

蔡德所 著

复杂坝基与滑坡 研究中的 新方法

中国电力出版社

复杂坝基与滑坡研究中的新方法

蔡德所 著

中国电力出版社

内 容 简 介

本书系统介绍了作者近年来以长江三峡工程、清江隔河岩工程为背景,在复杂坝基与滑坡领域中的研究成果和一些新的思想。这些研究涉及面广,学科综合交叉特色鲜明,应用了多学科分支的新成果、新方法,如分形几何、损伤力学、神经网络、CT技术等。

本书可供从事土木、水利、铁道、核能等与岩土工程、水工结构工程有关的科技人员和高等院校的教师、研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

复杂坝基与滑坡研究中的新方法/蔡德所著. —北京:
中国电力出版社, 1997

ISBN 7-80125-522-4

I. 复… II. 蔡… III. ①复杂地层-坝基-研究方法
②滑坡-水利工程-研究方法 IV. TV64

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 23791 号

中国电力出版社出版、发行
(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)
北京地矿局印刷厂印刷
各地新华书店经售

1998 年 1 月第一版 1998 年 1 月北京第一次印刷
850 毫米×1168 毫米 32 开本 7.625 印张 200 千字
印数 0001—1000 册 定价 10.20 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)



作者简介

蔡德所,男,1952年生于武汉市。1979年7月毕业于武汉水利电力学院水工建筑专业,1991年6月获武汉水利电力大学结构力学专业硕士学位,1995年6月获四川联合大学岩土工程专业博士学位,1995年8月晋升为副教授,1996年6月被电力部确认为电力部首批跨世纪学术带头人培养对象,1997年7月被评定为具有硕士研究生导师资格。现任武汉水利电力大学(宜昌)建筑工程系主任,宜昌市力学学会秘书长,哈尔滨建筑大学工程理论与应用研究所博士后。近年来,主要研究岩土工程静动力稳定、水工结构工程监测新技术,发表科研论文34篇,主持和主研纵横向科研课题15项。

New Methods of Researches in Complex Dam Foundation and Landslide

by Cai Desuo

Introduction

This book makes a systematic introduction of the author achievements in the fields of complex dam foundation and landslide studies, and some new thoughts background on the Three Gorges Project and Geheyan Project on Qingjiang River in recent years. These researches involve wide aspects, which have multiple intersections characteristics. In these studies, the author uses new achievements and methods of multiple branch of learning, such as fractal geometry, damage mechanics, neural networks and CT technique.

This book can be used as the text for an advanced course of geotechnical engineering and hydraulic structure engineering. It is also valuable for reference to all researchers, engineers, teachers and graduate students in these subjects.

序

三峡工程是举世瞩目的跨世纪工程，功在当代，利及千秋。工程中诸多技术难题，必须以“如临深渊，如履薄冰”的严谨科学态度，慎重研究。

大坝与地基的动力相互作用、施工开挖爆破对建基面下卧岩体的影响、库区滑坡预测的非线性理论等都是不可忽视的重大课题。蔡德所同志的论著，在上述问题上做了有益的研究工作，他从现场实际（或实测）资料出发，在理论分析的基础上，建立符合实际的计算模型，运用已有的大型可靠的软件进行数值计算，再将结果又回到工程实际中予以检验，以此所形成的一条技术路线，决定了整个研究过程的科学性与可靠性。从应用分形理论寻求实际断层间的分布规律，到采用 DYNA3D 程序；从测试体系对现场爆破震动的传播记录、处理，到提出适合三峡工程基岩爆破地震效应计算模型；从 CT 技术应用于现场爆破试验中，到形成一种确定基岩爆破损伤范围的新方法；从各种耦合方法的提出到神经网络理论的应用等，都反映出作者对已有的理论和技术成果具有独到的理解，对此，我感到由衷的高兴。相信这一论著会有益于三峡工程建设中上述难题的解决，同时，也会引起同行们的广泛兴趣。

王光远院士

1997 年 10 月于哈尔滨

目 录

序

第一章 绪论	1
第一节 问题的提出及选题意义	1
第二节 水工结构工程抗震数值模拟研究现状	2
第三节 爆破地震波作用下岩体质点的振动特性研究现状	4
第四节 岩体爆破损伤范围的研究现状	5
第五节 滑坡预测预报研究现状	8
第二章 长江三峡地区断层特征的分形研究	9
第一节 引言	9
第二节 分形几何概述	10
第三节 长江三峡地区断层分布的分形特征	16
第四节 三峡工程坝区断裂构造的分形特征	19
第五节 左岸坝段基岩的分形分区研究	21
第六节 结论	25
第三章 解析与数值结合法及其工程应用	27
第一节 引言	27
第二节 边界元、位移间断单元的基本理论	28
第三节 等价边界元与有限元联合求解的矩阵方程	31
第四节 等价边界元与离散元结合法	39
第五节 有限元与刚体—弹簧元联合求解的矩阵方程	42
第六节 等价边界元与有限元联合求解方法在三峡工程 建基面选择中的应用	47
第七节 有限元与无限元结合法计算坝的变形及应力	52
第四章 三峡工程左岸坝段抗震三维数值模拟	59
第一节 引言	59
第二节 坝基缓倾角节理裂隙的动力接触元模型	59

第三节	左岸坝段结构形式对坝体动力特性的影响	66
第四节	地震输入波形对坝体动力反应的影响	75
第五节	节理裂隙连通率对坝体动力反应的影响	80
第六节	长大节理裂隙面位置对坝体动力反应的影响及其抗震安全性评价	87
第七节	结论	90
第五章	三峡工程坝基岩体爆破地震效应的现场试验研究	92
第一节	引言	92
第二节	现场试验方法与测试结果	92
第三节	爆破震动效应计算模型	97
第四节	基岩爆破地震波频率与炸药量、离爆源距离的关系分析	102
第五节	结论	103
第六章	基岩爆破损伤的数值模拟及其工程应用	104
第一节	引言	104
第二节	基岩爆破损伤区的力学模型研究	105
第三节	开挖爆破的物理模型与数值模拟方法	108
第四节	工程实例计算与分析	114
第五节	结论	117
第七章	圈定基岩爆破损伤范围的声层析成像方法	118
第一节	引言	118
第二节	地震层析成像 (CT) 技术的基本问题及其处理方法	119
第三节	现场试验的数据采集方法与测试结果	124
第四节	基岩爆破损伤范围确定与质点临界振动速度分析	130
第五节	结论	133
第八章	神经网络方法及其在复杂坝基与滑坡研究中的应用	135
第一节	引言	135

第二节	神经网络基本理论	137
第三节	神经网络的泛化性能研究	156
第四节	岩体爆破效应预测的前馈网络理论	161
第五节	前馈网络理论在三峡工程中的应用	165
第六节	神经网络方法在隔河岩水电工程库区 滑坡预报中的应用	168
参考文献		174
后记		182
附录 SHALE 的主要 SUBROUTINE 源程序		184

Contents

Preface

1 Introduction	1
1.1 Problem Raising and Meaning of Topic Selecting	1
1.2 Present Situation of Earthquake-Resistance' s Numerical Simulation Studies in Hydraulic Structure Engineering	2
1.3 Present Situation in Vibration Characteristics Studies of Rock Mass Particle under Blasting Seismic Wave	4
1.4 Present Situation of Rock Blasting Damage Range Studies	5
1.5 Present Situation of Landslide Prediction and Forecasting Studies	8
2 Fractional Studies on Faults in the Three Gorges Reservoir Area	9
2.1 Foreword	9
2.2 Introduction of Fractal Geometry	10
2.3 Fractal Characteristics of Fault Distribution in Three Gorges Region	16
2.4 Fractal Characteristics of Faults on the Dam Section	19
2.5 Studies on the Fractal of Bed Rock of Division of the Left Bank Dam Blocks	21
2.6 Conclusion	25
3 Combination Method of Analytical and Numerical	

Solution and Its Application in Engineering	27
3.1 Foreword	27
3.2 Basic Theory of Boundary Element and Displacement Discontinuous Element	28
3.3 Matrix Equation of Combination of Equivalent Boundary Element and finite Element	31
3.4 Combination of Equivalent Boundary Element and Discrete Element Method	39
3.5 Matrix Equation of Combination of Finite Element and Rigidbody-Spring Element	42
3.6 Applications of Combination of Equivalent Boundary Element Method and Finite Element Method in Three Gorges Project's Dam Base Selecting	47
3.7 Combining Method of Finite Element and Infinite Element to Calculating Deformations and Stresses of Dam	52
4 Three-dimensional Numerical Simulation of Earthquake-resistance on the Left Bank Blocks of Three Geoges Project	59
4.1 Foreword	59
4.2 Dynamic Contact Element Module of Low Angle Faults on the Dam Foundation	59
4.3 Effect on Dam Dynamic Characteristics with Structure Model of Left Bank Dam Blocks	66
4.4 Effect on Dynamic Response of Left Bank Dam Blocks with Earthquake Input Waves	75
4.5 Effect on Dam Dynamic Response with Continuity of fissure	80
4.6 Effect on Dam Dynamic Response with Long-big	

Joints and Earthquake-resistance Safety Evaluation	87
4.7 Conclusion	90
5 Field Test on Rock Mass Blasting Vibration	
Effect on the Three Gorges Project site	92
5.1 Foreword	92
5.2 Field Test Methods and Test Results	92
5.3 Calculation Model of Blasting Vibration Effect	97
5.4 Relation Analysis on Frequency of Bed Rock Blasting Vibration Wave, Quantity of Explosive and Distance from Origin of Blasting	102
5.5 Conclusion	103
6 Numerical Simulation on Bed Rock Blasting Damage and Its Application in Engineering	104
6.1 Foreword	104
6.2 Mechanical Model Studies on Bed Rock Blasting Damage rone	105
6.3 Physical Model and Numerical Methods of Excavation and Blasting	108
6.4 Calculation and Analysis of Engineering Examples	114
6.5 Conclusion	117
7 Sonic Tomography Methods of Enclosed Bed Rock Blasting Damage Range	118
7.1 Foreword	118
7.2 Foundmental Problems and Their Soluting Methods of Seismic Tomography Technique	119
7.3 Data-collecting Methods of Field Test and Test Results	124
7.4 Determination of Bed Rock Blasting Damage Range	

and Analysis on Critical Vibration Speed of Rock Mass Particle	130
7.5 Conclusion	133
8 Neural Network Methods and Application in Complex Studies of Foundation and Landslide Studies	135
8.1 Foreword	135
8.2 Basic Theory of Neural Network	137
8.3 Generalization Capacity Studies on Neural Network	156
8.4 Feed Forward Neural Network Theory of Rock Blasting Effect Forecasting	161
8.5 Feed Forward Neural Network Theory's Applications in Three Gorges Project	165
8.6 Neural Network Methods' Applications in Landslide Forecasting in Geheyan Project	168

第一章 绪 论

第一节 问题的提出及选题意义

三峡工程是世界瞩目的跨世纪超巨型工程。坝基开挖过程中的岩体爆破动力特征与边坡稳定,爆破作用对岩体的损伤扰动范围,天然地震作用下的坝体动力稳定性等问题一直是国内外专家所关注的焦点,这些重大技术难题对工程的施工进度、工程质量起着决定性的影响作用。

水工建筑物的动力相互作用问题一直是学术界和工程界所重视的课题。有关科研单位对三峡工程坝体的地震动力作用做了一些有益的工作,其成果在工程设计中得到了参考应用。在天然地震方面,鉴于三峡大坝安全的特殊重要性,大坝与地基的动力特性及抗震安全性评价迫切需要进行更深入、全面的研究。左岸厂房1[#]~6[#]机组坝段,坝后厂房建基面低于大坝建基面,形成高达80m左右的临空陡边坡,且基岩缓倾角节理裂隙又较发育,同时F7断层斜穿坝基,因此,是坝基稳定性研究的重点,深为工程界所关注。

爆破地震波对节理裂隙岩体的动力作用长期以来是国内外岩石力学、爆破工程学术界和工程界关注的重要课题。三峡工程主体石方开挖量约1亿m³,爆破工作量很大,目前,仅在右岸一期围堰做了一些爆破监测工作,而爆破地震波对缓倾角裂隙发育的左岸厂房坝段基岩的影响,对高约120m的临时船闸高边坡以及世界罕见的170m高的永久船闸高边坡的动力作用使人十分忧虑^[1]。对于爆破震动效应,目前的工作主要侧重于研究建筑结构破坏机制和安全评定方法,并给出了以最大振动速度为爆破地震安全的评定标准,很少涉及爆破地震对节理裂隙岩体的动力稳

定问题以及基岩边坡不至震裂条件下的岩石质点临界振动速度问题。

爆破会对建基面岩体、边坡岩体带来不同程度的破坏，实测这一破坏范围是评价爆破方法优劣的重要依据，也是确保坝基、边坡稳定必不可少的措施。对于三峡工程，其开挖方量、边坡高度、基岩的复杂程度，使得这一问题更为突出，如何可靠便捷地确定爆破损伤边界具有重要意义。

综上所述，针对三峡工程开展基岩和坝体在天然地震和爆破地震作用下的动力问题研究，不仅有着重要的理论价值，而且具有重大的社会意义、经济意义和历史意义。

滑坡的孕育和发生过程是一个复杂的物理过程，受多方面因素的影响，内在的因素主要有岩石介质的各向异性、岩体结构的高度非均匀性、地形地貌以及地应力的复杂性，外在的因素主要有地下水、降雨、温度等因素的变化以及人类活动的影响等等，这些内在、外在因素的相互耦合又相互竞争，导致滑坡位移随时间变化表现出很强的非线性特征，也使滑坡系统成为复杂的非线性系统，滑坡的预测预报成为一个复杂的研究课题。

第二节 水工结构工程抗震数值 模拟研究现状

地震作用下水工建筑物的动力反应是一个建筑物、水库流体和地基三种介质的运动通过它们之间的界面发生耦合的相互作用问题。地震波动通过地基传给建筑物和水库，同时地震波的输入又受到建筑物和水库运动的反馈影响。相互作用对水工建筑物，特别是大坝的地震反应产生重要影响，而其抗震安全关系到下游地区人民生命和财产的安全。因此，水工建筑物的动力相互作用问题成为许多研究者和工程设计者十分关注的课题^{[2][3]}。水工建筑物大多是大体积建筑物，建筑物和地基间含有比较宽广的接触界面，在通常的相互作用研究中，将建筑物与地基接触的界面

简化为刚性平面以减少相互作用问题中自由度的作法对水工建筑物是不合适的^[2]。

大坝和地基的动力相互作用研究，始于 60 年代末，从 1973 年第五届世界地震工程会议起，在国际或区域性的地震工程学术会议上，坝与地基的动力相互作用便受到研究者的重视，成为讨论的重点。由于这一时期数值离散方法迅速发展，使得相互作用的研究进入了一个新的阶段，其中主要的方法是有限差分法、有限元法^[4]、边界元法^[5]、离散元法^[6]，以及上述各类方法的相互耦合技术^{[7][8]}。

有限元法具有处理地基的不均匀、不等性、非线性以及地基的复杂地形与地质条件的优点，在结构地基动力相互作用问题的研究中，有限元法的关键问题在于无限地基的有限模拟，需要在人工边界上设置一些特殊的边界条件以消除人工边界上波的虚假反射，这方面的研究已有大量成果^{[9][10]}。

用于处理人工边界上波的透射的另一类方法是无限元法，最早由 Ungless^[11]和 Bettess^[12]在静力问题中提出，并由 Bettess 和 Zienkiewicz 推广到动力问题中以模拟波向无限远处的传播。我国赵崇斌、张楚汉^[14]进一步发展了这一方法并应用于拱坝地基的模拟与地震反应分析中。无限元法本质上也是一种人工边界，它以形函数形式描述从近域到远域位移幅值的衰减规律以及不同波数的相位特征。

另一个得到广泛重视的数值方法是边界元法。近十多年来，边界元法的发展给结构地基动力相互作用研究开辟了新的途径。它的主要特点在于其基本解自动满足无限远处的辐射条件，不存在人工边界的反射问题，特别适合于处理无限或半无限地基。

针对边界元法无需设置人工边界，适宜于处理半无限域问题以及有限元易于处理复杂的材料特性、几何条件的特点，有限元与边界元的耦合在结构地基动力相互作用研究中成为一个引人注目的方法^[15]。

针对三峡工程坝体抗震动力相互作用的研究始于 80 年代末：

对三峡大坝多层大孔口坝段进行了结构动力稳定性研究^[16]；对三峡工程厂房坝段进行了三维静动力分析^{[17][18]}；对三峡重力坝下游面压力管道抗震问题作了二、三维动力有限元计算和二维动态模型试验^{[19][20]}。上述研究表明：7度地震时三峡大坝抗震强度安全能满足规范要求；大坝在静、动荷载作用下，坝基面有足够的抗滑稳定性；三峡重力坝下游面管道的自振频率较高，基频为15.74Hz，远离一般地震波的主频2~8Hz，而且在地震作用下有较大的刚度储备。

从已做的研究工作来看，未能考虑坝基缓倾角节理裂隙的影响，没有重视坝体下游侧80m左右的临空陡边坡，而且输入地震波形较单一。为此，迫切需要对坝体在地震荷载作用下的动应力分布特征及其抗震强度安全性做更深入、更系统的研究。

第三节 爆破地震波作用下岩体质点的 振动特性研究现状

爆破地震波在地层中的传播是复杂的力学过程，这使得对爆破震动效应的研究成为爆炸力学与工程爆破等领域一个有理论深度的重要课题。

爆破地震安全的评定方法是爆破震动效应的主要问题之一，目前主要采用单一参数法和计算机数值模拟方法。后者基于岩体爆破机理或引用地震工程学中反应谱理论的动力分析法，借助于计算机进行，该方法现正在研究和完善之中。而应用最广的是单一参数法，即用爆破地震波的最大振动幅值作为安全评定的标准。

由于岩体质点振动速度与建筑物和构筑物的破坏特征关系比较密切，所以工程上常采用振动速度垂直分量的峰值作为衡量标准。为此，各国专家学者在爆破地震波作用下岩体质点的振动特性方面做了大量的研究工作^{[21][22]}，提出了许多岩体质点振动速度计算公式，其中较著名的有萨道夫斯基公式、兰格弗尔斯公