

水工岩石力学研究的基本思路

董学晟, 邬爱清

(长江科学院 岩基研究所, 湖北 武汉 430010)

摘要: 综合多年来岩石力学在大量大中型水利水电工程中的研究和应用实践, 提出一些在开展水工岩石力学研究时应当掌握的基本思路, 包括水利水电工程中岩石力学的特点、任务, 认识岩体、利用岩体和加固岩体 3 个组成部分, 和它们之间的关系。概述了水工岩石力学中有关岩石工程中的不确定性及对策、岩石力学研究的阶段性问题、水工岩石力学研究的主要内容、水工岩石力学中的三大工程问题、岩石力学研究与地质及设计相互关系问题、工程岩体的性状监测以及岩石力学中有关环境保护和维护生态平衡等方面的观点和看法。

关键词: 岩石力学; 水利水电工程; 基本思路

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)20 - 3696 - 08

SOME ESSENTIAL CONSIDERATIONS OF ROCK MECHANICS IN HYDRAULIC ENGINEERINGS

DONG Xue-cheng, WU Ai-qing

(Rock Foundation Division, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Based on the experience of rock mechanics study accumulated in the past 50 years in the fields of hydraulic and hydropower engineerings, some essential considerations including the purposes and the distinctive characteristics of these studies are studied. It is emphasized that the three parts of rock mechanics study in hydraulic engineerings, i.e., reconnaissance of rock mass, utilization of rock mass and reinforcement of rock mass, are closely related to each other. In addition, some attitudes associated with rock mechanics study in hydraulic engineering in aspects of uncertainties of rock mass and the corresponding strategies, phasic problems in rock mechanics study, the main contents of rock mechanics study, characteristics related to the three kinds of rock engineerings(dam, rock slope, and underground openings), relationship with engineering geology and engineering design actual behavior monitoring of engineering rock mass, and general comments considering the environmental protection and the maintenance of ecological equilibrium are presented and summarized.

Key words: rock mechanics; hydraulic and hydropower engineering; essential considerations

1 引言

岩石力学是一门新兴的学科, 仅仅于 20 世纪中叶才开始在欧洲出现。20 世纪 50 年代以前, 我国

没有一家岩石力学实验室, 只是把岩石看成是建筑材料, 与混凝土一同划归材料实验室, 简单地测定一般物理力学指标。50 年代以后, 随着我国国民经济建设的兴起, 许多大中型水利水电工程, 如三峡、丹江口、乌江渡、以礼河、龚咀、碧口、葛洲坝、

收稿日期: 2005 - 06 - 14; **修回日期:** 2005 - 08 - 29

作者简介: 董学晟(1932 -), 男, 1958 年毕业于莫斯科动力学院水工专业, 现任教授级高级工程师, 主要从事岩石力学与岩石工程方面的研究工作。
E-mail: dxc_413@163.com。

龙羊峡、二滩、小浪底、白山、鲁布革、隔河岩、天生桥等的兴建,提出了大量的、丰富多彩的岩石力学研究课题,为解决这些难题,成百上千科技人员集中攻关,获得了大量科研成果,使我国岩石力学研究迅速提高到国际水平^[1~4]。

纵观几十年来我国岩石力学的发展,可以看到:岩石力学学科在中国是因工程建设的需要而产生、受工程建设的推动而发展起来的。特别是水利水电工程建设,在岩石力学的开创和发展中,发挥了主力军的作用。由于水利水电工程本身的特点,由此发展起来的岩石力学不论是方法、途径还是测试技术都有很多自己的特色,可以说,水利水电工程中的岩石力学研究已经形成了岩石力学学科的一个重要分支——水工岩石力学^[1]。

2 水工岩石力学研究的特点与任务

2.1 特点

总结多年来水利水电工程中关于岩石力学问题的经验,可以看到水工岩石力学有以下几大特点^[1, 4, 5]:

(1) 由于坝址选择要考虑水能综合利用、防洪、航运等多种因素,地质条件的选择余地往往有限。在选定的地质条件下,既要满足建筑物的充分安全可靠,又要考虑尽可能减小工程量。由于工程规模大,后者常常是设计方案选择中的主要因素。由此,对岩石力学研究提出的要求就是:查明岩体的极限承载能力,以便能够最大限度地加以利用。例如:需要充分了解、利用洞室围岩和边坡岩体的自稳能力,仅在必要时才进行适当的加固措施,以保证足够的稳定安全度。而其他行业,例如铁道,线路很长,要通过多种地质条件的地段,每一种条件对工程影响的范围有限,不可能也不必要详尽了解每一段基岩的性状。对于工业与民用建筑物的地基来说,往往只要是岩石基础就能充分满足要求、有足够的裕度了。至于军事工程一般都可选择地质条件较为优越的岩体作为场址。

(2) 在水利水电工程(特别是大中型工程)的岩石力学研究中,要求对比较大范围(如大坝坝基,常达几百米乃至几公里)的岩体的每一部分都有详尽的了解,这就是说,一方面要对岩体的力学性状及其变化作深入的研究;另一方面,这种研究还要覆盖建筑物涉及的每一部分(地段)岩体,而不能满足

于平均的概念。某一薄弱环节的破坏会导致整个大坝的失稳,相反,局部条件较差也有可能被其他部分所补救。例如,地下电站厂房洞室围岩或者船闸闸首边坡,这些要和机电设备或金属结构配合的岩体,需要预测其变形到厘米级的精度,以保证这些设备和结构的安全运行。同一大坝各个坝段坝基岩体的力学性质可能不尽相同,需要进行分区、分段进行研究,区别对待。

(3) 大坝要挡水,水工隧洞要过水,船闸边坡和库岸边坡要浸泡在水中。水除了对岩体施加动、静荷载外,还要影响岩体及其结构面的力学性质。对于未扰动的天然岩体,要弄清自然条件下的地下水渗流场,研究、预测施工开挖后渗流的变化,在此基础上确定渗流施加于岩体和建筑物上的荷载,采取相应的结构和防渗、排水工程措施。例如,在三峡双线五级船闸高边坡工程中,为解决地下水对边坡稳定性和闸室悬挂式衬砌墙的影响,在连续三个五年计划期间都设立了国家重点攻关课题,开展了广泛、深入的研究。显然,水利水电工程中水对岩体影响的研究,比其他行业更为重要。

(4) 大坝和其他水工建筑物的服务年限一般都很长,即所谓的百年大计、千年大计。在这样长的时期里,岩体特别是其中结构面的力学性质,以及其存在的状态都将经历各种缓慢但具积累性的变化。研究这些变化(如岩体的时效变形)对工程岩体稳定性和建筑物正常运行的影响,是水工岩石力学的重要课题,例如,三峡双线五级船闸高边坡的长期稳定性问题。而其他工程如矿井,相对来说是临时短期存在的,岩体性状长时间内的变化就不那么重要。

除此之外,作为直接为工程服务的学科,与其他固体介质力学相比,水工岩石力学的特点还与其服务的对象——工程岩体有关。用力学方法研究别的固体介质(如混凝土、钢材、土体等等)时,一般要将介质(材料)的样品制成试件,通过试验测试其物理力学性能和指标,用它们来作为这个介质(材料)的性能和指标,作为进行模型试验、计算分析和设计的根据。但是对于工程岩体来说,由于其高度的不均匀性和不连续性,小块的岩石(体)试件很难代表大体积的工程岩体,同一类岩体在同一工地的不同部位(有时相距很近)性质也可能相差很大,因此需要研究新的方法和途径来认识它。

2.2 任 务

为水利水电工程建设服务的岩石力学研究,其基本任务可以概括为“认识岩体、利用岩体、加固岩体”。随着水工建设规模由小变大、坝址的地质条件由优良、单纯,逐渐变得困难复杂,对岩体“认识、利用、加固”的水平也逐渐提高了。早年开始进行岩石力学研究时,在比较坚硬完整的基岩上建设小、规模的工程,研究工作仅限于进行少量的岩石力学试验,为水工设计提供一些岩石(岩体)的变形、强度参数,如弹模、抗剪强度等(即所谓常规试验)就可满足需要。评价工程岩体稳定性的准则和手段一般只限于材料力学的概念和方法,进行整体极限平衡计算,这是认识和利用岩石(体)的初级阶段。按照当时一般习惯的做法,试点往往选在地质条件中等偏优的岩体上,试验结果要经地质、试验和设计三方面人员讨论,给试验数据打一个比较大的折扣,取为设计选用的岩石力学参数值。实际上这是将岩体不均匀、条件不确定的因素放在岩石力学参数的折减里来考虑。在进行整体稳定性分析中,一般取用比较大的安全系数,由此设计出的岩石工程和有关建筑物,按一般的说法可以“包得住的”,也就是说,岩体的承载能力肯定会比所施加的荷载大得多,研究给出的是岩体可能具有的最小承载能力。对于承载力不够的岩体一般的对策是挖除,以人工建筑物和材料代替。但是,根据河流综合利用要求选定的坝址,地质条件不会都那么理想。并且,随着建设不断发展,地质条件优良的坝址会逐渐减少,而建坝的规模加大。坝区基岩或有软弱岩层,或含软弱夹层的岩体,或因断层、节理、裂隙切割而较破碎,或存在强透水地层,或位于高地应力区、强地震区等等。这时,仅仅取得一般的力学试验指标、了解岩体可能具有的最小承载能力、或者对于岩体承载能力仅仅有个大体上的概念,就远远不够了。必须对岩石力学研究提出更高的要求,否则只能选用偏于保守的方案,导致资源浪费,甚至放弃规划上经济合理的坝址。

为了解决在有缺陷和不良地质条件下建设水工岩石工程的问题,要进行更加深入细致的岩石力学研究。首先,需要全面认识天然岩体,区别质量不同的各部分,减小不确定性。这包括:对岩体和结构面进行分类和分级、分别进行力学性能试验、测求岩体和结构面在初步屈服以后剩余的承载能力

(因为局部的屈服并不等于整体的破坏、失稳)、测试和研究坝址区地应力场和岩石渗流场等等。其次,天然岩体受到工程活动扰动(边界、环境和应力条件改变、承受工程荷载)后,成为建筑物的环境或者一个组成部分(即工程岩体),其性状发生了变化。需要通过计算分析、模型试验或原型监测等手段,弄清这些变化,在此基础上进行稳定性和安全裕度的评价。这些多方面详尽的研究,目的就是要弄清工程岩体承载能力可能达到的限度和在经济合理的范围内改造加固岩体所能达到的限度,以便做到主要按规划要求和综合因素而不是单纯由地质因素来选择坝址,既安全又经济地建设水工建筑物。

综上所述,可将水工岩石力学的任务概括为:通过试验、模拟分析和监测等手段,研究认识天然岩体和工程岩体的力学性状及其变化,弄清工程岩体承载能力可能达到的限度;当承载能力(或稳定性)不足时,研究加固岩体的工程措施及加固所能达到的效果,为利用岩体建造水工建筑物中工程设计、设计优化、施工方法的优化、工程安全运行提供依据。

3 水工岩石力学研究的基本思路

3.1 岩石工程中的不确定性及对策

为了满足岩石工程建设前期的工程规划与设计需要,通常要进行地质勘探以搞清楚岩体的地质条件(岩性、构造、层理、断裂、岩溶等等),开展岩石力学试验工作以查明岩体的力学特性及其赋存的条件(岩体应力状态、地下水运行状态等),进行各种专题研究,了解工程岩体的应力、变形状态,评估工程岩体的稳定性。根据这些资料、数据和结果,进行岩石工程设计,决定建筑物的轮廓、尺寸及各种支护加固办法,选用开挖方法和程序。通过这种前期工作把一切情况在开工前都弄清楚,以便开工后就按照既定的要求和程序进行施工,达到经济、安全、高效的目的。然而在工程实践中,由于地质条件、岩体性状的变化,或施工条件的变化,或洪水、地震、气候等环境条件的异常变化等,开工后总会遇到这样、那样没有预见到的情况和问题,以致不得不修改设计、改变原来设想的做法。在前期工作中原以为确定了的东西其实都还不很确定,有时甚至是很不确定。对岩石工程而言,这种不确定

性尤为突出、常见,几乎成了一般规律。

为了减小岩石工程的不确定性,工程前期的地质勘探工作尽量细致,岩石力学试验研究要更深入,设计中对岩体承载能力的利用要留有余地和有备用方案。但是,最为有效的是施工中要根据临时发现的情况及时修改设计,也就是说,要进行动态设计。实现动态设计最关键的问题是设计、地质、施工、监测、监理和业主等各方面要密切配合,而不能分家、相互牵制、防范。要建立一个各方面(各环节)密切配合(而不是互相牵制)的体制。

另一方面,由于岩石工程地质条件的不确定性,岩石力学研究所能采用的勘探、试验、计算分析的手段有限,一直到岩石工程完全建成,对工程岩体性状变化的认识始终有一定程度的不确定性,这只能依靠岩体性状监测来解决。岩体性状监测既是认识岩体最直接的手段,也是检验模拟岩体的正确性和加固岩体的效果唯一可靠的办法,还是施工过程中借以及时调整、修改设计和施工方法、保证施工安全的有效手段。必须根据工程岩体的变形破坏类型,在充分了解岩体的力学性质和赋存条件下,结合岩体性状模拟试验、分析和加固等工作,进行岩体性状监测的设计和成果分析。

3.2 岩石力学研究的阶段性问题

根据国家现行的基本建设程序,水利水电工程建设有几个阶段。在工程前期是:江河流域(区域)综合利用规划,工程项目建议书,可行性研究报告,初步设计报告等几个阶段;在工程实施期是:招标投标,标书编制,施工;最后是工程运行阶段。

各建设阶段的设计任务不同,对地质工作、建筑物设计以及岩石力学的要求也不相同,工程的项目建议书阶段、可行性研究阶段、初步设计阶段、施工阶段和运行阶段各有不同的岩石力学研究任务。综合利用规划阶段还没有具体的工程项目,谈不上进行岩石力学研究。招标投标和标书编制时间都很短,其内容一般也都与岩石力学研究关系不大。岩石力学研究的阶段性主要体现在:项目建议书阶段、可行性研究阶段、初步设计阶段、施工阶段和运行阶段。文[1]对各阶段岩石力学研究特点进行了比较详细的概括。

3.3 水工岩石力学研究的主要内容

为工程服务的岩石力学研究必须包括“认识岩体、利用岩体、加固岩体”三个不可脱离的组成部

分。由于水利水电工程的特点,对这三部分工作都有特殊的要求,即:认识岩体要深入,利用岩体要充分,根据实际条件尽量加固岩体。

(1) 深入认识岩体

认识岩体是指在地质调查的基础上,了解岩体的力学性质及其赋存的环境^[6~9]。

认识具体(某一场址、某一区段)岩体的力学性质只能通过对此具体岩体进行力学试验(特别是现场岩体力学试验)获得,岩体的力学性质试验是研究、利用岩体不可绕过的环节,是任何数值模拟和物理模拟的前提。要点是认识岩体的不连续性、不均匀性及其随时间变化的特性。

除了岩体的力学性质外,岩体初始应力场和地下水渗流场是天然岩体所赋存的一个重要力学环境,它既是天然岩体所受到的“外荷载”,又对岩体的状态和力学性质有很大影响。对于岩体初始应力场和地下水渗流场的研究是认识岩体的重要组成部分。

认识岩体要深入,就力学性质而言,包含两方面要求:首先,在一个场址上不能满足于对某类基岩岩性平均大致的认识,要对岩石工程涉及的各部分岩体(特别是其中有地质缺陷、不均匀的部分)都应获得详尽的数据;其次,对某一类岩性不能满足于取得一个或几个参数,应对其在荷载作用下的变形破坏特性有较全面的了解。对于岩体初始应力和地下水也是一样,需要认识的是“场”,而不仅是几个点的情况。

在认识岩体的基础上利用岩体,需要充分而恰当地运用认识岩体中取得的数据和成果,关于参数取值的研究、工程岩体质量的评价、岩体质量分级、分区分段的研究是不可缺少的中间环节,是连接“认识岩体”和“利用岩体”之间的必要的“接口”。

(2) 充分利用岩体

利用岩体就是利用岩体所具有的承载力和强度,将工程岩体直接作为水工建筑物的一部分,如大坝基础、地下洞室围岩和各种建筑物岩石高边坡等。强调“充分利用”的意思就是要发挥岩体可能达到的最大承载能力和自稳能力,以便减少坝基开挖量,节约地下洞室支护和衬砌,边坡开挖尽可能陡些。

所以利用岩体的主要任务是:研究在工程荷载作用和开挖扰动影响下,工程岩体的性状变化,并

通过这些研究,寻求(确定)在一定安全储备下工程岩体承载能力和自稳能力可能达到的限度(稳定性研究或评价),而不能满足于“包得住”的概念。

在工程前期关于“利用岩体”的研究,只能采用模拟(数值模拟和物理模拟)的方法。两种模拟方法各有优缺点,应当依据不同工程建设阶段、不同类型的岩石工程及其变形破坏类型,采用数值模拟和物理模拟相结合的方法,使各自的优点相互补充。

对天然岩体进行合理、恰当的概化是正确地模拟研究工程岩体的前提。应当区别连续介质模型和非连续介质模型两大类,后者又分为块体结构模型和更为接近实际的裂隙岩体和层状岩体模型。采用何种模型,不仅取决于工程岩体种类、变形破坏类型的不同,还与工程建设阶段和设计任务要求有关。

(3) 尽量加固岩体

对待具有潜在不稳定性岩体工程,一般有两种做法:一是将不良的岩体挖除,用混凝土或其他人工材料代替;二是采取工程措施加固不够坚硬、稳定性不足的岩体。从岩石力学的观点看,对待一些具有潜在不稳定性的岩体工程问题,首要的问题是认真研究岩体所具有的强度和承载能力,尽量采用加固岩体的途径解决这类问题,慎重采用直接挖除的方案,能够保留的岩体就尽量保留,尽量少挖。很多情况下,采用简单挖除的办法,会扰动岩体原有的结构,带来新的不稳定问题。加固岩体的途径有两种,即通过对节理岩体灌注各种浆液的手段加固岩体;用锚杆、锚索辅以喷混凝土来加固岩体。

关于灌浆和锚喷两类加固岩体的方法,有两点是要强调:① 加固方法的选择和加固材料、工艺的设计应当根据前面“利用岩体”研究中取得的成果进行,特别是工程岩体的变形破坏模式(类型),以及由此提出的稳定性课题,应当是岩体加固设计的出发点。所以岩体加固研究要与稳定性研究或评价结合进行;② 灌浆和锚喷两类方法应当相互结合运用,在这方面过去的经验很少,研究也很少,值得今后大力提倡。

“认识岩体、利用岩体、加固岩体”这三个环节,各有丰富的工作内容和要求,彼此又密不可分,是一个缺一不可的整体。“认识岩体”是“利用岩体”和“加固岩体”的基础,“利用岩体”是“认识岩体”的目的,“加固岩体”是更好地利用岩体必不可少的手段。不考虑“利用岩体”的需要和特点,采用再

好的勘探、试验手段也是无的放矢。没有对岩体的深入认识,就不可能充分利用岩体,任多么复杂、高深的模拟、分析、计算也难以描述工程岩体的实际性状。“加固岩体”则必须根据认识岩体的成果、结合利用岩体的需要进行。

3.4 水工岩石力学中的三大工程问题

不同性质和赋存条件的岩体,在荷载作用下会有不同的变形破坏形态和机制。由此导致水利水电工程中的三类工程岩体(坝基岩体、边坡和地下洞室围岩)各自具有不同的稳定性问题,也就是坝基工程、边坡工程(包括与工程有关的滑坡问题)和地下洞室工程各自经常遇到的岩石力学课题^[10~13]。研究解决这些课题的途径和方法(包括岩体概化模型的选择和模拟分析理论和方法的取用),取决于这些工程岩体的变形破坏类型。不同性质的问题需要用不同的方法来解决。

(1) 岩石坝基工程问题

不论是重力坝还是拱坝,稳定性都有强度稳定性和变形稳定性两方面问题,要将基岩与坝体当成一个结构整体正确深入地分析坝基整体破坏机制。典型的重力坝坝基稳定性问题有:坚硬完整基岩上重力坝坝基胶结面抗剪强度参数选择问题,具贯穿性软弱夹层的岩石坝基的深层滑动问题,具断续缓倾角节理高坎坝段坝基抗滑稳定性问题。拱坝稳定性问题主要是具贯通性结构面的拱座岩体抗滑稳定性问题,和具软弱层带的拱座岩体的变形稳定问题。

(2) 岩石边坡工程问题

水利水电工程中有两大类岩石边坡:天然边坡和工程岩体边坡。天然边坡包括水库库岸的边坡和陡崖,主要问题是水库库岸岩石滑坡和危崖体的稳定性问题,特别是水库蓄水后,水位抬高导致的稳定性下降问题。工程岩体边坡包括削坡边坡和深切山体边坡两类,前者指边坡工程要扰动已经存在的天然边坡——表层清理、切脚等,由此形成的工程边坡;后者是原没有边坡,需要在山体中开挖深槽,同时形成两个相对的临空面——两个相对的边坡。天然边坡以及对天然边坡进行削坡的工程岩体边坡的变形失稳主要是崩塌和滑移。对于深切山体边坡来说,由于岩体应力剧烈释放和开挖爆破的影响,边坡表层岩体松动、开裂是另一种变形破坏形式。

(3) 地下洞室工程问题

根据洞室开挖引起的围岩应力状态变化,结合

围岩岩性和结构条件有几种常见的围岩失稳现象：岩石块体错动滑移和崩塌，岩体脆性开裂，顶拱塌落，断面压缩和岩爆。工程实践中可归纳出5类常见的岩石力学研究课题，即：大跨度、高边墙地下洞室群围岩稳定性研究，不利围岩的稳定性和加固处理，水工隧洞工程中的岩石力学问题，高初始应力条件下地下洞室稳定问题，以及地下洞室围岩实际变形和破坏特征研究问题。

3.5 岩石力学研究与地质及设计相互关系问题

如果将工程设计理解为工程建设的前期工作，那么，工程地质勘察和岩石力学试验研究都是工程设计的一部分内容。但对具体的设计工作而言，岩石力学研究是为工程建设服务的一项独立专业，是地质勘察和工程设计中间的一个必不可少的环节，它与地质勘察、工程设计既有密切联系，又各有分工。

(1) 与地质的关系

岩石力学研究工作必须和地质工作紧密联系，必须在充分掌握地质资料的基础上进行。首先，岩石力学工作者必须对地质工作的成果——关于岩石、岩体的性质和状况的描述有详尽的了解；其次，室内试验取样、现场试验选点都应当与地质人员结合进行，以便保证试验结果具有足够的代表性；试验结果分析、解释要紧紧密结合试点附近的地质条件进行(特别是在试验结果出现异常时)；各种计算分析数学模型的建立、本构关系和强度准则的选用、计算域(范围)的确定等等都必须符合实际地质条件，应有地质人员参与。对分析、计算结果的解释和应用也要在充分考虑地质背景条件下进行。

根据以往大量工程实践经验，可以就工程地质与岩石力学的分工提出这样一个模式：凡是不需要通过物理力学性质试验研究就可以得到的有关岩石、岩体性质的说明和描述，属于工程地质的工作范围，反之，则归于岩石力学研究的范畴。凡是基于直接感性认识和野外实际经验对工程岩体的稳定性做出的论述和评价，属于工程地质的工作范围，反之，一切基于岩体物理力学性质对工程岩体稳定性进行分析、计算和评价是岩石力学研究应当完成的工作。

(2) 与工程设计的关系

为工程服务的岩石力学研究必须与工程设计密切结合：根据设计工作提出的重大问题选择课题，

试验和计算分析方法、概化模式也都应当结合设计要求和条件确定，试验和计算成果的分析解释更要与设计工作密切结合进行，但是二者分工不同。

从工程设计的角度看，水利水电的岩石工程设计的任务可以概括如下：根据工程地质勘探和岩石力学试验研究提供的关于天然岩体的地质条件和物理力学性质，考虑水文、气象等其他方面的条件，按照本枢纽对各水工建筑物功能的要求，确定岩石基础、地下洞室和岩石边坡的位置、尺寸、加固处理措施、施工开挖方法和程序等。与此相应，从岩石力学的角度看，岩石力学试验研究的任务为：根据水工布置的需要，通过现场和室内试验研究，提供关于天然岩体物理力学性质的认识和资料(包括物理力学性质参数、应力-应变关系曲线，本构关系、变形和强度属性等)，并按照工程设计选出的岩石工程方案(位置、尺寸、加固处理措施、施工开挖方法和程序)，通过计算分析、模型试验或原型监测，阐明有关工程岩体的力学性状(应力、应变分布、塑性区或破裂损伤区)，对其稳定性或失稳破坏形态做出评价，提出优化设计方案、岩体加固处理的建议。因此，岩石力学为工程设计的服务不应当是一种消极、被动的服务，而是一种积极的、主动的、参与式的服务。也就是说，一方面它应当按设计规范的要求，向设计工作提供有关天然岩体性状的资料，另一方面它还要将对工程岩体分析研究的结果反馈给设计，提出优化设计的建议。

3.6 工程岩体的性状监测

工程岩体是受到工程建设扰动的岩体，建设岩石工程使天然岩体的边界条件和荷载条件都发生变化，因而它的应力、应变、环境(如水的赋存)等力学状态、甚至其力学性质都改变了，这种变化对其稳定性的影响怎样，是岩石工程设计中关心的首要问题。工程前期，天然岩体还没有受到扰动，只能通过模拟的方法(数值模拟或物理模拟)来研究工程岩体的性状变化，模拟得是否正确，只能在工程建设后才能得到验证。对被扰动岩体的性质和状态进行量测和测试——工程岩体性状监测，是认识工程岩体性状和稳定性最直接的途径，也是验证前期设计、模拟、计算最可靠的途径。

通过工程岩体性状监测，可以及时了解工程岩体在工程施工过程中和运行中性状(因而也就是稳定性)的变化，为工程施工期和运行期的岩石工程的

安全评估提供重要的依据,所以工程岩体性状监测又是为工程安全监控服务的,这就是岩石工程的安全监测,是水利枢纽工程安全监测系统的一个重要组成部分^[14]。

工程岩体性状监测的作用包括验证设计、优化设计、指导施工、监控工程施工和运行安全等几方面。在水利水电工程实践中,工程岩体性状监测,一般都作为岩石力学研究的一项重要手段和研究内容;在工程设计中也不单独列出,而是作为安全监测系统的一部分。

水利水电工程中的工程岩体性状监测的对象主要是大坝岩基、地下洞室围岩、岩石边坡和库岸滑坡的岩体。

3.7 环境保护和维护生态平衡

岩石力学在为岩石工程服务的同时,应尽量将对环境和生态的消极影响减小到最低限度。环境保护和维持生态平衡与保证安全、节约投资一样,是岩石工程设计需要遵循的原则之一。岩石力学在为工程服务的同时,如何帮助将对环境和生态的消极影响减小到最低限度?分析大量工程实际经验,可以初步归纳出以下几条:

(1) 在满足工程需要的同时要尽量减少开挖。为此,一方面应在优化建筑物的几何形态和减小尺寸上下功夫,另一方面要尽量保护、增加岩体的承载力和自稳能力,即加固岩体,避免采用简单的挖除方法。

(2) 多开洞少挖边坡。采用地下洞室结构代替明挖边坡有很大的优越性:线路短,开挖工作量小,对地表土壤和植被的破坏大为减小,并且,因洞室围岩多处于切向受压应力状态,与处于拉应力状态的边坡岩体相比,其稳定性更容易得到保证和长期保持。

(3) 多勘探、多研究,加深对岩体的认识,减小不确定性。对地质条件和岩体性状的不确定性,往往造成设计中采用过于保守的参数和条件,保留过大的安全裕度,使岩体开挖量增加。要减少对岩体认识的不确定性,在工程前期,地质勘探和岩石力学研究要尽量做细;在施工期,应充分利用施工地质和性状监测提供的信息。

(4) 多加固少挖除,充分保护和利用岩体的自稳能力和承载能力。对于承载能力和自稳能力不够的工程,应尽量采取加固而不是挖除的办法处理。

如对风化、软弱岩体或被断层、节理切割的破碎岩体,因开挖扰动,容易形成危岩体或不稳定块体,对其采用加固措施,可以节约回填混凝土,避免直接挖除可能引起的岩体进一步开裂失稳问题。

上述这些原则、考虑和方法,若能在工程项目的规划和立项阶段就得到重视和应用,其积极作用会更大。

4 结 语

我国正处于工程建设的新高潮,建设趋于规模化、巨型化、系统化,水利工程建设条件更加复杂,对于工程建设周期、耐久性、节能和环保等方面的要求越来越高,这些也对岩石力学与工程学科提出了更高要求和挑战。本文综述了文[1]中的一些主要问题和基本思路,包括水利水电工程中岩石力学研究的特点、任务、三个组成部分、主要工程课题,以及岩石力学研究与地质勘测、工程设计、环境保护的关系等问题,希望引起同行们关注。对这些岩石力学研究和为工程服务的基本问题开展广泛的讨论,使水工岩石力学解决工程实际问题的能力进一步提高,为解决国家西部水利水电建设面临的一些挑战性的岩石力学课题贡献力量。

参考文献(References):

- [1] 董学晟,田野,郭爱清.水工岩石力学[M].北京:中国水利水电出版社,2004.(Dong Xuecheng, Tian Ye, Wu Aiqing. Rock Mechanics in Hydraulic Engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2004.(in Chinese))
- [2] 陈宗基.发刊词[J].岩石力学与工程学报,1982,1(1): III - IV.(Tan Tjongkie. Forewords of the first issue[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1982, 1(1): III - IV.(in Chinese))
- [3] 王思敬,杨志法,傅冰骏.中国岩石力学与工程的世纪成就[M].南京:河海大学出版社,2004.(Wang Sijing, Yang Zhifa, Fu Bingjun. Century Achievement of Rock Mechanics and Engineering in China[M]. Nanjing: Hohai University Press, 2004.(in Chinese))
- [4] 周思孟.复杂岩体若干岩石力学问题[M].北京:中国水利水电出版社,1998.(Zhou Simeng. Rock Mechanics Problems in Complicated Rock Mass[M]. Beijing: China Water Power Press, 1998.(in Chinese))
- [5] 陶振宇.水工建设中的岩石力学问题[M].北京:水利电力出版社,1976.(Tao Zhenyu. Rock Mechanics Problems in Hydraulic Engineering[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press,

- 1976.(in Chinese))
- [6] 刘允芳. 岩体地应力与工程建设[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2000.(Liu Yunfang. Rock Stress and Engineering Construction[M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2000. (in Chinese))
- [7] 李迪, 张保军, 张漫, 等. 岩体变形试验与分层弹模计算[M]. 湖北: 湖北科学技术出版社, 2005.(Li Di, Zhang Baojun, Zhang Man, et al. Rock Mass Deformation Test and the Elastic Modulus Calculation in Individual Layer[M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2005.(in Chinese))
- [8] 中华人民共和国国家标准编写组. 工程岩体分级标准(GB50218 - 94)[S]. 北京: 中国计划出版社, 1995.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. Standard for Engineering Classification of Rock Masses(GB50218 - 94)[S]. Beijing: China Planning Press, 1995.(in Chinese))
- [9] 中华人民共和国行业标准编写组. 水利水电工程岩石试验规程(SL264 - 2001)[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Specifications for Rock Tests in Water Conservancy and Hydroelectric Engineering(SL264 - 2001)[S]. Beijing: China Water Power Press, 2001.(in Chinese))
- [10] 夏熙伦, 任放, 鲁先元, 等. 工程岩石力学[M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1998.(Xia Xilun, Ren Fang, Lu Xianyuan, et al. Engineering Rock Mechanics[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 1998.(in Chinese))
- [11] 田野, 蔡斌, 丁秀丽, 等. 岩石坝基工程[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2001. (Tian Ye, Cai Bin, Ding Xiuli, et al. Rock Dam Foundation Engineering[M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2001.(in Chinese))
- [12] 张有天, 周维垣. 岩石高边坡的变形与稳定[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.(Zhang Youtian, Zhou Weiyuan. Deformation and Stability of High Rock Slope[M]. Beijing: China Water Power Press, 1999.(in Chinese))
- [13] 朱维申, 何满潮. 复杂条件下围岩稳定性与岩体动态施工力学[M]. 北京: 科学出版社, 1996.(Zhu Weishen, He Manchao. Stability of Surroundings on the Complex Condition and the Dynamic Construction Mechanics of Rock Masses[M]. Beijing: Science Press, 1996.(in Chinese))
- [14] 王永年, 殷世华. 岩土工程安全监测手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.(Wang Yongnian, Yin Shihua. Safety Monitoring Handbook for Geotechnical Engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 1999.(in Chinese))

南水北调工程在建项目进展情况

截至 2005 年 8 月底, 南水北调工程在建项目(12 个)进展情况如下:

工程名称	总投资/亿元	工期/月	开工日期/年月日	完成投资/亿元	投资完成比例/%
三阳河、潼河、宝应站工程	9.18	36	20021227	8.23	89.70
济平干渠工程	13.06	30	20021227	11.16	85.50
东线一期					
解台泵站工程	1.88	24	20041024	0.42	22.30
刘山泵站工程	2.41	30	20041024	0.36	14.90
万年闸泵站工程	2.52	30	20041118	0.31	12.30
中线一期					
永定河倒虹吸工程	2.92	25	20031230	2.76	94.50
北京西四环暗涵工程	11.00	32	20050528	0.35	3.18
滹沱河倒虹吸工程	5.47	34	20031230	3.51	64.20
唐河倒虹吸工程	2.21	24	20040901	0.63	28.50
釜山隧洞工程	2.02	35	20040901	0.40	19.80
漕河段工程	8.84	36	20050613	0.37	4.19
古运河枢纽	1.85	23	20050715	0.12	6.49

(摘自 2005 年 9 月 19 日《经济日报》)