



水电能源开发中的关键工程地质体力学问题



李世海*, 周东, 王杰, 王理想, 冯春, 刘晓宇, 刘青泉

中国科学院力学研究所, 北京 100190

*联系人, E-mail: shli@imech.ac.cn

收稿日期: 2013-05-28; 接受日期: 2013-11-05

国家重点基础研究发展计划资助项目(批准号: 2010CB731500)

摘要 本文首先讨论了能源开发建设所面临的工程问题和科学问题, 简述了工程地质体力学的内涵和应解决的核心问题. 特别介绍了笔者研究团队最近几年的研究成果, 提出了相关科学问题的研究方向. 主要内容包括: 传统固体力学中关于点破坏的概念, 研究地质体有很大的局限性, 论述了用破坏程度描述地质体破坏状态的合理性, 以及基于监测与数值模拟相结合的破坏状态概念——破裂度; 基于破裂演化原理, 讨论了工程地质灾害的两个防灾理念, 强调了状态判断的合理性及数值模拟方法的重要性; 讨论了地质体稳定性分析方法的评价标准, 并对目前常见的几种评价方法做了简要的评述; 提出了数值模拟地质体的非连续、非均匀性的两尺度力学模型和计算框架; 论述了代表性体积单元尺度上的应变强度分布函数, 该函数比本构关系表征材料的破坏特性更为合适; 综述了地质体孔隙裂隙渗流及与破裂场耦合模型的计算模型; 结合汶川地震次生地质灾害的现象, 指出了拟静力计算方法的不合理性, 介绍了关于地震作用下地质体边坡稳定性的数值模拟新方法.

关键词 地质体力学, 破裂度, 应变强度分布, 孔隙裂隙渗流, 动力时程分析

PACS: 91.55.Ax, 91.55.Jk, 91.60.Ba, 89.30.Ee, 89.60.Ec

doi: 10.1360/132013-243

水利水电工程是能源开发的重要组成部分, 开发我国西部水电资源是国家重大战略之一. 然而, 我国西部地区地质构造和地质环境复杂, 水电工程建设及水库运行中必然面临着工程诱发地质灾害、地质工程安全的问题. 其中, 主要包括山体的崩塌、滑坡、泥石流, 地下厂房和隧道建设中的岩爆、突水,

大坝与岩体复合结构在水与地震荷载作用下的稳定性安全评估等工程问题; 解决这些工程问题都离不开研究地质体变形与破坏的规律. 此外, 各种地下矿藏开采过程中, 开采空间的岩体稳定性、常规及非常规油气藏高效开采中水压致裂等, 研究的对象也是地质体. 因此, 能源开发建设需要研究工程地质体力学.

引用格式: 李世海, 周东, 王杰, 等. 水电能源开发中的关键工程地质体力学问题. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: 1602–1616
Li S H, Zhou D, Wang J, et al. Key problem of engineering geomechanics in hydroelectric energy exploitation (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2013, 43: 1602–1616, doi: 10.1360/132013-243

工程地质体力学^[1]作为力学中独立学科的主要标志在于以解决工程问题为目的, 研究工程尺度的地质体的变形与破坏的规律. 而地质体与其它力学研究对象的主要区别在于其非连续性、非均匀性、流固耦合及未知的当前状态(当前状态是指地质体演化的当前结果, 又是预测灾变的初始条件). 很显然, 工程地质体力学是与地质、力学和工程技术密切相关的. 地质体力学的核心包括 2 个方面: 其一, 认知地质体的变形、破坏与运动规律; 其二, 获得与具体工程相关的工程规律. 就上述与能源相关的地质体工程而言, 前者更具有普遍意义, 而后者对解决工程问题更有价值.

以地质体为研究对象的关键力学问题包括: 地质体破坏程度的评价方法、地质体中岩土体与水的相互作用规律、地质体变形与破坏的现场监测方法及基本理论、地质体数值模拟的力学模型与算法等. 本文围绕着上述关键科学问题, 对国内外相关的研究工作做了概要评述, 特别介绍了笔者研究团队最近几年的研究成果, 提出了相关科学问题的研究方向. 主要包括: (i) 地质体破坏程度的表述方法与破裂度; (ii) 基于破裂演化原理的工程地质灾害防灾理念; (iii) 地质体稳定性、安全性分析方法的评价标准; (iv) 地质体的非连续、非均匀特性与两尺度力学模型; (v) 表征材料特性的应变强度分布函数; (vi) 地质体孔隙裂隙渗流及与破裂场耦合模型的计算方法; (vii) 高陡边坡在地震作用下的破坏机理及评价方法.

1 地质体破坏程度的表述方法与破裂度

1.1 材料的强度理论与破坏准则

材料的强度理论从 18 世纪到 20 世纪分别由不同的科学家提出来, 形成了材料力学的四大强度理论, 它包括最大拉应力、最大拉应变、最大剪应力、最大形状改变比能理论. 后来由众多的科学家在此基础上提出了各种不同的破坏准则. 这些理论的基本出发点是将破坏定义为点的特征, 即应力、应变. 而在实际应用过程中, 针对不同的工程, 强度理论的应用采用了不同的方法. 强度理论的应用也随着力学理论和计算方法的发展而发展.

随着弹性力学和数值模拟技术的发展, 可以得到材料内部的弹性应力场, 给出任意截面上的弹性应力. 从理论上讲, 当介质中某一点的应力或应变满足强度

准则时就称为破坏, 工程上将点的应力与容许应力的比值定义为安全系数. 该方法的局限性在于弹性力学的理论解很有限, 难以解决工程实际问题, 而数值方法所给出的应力值对单元有很强的依赖性.

基于塑性力学和相应的数值方法分析材料的破坏更接近工程实际, 理论上也更合理. 当某一点的应力达到应力强度时, 材料进入塑性状态, 其应力值不再增加或者开始减小. 该点周围区域的应力值就会提高, 当局部区域进入塑性状态后周围的区域应力提高, 实现应力转移的过程, 承担局部破坏失去的能力, 提高承载力.

断裂力学认识到连续模型应力场体系的缺陷, 在裂纹的尖端应力可以达到无限大, 利用强度准则, 裂纹就会无限扩展, 而事实并非如此. 断裂力学解决这一问题的方法就是找一个将集中应力转化为局部应力的尺度, 提出了应力强度因子的概念, 建立了特定条件下断裂能与应力强度因子的联系. 非线性断裂力学认为裂纹尖端有一个特征尺度, 建立断裂能与这一特征尺度的联系, 大量的理论和试验研究均通过特定的试验和数值方法, 致力于解决单个裂纹的发展.

1.2 地质体的破坏面分析方法

地质体内部充满了裂隙, 就点的强度准则而言, 在每个裂隙面上所有的点都满足强度准则, 在裂隙的边缘或尖端也可以沿用断裂力学的表述方法. 然而, 当存在着裂缝“分布”时, 研究单一裂纹的方法应用起来很困难. 当裂隙长度和研究区域的尺度相比不满足均匀化假设的连续介质模型时, 采用力平衡的分析方法更为简洁和为人接受. 刚体极限平衡法^[2-4]意义正在于此, 假设可能滑动、破坏的区域为刚体, 通过分析可能穿过的破坏面上力的平衡, 进而确认滑体的稳定性. 事实上, 这是一种与材料力学几乎相同的处理方法, 只是前者选取了构件的截面, 后者选取了地质体内的截面.

极限平衡方法自出现以来, 一直作为工程师经验判断的参考方法, 为地质专家的经验提供了量化的尺度. 在中国, 这种方法写入大学教材, 又列入国家规范, 并且一直沿用几十年至今. 即使后来有了有限元、离散元大规模先进的计算技术, 发展了一系列更符合实际的力学模型, 也无法取代极限平衡方法在工程界广泛应用的地位. 值得注意的是, 工程实践

中,经常出现外延该方法适用范围的情况,对计算结果要求的精度远远超出了模型不合理的误差。为此,有必要对该方法进行深入的剖析,使工程专家和科学家对此有更为深刻的认识。在这里仅就其适用范围和计算精度做简单说明: (i) 刚体极限平衡方法基于刚体的滑动假设,不适用于计算有“倾倒”因素的问题;假设滑面以上为刚性体,不适用地表或内部有裂缝和非均匀介质材料;假设滑坡体的破坏过程是同时发生的,不适用于渐进破坏问题。一般说来,满足上述 3 个条件的山体只有滑面为平面或可近似看作平面,滑面以上的山体是较为均匀岩体,滑面的强度远低于滑体的强度。(ii) 影响地质体稳定的因素很多,坡面形状、滑面位置、各种力学参数等,输入参数误差很大,该方法的量化分析又没有其它可测物理量校核,其结果仅供经验参考。对量化精度要求到 5%(安全系数 1.05)也没有科学依据。

刚体极限平衡法把研究对象当作一个“试件”很有意义,注意每一个灾害体都具有其独特性,将地质专家的工程类比法向量化推进了一步。

1.3 地质体的破裂场及评价体系

孙广忠^[5,6]提出了岩体结构控制论,认为岩体的结构是至关重要的,给出了几种岩体结构形式,并研究了不同结构形式的力学行为。与刚体极限平衡方法比较,结构岩体的理论是把研究对象当作一个复杂的结构系统,并且这个结构系统的结构并不是已知的。事实上灾害体内部的结构还是不断演化的。总结抽象地质工程专家的经验,李世海等人^[7]提出了用地质体的破裂程度表征地质体的破坏,认为地质体的破坏可以根据其破坏程度分为如下几个阶段。

既有破坏: 表征地质体当前状态或者过去某一时刻的状态,其破坏是指地质体内部既有的结构面。

局部再破坏: 表征在受力条件、材料强度演化情况下,内部结构面局部扩展、相邻结构面联通以及萌生出新的破坏面的过程。

贯穿性破坏: 表征研究区域尺度下,形成了贯穿整个区域的结构面、破裂面的状态。

碎裂性破坏: 表征研究区域内形成贯穿性破坏之后,域内进一步的破裂,形成了在边界和贯穿性破坏面包围的区域内次级的贯穿性破坏面,贯穿性破裂面逐渐增多的过程。

运动性破坏: 在多级贯穿性破坏形成之后,研究

区域内发生局部或者整体的运动过程。

应当说明,地质体的破坏演化是始终存在的,而这个演化本身就是一个动态过程。上述的五种破坏阶段正是一种表征演化过程中破坏程度的描述方法,各个破坏状态需要有明确的定义,也应该有量化的参数表达。

1.4 描述灾害体破裂状态的重要物理量——破裂度

如前所述,研究地质体的成灾过程必须认知地质灾害体的特殊性、结构性和演化性。这就需要针对具体的灾害体定量地刻画其破坏状态;灾害体的结构性是灾害体内部结构面、破裂面的空间分布特性;破裂面的空间分布是不断变化的,如同破坏从一个状态演化到另一个状态。为了将破坏状态定量化,我们提出了破裂度的概念。

破裂度是度量灾害体破裂程度的物理量,是灾害体当前状态下的破裂面积与灾变破裂面积的比值:

$$D_b = \frac{S_c}{S_d},$$

其中, D_b 是破裂度, S_c 为指定状态下的破裂面积, S_d 为发生灾变时的破裂面积。应当说,地质体内部的破裂面积不是可测物理量,是一个不可知的物理量,上述定义有问题,需要补充说明如下:

破裂度是将数值模拟与现场监测相结合,针对具体的灾害体和确定的演化条件,建立确定的地质模型、力学模型和计算模型,借助于数值模拟计算出灾变过程中统计得到的当前破裂面积与灾变破裂面积之比。

计算破裂度的具体步骤如下:

(i) 根据地质环境、地形和地质构造建立地质力学模型;

(ii) 建立基本方程、确定材料本构关系、引入几何尺寸、边界条件,形成力学模型;

(iii) 划分计算网格,形成计算模型;

(iv) 选定计算方法,该方法应具有连续—非连续计算模型,能够模拟灾害体的渐进破坏过程的功能;

(v) 数值模拟初始地应力场、初始破裂场;

(vi) 给定演化条件: 在材料强度参数的取值范围内,取不同的强度参数计算;或者给定一组材料参数并增加重力荷载,求出不同参数下的破裂面积,进而得到一组灾变状态下的破裂面积;

(vii) 将数值模拟获得的结果(如地表位移、倾角、地表破裂位置、地表破裂现象等)与现场观测结果比较,取最接近的工况作为当前状态;

(viii) 求得当前状态的破裂度.

从破裂度的定义和求解过程可以看到,破裂度的表征有如下三个基本要素:其一,破裂度的计算方法基于对地质体全尺度及灾变演化全过程的数值模拟;其二,数值模拟的结果是通过现场监测结果验证,并经过筛选获得的;其三,地质体的灾变状态是通过数值模拟预测得到的.

2 基于破裂演化原理的工程地质灾害防灾理念

地质灾害安全评估及灾害预警研究的历史很长,科学家们提出了各种分析方法和预警的理论,有些研究工作非常具体和深入.当我们意识到,地质灾害的成灾过程是地质体内部破裂演化过程这样一个基本的原理,将力学和地学融合,基于新的监测技术和数值模拟方法,就会很自然地建立工程地质灾害防灾的新理念.现分别论述如下.

2.1 将地质灾害成灾过程的预测转化为地质体破坏状态的判断

地质体的内部结构复杂,其成灾过程也十分复杂,根据一些测量结果和现象,对地质灾害进行时间预报和预警面临很多难以克服的困难,主要原因如下:

(i) 地质灾害的发生总是与突发因素有关,通常不知道突发因素发生的时间,也就不可能预测突发因素之后灾害发生的时间.

(ii) 对于滑坡问题,致灾的作用力和阻止灾变的作用力在相同的量级上,一些偶然的因素都有可能提前和缓解灾害发生的时间,地质体内部复杂的地质条件很容易形成这些偶然因素.

(iii) 单一诱因的定量化预测也很困难.地质体的监测信息通常是局部的、表面的,地质灾害的发生是综合因素的结果.

地质体的破坏状态是地质体众多诱因作用下形成的基本特征.只有发展到运动性破坏才能够成灾,不同的破坏状态可以确定地质体的破坏程度.将复杂成灾过程的预测转化为具体的、确定的破坏状态判断就可以忽略枝节因素,抓住主要矛盾.

2.2 将现场监测和数值模拟相结合建立可测物理量与内部破坏状态之间的联系

如前所述,地质体的破坏状态至关重要.怎样才能对地质体的当前状态做出判断呢?现代数字通讯和监测技术以及数值模拟方法为解决这个问题创造了必要的条件.

在监测方面,数字通讯技术可以将现场监测数据实时地传输到灾害预测分析人员的工作室,为分析人员提供校核模拟结果的依据.监测的物理量也从个别点的信息扩展到地表的全场信息,从地下测点的小位移扩展到大位移,从单一几何和岩土参数扩展到其它如声、电磁、电阻等物理量.

在数值模拟方面,已经有了适合地质体模拟的离散模型和连续-非连续模型;通过 GPU 并行计算,不仅计算速度有了量级上的提高,计算单元数也有了大幅度的提高.相应的计算软件可以支持满足分析要求的山体全尺度模拟,并且基本可以在个人电脑上实现.

然而,人们也充分认识到,监测信息是真实客观的,反映了灾害体的本来面目,却是局部的、表面的,监测的物理量也很有限;数值模拟可以通过计算获得全场丰富的信息,而这些信息只是建立在理论模型及未必准确的物理参数选取基础上的.将现场监测与数值模拟相结合就可以充分利用两种方法的优势而弥补其不足.

3 地质体稳定性、安全性分析方法的评价标准

地质、工程、力学专家都依据自己的知识结构,提出了评价和分析地质体稳定性、安全性或变形破坏规律的定量化方法.大体上可以分为三大类:力平衡和运动学方法、经验参数法以及求定解问题的方法.在每一类中又含有不同的形式,种类繁多.如何评价这些方法呢?可否有一个较为统一的认识或者标准呢?笔者提出了对分析方法的评价要素:

(i) 分析方法是否具有描述地质体基本特性的功能

一般说来,地质体的基本特性主要表现在三个方面.其一,是独特性.每个灾害体都有其自己的特点,或几何尺寸、或地质成因、或诱发因素、或当前状态,分析方法必须能够具体问题具体分析,类比和

复制其它成功的案例不可取。其二,是结构性。无论是岩质的、土石混合体的,还是土体的灾害体,都具有结构性,这种结构性表现为复杂而有序。分析方法应该能够用确定性的方法定量地表述有序性,用概率的方法定量地表述复杂性。其三,是动态演化性。同一灾害体,“原始”的地质调查结果基本不变,但是受各种因素的影响,灾害体的状态却不同,甚至是在不断的变化。分析方法应该能够表征这种演化特性。

(ii) 分析方法是否能够充分利用可测物理量

地质体的独特性、结构性和动态性可以归结为地质体当前状态的不可知特性。解决问题的唯一途径就是充分利用监测信息——可测物理量。人们对灾害体表现出来的信息了解的越多,对它的状态认识就越全面。分析方法利用监测信息越多,对内部破坏状态的定量化表述就越准确、越可靠。利用可测物理量包括输入参量的利用和输出参量的校核。

(iii) 分析方法是否尽可能少的利用专家经验

毋庸置疑,地质和工程专家对灾害体安全性的判断有很好地经验,这是他们长期积累的结果。目前大多数分析方法得到的结果都需要和专家经验相比较,有些是专家先给出结果,再由分析方法反分析参数,给出与专家一致的结论。依赖专家经验或较多的依赖专家经验都不能称为好的分析方法。当然,首先要能够将专家经验定量化,进而摆脱专家的经验,超出专家的判断能力是分析方法必须做到的。

按照上述的评价标准,我们可以对已有的分析方法作简要评述。譬如,滑面上力平衡的方法无法校核输出的结果,也不能利用变形信息;运动学的方法不能利用岩土体的材料参数;经验参数法、专家评分与神经网络结合的方法需要依赖专家经验;数值模拟方法中连续模型不能很好的表征地质体的破裂;完全非连续模型不能很好的表征灾害体的演化;描述固体介质的连续-非连续模型不能表征地质体的流固耦合特性等等,即使很全面的力学模型在利用监测信息时也不能完全的摆脱灾害演化过程中的概率误差及不完备地下信息带来的不确定性。

4 地质体的非连续、非均匀特性与两尺度力学模型

地质体的非均匀特性主要是指材料力学特性的非均匀性。其一,是弹性模量的非均匀性,如土石混

合体中块石的弹性模量在 10^9 – 10^{10} Pa, 而土的弹性模量一般在 10^7 Pa; 并且块石的分布以及块石的大小也具有不确定性。这就给理论分析、实验方法以及数值计算方法带来了难度。其二,是材料强度的非均匀性。材料的强度要比弹性模量复杂得多,它涉及到不同的本构模型和强度准则,特别是岩土类介质,包括应力强度准则、应变强度准则,在同一类准则中还有拉伸强度和剪切强度。有些复杂的材料本构模型,包含有 20–30 个材料参数。由此带来的问题不仅仅是怎样利用这些参数进行计算,而如何确定这些参数本身就成了难题。

当地质体内部的结构尺寸与所研究问题的尺度具有相同的量级或者量级接近时,材料的结构性就不可忽略。如果仍然用均匀化的模型,所表现的力学行为就会变化莫测。在土力学试验中的试样直径是几厘米,如果土颗粒的尺寸或者土颗粒团的尺寸达到毫米量级,土的特性就很难用均匀化模型表述了。山体的尺寸(如滑坡、崩塌体)长度百米到千米,厚度在十米到几十米。当结构面的间距、长度一般在米以上时,灾害体的特性基本上是由结构面控制的。采用连续模型很难准确表述。我们把介质均匀化、本构关系复杂的力学模型称为“简单结构、复杂本构”,这类模型的基本思路是将复杂的几何问题转化为复杂的物理问题。而另一类模型的思路,是尽可能地表述材料复杂的几何模型,材料的本构关系采用弹性、断裂、摩擦这些基本关系,此类模型称为“简单本构、复杂结构”。两种模型都是要表述复杂地质体的力学行为,两种模型都有优势也都有不足。将整个山体用均匀化模型描述而不关注内部结构或者山体受各种扰动产生的宏观裂隙,显然是不合理的;将山体内部各种尺度的宏观裂纹都具体的刻画出来,不进行简化和抽象,具体实践中也难以实现。克服这些困难需要建立两个尺度的模型。

4.1 宏观尺度模型

该尺度下需要思考 2 类问题。

(i) 建立该尺度下的地质体结构面的几何模型。如,断层、地层、构造运动形成的结构面以及卸荷结构面,这些几何尺寸均可以在宏观尺度模型中定量的表述,尽管有些确定的几何位置和密度不够准确,但是,可以给出概率的分布或者利用现场调查的结果;对于土石混合物,也可以给出既有的裂缝位

置、土石混合体的土石比以及块体尺度的分布。

(ii) 建立该尺度下的可均匀化单元。在计算模型中, 还需要建立结构面之间包含连续区域的单元, 这些单元的尺寸, 是宏观尺度模型需要考虑的。单元的尺寸应遵循 2 个原则: 其一, 计算中单元内的应力变化不大; 其二, 单元尺度下, 内部的非均匀性、非连续性微元的尺度与单元尺度相比可以忽略。

通常的计算方法是单尺度模型。在该尺度下模拟地质体变形与破坏, 计算方法主要包括连续模型、非连续模型、连续-非连续模型。

连续模型, 代表性的方法包括有限元、有限差分法等; Swenson 等人^[8]采用传统有限元方法模拟裂纹的扩展过程, 通过将裂纹设为单元的边、裂尖设为单元顶点, 采用网格重新剖分的方式, 实现裂纹在计算域内的扩展, 但是网格重构极大的影响了该方法的计算效率。Goodman 等人^[9]在有限元的基础上, 在单元间增加界面单元, 通过定义交界面两侧的法向和切向相互作用与张开度和滑移变形之间的关系, 模拟裂缝在材料中的萌生与扩展过程。由于上述方法均是以连续理论为基础, 在模拟岩石的破裂问题中, 面临着数值求解不稳定、方程病态等许多明显的问题。

非连续模型, 代表性的方法有离散元方法和不连续变形分析。离散元可以将块体视为刚体或变形体, 块体之间通过弹簧连接, 通过弹簧的破坏实现块体之间的破坏。侯艳丽等人^[10]在变形体离散元中引入了弥散式裂缝模型和分离式裂缝模型, 分析了岩石等脆性材料的破坏过程, 但裂纹扩展路径均是预先设置在单元的界面上, 无法进行任意方向的扩展。常晓林等人^[11]在变形体离散元的基础上, 引入损伤、断裂的黏聚力模型, 通过界面单元的起裂、扩展和失效, 实现岩体开裂的模拟。Ke^[12]基于非连续变形分析方法, 通过加入人工节理及分割子块体的方法模拟块体的破裂。这两种方法能够准确模拟块体间的破坏及刚体运动, 在大位移及非线性问题的计算上效率较高。但该方法由于基于离散介质假设, 故无法模拟介质由完全连续到非连续的破坏过程, 同时破坏仅发生在块体界面上, 受初始网格的影响较大, 无法实现块体内部的断裂。

连续—非连续模型主要的工作是将有限元和离散元融合。连续介质模型和非连续介质模型分别具有各自的优势, 那么将两种模型结合为统一的连续-离散模型则是国内外的研究热点。Owen 等人^[13]在有

限元网格中嵌入裂缝实现连续向非连续的转化, 并用该方法来研究脆性材料在冲击作用下的力学行为。Munjiza 等人^[14]将有限元和离散元耦合, 在有限元中引入了损伤、断裂理论, 当材料破裂后利用离散元的方法在块体边界间进行接触计算。Li 等人^[15,16]基于连续-离散耦合分析的思路, 提出了连续-非连续单元法(CDEM), 并应用于地质体的渐进破坏分析。该方法在连续计算时, 将块体单元离散为具有明确物理意义的弹簧系统, 通过对弹簧系统的能量泛函求变分获得各弹簧的刚度系数, 进而直接采用弹簧刚度求解单元变形和应力, 连续问题计算结果与有限元一致, 在继承了有限元的优势的同时提高计算的效率。在此基础上, 通过引入 Mohr-Coulomb 与最大拉应力的复合准则, 确定单元的破裂状态及破裂方向, 进而采用局部块体切割的方式实现单元内部和边界上的破裂, 显式模拟裂纹的形成和扩展。该方法不用预先设置裂纹扩展的路径, 且扩展过程中不受初始网格的限制, 可以有效的解决拉伸、压剪等复杂应力状态下多条裂纹的扩展问题。单元破裂后, 在破裂的单元面上相应的建立接触边模型用于块体之间的接触检索, 从而可以模拟连续-离散耦合介质向离散介质转化后的大运动和转动问题。

4.2 代表性体积单元尺度模型

该尺度下通常有三类处理方法。

(i) 均匀化模型。认为单元内部没有结构, 即, 均匀化假设, 采用实验获得的材料本构关系, 建立线性或非线性单元计算模型。主要的代表性方法是扩展有限元方法, 如 Belytschko 等人^[17,18]的工作。该方法通过引入非连续的阶跃函数来表征裂缝两侧的非连续位移场, 求解连续介质的损伤断裂问题, 该方法不用进行网格重新剖分, 即可模拟裂纹的扩展。

(ii) 离散化单元模型。认为单元内部由颗粒组成。在单元内部用离散元模型, 通过离散元颗粒的计算给出单元尺度上的宏观特性, 近年来, 在这方面有大量的研究工作, 其中包括确定颗粒之间作用力形式、颗粒的旋转等计算模型, 也有一些新的理论模型和计算方法, 如 Li 等人^[19-21]的颗粒材料模型, 通过代表性体积单元内部微颗粒的细观作用, 得到材料复杂的宏观力学行为。另一些损伤模型通过考虑材料参数的离散性来描述材料的渐进破坏过程, 如 Tang 和 Wang 等人的损伤计算模型^[22,23], 这类模型提

出非均匀性(如弹模、强度)是非线性的根源,将材料内部的非均匀损伤转化为单元弹性模量的衰减,从而刻画材料的非线性力学行为。该模型对材料内部破裂损伤区域的力学行为表述有待于进一步发展。

(iii) 连续-非连续模型。这是一类介于均匀化模型和离散模型之间的模型。一方面可以用应力应变模型表征材料的均匀化特性,另一方面又引入了材料断裂、摩擦特性以及均匀破裂场的破裂面积。Li 等人^[24-26]提出了一类应变强度分布本构模型,事实上是将宏观尺度中破裂度的概念在代表性体积单元尺度中表述,考虑了材料内部强度的非均匀性、细观微破裂面的摩擦及拉剪联合作用下的破坏模式,可以自然描述材料的非线性、应变软化等力学行为。

4.3 两尺度模型与材料本构关系之间的关系

通过材料试验机试验,可以得到试块的应力应变关系和材料的强度,获得试验的结果有如下基本假设:

- (i) 材料是均匀的;
- (ii) 特定形状的试块给出的力与位移之间的关系可以等效为点的应力应变关系;
- (iii) 特定形状的破坏荷载可以等效为材料的强度;

大量的试验表明,对岩土体而言,试块的形状和试块的非均匀性对材料的本构关系有影响,这表明上面基本假设对岩土试样而言,很多情况下不成立,这就是众多学者研究岩石细观特性的主要原因。

在单尺度模型中数值模拟认为岩块的应力应变关系和强度是基本的模型,无论计算单元的尺度多大,形状如何,基本模型都不变。在整个区域内单元节点力和位移的计算规则是一致的,由刚度矩阵建立联系。

在两尺度模型中,定义了工程灾害体的宏观尺度和代表性体积单元两个尺度。在宏观尺度下,地质体是由“均匀变形”的单元和结构面构成的,并且不同单元的力学特性有别,用以表征地质体的非均匀性;在单元内部有渗流,结构面内有流体流动;均匀变形的单元可以断裂。该尺度上的破坏分为既有破坏、局部再破坏、贯穿性破坏、碎裂性破坏及运动性破坏,可以用灾变破裂度表征。

在单元尺度上,单元在均匀变形条件下的损伤演化,表现为弹性变形、均匀化的破裂、摩擦效应、断裂能消耗等。该尺度上的破坏经过均匀损伤、损伤

局部化(局部再破坏)和单元断裂(贯穿性破坏),可以用单元的应变分布强度(见下节)和单元断裂表征。

两尺度之间的关联:其一,宏观尺度给单元尺度节点位移,单元尺度给宏观尺度节点力,这一点与传统的连续模型计算是一致的;其二,单元在计算过程中断裂,由单元尺度内的破坏演化,转化为宏观尺度的结构面。

5 表征材料基本特性的函数——应变强度分布函数

在连续介质力学的基本理论中,定义了一个微元体(正方形或正六面体),根据牛顿第二定律或力的平衡条件,建立连续介质力学的基本方程。微元体的基本假设是宏观无限小、细观无限大,微元体是均匀介质。进而假设微元体遵循重要的函数关系:本构关系即应力应变关系。本构关系是连续介质力学的基石,它是从实验中得到的。然而,大量的实验表明,对于岩土介质,通过试验获得的本构关系,离散度很大,应力应变关系的尺寸效应非常明显。特别是,岩土工程中经常需要材料的应力峰后特性,本构关系的尺寸效应更加明显。Tang 等人^[22]考虑了材料的非均匀性,用有限元方法模拟岩块的特性,说明了材料本构具有很强的不确定性。本构关系的不确定性动摇了应用连续介质力学的理论根基。对于数值模拟而言,通常计算单元的尺度远大于试样尺度,所模拟的真实介质更不均匀,其可信度值得怀疑。

代表性体积单元的概念,打破了单一强度和均匀化的假设。Bai 等人^[27-29]考虑材料内部微损伤的分布性,提出了微损伤统计演化模型和损伤局部化模型。Li 等人^[24-26]提出了应变强度分布本构模型,该模型是建立在代表性体积单元基础上的,不仅可以分析拉伸破坏,还可以分析剪切破坏。

基本假设如下:

- (i) 认为代表性体积单元是等应变的;

该假设与传统连续介质中的微元假设是一致的,不考虑微元内部的非均匀变形。

- (ii) 单元内部的拉伸应变强度和剪切应变强度服从某种分布;

该假设是应变强度分布准则的核心,也是代表单元与微元的主要差别。认为在代表性体积单元内的强度不是一个值,而是服从某个分布,拉伸和剪切

的强度可以采用不同的分布形式.

(iii) 代表性体积单元内由连续微元和断裂微元组成;

基于(i)(ii)假设, 该假设说明代表性体积单元内的微元只需要两种状态就可以描述复杂的应力-应变关系.

(iv) 微元的体积和微元的最大断裂面积之比是常数;

该假设定义了一个微元的特征长度, 由此建立了微元体积和断裂面积之间的联系, 也只有建立了这样的联系, 代表性体积单元的断裂面积计算就更加容易量化.

(v) 对于连续微元保持线弹性状态, 对于断裂微元, 处于拉断的微元在断裂面上的应力为零, 处于剪断状态的微元服从接触摩擦准则.

需要说明, 该假设是在代表性体积单元内的微元断裂, 是在细观尺度上准确地理论描述. 但是, 断裂面积及效果的宏观的定量表述是基于这一假设的结果.

在上述假设的基础上, 给出如下的代表性体积单元任意方向的本构关系:

$$\begin{aligned} \sigma_n &= I_e (2G\varepsilon_n + \lambda e) \\ &+ \begin{cases} D_b (2G\varepsilon_n + \lambda e), & \varepsilon < 0, \\ 0, & \varepsilon \geq 0, \end{cases} \\ \tau &= I_e G\gamma \\ &+ \begin{cases} D_b G\gamma, & G\gamma < \sigma_n \tan \varphi, \varepsilon < 0, \\ D_b |2G\varepsilon_n + \lambda e| \tan \varphi, & G\gamma > \sigma_n \tan \varphi, \varepsilon < 0, \\ 0 & \varepsilon \geq 0, \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, λ , G 为拉梅系数, 分别表示材料的体积变形和剪切变形模量; e , ε_n 和 γ 分别表示材料的体积应变、正应变和剪切应变; φ 为材料断裂后的摩擦角; ε 为名义正应变, 有 $E\varepsilon = 2G\varepsilon_n + \lambda e$, $\varepsilon < 0$ 表示材料受压, $\varepsilon > 0$ 表示材料受拉; I_e 和 D_b 分别为介质的完整度和断裂度, 具体表述如下:

$$I_e = \alpha_l \beta_l, \quad (2)$$

$$D_b = 1 - I_e, \quad (3)$$

$$\alpha_l = \begin{cases} 0, & \varepsilon \geq \varepsilon_{\max}, \\ \frac{\int_{\varepsilon}^{\varepsilon_{\max}} f(\varepsilon) d\varepsilon}{\int_{\varepsilon_{\min}}^{\varepsilon_{\max}} f(\varepsilon) d\varepsilon}, & \varepsilon_{\min} < \varepsilon < \varepsilon_{\max}, \\ 1, & \varepsilon \leq \varepsilon_{\min}, \end{cases} \quad (4)$$

$$\beta_l = \begin{cases} 0, & \gamma \geq \gamma_{\max}, \\ \frac{\int_{\gamma}^{\gamma_{\max}} g(\gamma) d\gamma}{\int_{\gamma_{\min}}^{\gamma_{\max}} g(\gamma) d\gamma}, & \gamma_{\min} < \gamma < \gamma_{\max}, \\ 1, & \gamma \leq \gamma_{\min}, \end{cases} \quad (5)$$

这里, $f(\varepsilon)$, $g(\gamma)$ 分别表示代表性体积单元单位体积内拉伸应变强度分布函数和剪切应变强度分布函数; α_l , β_l 分别表示代表性体积单元的拉伸完整度和剪切完整度; $\varepsilon_{\min}$, $\varepsilon_{\max}$ 和 $\gamma_{\min}$, $\gamma_{\max}$ 分别表示代表体积性单元内部发生微元断裂的最小拉应变、完全拉断的最大拉应变和发生微元断裂的最小剪应变、最大剪应变.

根据假设(iv), 对应的代表性单元拉伸断裂度 α_b 和剪切断裂度 β_b 的表达式:

$$\begin{aligned} \alpha_b = 1 - \alpha_l &= \begin{cases} 0, & \varepsilon \leq \varepsilon_{\min}, \\ \frac{\int_{\varepsilon_{\min}}^{\varepsilon} f(\varepsilon) d\varepsilon}{\int_{\varepsilon_{\min}}^{\varepsilon_{\max}} f(\varepsilon) d\varepsilon}, & \varepsilon_{\min} < \varepsilon < \varepsilon_{\max}, \\ 1, & \varepsilon \geq \varepsilon_{\max}, \end{cases} \quad (6) \\ \beta_b = 1 - \beta_l &= \begin{cases} 0, & \gamma \leq \gamma_{\min}, \\ \frac{\int_{\gamma_{\min}}^{\gamma} g(\gamma) d\gamma}{\int_{\gamma_{\min}}^{\gamma_{\max}} g(\gamma) d\gamma}, & \gamma_{\min} < \gamma < \gamma_{\max}, \\ 1, & \gamma \geq \gamma_{\max}, \end{cases} \quad (7) \end{aligned}$$

公式(6) 的物理含义可以图 1 表示, 图 1 为韦伯分布的密度曲线一般形式, 断裂度和完整度对应应变强度分布密度曲线下方的面积.

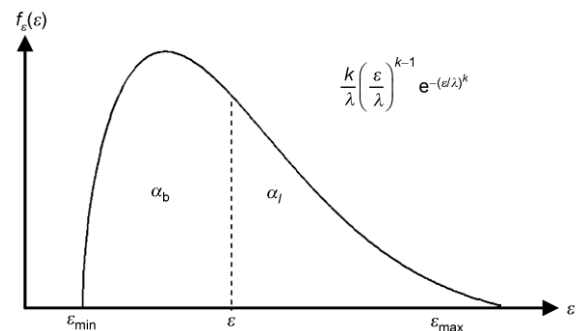


图 1 断裂度 α_b , 完整度 α_l 与应变强度分布密度曲线的关系

Figure 1 Relationship of α_b , α_l and distributive density of strain strength.

公式(1)–(7)完整地表达了代表性体积单元的应力应变关系. 其主要特点在于拉伸应力应变和剪切应力应变关系的统一表达; 可以表征代表性体积单元的拉伸破坏、剪切破坏、破坏后受压、受拉以及剪而不滑几种基本破坏形式; 材料的强度不再是一个点而是服从某种函数分布, 对应材料力学的四大强度理论可以称之为应变强度分布准则. 应变强度分布函数表征了材料非均匀性, 其更重要意义在于: 借助该函数, 已知单元的应变就可以获得单元内的破裂度和完整度.

6 地质体孔隙裂隙渗流及与破裂场耦合模型的计算方法

地质灾害的发生和发展通常受制于岩土体与水的相互作用. 其关键的科学问题包括地质体中的孔隙渗流、裂隙流、裂隙与孔隙双重渗流模型以及渗流与岩土体破坏的相互作用几个方面.

Darcy^[30]在一系列的实验基础上, 总结出了线性渗流方程, 其原始公式是

$$Q = KA \frac{(h_1 - h_2)}{L}, \quad (8)$$

式中 K 为渗透系数, A 为渗流截面积, h_1 , h_2 分别为渗流区域起点、终点处的水头, L 为起点与终点的距离, Q 为体积流量.

自此基于 Darcy 定律建立的经典渗流理论逐步发展完善. 之后, 俄国数学力学家 N. E. 儒可夫斯基在 19 世纪末对渗流问题进行了研究, 于 1889 年导出了渗流的微分方程, 此后的渗流力学在 20 世纪有了长足的发展.

渗流理论在水利、土建、给水排水、环境保护、地质、石油、化工等许多领域都有广泛的应用. 渗流问题的解法有: 解析法(包括直接求解微分方程组、平面问题的复变函数解及一维渐变渗流的分析法)、数值法(有限差分法、有限单元法、离散元法、边界元法、有限体积法、流形元法、无网格法等)、图解法(流网法)及实验法(包括砂模型及各种比拟模型——电比拟、热比拟等). 下面将综述一些关于数值方面的研究.

6.1 孔隙渗流

均匀多孔介质中的渗流理论相对成熟, 包括饱和渗流和非饱和渗流, 主要有 2 个基本方程控制.

一是表征材料渗透特性的 Darcy 定律流体的渗流速度与压力梯度成正比:

$$\mathbf{v} = -k \nabla h, \quad (9)$$

其中 $\mathbf{v}$ 为渗流速度, k 为渗透系数, h 为水头.

二是连续方程, 也称为流量守恒方程:

$$\text{div}(\mathbf{v}) = 0, \quad (10)$$

方程(9)和(10)可通过数值方法进行求解. 求解方法包括有限差分法、有限单元法、离散元法、有限体积法、边界元法、流形元法、无网格法等.

有限差分法从泰勒展开理论发展而来, 是较早被使用的数值方法, 在计算流体力学中应用广泛. 在渗流上也有很多的应用, 比如 Das 等人^[31]使用有限差分中的 MAC 方法研究了孔隙介质中的渗流问题, 该研究表明有限差分法具有较高的精度.

有限单元法先写出能量泛函, 再使用变分原理, 得到了线性的平衡方程组. Zienkiewicz 和 Cheung^[32]用有限元法求解了稳态渗流问题, 而 Javandel 等人^[33]用有限元法对瞬态渗流问题进行了求解.

自从 Cundall 等人^[34]提出离散元法之后, 该方法在渗流上也获得了很好的应用, UDEC3D 以及 PFC3D 等都使用离散元法计算渗流问题.

有限体积法也是近年来发展起来的一种数值方法. 它通过高斯散度定理将单元上的物理量进行平均处理, 通过显式或隐式求解进行迭代. 此外近些年来新发展的数值方法包括边界元法、流形元法、无网格法等等.

数值方法的发展, 带来了一批软件的成长. 包括 Plaxis 中的 PlaxFlow 渗流分析模块, GeoStudio 中的 SEEP3D 模块, SUSAP 饱和-非饱和土渗流分析软件, GMS 中 SEEP2D 模块以及 Itasca 公司的 FLAC3D, UDEC3D, PFC3D 等等.

6.2 裂隙渗流

地质体中的裂隙主要包括岩体中既有的具有开度的结构层, 也包括土体或土石混合体中由于各种原因诱发的裂缝. 一般说裂隙中流体的流动速度比孔隙中快. 求解这类问题的首要任务是建立合适的模型.

(i) 物理模型

对裂隙几何表述而言, 由于裂隙网络系统的复杂拓扑关系, 加上跨尺度效应, 很难真正了解裂隙分布. 为了更合理的描述裂隙分布, Bonnet 等人^[35]提出分形模型, 把多尺度效应考虑进去. 对理论和数值方

法而言, 主要有 3 种模型: 等效连续介质模型、离散模型和混合模型.

等效连续介质模型假设代表性体积单元(RVE)不仅适用于孔隙介质, 也适用于裂隙介质. 使用平均的参数来表征裂隙渗流特性. 由于渗流传导可以从微观尺度到宏观尺度, 要使用该模型必须满足一定的条件, 即 RVE 的尺寸要远大于非均匀性的尺寸, 并且要远小于宏观尺寸. 等效连续介质模型分为 2 种类型, 一种是单孔模型(Chavent 等人^[36]), 把裂隙网络与基质等效为一种孔隙介质; 另一种是双孔模型(Gerke^[37]和 Zhao^[38]等), 把裂隙网络等效为一种孔隙介质, 把基质作为另一种孔隙介质, 并且要考虑两者之间的窜流项.

离散模型认为裂隙是离散的结构. 该模型中, 裂隙可以被认为是同维的单元或者低维的单元, 不考虑垂直于裂隙方向的流动. 该模型要优于单孔模型, 并且由于没有窜流项, 克服了双孔介质的限制(Hoteit 和 Firoozabadi^[39]), 且模拟更接近实际(Reichenberger 等人^[40]), 被众多学者使用, 如 Sahimi^[41]和 Bear 等人^[42]. 但缺点是该模型需要裂隙的详细信息, 在实际中这无疑是很困难的.

混合模型是以上两者的组合, 在不同的区域使用不同的模型. Wu 和 Pruess^[43]就使用这种方法模拟了核废物处理问题.

(ii) 数学模型

在 Darcy 定律的基础上, 再加上动量方程或质量守恒方程即可求解. 也可以通过直接求解 N-S 方程或者立方定律得到数值解, 分别如(11)和(12)式所示:

$$\begin{cases} \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \mu \nabla^2 \mathbf{u} - \nabla p, \\ \nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \end{cases} \quad (11)$$

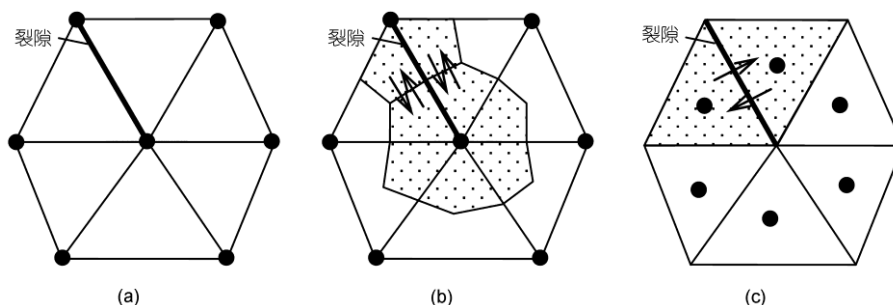


图 2 几种数值方法单元图形对比: (a) 有限元/离散元方法; (b) 基于顶点的有限体积法; (c) 基于中心的有限体积法

Figure 2 Classification of numerical methods according to spatial approximations: (a) FEM/DEM; (b) vertex-based FVM; (c) center-based FVM.

$$\nabla \cdot \left(\frac{a^3}{12\mu} \nabla p \right) = 0, \quad (12)$$

式中 ρ 表示流体密度, $\mathbf{u}$ 表示流体速度, μ 为流体黏性系数, p 表示流体压力, a 表示裂隙开度.

6.3 孔隙裂隙耦合渗流

孔隙渗流和裂隙渗流是两个尺度上的问题. 就渗透速度而言, 裂隙流要比孔隙流的速度快两个量级. 而孔隙渗流的体积或孔隙渗流截面积比裂隙渗流要高两个量级. 这就需要建立孔隙和裂隙渗流的基本模型, 提出相应的计算方法. 特别是在数值模拟中, 要给出两种耦合模型合理的切实可行的空间节点布置图.

孔隙裂隙渗流计算通常采用有限元法或有限体积法. 有限体积法又包括 2 类: 一类是基于顶点的有限体积法, 另一类是基于中心的有限体积法. 各类方法的几何构型如图 2 所示.

Reichenberger 等人^[44]使用基于顶点的有限体积法研究了孔隙裂隙两相流问题, 并给出了二维和三维问题的数值解. Bajaj^[45]和 Wang 等人^[46]使用基于中心的有限体积法分别求解了二维多相孔隙裂隙耦合问题和三维单相孔隙裂隙耦合问题. 对于这两种方法的区别, 可以参见图 3. 使用基于顶点的有限体积法时, 裂隙充满水之后向孔隙渗流时, 水会立刻充满相邻的整个单元; 而使用基于中心的有限体积法时, 裂隙充满水之后向孔隙渗流时, 水只会充满临近中心的区域. 在计算孔隙裂隙耦合渗流时, 相比而言后者更加合理.

Nick 等人^[47]将有限元和有限体积进行耦合, 用于计算渗流问题, 对比了 3 种 FE-FV 耦合方法的求解效果.

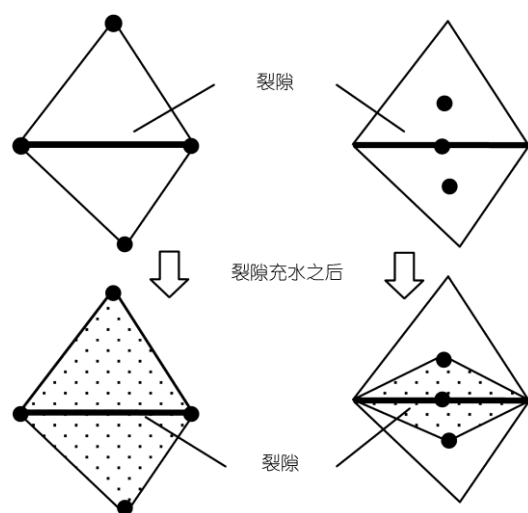


图3 裂隙与孔隙耦合时的对比

Figure 3 Comparison between vertex-based FVM and center-based FVM.

6.4 孔隙裂隙渗流应力耦合

渗流问题除了计算孔隙渗流、裂隙渗流以及孔隙裂隙耦合渗流外,有些还需要考虑渗流与应力之间的耦合。

刘洋和李世海等人^[48]将孔隙渗流、裂隙渗流与应力互相耦合进行求解,整个过程分为固体计算、孔隙渗流应力耦合计算和裂隙渗流应力耦合计算3个部分。固体计算模型采用基于连续介质的离散元法(是一种有限元和离散元耦合方法),能够反映地质体的破坏规律,可以模拟从连续到非连续的破坏过程;孔隙渗流模型采用有限体积法,可以方便地计算出自由水位线(浸润线)的位置;裂隙渗流应力耦合模型采用有限体积法或有限差分法,可以避免由于不连通裂隙(孤立裂隙)存在所导致的收敛性问题;只考虑库水涨落和降雨的最终状态,裂隙渗流产生的水头分布和由库水涨落所引起的水头改变作为孔隙渗流的变边界条件,从而实现孔隙渗流场和裂隙渗流场的耦合。

7 高陡边坡在地震作用下的破坏机理及评价方法

汶川地震后众多专家调查发现,支挡结构的震损率很低、老滑坡不复活、基覆边坡表层流滩、顺层边坡发生深厚层滑动等现象。这与传统的经验产生

极大反差,也给传统的边坡分析方法带来很大的冲击。因此需要重新认识地震作用下高陡边坡的破坏机理及评价方法。

工程抗震设计规范中普遍采用的拟静力法^[49],认为惯性作用是导致边坡发生破坏的主要原因,因而将地震载荷作为一种等效的体力施加到坡体内,并通过极限平衡方法求取等效静力作用下的安全系数。然而,地震力是一种动载荷,地震结束后,地震力即宣告消失。拟静力法的基本假设是地震加速度在边坡体内部保持时间及空间上的一致性,也就是当地震波波长 λ 相对坡体尺寸 H 大很多的时候该假设才成立^[50],一般仅适用于特征尺寸在10~20 m的低矮边坡。反之,也就是 H/λ 比较大时(>4),滑坡体内的地震荷载就不再保持一致性。

汶川地震是浅层地震,且次生灾害发生在断裂带附近,地震断裂后产生的荷载类冲击荷载,含有高频成分;加之荷载幅值大,导致高频率荷载不可忽略(几十赫兹到百赫兹,对应的波长可在几米~几十米)。基于这样的认识,结合大量的现场调查及模型实验分析^[51~56],地震应力波在坡体表面产生的反射拉伸波是导致边坡失稳滑移的主要原因。高陡顺层边坡在反射拉伸波作用下出现了深厚层的滑动,基覆边坡在反射拉伸波的作用下出现了大量的表层拉裂、流坍。

汶川地震后的现场调查结果表明,按照Ⅷ度设防修筑的各类公路、铁路边坡支挡结构,在Ⅹ度及Ⅺ度区的震损率仅为4%~8%^[57]。事实上,采用拟静力方法设计,将短时间作用的动荷载转化为永久作用的静荷载,保证安全系数的情况下,结构设计必然过于保守,低烈度设计就能够抗住高烈度地震。而一些浅锚杆框架梁结构,本来只是用于防护表层滚石和流坍的,由于其较强的抗拉作用,防止了地震波在地表反射导致的拉伸破坏。

分析高陡顺层岩质边坡在地震作用下的破坏模式,其现象为表层结构面以拉伸破坏为主,深层结构面以剪切破坏为主,但最终均以剪切破坏模式整体失稳下滑。简单的机理分析是,地震拉伸波在地表反射,引起顺层弱面上的破坏,强度降低。随之,弱面强度降低的滑坡体在重力作用下滑动,形成灾害。与这一机理相对应的工程分析方法,先通过数值模拟地震荷载作用,给出反射波引起结构面上震后残余强度,然后,通过极限平衡法获得安全系数。数值分析的结果

表明, 顺层边坡的动力安全系数具有明显的三阶段特征(水平段-速降段-水平段), 而拟静力法获得的安全系数随着设防烈度的增大却呈现出逐渐减小的特征. 此外, 通过动力时程分析可以看出, 除幅值外, 地震波频率对顺层边坡稳定性也有较大影响^[58]. 应当说, 采用了数值模拟方法可以直接获得工程师所需要的结果, 完全没有必要再用极限平衡方法计算.

关于基覆边坡, 李承亮^[59]用数值模拟, 分析了大量的案例. 结果表明, 地震下基覆边坡的破坏模式与 H/λ 有关, 随着 H/λ 的增大, 破坏模式依次为整体破坏、高位剪出、表层破坏及局部破坏. 不同的破坏模式应采取不同的支护措施, 整体破坏时应重点关注基覆交界面的稳定性情况; 高位剪出时除关注交界面失稳外, 更应该关注剪出口的位置, 以便合理设置下挡结构; 表层破坏及局部破坏应注重覆盖层表面松散物的清除, 对关键区域可进行局部喷浆处理. 由于基覆边坡没有确定性的滑移面, 且覆盖层(尤其黏土类材料)在失稳后材料强度几乎不变, 因此难以用极限平衡法进行简单刻画. 采用破裂度及永久位移进行基覆边坡地震稳定性的评价是可行的, 可利

用数值分析法进行基覆边坡动力时程计算, 通过统计破裂度及永久位移, 采用双重指标评价基覆边坡地震稳定性, 评价时宜采用“就高不就低”的原则.

8 结束语

发展工程地质体力学有助于解决能源开发中的工程及科学问题; 用破裂度描述地质体的破裂程度有可能突破长期使用的点强度及滑面力平衡的分析方法; 用破坏状态判断取代破坏过程分析、发挥数值模拟分析方法的作用有助于开拓地质灾害预警方法的新思路; 现场监测与数值模拟相结合是认识地质体灾变规律的重要的和基本的途径; 数值模拟的两尺度模型及破裂度、应变强度分布等新的概念可以开拓力学的研究领域也有助于地质体灾变问题的解决; 汶川地震的现象表明, 高地震烈度区传统的拟静力方法不适用, 需要用动力分析方法.

能源中的关键力学问题很多, 本文只是涉及很少部分, 受篇幅限制, 对众多学者的研究成果综述的很不够.

参考文献

- 1 Li S H, Li X, Liu X Y. Some issues in engineering geomechanics and its applications (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2006, 25(6): 1125–1140 (in Chinese) [李世海, 李晓, 刘晓宇. 工程地质力学及其应用中的若干问题. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(6): 1125–1140]
- 2 Duncan J M. State of the art: Limit equilibrium and finite-element analysis of slopes. *J Geotech Eng*, 1996, 22(7): 577–596
- 3 Chen Z Y, Mi H L, Wang X G. A three-dimensional limit equilibrium method for slope stability analysis (in Chinese). *Chin J Geot Eng*, 2001, 23(5): 525–529 [陈祖煜, 弥宏亮, 汪小刚. 边坡稳定三维分析的极限平衡方法. *岩土工程学报*, 2001, 23(5): 525–529]
- 4 Zhang J F, Ding H. Generalized 3D limit-equilibrium method for slope stability analysis and its application (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2005, 24(3): 365–370 [张均锋, 丁桦. 边坡稳定性的三维极限平衡分析方法及应用. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(3): 365–370]
- 5 孙广忠. 岩体结构力学. 北京: 科学出版社, 1988
- 6 Sun G Z. On the theory of structure-controlled rockmass (in Chinese). *J Eng Geology*, 1993, 01: 14–18 [孙广忠. 论岩体结构控制论. *工程地质学报*, 1993, 01: 14–18]
- 7 Li S H, Liu T P, Liu X Y. Analysis method for landslide stability (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2009, 28: 3309–3324 [李世海, 刘天苹, 刘晓宇. 论滑坡稳定性分析方法. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28: 3309–3324]
- 8 Swenson D V, Ingraffea A R. Modeling mixed-mode dynamic crack propagation using finite elements: Theory and applications. *Comput Mech*, 1988, 3: 381–397
- 9 Goodman R E, Taylor R L, Berkke T. A model for the mechanics of jointed rock. *J Soil Mech Foundations Division, ASCE*, 1968, 94(3): 637–659
- 10 Hou Y L, Zhou Y D, Zhang C H. I/II tensile-shear mixed mode fracture simulation by 3d discrete element method (in Chinese). *Eng Mech*, 2007, 24(3): 1–7 [侯艳丽, 周元德, 张楚汉. 用 3D 离散元实现 I/II 型拉剪混凝土断裂的模拟. *工程力学*, 2007, 24(3): 1–7]
- 11 Chang X L, Hu C, Ma G, et al. Continuous-discontinuous deformable discrete element method to simulate the whole failure process of rock masses and application (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2011, 30(10): 2004–2011 [常晓林, 胡超, 马刚, 等. 模拟岩石失效全过程的连续-非连续变形体离散元方法及应用. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(10): 2004–2011]
- 12 Ke T C. Simulated Testing of Two Dimensional Heterogeneous and Discontinuous Rock Masses Using Discontinuous Deformation Analysis. Dissertation for Doctoral Degree. Berkeley: University of California, 1993

- 13 Owen D R J, Feng Y T, De Souza Neto E A, et al. The modeling of multi-fracturing solids and particulate media. *Int J Numer Methods Eng*, 2004, 60(1): 317–339
- 14 Munjiza A. *The Combined Finite-Discrete Element Method*. New York: John Wiley and Sons, 2004. 277–290
- 15 Li S H, Zhang Y N, Feng C. A spring system equivalent to continuum model. In: *The Fifth International Conference on Discrete Element Methods*, London, 2010. 75–85
- 16 Feng C, Li S H, Yao Z X. Study of block-discrete-spring method based on continuum mechanics (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2010, 29(S1): 2690–2704 [冯春, 李世海, 姚再兴. 基于连续介质力学的块体单元离散弹簧法研究. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(增1): 2690–2704]
- 17 Belytschko T, Black T. Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing. *Int J Numer Methods Eng*, 1999, 45(5): 601–620
- 18 Belytschko T, Moeo N, Usui S, et al. Arbitrary discontinuities in finite element. *Int J Numer Methods Eng*, 2001, 50(4): 993–1013
- 19 Li X K, Liu Q P, Zhang J B. A micro-macro homogenization approach for discrete particle assembly-Cosserat continuum modeling of granular materials. *Int J Solids Struct*, 2010, 47: 291–303
- 20 Li X K, Wan K. A bridging scale method for granular materials with discrete particle assembly-Cosserat continuum modeling. *Comput Geotech*, 2011, 38: 1052–1068
- 21 Li X K, Zhang X, Zhang J B. A generalized Hill's lemma and micromechanically based macroscopic constitutive model for heterogeneous granular materials. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 2010, 199: 3137–3152
- 22 Tang C. Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1997, 34 (2): 249–261
- 23 Wang Z L, Li Y C, Wang J G, et al. A damage-softening statistical constitutive model considering rock residual strength. *Comput Geosci*, 2007, 33: 1–9
- 24 Li S H, Zhou D. Progressive failure constitutive model of fracture plane in geomaterial based on strain strength distribution. *Int J Solids Struct*, 2013, 50(3-4): 570–577
- 25 Li S H, Zhou D. Strain strength distribution criterion. In: *Third International Symposium on Computational Mechanics (ISCM III)*, Taipei, 2011: 414–415
- 26 Li S H, Zhou D. Formulation for damage of brittle materials and computational element based on criterion of strain strength distribution. *J Hydraulic Eng*, 2012, 43: 8–12
- 27 Bai Y L, Ke F J, Xia M F. Formulation of statistical evolution of microcracks in solids. *Acta Mech Sin*, 1991, 7(1): 59–66
- 28 Bai Y, Han W, Bai J. A statistical evolution equation of microdamage and its application. *ASTM Special Technical Publication*, 1997, 1315: 150–162
- 29 Bai Y L, Xia M F, Ke F J, et al. Statistical microdamage mechanics and damage field evolution. *Theor Appl Fracture Mech*, 2001, 37(1): 1–10
- 30 Darcy H. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Paris: Dalmont, 1856
- 31 Das B, Steinberg S, Weber S, et al. Finite difference methods for modeling porous media flows. *Transport Porous Media*, 1994, 17(2): 171–200
- 32 Zienkiewicz O C, Cheung Y K. Finite element method of analysis for arch dam shells and comparison with finite difference procedures. In: *Proc Symp Theor Arch Dams*, Univ Southampton, 1964
- 33 Javandel I, Witherspoon P A. Application of the finite element method to transient flow in porous media. *Old SPE J*, 1968, 8(3): 241–252
- 34 Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 1979, 29(1): 47–65
- 35 Bonnet E, Bour O, Odling N E, et al. Scaling of fracture systems in geological media. *Rev Geophys*, 2001, 39(3): 347–383
- 36 Chavent G. *A New Formulation of Diphasic Incompressible Flows in Porous Media*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1976. 258–270
- 37 Gerke H H, Genuchten M T. A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media. *Water Resources Res*, 1993, 29(2): 305–319
- 38 Zhao Y, Chen M. Fully coupled dual-porosity model for anisotropic formations. *Int J Rock Mech Mining Sci*, 2006, 43: 1128–1133
- 39 Hoteit H, Firoozabadi A. Multicomponent fluid flow by discontinuous Galerkin and mixed methods in unfractured and fractured media. *Water Resources Res*, 2005, 41(11): W11412
- 40 Reichenberger V, Jakobs H, Bastian P, et al. Complex Gas-Water Processes in Discrete Fracture-Matrix Systems: Up-scaling, Mass-Conservative Discretization and Efficient Multilevel Solution. *Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart*, Heft 130, 2004
- 41 Sahimi M. *Flow and Transport in Porous Media and Fractured Rock*. Weinheim: Wiley-VCH, 2012
- 42 Bear J, Tsang C F, De Marsily G. *Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock*. London: Academic Press, 1993
- 43 Wu Y S, Pruess K. Numerical simulation of non-isothermal multiphase tracer transport in heterogeneous fractured porous media. *Adv Water Resources*, 2000, 23(7): 699–723
- 44 Reichenberger V, Jakobs H, Bastian P, et al. A mixed-dimensional finite volume method for two-phase flow in fractured porous media. *Adv*

- Water Resources, 2006, 29(7): 1020–1036
- 45 Bajaj R. An unstructured finite volume simulator for multiphase flow through fractured-porous media. Massachusetts Institute of Technology, 2009
- 46 Wang L X, Li S H, Ma Z S. A cell-centered finite volume simulator for single-phase flow in fractured porous media. In: The 6th international conference on discrete element methods and related techniques, Golden, Colorado, USA, 2013: 130–135
- 47 Nick H M, Matthäi S K. Comparison of three FE-FV numerical schemes for single-and two-phase flow simulation of fractured porous media. *Transport Porous Media*, 2011, 90(2): 421–444
- 48 Liu Y, Li S H, Liu X Y. Coupled fluid flow and stress computation model of dual media based on continuum-medium distinct element method (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2011, 30(5): 951–959 [刘洋, 李世海, 刘晓宇. 基于连续介质离散元的双重介质渗流应力耦合模型. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(5): 951–959]
- 49 中华人民共和国铁道部铁路工程抗震设计规范. 北京: 中国计划出版社, 2006
- 50 Li C L, Feng C, Liu X Y. The application range of pseudo-static method and the calculation of earthquake force (in Chinese). *J Univ Jinan (Sci Tech)*, 2011, (4): 431–436 [李承亮, 冯春, 刘晓宇. 拟静力方法适用范围及地震力计算. *济南大学学报(自然科学版)*, 2011, 25(4): 431–436]
- 51 Yin Y P. Features of landslides triggered by the wenchuan earthquake (in Chinese). *J Eng GeoLogy*, 2009, 17(1): 29–38 [殷跃平. 汶川八级地震滑坡特征分析. *工程地质学报*, 2009, 17(1): 29–38]
- 52 Huang R Q, Li W L. Fault effect analysis of geo-hazard triggered by wenchuan earthquake (in Chinese). *J Eng GeoLogy*, 2009, 17(1): 19–28 [黄润秋, 李为乐. 汶川大地震触发地质灾害的断层效应分析. *工程地质学报*, 2009, 17(1): 19–28]
- 53 Xu Q, Li W L. Study on the direction effects of landslides triggered by Wenchuan earthquake (in Chinese). *J Sichuan Univ (Eng Sci Ed)*, 2010, 42(S1): 7–14 [许强, 李为乐. 汶川地震诱发滑坡方向效应研究. *四川大学学报(工程科学版)*, 2010, 42(S1): 7–14]
- 54 Cui F P, Yin Y P, Xu Q, et al. Collapsing and sliding response of slopes triggered by single and combined action with time difference of P and S seismic waves (in Chinese). *Chin J Geot Eng*, 2010, 32(8): 1266–1273 [崔芳鹏, 殷跃平, 许强, 等. 地震纵横波时差耦合作用的斜坡崩滑响应研究. *岩土工程学报*, 2010, 32(8): 1266–1273]
- 55 Ai C, Feng C, Li S H, et al. Experimental research on dynamic response of consequent rock slope under seismic loading (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2010, 29(9): 1825–1832 [艾畅, 冯春, 李世海, 等. 地震作用下顺层岩质边坡动力响应的试验研究. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(9): 1825–1832]
- 56 Zhao A P, Feng C, Li S H, et al. Experimental research on seismic failure mode and supporting for slope of bedrock and overburden layer (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2012, 33(2): 515–523 [赵安平, 冯春, 李世海, 等. 地震力作用下基覆边坡模型试验研究. *岩土力学*, 2012, 33(2): 515–523]
- 57 杨雪莲, 周永江, 吴事贵, 等. 汶川地震区公路挡墙破坏分析及设计中有关问题的探讨. 北京: 科学出版社, 2009. 921–924
- 58 Feng C, Li S H, Wang J. Stability analysis method for bedding rock slopes under seismic load (in Chinese). *Chin J Geot Eng*, 2012, 34(4): 717–724 [冯春, 李世海, 王杰. 基于 cdem 的顺层边坡地震稳定性分析方法研究. *岩土工程学报*, 2012, 34(4): 717–724]
- 59 李承亮. 地震作用下基覆类高陡边坡的稳定性分析. 硕士论文. 北京: 中国科学院力学研究所, 2011

Key problem of engineering geomechanics in hydroelectric energy exploitation

LI ShiHai^{*}, ZHOU Dong, WANG Jie, WANG LiXiang, FENG Chun, LIU XiaoYu
& LIU QingQuan

Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Engineering and scientific problems confronted in hydroelectric energy exploitation and construction are discussed, and the concept and key problems in engineering geomechanics are introduced. The research work by the team of the authors in recent years is reviewed and research interests in relevant scientific fields are proposed, which includes: (1) The theory of “failure on a point” in traditional solid mechanics is inadequate to describe geological body, and the concept of “fracture degree” is proposed, rationality as well as the operation method with field monitoring and numerical simulation are discussed. (2) Two disaster prevention concepts in geologic hazards based on fracture evolution are introduced, rationality of state evaluation and importance of numerical simulation are emphasized. (3) Evaluation criteria of stability analysis for geological body are discussed and comments are made for some of the common methods. (4) Two scale mechanical model and computational frame for numerical simulation of discontinuum and heterogeneity in geological body are presented. (5) Distributive function of strain strength in representative volume element are expounded, which is more appropriate to describe fracture of material than traditional constitutive relationship and parameters. (6) Seepage model for fractured porous media and fracture coupled model are reviewed. (7) According to secondary geological disaster in Wenchuan, irrationality of pseudo-static method is pointed out, and a new method with numerical simulation for stability analysis of geological body subjected to seismic loads is introduced.

geomechanics, fracture degree, strain strength distribution, fractured porous media, dynamic time-history analysis

PACS: 91.55.Ax, 91.55.Jk, 91.60.Ba, 89.30.Ee, 89.60.Ec

doi: 10.1360/132013-243