大船舶海洋与建筑学院	200240
王铁军	教授, 西安交大建筑工程与力学学院	710049

评议人名单:

沈祖炎	教授, 同济大学土木工程学院	200092
叶志明	教授, 上海大学	200072
李开泰	教授, 西安交大理学院	710049
钱若军	教授, 同济大学土木工程学院	200092
李术才	教授, 中国科学院武汉岩土所	430071
何陵辉	教授, 中国科技大学机械工程与力学系	230026

答辩委员会对论文的评语

李树忱的论文“断续节理岩体的无网格流形方法和实验研究”选题是目前科学和工程计算研究的前沿领域，其工作具有重要的理论和工程应用价值。

论文从节理岩体的分析特点和要求出发，研究合适的数值方法，并进行实验研究。其技术路线跟踪计算力学新思维，探索新方法，强调和重视计算力学和工程应用的结合。所取得的主要创新与成果包括：

1. 建立了基于加权残数法的数值流形方法，并提出了扩展的数值流形方法。

2. 创造性地提出了无网格流形方法，克服了以往无网格方法中处理不连续依赖于数值经验的缺点。并提出了扩展的无网格流形方法。

3. 研究了动态断裂力学的无网格流形方法。

4. 对断续节理岩体裂隙扩展进行了动态 CT 实验和分析。

5. 研究了裂隙扩展的无网格流形方法，并与实验结果进行了对比。另外，还将无网格流形方法应用于工程分析，取得了很好的效果。

该论文具有多方面的创新性，难度大，工作量大。作者具有坚实的数学和力学基础和相关专业宽广的知识，具有较强的独立科研能力。

论文条理清晰，写作流畅，公式推导正确，实验结果和计算结果可靠，是一篇优秀博士学位论文。李树忱同学答辩论述清楚，思路清晰，回答问题正确。

答辩委员会表决结果

经答辩委员会表决,全票同意通过李树忱同学的博士学位论文答辩,建议授予工学博士学位。

答辩委员会主席: 嵇 醒

2004 年 5 月 18 日

摘 要

本文以大型水电地下洞室群(岩石高边坡)中断续节理岩体为研究背景,以数值流形方法和无网格方法为基础,研究了断续节理岩体中岩体不连续及其尖端场的数值模拟方法,并做了相关的实验研究.

本文首先推导了基于加权残数法的数值流形方法.原有的数值流形方法是以最小势能原理或变分原理为基础来建立求解方程的,但在实际工程中科技人员所遇到的有些实际问题,其控制方程所对应的泛函往往是难以找到的,在这些情况下就无法应用变分方法来建立数值流形方法的求解方程,而必须寻找较为一般的方法来推导数值流形方法的求解方程.本文研究了如何从加权残数法出发建立数值流形方法的求解方程,并应用基于加权残数法的数值流形方法求解了势问题,进一步发展了数值流形方法的数学理论,拓宽了数值流形方法的应用范围.

为了模拟岩体结构的实际破坏过程,对于非连续尖端的局部化现象,本文在单位分解法的理论上应用裂隙尖端局部函数来扩展数值流形方法的试函数,提出扩展的数值流形方法.应用该方法可较好地求解裂隙岩体连续和非连续及其所带来的局部化问题.

为了模拟岩体中不连续的扩展情况,克服数值流形方法在裂纹扩展过程中物理网格重构的缺点,本文在数值流形方法和单位分解法的基础上,提出了无网格流形方法.无网格流形方法在无

网格类方法中引入了有限覆盖技术,避免了无网格方法在构造插值函数时由于不连续引起试函数构造所带来的困难. 无网格流形方法属于无单元类方法中的一种,由于它不需要预先建立流形单元,特别适合模拟裂纹扩展问题.

当域内不连续处于覆盖内时,即不连续没有贯穿该节点所形成的覆盖时,在原有的无网格流形方法中采用了透视原则,将覆盖分割成不规则的子覆盖,给计算结果带来一定误差. 为了弥补该方法的不足,本文提出了扩展的无网格流形方法.

为了模拟断续节理岩体在动态荷载作用下的破坏规律,本文在无网格流形方法基础上提出了动态断裂力学的无网格流形方法. 该方法利用单位分解法和有限覆盖建立节点形函数,使形函数的建立不受域内不连续的影响,方便了动态断裂力学问题的求解.

为了验证上述数值方法的正确性,本文采用与 CT 机配套的加载装置,使用相似材料,对单裂纹含水和不含水的标准试件进行了 CT 实时监测实验,以观测裂纹扩展的全过程. 将得到的裂纹扩展路径与本文提出无网格流形方法模拟结果进行对比,验证了数值方法的正确性,并给出试件裂纹尖端应力及位移场的变化关系.

利用本文提出的无网格流形方法,对节理岩体裂隙扩展进行了模拟,说明了本文方法在处理节理岩体问题时的正确性和有效性.

关键词 节理岩体, 裂纹扩展, 动态断裂力学, 数值流形方法, 单位分解法, 扩展的数值流形方法, 无网格流形方法, CT 实验

Abstract

The background of the researches in this paper is the fractured rock mass of the hydropower underground group (rock high slope). Based on numerical manifold method and meshless methods, some numerical methods are presented to simulate the discontinuous domain and the stress field at the tip of a crack for fractured rock mass. And the corresponding tests are done.

At first, in the paper, the numerical manifold method based on the method of weighted residuals (MWR) is presented. The solving equations of the numerical manifold method (NMM) were formed by the minimum potential energy principle before. But for many practical problems, it is very difficult to find the functional of the governing equations, and then the minimum potential energy principle or the variational principle can't be used to obtain the solving equations of the numerical manifold method. As a matter of fact, we must choose a general method to obtain the solving equations of NMM. The paper studies how to obtain the solving equations of NMM from the MWR. And the potential problem is solved by the method in the paper. The method in this paper enriches the mathematical foundation of NMM and extends the applied fields of the method.

In order to simulate the real failure process of rockmass, for the local problems at the tip of the discontinuity, the extended numerical

manifold method is presented based on the partition of unity method. The local trial functions at the tip of the discontinuity are enriched with the analysis solution at the tip. So the method in the paper can solved the problems of the fractured rockmass and the localization with continuity and discontinuity. At the same time, the method can enhance the precision of the numerical result to discontinuous and its tip.

To simulate the discontinuous growth in the fractured rockmass, a meshless manifold (MM) method is presented based on the numerical manifold method and the partition of unity method. The method can conquer the disadvantages of the remesh technique treating with the discontinuous growth problems in the NMM method. In the meshless manifold method, the finite cover technology is applied. And some difficulties in the meshless methods, such as the trial function due to the discontinuity in the displacement, are avoided. The meshless manifold method is a meshless method, which are well suited to problems involving crack propagation due to the absence of any predefined manifold element connectivity.

When the discontinuity lies in a cover in the solving domain such as the tip of crack, the meshless manifold (MM) method use the visibility criterion at the tip of crack to divide a cover into two irregular sub-covers. The method may bring some errors in the result. So the enriched meshless manifold method is presented. The method perfects meshless manifold method.

The meshless manifold method is also used to analyze transient deformations of the dynamic fracture mechanics for failure rule of

the fractured rockmass. So the meshless manifold method of the dynamic fracture mechanics is presented in the paper. The method forms the shape function by the partition of unity and finite cover technology, so the shape functions cannot be effected by discontinuous in the domain. And dynamic fracture mechanics problems can be solved well.

In order to show that the numerical methods in the paper is correct and the full process of crack growth, the CT tests are done. A loading system corresponding to CT machine is designed. The resemble material is used, and the specimens with single crack including hydraulic pressure and no hydraulic pressure are under triaxial compression. When the meshless manifold method is used to analyze the crack growth of the rock samples, the validity and accuracy of the meshless manifold method are illustrated by a numerical example. The numerical results agree to the test ones. At the same time, the curves of the stress and displacement fields at the tip of crack are given.

The crack propagation of the fractured rockmass is simulated by the meshless manifold method. The numerical results show that the numerical methods in this paper are correct and effective to simulate the fractured rockmass problems.

Key words fractured rockmass, crack growth, dynamic fracture mechanics, numerical manifold method, partition of unity, extended numerical manifold method, meshless manifold method, CT test

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 引 言	1
1.2 数值流形方法和无网格方法研究现状	3
1.3 节理岩体实验研究概述	18
1.4 存在的问题及拟采用的解决方法	20
1.5 本文的主要研究内容	22
第二章 基于加权残数法的数值流形方法	25
2.1 引 言	25
2.2 数值流形方法	26
2.3 基于加权残数法的数值流形方法	33
2.4 势问题的数值流形方法	39
2.5 本章小结	43
第三章 扩展的数值流形方法	44
3.1 引 言	44
3.2 数值流形方法的基函数与试函数	44
3.3 单位分解法	46
3.4 扩展的数值流形方法	48
3.5 数值算例	56
3.6 本章小结	60
第四章 基于单位分解法的无网格流形方法	62

4.1	引 言	62
4.2	无网格覆盖的几何描述	63
4.3	试函数的建立	64
4.4	无网格流形方法的求解方程	72
4.5	不连续的处理	75
4.6	数值算例	77
4.7	本章小结	86
第五章	扩展的无网格流形方法	87
5.1	引 言	87
5.2	扩展的无网格流形方法试函数的建立	88
5.3	扩展的无网格流形方法	92
5.4	数值算例	94
5.5	本章小结	97
第六章	动态断裂力学的无网格流形方法	99
6.1	引 言	99
6.2	弹性动力学的基本方程	100
6.3	弹性动力学的无网格流形方法	101
6.4	边界条件的处理	104
6.5	时间积分方案	105
6.6	数值算例	107
6.7	本章小结	116
第七章	节理岩体裂隙扩展的 CT 实验	117
7.1	引 言	117
7.2	实验设备	118
7.3	含单裂纹节理岩体试件压缩的 CT 实验	119

7.4	含有压水单裂纹节理岩体试件压缩的 CT 实验	127
7.5	水压致裂的单裂纹节理岩体试件压缩 的 CT 实验	134
7.6	本章小结	143
第八章	节理岩体裂隙扩展的数值模拟	144
8.1	引言	144
8.2	裂纹扩展分析基础	145
8.3	节理岩体裂隙扩展的数值模拟	152
8.4	本章小结	169
第九章	结论与展望	170
9.1	结论	170
9.2	展望	171
	参考文献	173
	致谢	197

第一章 绪 论

1.1 引 言

目前,国内外岩体工程发展迅速,越来越多的能源、交通、矿山、水利和国防工程建造在岩石地区,其工程设计、施工、稳定性评价和岩体加固等都直接依赖于节理岩体的强度、变形及裂隙的扩展等特性.而大量的岩土工程实践表明,岩土工程的失稳破坏与其内部的节理裂隙的扩展、贯通及渗流密切相关,如法国的马而帕塞大坝溃坝破坏(1959)、意大利的瓦伊昂边坡失稳(1963)和中国长江三峡链子崖滑坡等^[1].本文以大型水利水电工程地下洞室群为背景,重点研究裂隙围岩或软弱围岩在洞室群开挖过程中的裂隙及其扩展等力学行为的数值方法和实验方法,为相关问题的理论研究和工程分析提供好的方法.

近年来,岩体断裂和损伤力学的研究越来越受到广大岩土力学工作者的关注,并取得了大量的成果.岩体损伤力学和断裂力学对节理岩体从微裂纹萌生、扩展、演化到宏观裂纹的形成、断裂、破坏全过程进行研究,旨在更真实地分析裂隙岩体的稳定性.目前,解决岩土力学问题的方法主要有实验方法、理论分析方法和数值模拟方法三大类.这三大类方法相辅相成,互为补充.其中数值模拟是解决岩土工程问题的有效手段,已被学术界和工程界广泛接受作为一种力学状态的分析工具,它越来越多地被应用于岩土体稳定

性、岩土工程设计和岩土工程基本问题分析中, 岩土工程方面的许多专家对岩土力学数值分析方法与最新进展进行了系统的综述^[2-6]. 岩土力学的数值方法主要包括有限差分法(Finite Difference Method)^[7,8]、有限元法(Finite Element Method)^[9,10]、边界元法(Boundary Element Method)^[11-14]、无单元法(Element Free Method)^[15,16]等数值方法, 其中以有限元法应用最为广泛. 有限元在连续性分析方面取得了很大的成功, 但同时也遇到了一些本身不可克服的困难. 例如, 界面处理上的困难, 对任意大变形受制于单元形状的限制等等. 为了充分考虑岩土介质的非连续性、非均匀性和多相性等特点, 有限元法仍然在不断更新和发展之中. 在 1992 年美籍华人石根华博士针对岩土介质的非连续性、非均匀性等特点, 结合有限元法、非连续变形分析方法^[17]和解析方法提出了数值流形方法(Numerical Manifold Method)^[18], 能够统一处理连续和非连续问题, 非常适合于模拟节理岩体的变形规律.

对于岩体这种介于连续与非连续介质之间的材料, 沟通连续变形与非连续变形的桥梁是岩体中地质非连续面的扩展、贯通等破坏行为. 它是连接岩体变形过程中初始阶段与终了阶段的一条纽带, 在整个岩体变形过程中, 这些非连续界面的变形、扩展以及失稳对整个工程岩体结构的稳定性是至关重要的. 而现有的基于网格的分析方法, 多数是以单元离散的思想为基础. 在分析裂隙扩展时, 都遇到了以下两方面的困难: (1) 网格重构的困难; (2) 计算所得裂隙扩展的结果严重地受到网格划分形式的影响.

节理岩体作为一种含有初始损伤的岩体, 在实验方面的研究也得到了飞速发展, 如观测裂纹发展的声发射技术和扫描电镜技术. 而在对裂纹扩展规律的研究中大都使用二维模式, 并且由于实验条件等原因, 目前裂隙节理岩体中的裂隙的扩展规律从细观到宏观的