

岩体力学参数变异性及取值方法

刘 高^{1,2}, 李新召¹, 邓建丽¹, 付清胜¹

(1. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000;

2. 兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要:受结构和赋存环境的制约,岩体力学性质及其力学参数具有显著的时间和空间变异性。岩体力学参数和岩体质量从不同的侧面反映了岩体力学性质,两者具有必然的关联性,故可用相对简单的岩体质量评价来选取岩体力学参数;按地质条件将岩体空间离散为若干连续微元体单元;采用Q、RMR和BQ等方法逐一对各单元开展岩体质量评价,并利用岩体质量与岩体力学参数间的关系(如Hoek—Brown经验准则)计算其力学参数;综合各单元的计算结果确定反映连续岩体空间内空间变异特征的力学参数。以某水电站地下洞室群为例,实现了工程区围岩力学参数的不连续取值。

关键词:岩体;力学参数;岩体质量;Hoek—Brown准则;时空变异性

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000—0844(2008)01—0001—05

Variability of Mechanical Parameters of Rock Mass and Its Selection Method

LIU Gao^{1,2}, LI Xin-zhao¹, DENG Jian-li¹, FU Qing-sheng¹

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Key Laboratory of Mechanics on Western Hazard and Environment, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: A reasonable selection of mechanical parameters of rock mass for a project is very hard, because the mechanical properties and the parameters have the remarkable characteristics of spatial and temporal variability due to rock mass structure and existing environments. Both the mechanical parameters and the rock mass quality reflect the mechanical properties from different aspects and are interrelated each other, but the latter can be determined more easily than the former, so it is feasible to select the mechanical parameters of rock masses through the estimated results of rock mass quality. Based on analysis of geological conditions of rock mass, rock masses space of a project can be divided into lots of continuous cells, whose rock mass quality can be easily given by such system as Q, RMR and BQ. The mechanical parameters of each cell can be calculated through the relationship between rock mass quality and mechanical parameters, for example the Hoek—Brown criterion. All the mechanical parameters of whole rock masses in a project space which reflects the spatial variability can be gotten by integrating the results of all cells. Take the underground works of a hydropower station as example, the mechanical parameters of surrounding rocks are gained using the methods mentioned as above.

Key words: Rock mass; Mechanical parameters; Rock mass quality; Hoek—Brown criterion; Spatial and temporal variability

收稿日期: 2007-08-02

作者简介: 刘 高(1970—),男(汉族),重庆开县人,副教授。主要从事岩体力学、地下工程和地质灾害领域的教学和科研工作。

0 前言

正确选取岩体力学参数是岩石工程稳定性评价、工程结构设计和施工方案制订的关键^[1-4],无论是传统的荷载—结构设计,还是基于岩体与工程结构共同作用理念的岩体力学设计(多用数值计算方法),岩体力学参数越准确,岩石工程的设计和施工越合理且可靠。

以特定建造为基础且经历了多期次复杂构造作用和浅表生改造的岩体,其内发育了众多不同性质、规模和方向的结构面且赋存于复杂的地质环境(地应力场、渗流场和地热场等)中^[5],受岩性、岩体结构和赋存环境的综合影响,包括力学性质在内的岩体特征具有显著的空间变异性^[1,6-7],具体表现为不连续性、非均匀性、各向异性和有条件转化性。赋存环境和外界荷载条件(自然的和人为的)是活的和易变的,随时间而显著地变化。如伴随岩石工程施工,工程岩体便开始其复杂的时间相关性演化^[7-8],直接改变了赋存环境的同时,加载和(或)卸载使岩体发生变形并导致岩体结构的变化,进而引起受载条件自身的改变,如此周而复始地循环,岩体力学性质因此而具有显著的时间相关性^[7-9]。

总之,赋存环境和岩体结构特征决定了岩体力学性质和岩体力学参数在时间和空间上具有显著的变异性特征,这给岩体力学的理论研究(岩体力学性质研究、力学参数选取)和岩石工程实践(工程设计和施工)带来了极大的难度。正因为如此,工程实践中通常采用统一取值方法,即对整个工程区的岩体选用同一物理力学参数,或者将工程区分为若干等效连续区(如风化带分区),每个等效连续区取相同参数^[10-11]。这种不得已而为之的方法弱化了岩体力学性质的空间变异性,越来越不能满足工程需求^[2]。本文拟以某水电站地下工程为例,探讨能反映连续岩体空间内岩体力学性质空间变异性的力学参数不连续选取方法。

1 岩体力学参数与岩体质量

1.1 岩体力学参数与岩体力学性质

岩体力学性质通过一定的本构方程及相应的配套参数表征,其中岩体力学参数至关重要,它是岩体力学性质最直接的表征。

岩体力学参数取值常用方法有试验法、经验法、反算法以及近些年发展起来的新方法^[1-5]。原位试验能较好地反映岩体的自然特性,是岩体力学性质

和力学参数选取的基本方法。但该方法周期长、费用高,一般工程极少开展,即使大型工程也不可能大量测试,加之试验结果分散性大而且不同试验方法所得结果彼此偏差较大,故该方法不能很好地反映工程区岩体力学性质的空间变化规律。其它方法均以试验法为基础。

总之当前的岩体力学参数选取方法均未能较好地反映这种时空变异性,难以准确反映岩体力学性质和厘定岩体力学参数。

1.2 岩体质量与岩体力学性质

岩体质量是岩体的工程质量,它是在工程地质研究基础上,选取岩体的若干特征指标以定性或定量的方式进行岩体质量级别划分。目前岩体质量分级(有时亦称岩体分类)方案很多,如地质力学系统(RMR)、地下工程掘进系统(Q)和《工程岩体质量分级标准(GB50218—94)》(BQ)等,其中前两者为国际通用标准,后者是我国的强制性国家标准。

岩体质量分级是根据工程需要,选取若干能反映岩体基本特征的指标而进行的质量分级,如岩石强度、RQD、结构面间距、 K_v 、 J_v 、结构面壁特征和地下水、地应力以及主要结构面与工程轴线方位的关系等。这些指标均是最基本的岩体特征因素,故岩体质量分级从一个侧面反映岩体的基本特征和力学性质。

1.3 岩体力学参数与岩体质量

既然岩体质量与岩体力学参数均是岩体性质的综合反映,从不同侧面表征了岩体力学性质,两者之间必然存在相关性,故通过相对较为简单的岩体质量分级来确定岩体力学参数的方法是可行的^[1]。

一些岩体质量分级系统给出了相应的物理力学参数,但因多为范围值而不方便使用且主观性或经验性强。一些岩体力学和工程地质工作者致力于探讨二者之间单值对应关系^[1,3,12],其中尤以 Hoek—Brown 经验公式应用最为广泛。该经验公式在 1980 年首次提出后经过不断完善和修改,发展为基于岩体地质强度指标的 Hoek—Brown 经验公式(2002 版)^[12],即

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1)$$

式中, σ_1 为破坏时的最大主应力; σ_3 为最小主应力(围压); σ_{ci} 为完整岩石的单轴抗压强度,单位 MPa; a 、 m_b 和 s 是岩体特征常数,其中 $a = 0.5 + (e^{-GS/15} - e^{-20/3})/6$, $s = e^{(GS-100)/(9-3D)}$, $m_b = m_i e^{(GS-100)/(28-14D)}$; m_i 为完整岩石的常数; D 为开挖对岩体的扰动系

数, $D = 0 \sim 1$; GSI 为岩体地质强度指标(表 1), 其本质为岩体质量分级。

Hoek 等(2002)提出了基于其强度经验准则来计算岩体力学参数的方法^[12], 即

$$\begin{cases} \varphi_m = \arcsin \left[\frac{6am_b(s+B)^{a-1}}{2A+6am_b(s+B)^{a-1}} \right] \\ c_m = \frac{\sigma_c[(1+2a)s+(1-a)B](s+B)^{a-1}}{[A^2+6am_b(s+B)^{a-1}A]^{0.5}} \end{cases} \quad (2)$$

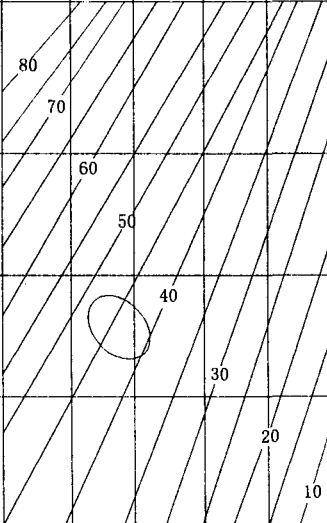
$$\begin{cases} \sigma_{cm} = \sigma_{ci}s^a \\ \sigma_{lm} = \sigma_{ci}/m_b \end{cases} \quad (3)$$

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \left(\frac{\sigma_{ci}}{100}\right)^{0.5} \times 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} \quad (4)$$

式中, c_m 为岩体的粘聚力, MPa; φ_m 为岩体的内摩擦角, ($^\circ$); σ_{cm} 、 σ_{lm} 为岩体的抗压强度和抗拉强度, MPa; E_m 为岩体的弹性模量, GPa; $A = (1+a)(2+a)$; $B = m_b\sigma_{3n}$; $\sigma_{3n} = \sigma_{3max}/\sigma_{ci}$, σ_{3max} 为上限围压, MPa; 其它符号意义同上。

在计算 E_m 时, 若 $\sigma_{ci} > 100$ MPa, 则 $\sigma_{ci} = 100$ MPa。

表 1 岩体地质强度指标(GSI)与地质条件

地质强度指标		表面状态			
		表面质量递减→			
根据岩体结构和表面特征, 并根据等值线图判断岩体的平均GSI值。 不要试图太精确, 使用范围值, 如GSI=36~42, 比具体说GSI=38更符合实际		很好(VG) 表面非常粗糙, 新鲜, 未风化	好(G) 粗糙, 微风化, 表面有铁锈	一般(F) 光滑, 弱风化或蚀变	差(P) 镜面擦痕, 强风化, 有膜覆盖或有枝角状碎屑充填
结构条件 岩块间镶嵌程度降低↓		块体(B) 很好的镶嵌状未扰动岩体, 由三组相互正交的不连续面切割, 岩体呈立方体状	80 70 60 50 40 30 20 10		
		碎块状(VB) 镶嵌状部分扰动岩体, 由四组或更多组不连续面切割, 形成多面棱角状岩块			
		块状/扰动(BD) 由多组不连续面相互切割, 形成棱角状岩块, 且经历了褶曲和(或)断层活动			
		离散(D) 岩块间相互镶嵌作用很差, 岩体极度破碎, 呈混合状, 或由棱角状的浑圆状岩块组成			

Hoek—Brown 经验公式能为岩石工程分析计算提供可靠的参数, 已成为确定节理化岩体力学参数的一个通用方法, 应用于世界各国的一系列重大工程实践中^[12]。

2 力学参数的空间变异性

为获得能够反映岩体力学性质空间变异性特征的岩体质量和岩体力学参数, 将工程区岩体空间离散为一系列微元体, 逐一评价每个单元的岩体质量, 并根据岩体质量与岩体力学参数之间的关系计算相应的力学参数; 综合所有单元的计算结果, 即可得到整个工程区岩体空间的岩体质量和力学参数。

2.1 岩体空间的离散

单元体的尺寸应根据工程区岩体的地质条件以及精度要求等因素综合选取。地质条件复杂多变的地段(如断层破碎带等)以及工程关心的部位和距工程结构较近区域的单元体宜精细, 而地质条件简单和远场部位可适当粗些。

为保证微小单元体能连续且不重复地覆盖整个岩体空间, 尤其是那些工程上非常关心但规模较小且形状不规则的岩体, 要求单元并非总是立方柱体且大小不一, 为此采用单元角点的空间坐标(x, y, z)而不是行列层坐标(i, j, k)来控制单元的形状。

2.2 空间数据库

由于离散出的微元体往往数量庞大, 因此在对岩体空间离散的基础上以微元体为单位建立岩体空间的数据库。由于该数据库是为评价岩体质量和计算岩体力学参数, 故基本数据的项目应至少包括岩体质量评价和参数取值所需的所有数据, 如单元体编号、几何属性(单元角点坐标)、物性指标(岩石类型及物理力学性质)、应力场状态、地下水状态、结构面特征属性(条数、组数、长度、间距等)以及其它测试数据(如波速、围岩位移等)。

2.3 空间岩体质量及岩体力学参数

根据某种岩体质量分级方案, 从数据库中选择相应的指标, 逐一对各单元体进行岩体质量分级的相关计算, 确定该单元的岩体质量的具体数值。可选用多种分级方法, 分别计算出该单元不同体系的岩体质量, 如 RMR 、 Q 、 BQ 和 GSI 等。

利用岩体力学参数与岩体质量之间的关系, 如式(2)~(4), 计算相应单元的力学参数。

集成所有单元的计算结果, 即可得到整个工程区岩体空间的岩体质量(多种分级标准)及相应的岩体力学参数, 据此反映岩体力学性质的空间变异性。

3 工程应用

3.1 工程概况

黄河上游某水电站处于一个中等偏高的地应力场环境中。坝址处为印支期花岗闪长岩(γ_5^2), 两岸谷坡陡峻, 谷深近 1 000 m。

该电站地下厂房系统主体布置在右岸距岸边 150 ~ 466 m, 上覆岩体厚度 230 ~ 426 m 的花岗岩之内, 由多个规模庞大、结构复杂、纵横交错的洞室群组成(图 1)。主厂房长 316.75 m、宽 29 m、高 74.9 m, 主变室长 235 m、宽 27.5 m、高 42.88 m, 两洞室平行布置(纵轴方向 NE25°), 间距为 50 m, 通过母线洞联系。尾水闸平行布置于主变室之后 25 m, 其尺寸为 188.5 m × 8 m × 76.04 m; 两个尾水调压井位于尾水闸门操作室后, 独立成井, 两井中心轴线与厂房和主变轴线平行; 闸门操作室与尾调井之间距离为 35.5 m。

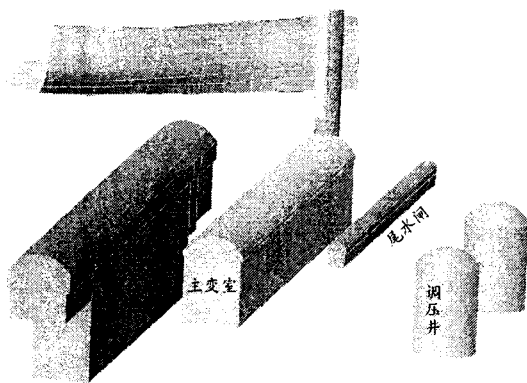


图 1 某水电工程地下洞室群模型图

Fig. 1 Model of underground works of a hydropower station.

该地下厂房系统具有深埋性、洞群式、大跨度、高边墙、延伸长等特点。

3.2 岩体特征参数及其确定

为了能较准确掌握该地下洞室群空间内围岩(包括滑洞壁围岩)的岩体力学性质, 为洞室群稳定性计算以及洞室工作状态的评价和各种监测资料的合理解释提供可靠力学参数, 采用上述思想和方法对该洞室群围岩的力学参数开展取值研究。

(1) 围岩空间的离散及空间数据库

根据围岩的地质特征, 以满足各种计算分析所需的边界条件为研究范围, 以 5 m 间距为基本单元体对研究范围进行离散。对于洞壁附近和断层及其破碎带等工程所关心的重点部位适当加密网格至 1 m 间距。以 8 个顶点的空间坐标和 ID 号来标识每一单元格。根据离散结果建立岩体空间数据库。

(2) 岩体特征参数的提取

对于每一单元格所需基本参数包括岩石强度、岩体结构定量指标、地应力状态、地下水状态等。

该地下洞室区的岩石强度、地应力场状态和地下水状况均较易确定。围岩的岩石类型较单一, 主

体为花岗岩, 局部发育断层及其破碎带, 其物理力学性质由室内试验确定。地应力状态由地应力实测值及单元体所在位置综合确定。洞室区地下水不丰富, 根据勘测资料和开挖后的状况确定。

岩体结构的定量指标则相对较难确定且信息量庞大, 为此专门编写了相应的计算机程序, 利用各种平切图和剖面图, 自动完成结构面的间距、条数、 RQD 、 J_c 、 K_c 和裂隙率等庞大而繁琐的计算。

此外, 能表征围岩深部特征的各种信息(如弹性波速度、围岩位移和围岩应力等)以及其它相关信息, 均存入相应单元体的数据库中备用。

3.3 围岩的力学参数

(1) 岩体质量

在获得基本数据的基础上, 同时采用 RMR 、 Q 和 BQ , 逐一评价所有单元的岩体质量。该工作由编写的专门相应程序自动完成, 该程序严格遵照各评价系统的指标取值方法和计算方法, 从围岩空间数据库中读入相关信息, 经分析判断并计算各单元的岩体质量, 包括 RMR 、 Q 和 BQ 以及 GSI 。

根据对洞壁围岩岩体质量的分析, 计算结果与现场评价结果十分吻合, 表明该方法可行。

(2) 力学参数

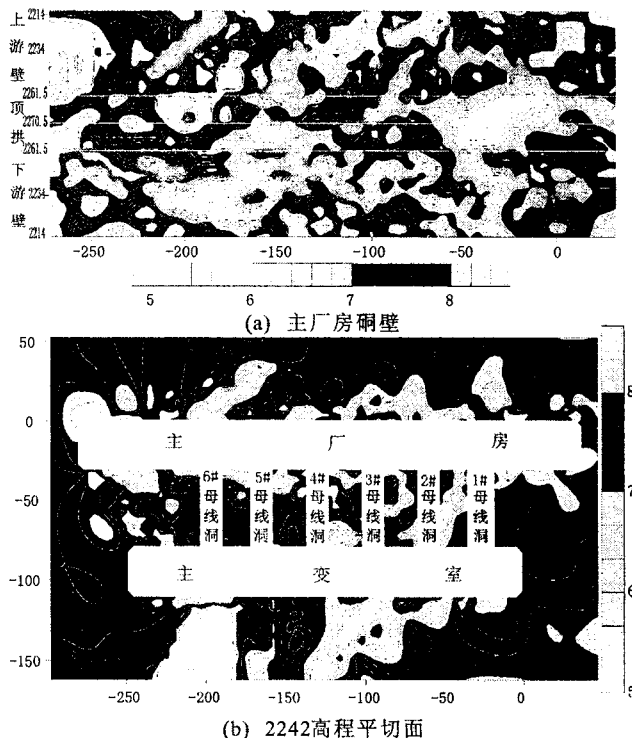


图 2 洞室群围岩内聚力 c (MPa)

Fig. 2 The calculated cohesion of surrounding rocks near the underground works.

利用各单元体的岩体质量评价结果,利用式(2)~(4)即可计算各单元体的力学参数。由于计算工作量繁重,本文采用 Hoek 经验公式(2)~(4),编制专门程序并与质量评价程序集成。根据岩体质量评价结果,利用 GSI 、 a 、 s 、 m_i 、 D 、地应力值等参数,计算得到各单元岩体力学参数(如 E_m 、 σ_{cm} 、 σ_{tm} 、 c_m 和 φ_m),获得整个工程区的岩体力学参数。计算结果与现场试验参数(E_m 、 c_m 和 φ_m)较为接近且更精细。

如此可方便获得任意所需位置的力学参数(图2),供各种计算分析选用,也可据此研究围岩力学性质和力学参数空间变异特征。

4 结语

(1) 受岩体结构、赋存环境以及荷载条件等综合影响,岩体力学性质及其力学参数具有显著的时间和空间变异性。

(2) 岩体质量和岩体力学参数均是岩体力学性质的客观反映,两者之间存在必然的内在联系。对于难以确定的岩体的力学参数,利用二者之间的相关关系,通过岩体质量评价结果来确定岩体力学参数是可行的和可信的。

(3) 根据岩体的地质条件和工程特点,将工程区岩体按一定空间关系离散为一系列不重复的微小单元体,逐一评价岩体质量并利用岩体质量与力学参数之间相关性计算力学参数,综合所有计算结果,即可得到反映岩体力学性质空间变异性的岩体质量及相应的力学参数。

(4) 为完成上述工作而编制的专用系列程序,实现了计算分析的自动化,减轻了工作强度、减少出错机率并提高了计算精度。

(5) 对开挖前以及开挖后不同阶段进行上述同样的工作,可得到工程岩体力学性质及其岩体质量和力学参数随时间的变化特征,进而反映岩体力学

性质的时间和空间变异性。

(6) 该方法能同时得到多种岩体质量评价系统的结果以及工程区各位置处的岩体力学参数,供洞室群稳定性计算、洞室工作状态评价以及各种监测资料的合理解释之用。若将该方法与数值计算结合起来,二者采用相同的离散单元,数值计算中各单元所需岩体力学参数的可直接调用,获得更符合实际的数值计算结果。

〔参考文献〕

- [1] 伍佑伦,许梦国.根据工程岩体分级选择岩体力学参数的探讨[J].武汉科技大学学报(自然科学版),2002,25(1):22-24.
- [2] 何满潮,薛延河,彭延飞.工程岩体力学参数确定方法的研究[J].岩石力学与工程学报,2001,20(3):225-229.
- [3] 哈秋龄,李建林.长江三峡工程岩石边坡卸荷岩体宏观力学参数研究[M].北京:中国建筑工业出版社,1996.
- [4] 孙广忠.岩体结构力学[M].北京:科学出版社,1988.
- [5] 胡小荣,唐春安.岩土力学参数随机场的空间变异性分析及单元体力学参数赋值研究[J].岩石力学与工程学报,2000,19(1):59-63.
- [6] 谭文辉,王家臣,周汝弟.岩体强度参数空间变异性分析[J].岩石力学与工程学报,1999,18(5):497-502.
- [7] 刘高,韩文峰,李雪峰.金川矿山围岩动态演化及其力学参数研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(supp.2):2588-2594.
- [8] 刘高.高地应力区结构性流变围岩稳定性研究[D].成都:成都理工大学,2001.
- [9] Kalamaras G S, Bieniawski Z T. A rock mass strength concept for coal seams incorporating the effect of time[A]//Proc. 8th ISRM Congress[C]. Tokyo,1995:295-302.
- [10] 符文熹,尚岳全,孙红月,等.岩体变形参数渐变取值模型及工程应用[J].工程地质学报,2002,10(2):198-203.
- [11] 聂德新,韩爱果,巨广宏.岩体风化的综合分带研究[J].工程地质学报,2002,10(1):20-25.
- [12] Hoek E. Practical Rock Engineering[EB/OL]. <http://www.rocksience.com/hoek/PracticalRockEngineering.asp>.