

卸荷工程岩体非线性模型的研究探讨

孙英学¹, 姜建军²

(1. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 浙江建筑工业学校, 浙江 杭州 310012)

摘要:从卸荷岩体的工程地质特征、力学参数的确定、本构关系及卸荷岩体释放荷载的计算方面对卸荷工程岩体进行初步探讨。研究结果表明, 卸荷工程岩体与传统的加载岩体的力学条件有本质的区别, 其非线性特征更为明显。在岩体力学分析研究中, 首先应划分加载区域和卸载区域、加载方向和卸载方向, 加载和卸载的力学状态, 然后在研究卸荷岩体工程地质特征的基础上, 建立不同的物理力学模型, 采用不同的物理力学参数, 才能合理地分析卸荷工程岩体的强度与变形特征。

关键词:卸荷工程岩体; 工程地质特征; 非线性模型; 释放荷载

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2001)07-0038-02

工程岩体在加载与卸载的不同力学动态条件下, 岩体力学条件有本质的区别。目前岩石地基基础工程岩体一般符合加载岩体力学条件, 而在岩质边坡开挖工程及地下工程开挖面径向则表现为卸荷条件。当前边坡工程岩体的力学分析与计算中, 采用常规加载试验参数和常规的本构模型与方法, 与实际物理模型很不吻合, 导致研究成果与实际监测资料不符, 甚至出现数量级的差别。另一方面, 卸荷岩体对于岩体的各向异性特征和抗拉强度较加载岩体更为敏感, 在卸荷条件下, 特别是出现拉应力后, 结构面的力学条件将发生本质的变化, 导致岩体力学参数急剧下降, 卸荷变形剧增。因此对于卸荷工程岩体, 正确地评价其力学状态, 建立合理的非线性模型是分析评价其安全稳定性的关键。

1 卸荷岩体的工程地质特征

卸荷工程岩体离不开具体的地质环境, 岩体的建造与改造都是地质作用的结果; 卸荷岩体具有多介质性、不均一性、非线性、非连续性的特征; 在卸荷回弹条件下使岩体具有低抗拉强度特征的结构面为最不利结构面, 该类结构面通常与第一主压应力方向夹角小于结构面内摩擦角, 控制卸荷岩体的稳定与变形; 卸荷岩体中的地应力主要考虑自重应力和构造应力两个因子, 通过研究卸荷岩体的地质环境背景、褶皱与断裂构造的展布规律、地形切割情况、二次应力展布规律可明确卸荷岩体中的地应力特征; 地下水的存在将改变结构面的变形和强度特征,

是卸荷岩体非线性模型研究中不可忽略的因素。

2 卸荷岩体力学参数的确定

传统岩体力学参数的确定基于岩石试验规程进行加载试验, 未涉及岩体卸荷这一基本特性, 因此具有很大的局限性。卸荷岩体的变形参数和强度参数的确定应充分考虑岩体的卸荷状态及最不利结构面的影响, 即考虑卸荷裂隙岩体力学参数的弱化问题。目前裂隙岩体力学参数的弱化处理方法有 BQ 法、费辛格法、Georgi 法、经验折减法、RMR 分类法、Hoek-Brown 法等, 但都未准确考虑岩体卸荷的影响。实践证明, 岩体卸荷前后其力学参数变化很大, 如三峡船闸岩体卸荷前后水平方向变形模量 E_t 的变化 (见表 1)。

表 1 不同风化岩体卸荷前后 E_t 的变化

岩 体	变形模量/GPa					
	全风化	强风化	弱上	弱下	微风化	新鲜
卸荷岩体	0.1	0.6	3.3	8.8	16.8	26.6
原 岩	0.4	1.6	5.3	13.0	26.6	42.2

表 1 中 E_t 是根据 Hoek-Brown 法分别确定的。可以看出, 目前工程界普遍采用的弱化处理方法对于岩体卸荷力学参数的确定是不适用的, 亟待修正。

确定卸荷岩体力学参数的有效方法是模拟试验法。卸荷岩体所涉及的结构面一般为 II ~ V 级, 其中对于 II、III 级结构面可专门考虑, IV、V 级结构面在岩体模型试验中则难以具体模拟, 因此在试验中应针对岩体结构特征采用局部模拟技术, 即主要考虑

作者简介: 孙英学 (1973—), 男, 助教, 山东烟台人, 主要从事岩体力学研究。

对岩体各向异性及卸荷特性影响最大的最不利结构面,并同时研究其尺寸效应。试件加载路径应根据岩体在地质历史上地质构造运动的原则条件进行,并应考虑岩体天然地应力特征,并保持约 30~60 min 的持荷时间,最终以尺寸效应最不明显的试件试验结果为条件确定在不同卸荷阶段岩体各向异性的力学参数。

3 卸荷岩体的本构关系

描述岩体的非线性本构关系的模型通常有非线性弹性模型、弹塑性模型两种。图 1 为一般岩体在普通室温和大气压条件下进行压缩试验得到的典型 $\sigma \sim \epsilon$ 关系曲线。OA 段为结构面压密闭合阶段;AB 段为弹性变形阶段;BC 段为塑性变形阶段;CD 段为破坏阶段或非稳定阶段。B 点以后阶段出现塑性变形,卸载曲线的斜率有所降低,即为弹塑性耦合现象。

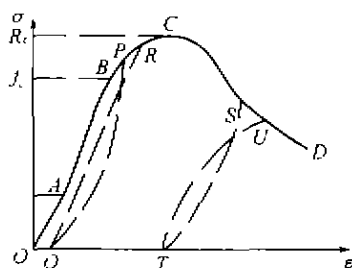


图 1 岩体全应力-应变曲线

3.1 弹性状态下的本构关系

在弹性状态下描述卸载岩体的本构关系即广义虎克定律,增量形式表示为

$$d\sigma_m = 3Kd\epsilon_m \quad (1)$$

$$ds_{ij} = 2Gde_{ij} \quad (2)$$

矩阵形式表示为

$$\{\sigma\} = [D_e]\{\epsilon\} \quad (3)$$

3.2 弹塑性本构关系

考虑流动法则,应变空间描述的岩体弹塑性本构关系为

$$\{d\sigma\} = [D_{ep}]\{d\epsilon\} - d\lambda \left\{ \frac{\partial F}{\partial \epsilon} \right\} \quad (4)$$

对于中性变载和卸载, $d\lambda = 0$, 式(4)退化为虎克定律。

弹塑性矩阵 $[D_{ep}]$ 的表达式为

$$D_{ep} = D_e - \frac{D_e \left(\frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right) \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma} \right)^T D_e}{\left(\frac{\partial F}{\partial \sigma} \right)^T D_e \left(\frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right) - \left(\frac{\partial F}{\partial \epsilon_p} \right)^T \left(\frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right)} \quad (5)$$

式中: Q 为岩体的塑性势函数; F 为岩体的屈服函数。

3.3 弹塑性岩体的加卸载准则

在应变空间中, $d\epsilon > 0$ 表示加载, $d\epsilon < 0$ 表示卸载。对于理想塑性岩体其加卸载准则为: $F = 0$, 且 $l = \frac{\partial F}{\partial \epsilon_{ij}} d\epsilon_{ij} < 0$ 为卸载;若 $l = 0$ 为加载。

对于强化材料和软化材料其加卸载准则为: $F = 0$, 且 $l = \frac{\partial F}{\partial \epsilon_{ij}} d\epsilon_{ij} < 0$ 为卸载; $l = 0$ 中变加载;若 $l > 0$ 为加载。

4 卸荷岩体释放荷载的计算

岩体开挖释放荷载的计算是卸荷岩体仿真分析的重要内容之一。最早开挖模拟的思想是将每一步开挖前与开挖后进行对比,使得所暴露出来的表面为自由面,认为自由面为无法向应力状态,即需要对无应力表面施加修正荷载。如有限元分析中开挖荷载产生开挖面上的应力分量为

$$\{F\} = \int_s \{B\}^T \{\sigma\} ds \quad (6)$$

该方法的缺点是计算的开挖释放荷载存在误差,开挖面不能完全成为自由面。现在介绍一种新的卸荷岩体释放荷载的计算方法。首先将开挖域与未开挖域分开(图 2),则描述结点平衡和整体平衡的方程为

$$\begin{aligned} & -[\bar{F}_\sigma^R - (\bar{R}_\Omega^R + \bar{R}_S^R + \bar{R}_P^R)] \\ & = \bar{F}_\sigma^E - (\bar{R}_\Omega^E + \bar{R}_S^E + \bar{R}_P^E) \end{aligned} \quad (7)$$

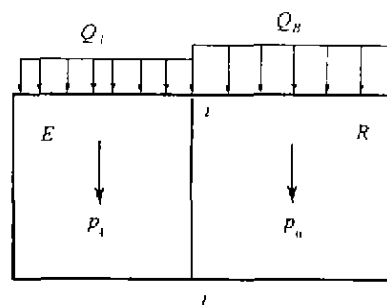


图 2 开挖面 ij 示意图

方程的左端和右端分别为未开挖域和开挖域的等效结点力、体力、面力和集中力,只有在开挖面 ij 上,左端等于右端,且不为 0,两端所求的都是开挖释放荷载。利用该方法求释放荷载有以下几种算法:①利用未开挖域计算,对开挖域计算的荷载向量在结点充 0;②利用开挖域计算,对于未开挖域计算的荷载向量在结点充 0;③与开挖面相关的开挖域单元计算,对于非开挖面的开挖荷载在结点充 0。该方法的优点是考虑了体力等外荷载产生的等效荷载,直接利用高斯点应力求开挖面结点应力,没有由于应力插值产生的误差。

(下转第 52 页)

由 f_3 与 NNE 向陡倾角 IV 级结构面或一组卸荷裂隙组合成的楔形体滑动。

b. CSMR 边坡岩体分类方法结果表明:强风化或强卸荷岩体分布地段边坡稳定条件差,弱风化卸荷岩体分布地段边坡稳定条件一般,微风化-新鲜岩体分布地段边坡稳定条件好。

c. 定位楔形体稳定分析结果表明:由 f_3 与一组卸荷裂隙构成的楔形体安全系数较低,其稳定性对

卸荷裂隙的 c 值较敏感。

d. 随机楔形体稳定分析结果表明:进水口边坡开挖后,不稳定随机楔形体多出现在深度 15 m 以内,一般不超过 20 m。

e. 在水库蓄水后,结构面的强度将会降低,水位骤降也会影响边坡的稳定,因此,必须考虑适当的处理措施,增加进水口边坡的稳定性。

(收稿日期:2001-07-01 编辑:张志琴)

(上接第 37 页)

仙人洞总长 900 余 m,计划开发利用的约有 240 m,面积达 250 m²。仙人洞由上、中、下三层洞穴组成,上洞长 30 m,面积 26 m²,顶部悬挂有“骆驼”、“佛像”等各种造型的钟乳石;中洞总长 55 m,面积 65 m²,发育有 4 个厅,厅内石笋、石钟乳发育,壁上布满“石葡萄”,洞底钙华铺地;下洞总长 130 余 m,面积 156 m²,除了可见“石帘”、石钟乳及各种造型的滴水外,最具特色的是有多处响水坝。在离下洞出口约 40 m 处的一响水坝为洞内最低点,洞内水流由此进入暗河,形成潺潺流水响声,令人心旷神怡,洞底流水深约 30 cm,终年不断。洞内发现有隋、唐、五代、宋、元、明瓷器片及明代釉陶壶。

青龙洞洞长 150 余 m,由上下两层洞穴组成,其洞径较大,均在 4 m 以上,最大可达 13.5 m,高在 10 m 以上。洞内曲境幽静,“山、石、廊、庙”琳琅满目,一应俱全,颇具苏州园林色彩。又如玉柱洞,洞长 30 m,洞高约 2 m,洞顶小钟乳石遍布,常年滴水,且随降水量的多少而变化。

此外,茅山地区溶洞人类利用的历史悠久,化石丰富。在洞内采集了大量的古脊椎动物化石,时代均为中更新世至晚更新世之间。洞内还发掘了许多有价值的考古文物。值得一提的是华阳洞,据记载曾是三茅祖师修炼得道的圣地,具天下“第一福地第八洞天”之称,华阳洞洞名石刻便是北宋政治家、文学家、书法家苏东坡的真迹。在华阳洞内发现了鹿、斑鬣狗、棕熊、水牛、小动物牙齿等化石以及唐朝至明朝时期的筒瓦、铁鎏金龙片、金圈、瓷器盖等文物。

4 结 语

茅山地区的岩溶洞穴是该地区岩石、构造(特别是新构造)、气候、水文等因素的综合作用的结果,具有介于南方湿润气候型和北方亚湿润气候型岩溶地区之间的苏南地区岩溶区的发育特征:①岩溶发育主要受构造影响,结构简单,具成层性,且具有一定

的方向性;②岩溶发育受地貌影响,溶洞发育高度普遍大于宽度;③溶洞在不同的灰岩段内发育程度存在差异。同时茅山地区岩溶洞穴如仙人洞、华阳洞等具有一定的规模,洞内发育各种造型的钟乳石,景色优美,且依山傍水,距南京、镇江、常州均为 60 ~ 70 km,水陆交通便利,具有良好的旅游开发价值。

(收稿日期:2001-09-19 编辑:熊水斌)

(上接第 39 页)

5 结 语

现行岩石(体)力学严格来讲应属于加载岩石(体)力学范畴,而岩体工程开挖形成的二次应力场中,切向应力表现为加载,径向应力表现为卸载。从力学本质上来分析主要是卸载。岩体工程在加载与卸载条件下,其力学特性有本质区别。因此在岩石(体)力学分析研究中首先应划分加载区域和卸载区域,加载方向与卸载方向,加载与卸载的力学状态,然后在研究卸荷岩体工程地质特征的基础上,建立不同的物理力学模型,采用不同的物理力学参数,才能合理地分析卸荷工程岩体的强度与变形特征。卸荷岩体非线性模型的应用过程中关于开挖释放荷载的计算一直存在算法上的争议,本文从新的角度计算开挖面上的应力,精度较高。

卸荷工程岩体的研究是岩体力学研究的新领域,其地质特征、力学参数、本构模型与计算方法的研究亟待进一步加深与完善,卸荷岩体的动力特性、渗流场与应力场的耦合等问题有待进一步补充。

参考文献:

- [1] 郑颖人. 岩土塑性力学基础[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1989.
- [2] 哈秋龄. 节理岩体卸荷非线性岩体力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1998.

(收稿日期:2001-07-08 编辑:马敬峰)