

对我国水工地下工程建设的几点看法

武汉水利电力学院 陶振宇

近十余年来,国内外地下工程建设都在迅速发展。据不完全统计:我国已建水工隧洞总长达100多公里,其中长度在2000米以上的有30条,最长的达12公里以上;已建和正建的地下水电站有28座,最大的地下水电站装机容量达90万千瓦;高压管道最大水头达630米。国外已建成世界上最大的地下水电站(加拿大LaGrande I,装机容量达532.8万千瓦,1980);最长的海底铁道隧道——日本青函隧洞(长53.58公里,其中海底部分为23.30公里)也正在建设中;还建成了Chooz地下核电站(法国Ardenne, 1967),装机容量达27.5万千瓦,洞室尺寸为宽×长×高=18.5×41×42.8米,而且地下工程所服务的领域也日益扩大^(1,2)。从这些丰富的工程实践经验中,我们试图从岩石力学的观点,谈一些发展我国水工地下工程建设的看法,供参考。

一、重视前期探洞或施工导洞的岩石力学测试工作

在地下工程建设中,如何在施工前获得场地的地质、岩体特性的详尽而明确的认识和设计参数,一向是一个老大难问题,而这个问题如果得不到恰当的解决,则地下工程建设就不可避免地带有一定的盲目性也难于确保其安全性和经济性。

从实践中使人们认识到,地下工程施工以前在拟建洞室范围内开挖探洞,则是岩石力学研究的必要手段。Londe指出^[3],尽管认为这样做花费大,但探洞却是勘探深处岩石的一种有效方法。因为它提供了沿洞室轴线岩石的各种信息,且利于进行各种岩石试验和观测,并可为最终施工开挖和临时支护作必要的测试。这些测试结果,可以为地下洞室的设计提供接近于岩体实际情况的数据。

地下工程施工以前探洞中应进行的岩石力学测试项目详见表1。

表 1

探洞测试项目与测试内容

序号	测 试 项 目	内 容
1	洞内调查及素描	了解岩石性, 状断层破碎带, 夹层, 节理, 褶皱, 变质带等情况
2	围岩弹性波分布	测定围岩松动圈范围, 喷层情况等
3	表面应力测定	给出洞壁应力及方向
4	钻孔应力测试	求得洞壁一定深度围岩内的空间应力大小及方向

5	钻孔试验	(1) 测定一定深度的围岩弹性模量 (2) 用钻孔引伸仪测定从洞壁到一定深度的范围内围岩的变形, 并观测其随时间的变形
6	现场直剪试验	求得岩石结构面的强度参数 C, φ
7	承压板法试验	测定岩体变形模量, 并由承压板下的岩石变形速率结果推求出变形模量的时间因素
8	单轴及三轴岩体试验	测定单轴抗压强度, 弹性常数 (E, μ) 及强度参数 (C, φ)
9	收敛测量	测定洞室直径的变化
10	渗漏观测	搜集渗透到探洞的水, 观测其地下水活动情况
11	微震活动性监测	监测岩体的动力性态, 以估计通常用承压板法试验得不到的某些静力参数。
12	岩石锚杆试验	确定打钻程序和装置锚杆的方法, 以及随时间变化的锚杆应力

二、加强卸荷过程中岩体特性的研究

虽然任何工程建设都不可避免地伴随有岩体的卸荷过程, 但岩体卸荷作用对地下工程的影响尤为显著, 直接关系到地下工程围岩的稳定性。许多地下工程中的坍方, 往往与岩体卸荷面形成新的边界条件有关, 因此, 要着重研究卸荷对围岩的作用和影响。

这个问题, 可分两个方面: 一是开挖引起的围岩应力重分布问题; 二是开挖的卸荷作用给围岩性状带来的影响。

在地下工程建设中, 首先要对岩体初始应力场作必要的了解, 才能进一步研究在开挖过程中和衬砌后应力的集聚、释放、转移等为特征的应力重分布问题。但遗憾的是, 对于岩体中的初始应力场, 目前还难于从理论上得到, 而只能借助于现场岩体应力测试技术实测。但是应该看到现有实测方法有它的局限性: 其一、现有的应力测量技术, 都是在岩体受扰动的条件下进行的, 但扰动后对初始应力场有多大影响, 目前还无法予以精确估计; 其二、现有的应力测量, 只能求得岩体内一点的全应力 (即一点的三个主应力的大小和方向)。而岩体的初始应力场则仍然是不确定的, 只能根据岩体中若干已测定的点的应力状态予以推断和估计。但目前这种推断方法的物理假设, 只是当作一定的各向同性的弹性介质的均匀应力场。由于各种地质因素所引起局部应力状态的不均匀性, 对地下工程围岩——支护系统的稳定性有多大影响, 却常常是无法求得的。实测资料分散性很大, 就是不均匀性的证明。

在地下工程设计中, 考虑初始应力有几种常用的方法: 一种是用侧压力系数来表示岩体初始应力状态, 作为分散计算的重要参数。这种作法的缺点是比较粗略, 但其优点是避免了实测资料的某种程度的分散性, 只要其侧压力系数在一定的区间变化就行。因为计算表明,

侧压力系数粗略分为 $0.8 \sim 1.20$, <0.8 和 >1.20 这三个区间。一般说来, 每一个区间的洞室应力重分布的图形, 在形态上没有质的变化。另一种方法是以若干实测点的初始应力为基础, 借助于有限元法(平面的或空间的)来模拟峡谷形成后岩体初始应力的分布状态, 并考虑回归分析, 以得到计算边界上的受力条件作为工程计算模型。这种方法比前一种方法前进了一步, 可以得出任意一点应力的方向和大小, 但这仅仅是一种等效均匀的应力场, 仍然不是实际存在的岩体初始应力场。第三种方法是在地下工程的导洞(或探洞)中实测其位移, 以反求围岩中的初始应力状态, 并利用若干测点的应力测量结果作为校核, 进行必要的调整, 所得的结果作为工程设计计算的依据, 这样做当然也只是一种等效应力场, 与实际岩体应力场并不一定是相符的, 但因为是探洞中岩石力学的实测资料, 更接近于地下工程的实际情况, 如能根据施工过程中的实测资料予以验证和完善, 则应该还是比较符合实际的。

其次, 是地下工程开挖所带来的卸荷作用, 对围岩性状有什么样的影响, 也是需要弄清楚。一般说来, 人们对这方面的研究和认识是很不够的。国外在方面的研究也未见诸报导。笔者曾有机会对国内某些工程(鲁布革地下水电站, 故县水库工程等)进行过实地考察, 发现在局地应力区的岩体在卸荷作用下有膨胀、脆碎、裂隙架空等许多物理——力学现象。显然会对岩体性状有重要影响^[4], 只是目前还缺乏系统的研究, 暂时还不能得出进一步的评价。但是看来是值得着重研究的。

三、利用施工中岩石力学测试结果以完善和改进 地下工程的设计和施工

实际工程施工期间岩石力学研究的目的, 是将洞室开挖时的量测资料, 用于完善设计并改进施工方法, 确保地下工程建设安全而经济地进行。具体地说, 施工时岩石力学测试的目的是: (1) 及早地提供围岩失稳的警报, 以便及时采取补救措施; (2) 在施工期间进行观测来校核那些对施工和设计具有特别重要的第一性资料数据; (3) 根据施工期间的量测, 减少在设计假定中的未确定因素; (4) 进一步保证施工完全符合实际要求。总之, 是利用施工期间所提供的围岩信息, 反馈到设计和施工中去。

因此, 施工期间的岩石力学测试具有重要的意义。但由于测试是在施工期间进行的, 条件较差, 所用仪器一定要设计得容易安装和防护(防震, 防潮等), 而又具有较高的灵敏度和耐久性, 从开挖直到施工以后的整个期间都能有效的工作。又由于围岩情况复杂, 要使实测结果能够反映围岩的真实情况, 必须进行大量的不同类型的量测, 以使资料具有可比性和规律性。重要的是要进行预测的围岩性状与实际性状的比较, 这通常是借助于有限元法来进行。

四、关于地下工程的有限元法

目前广泛采用有限元技术来确定地下开挖围岩的位移、应力和应变场, 为此需要解决岩石的本构关系(应力—应变关系), 计算参数等问题。这些问题取决于对天然岩体特性的认识 and 了解, 目前还没有解决, 是当前岩石力学研究的重要课题。

就实际地下工程设计和施工来说, 现在比较通用的是摩尔—库仑(Mohr—Coulomb)准

则；并普遍注意到岩石的粘弹性和粘塑性问题，发展了一些测试技术和计算方法。

岩石力学的有限元法，虽然获得了很大的发展，但也还存在一些值得改进的地方。首先，目前多把天然岩体只作为单相（固相）介质，而实际上它应是一种三相（固相、液相和气相）的介质；如果气相在一般情况下可以被忽略不计的话，至少也应作为两相介质来对待。研究表明〔6〕，在粘塑性地质岩体中的孔隙—裂隙液体，对地下开挖有重要的影响，它可以降低洞壁的位移率。因为在两相分析中，体积的增加部分为孔隙—裂隙液体所抑制，所以单相分析的位移增长率要比两相分析的为大。而且孔隙—裂隙液体的效应，还会使开挖的围岩介质应力分布显著地不同于单相分析的情况。

其次，还发现〔6〕：如果岩体强度低于初始应力（这在地下工程建设中，迁到某些岩体软弱、而又具有高地应力的条件时是可能存在的情况）。按一般有限元法由于收敛太慢而实际上成为不可能，因为在这种情况下，存在着明显地低估开挖周围塑性区的实际范围的危险。

此外，在目前有的有限元分析中，忽略了重力的影响，而地下工程中，重力的作用是重要的。在其它情况相同时，重力的影响会随着开挖尺寸的增加而变大。如果不计重力的影响，则洞室周围塑性区范围就会明显的扩大，因此，重力对稳定性的影响是不能忽略不计的〔6〕。

再者，岩石力学有限元的非线性分析中，目前多限于材料非线性问题，考虑到岩体的基本特性，在有些情况下也需要考虑它的几何非线性问题（大变形问题）。因此，似可将有限元法的“力系离散化”，同岩体结构本身的“材料离散化”结合起来，将岩体表现的单一性状离散化为实际存在的包括结构面的天然岩体性状，从而使岩体结构特性包含在计算分析之中，看来是可取的〔7〕。

前已提及有限元法被广泛应用于进行地下工程预测的围岩性状和实际性状的比较分析。国外某些地下水电站用现有的程序进行有限元法计算结果与实测资料的比较表明〔6〕：其曲线的趋势和位移的数值都不一致。这个事实再一次启示我们，在现阶段恐怕主要还是依靠岩石力学量测结果，来发展地下工程的设计和施工技术。

五、地下工程的岩石力学模型试验

岩石力学模型试验是地下工程的一种物理模拟，与电算技术（有限元法、边界元法等）的数学模拟同是解决地下围岩整体性状的重要技术途径。但是二十余年来，前者的发展比后者缓慢得多。这可能是由于模型试验有个重要弱点——周期长，而且在模型材料、试验技术等方面都有待改进的缘故。例如需要能模拟自重而又在其它性能上与所模拟岩石相似的材料必须满足岩体应力—应变关系的相似准则，且性能必须保持稳定，但很不容易获得；目前试验技术较多地是平面应力条件或平面应变条件下的，而三向模型试验技术研究得很少，等等。但是模型试验，能够得到一般有限元法得不到的情况，例如应力集中情况，而又能重现实际地下工程的观测结果，故仍是地下工程研究中的一个重要方法。

六、地下工程建设中的喷锚支护技术

长期以来，地下工程建设中的一个重要课题，是在保证它的围岩—支护系统的稳定性的同时拟进一步加快其建设速度。喷锚支护技术的发展，使这两者有可能同时得到满足。喷锚

支护技术与岩石力学现场测试技术的发展有极为密切的关系,是地下工程建设的一个重要进展,获得了广泛的应用。

但是,这一重要技术还大有发展余地。例如,二次支护时间的确定问题,新奥法的倡导者说⁽⁸⁾:应适时地进行,既不太早也不宜太晚。但究竟何时为好,并无具体原则可以遵循。封底的时间的确定也类此。正因为如此,国外许多地下工程在实施新奥法的过程中,常有这样或那样的事故发生,看来不是偶然的。

重要的是,尤其要结合我国地下工程的具体实践经验来实施和发展喷锚支护技术。譬如,过去我们在论述喷层性能时,常常以其具有柔性作为重要特性。其实,喷层材料并不是柔性的而是脆性的,表观上的柔性,除了在凝固期间由于“嫩”外,主要是因为喷层薄,和延期封底等因素造成的;而且,对于软弱围岩,其支护并不一定是越其柔性就越好。事实上,极为软弱的围岩,支护具有足够的刚性反而才是合适的。因此,对于传统的刚性支护(衬砌),采取完全否定的态度是不对的,只应否定其不合实际的部分,而吸取其合理的因素,与喷锚支护技术相结合才是正确的态度。

此外,喷锚支护的糙度如何适应水工压力隧洞的要求,也是一个重要课题,目前并没有很好解决。看来采用复合支护结构(与围岩接触的是喷锚支护,而过水洞内壁仍采用预制块组合衬砌)对于降低糙率也许是可行的;而且这种结构,可能还具有适应岩体中的高水平初始应力的能力⁽⁹⁾,这种高水平地应力的情况在国内水电建设和矿山建设中都迁到过,目前还没有很好的解决。

七、结 束 语

综上所述,我认为,开展施工前探洞(或导洞)和施工过程中围岩一支护系统的岩石力学测试工作,并与电算技术和模型试验结合起来,把其结果反馈到设计和施工中去。这样做,既能保证工程的安全可靠,而又较能符合围岩及支护的实际情况,看来是加速我国大型水工地下工程建设的一条比较有效的技术途径。

参 考 文 献

[1] D.C. (1979), The development of tunnelling and the use of underground space, Tunnels and Tunnelling, vol, 11, NO.7 81—85.

[2] D.C. willett (1979), The economic use of underground space, Tunnels, and Tunnelling, vol, 11 NO.8. 23—29.

[3] P.Londe (1977), Field measurements in tunnels Field Measurement in Rock Mechanics, Vol, I, 619—638

[4] 陶振宇, 贾愚如 (1982), 对鲁布革地下水电站岩体特性的初步考察报告, 《地下工程》, NO.1.1982.1—4.

[5] G. Gioda, A.Cividini (1981), Viscous behavior around an underground opening in a two-phase medium, Int. J. Rock Mech.Min.Sci. & Geom-

(下转第24页)

员都相当精干,国内外技术协作也很密切。

就我国具体情况而言,今后宜做好分工协作,在自力更生的基础上,充分发挥现有力量。目前,在人力物力方面,往往各单位独成体系,别的单位有新仪器设备,本单位也要有,耗费财力且利用效率不高。在岩石力学测试仪器研制方面,动辄几家分散进行同一项目(如岩石多点位移计等)。因此,对于某些关键性的设备可以共有,不一定万事不求人。加强组织协调,关键是有一个科学管理方法。

(四)我国在岩石力学现场监控观测方面,尤其是地下工程,边坡工程观测仪器方面,与奥地利及西欧各国差距甚大,建议国家组织力量,重点进行突破。

(五)若今后组织力量对奥地利进行考察,似不宜局限于奥地利一个国家。因奥地利一些工程顾问公司,虽然在国际上名声很大,并无具体部门直接从事科学研究。可以考虑对附近的国家,如西德、瑞士等国的科研单位同时进行考察(西德的卡尔斯鲁大学、阿亨大学,瑞士的苏黎世工业大学等都是很有名的)。或利用开会期间进行参观访问,如能重点考察,收效可能更大。

《四川水利》征订启事

《四川水利》是四川省水利学会和四川省水利电力厅科技情报中心站合办的水利科技综合性期刊,由该情报中心站内部发行。

本刊主要刊载水利水电规划、勘测设计、施工和管理的实践经验。问题探索和科研成果。内容包括各有关学科,如水工、水文、机电、材料试验、灌溉技术、水文工程地质、水利经济、水利史志等,每期除刊载短小论文十余篇外,还辟有文摘专栏、新技术介绍和资料专栏。内容力求实用,面向基层,作到图文并茂,雅俗共赏。

本刊每季度出版一期,每期80页,收费0.30元,欢迎省内外单位和个人订阅。办法是:通过信件与四川省成都市实业街省水科所内科技情报中心站联系,即函寄订阅单,填单收订。

(上接第10页)

ech. Abstr, Vol.18, NO.5. 437—443.

[6] S. Martinetti (1977), Experience in field measurements for underground power stations in Italy. Field Measurements in Rock Mechanics, Vol I. 509—534

[7] 陶振宇 (1980), 岩石力学基本知识 (四), 《水力发电》, NO.10. 54~59.

[8] L. Müller; F. Fecher (1980), 新奥法的基本思想和主要原则, 《地下工程》, NO.6.

[9] 陶振宇 (1982), 我国隧洞建筑法刍议, 武汉水利电力学院。

本文承李东一同志协助描图, 笔者深表感谢。