

岩土工程青年专家 学术论坛文集

《岩土工程青年专家学术论坛文集》编委会

中国建筑工业出版社



岩土工程青年专家学术论坛文集

《岩土工程青年专家学术论坛文集》编委会

中文样本图书

中国建筑工业出版社

(京)新登字 035 号

图书在版编目 (CIP) 数据

岩土工程青年专家学术论坛文集/《岩土工程青年专家学术论坛文集》编委会编. -北京: 中国建筑工业出版社, 1998

ISBN 7-112-00126-9

I. 岩… II. 岩… III. 岩土工程-文集-中国 IV. TU751-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 24771 号

本文集是岩土工程青年专家学术论坛部分论文选集, 共 50 篇。主要涉及以下 10 个专题: 岩土工程基本理论、勘察与测试技术、地基处理与桩基、基坑工程、环境岩土工程、三峡工程中的典型岩土工程问题、边坡工程、地下工程、高速公路建设中的土工问题及海洋岩土工程。

本文集适合于岩土工程有关的科研与工程技术人员及大专院校师生阅读、参考。

责任编辑: 戚大庆

岩土工程青年专家学术论坛文集
《岩土工程青年专家学术论坛文集》编委会

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京市兴顺印刷厂印刷

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 29¹/₄ 字数: 718 千字

1998 年 10 月第一版 1998 年 10 月第一次印刷

印数: 1—1020 册 定价: 59.00 元

ISBN 7-112-00126-9
TU·80 (8908)

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)

岩土工程青年专家学术论坛顾问委员会

主 任：潘家铮

副主任：范维唐 周干峙

委 员：（按姓氏笔画为序）

王思敬	王梦恕	龙驭球	叶可明	冯叔瑜	刘济舟
刘建航	孙 钧	杨秀敏	吴中如	沈珠江	张宗祜
陈厚群	陈肇元	胡海涛	周 镜	郑守仁	钱七虎
钱鸣高	黄熙龄	崔俊芝	葛修润		

岩土工程青年专家学术论坛组织委员会

名誉主任：沈 廉 白世伟 魏章和

主 任：汪 稔

副主任：陈 丹 黄 强 陈湘生 刘卫卫

秘书长：黄运飞

委 员：（按姓氏笔画为序）

韦 伟	毛由田	王建华	王明洋	刘卫卫	刘小敏
刘国楠	汤天鹏	李子新	李荣强	李耀刚	张 雁
张 炜	张四平	陈 凡	陈 丹	陈如桂	陈剑平
陈湘生	汪 稔	杨 斌	杨 敏	何满潮	宋二祥
宋义仲	吴 恒	吴兴春	周兴旺	贺怀建	侯伟生
赵维炳	胡建林	秦四清	徐卫亚	徐日庆	黄 强
黄运飞	黄润秋	黄雪峰			

岩土工程青年专家学术论坛文集编辑委员会

主 任：潘家铮

委 员：（按姓氏笔画为序）

王明洋	刘国楠	李荣强	张 雁	陈 丹	陈如桂
陈湘生	汪 稔	杨 敏	何满潮	赵维炳	秦四清
徐卫亚	黄 强	黄运飞	黄润秋		

序

岩土工程是与经济建设和社会发展紧密相关的科学技术领域。生产实践的需要,有力地推动了岩土工程的进步,而岩土工程水平的提高又极大地促进了经济建设的发展。从拔地而起的摩天大楼、驯服江河的高坝大库、穿山越海的公路铁道到星罗棋布的矿冶工业,无一不留下了岩土工程科技人员的智慧和汗水。

如果说,20世纪是岩土工程创立和奠基的世纪,那么21世纪将是它取得突破性进展的世纪。尤其我国在新的世纪中将出现史无前例和世无前例的工程建设新高潮,岩土工程的重要性将日益突出。努力提高我国岩土工程科学技术水平,是我国岩土工程界的首要任务。

下世纪是知识经济时代,一个国家、民族在面临剧烈的竞争中能否屹立和发展,取决于她有没有创新的能力。竞争,本质上是综合国力的竞争、是科学技术水平的竞争、归根到底是人才尤其是接班人的竞争。岩土工程界也不例外,青年岩土工程师是我国岩土工程界的未来和希望。他们的水平和能力,代表着我国岩土工程的未来,中国科学院武汉岩土力学研究所、中国建筑科学研究院、煤炭科学研究总院的部分青年科技工作者经过多次研究,决定在1998年组织一次岩土工程青年专家学术论坛会,并希望得到中国工程院的支持,我认为这是一件好事。中国工程院是国家在工程科学技术方面的最高荣誉性、咨询性学术机构。关注青年人才的成长,为我国工程科学技术发展提供高水平的后备力量,是工程院的主要任务之一。工程院乐意青年人提供舞台,为他们展示才华创造条件。因此我们支持和鼓励有关的院士参加论坛的顾问委员会,协助审查论文和出席会议,对论坛给予力所能及的支持。今后,还将为接班人才的培养作出多方面的努力。

现在论坛组织工作已准备就绪,大会选中的50篇论文是由文集编委员认真约稿、选取、修改并经顾问委员会审阅定稿的,基本上反映了我国岩土工程界青年专家的水平,对当前我国岩土工程发展中的一些热点、难点问题结合实践提出了自己的看法,虽然不能包括岩土工程的所有领域,但已可看出主要问题所在和青年专家的主攻方向,弥足珍贵。

在文集出版之际,编委会要我写篇序言,我除希望文集的出版有助于促进我国岩土工程的进一步发展和青年专家的脱颖而出外,并愿指出一点。‘岩土工程’这个词和‘岩土力学’在含义上有些区别。后者是指一门跨行业的应用基础性研究学科,它服务于传统行业,却又是门年轻的学科,存在大量复杂问题和重要关键有待研究与攻克。而要解决这些问题,仅靠理论与试验室研究是不够的。岩土的性质如此复杂多彩变幻无常,要取得突破,既要深入的理论探索和基础性研究,需要各种高新科技的引进和渗透,更需要丰富的实践经验的反馈,从中吸取养料、检验、丰富和改进理论。一定要将两者紧密结合起来才能有成。‘岩土工程’这个名词正是意味着岩土力学理论和工程实践的综合。文集中不少论文都是两者结合的范例。我想论坛采用这个名词也有深意吧,既然中国将进行规模空前的工程建设,只要我们努力,在肥沃的土地上也一定能盛开灿烂的鲜花、结出丰硕的成果、谨以此意贡献给青年岩土专家们。

潘家铮

目 录

三峡工程永久船闸高边坡岩体稳定与变形分析	1
爆炸波在三相饱和土简化介质模型中的传播规律	20
土体动力本构模型及动力分析研究进展	29
三相饱和土中波传播问题研究	43
岩土材料分叉与变形局部化研究	51
软土边界面模型的本构关系	59
岩土工程勘察的现状和趋势	64
岩土工程勘察点源程序信息系统的开发	73
综论大坝与岩基的反馈分析及其应用	80
深基坑开挖监测与信息化施工	88
地下工程测试技术与反分析	97
大坝观测技术及其在岩土工程中的应用	108
桩基工程质量检测中一些尚待解决的问题	117
GIS 及其在环境地质调查中的应用初探	125
减少沉降桩基础的设计理论和工程应用	129
嵌岩桩承载特性与后压浆技术应用	137
水泥土搅拌桩的工程应用与经验教训	145
高层建筑地基、基础与上部结构共同工作计算中桩土变形计算及工程应用	153
桩土作用特性的理论与应用研究	164
黄土中钻孔灌注桩荷载传递性状的试验研究	173
基坑土体整体稳定性无量纲分析	182
内支撑支护结构简单空间分析方法	190
深基坑土钉支护设计计算方法	196
深基坑支护优化设计	205
基坑支护结构嵌固深度分析	215
深基坑地下连续墙支护结构的数值分析	221
深基坑支护结构的变形及控制	230
软土地基排桩支护结构计算	236
基坑井点降水的有限元分析与验证	247
倡导绿色岩土工程观念	254
城市生活垃圾堆地环境污染及再利用	260
海平面上升对沿海城市地基土的影响	266
城市固体废弃物填埋场的设计与研究概况	273

固体废弃物填埋场边坡稳定分析..... 279

卫生填埋中的沉降计算及参数确定方法..... 291

襄樊垃圾填埋场的设计与施工..... 304

城市区域水土作用机理初探..... 312

岩石工程高边坡稳定性研究的某些理论与实践问题探讨..... 318

高烈度地震区滑坡的动力稳定性分析..... 329

大深度软岩巷道变形力学机制及支护对策..... 342

人工地层冻结工法..... 347

线形地下结构震害形式、原因及抗震对策..... 360

海洋岩土工程的发展与现状..... 370

钙质土的工程特性及有关的基础工程问题..... 380

固定式海洋平台基础形式与设计方法概述..... 393

抛填石料含泥砂量极大的护岸工程的软基爆炸处理..... 403

我国高速公路建设的主要岩土工程问题及其对策..... 407

浅层地震勘探在岩土工程勘察中的应用..... 424

CFG 桩复合地基在高层建筑地基处理中的应用 432

地球工程环境力学系统科学统一理论..... 449

编后记..... 459

三峡工程永久船闸高边坡 岩体稳定与变形分析*

(研究综述)

孙 钧

(同济大学岩土工程研究所, 上海 200092)

【提 要】 本文主要包括: (1) 三峡工程永久船闸及其高边坡岩体简介; (2) 若干非常规性岩石力学试验研究; (3) 边坡岩体损伤力学分析; (4) 分形块体力学理论与方法在边坡岩体局部稳定分析中的应用; (5) 边坡岩体开挖卸荷条件下的数值计算方法; (6) 水对加剧岩体损伤、恶化边坡稳定条件的影响; (7) 边坡岩体仿真模型及其稳定性控制的随机预报; (8) 近期的几项新的研究工作; (9) 对三峡工程永久船闸高边坡岩体设计施工的若干建议意见。

1 三峡工程永久船闸及其高边坡岩体简介

长江三峡水利枢纽工程是举世瞩目的特大型工程, 自 1994 年 4 月起已经全面兴工, 1997 年 11 月大江已截流, 进入工程关键时期。它具有防洪、发电、航运、养殖、供水等巨大的综合利用效益, 其规模之大、技术之难为世界所罕见。三峡水利枢纽永久船闸是一座双线五级船闸, 它将满足万吨船队渝汉直达, 保证长江黄金水道的畅通, 是三峡工程日后航运效益的枢纽所在。

三峡永久船闸位于长江左岸, 全长 6442m, 其中, 闸室段长 1617m。单级闸室有效尺寸 280m×34m×5m, 两线船闸之间设 60m 宽的岩体中隔墩, 整个闸室均在花岗岩的山体中深切开挖修建, 最大开挖深度达 174.5m。开挖后, 北坡最大高度为 137.8m, 南坡最大高度为 157.8m, 中隔墩两侧坡高一般 50m 左右, 最大处达 70m。作为世界最大的通航建筑物之一, 三峡船闸边坡集长度、高度、陡度和重要性四大要素于一体, 为国内外少见的深切高陡人工开挖的岩质边坡。

由于三峡船闸高边坡是在一定量级的地应力场中进行大规模深切开挖而形成的, 其稳定性问题要比一般工程更复杂、更重要。边坡的稳定性除受地质条件、裂隙水渗流、结构形式和各种自然因素影响外, 在很大程度上还受施工开挖方式的制约。边坡分部开挖卸荷将导致初始地应力的释放和坡帮临空面的出现, 进而引起卸荷带内岩体从局部崩塌到较大范围的破坏和失稳, 这种情况对于三峡船闸高边坡花岗岩的脆弹性岩体而言, 显得更为突出。此外, 受日后各闸段闸首处安装钢闸门允许变形条件的控制, 闸室段岩体的后期粘性

* 国家自然科学基金与长江三峡工程开发总公司联合资助的重大基金项目。

变形发展亦是一个十分突出的制约因素,也需在设计计算中妥慎研究,初步拟定需掌握在20~25mm以内。这样,开展在工程卸荷条件下三峡船闸高边坡岩体的稳定与变形研究,对于优化设计,确定高效合理的施工开挖程序,设计经济可靠的坡帮岩体加固方案,以及建立全面监控边坡施工和船闸运营过程中岩体性态的安全监测系统均具有十分重要的现实意义。

由于三峡工程特殊的重要性以及船闸建成以后极高的安全要求,不仅需要保证船闸高边坡的整体稳定,不允许施工期内出现大的滑坡、塌方或崩塌,运行期间不发生过量的变形或任何的松动、掉块与开裂之外,还要求保证在工程建成以后仍具有长期的稳定性。

组成三峡船闸高边坡的岩体属闪云斜长花岗岩,闸室段岩石坚硬细密,结构完整,结构面数量少,产状相对船闸轴线非常有利,因而其整体稳定性应该是好的。但是,对边坡岩体的局部变形和破坏仍需要作更加全面、深入的探讨,其力学机理除边坡坡面与原有结构面组合产生随机块体或半定位块体以外,主要有两种:

(1) 高陡边坡在开挖形成过程中,一定范围内的坡帮岩体发生卸荷效应,产生二次应力场,导致岩体中的细观损伤不断累积和发展,形成宏观的卸荷裂隙,并逐步与原有的节理裂隙相连接,在某些部位出现新的非稳定块体,影响边坡的局部稳定性;

(2) 岩体受地应力场及外载长期作用,尤其当应力相对其强度达到较高水平时,这种脆弹性岩石仍可表现出相当的时效损伤和变形,进而对边坡的长期稳定及后期流变粘性变形的发展均产生不利影响。

以上所述各点,即为本项研究工作的重点。

2 若干非常规性岩石力学试验研究

船闸边坡岩体的常规性岩石力学室内实验与现场测试均已早全面开展许多年,这方面资料十分丰富,可以满足本项研究时所借用。但是,针对此处科研工作的急需,仍须补充进行以下各项非常规性室内试验,它们主要是:

(1) 利用附设有加载台设备的高倍扫描电镜(Cam Scan 400-DV)对岩体的细观时效损伤特性和损伤力学行为进行细观实验;

(2) 复杂应力状态岩体在开挖卸荷条件下的多轴卸荷破坏试验;

(3) 岩样抗拉全过程的单轴破坏试验(直接拉伸与劈裂拉伸);

(4) 饱水岩样劈裂拉伸强度时效性试验及其长期拉伸强度。

试验条件与过程可请参见各有关年度汇报材料,此处限于篇幅仅将主要结论意见分别写述如后。

(1) 岩石细观损伤试验包括有:岩石细观组构及初始细观损伤特征、单调压缩和拉伸加载条件下岩石的强度、变形及其细观破坏特征,以及细观条件下岩石的时效损伤发展及其蠕变特征与破坏形态分析。试验表明,与一般的脆-弹性岩石相类似,三峡工程的闪云斜长花岗岩在蠕变条件下的细观损伤主要表现为:

①在低应力水平时,除介质挤压密实、少数原始裂纹张开或压闭等局部结构调整外,仅有少量新的细观损伤随时间增长而产生。

②在较高应力水平的持续作用下,岩石的组构随时间不断变化,不仅表现在蠕变变形过程大量细观分布裂纹的产生和发展,而且可以逐渐形成细观主裂纹,并继续扩展。

③细观主裂纹出现后,多数试件保持较平缓的蠕变速率,在电镜加载允许的时间尺度范围内无法进入蠕变Ⅲ阶段,细观主裂纹也迅速发展为贯通性裂面,从而使试样发生蠕变断裂。

本次试验中,岩石发生蠕变破坏的应力水平平均为单调加载单轴抗压强度平均值的86.0%。

(2) 在我校岩石力学实验室 100^T-INSTRON 三轴刚性压力机上进行的三轴卸荷应力-应变全过程破坏试验可以模拟边坡岩体的开挖卸荷情况,试验结果表明:

①岩石在三向应力状态下,卸围压可以导致岩石破坏。

②三峡闸区闪云斜长花岗岩在卸荷条件下破坏主要是剪切破坏。剪切破裂角主要取决于岩石内部隐含的微细结构面的主导方向。在剪切破坏的同时,侧表面附近有张性破坏产生。

③本次试验中闪云斜长花岗岩在围压卸载而破坏时,有较明显的轴向塑性流动阶段,该阶段的长短,与破坏时的应力水平,特别是围压的卸载速率有关,卸载速率越小,轴向塑性流动越大。

④试验显示,岩样在卸载破坏时,沿卸荷方向(围压方向)有明显的扩容或剪胀。

⑤围压卸载速率除影响破坏时岩石的塑性流动的大小,也对岩石破坏后的曲线形态影响很大,当岩石破坏后抵抗轴力的能力的消退速率大于围压卸载速率时,曲线会出现升高的现象,即其残余强度的大小取决于围压卸载的速率与残余围压的大小。

⑥围压的大小对岩石的强度影响极其显著,本次试验得出了闪云斜长花岗岩的强度方程经验关系式。

考虑到三峡工程实际工况,本次试验的卸载应力路径采用恒轴压、卸围压的方式。由于本次试验的围压系统是手动控制的,虽然可以定性地得出其卸载的速率对岩石的破坏有影响的结论,但无法定量地找出其影响规律。这有待于在以后的工作中改善试验设备和测试手段,使试验成果更为全面。

(3) 根据船闸区工程地质报告中对高边坡稳定计算结果,其高边坡和中隔墩岩体中存在着有拉剪和压剪屈服形成的塑性区,为了准确进行船闸区边坡岩体的稳定与变位计算,必需进行岩石在拉伸条件下其应力-应变全过程曲线的测试,以提供岩石在抗拉峰值强度后区软化阶段直至残余应力计算中有关材料参数,建立该阶段的本构关系,以确保设计的正确性。

在实验岩石力学中,有关拉伸破坏过峰值强度以后的岩石特征的试验研究成果极少,从岩体破坏的现象看,很多的是与岩体内部受拉应力作用导致岩石裂隙的发生和发展有关,因此岩石在拉伸条件下的应力-应变全过程曲线试验,对于揭示岩石破坏现象的机理和本质是十分重要的。本次试验就是试图获得岩石在拉伸条件下的应力-应变全过程曲线,用以研究岩石在拉伸破坏前后的不同特征,为下步数值分析建立更为完善的岩石软化阶段拉伸本构关系提供必要的实验依据。这在三峡岩坡以往进行的岩石力学实验中还未做过。

本子项研究通过岩石直接拉伸和劈裂试验方法,均获得了三峡船闸区高边坡闪云斜长花岗岩体微新岩样的抗拉应力-应变全过程曲线。

从直接拉伸试验结果看,岩样破坏的类型有三种:(1)全断面岩石拉断,断面并不平整,是沿组成岩石的粗细颗粒连接处拉开。宏观上看,断面基本上与轴线垂直,其抗拉应

力-应变全过程曲线形状与典型的较坚硬岩石在压缩状态下的应力-应变曲线相似；(2) 拉断面处部分是岩石拉断，部分是硬性结构面的张拉破坏，其试验曲线类似于中等强度岩石在压缩条件下的应力-应变全过程曲线；(3) 全断面属于结构面被拉开，其曲线形状与断面角度和性质有关，有的与(1)相似，有的与(2)相似，其峰值大小亦然。由含结构面拉断的岩样所占比例很大这点来看，至少可以认为有些闸段即使是微风化和新鲜岩石，其内部亦含有极发育的细微结构裂隙，这在理论计算时须引起足够注意。

劈裂试验所得曲线均存在下降段，较直接拉伸所得的曲线下下降段平缓，只是由于电阻应变片断裂而曲线终止，尚不能确定劈裂拉伸时有否残余应力存在。

比较两种试验方法，直接拉伸法困难大一些，其成功的关键是粘结剂，而试验精度取决于消除压-拉转向器系统本身刚度的影响，因此在以后工作中还必须不断改进试验方法，研究新的工艺和测试手段，使试验成果更为精确可信。

(4) 已有研究表明，三峡工程船闸高边坡和中隔墩花岗岩岩体中存在较大范围的拉应力区。为了正确评价船闸高边坡和中隔墩花岗岩岩体的稳定性，确保船闸安全地运营，有必要深入研究花岗岩的抗拉强度。尽管三峡工程船闸高边坡和中隔墩中布有排水设施，但其中岩体的含水量还是比较高的，视季节性不同有时可接近饱和状态，这是因为地下空气湿度比较高或部分排水设施失效。众所周知，水对岩石（包括花岗岩）的力学性质有很大的影响，因此，在评价三峡工程船闸高边坡和中隔墩岩体的稳定性时，必须考虑水对花岗岩抗拉强度的影响。为了满足这一需要，本文的试验是在饱和环境下进行的。

作为跨世纪特大型工程，三峡工程的使用寿命很长，达数百年。因此，人们不仅关心它在施工期间的稳定性，而且关心它在运营期间的稳定性。由于岩石（包括花岗岩）的强度具有很强的时效性，因此要正确评价三峡工程船闸高边坡和中隔墩的长期稳定性，确保船闸在运营期间的稳定，就必须深入研究花岗岩抗拉强度的时效性。

一些文献研究了三峡花岗岩在直接拉伸条件下和劈裂拉伸条件下的变形性质和强度性质。结果表明，在直接拉伸条件下，三峡花岗岩的破坏主要受小裂隙、小岩脉结构面控制；由于三峡花岗岩中的小裂隙、小岩脉的发育程度、分布和规模变化很大，因此，其直接抗拉强度具有很强的离散性；在劈裂拉伸条件下，三峡花岗岩的破坏主要为劈裂拉伸破坏，岩石中的小裂隙、小岩脉等结构面对它的影响很小，其劈裂抗拉强度的离散性较前者小得多。因此，为了能清楚地揭示三峡花岗岩抗拉强度的时效性，本次研究采用了劈裂拉伸试验。试验结果表明：

① 三峡花岗岩劈裂拉伸破坏型式都为断岩型，其中的微裂纹、小岩脉等弱面对试样的破坏影响较小，因此，相对在直接拉伸作用下而言，在劈裂拉伸作用下，三峡花岗岩的抗拉强度离散性要小得多。

② 在劈裂拉伸荷载作用下，三峡花岗岩表现出一定的时效性。这表现在两个方面：(a) 花岗岩的破坏荷载与破坏时间相关；(b) 花岗岩的强度与加载速率相关。

③ 水不但能降低花岗岩劈裂抗拉的短期强度，即有软化作用，而且能降低花岗岩劈裂抗拉的长期强度。水对花岗岩劈裂抗拉强度的影响大小受时间控制，时间越长，影响越大。

④ 由于岩石的破坏与强度普遍具有时效性，因此，作为描述岩石破坏条件和规律的强度理论必须考虑时间因素，也只有依据这样的强度理论才能正确评价岩石工程的长期稳定性，确保岩石工程在运营期间的安全。

⑤考虑岩石破坏与强度时效性的强度理论——时效强度理论应当包括两个判据：岩石材料破坏的应力判据和时间判据。前者回答在给定的应力作用下岩石是否发生破坏，后者回答何时发生破坏。

⑥时效强度理论的分析表明，三峡饱和花岗岩劈裂拉伸长期强度的上限和下限分别为4.66MPa和3.12MPa。

对岩石直接拉伸强度建议通过现有公式换算求得。

3 边坡岩体损伤力学分析

本子项研究所探讨的重点应该是处居微新岩体内的直立式闸室段。这部分岩体完整致密，原生裂隙多呈断续型非连续的微裂纹形式分布，可视为初始损伤；闸室分部开挖逐次卸载以后，在二次应力场作用下，裂隙开展延伸并派生新的剪切裂纹，采用宏观上视为连续介质的损伤力学理论与方法来分析，可看做为损伤扩展，并进一步恶性演化，属卸荷裂隙，它与坡帮临空面以及帮面不稳定岩块的不利组合，有可能导致坡帮附近小范围内的局部失稳。据此，我们认为，此处借用损伤力学的手段来作分析研究是比较恰当的。

在岩体稳定性的细观时效损伤分析方面，我们建立了脆弹性岩石细观裂纹损伤的力学模型，对边坡与闸室段岩体的细观时效损伤进行了分析，结论意见认为：这种岩石在应力水平较高时，可以表现出相当的时效损伤行为；但是如按当前地应力水平最高合13~16MPa计算，且仅从岩石材料的蠕变断裂历时发展看，由建议公式可以计算得，为 4.066×10^{29} 年。因此可见，三峡船闸高边坡岩体的长期稳定性是好的，其持续安全可有足够保证。

在宏观损伤力学研究方面，我们进行了较多工作，拟再稍作展开阐述如下：

三峡永久船闸高边坡岩体是赋存于一定的地质和地应力环境中具有内在随机分布缺陷（损伤），并为各种尺度结构面（节理、裂隙、断层破碎带等）所切割的初始损伤体。虽然三峡船闸岩坡的整体稳定性比较好，但由于开挖过程中的卸荷和爆破损伤及其作用的时空效应，我们认为，仍亟需对以下三种可能的失稳形态作进一步的深化研究，在研究中考虑了以下三种情况：

（1）边坡岩体因受原生裂隙切割与开挖引起裂隙扩展的联合作用，形成与临空面结合的关键块体而产生局部的脆弹性破坏（指塌滑与坍落掉块）；

（2）山体因深开挖形成高陡人工边坡的过程中，沿垂直临空面的径向产生卸荷作用；而在顺坡切向则应力集中，这样，使坡面以内受此影响的相当范围内（坡帮）原有的初始损伤（节理、裂隙）累积而断裂扩展，并派生新的剪切裂隙且相互贯通，从而导致坡帮岩体因开挖卸荷而松动、失稳，或产生一定量值的卸荷变形、位移；

（3）边坡岩体开挖是分部、分层进行的，由于分部开挖使坡帮应力和变形均随时间呈逐步释放情况，在相当长的时间内其应力和变形仍在不断地调整并重新再分布，同时岩体又处在三向应力差（剪应力）的长期持续作用之中；这样，由于岩体中各种弱面的剪切流变作用，因而，此二者使岩石及其结构面产生的变形时效作用是一种蠕变损伤，它形成新的裂隙并与进一步扩展的节理、裂隙相互贯通，造成岩体的蠕变时效损伤破坏。

我们认为，以上三种可能的岩坡破坏形式（极有可能是联合作用产生）或即坡帮岩体的局部失稳问题，在本质上都是与岩体的损伤积累及其演化发展（指由损伤向断裂扩展演化）密切相关而又相互作用着的。因此，本专题对边坡节理岩体进行的损伤力学分析就

是根据工程岩体实际的地质、几何（特别是岩体结构面的产状、相对位置及与开挖临空面间的相对关系）、物理（应力、应变、时间的本构关系）等特性以及岩体损伤的机理和计算方法，通过采用损伤变量来定量描述岩体的初始损伤状态，将岩体的细、宏观结构特征（微裂纹、细观缺陷、节理、裂隙以及断层破碎带等）与其力学行为相结合，建立相应的损伤本构关系，进而分析边坡岩体开挖后的各种力学性状及其稳定特性。针对三峡船闸高边坡脆弹粘性岩体稳定的时空效应，本子专题提出了相应的边坡节理岩体的损伤力学分析理论和方法。阶段成果主要包括以下四个方面的内容：

（1）边坡岩体脆弹性损伤

已如上述，我们曾对脆弹硬性花岗岩块在加载条件下的细观损伤破坏进行的试验表明：细观分布裂纹的产生、扩展与止裂，以及细观主裂纹的形式及其贯通作用，从定性上言也就是此处高边坡脆弹性岩体损伤破坏的源起和核心。从细观意义上讲，脆弹性岩石损伤最重要的就是细观裂纹损伤，而且这对于脆弹性裂隙岩体在开挖卸荷情况下也是同样至关重要的。因此，对脆弹性岩体损伤力学作分析的关键就在于这种细观裂纹损伤效应合理的定量描述。本子专题研究通过对闪云斜长花岗岩应力-应变全过程曲线的分析，结合含分布裂纹岩石的统计研究结果，并充分考虑到脆弹性岩石的细观裂纹损伤特征，在研究中建立了脆弹性岩石的细观裂纹损伤模型；然后以节理、裂隙的几何统计特征为基础，定义了岩体损伤张量，给出了脆弹性岩体的损伤本构关系及其演化方程，进而对脆弹性岩体作了损伤局部性分析。此外，针对以往岩体的破坏准则中参数选取的非确定性问题，又进一步以损伤力学思想为基础，较好地考虑了节理裂隙岩体破坏的损伤力学机理与特点，建立了脆弹性岩体的损伤破坏准则，弥补了上述不足，进而并对其在此处边坡工程中的应用与岩体长期强度预测等问题进行了讨论。

有关闪云斜长花岗岩在三轴受力卸荷条件下以及在加（卸）载台上做细观电镜扫描的二项试验均可参见上节所述说明。

（2）边坡开挖卸荷损伤

边坡岩体开挖实质上是对坡帮岩体沿坡面正交方向的一种局部卸荷过程。这时，坡帮岩体诸单元中的正交向应力被卸除（释放），而与临空坡面相贴的一些单元，其正交向应力则将被完全释放；另一方面，开挖中顺坡方向的地应力值却反而有相当幅度的增加。这种对边坡卸荷带内坡帮岩体的局部卸荷作用将导致坡帮岩体内的偏应力值加大，从而使岩体内的初始损伤因开挖卸荷而发生演化，显然，它将引起坡帮岩体的力学性状呈现出一定程度的恶化。对于地应力值较高的脆弹性岩体言，因其自身原先的地压值已经很高，甚至已接近原岩的抗剪强度，所以，它对开挖卸荷作用的敏感程度将远高于轴压增加的情况。这点已由 Mohr 理论和以往的大量试验与实测研究所证实。

另外，由于应力路径的差异，岩体在卸荷条件下的损伤和破坏无论在机理上还是在方式上都与连续加载情形有所不同。所以，若仍沿用以连续加载试验或分析结果为前提的损伤岩体力学理论分析此处的开挖卸荷情形，其结果将很可能与工程实际偏差较大。因此，针对三峡船闸高边坡岩体的开挖卸荷情况，我们在分析边坡岩体卸荷损伤机理的基础上，提出了“损伤破坏表面”的概念，以及与之相应的岩体在开挖卸荷条件下的破坏准则。其基本思想在于：坡帮卸荷带内岩体在开挖卸荷作用下的破坏形态将是一种损伤累积和演化导致断裂扩展并派生分支剪切裂纹，进而与开挖临空面及不利优势结面组合产生的结果。从

而,我们认为可以用主应力空间损伤破坏表面的一种极限状态来表述卸荷岩体的这一损伤断裂破坏状态。对同一种类岩体言,由于损伤历史和应力路径的不同,使之达到破坏的应力状态将处于同一损伤表面上。这也从另一角度说明,岩体的损伤破坏是与其损伤历史及其应力路径密切相关的。为此,本子专题研究应用损伤破坏表面的思想建立了卸荷条件下损伤岩体的破坏准则,并给出了相应的完整表达式;在求得了岩体损伤张量后,即可进行卸荷条件下的岩体强度预测。具体计算留待下阶段继续进行。

(3) 边坡岩体时效蠕变损伤

虽然三峡高边坡岩体具有很强的脆弹性态,但在工程施工过程中以及建成以后因受到荷载(特别是应力差)的持续作用,导致岩体各种弱面的剪切蠕变效应;加之已如上述因分部、分层开挖使坡帮应力和变形均随时间呈逐步释放;因而它的变形和失稳破坏都还具有相当程度的粘性特征,即是与时间因素密切相关的,表现为较典型的时效渐进蠕变变形与破坏历程。从岩体时效蠕变损伤、断裂力学机理而言,也即这种粘性岩体的损伤积累、深化及其断裂扩展均呈现为一种时效累进而增长发展的长时间历程。特别对赋存有较高的地应力水平的脆弹性岩体,其弹性应变能指数比较高,在边坡工程开挖和开挖后的一个时间内,坡帮岩体将会产生虽为时稍短但仍较显著的时效损伤变形和蠕变损伤扩容。我们认为,这二者是构成坡帮岩体局部失稳的另一重要力学机制。这从本质上言也都是其晶格结构不断调整变化导致损伤积累、演化并断裂扩展的结果,在边坡开挖卸荷过程中,对坡帮岩体稳定性起决定作用的总可表征为岩体的时效累积损伤变形,以及因岩体各种结构面在偏应力作用下剪切变形导致的损伤扩容。在地应力持续作用下,岩体的这种蠕变损伤变形和蠕变损伤扩容以及上述的因分部、分层开挖产生随时间增长的坡帮变形逐步释放,这三者都是与闸室部分微新岩体内非贯通的雁形微裂纹及各种初始缺陷的时效渐进扩展密切相关的。因此,合理描述这种脆弹性粘性岩体的蠕变时效损伤对坡帮岩体的局部稳定性作分析具有重要意义。

边坡节理裂隙岩体均处于三维应力场中,由于其产状和组构的特殊性,使之在时效蠕变条件下所产生与发展的损伤变形也具有各向异性特征。这类岩体损伤的局部特征极其明显,所以此处采用有效应力张量各分量的组合来定义等效应力,建立了各向异性蠕变损伤本构关系和蠕变裂纹扩展的损伤累积与演化模型。实际上,节理岩体的蠕变裂纹扩展既是其蠕变损伤的重要组成部分,同时又与时效损伤的逐渐累积有关。因而我们认为,将近裂尖区域划分为若干单元,由于应力的持续作用,各单元的损伤随时间发生演化;对每一时间步长,计算各单元的累积损伤,当某一单元的累积损伤量达到岩石破坏的损伤阈值时,认为该单元将呈现破坏状态,此时裂纹将扩展到该单元。上述所建议的损伤累积与演化模型可将岩体裂纹的蠕变扩展与蠕变损伤累积统一在一起考虑,进而便于直接采用数值方法来分析岩体在时效蠕变条件下的裂纹扩展与破坏。具体数值计算可请参见本文后节说明。

(4) 断层破碎带对岩坡稳定影响的损伤力学分析

此外,在充分考虑岩体结构特性,如岩体的节理裂隙和断层破碎带等优势结构面这一构造现象对恶化边坡稳定性影响的基础上,我们还从节理岩体损伤力学的基本原理出发,将固有的岩体节理裂隙和边坡内几处较典型的断层、破碎带均视为各各不同的特定的初始损伤,进而建立了节理岩体包括断层破碎带为主的损伤力学模型,可用于分析边坡开挖时这类损伤对恶化岩体稳定性的影响。

4 分形块体力学理论与方法在边坡岩体局部稳定分析中的应用

三峡船闸边坡岩体的基本属性为闪云斜长花岗岩, 闸室部分属微新岩体, 其完整性较好, 强度高; 但仍属被各种规模的断层、节理、裂隙所切割, 其中如NNW向Ⅲ级结构面还直接在边坡上出露, 有可能形成潜在的单面滑动或双面滑动; Ⅰ、Ⅱ级结构面(主要是Ⅲ级结构面之间)组合切割形成定位或半定位块体。施工开挖后的卸荷作用在边坡岩体内产生的拉、剪应力也将追踪这些节理、裂隙, 加剧岩体宏观初始损伤(节理、裂隙)的累积和演化, 并可能在坡帮区域发展成为较大规模和相当范围的卸荷裂隙。应特别指出, 平行船闸轴线有一组主干节理, 有可能较严重地威胁着边坡开挖后的持续稳定, 它在南坡为顺层滑动, 在北坡则为倾倒破坏。卸荷裂隙系由拉应变所引发, 其形成和发展与岩体结构密切相关, 其与结构面和开挖临空面的不利组合将有可能导致坡帮的局部失稳和破坏。此外, 水对边坡岩体损伤的加剧作用, 更将进一步恶化岩体结构面性状和卸荷裂隙的累积、演化和贯通, 从而就块体力学言, 它将对这类原非贯通块体的稳定性产生重要影响, 甚至危及岩坡的整体稳定。

在以往的理论分析与工程实践中, 极限平衡法始终是堤坝、天然边坡和其它岩体结构稳定性的主要分析方法, 其中对平面滑动和楔形滑动的极限平衡稳定分析在岩坡稳定研究中得到了广泛应用。然而, 在一定地质环境下所形成的块体实际上往往并不能完全按照上棕理想的平面滑动面滑塌失稳, 其真实滑动面可能是曲面, 而更多的将是不规则形的折面, 且具有它独特的分形特征, 因而, 我们认为可概化为一种“分形面”。这样, 即使对裂隙不很发育的微新岩体边坡言, 岩体也被这些“分形面”不同程度地切割, 形成了各种类型的空间分形块体。在自然状态下, 这些空间分形块体处于静力平衡状态; 但当边坡开挖以后, 使暴露在坡帮临空面附近的某些分形块体失去了原先的静力平衡, 进而使其沿着“分形面”滑移、塌落, 并可能产生连锁反应, 造成边坡岩体较大范围的失稳破坏。

因此, 在本子专题中为了分析岩坡内的任意形状分形块体的稳定性, 我们首先应用能量法则对三峡船闸边坡岩体稳定问题采用分形块体理论建立了分形块体分析模型, 该模型可用以分析任意形态分形块体的稳定性, 而传统的平面和楔形体以及沿圆弧面滑动失稳等均可视为该模型的某种特例情况。我们结合三峡船闸高边坡岩体稳定的工程实际, 指出: 若三个或三个以上“分形面”构成滑动面时, 分形块体的稳定性将明显减小, 即易于形成范围较大的局部失稳。尤其是开挖后由于大量卸荷裂隙和爆破裂隙的产生, 它们与原生裂隙、优势结构面和开挖临空面的不利组合将有可能形成上述各类分形块体, 对边坡失稳构成潜在的危害。

此外, 节理岩体中的坡体开挖一般是在环境不完全清楚情况下的施工活动, 其块体破坏模式是多种多样的, 既有个别分形块体的掉落, 也可能导致较大体积分形块体的崩塌。为了考虑所有可能的分形块体破坏模式, 在石根华关键块体理论的基础上, 我们将分形几何与块体理论相结合, 建立了分形块体理论, 提出了分形块体的赤平解析方法, 为分形块体(凸体或凹体)的稳定性提供了另一种分析途径。结合三峡高边坡岩体的工程实际, 作为第一步, 现阶段工作首先是分析了分形块体在岩体原生裂隙作用下的滑动失稳。初步分析结果已表明: 在未考虑卸荷裂隙、爆破裂隙以及水体渗流作用的恶化影响下可以认为三峡船闸高边坡岩体的稳定性是好的, 不存在较大范围的失稳破坏问题。

这阶段的研究只是相当初步的,下步工作将致力于卸荷裂隙与爆破裂隙对岩体稳定附加不利影响问题的研讨。此外,分形块体的转动以及地下水作用对“关键分形块体”的影响问题也将是下步重点的待研究内容;并试图与岩体的二次应力场、应变场相结合,有望突破这类岩体结构的不连续变形问题。然后,通过1996年研究工作的进一步具体化和应用,有了下述的一点成果。

针对三峡工程高边坡实际情况,从岩体的非线性和非连续本质特征出发,提出并建立了用于岩质边坡稳定分析的分形块体理论。进而,从理论分析和工程应用两方面,对三峡永久船闸高边坡的稳定性进行了较为深入的研究,得到的主要结论及研究成果如下:

(1) 岩体是分形结构面和分形块体的共同体,岩体分形结构面空间产状相互组合关系及其切割机制等结构条件直接决定着高边坡岩体块体失稳模式及其稳定性。

(2) 分形块体理论在三峡高边坡工程中应用结果表明:(a) 三峡永久船闸高边坡南、北坡均存在一定数量的关键分形块体,其分布大多出现于微新岩体内,且南坡多于北坡;(b) 开挖临界坡度南坡(67.0°)亦小于北坡(73.9°);因此,三峡高边坡加固的重点应是下部微新岩体段,且南坡加固程度应高于北坡。

(3) 分形块体理论分析表明,凸形边坡不利于边坡稳定,建议正在施工的三峡高边坡直立段底部建成凹圆弧形,这将对高边坡整体和局部稳定极为有利。

(4) 三峡永久船闸高边坡在原生裂隙切割下,所构成的关键分形块体在数量和规模上虽是有限的,但受开挖卸荷、爆破及水的作用后,关键分形块体将会明显增多,尤其是小裂隙、小断裂的扩展、连通,较易于形成范围较大的局部块体失稳。

(5) 关键分形块体的概率分析表明,分形块体体积愈小,组成分形块体的面愈少,则分形块体愈容易失稳。

(6) 关键分形块体一般仅影响边坡很有限的区域,只要在开挖时加强监测和施工地质预报,都可以预先发现,并及时进行适当的锚固,即可保证施工期以及长期运行的安全。

下面谈一下尚有待进一步研究的问题:分形块体理论从岩体的非线性和非连续的本质特征出发,将分形几何与块体理论相结合,形成了独具特色的分形块体理论赤平解析法。该理论符合工程实际,简单、明了且易于被工程界接受,为岩质边坡稳定性分析开辟了一条新的途径。然而,分形块体理论尚处于发展阶段,它的进一步发展是与岩体的应力、应变分析结合起来,从而有望突破岩体结构的“不连续变形”问题,它还可与渗流分析相结合,研究天然岩体的渗流特性以及渗透路线的形态和流速的趋势,其与损伤断裂的结合也将有比较大的意义。

此处,虽然对三峡永久船闸高边坡稳定性进行了较为深入的研究,但是,由于受客观条件的限制,尚无法开展用分形块体理论计入卸荷裂隙和爆破裂隙对高边坡稳定影响的研究,亦有待下一步进行研讨。

5 边坡岩体开挖卸荷条件下的数值计算方法

对船闸边坡一闸室的若干个典型剖面,按5~7步分部开挖卸荷情况按二维平面应变条件分别进行了数值模拟计算分析,包括:(1) 弹—粘塑性有限元法 TJ-VP 程序;(2) 有限差分 FLAC 程序;和(3) 岩体非连续变形分析 DDA 程序三个内容,其结果简述如后。

(1) 有限元法分析表明:

①在开挖卸荷后,南北坡、闸室和中隔墩的边帮部位均产生有一定范围的塑性屈服区和拉应力区。随着向下逐步开挖的进行,塑性区和拉应力区也不断增大。开挖所导致的塑性区多包含于拉应力区中,两侧边坡直立坡段上部约 $2/3$ 坡高范围存在三角形分布的拉剪屈服区,中隔墩由于三面卸荷及闸室底板的挤压,中隔墩上部约 $1/3$ 范围为拉(剪)屈服区。在南、北边坡的坡脚由于压应力集中,而为压剪屈服。在边坡深部没有形成危及边坡稳定的塑性区分布形式。

②从总体上讲,三峡船闸区的工程地质条件是好的,船闸区域不存在大规模的整体失稳破坏问题。对于剖面 20—20' 由于其坡高大,在开挖卸荷的作用下,在边坡岩体的全强风化层中可能产生滑动破坏,南、北边坡的开挖面及其邻近区域将可能出现局部破坏,但在边坡的内部没有出现深层破坏现象。因此,可通过削去一定厚度的全强风化层,对局部破坏区域及时进行加固,坡帮的局部稳定也还是可以确保无虞。

③利用改编的有限元程序对开挖坡高最大的剖面 20—20' 进行分步开挖数值模拟分析,研究表明边坡岩体由于开挖卸荷而产生的破坏形式主要为拉破坏或拉剪破坏。

④通过绘制的图表形象地表明了随着开挖卸荷的进行,边坡岩体的变形、应力、拉裂及塑性区变化发展状况,取得了满意的效果,且与已有的结果较为一致。

⑤数值模拟结果表明:三峡船闸剖面 20—20' 在开挖过程中全强风化岩层可能产生滑破破坏,其它除局部地段(如闸顶平台、直立墙及中隔墩上部)可能产生拉破坏或拉剪破坏,但只要及时采取适当的锚固措施,现行的设计方案是安全可靠的。

(2) 有限差分方法分析表明:

①位移特征

各闸室两侧非直墙岩体边坡因地质构造及坡面台阶的不同,在各开挖步产生的最大水平位移值有一定的差异。其中 20—20' 剖面最小位移为 14mm, 17—17' 剖面位移最大为 68mm; 与开挖深度成正比,随着开挖步其值不断增大。由于本计算没有考虑岩体的流变特性,所以各剖面水平位移在闸室开挖到底后随即稳定。从 17—17' 和 20—20' 两剖面闸室两侧非直墙边坡位移由地表面到直墙边坡位移分布图可见,该段边坡位移除 17—17' 剖面左侧由地表(地表处最大)往下呈减小趋势外,其余均呈增大趋势。分析其原因是由于 17—17' 剖面左侧边坡正巧处于岩脉侵入带,计算时按弱风化岩考虑取用参数,因此,算得的变形较大且呈上述趋势。

直立闸室岩体包括直立墙和中隔墩两部分,由于闸室直立边坡高达 80m (17—17'), 因此,在计算时给予了特别注意。直墙段和中隔墩最上点水平位移均随着开挖深度的增加而增加,由于地质条件的不同,即使是同一中隔墩左右最上点水平位移也有较大的差异,沿深度方向最大位移点均在最上端拐角点,从上往下呈递减趋势,该部位也是易发生失稳的地方。

②应力分析

根据计算可知,拉应力均出现在非直墙边坡处,其位置、量值与坡高和岩性有关。如 20—20' 剖面最大拉应力出现在距地表 $1/3$ 处, $H = 130\text{m}$ 处最大拉应力值为 $\sigma_{2\max} = 0.592\text{MPa}$ 。该剖面拉应力区内拉应力大部分不超过 0.5MPa 。

(3) 非连续变形分析表明:

船闸 20—20' 剖面计算结果表明,岩体被开挖后,船闸边坡及中墩近临空面在一定范围