



ROCK MECHANICS ON LARGE DAMS

高坝岩石力学

杨 强 杨若琼 林 鹏 刘耀儒 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

ROCK MECHANICS ON LARGE DAMS

高坝岩石力学

杨 强 杨若琼 林 鹏 刘耀儒 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

周维垣教授从事高坝结构及坝基研究工作近 40 年,在我国,他率先将损伤力学引入岩石力学,发展了损伤断裂的理论,并应用于大坝稳定分析。我国高拱坝建设 30 年以来,他对国内大部分高坝做了数值分析及模型试验,结合工程研究就高坝岩石力学曾发表论文 200 余篇,本书从这些论文中精选了各个时期比较经典的研究成果,从一个侧面反映了我国高坝岩石力学研究的发展轨迹,勾画了高坝岩石力学的轮廓。

本书的主要内容包括节理岩体力学本构模型及参数,高坝及基岩损伤断裂力学模型,高坝稳定、基础加固理论,高坝数值分析方法,高坝地质力学模型试验,高坝工程应用。

本书可供从事水利水电工程设计、科研、施工人员,岩石力学与工程研究的技术人员及高等院校相关专业的师生阅读、参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

高坝岩石力学/杨强等编著. —北京:中国电力出版社,
2009

ISBN 978-7-5083-8117-6

I. 高… II. 杨… III. 高坝-岩石力学 IV. TV649 TU45

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 181430 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 7 月第一版 2009 年 7 月北京第一次印刷

880 毫米×1230 毫米 16 开本 28 印张 868 千字 1 插页

印数 0001—1500 册 定价 99.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

本书编写人员名单

主 编：杨 强 杨若琼 林 鹏 刘耀儒

参 编：（按姓氏笔划排序）

王仁坤 尹健民 孙卫军 刘元高

吴 鹏 吴瑞婷 杜广林 杨延毅

肖洪天 陆正勇 陈 欣 陈 新

周力田 胡云进 赵吉东 刘公瑞

寇小东 强天驰 曾永东 薛利军

魏伶俐

序



2008年11月20日是周维垣先生的八十华诞。这是一个值得庆祝的日子。

周维垣先生自1951年毕业留校工作以来，已近60年。他曾从事学校的党政、教学及科研工作。近四十年来，周维垣先生从事高坝坝基研究工作，是我国拱坝地质力学模型试验的奠基人。在我国，周维垣先生率先将损伤力学引入岩石力学，发展了损伤断裂的理论，并应用于大坝稳定分析，为岩石力学理论和工程实践作出了大量的贡献。

周维垣先生现任国际岩石力学学会灌浆委员会委员、国际岩土力学计算方法和进展学会理事、中国岩石力学与工程学会常务理事，并长期担任中国岩石力学与工程学会岩体数值与物理模拟专业委员会主任，两次出任国际会议副主席。周维垣先生以他的学术贡献和人格魅力赢得了岩石力学界和工程部门由衷的赞誉。

作为国内外知名的岩石力学专家，周维垣先生发表学术论文150余篇，出版著作10部，获得国家级奖四项、部级奖六项。2005年，第11届“国际岩土力学计算方法与进展学会”（IACMAG）大会授予周维垣先生“卓越贡献奖”，这是国内学者首次获此殊荣。

在科学的道路上，周维垣先生以严谨治学、勇于开拓的科学作风，达至斐然成就。在共事的同事和学生们的目光中，他既是严格的师长，又是德高望重的前辈。周维垣先生为学生的成长倾注了大量的心血，“高徒出于严师”，他的许多弟子已成长为学术界的精英或工程界的栋梁。周维垣先生以实际行动诠释了传道授业、诲人不倦的师者风范。

在这个喜庆的日子里，我们怀着对周维垣先生的诚挚的敬意，编辑了这本庆贺文集，用我们的方式向周维垣先生的八十寿辰表示最衷心的祝贺。

本书的出版既是对周维垣先生多年来科研工作的梳理和总结，也是对其为人为学优秀思想的展示与颂扬；既是为了隆重庆贺这个重要的日子，也是为了与更广泛的读者共享我们的感受，使岩石力学与工程相关领域的同行、学者和师生有所启迪和激励。

衷心祝愿周维垣先生健康长寿，不断为岩石力学与工程事业作出新的贡献！

杨 强

2008年5月1日于北京清华园

倾心科研事业 天道自然酬勤

杨强 杨若琼 林鹏 剡公瑞 刘耀儒

作为周维垣教授的同事和学生，周维垣教授渊博的学识和严谨的治学态度，令我们受益匪浅。值周教授八十华诞之际，特写此文表达我们对他的崇高敬意。



● 周维垣教授

周维垣教授 1928 年 11 月 20 日出生于河南省开封市。1947 年作为清华大学新生参加“反内战反饥饿”大游行。1948 年加入中国共产党，任地下党支部委员，负责联络工作，组织东北进京学生联谊会，展开东北学生的组织工作，组织“大江流”壁报宣传“新华社广播”；参加北京市学生“反迫害，要活命”大游行；在国民党对北京市学生实施“819”大逮捕时，负责组织学生抗逮捕活动，要求国民党政府释放被捕学生，严惩特务。1949 年任清华大学总支委员，担任土木、建筑系支部副书记、书记，组织土木及建筑系学生进行宣传。1951 年毕业于清华大学土木系，其后任清华大学总支常委、第一任党委组织部长、纪律检查委员，负责整党活动。1952 年开展清理阶级队伍运动时，负责清华大学职工分部。1953

年调入燕京大学总支，负责燕京大学总支的职工清理阶级队伍工作，同年参加清华大学建党整党工作，按系建立支部，负责联系土木建筑系的工作。1956 年任清华大学人事处副处长、第一届清华大学党委常委、组织部长、纪律检查委员会委员，并作为清华大学党代表出席北京市第一次党代会。

周维垣教授 1959 年任清华大学土木系总支书记。1978 年任清华大学水利系副主任。1984 年任清华大学水利系副教授。1989 年任清华大学水利系教授。1991~2003 年任中国岩石力学与工程学会常务理事，物理数学模拟专业委员会主任，中国岩石力学与工程学报编委。1990~1996 年任国际岩石力学学会注浆委员会理事。1996 年应邀成为中国三峡技术设计特邀专家。1993 年至今担任国际岩土计算机技术进展学会（IACMAG）理事；多次担任亚洲太平洋计算力学大会顾问，国际锚固灌浆研讨会、国际岩石力学与工程新进展大会、国际岩土计算力学大会等副主席。周维垣教授还是国际岩石力学学会会员，国际灌浆专业委员会委员，中国岩石力学与工程学会、中国岩土工程



● 与彭珮云等早期革命同事合影



● 全家合影



● 参加国际会议

研究中心及中国水工建筑物标准化委员会顾问等。

周维垣教授 40 多年来一直从事基础岩石力学数值方法理论研究工作。他为我国岩石力学的理论和数值新方法的发展作出了重要贡献。其主编的《高等岩石力学》曾被学界引用 1000 余次，20 多年来，该书在水利水电、采矿、交通、铁道、国防等领域的岩石力学科研教学中发挥了很大作用，影响长久不衰，是我国岩石力学发展过程中的奠基之作。

作为我国著名的高坝专家，周维垣教授在高坝岩石力学理论与数值方法、高坝结构与复杂岩基工程的研究、高坝整体稳定破坏仿真分析设计系统、地下结构和边坡工程、岩基加固和反馈计算等方面均有重要建树，在我国高拱坝从百米高度向世界水平的 300m 高度的跨越过程中作出了重大贡献。周维垣教授主要成就有以下五个方面：

(1) 发展岩体混凝土宏细观断裂损伤力学模型、设计方法及地基加固模型创新。周教授推出高坝结构细观开裂模型及宏观破坏路径搜索法，求结构随机安全度。1990 年，“拱坝坝肩岩体破坏及可靠度分析”获全国水利学会优秀论文奖，文中提出细观损伤断裂到开裂破坏模型，用细观损伤力学引入有限元数值模拟节理岩体的本构弹塑性力学关系，开创了节理岩体的数值模拟力学方法。在我国首先引入流形元法、无网格数值方法，并应用于锦屏、溪洛渡、拉西瓦等 300m 级高拱坝坝肩岩岩层的稳定分析；提出渗流的多重网格，并分析了小湾及拉西瓦拱坝的裂隙岩体渗流场。周教授推出了渗流场与应力损伤场耦合模型；在损伤局部化梯度力学模型中考虑多尺度屈服面效应，建立塑性局部化多重屈服面模型，应用于开裂高梯度计算分析，这项研究获得了 2007 年度国家教委自然科学一等奖。



● 1986 年在人民大会堂出席国际会议

周教授承担了“八五”攻关高强度大体积混凝土材料的断裂特性研究，根据二滩高拱坝及小湾的现场混凝土材料进行劈裂试验，用数值模拟试验对断裂面分数维的能量积分，求出断裂能，并分析断裂的尺寸效应。此项研究位居国际先进行列，2001 年获得国家科技进步奖三等奖。

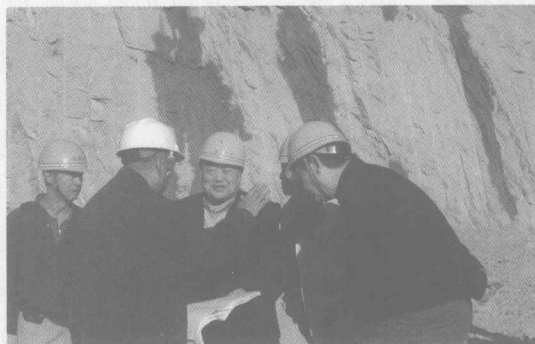


● 在三峡大坝工地

周教授首次论证了加固灌浆后岩体的力学强度有所增加机制，该机制应用于清江隔河岩拱坝及二滩拱坝，“加固后裂隙岩体的力学特性及建基面准则研究”也于 1996 年获国家教委科技进步奖二等奖。软岩上修坝，如铜头拱坝的地基仅为混凝土变模的 1/6，对此类超软坝基周教授既研究了合适的坝型，又采用断裂损伤分析指导地基加固，节省了大量锚索，软岩上修坝经建成后五年的原型监测分析，说明模型



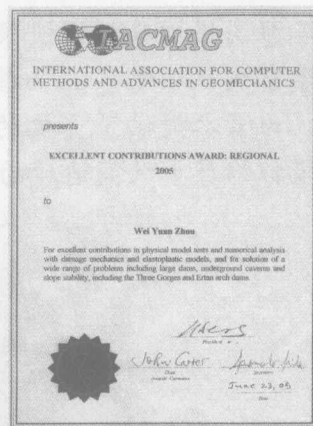
● 在二滩工地



● 在小湾工地

分析是正确的。周教授提出的加固模型通过对国内 20 多座高拱坝的分析计算,得到拱坝可行的加固分析方案,并应用到相应工程的设计中,为我国高坝可行性提出了论证。

(2) 创建高坝整体稳定破坏数值仿真设计系统。近三十年,我国新建一批高拱坝,为此需要研究大坝整体稳定设计及计算方法。周教授领导的研究小组参加了二滩组织的“七五”、“八五”科技攻关项目。研究并建立了三维有限元弹塑性,断裂损伤仿真破坏设计方法。1984 年起,首次对二滩高拱坝进行了整体稳定破坏仿真分析。由自编的 TFINE 程序论证了二滩双曲拱坝的可行性和安全度、大坝的建基面岩体强度预测参数及大坝浅开挖的可行性,从而可节省开挖 60 万 m^3 及回填混凝土 30 万 m^3 。之后为二滩拱坝进行了基础加固设计计算、坝线优化计算。1990 年,二滩拱坝开工,周教授亲自到工地为开挖录像,并在蓄水期进行监控分析。1989 年,“双曲拱坝整体应力稳定分析技术”获国家教委科技进步奖二等奖,该技术从二滩拱坝设计勘探到施工蓄水,历时 18 年,全过程为二滩拱坝服务,产生的经济效益巨大。“高坝坝基岩体稳定性评价及可利用岩体质量的研究”获国家科技进步一等奖,其创新点在于首次用岩体网格开裂破坏模型仿真坝踵开裂长度和失稳过程,应用于拉西瓦高拱坝、



● 授予周维垣先生的
IACMAG 大会奖状



● 观察试验过程

东风双曲拱坝,节约开挖 7 万 m^3 、混凝土 16 万 m^3 ;应用于李家峡、紧水滩、溪洛渡、锦屏、小湾拱坝、拉西瓦、大岗山、马吉,论证了稳定超载能力,产生的经济效益巨大。周教授近几年参与论证了溪洛渡拱坝基础利用Ⅲ₁级岩体和上部高程部分利用Ⅲ₂级岩体作为大坝基础的可行性;建基面优化方案较可研方案减少基础开挖和大坝混凝土工程量达 100 多万立方米,节省直接投资约 7 亿元。2005 年,在意大利都灵举行的国际第 11 届计算大会 (IACMAG) 上,周维垣教授被授予“卓越成就奖”,用以表彰他在高坝结构及基础整体稳定分析研究方面的贡献。

(3) 从事高坝地质力学模型破坏试验。周教授四十年来从事大坝脆性结构模型试验,用结构断裂的极限分析方法在模型试验中验证,创新地引入复合体块模拟岩

体力学特性,1986年获“大坝基岩的地质力学模型试验技术”优秀成果奖。我国修建和在建的高拱坝几乎都在周教授的领导下做过模型破坏试验,如二滩拱坝、青石岭拱坝、古城拱坝安康重力坝、凤滩空腹坝、紧水滩、东风、李家峡、铜头、小湾、渔子溪、锦屏、拉西瓦、溪洛渡、大岗山等32项。周维垣教授是我国大坝地质力学模型破坏试验的奠基人之一,其从试验技术理论到实践,都进行了艰苦的探索,并对材料试验理论、材料相似理论、数据量测理论等进行了摸索创新,为我国的高坝建设作出了卓越贡献。《高坝水工结构模型试验》曾获得国家科技进步奖二等奖,主要成果也已编入(SL 282—2003)《混凝土拱坝设计规范》和(DL/T 5436—2006)《混凝土拱坝设计规范》中。“二滩双曲拱坝整体地质力学模型破坏试验”项目获能源部1992年科学技术进步一等奖。

周教授10年内对二滩拱坝进行了13个断面、2个整体模型的试验和计算,首次论证了二滩高拱坝双曲拱坝坝型的可能性,使我国高坝水平的研究达到国际先进地位。周教授为李家峡拱坝做了3个整体破坏模型试验,研究河床岩基软弱带的处理、坝肩的锚固处理,为蓄水提供了重要的依据。周教授还运用地质力学模型研究高边坡的稳定度,2007年模拟锦屏Ⅰ级高边坡的溃塌机制,开创了三维边坡滑坡模拟的先河。



● 课题组合影

(4) 创建岩质高边坡工程的稳定分析系统,并应用于三峡船闸高边坡、锦屏左岸高边坡等工程。周教授曾为三峡船闸高边坡开挖的稳定变形流变渗流加固做过分析研究。他主持了“八五”科技攻关北京专项,首先进行了三峡岩体的力学参数模拟取值;然后采用连续介质与不连续的不同方法进行变形稳定分析,得出高边坡可行性和加固的敏感分析,提出了渗流下的安全度以及宏细观的复合模型并做了流变的断裂试验,结合现场试验,为开挖工程的流变提出预测。此项研究经国家科委鉴定,认为属于国际先进水平、部分国际领先。周教授主持了获国家自然科学基金支持的节理岩体的本构关系研究,并于1984年得出创新成果。

(5) 长期从事高等教育。周教授先后开设《岩石力学数值方法》、《大坝模型试验》、《岩石力学》、《计算机方法》等课程,培养研究生26人。曾先后到美国明尼苏达大学、英国皇家工学院、澳洲悉尼大学、澳大利亚科学院、日本京都大学讲学,还与法国可因公司交流。

目 录



序

倾心科研事业 天道自然酬勤

第 1 篇 节理岩体力学本构模型及参数

节理岩体力学参数取值研究	周维垣	杨延毅	(3)			
隔河岩大坝灌浆帷幕岩体力学强度的扫描电镜试验研究	荆公瑞	杨若琼	周维垣	陈珙新	熊 进	(12)
岩石裂纹流变扩展的细观机理分析.....	肖洪天	周维垣	杨若琼	(19)		
岩石、混凝土类材料断裂损伤过程区的细观力学研究.....	周维垣	荆公瑞	(23)			
裂隙介质中的多重裂隙网络渗流模型.....	杜广林	周维垣	赵吉东	(30)		
岩体三维节理网络模拟及其在三峡工程中的应用.....	尹健民	周维垣	杨若琼	(36)		
脆性岩石变形与破坏的细观力学模型研究.....	肖洪天	周维垣	(40)			
岩体稳定的分叉局部化及应变梯度模型研究.....	周维垣	刘元高	赵吉东	杨若琼	杨 强	(46)
含裂隙组岩体的稳定问题.....	周维垣	刘元高	吴 浩	杨晓君	(55)	
裂隙岩体局部化破坏分析的多重势面分叉模型.....	刘元高	周维垣	陈 欣	赵吉乐	杨 强	(60)
裂隙岩体损伤局部化破坏分叉模型及其应用.....	刘元高	周维垣	赵吉东	杨 强	(64)	
不同角度单裂纹缺陷试样的裂纹扩展与破坏行为.....	林 鹏	黄凯珠	王仁坤	周维垣	(72)	
基于二阶损伤张量的节理岩体各向异性屈服准则.....	杨 强	陈 新	周维垣	(77)		
Shear Banding Analysis of Geomaterials by Strain Gradient Enhanced Damage Model	Jidong Zhao Daichao Sheng Weiyuan Zhou	(85)				

第 2 篇 高坝及基岩损伤断裂力学模型

抛物线型拱坝坝肩断裂破坏试验研究.....	周维垣	杨若琼	罗光福	(89)	
坝肩节理岩体稳定的三维弹塑性断裂有限元分析.....	周维垣	杨若琼	周力田	(94)	
节理岩体的损伤断裂力学模型及其在坝基稳定分析中的应用	周维垣	杨延毅		(101)	
裂隙岩体的渗流—损伤耦合分析模型及其工程应用		杨延毅	周维垣	(107)	
岩石与混凝土类材料断裂过程研究		杨延毅	周维垣	(114)	
岩体边坡非连续非线性卸荷及流变分析	周维垣	杨若琼	荆公瑞	(119)	
三峡永久船闸高边坡流变损伤稳定性分析	肖洪天	周维垣	杨若琼	(124)	
岩石混凝土类材料损伤局部化分叉研究及应用	赵吉东	周维垣	黄岩松	杨若琼	(130)
基于应变梯度的损伤局部化研究及应用	赵吉东	周维垣	刘元高		(135)
三维间断位移法及强奇异和超奇异积分的处理方法	周维垣	肖洪天	吴劲松		(140)
基于正则结构的各向异性损伤演化律	杨 强	吴荣宗	周维垣		(145)
Thermodynamic Relationship Between Creep Crack Growth and Creep Deformation	Qiang Yang Xin Chen Weiyuan Zhou (153)				
On Microscopic Thermodynamic Mechanisms of Damage Evolution Laws	Qiang Yang Xin Chen Weiyuan Zhou (163)				

Micromechanical Identification of Anisotropic Damage Evolution Laws

..... Q. Yang W. Y. Zhou G. Swoboda (183)

Simulation of Localization Failure with Strain-Gradient-Enhanced Damage Mechanics

..... Weiyuan Zhou Jidong Zhao Yuangao Liu Qiang Yang (184)

Multi-Network Percolation Model for Fractured Rock Masses

..... Zhou Weiyuan Du Guanglin Yang Qiang (185)

第3篇 高坝稳定、基础加固理论

空腹坝坝踵应力的非线性有限元分析及实验研究 周维垣 杨若琼 (189)

复杂地基上二滩双曲拱坝整体稳定分析 周维垣 杨若琼 杨强 (198)

二滩拱坝坝基弱风化岩体灌浆加固效果研究 周维垣 杨若琼 剡公瑞 (204)

高拱坝稳定性评价的方法和准则 周维垣 杨若琼 剡公瑞 (212)

大坝整体稳定分析系统 周维垣 杨若琼 剡公瑞 (217)

高拱坝的有限元分析方法和设计判据研究 周维垣 杨若琼 剡公瑞 (222)

推求拱坝极限承载力的一种有效算法 杨强 陈新 周维垣 杨若琼 (226)

垫脚加锚—高拱坝加固增稳的高效方法 周维垣 胡云进 杨若琼 (232)

基于非线性规划的极限分析方法及其应用 杨强 程勇刚 赵亚楠 周维垣 (236)

拱坝基础不对称性影响研究 周维垣 王仁坤 林鹏 (241)

复杂地基上高拱坝开裂与稳定研究 王仁坤 林鹏 周维垣 (246)

变形加固理论及高拱坝整体稳定与加固分析 杨强 刘耀儒 陈英儒 周维垣 (255)

The Challenging Problems with the Super Large Xiaowan Arch Dam under Construction

..... Zhou Weiyuan Lin peng Yang Qiang Yang Ruoqiong (272)

An Anisotropic Strength Criterion for Jointed Rock Masses and Its Application in Wellbore

Stability Analyses X. Chen Q. Yang K. B. Qiu J. L. Feng (273)

第4篇 高坝数值分析方法

有限单元法的波阵解法 周维垣 戴国平 (277)

流形元法及其在工程中的应用 周维垣 杨若琼 剡公瑞 (285)

三维岩体构造网络生成的自协调法及工程应用 周维垣 杨若琼 尹健民 王志人 (290)

无单元法及其工程应用 周维垣 寇晓东 (295)

三维有限元网格加密方法及其工程应用 强天驰 寇晓东 周维垣 (303)

无单元法在三维断裂力学中的应用 胡云进 周维垣 林鹏 (308)

三维无单元伽辽金法及其在拱坝分析中的应用 周维垣 黄岩松 林鹏 (312)

三维有限元并行 EBE 方法 刘耀儒 周维垣 杨强 (318)

损伤模型在界面元方法中的应用 陈欣 周维垣 黄岩松 杨若琼 (324)

三维界面元的数值计算方法及应用 陈欣 周维垣 黄岩松 杨若琼 (329)

Multi-Potential Based Discontinuous Bifurcation Model for Jointed Rock Masses and Its Application

..... Weiyuan Zhou Yuangao Liu Jidong Zhao (333)

A New Three-Dimensional FEM Model on Arch Dam Cracking Analysis

..... P. Lin W. Y. Zhou Q. Yang Y. J. Hu (345)

A Distributed Memory Parallel Element-by-Element Scheme Based on Jacobi-Conditioned

Conjugate Gradient for 3-D Finite Element Analysis

..... Yaoru Liu Weiyuan Zhou Qiang Yang (346)

第5篇 高坝地质力学模型试验

坝基稳定的块体模型有限元计算与试验研究	周维垣	杨若琼	(349)
拱坝整体地质力学模型破坏试验研究	周维垣	杨若琼	罗光福 (359)
高拱坝整体稳定地质力学模型试验研究	周维垣	杨若琼	刘耀儒 林 鹏 (366)
锦屏高边坡稳定三维地质力学模型试验研究	周维垣	林 鹏	杨 强 杨若琼 周 钟 (373)
Stability Analysis of Ertan Arch Dam and Its Prototype Observation	Zhou Weiyuan	Zhao Jidong	Yang Ruoqiong (382)

第6篇 高坝工程应用

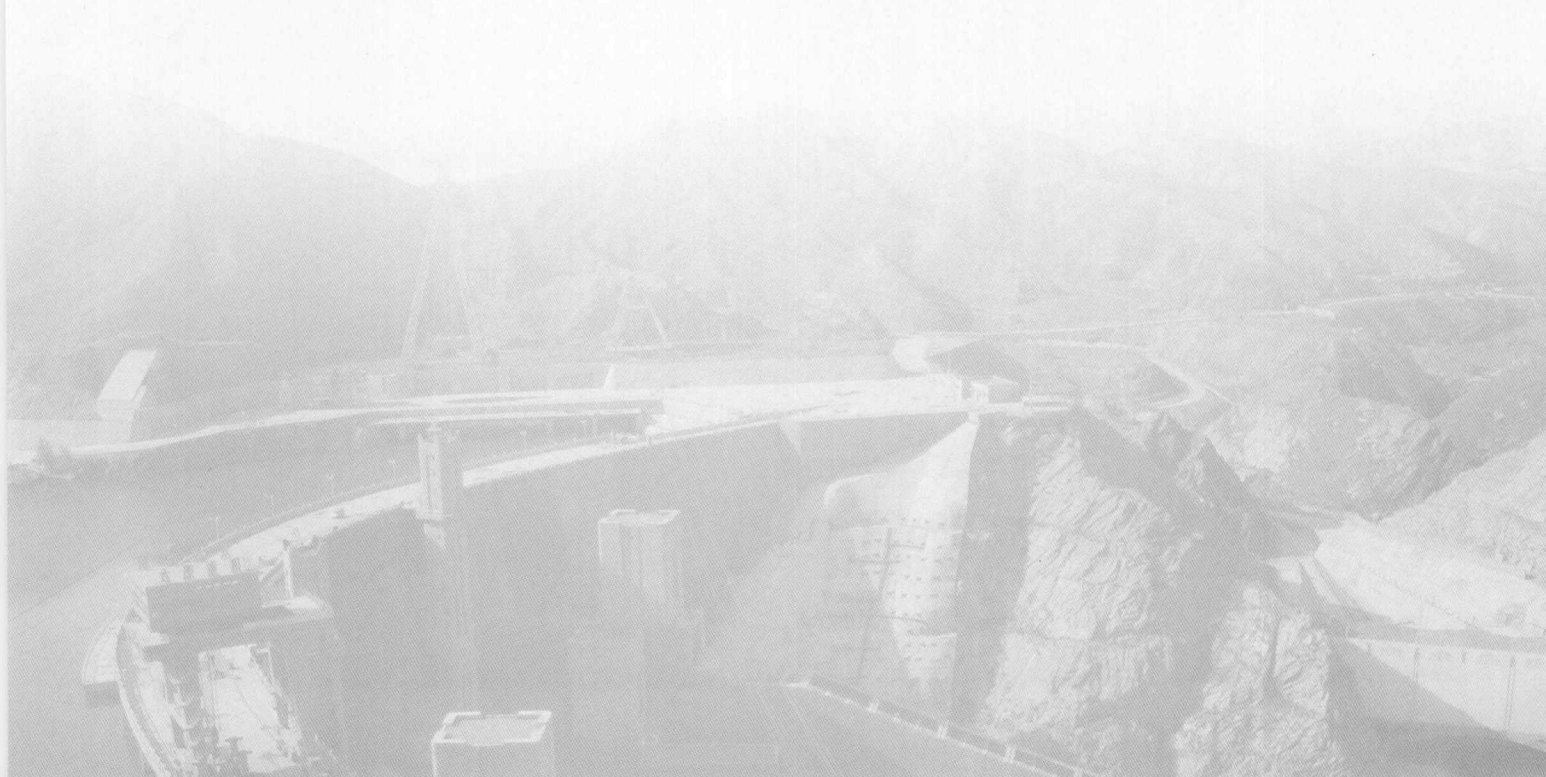
拉西瓦双曲拱坝整体稳定分析	黄岩松	周维垣	陈 欣	杨若琼	(391)
三维快速拉格朗日法进行水布垭地下厂房的稳定分析	陈帅宇	周维垣	杨 强	杨若琼	(396)
水布垭枢纽地下厂房围岩稳定及锚固分析	杨 强	杨晓君	周维垣		(403)
锦屏拱坝破坏仿真的三维有限元分析	陈 欣	周维垣	黄岩松		(409)
高拱坝基础大垫座及周边缝设置研究	周维垣	林 鹏	周雅能	杨 强	(414)
附录一 著作					(422)
附录二 论文					(423)
附录三 获奖目录					(431)
附录四 科研课题					(432)

Rock Mechanics on Large Dams

高坝岩石力学

第1篇

节理岩体力学本构模型及参数



节理岩体力学参数取值研究

周维垣 杨延毅

【摘要】 本文提出了一种确定节理岩体力学参数的计算机模拟试验法。该法基于节理裂隙的野外勘探资料建立岩体的损伤断裂模型,可在计算机上模拟计算实际试验过程,获得应力—应变全过程曲线和岩体变形模量、抗剪强度参数的各向异性特征。文中具体研究了拉西瓦工程岩体参数的取值问题。

1 引言

由于人们对节理岩体复杂多变的力学性质认识不足,所以对它的力学参数(如变形模量、抗剪强度等)取值,以及如何评价和利用这类岩体等问题,感到颇为棘手,目前仍只能依靠现场试验和经验类比两种手段。

由于现场试验存在尺寸效应,又受财力物力制约,广泛应用受到限制。经验类比法目前在工程中应用较多。此法把岩体按一定指标划分为若干等级,对每一等级岩体,给出统一的力学参数供工程设计选用,如能源部成都院水科所提出的“岩体质量指标”,中科院地质所提出的“岩体质量系数”,长办勘测处提出的“块度模数”,美国伊利诺斯大学提出的“RQD”,挪威学者巴顿提出的“岩体质量”等。这类方法的不足之处是只能得到力学参数的取值范围,而且由于所得范围较大,使用时仍具有较大的任意性。

根据力学理论,如果获得了一种介质的本构关系,就可推求出这种介质的力学参数。因此,通过研究节理岩体的本构关系,也应是研究节理岩体参数取值的一条途径。据此,笔者在文献[1]中深入研究了节理岩体的损伤断裂模型。这个模型的突出优点是从完整岩块的室内试验资料和节理裂隙的野外勘探统计资料出发,应用损伤力学建立起来的。它一方面建立节理组构张量与损伤张量之间的关系,使节理裂隙的几何特征和岩体宏观力学特性得以联系;另一方面,从分析节理的断裂扩展机理入手,将损伤演化过程和节理断裂扩展过程联系起来预测岩体参数的变化规律。显然,在节理裂隙的现场概率统计基础上,运用本文的模型便可在计算机上模拟实际试验过程,并由此推求岩体参数。文中应用该方法具体研究了拉西瓦工程弱风化、微风化级岩体参数的取值问题。

2 节理岩体的几何特征及概率统计方法

岩体中节理面的空间分布取决于产状、形态、规模、密度和张开度等五个几何参数。因节理多为成组展布,从抓住主要优势结构面的角度,可先按节理面产状概化为若干组,再对每一概化节理组统计其特征尺寸、密度和张开度。

2.1 概化节理组

由野外出露面和人工探洞中量测到的节理面产状在赤平投影图上[见图 1(a)]经过图 1(b)~图 1(d)的统计过程,得到图 1(e)峰点位置所代表的节理面产状即为概化节理组产状,可用单位法向矢量 $\vec{n}$ 代表(见图 2):

$$\vec{n} = (n_x, n_y, n_z) = (\sin\theta\cos\varphi, \sin\theta\sin\varphi, \cos\theta) \quad (1)$$

式中: φ , θ 可从与走向角 α 和倾角 β 的相互关系确定。

2.2 节理面形态假定

观察岩体中的节理多呈平面状,大多数研究者把节理面形态视为圆形或椭圆形。据此,这里近似假定节理在扩展前呈圆盘(块状岩体)或椭圆盘(层状岩体)。

2.3 节理特征尺寸

根据 Hudson 和 Kulatilake 等人建立的迹长测线统计法(见图 3),迹线长度的统计平均值 $\bar{l}$ 由下式确定

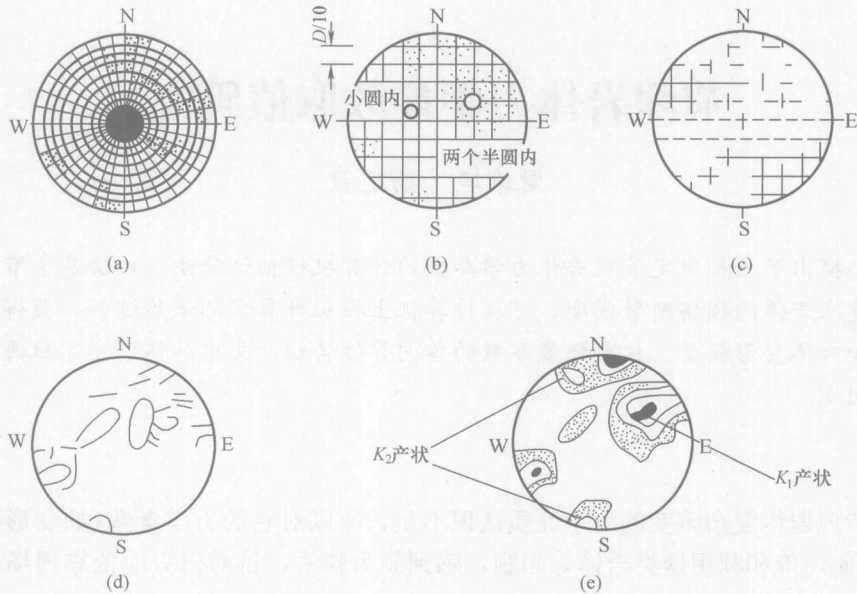


图1 赤平投影形成概化节理组
(a) 节理产状投影；(b) 赤平投影网络；(c) 统计极点百分数；(d) 极点百分数等值线；(e) 峰点位置结构面

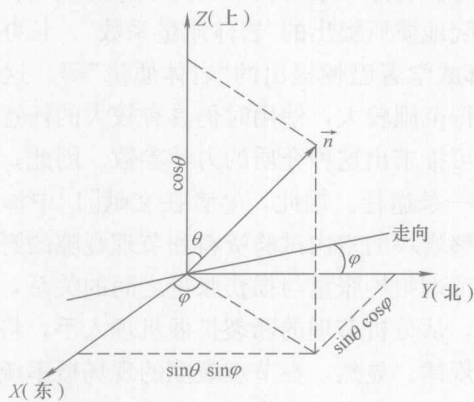


图2 裂隙法矢量与产状的关系

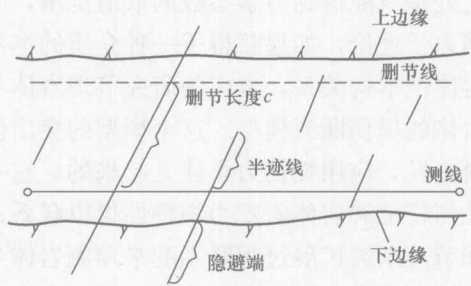


图3 狭长观测面上迹线出露情况

$$\bar{l} = -c / \ln \left(e^{-\frac{c_0}{\bar{l}}} - \frac{r}{n} \right) \quad (2)$$

式中： n 是与测线交切的迹线总条数； r 是仅与测线交切而不与删节线交切的迹线条件； c_0 是地质素描图上提供的迹线长度小值平均值； c 是删节长度。

对币状节理盘半径 a 有

$$a = \frac{\pi \bar{l}}{4} \quad (3)$$

2.4 节理密度

设体积为 V 的岩体内有 m 条节理，则定义节理密度 ρ 为

$$\rho = m/V \quad (4)$$

文献[3]用概率方法，得出节理面密度 λ 计算式为

$$\lambda = \frac{k + \sum_{i=1}^l [P_1(\omega)]_i + \sum_{i=1}^m [P_0(\omega)]_i}{A} e^{\frac{c_0}{\bar{l}}} \quad (5)$$

式中： k ， l ， m 分别是观测面内的全迹线、半迹线和删节迹线的条数； A 是观测面积。

$[P_1(\omega)]_i$ ， $[P_0(\omega)]_i$ 分别用下列两式计算：

$$[P_1(\omega)]_i = 1 - e^{-\omega_i} \quad (6)$$

$$[P_0(\omega)]_i = \mu e^{\mu a_i} \int_0^{\frac{1}{2a_i}} \frac{a_i}{t - a_i t^2} e^{-\frac{\mu}{t}} dt \quad (7)$$

式中: a_i 是迹线出露长度, $\mu=1/\bar{l}$ 。

根据 Karlin 的观点有

$$\rho = \lambda^{3/2} \quad (8)$$

2.5 节理岩体的几何特征张量

为了寻求岩体中节理分布的产状、半径、密度等几何参数间的关系,有必要引入组构张量——裂隙矢量(模为裂隙盘直径,方向为裂隙面法向)的和矢量 F

$$F_{ij} = 2\pi\rho \int_0^\infty \int_\Omega a^3 n_i n_j E(\vec{n}, a) d\Omega da \quad (9)$$

式中: $E(\vec{n}, a)$ 是半径为 a , 单位法向矢量为 $\vec{n}$ 类节理的概率密度函数; Ω 是立体角, $\Omega=4\pi$ 。

四阶节理组构张量为

$$F_{ijkl} = 2\pi\rho \int_0^\infty \int_\Omega a^3 n_i n_j n_k n_l E(\vec{n}, a) d\Omega da \quad (10)$$

拉西瓦工程岩体可按其风化程度和裂隙发育程度等因素,分成强风化、弱风化、微风化和新鲜岩石。开挖处理后大坝建基面部分坐落在弱风化和微风化级岩体上,这部分岩体中节理裂隙较为发育,且部分夹泥,工程上关心其变形和强度特征。这里采用的节理统计步骤如下:

- (1) 从平硐布置图上找出穿过弱风化和微风化级岩体的平硐(见表 1)。
- (2) 根据这些平硐硐顶的地质素描图,整理出裂隙产状图表(见图 4、表 1)。
- (3) 对每一平硐,由其裂隙产状图表,按照极射赤平投影方法,确定出概化节理组,得到左岸为两组节理发育,右岸为三组节理发育,其具体产状见表 1。
- (4) 对每一平硐的概化节理组统计节理平均长度 $\bar{l}$, 节理密度 ρ 和节理平均宽度 t_0 等参数(见表 1)。

表 1 拉西瓦工程节理统计成果汇总

岸别	岩类	洞 号	观察位置 (m)	面积 (m ²)	节理组	走向 (°)	倾角 (°)	平均长度 $\bar{l}$ (m)	密度 ρ (条/m ³)	平均宽度 t_0 (cm)	损伤度 d
左岸	弱风化花岗岩	PD-5	14~24 31~51 58~192	252	I	25	85	2.626	0.133	0.214	0.601
					II	320	90	2.546	0.102	0.21	0.512
		PD-3	32~66 102~130	172	I	20	70	3.215	0.122	0.192	0.716
					II	320	75	2.168	0.069	0.154	0.304
		PD-11	0~7	14	I	10	70	2.188	0.133	0.225	0.466
					II	310	90	3.043	0.098	0.15	0.633
	微风化花岗岩	PD-11	7~53	83	I	15	80	2.57	0.084	0.067	0.047
					II	310	80	2.613	0.02	0.278	0.18
		PD-5-2	47~121	148	I	20	70	2.953	0.105	0.156	0.628
					II	320	95	1.691	0.099	0.168	0.23
右岸	弱风化花岗岩	PD-4	0~39.6 55~91.5 157~170.0	178	I	55	80	2.744	0.134	0.523	0.633
					II	0	100	3.159	0.200	0.303	0.798
		PD-6	0~55	100	I	60	75	2.482	0.104	0.308	0.498
					II	15	97.5	2.284	0.126	0.260	0.485
		PD-6-1	20~58	76	I	55	75	1.796	0.071	0.189	0.204
					II	290	35	2.317	0.128	0.281	0.499
	微风化花岗岩	PD-4	39.6~55 91.5~157	162	I	55	80	2.284	0.090	0.303	0.402
					II	350	80	2.693	0.070	0.236	0.461
		PD-6	55~118.5	107	I	52.5	82.5	2.83	0.150	0.32	0.681
					II	15	97.5	2.63	0.049	0.132	0.359
		PD-8-2	7~80	146	I	45	75	2.628	0.037	0.332	0.296
					II	75	97.5	2.484	0.011	0.240	0.097
		PD-14	0~25	118	I	50	80	2.481	0.026	0.292	0.200
					II	15	100	2.568	0.069	0.159	0.422