

工程地质力学及其应用中的若干问题

李世海¹, 李 晓², 刘晓宇¹

(1. 中国科学院 力学研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要: 工程地质力学是以工程为目的研究地质体变形破坏规律的科学。地质体具有非连续、非均匀、流-固耦合以及未知的初始状态的特性, 工程地质力学的关键科学问题包括如何判断地质体的当前状态、描述地质体的力学特性以及分析地质体由连续到非连续的演化过程。工程地质力学研究应当以地学为基础、力学为手段、工程为目的, 迫切需要解决的工程问题包括探测地质体的几何和力学特性, 给出地质体稳定性的分析方法、地质工程设计依据以及地质灾害的预测预报方法。无论是模型实验还是模拟实验的结果能否回答工程问题取决于对地质条件的认知程度, 但是, 实验研究可以作为验证数值模拟结果的有效工具; 地质调查和现场测量是工程地质力学必不可少的组成部分, 地质体的力学分类体现了地学的基础作用, 可实现地质环境描述定量化。针对工程需求建立力学模型可主要考虑含结构面岩体、土石混合体以及地质中裂隙流和岩土体的相互作用; 实验室岩块实验的试样尺寸应作为地质体多尺度计算模型中的基本尺度。工程地质力学的主要研究内容应当包括给出关键的力学测量参数、研究获得这些参数的方法及相关的仪器; 在提出和完善力学模型的同时, 应更加注重新的计算方法的验证以及工程应用研究。

关键词: 工程地质; 地质体特性; 岩体分类; 监测; 力学模型; 数值分析

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2006)06-1125-16

SOME ISSUES IN ENGINEERING GEOMECHANICS AND ITS APPLICATIONS

LI Shihai¹, LI Xiao², LIU Xiaoyu¹

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Engineering geomechanics is a subject aiming at investigating generalized deformation and failure processes of geological body for engineering problems. Due to geological body inherent characteristics of discontinuity, inhomogeneity, coupled fluid-solid and unknown initial state, key scientific issues in engineering geomechanics are how to judge current state of geological body, how to describe mechanical properties of geological body, and how to simulate the evolution from continuous to discontinuous failure process. Researches in the area of engineering geomechanics should take geology as the foundation, take mechanics as the analytical tool, and its aim should face engineering. The engineering problems to be solved include investigating the geometrical and mechanical properties of geological body, developing the analytical method for geological body stability, and providing the design basis for geological engineering as well as the prediction and forecast scheme. Whether model experiments or simulation results of experiment can answer engineering questions is determined

收稿日期: 2005-02-24; **修回日期:** 2005-04-27

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412703); 中国科学院重要方向性项目(KJ951-A1-01-01); 国家自然科学基金资助项目(10472121)

作者简介: 李世海(1958-), 男, 博士, 1982年毕业于河北工业大学物理专业, 现任研究员, 主要从事非连续介质力学数值计算方法及滑坡灾害防治中的关键力学问题等方面的研究工作。E-mail: shli@imech.ac.cn

by the extent to identification of geological conditions. But experimental studies can be recognized as a powerful tool to verify the results of numerical simulation; and geological investigation and spot survey are indispensable parts in engineering geomechanics. The mechanical classification of geological body embodies the underlying role of geology, and is able to quantitatively represent the geological environments. The construction of mechanical models, which meets engineering requirement, needs to consider rock masses with discontinuity, rock and soil aggregates as well as the interaction between flow in fractured rock and rock masses. The extraction of measurement parameters, development of approaches to obtain these parameters, and research on relevant test devices require the participation of geomechanics. While present mechanical models are improved or new models are developed, more attention should be paid to the verification and application of new methods.

Key words: engineering geology; characteristics of geological body; classification of rock mass; monitoring; mechanical model; numerical analysis

1 引言

地质力学既是地质学的一个分支也应当是力学的一个分支,涵盖了与地质体的演化、变形与破坏有关的大量内容。工程地质力学着重于研究与工程相关的地质力学问题。在这里,“工程”是指以工程为目的,研究工程尺度的问题;“地质”是指研究对象为地质体;“力学”则代表学科性质。作为地学、力学与工程科学相结合的交叉学科,工程地质力学是以地学为基础,以力学为手段,解决与工程相关的、涉及地质体演化、变形与破坏的科学问题。在李四光创立的地质力学^[1]的基础上,谷德振^[2]等率先开展工程地质力学的研究。之后,孙光忠^[3]发表了专著《岩体结构力学》,将岩体的结构进行分类,对不同种类结构岩体并给出不同的力学分析方法;王仁^[4]借助于有限元方法将弹塑性理论用于反演大地构造应力,成功地预测了未来地震危险地区,是力学和地学相结合取得重要成果的典型例证;王思敬^[5]在工程岩体变形破坏机制研究的基础上,发展了岩石工程稳定性分析原理和方法。

近年来,随着我国实施西部开发和大规模的基础设施建设,越来越多的研究人员正在地学、力学和工程科学等领域从事地质工程问题的相关研究,并在世界范围内形成了不可忽视的研究力量。已经开展的工作涉及岩石力学的集成分析^[6]、多场耦合^[7]、力学参数探测^[8]、地应力变化^[9]、损伤力学^[10]和破坏力学^[11]、岩石动力学^[12]、深层岩石力学^[13]等方面。然而,工程地质力学的发展不仅面临着机遇,也面临着巨大的挑战。许多超常规规模的地质工程建设中存在着大量的经典力学理论和方法难以解决的力学问题^[14, 15]。为此,王思敬^[16]在总结我国地质力

学的研究成果同时,也提出了未来岩石力学发展的任务。

本文综合前人的成果,针对我国地质工程迫切需要解决的问题,从力学的角度,首先分析了地质体的特性,提出了工程地质力学面临的工程问题和科学问题,讨论了工程地质力学的研究方法以及与相关学科相结合的切入点,认为以地学为基础、力学为手段、工程为目的的结合形式有利于工程地质力学的发展。

2 地质体的主要力学特性

地质体是由赋存于一定地质环境中并按照某种结构排列的岩石、土和水组成的。它具有非连续、非均匀、流-固耦合以及未知“初始”状态的特性。地质体的这些特性充分体现了地质体与传统力学研究对象的区别。

非连续性:地质体中含有大量的断层、裂隙、节理、软弱夹层(通称为结构面)等,它们共同的特性是复杂而有序地分布在地质体中,对地质体整体的强度起着控制作用。

非均匀性:通常赋存于古滑坡体、崩塌体中,表现为土石混合物,其中块石和土的混合比例、分布、块石的大小、形状、空间姿态是随机的。土、石两种材料强度有两个量级以上的差别以及土体的断裂可以导致更为复杂的力学行为^[17]。

流-固耦合特性:主要体现在地质体结构面上的强度与裂隙中水的压力具有相同的量级。该特性不仅包括岩石或土作为材料的特性、裂隙渗流规律,更为重要的是体现了山体的整体力学特性。

地质体的上述特性尽管在描述方法上仍然有很多问题值得深入的研究和探索,但一般可通过室内

实验进行精细的分析并获得形式多样的本构关系和一些特殊的规律。然而,地质体是一个复杂的系统,从这个系统中取出任何一个局部(岩体的试样)都不能代表它整体的特性,即试样不具有代表性;从另一个方面说,岩体的试样离开了地质体就失去它作为母体中一部分的作用,甚至在有些情况下获取试样的过程中其特性就发生了改变。当然,为研究地质体的整体特征,充分地了解其局部特性是非常必要的,而更重要的是如何在此基础上描述和探测出地质体的整体特性。

地质体未知“初始”状态的特性可作为区别地质体与岩土材料的要素之一。它包括未知的“初始”地应力和未知的“初始”破坏程度(结构面的发育程度),在这里,“初始”状态是相对的,有时也可称为“当前”状态,特指某一事件(开挖、崩塌、降雨)发生前的地质体的状态。地质体的这一特性与地质环境和地质构造运动的历史有关,并且决定着地质体的力学行为。按照力学的分析方法,不能量化地给出初始的状态就无法获得量化的结果。因此,探明地质体的初始状态,不仅是工程地质力学的重要任务,也是使该学科真正能够解决实际问题的关键。

尽管地质体还存在其他的特性,如材料的各向异性特征、尺度效应、非弹性、非线性特性等,笔者认为这些特性主要与岩体结构面的空间分布有关。并且,由于地质体的时间效应、温度效应、化学腐蚀特性是通常固体材料所共有的,而且这些特性对大多数的工程实际问题的影响通常被地质体的其他特性所掩盖,因此,通常也可忽略。此外,冰川、冻土是与温度有着密切关系的地质体,特别是表层冻土随着天气的变化而有相变发生,其力学过程更为复杂。

3 工程地质力学面临的工程问题

地质工程大致可归为两类问题:其一为地下工程,包括交通和水电工程中的隧道、地下厂房、地下核废料库以及地下矿藏开采形成的采空区,地质体中的软岩、透水、活动断层等直接影响着工程的成败和工程建设的造价,主要的力学问题是高地应力环境下卸荷后地质体的变形和破坏;其二为地面工程,包括工程建设方面的大型基础、航道、露天矿开挖、铁路公路的边坡,引发的灾害有滑坡、崩

塌、泥石流。在我国当前由边坡工程引发的灾害极为严重,其主要的力学问题是地质体在重力、地震、水的作用等自然力作用下的破坏规律。工程建设主要包括选址、勘察、设计、施工、运营几个阶段。在不同的工程阶段,工程目的不同,所遇到的工程问题的侧重点也不同,然而,一般而言,地质工程是一个系统工程,各个阶段相互关联,需要综合考虑不同阶段依赖于工程地质力学解决的问题。

3.1 地质体稳定性判断及其安全预测

在大型工程建设中,“避让”是一条基本的并且是非常重要的原则,要避免危险的区域首先要知道哪些区域是危险的。在获得一定地质资料之后,就要对山体的稳定性做出判断。稳定性判断的可靠性关系到工程建设的成败,道理很简单,建筑在不稳定的基础上的工程一定是失败的;另一方面,如果本来稳定的地质条件被误判为不稳定的,无论是避让还是采取工程措施都会造成不必要甚至是非常巨大的浪费。在我国的工程实践中,解决该问题主要是依赖于地质工程师丰富的实践经验进行定性的判断;以刚体极限平衡条分法为基础的边坡稳定性判断方法对滑面上的参数很敏感,而确定这些参数更重要的依赖于经验;有个别工程也采用有限元、离散元、有限差分等计算,仍属有探索或科研性工作。从目前来看,给出可靠的分析方法并为工程接受还需要进行大量的工作。

3.2 探测地质体力学特性的方法

选址是地质专家的工作,他们根据地形地貌、地质条件,借助于多年积累的丰富经验,判断工程建设的可行性,初步确定工程建设的地点、线路、以及区域。在此基础上进行地质勘察,其主要目的是了解地质条件,进一步确认工程建设的可行性,通过各种手段获得地质资料为工程设计提供设计依据。勘察获得的资料越丰富,工程设计的可靠性也就越大。然而,在实际工程中,尽管地质勘察的手段很多,受勘察手段、经费的限制,获得详细的地质资料是很困难的,工程设计往往是在较大范围内以修改结果为基础。如何用最小的代价获得最丰富的地质信息,是地质工程中最为迫切和关键的问题。作为力学研究不仅研究给定条件的结果,还要提出如何获得地质条件的方法。用波动、渗流以及表面位移监测的方法探测地质体的力学特性,从理论上要比直接钻孔、开挖更合理。事实上这些方法不破坏地质体的原有结构,反映了某个区域而不是某个

点的特性,探测成本也低。这些方法已经在地质勘察中发挥了一些作用,但还远远不够,完成这一任务需要更基础的理论工作和计算技术,否则很难获得突破。地质雷达是探测地质体特性的重要手段之一,受发射能量的限制,探测深度在土体中一般不超过30 m,包括电法都存在着如何将探测结果转化为力学参数的问题。用力学的方法(特别是地震波法)探测力学参数,应该更为直接和有效。

3.3 地质工程防治的设计依据

对于工程而言,仅仅做出山体的稳定性判断还不够,还需要研究山体的变形与工程结构的相互作用。例如,库区蓄水引起的库岸变形(整体并不失稳)照样可能导致上部结构的破坏,这是比山体滑坡更为普遍的地质灾害;有些情况工程建设地点不可避免和无法选择,必须要研究地质体的变形。由于地质体通常允许的变形比工程结构所能够容许的变形大很多,研究地质体与工程结构的相互作用远比判断山体稳定性以及分析单纯结构的变形复杂得多,不清楚地质体的初始状态、地质体的地质结构和地应力场的分布,试图给出科学和合理的工程设计非常困难,而工程设计的优化要求更高一些。对地下工程常用的工程设计基础是岩体分类技术^[18],边坡工程还没有这样的分类。深入分析这种技术的理论基础,仍然有值得探索的地方:给出分类技术合理性的依据目前还不完全清楚;寻求获得地质体的力学参数更为普遍的方法;论证这种岩体分类适用于我国西部复杂的地质环境以及满足超大规模地质工程的可行性。一般说来工程岩体分类是粗旷性的,主要用于初步设计、工程概预算和招投标阶段。它不能取代具体工程的力学计算和分析,特别对一些复杂、大型、重要的工程,岩体分类还远远不够。当地质条件复杂和有更多的工程方案供选择时工程设计应该具体问题具体分析,为此需要提出科学的分析方法和建立完整、可靠的设计依据。

3.4 预报地质工程安全的方法

主要涉及到已有的难以治理的工程,为避免和减少灾害造成的损失,需要对灾害的破坏程度做出预测,预报灾害可能发生的时间。在静态问题没有清晰的认识之前,考虑地质体的时间效应很困难,但是,这是一个十分迫切的亟待解决的问题,它不仅是一个预测、预报方法的理论问题,同时涉及到如何进行监测和如何分析测量结果。尽管如此,有

一点可确定:地质灾害的发生是地质体经过长期演化后在突发事件的作用下发生的。根据监测结果能够了解和预测地质体在观测时间尺度内的演化过程,但是,灾害发生的时间不只是与演化的时间有关,而是取决于突发事件的时间。由此可知,如果不能预报突发事件的时间,就不能预报灾害发生的时间。例如,三峡新滩滑坡如果没有对黄岩危岩体崩塌这一重要事件的预报,那么根据前两年的监测数据预报滑坡发生的时间,就如同不知道东南亚何时、何地发生地震却能够预报印度尼西亚海岸哪一天发生海啸一样。地质灾害预测、预报脱离不了现场监测,在此基础上能够解决实际问题的工作集中在对地质灾害的短期预报(临发预报)和针对具体的地点给出发生灾害的外界条件,即经过研究能够预测出在什么条件下会发生地质灾害。

长期以来,人们为解决上述工程问题积累了丰富的经验,也从不同的角度、深度探索科学的解决方法,提出了一些非常有意义的科学问题,但还不尽人意,地质灾害仍然是防不胜防,这涉及到更深层次的科学问题。

4 工程地质力学中的科学问题

应用科学研究的目标一方面能够解决制约着工程技术发展的科学问题;另一方面是能够引领新技术的产生和发展。工程地质力学作为一门应用性科学,需要通过研究地质体的变形和破坏规律这个共性的问题,解决工程中的共性问题,其主要包括:地质体的本构关系、获得未知的初始状态以及描述地质体由连续到非连续的演化过程。

4.1 本构关系

应当说介质的本质是非连续的,连续介质力学采用简化的处理方法为解决大量的力学问题做出了巨大的贡献。它将由离散颗粒构成的材料,用有限的方程来描述。也就是要建立应力-应变、应力-应变率、应力与速度梯度、力与位移等之间的联系。连续介质力学可得到很好的结果,广泛地应用于工程实践,主要有两方面的原因:其一,大量的连续介质力学研究的问题中介质通常可以简化为连续的,非连续特性的尺寸与研究区域的尺寸相差两个甚至几个量级以上;其二,介质非连续的特性在实际问题中一般不能表现出来或者说可以避免这

种表现出现。对于一般的材料，没有必要研究缺陷带来的影响。大部分金属构件，人们为了安全起见，只是利用它的线弹性部分，不考虑由于材料的缺陷带来的非线性等因素就可以满足实践的要求。当然，随着材料科学研究不断的深入，对力学研究的要求不断提高，需要建立一些复杂的本构关系，进而产生了一些新的研究理论和研究方法，比如非线性力学、应变梯度理论等。

对地质体问题，结构面的尺寸与研究区域的尺寸有相同的或者接近的量级，不考虑结构面的影响，就不能从根本上解决问题。描述地质体的非连续特性的方法有两种：一种是均匀化的方法，该方法建筑在根深蒂固的连续介质理论之上，将介质复杂的结构性用复杂的应力应变关系等效，不考虑结构面上的力学特性，而是将结构面的这种特性等效在连续介质的应力应变关系之中，如损伤模型；另一种是直接考虑结构面的力学特性，将介质的非连续几何特征充分的概化，使得材料的本构关系非常简单，界面上满足虎克定律和摩擦准则，非界面的区域内采用线弹性的关系，这种方法使得整个研究区域的结构变得复杂。一种形象比喻称前者为“复杂的本构、简单的结构”，这是较为传统的方法，而后者为“简单的结构、复杂的本构”，正在为人们所接受。作者也希望在这方面进行一些研究，同时，也认为这种思想更具有生命力。

比较两种方法可知，连续介质力学的研究方法，是将地质体复杂的结构的几何问题转化为物理问题，简单而言，就是将结构面的几何分布转化为本构关系。而非连续介质的做法，是试图直接考虑介质的几何结构。

4.2 初始状态

地质体当前的状态是经过地质年代的长期演化的结果，与地质体形成演化过程密切相关。事实上，初始状态是相对的，如边坡开挖工程，只需将开挖以前斜坡的状态作为初始状态；而隧道工程，将隧道开挖前的状态作为初始状态。当然，也有些问题就很难界定什么是初始状态，如山体滑坡问题，通常有记录的时间都是很短的，人们几乎不能了解记录之前变形了多少，最初的状态只能根据地貌和地表特征等做出定性判断。

搞清地质体的形成演化过程是获得地质体初始状态的基础。例如，地质体当前的构造和结构一

般是经历了多期、次构造运动留下的形迹，每次构造运动的构造形迹不同，地质体力学特性的差别就很大。如果了解了某一工程区构造运动的演化史，就能够深刻认识和理解该工程区的构造格局及其宏观力学特性。主应力状态是地质体经过若干次构造运动后形成的，最近的一次构造运动往往决定了当前的主应力状态。因此，搞清楚了地质体、构造运动以及构造应力场的形成演化过程，对判断和确定主应力方向非常重要。

地质学家通常可以给出地质形成的年代、地质体的建造和改造过程，这是力学家望尘莫及的。在此基础上，地质工程师就可以凭借丰富的经验对地质体的稳定性做出基本的判断；而对力学分析而言，不仅要知道不同特性的地质体所在的区域、最大主应力方向，还需要定量地知道在不同区域内力学特性和最大主应力的具体数值，然后，才能够借助力学分析给出工程上所需要的结果。由此可以清楚地发现地学、力学不同的工作特点以及在工程应用中所发挥的作用。地质工作探明了地质的成因和演化，需要进行定量化的描述，进一步借助于力学手段给出定量化的结果。力学工作依赖于地质分析：将看起来相同的地质体划分为不同的类别，确定了地质勘查的对象、范围。

地学根据地质分析向力学提供哪些基本的地质特征，以及力学如何根据地学提供的定性分析获得定量化描述的参数是地学和力学相结合的切入点，也是获得地质体初始状态的基本途径。

工程实践中，初始的地应力有很多的方法可以测量，当构造应力较大并且地层较均匀时，能够得到一些可以利用的结果。但是，地质体的不均匀和复杂的地质构造致使地应力的分布本身就是不均匀的。通常测量传感器的尺寸很小，所代表的范围非常有限，测量时有些点测得的应力值很大，而由另一些点得到的值很小，甚至为 0。上述现象较为普遍，为了获得准确的地应力信息通常要设置较多的测点。应当说，初始地应力状态的不确定性是由于地质构造的不确定性而决定的。

初始的地质构造表征着地质体经受过破坏的特性。对于岩体，未知的初始状态包含了未知结构面的形状、方位、间距以及连通率；对土石混合物，包含了土石混合比、块石的尺寸、形态、分布；渗流场是未知初始状态的另一个重要的特征，在研究

地质灾害时，这一因素起着极其关键的作用，在岩体中，渗流场不再是均匀渗流，裂隙中水的流动与岩块中水的渗流速度相差几个量级。因此，如果不能描述岩体的结构，岩体内部的渗流规律也很难得到。

由此可知，无论是地质体初始地应力的不确定性、地质体结构和渗流场的复杂性，都可以归结为地质结构的几何问题。

4.3 地质体变形与破坏的演化过程

描述岩体受到扰动发生变形、破坏不能单纯研究地质体的结构，需要认识两方面的问题：其一，地质体内部已经有了很多的破坏面——结构面，这些结构面的存在影响着应力场的分布，描述地质体的复杂结构，并且能够得到准确的地应力场需要建立合理的力学模型；其二，地质体发生灾变是逐步演化而来的，发生灾变的关键并不是这些结构面的破坏，而是那些结构面以外，具有较高强度的岩块（岩桥）的破坏。在应力场作用下岩桥破坏，地质体内会形成新的结构面，并改变地质体的整体特性，应力场重新分布，进而诱发新的破坏。

准确地给出地质体内部的应力场、描述地质体内部应力转移的过程就是研究地质体由局部破坏引发整体破坏的过程，也可认为是局部连续的区域演化为破坏面的过程。客观地描述这样的力学过程比较困难，人们借助于不同的力学模型作了大量的工作，结果还是不理想。相关基础理论或相应计算方法的不完善制约了力学在地质工程中的应用。

总之，笔者认为，研究地质体的关键科学问题包括：提出合理的描述地质体特性的力学模型、将力学和地学结合给出探测地质体的初始状态方法、研究定量地描述地质体由局部破坏演化为整体破坏的过程的力学分析方法。

5 工程地质力学的研究方法

5.1 上、下限解定理与解析解

按照“复杂结构、简单本构”的思路，不同的山体其地质体的结构性不同。不同的山体就如不同的建筑物，地质体的结构与人造的建筑结构相比复杂得多，很难将一个工程的结果用于另一个工程，这就需要针对具体的问题进行具体的分析，很难从中总结出一个具有普遍意义的解析解。事实上，解析解真正能够解决的问题甚少，一些通过实验整理

出的经验公式所能应用的范围也比较有限。

在结构塑性极限分析中有两个定理——上、下限定理。其中，上、下限是指使得系统破坏外加力的最大值和最小值。简而言之，当外加力超过系统允许的上限时系统一定会发生塑性破坏，并会发生整体的运动；当外力小于系统允许的下限时，整个系统一定不会发生塑性破坏。定理还强调了用运动学的方法可以确定材料的上限，用静力学的方法可以确定下限，而上、下限定理本身并没有给出具体的求解方法。如果对地质体进行极限分析，在满足塑性极限分析的条件的基础上，外加的力是不变的，通常的分析方法是通过降低岩体内部的材料强度来分析地质体的破坏安全度。材料强度降低相当于外力增大，反之，则是外力减少。这样，如果用材料的强度来说明上、下限定理就是当介质的强度低于系统允许的强度下限时，系统就会破坏，当介质的强度高于系统允许强度的上限时，系统一定不会发生破坏。有必要说明的是，上、下限的定理是普遍意义下的理论叙述，适用于各种给定的力学模型，但是，根据上、下限定理并不能鉴别力学模型是否客观。举例说明，刚体极限平衡的条分法借助于上、下限定理，可给出一种山体的破坏状态，该结果的合理性取决于地质体可简化成为条分结构和沿滑面滑动的假设。如果复杂的地质体不满足这种假设，所得到的结论也就不一定合理。

研究含有复杂结构的地质体，给出解析解通常是比较困难的，这方面的研究成果距离解决实际问题还比较远。随着计算方法逐渐成熟和计算技术的不断提高，人们已经不再期望通过解析解来解决实际工程问题。

5.2 室内实验研究

在解析解应用范围非常有限的情况下，开展室内实验研究不失为一种探索地质体力学特性的方法。室内实验研究主要可分为模型实验、模拟实验和岩石力学性能的测量。模型实验只能给出实验尺寸条件下的结果，模拟实验试图给出相似条件下原型尺寸下的结果。

5.2.1 模型实验

一般不考虑相似率，实验结果只是用于模型的尺寸，用于观察实验现象和得到实验尺度上的规律性。从实际应用的角度而言，模型实验似乎没有意义，也由于不满足相似率经常遭到非议。然而，如果将实验的目的用于验证数值模拟结果的可靠性，

或者说将实验和数值模拟相结合,其研究意义就不同。模型实验中,可以制造一些复杂的岩体结构,精确的测量、研究某些参数逐渐变化得到某种条件下“山体”变形和破坏的规律,然后用数值方法模拟该实验,并将两种方法得到的结果比较,验证数值方法的正确性,最后通过数值模拟给出回答工程问题的答案。数值模拟有时可以通过改变参数得到所需要的结果,得到与某个工程测量结果相接近也不困难,但是,如果几个力学参数变化的规律都能够做到实验和数值模拟吻合或得到相同的规律,计算程序就比较可信。目前大量的计算软件是基于连续介质力学模型的,模拟岩体问题受到很多限制,在用于模拟工程以前很有必要通过室内实验验证这些方法的可靠性。

5.2.2 模拟实验

对地质工程而言,主要的相似参数是几何相似和重力相似参数。

在几何相似方面,由于山体的尺寸很大,几何相似时,要求对实验材料的制作有了很高的要求,如山体的尺寸为几百米,考虑结构面的间距为米的量级;若几米的模型实验中结构面间距的尺寸要小于1 cm,就给模型制作增加了难度,如果要想考虑结构面的厚度,模型实验真正实现起来并不容易。

在重力相似方面,可写出重力产生的应力与强度的比 $(\rho gh)/\tau$ 这一量纲一的量,其中 ρ 为密度、 g 为重力加速度、 h 为岩体的特征尺寸, τ 为材料的强度。满足相似率可以通过增加材料的密度和降低材料强度的方法,也可以用原材料做离心机实验研究水的特性还需要分析渗流过程中的动力相似问题,将更加复杂。即使不考虑满足几何相似的制作困难、也不考虑相似材料的不相似性以及离心机实验中除重力之外其他不相似的因素,仍然可以认为,如果期望模拟实验能够模拟实际工程问题,给出实际工程真正需要的结论,必须很清楚地质结构,而这是很困难的。事实上,模拟实验最重要的模型的相似性,但是,在地质体原型的结构还不知道的情况下,不可能做出具有相同结构实验模型,不能做到结构的一致性,也就不能达到实验模拟目的。更为明确地讲,正是地质体未知的“初始”状态,降低了离心机实验的使用价值。由此可知,无论模型实验还是模拟实验,室内实验更重要的作用是为数值模拟提供验证的依据和定性地观察一些实

验现象。

5.2.3 岩体力学性能测量

岩体力学性能室内实验主要是测量岩样、土样的力学性能,主要的工作是在材料实验机上完成的,包括岩块的本构关系、强度实验以及结构面的强度实验等。常规的实验内容基本上还是借用金属材料特性实验的方法和仪器,针对岩土特性的实验加入了峰后特性(post-peak failure)、结构面剪切、化学腐蚀以及流、固耦合方面的实验仪器。需要指出的是,在已获得应力应变关系为基础的实验中,一个最基本的假设是通过试样测量得到岩体中一个点的力学特性。这样,从有限体积试样的实验中得到本构关系和强度准则需要满足一些基本的条件:材料是均匀的、外加荷载是均匀的。对于非均匀材料,当施加力的边界是刚性边界时,也就是给定位移边界(边界上各点的位移相等),边界上力的分布就是非均匀的。换言之,对土石混合体、含结构面岩体、以及有内部缺陷的岩块如果用常规的材料实验机进行实验,实验给出的是已知边界合力、未知应力分布条件下的结果。因此,当非均匀材料作常规实验得到一些不规律的实验结果并不奇怪(特别是试样的强度离散度较大),因为实验中的所加的荷载本身就是不确定的。一种新型的材料试验机即柔性边界加载的材料试验机试图解决这一问题^[19]。

5.3 现场地质调查与现场监测

尽管在地质体的研究过程中,人们经常采用类比的方法对山体的稳定性做出判断,但是在工程实践中,几乎很难发现地质条件相同的两个山体,这也正是工程地质力学研究的主要的难点之一。深入细致地进行调查研究,了解和掌握地质体的演化、分层特性、层内介质的力学特性、地质体的结构等对概化力学模型是非常重要的。这项工作是工程地质力学的基础工作,是建立力学模型的基本出发点,对工程地质力学研究成果的可靠性起着关键的作用。

现场地质调查、勘察和分析应当是地质力学研究的一部分,除了上述为力学模型建立做准备的工作,还应当包括了力学分析方法作为地质调查、勘察基本手段的内容。随着现代通讯技术和测量仪器的发展,现场地质测量的技术水平也相应有了大幅度提高。笔者认为,基于新的力学分析手段可以提

出所需要的力学参数,为了定量地获得这些参数就必须要在地质调查过程中进行现场的测量,而有些测量仪器的开发和测量结果的分析又需要力学的分析工具来实现。也就是说,地质调查是建立力学模型的基础、现场测量为确定计算参数提供原始数据,力学分析是确定力学参数一种手段。

地质工程师的工作是在地质调查的基础上直接做出判断并给出结论,而工程地质力学是在此基础上进行测量,获得定量的参数,建立力学模型,通过分析和计算才给出结论,这正是地学与工程地质力学的主要差别之一。

5.4 数值模拟

随着数值模拟在其他力学分支学科扮演着越来越重要的作用,人们也试图将数值模拟发展为工程地质力学研究中最主要的工具之一。然而,现有的数值方法在模拟复杂地质体方面,还远远不能满足工程的要求,所给出的结果也通常不尽人意。面对应用于工程地质力学领域内的众多数值方法,有必要考察其适用范围,验证其可靠性。为此,笔者建议从以下4个方面对数值方法的可靠性进行判断:(1)能够定量地描述复杂的地质环境;(2)能够模拟地质体由变形到破坏的演化过程;(3)能够实现数值模拟结果与地质体几何结构及力学响应之间的信息互馈;(4)计算结果和判断方法能够被工程师所接受。L. Jing^[20]已经对岩石力学中所涉及的数值方法作了较为全面和准确的论述,本文基于以上4个方面简要地评述几种主要数值方法的适用性。

5.4.1 有限差分方法

有限差分方法是一种最直接、最本能的求解偏微分方程的数值方法,特别适于处理涉及流变体,如流体动力学、热传导等的工程问题^[21]。但对于岩石材料而言,该方法在处理连续问题方面,与有限元相比并不具有优势;在处理非连续问题方面,由于可看作显示离散元方法的基础,也可被后者所取代。因此,有限差分方法与其他数值方法杂交,可更为有效地应用于流-固耦合问题。

5.4.2 有限元方法

有限元方法建立在连续介质力学模型的基础之上,能够很好地描述在均匀化假定下岩土体的力学特性^[22]。近年来大量的研究工作致力于有限元方法的扩展算法,试图模拟岩土材料的破坏过程。Goodman单元^[23, 24]在前处理中,根据岩体结构面的几何分布

来划分网格,可模拟已知结构面材料的失效过程。对于含有大量结构面的岩体,划分单元的工作将十分繁重。最近,嵌入不连续的有限元方法得到较大的发展^[25],该方法可在无需网格重划分的前提下,将不连续表面或裂纹引入有限元中,也已经应用于对不连续问题的研究。此外,利用生死单元并借助处理塑性单元的技术在一定程度上也可模拟材料的拉伸破坏^[26],由于该方法存在网格不客观问题,数值结果的意义主要还是在定性的方面,还需要从单元破坏的物理意义上开展更深入的研究。

5.4.3 离散元方法

模拟岩体的离散元方法主要是块体离散元(包括DDA)^[27-29]。该方法能够方便地描述岩体中结构面的复杂分布模式,也可模拟材料变形和破坏过程,在结构面上所使用的剪切破坏准则类似于常规的刚体极限平衡方法,可给出工程师习惯使用的安全系数。该方法的缺点主要是没有严格的理论基础,确定结构面的刚度依赖于经验;不能够很好地描述地质体中具有连续介质特性的部分;对结构面事先给定的模型也不能模拟演化过程,可断裂块体的模型将块体用连续模型描述还是摆脱不了连续模型的限制。当然,工程地质力学模型本身已经进行大量的简化,这种靠经验确定结构面刚度的方式有时候不影响离散元在实际工程中的应用,因为与常规的刚体极限平衡方法相比,离散元方法考虑了更多的地质因素。但是,应当明确各种模型下离散元界面刚度的物理意义^[30](李世海,2004)还要对该方法的适用范围有足够的认识;基于连续介质的离散元方法试图给出结构面单元刚度的确定方法和分析地质体由连续到非连续的演化过程^[28, 31]。

5.4.4 刚体极限平衡方法

L. Jing^[20]的相关研究中,刚体极限平衡方法^[32, 33]由于没有被列为数值分析方法,未做讨论。J. M. Duncan^[34]对该方法有较为全面的综述,认为极限平衡方法比有限元方法更为保守,有限元计算地应力可以作为极限平衡方法的补充。笔者认为,刚体极限平衡方法尽管能够为工程师提供容易理解的分析结果,但其固有的缺陷弱化了它的实用价值。该方法通过寻找滑面的方式描述地质结构,提供一种破坏状态,而无法描述变形及破坏的过程;条分和沿破坏面滑动的假设,掩盖了地质体复杂特性对稳定性的作用,至于是偏保守还是偏危险(与离散元相比

要偏危险), 取决于各种方法所建立的力学模型, 不能一概而论; 只是研究破坏状态不能够充分利用一些地质勘查和测量的结果。但是, 在目前情况下, 要取代该方法, 还需要进行大量的工作。主要原因在于: 其一, 该方法在某些特定条件下仍然有其可取之处; 其二, 到目前为止, 还没有一种令人信服的方法能够取代刚体极限平衡方法, 人们仍习惯使用传统方法; 其三, 一种新的方法能够推广应用, 必须要通过大量的室内实验和工程实践证明其可靠性和实用性; 其四, 需要提高工程技术人员对计算技术和力学模型的认识水平, 使他们真正地认识到传统方法的固有缺陷。

5.4.5 神经网络及遗传算法

神经网络及遗传算法是一种经验方法, 其可靠性基于在对大量工程数据积累。当所获得的地质体数据的准确性受到质疑时, 该方法提供的分析结果也就值得怀疑^[35, 36]。此外, 如何抽取各种计算因子并确定它们的权重都是必须解决的问题。事实上, 这些问题的真正解决仍然依赖于对地质体量化的描述。支持向量机^[37]是一种进行参数敏感性分析的计算工具, 它将由参数变化产生的结果用函数的形式表示出来, 可以通过对该函数的运算, 判断进一步计算参数改变的方向, 以求得节省计算工作量。当前一种将敏感度分析——支持向量积、确定性算法和遗传算法相结合的方法, 可以高效率地分析出各种参数对工程地质力学响应的影响度, 回答工程问题。利用该方法, 可将选取的影响因子与力学模型的基本参数对应起来, 来补充修正力学模型。如果将支持向量机中的影响因子用量纲一的量表述, 也可以减少计算的工作量并且使计算结果分析更具有物理意义。

由于地质体中各种力学参数的选取具有不确定性, 给出确定性的稳定性结论和确定性的预报结果实际上是不可能的。因此, 在研究地质体的工程问题时, 需要采用概率统计方法来表征参数的不确定性。实现概率统计结果的可靠性仍然依赖于工程地质力学中的两个基本要素: 其一, 力学参数分布函数的可靠性, 如现场地质调查得到的岩体结构面间距的均值和方差是否准确可靠。这需要以地学为基础; 其二, 计算方法的科学性。如果采用的计算方法过于简单, 以至于不能反映研究问题中复杂地质体的基本(或主要)特征, 则所得到的概率结果仍然不可靠。

总之, 发展地质力学数值分析方法, 要客观描述地质体的运动规律, 新方法所给出的结果应该采用传统的表达方式, 以便能够为工程师接受并可与当前的规范相结合, 从而逐步将其推广使用。实现这一目标的关键还是要通过模拟大量的实验和工程验证方法的可靠性。

6 地学、力学与工程结合的问题

长期以来, 我国的科学家就非常注重地学与力学的结合, 并强调以工程建设为目的。然而, 影响这种结合的主要因素包括力学基本理论的发展、测量和勘查技术以及大型工程建设的需求。在力学的研究工具不足以模拟复杂的地质结构时, 那些简单模型下给出的结论很难满足工程的要求。数值计算结果的计算参数来自于经验的估计, 计算给出的结果就只能是供参考, 超出不了工程师的经验判断; 如何摆脱这种局面, 需要地学和力学的相互渗透并将研究目标着眼于解决工程的实际问题。

6.1 力学研究成果应用面临的困难

(1) 不了解地质演化的基本规律, 不能准确地将地质演化过程中特殊的构造融入到计算模型中。而这些特殊的构造是地质工程师经验判别的主要因素, 因此, 那些结果难以得到地质工程界的认同。

(2) 均匀化的力学模型建立了复杂的本构关系, 用于描述地质结构时有些困难, 研究成果不实用。

(3) 计算结果依赖于参数选取, 参数选取具有很大的人为性, 当得到的结果与工程师长期积累的经验不符合时, 又缺少充分的依据给予证明。

6.2 地学研究成果应用面临的困难

(1) 根据工程地质、施工地质的大量的地质调查结果直接做出判断, 没有将调查结果抽象为用于量化分析的参数, 给出的结论缺少多种因素和量化分析的结果。

(2) 对大型的现代化工程, 特别是工程治理设计, 经验判断不能给出设计参数, 满足不了现代化工程的需求。

地学和力学研究成果应用的困难导致了地质灾害防治的传统工艺、分析方法和防治思路难以获得突破: 物探、监测获得的地质体信息难以直接用于分析方法当中; 难以检验工程治理的效果: 尽管治理后的边坡是稳定的, 但是, 难以判断该边坡是否有必要治理。地质体与工程结构的相互作用并不是

整体失稳和失稳条件下的结果,准确、定量描述变形的过程,需要科学的计算方法。

在工程实践中,由于地质工程师的经验和长期的地质调查工作积累,往往可对某一地区的地层直接做出判断,在此基础上开展地质调查可以有的放矢,进而节约经费和时间。如果地质判断失误,已有的经验会导致工程失败,在此基础上的力学分析也不会成功。反过来,在地质调查中,需要补充力学的分析手段,更准确地获得地质体的力学参数。工程地质对地质体的判断借助于力学的手段定量化,并通过力学的理论方法进行定量分析,给出满足工程设计要求的设计依据。将地质环境定量化,在考虑地质构造形成的宏观运动过程和地层的辨认和定性描述的同时,还要注重地层几何特性、物理特性的定量化,并结合地质勘查和现场的监测弥补经验判断的不足,避免失误。

工程地质力学是地学、力学和工程科学的交叉学科,遵循以地学为基础、以力学为手段、以工程为目的的基本思路,就可以将各个学科有机联系起来,推动工程地质力学的发展。

7 工程地质力学的主要研究内容

根据工程地质力学的发展状况,笔者认为,当前的研究内容应包括下述几个方面的内容。

7.1 建立地质体的力学分类标准,并在此基础上提出地质调查新方法

岩体分类对地质工程非常重要,国内外学者提出了不少的分类方法。岩体分类工作往往在勘察阶段进行,主要目的用于初步设计、工程概预算、工程定额计算、工程招投标等,在这一阶段,所能获取的地质数据非常少,这就决定了岩体分类只能是粗放性、概略性的。分析目前的岩体分类主要可以概括为两种方法:一类是按照岩体自身特性进行的分类方法,主要考虑岩体的质量,按照岩体本身的工程地质力学特性(如岩石的坚硬程度和岩体的完整程度)进行分类的。例如,我国现行的国家标准《工程岩体分级标准》(GB50218-94)、国际上应用较多的适用于隧道工程的Q分类法、适用于矿山巷道的RMR分类法等,都属于这种分类方法;另一类是结合工程进行的分类方法。基本上限于围岩稳定性分类,如国内铁路部门的《铁路隧道围岩稳定性分类》、煤炭系统的《矿山巷道围岩稳定性分类》等,

这种分类法用得不多,它着眼于工程扰动后围岩的稳定程度,既考虑岩体本身的工程地质力学特性,也考虑工程的类型和规模,如隧道的跨度、高度,主要节理组与隧道轴线的夹角,隧道的重要程度和服务年限等。

比较两类分类方法就会发现,特性分类方法只是给出地质体的特性,不涉及具体的工程,因此具有普遍的意义。但是,基于岩体的分类,工程专家制定了相应的设计规范,从而使工程设计与岩体的分类(包括特性分类)紧密的结合起来。

以Q分类法为例,确定Q值需要6个参数:岩石质量指标RQD;节理组数 J_n ;节理粗糙度 J_r ;节理蚀变度 J_a ;节理水影响的降低因子 J_w ;应力降低因子SFR。上述6个参数均与工程特性无关。可见,Q分类法不仅仅给出了岩体类别,而且还给出了不同岩体类别所对应的建议支护参数。

由此可知,岩体分类直接或间接与工程设计所建立的联系,决定了岩体分类在地质工程中的重要作用,从某种意义上讲,岩体分类决定了设计参数。现在从力学的角度分析从地质调查到完成工程设计及优化所必需的条件和力学分析过程:

- (1) 必需条件:边界条件(地下空间的尺度)、初始地应力场或位移场、给定地质结构几何特性;
- (2) 本构关系:地质体结构力学特性,包括岩块和结构面的力学特性;
- (3) 强度准则:工程结构及地质体强度准则;
- (4) 受力分析:借助于计算技术,给出工程结构与地质体相互作用的规律;
- (5) 强度校核:设计强度校核;
- (6) 结构优化:改变工程结构,重新分析,并比较不同结构的差别。

由此可知,借助于力学手段进行结构优化,所需要的基本力学参数有些能够通过已有的岩体分类获得,有一些却不能。通过岩体的分类法能够直接或间接地确定工程设计的原则,其产生的定量结果并不是通过确定性的方法得到的,其中含有较多的经验成份。随着计算技术的发展,人们已经有可能也有必要实施确定性的分析,对于难以确定的地质体的强度、初始地应力场也可以通过实验、现场监测和参数反分析等方法估算出来。如果在岩体分类法中不结合具体的工程类别,直接给出力学分析需要的确定性参数,对不确定的力学参数采用统计、测量或反演的的方法给出,然后借助于力学手段提供

工程设计的依据, 岩体分类的目标就非常明确了。

基于上述讨论, 为了定量描述地质体与结构的相互作用, 地质体分类的目的不再仅仅是直接为工程设计使用, 或者为工程设计提供岩体质量的级别, 而且还是直接或间接为力学分析中提供所需要的力学参数。这样的思路, 不排除已有的岩体的分类方法, 只是分类的指标更为具体和更具有针对性。为了有别于传统的分类方法, 将这种根据力学分析对力学参数的需求进行分类的方法, 称为地质体的力学分类法。

力学分类方法充分体现了地学与力学的有机结合, 它将地学对地质体的描述通过力学定量化, 同时完成了力学研究者的知识结构难以实现的工作。围绕着力学需求, 地质调查的内容更加明确, 列出如下的内容作为说明:

(1) 不同地层与构造的分布参数

地质工作可以对研究区域内可能存在的地层分布做出判断, 给出不同地层的地质特性, 经过地质勘查校核, 确认地层的分布。力学研究可以通过建立地质体的力学模型将地质勘查得到的结果给出更精细的分析。

(2) 地质界面的几何与力学特性参数

明确表述地层的厚度、倾向、倾角, 各个地层之间连接的方式、形成年代决定的界面强度、相互之间是否错动所决定的界面的连通率, 力学研究是将这些几何特性, 融入到计算模型中。

(3) 结构面的几何和力学特性参数

通过地质调查给出结构面的倾向、倾角、间距、结构面的厚度、填充物的特性、结构面的连通率。土石混合体不存在结构面, 相关的参数包括土、石混合的比例、块石的尺度、分布规律等。

(4) 渗流场边界条件参数

地质体内的渗流场分布除了地质体的结构参数之外, 还应包括渗流场的边界条件: 补、排水的位置、几何尺寸、流量(流速)等。

(5) 地质体当前状态参数

裂隙是压性(闭合型)还是张性的, 反映了地质体在该区域内的受力状态, 定量地描述要借助测量, 比如波速, 地下水位以及在降雨条件下的水位变化, 表征了结构面张开以及连通的程度。

(6) 通过测量给出的分类参数

借助于地震勘探^[38], 给出的地质体波的传播速

度、震动衰减规律、地表振动的频率、振动持续时间等。对于大型工程, 一般可以通过变化荷载(开挖、降雨、震动等)测量出地质体的相关物理量(位移、应力、水压力等)的变化。在地质工作根据结构面的形态和运动的痕迹判断结构面的状态的基础上, 力学研究可以模拟出与此对应的可能的初始状态, 进而得到地质参数变化的范围。

地质体的力学分类方法是以地质体自身的力学特性为基础的, 具有普遍的意义, 不受工程类别的影响, 在此基础上, 可以直接为数值计算提供力学参数, 工程结构设计以及优化均可以根据计算结果得到。更进一步而言, 材料特性中个别参数不能给出确定的数值, 但是具有统计意义。可以在力学模型中设为统计量, 通过反分析和测量结合进一步确定取值范围。

建立统一的分类标准, 将分类的标准定量化, 并作为数值模拟的参数输入, 在此基础上计算出的结果应用于工程, 体现了力学、地学与工程的有机结合。

7.2 建立合理的力学模型并给出可靠的计算方法

描述地质体非连续、非均匀、流固耦合以及未知的初始状态的特性, 需要合理的地质力学模型。传统的有限元、离散元等方法分别基于连续、非连续介质的力学模型, 在定量描述地质体的力学特性方面均有自己的优势, 也有自己的缺陷。针对一个具体的问题, 总可以提出一种简化的模型, 并完成某一种条件下的力学分析, 但是计算结果的可靠性总是遭到质疑。解决问题需要开展两个方面的工作: 一是计算方法要有坚实的理论基础, 基本上能够反映材料特性; 二是计算方法稳定性要好。

7.2.1 描述岩体的力学模型

岩体中含有大量的结构面, 这些结构面有一定的分布规律, 结构面内充填物的厚度(有些结构面没有厚度)和充填材料的性质不同。如果已知结构面的位置, 数学描述这些结构面并不困难。建立岩体的力学模型主要的研究内容包括:

(1) 探测或确定结构面的连通率

岩体的结构控制论强调了结构面对工程岩体的稳定性起着决定作用, 一般而言, 结构面的倾向、走向和间距确定之后, 连通率越高, 岩体的质量也就越差。连通率制约着力学模型的准确性, 作为统计量就需要通过现场勘测和反分析确定它的分布规

律。有了这样的模型,研究波在地质体的传播规律,应该是力学分析用于地质参数探测的重要方法。

(2) 岩体结构面的压、张状态

结构面的压、张状态是决定地质体当前状态的重要指标之一。在离散元的计算模型中,同一组结构面空间位置是确定的,不能直接给出结构面的拉、压状态。地质调查可以通过地表观察给出结果,还需要加到力学模型中去。

(3) 岩体破坏的演化过程

对工程而言,结构面连通率反映了岩体的工程质量,通过更进一步的分析,真正决定岩体破坏的是岩体中的“岩桥”。换言之,只有当结构面之间的完整岩体破坏时,岩体整体的破坏才会发生。而这部分岩体开始是连续的,只有描述了具有连续特性的完整岩体的破坏过程才能够真正给出地质体的变形和破坏的规律。

7.2.2 描述土石混合体的力学模型

自然界中的土、石混合体以坡积层、古滑坡体的形式出现,力学模型的建立与岩体有本质的区别。土、石混合体内部一般没有明显的结构面,只有和基岩的交接面和演化形成的滑面。

(1) 山体中块石的分布规律

初始状态完全可以通过有限元建立这种材料的力学模型,正如岩体的连通率一样,山体中岩块的含量、分布、块体尺寸和姿态都很难用确定的方法给出,地质钻孔也难以获得基本可靠的数据。力学研究的内容需要给出影响山体稳定性的最大块度、块石分布的关键位置以及探测块石分布的方法。

(2) 山体上的裂缝分布和演化

古滑坡体上产生的裂缝是山体变形、破坏的演化结果。通常情况是有了裂缝才被发现和开始研究,从有裂缝开始分析就需要知道裂缝和当前内部应力场的分布规律。在山体的变形过程中已有的裂缝可能会合并,其他的位置可能会产生新的裂缝,这样的过程反映到力学模型中也需要非连续的力学模型。

7.2.3 固体、流体耦合的力学模型

当前用于裂隙岩体渗流预测的主要有3种类型的模型:等效连续体模型、离散裂隙网络模型和等效-离散耦合模型。

(1) 等效连续体模型

等效连续体模型将裂隙中的水流等效平均到

整个岩体中,将裂隙岩体模拟为具有对称渗透张量的各向异性连续体,然后利用经典的连续介质理论进行分析。等效连续介质模型的突出优点是可以沿用各向异性连续介质理论进行分析,不需知道每条裂隙的确切位置和水力特性,对于那些不易获得单个裂隙数据的工程问题不失为一个很有价值的工具。但等效连续介质模型在应用时尚存在两方面的困难:一是裂隙岩体等效渗透张量的确定;二是对于不存在代表性体积单元(RVE)或RVE很大的地质体,由于其有效性不能得到保证,将会带来不合理的结果。

(2) 离散裂隙网络模型

离散裂隙网络模型力求在搞清每条裂隙的空间方位、隙宽等几何参数的前提下,以单个裂隙内水流基本公式为基础。利用流入和流出各裂隙交叉点流量相等的原则建立方程。然后通过求解方程组获得各裂隙交叉点的水头值。由于离散裂隙网络模型对岩体裂隙网络体系中的每条裂隙都加以具体的模拟,更能刻画裂隙岩体渗流的基本规律。但当裂隙较多时,特别是三维问题,计算量过大,导致该模型在工程实践应用上仍受到很大制约。

(3) 等效-离散耦合模型

等效-离散耦合模型对于裂隙密度较小的区域采用离散裂隙网络模型。对于裂隙密度大的区域采用等效连续介质模型。多重裂隙网络模型将岩体中的各种裂隙和空隙按规模和渗透性分为4级处理,各级裂隙(孔隙)都形成各自的裂隙网络。以水量平衡原理建立各级裂隙网络之间的联系,并考虑各级裂隙渗流与应力不同的相互作用关系。该模型既可避免离散裂隙网络模型对每条裂隙进行模拟而带来的巨大的工作量,又能保证等效连续介质模型的有效性。

尽管人们逐渐认识到裂隙岩体渗流应力耦合对工程安全的重要影响,研究工作大都局限于分析宏观裂隙网络中应力-应变状态,而对于涉及岩石应力-应变对裂隙渗流率的影响,以及裂隙岩体在开挖卸荷作用下裂纹的萌生、扩展和贯通过程中渗透率的演化及其与应力的耦合机制方面,仍缺少深入的认识和分析计算手段。并且,在煤矿开采过程中,当地层卸压后煤层中的瓦斯就会解析出来,瓦斯、水、固体颗粒和煤的多相运动形成瓦斯突出,是更为复杂的流、固耦合问题。因此,将非连续的力学

模型与流固耦合力学模型相结合, 发展相应的计算方法, 并通过实用程序验证理论的实用性, 已成为岩石力学、水力学领域的前沿课题。

7.2.4 多尺度计算模型

多尺度计算模型涉及的问题很多, 不同力学模型有不同的表述形式, 现进行简要的讨论。众所周知, 岩体具有尺寸效应。同种类型的岩体, 其强度在一定范围内随着试样尺寸的增大而降低。“结构控制论”观点认为, 由于相同的岩体内部节理面的间距是一定的, 因此小尺寸的岩块所含有的节理面(缺陷)的数目少, 而大尺寸的岩块所含节理面的数目多, 因此, 大尺寸的岩块强度要低。从材料均匀化的观点看, 大尺度试样内所含有的缺陷尺寸和小尺度试样内所含缺陷的尺寸对试样强度的影响不同, 因此, 表现出不同的力学特性。两种不同的解释在计算模型中有不同的反映。以有限元为例, 当不考虑尺寸效应时, 有限元中网格的划分仅对结果的精度有影响; 当考虑尺寸效应时, 材料的特性要随网格的细化而发生改变(强度提高), 否则就不能体现材料的多尺度效应。在离散元中, 块体的划分本身就可代表结构的特性, 块体的尺寸也就是结构面的间距。即使块体和结构面强度都不变, 边界条件也不变, 含有小尺寸块体单元的区域要比同样大小, 但含有大尺寸块体的区域更容易破坏。

笔者认为, 针对工程地质力学的特点, 在建立地质体多尺度力学模型时, 需要给出一个基本尺度(最小尺度), 即实验室岩石试样尺度。事实上, 对地质体而言, 完整的岩块可被看作是均匀材料, 其应力-应变关系、破坏强度也是可测的。另外, 结构面的强度也可通过实验获得。因此, 在能够构造结构面的情况下, 当研究尺度细分到基本尺度时, 材料的基本力学性质是已知的。此时, 可直接采用实验结果, 而无需再研究更小尺度的问题。具体实现计算模型时, 可根据实际情况, 选择不同尺度的尺寸。

对于离散元, 可以直接根据地质勘察结果建立结构面模型。如果条件允许, 可直接将单元划分到基本尺度。否则, 当允许的最小块体尺寸是某一尺寸并需要分析更小间距的结构面时, 可事先根据基本尺度和结构面模拟出该尺寸下块体的本构关系和强度准则, 加入到整个计算模型中去。

对于有限元, 可通过均匀化的方式在不同的研

究尺度内划分该尺度下的网格, 并赋给相应的材料特性, 当尺度细划到基本尺度时, 不必再研究更小的尺度。通过最大单元尺度与基本单元尺度的比值可以决定选择几重尺度。

多尺度计算模型更能够反映地质体的基本力学特性, 也是普及使用大型计算程序的主要手段, 应当是未来工程地质力学研究的内容之一。

7.2.5 开发实用计算程序

解决实际工程问题不仅需要建立力学模型, 而且需要发展计算程序来数值实现力学模型, 否则只能是纸上谈兵。开发具有强大生命力的程序是一项系统工程, 需要有基础理论、基本算法、实验研究、工程实践、界面处理等多方面的支持。目前我国正在进行大规模的地质工程建设, 有市场需求, 对开发实用计算程序有激励作用。必须指出的是, 用于模拟地质体的计算软件, 其可靠性的验证不能完全依赖于实际工程, 这是由地质体未知的初始状态决定的。正如前文所讨论的, 从开始获取地质参数、参数反分析、信息反馈就需要数值分析, 在这种情况下验证计算程序, 从逻辑上就不成立。地质体问题通常也没有解析解, 为了验证开发程序的可靠性, 就不得不做大量的实验验证工作。可靠的计算方法用于工程可以保证工程安全、避免或减少判断失误。

软件开发应致力于解决实际工程问题, 适用于不同的地质条件和地质工程。同时还要考虑软件使用者的认识水平, 这就需要软件开发深入现场, 对地质工程中的问题有清醒的认识。

总之, 开发工程适用的软件, 是一项复杂的系统工程。进行大量的工程实验、现场地质考察是软件开发的重要组成部分。

7.3 提出关键测量参数、研发新型监测仪器

力学研究通常是根据已知的参数通过理论或数值分析给出结果。对地质力学而言, 需要什么参数、如何获得这些参数以及获得参数的可靠性都需要进行力学的分析工作。对不同的力学模型, 相应的测量参数也就会发生改变。例如: 分析滑坡的稳定性时, 如果采用刚体极限平衡方法只需要知道材料的强度、地表的形状、有时需要破坏面的位置; 对有限元方法, 除了上述参数外还需要弹性模量、泊松比、地质分层、滑面位置; 对离散元方法还需要增加结构面的空间分布、结构面的力学参数; 流

固耦合的离散元方法还需要流体的黏性、补给水的位置和流量等；进行反分析需要测量一些变形、应力等物理参数的变化规律。由此可知，随着力学分析方法的发展，地质力学参数就需要相应的改变。

提出新的测量参数就需要获得这些参数的方法和仪器。仪器的测量原理、测量精度以及数据处理在很大的程度上也是地质力学的研究内容。例如，地震物探的方法，岩性的分析主要是依赖于波速，但是，地震波的幅值、频率和振动持续时间所携带的大量的信息都能够反映地质体的特性，在当前对地震波在地质体中的传播规律没有足够认识的情况下，测量仪器就不可能具有分析这些信息的功能。

7.4 实验验证、筛选力学分析方法

在不断完善力学模型和提出新的力学模型的同时，地质力学研究应当更加注重新方法的验证和应用的研究。每年我国有关地质灾害防治的科学论文数以千计，各种各样的本构关系、计算方法不断的涌现，然而，分析山体滑坡稳定性依然采用二十世纪五六十年代的分析方法——刚体极限平衡方法。该方法有着固有的缺陷，工程师也明知其中含有更多的经验成分，也不愿采用考虑更多地质因素的分析技术(有限元、离散元等)的原因在于：一方面是刚体极限平衡方法所要求的参数简单，如节7.3所述，它只要求地表形状和强度参数，并且在一些限定的条件下有其合理性，能够与工程师长期的经验建立起某种联系；另一方面，目前还没有经得起考验的新的分析技术。力学分析方法越精确，要求的参数就越多，方法的精确性和参数的易取性是一对矛盾，也是相辅相成的，更需要相互促进。计算方法应当尽可能地利用已经获得的力学参数，反之，为了利用精确的计算方法，应当开发勘测技术获得更多的力学参数。如果将国家的规范停留在简单的计算方法上，就没有必要探测新的力学参数，工程地质力学的发展必然会受到限制。

面对一系列的商用软件和不断提出的各种算法、计算机软件，需要开展一些专门的论证工作。在证明一些方法的可靠性的同时也发现其中的问题，确定其适用范围，在此基础上提出国家标准。

由于一些商用软件的源代码是不公开的，很难从根本上发现程序的缺陷。计算工程问题时，只能是输入参数得到结果。由于计算结果的需求方不能接受有问题软件的计算结果，使用软件者即使发现

了软件问题，也不便明确指出，对自己的计算结果也没有信心。笔者认为，用于分析地质体的计算机软件仍然处在探索之中，计算结果中出现不合理的情况是正常的，不断的发现问题和改进，计算机软件才有可能完善。没有必要假定计算机软件可靠而对不合理的计算结果给出牵强附会的解释。

7.5 研究具体的地质工程并探索普遍规律

自然界几乎不存在地质构造相同的山体，更不可能有完全相同的地质工程，这也正是地质工程设计和地质力学应用的难度所在。郑哲敏院士主张研究岩体力学首先要研究个别的案例，然后再去寻找一般的规律。矛盾的普遍性存在于矛盾的特殊性之中，在个别的问题不能很好解决的情况下，也是不可能的给出统一的方法。灾害调查的过程中经常发现，与滑坡灾害发生地相邻或附近的山体，地质条件差异很小，经验判断也更危险，但是却没有发生滑动。这说明，人们对地质体的认知程度基本上处在经验判断和感性的阶段，对个别案例的深入研究、积累数据和分析基本运动规律是地质力学长期的研究任务。

8 结 语

开展工程地质力学的研究需要以地学为基础、力学为手段、工程为目的。地质体复杂的力学特性对力学研究的方法提出了新的要求，研究地质体的力学分类、开发测量关键参数的新型仪器以及探索描述材料由连续到非连续破坏的演化过程是工程地质力学特有的或当今学科的前沿课题。工程地质力学研究面临着机遇和挑战，只有解决关键的科学问题才有可能从根本上解决地质工程的设计、施工中提出的问题，最终提高地质工程建设和地质灾害防治的水平。实现这一目标首先要提炼相关的科学问题、研究内容及方法，笔者主要从力学的角度对此提出了自己的看法。受知识结构和认识水平的限制，无论是深度、广度都还很不够，希望与地学、力学和工程科学的专家共同探讨有关问题，以求得我国工程地质力学的研究目标更加明确。

致谢 特别感谢郑哲敏、王思敬、谢和平院士、冯夏庭教授，以及近年来参与国家重点基础研究发展规划(973)项目“灾害环境下重大工程安全性基础研究”和中国科学院重要方向性项目“滑坡灾害防治

工程中关键力学问题研究”的各位同仁的大力支持和帮助！

参考文献(References)：

- [1] 李四光. 地质力学概论[M]. 北京:科学出版社,1979.(Li Siguang. Introduction to Geomechanics[M]. Beijing: Science Press, 1979.(in Chinese))
- [2] 谷德振. 岩体工程地质力学基础[M]. 北京:科学出版社, 1979.(Gu Dezhen. Foundation of Rock Mass Engineering Geomechanics[M]. Beijing: Science Press, 1979.(in Chinese))
- [3] 孙光忠. 岩体结构力学[M]. 北京:科学出版社, 1988.(Sun Guangzhong. Rock Mass Structural Mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1988.(in Chinese))
- [4] 王仁. 大地构造分析中的一些力学问题[J]. 力学进展, 1989, 19(2): 145-157.(Wang Ren. Some problems of mechanics tectonic analysis[J]. Advance in Mechanics, 1989, 19(2), 145-157.(in Chinese))
- [5] 王思敬. 坝基岩体工程地质力学分析[M]. 北京:科学出版社, 1990.(Wang Sijing. Analysis of Engineering Geomechanics of Dam Foundation Rock Mass[M]. Beijing: Science Press, 1990.(in Chinese))
- [6] Feng X T, Hudson J A. Integrated analysis approaches to rock mechanics problems[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(11): 1 702-1 707.
- [7] Jing L R, Feng X T. Numerical modeling for coupled thermo-hydro-mechanical and chemical processes(THMC) of geological media—international and Chinese experiences[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1 704-1 715.
- [8] 郭啟良,丁立丰. 岩体力学参数的原地综合测试技术与应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23): 3 928-3 931.(Guo Qiliang, Ding Lifeng. Study on integrated in-situ measurement technique of mechanical parameters for rock mass and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(23): 3 928-3 931.(in Chinese))
- [9] 孙宗頔,张景和. 地应力在地质断层构造发生前后的变化[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23): 3 964-3 969.(Sun Zongqi, Zhang Jinghe. Variation of in-situ stresses before and after occurrence of geologic fault structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(23): 3 964-3 969.(in Chinese))
- [10] 谢和平,彭瑞东,鞠杨. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3 565-3 570.(Xie Heping, Peng Ruidong, Ju Yang. Energy dissipation rock deformation and fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3 565-3 570.(in Chinese))
- [11] 沈珠江,陈铁林. 岩土破损力学——结构类型与荷载分担[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13): 2 137-2 142.(Shen Zhujiang, Chen Tielin. Breakage mechanics of geomaterial—structure types and load sharing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(13): 2 137-2 142.(in Chinese))
- [12] 黄理兴,陈奕柏. 我国岩石动力学研究状况与发展[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1 881-1 886.(Huang Lixing, Chen Yibai. Rock dynamics in China past present and future[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1 881-1 886.(in Chinese))
- [13] 陈勉. 我国深层岩石力学研究及在石油工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14): 2 455-2 462.(Chen Mian. Review of study on rock mechanics at great depth and its applications to petroleum engineering in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(14): 2 455-2 462.(in Chinese))
- [14] 路新景,孙文怀,李金都. 南水北调西线工程几个特殊的工程地质和岩石力学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 829-833.(Lu Xinjing, Sun Wenhui, Li Jindu. Special problems of engineering geology and rock mechanics in the West Route of South-to-North Water Transfer Project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 829-833.(in Chinese))
- [15] 张超然,戴会超. 三峡工程建设中的几个岩土力学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1 591-1 598.(Zhang Chaoran, Dai Huichao. Several geomechanics problems in construction process of the Three Gorges Project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10): 1 591-1 598.(in Chinese))
- [16] 王思敬. 中国岩石力学与工程的世纪成就与历史使命[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(6): 867-871.(Wang Sijing. Century achievements and new historical mission of rock mechanics and engineering in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(6): 867-871.(in Chinese))
- [17] Li X, Liao Q L, He J M. In-situ tests and a stochastic structural model of rock and soil aggregate in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, (3): 494.
- [18] Hoek E. 实用岩石工程技术[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2002.(Hoek E. Practical Rock Engineering[M]. Zhengzhou: Yellow River Water Resources Press, 2002.(in Chinese))
- [19] 孟祥跃,李世海,张均锋. 柔性边界加载试验机研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1 760-1 764.(Meng Xiangyue, Li Shihai, Zhang Junfeng. Study and manufacture of flexible boundary testing machine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics

- and Engineering , 2004 , 23(10) : 1 760 – 1 764.(in Chinese))
- [20] Jing L. A review of techniques advances and outstanding issues in numerical modeling for rock mechanics and rock engineering[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 2003 , 40(3) : 283 – 353.
- [21] Pande G N , Beer G , Williams J R. Numerical Methods in Rock Mechanics[M]. New York : John Wiley and Sons , 1990.
- [22] Tang C , Fu Y F , Kou S Q , et al. Numerical simulation of loading in inhomogeneous rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 1998 , 35(7) : 1 001 – 1 007.
- [23] Goodman R E. Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks[M]. San Francisco : West Publishing Company , 1976.
- [24] Gens A , Carol I , Alonso E E. Interface element formulation for the analysis of soil-reinforcement interaction[J]. Computers and Geotechnics , 1989 , 7(1/2) : 133 – 151.
- [25] Moes N , Dolbow J , Belytschko T. Finite element method for crack growth without remeshing[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering , 1999 , 46 : 131 – 150.
- [26] 唐春安,朱万成. 混凝土损伤与断裂——数值实验[M]. 北京:科学出版社, 2003.(Tang Chun an, Zhu Wangcheng. Damage and Fracture in Concrete—Numerical Experiments[M]. Beijing : Science Press , 2003.(in Chinese))
- [27] Cundall P A. A computer model for simulating progressive , large scale movements in blocky rock systems[A]. In : Proceedings of the ISRM Symposium on Rock Fracture[C]. Nancy : [s. n.] , 1971. 11 – 18.
- [28] Li S H , Zhao M H , Wang Y N , et al. A new computational model of three-dimensional DEM-block and particle model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 2004 , 41(3) : 436.
- [29] Shi G H. Block system modelling by discontinuous deformation analysis[J]. Computational Mechanics , 1993 , 11 : 25 – 31.
- [30] 李世海,汪远年. 三维离散元计算参数选取方法研究[J]. 岩石力学与工程学报 , 2004 , 23(21) : 3 642 – 3 651.(Li Shihai, Wang Yuannian. Stochastic model and numerical simulation for discontinuous jointed rock mass using 3D DEM[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2004 , 23(21) : 3 642 – 3 651.(in Chinese))
- [31] Li S H , Zhao M H , Wang J G. A continuum-based discrete element method for continuous deformation and failure process[A]. In : Computational Mechanics Abstract (Volume II)[C]. Beijing : Tsinghua University Press and Springer-Verlag , 2004. 77.
- [32] Morgenstern N R , Price V E. The analysis of the stability of general slip surfaces[J]. Géotechnique , 1965 , 15(5) : 79 – 93.
- [33] Bishop A W. The use of the slip circle for the stability analysis of slopes[J]. Géotechnique , 1955 , 5(6) : 7 – 17.
- [34] Duncan J M. State of the art : limit equilibrium and finite element analysis of slopes[J]. Journal of Geotechnical Engineering , 1996 , 122 : 577 – 596.
- [35] Hudson J A , Hudson J L. Rock mechanics and the Internet[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 1997 , 34(3/4) : 603.
- [36] Yi H , Wanstedt S. The introduction of neural network system and its applications in rock engineering[J]. Engineering Geology , 1998 , 49 : 253 – 260.
- [37] 赵洪波,冯夏庭. 位移反分析的进化支持向量机研究[J]. 岩石力学与工程学报 , 2003 , 22(10) : 1 618 – 1 622.(Zhao Hongbo, Feng Xiating. Study on genetic-support vector machine in displacement back analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2003 , 22(10) : 1 618 – 1 622.(in Chinese))
- [38] 夏国治. 20世纪中国物探 1930 ~ 2000[M]. 北京:地质出版社, 2004.(Xia Guozhi. The 20th Century Geophysical Exploration in China : 1930 – 2000[M]. Beijing : Geological Publishing House , 2004.(in Chinese))