

膨胀岩的判别与分类方法探讨

何 山,朱珍德,王思敬

(河海大学岩土工程研究所,江苏 南京 210098)

摘要:介绍膨胀岩的判别方法,以与工程设计有关的膨胀岩的主要膨胀特性指标:自由膨胀率、干燥饱和吸水率、浸水崩解度、极限膨胀量、极限膨胀力、比表面积、交换容量、围岩强度等为分类因素,首次引进模糊综合评判的概念建立膨胀岩分类专家数据系统,采用多因素、综合评判的方法对膨胀岩进行分类,并以工程实例进行验证,说明本文方法简单、可靠、实用,避免了单因素分类法对膨胀岩进行分类的不确定性。

关键词:膨胀岩判别;膨胀岩分类;专家数据系统;综合评判法

中图分类号:TU45 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7647(2006)04-0062-03

Measures for discrimination and classification of swelling rocks//HE Shan, ZHU Zhen-de, WANG Si-jing(*Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: With some main swelling characteristic indexes related to engineering design taken as classification factors, including free expansion rate, arid saturated absorption rate, collapse degree in water, maximal value of expansion, critical expansion force, specific surface area, exchange capability, and surrounding rock strength, an expert data system for swelling rock classification was developed based on the concept of fuzzy comprehensive evaluation, and the swelling rocks were classified by a comprehensive multi-factor method. Case study on some practical projects shows that the method is simple, reliable, and effective, and it also overcomes the uncertainty resulted from single factor-based classification of swelling rocks.

Key words: discrimination of swelling rock; classification of swelling rock; expert data system; comprehensive evaluation method

膨胀岩问题是当今工程地质学和岩石力学领域中最复杂的研究课题之一^[1],人们对膨胀岩的研究目前尚处于起步阶段,还没有统一的定量判别与分级标准,对膨胀力学机制的认识才刚刚起步,膨胀软化的本构关系还需深入研究。因此,研究不同地区不同类型膨胀岩的判别与分级标准及其膨胀特性和相应的本构关系模型^[2-6]不仅具有重大的理论意义,而且对膨胀岩地区工程的勘探、设计和施工具有重要的现实指导意义。

1 膨胀岩的判别方法

1.1 判别原理

膨胀岩胀缩特性的实质是岩石由于吸水和脱水作用而发生的体积变化。膨胀岩的胀缩与其所处环境的物理条件变化(主要是湿度变化)直接相关。另外,不同原因形成的膨胀岩,由于黏土矿物成分与数量不同,对水的敏感程度不一样,在水中的破坏形式也不同。对这些特点的认识会对人们区分膨胀岩与非膨胀岩有所帮助。膨胀岩的判别主要应从两方面入

手:一是黏土矿物成分的鉴定,二是亲水程度的确定。

1.2 判别方法

1.2.1 根据野外特征判别

a. 地貌特征:一般为波状起伏的低缓丘陵,相对高度 20~30 m,丘顶浑圆,坡面圆顺,无天然陡坡,坡度缓于 30°,岗丘之间以宽阔的 U 形阔地相间。

b. 岩性特征:为灰白色、灰绿色、灰黄色、紫红色和灰色泥岩、泥质粉砂、页岩、风化的泥灰岩、风化的基性岩浆岩、蒙脱石化的凝灰岩等。岩石遇水后手摸有油腻感。

c. 结构构造特征:岩层多为中厚层或薄层,裂隙发育,隙壁周围常有异种灰白、灰绿色物质充填或替代,岩体中的波状结构面光滑且有擦痕。

d. 野外风化特征:风化裂隙发育,岩体被切割成 10~20 cm 碎块。易风化剥落。干燥岩块泡水后崩解成碎块或碎片。天然含水岩块在曝晒下失水产生细微裂隙。

1.2.2 根据崩解特征判别

膨胀岩的崩解特征可以通过崩解试验进行观

作者简介:何山(1969—),男,江苏盐城人,博士研究生,从事岩土工程勘察和设计工作。E-mail:chnjsheshan@sina.com

察。崩解试验取 100 g 左右的原状不规则岩块在 105 ℃下烘干至恒重,在湿化仪上进行试验,观察崩解特征,判别膨胀性的大小。

不同岩石的崩解类型及特征见表 1。其中Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ类可初判为膨胀岩,Ⅳ类则为不亲水的非膨胀岩。

表 1 岩石崩解类型及其特征

崩解类别	崩解物形态	崩解特征
Ⅰ	泥 状	浸入水中即刻剧烈崩解,成土状撒落
Ⅱ	碎隙泥、碎块泥	浸入水中成絮状、粉末状崩落,崩解物为粒状、片状碎隙或碎块
Ⅲ	碎岩片、碎岩块	浸入水中成块状崩裂塌落或片状开裂,崩解物为碎岩片或碎岩块
Ⅳ	整体块状	浸入水中岩块坚硬、不崩解

1.2.3 根据自由膨胀率判别

自由膨胀率是用粉碎样测得的,它可反映出岩石的物质组成。根据现有研究成果,自由膨胀率大于 30%的岩石就具有很大的膨胀力。因此可把自由膨胀率小于 30%的岩石判断为非膨胀岩,大于或等于 30%的判断为膨胀岩。其中自由膨胀率 30%~50%的为微膨胀岩,50%~70%的为弱膨胀岩,大于 70%的为强膨胀岩。

1.2.4 根据岩块干燥饱和吸水率判别

把 100~200 g 不规则岩块在 105 ℃条件下烘至恒重后再浸泡 24 h,测得其含水量占岩块质量之比即为岩块干燥饱和吸水率。它反映了岩石矿物成分的亲水特征和结构连接特征。一般可将干燥饱和吸水率大于或等于 10%的岩石初判为膨胀岩。其中,岩块干燥饱和吸水率 10%~30%的为微膨胀岩,30%~50%的为弱膨胀岩,大于 50%的为强膨胀岩。

1.2.5 根据极限膨胀量判别

把原状岩样在 105 ℃条件下烘干至恒重,制成厚度 1 cm、直径 5.8 cm 的样品,在瓦氏膨胀仪上即可测出岩样的无荷极限膨胀量。极限膨胀量能充分反应原状结构下岩石的膨胀特性。从测得的指标看,极限膨胀量在 5%以下的岩石湿化后不崩解、不软化,保持原始形态不变,可判断为非膨胀岩,而极限膨胀量大于或等于 5%的则可判断为膨胀岩。其中,极限膨胀量 5%~10%的为微膨胀岩,10%~20%的为弱膨胀岩,大于 20%的为强膨胀岩。

表 2 现有的国内外膨胀岩主要分类标准

岩石类型	自由膨胀率/%	干燥饱和吸水率/%	浸水崩解度	极限膨胀量/%	极限膨胀力/kPa	比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	交换容量/(mL·g ⁻¹)	围岩强度/MPa
非膨胀岩	< 30	< 10	A	< 5	< 100	< 50	< 0.1	> 1
微膨胀岩	30~50	10~30	B、C	5~10	100~300	50~100	0.1~0.2	0.70~1
弱膨胀岩	50~70	30~50	C、D	10~20	300~500	100~300	0.2~0.5	0.40~0.70
强膨胀岩	> 70	> 50	D	> 20	> 500	> 300	> 0.5	< 0.40

注:浸水崩解度 A 表示几乎无变化,B 表示变化程度中等偏小,C 表示变化程度中等偏大,D 表示完全崩坏。

1.2.6 根据极限膨胀力判别

极限膨胀力是将原状样品烘干至恒重,用平衡法在固结仪上测得的。极限膨胀力是反映岩石膨胀性大小的最直观的指标,它不仅能反映出岩石的矿物成分,还能反映出岩石的结构和胶结程度。试验研究认为极限膨胀力小于 100 kPa 的为非膨胀岩,大于或等于 100 kPa 的为膨胀岩。其中极限膨胀力 100~300 kPa 的为微膨胀岩,300~500 kPa 的为弱膨胀岩,大于 500 kPa 的为强膨胀岩。

1.2.7 根据岩石的比表面积判别

由于不同的黏土矿物具有不同的结构形式,所以它们的比表面积是不一样的。主要的黏土矿物蒙脱石、伊利石、高岭石的比表面积都比较大,因此可以根据比表面积来判别岩石的膨胀性。由于黏质岩样几乎都不是单矿物成分的,常常是多种黏土矿物组成的混合物,测得的比表面积数值也就是多种黏土矿物的综合值。一般可将比表面积大于或等于 50 m²/g 的岩石初判为膨胀岩。其中比表面积 50~100 m²/g 的为微膨胀岩,100~300 m²/g 的为弱膨胀岩,大于 300 m²/g 的为强膨胀岩。

除上列特征及指标之外,还可根据交换容量、液限、耐久性指标、软化系数、围岩强度等指标来判别岩石是否为膨胀岩。这些指标内容偏多,有的不易测定或不易快速、经济地测定,本文不再赘述。

2 膨胀岩的分类方法探讨

关于膨胀岩的分类,目前还没有统一的国际和国内标准,各地区各部门的分类标准多种多样、各不相同。现将既有的国内外膨胀岩主要分类标准列于表 2。

表 2 所列判别标准的依据主要来源于大量的原始数据以及地质学者和工程师的经验,可称为专家数据系统^[7]。为使专家数据系统在实践中能得到更广泛的应用,本文将探讨如何利用专家数据系统来指导今后的工作,使膨胀岩的判别与分类工作更方便、快速、准确,从而为工程设计提供更合理的力学指标,达到优化工程设计的目的。

2.1 专家数据系统

膨胀岩的分类指标较多,若仅仅采用某单项因

素来进行分类就很难做到科学合理,甚至会导致不切实际的结果。下面探讨如何利用专家数据系统对膨胀岩进行分类。

采用现有的国内外膨胀岩主要分类指标,即自由膨胀率、干燥饱和吸水率、浸水崩解度、极限膨胀量、极限膨胀力、比表面积、交换容量及围岩强度等因素,构成因素集: $U = \{U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6, U_7, U_8\}$ 。根据既有的国内外膨胀岩主要分类标准确定膨胀岩分类的专家数据系统模式,其集合为: $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4\}$,其中 $V_1 \sim V_4$ 分别代表非膨胀岩、微膨胀岩、弱膨胀岩、强膨胀岩,且每一个 V 均有一组因素 U 与之对应。

2.2 数据标准化

对于确定的专家数据系统与待归类的样本,由于各因素单位不同,数据相差悬殊,若直接进行运算分析,那么数值越小则运算中的信息损失就越大^[8]。为避免信息损失,可先对原始数据作标准化处理,将各数据压缩在 $[0, 1]$ 闭区间内。

设待分类的样本共有 i 个($i = 1, 2, \dots, n$),记为 A_i ,其中某一因素可以取得 n 个原始数据,设 $U_{i1}, U_{i2}, \dots, U_{ij}(j = 1, 2, \dots, n)$ 为这一因素的各个元素。为把这些数据标准化,先求出它们的平均值和标准差。

平均值:

$$\bar{U}_{ij} = \frac{1}{n}(U_{i1} + U_{i2} + \dots + U_{ij}) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n U_{ij} \tag{1}$$

标准差:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (U_{ij} - \bar{U}_{ij})^2} \tag{2}$$

再根据式(3)求出各数据的标准化值 U'_{ij} :

$$U'_{ij} = \frac{U_{ij} - \bar{U}_{ij}}{S} \tag{3}$$

这样得到的标准化数据还不一定在 $[0, 1]$ 闭区间上,采用极值标准化公式:

$$U''_{ij} = \frac{U'_{ij} - U'_{\min}}{U'_{\max} - U'_{\min}} \tag{4}$$

式中: $U'_{\max}$ 和 $U'_{\min}$ 分别为 U'_{ij} 中的最大值和最小值。其他各因素计算方法相同。

2.3 分类方法

在确定的专家数据系统模式和待分类的样本之间建立一种距离关系,以此来标定样本与专家数据系统的接近度 $d(A_i, V)$ 。本文采用广义海明加权距离公式:

$$d(A_i, V) = \sum_{i,j=1}^n W_j (U_{A_i} - U_V) \tag{5}$$

计算中一般考虑将各分类因素等权重计算。当然也可根据各因素在工程设计中的重要性定出权重。

3 工程实例

红山窑水利枢纽工程由电力抽水站、节制闸和船闸组成,位于南京市六合区瓜埠镇以东约 4 km 的钟家洼,为滁河下游的挡蓄水工程。该工程始建于 20 世纪 70 年代中期,经过 30 多年的运行,工程内部出现大量缺陷和损伤,主要表现为:地基底版、岸墙和翼墙、护坦开裂并发生过大位移;上游挡水墙、下游挡水墙、岸墙、进出水通道和水泵室发生严重贯穿性裂缝和渗漏,大部分电机梁出现断裂裂缝;建筑物出现严重裂缝和位移,已不能适应工程运行要求。但是,当地经济发展对该工程提出了较高要求,当地政府和水利部门综合考虑各种因素后决定在原址重建新的红山窑水利枢纽工程。强风化砂岩是该工程建筑物的主要持力层,因其具有膨胀性,故可判断为膨胀岩。为防止在重建及以后运行过程中出现上述类似工程事故,必须对红山窑水利枢纽工程中的弱风化、中风化、强风化及全风化砂岩的物理力学性质进行研究。

根据室内外试验提供的试验成果表选取前述因素集原始数据,构成因素集 $U = \{U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6, U_7, U_8\}$,根据现有的国内外膨胀岩主要分类标准确定膨胀岩分类的专家数据系统模式,其集合为 $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4\}$,其中 $V_1 \sim V_4$ 分别为非膨胀岩、微膨胀岩、弱膨胀岩、强膨胀岩。为节省篇幅,原始数据和计算过程略,按公式(1)~(5)计算结果列于表 3。

表 3 岩样 A_i 在专家数据系统模式下的接近度

A_i	$d(A_i, V_j)$			
	V_1	V_2	V_3	V_4
A_1	0.28	-0.46	0.22*	-0.37
A_2	-0.54	0.19	-0.08*	0.35
A_3	0.29	0.15*	-0.33	-0.41
A_4	-0.44	-0.17*	0.58	0.36

注: $A_1 \sim A_4$ 分别代表全、强、中、弱风化砂岩,注*者表示 A_i 所在行中的数据其绝对值最小者对应的列为 V_j ,即第 i 个样本应归入第 j 类。

表 3 中 $d(A_i, V_j)$ 的工程意义为第 A_i 个样本到专家数据系统 V_j 的距离。从表 3 可知,本工程中的 4 种风化砂岩的分类情况如下:样本 A_3 和 A_4 归入 V_2 类,样本 A_1 和 A_2 归入 V_3 类。由此可以看出:微风化和弱风化红砂岩属于微膨胀岩,而强风化和全风化红砂岩则属于弱膨胀岩。该结果与本工程所做的室内试验和现场试验所得结果相符,说明该分类方法切实可行。

(下转第 86 页)

区排涝工程(泵站、水闸)、江都抽水站、万家寨引黄入晋调水工程、东深供水改造工程等。总体来说,这些系统的计算机监控、通信硬件配置比较先进合理,但传感器、执行机构(如叶片安放角调节机构)的可靠性以及基于运行调度理论的专用调度软件在一定程度上制约了系统的自动化水平。因此除了进一步提高传感器、执行机构的可靠性以外,重点应根据实时数据进行安全、优化调度专用软件的开发研究,进一步提高梯级泵站调水工程运行调度的自动化水平,根据调水需求,结合工程实际情况形成安全、优化的调度决策,进而实现操作控制全过程的自动化。

参考文献:

[1] 杨开林. 电站与泵站中的水力瞬变及调节[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.

[2] 杨开林, 时启燧, 董兴林. 引黄入晋输水工程充水过程的数值模拟及泵站充水泵的选择[J]. 水利学报, 2000(5): 76-80.

[3] 练继建, 王俊, 万五一, 等. 变时步的特征线法计算复杂输水系统的水力过渡过程[J]. 水利水电技术, 2003, 34(9): 12-14.

[4] 杨开林, 白正裕. 调水渠网非恒定流的线性变换求解方法[J]. 水利学报, 2004(3): 35-41.

[5] 杨开林. 明渠结合有压管调水系统的水力瞬变计算[J]. 水利水电技术, 2002, 33(4): 5-11.

[6] 王家亮, 覃杰. 东深供水改造工程中的流量平衡控制[J]. 水利水电技术, 2003, 34(8): 44-46.

[7] 邱锦春, 杨文容, 刘梅清, 等. 梯级泵站水道系统过渡过程计算分析[J]. 中国农村水利水电, 2003(5): 61-63.

[8] 马文正, 丘传忻, 贺贵明. 泵站运行的优化调度[J]. 水利学报, 1993(3): 35-41.

[9] 刘超. 泵站经济运行[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.

[10] 高占义, 窦以松, 黄林泉, 等. 大禹渡梯级泵站优化调度研究[J]. 水利学报, 1990(5): 1-10.

[11] 汪安南, 伍杰. 大型轴流泵站最优运行方式探讨[J]. 农田水利与小水电, 1993(11): 36-38.

[12] 陈守伦, 芮钧, 徐青, 等. 泵站日优化运行调度研究[J]. 水电能源科学, 2003, 21(3): 82-83.

[13] 刘正祥, 蒋丽娟, 张平燕. 动态规划、模拟技术在多级泵站优化调度中的应用[J]. 灌溉排水, 2000, 19(2): 62-68.

[14] 程芳, 陈守伦. 泵站优化调度的分解协调模型[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2003, 31(2): 136-139.

[15] 金明宇, 徐青, 陈守伦. 大型引水工程梯级水位优化模型研究[J]. 水电自动化与大坝监测, 2004, 28(1): 67-69.

[16] 戴振伟, 朱兆通, 储训, 等. 多级泵站优化调度研究[J]. 排灌机械, 1997(3): 37-41.

[17] 杨鹏, 纪晓华, 史旺旺. 基于遗传算法的泵站优化调度[J]. 扬州大学学报: 自然科学版, 2001, 4(3): 72-74.

[18] 李世芳, 马树元. 梯级泵站扬程优化调度算法[J]. 水利水电工程设计, 2002, 21(2): 45-46.

[19] 朱满林, 杨晓东, 张言禾. 梯级泵站优化调度研究[J]. 西安理工大学学报, 1999, 15(1): 67-70.

[20] 刘德祥, 何忠人, 郑玉春, 等. 大岗坡一石台寺多级泵站群优化调度模型研究[J]. 水电能源科学, 1995, 13(4): 236-241.

(收稿日期: 2005-03-29 编辑: 高建群)

(上接第 49 页)

[4] 杨庆, 栾茂田, 崇金著, 等. DRASTIC 指标体系法在大连市地下水易污性评价中的应用[J]. 大连理工大学学报, 1999, 39(5): 684-688.

[5] CIVITA M. Unified legend for the aquifer pollution vulnerability Maps[R]. Bologna: Pitagora Edit, 1990.

[6] FRANCES A, PARALTA E, FERNANDES J, et al. Development and application in the Alentejo region of a method to assess the vulnerability of groundwater to diffuse agriculture pollution: the susceptibility index[R]. Lisbon: GeoSystem Center IST, 2001.

[7] 钱家忠, 吴剑锋, 董洪信, 等. 徐州市张集水源地裂隙岩溶水三维等参有限元数值模型[J]. 水利学报, 2003(3): 37-41.

[8] GOGU R C, HALLET V, DASSARGUES A. Comparison of aquifer vulnerability assessment techniques: application to the Neblon river basin (Belgium)[J]. Environmental Geology, 2003, 44: 881-892.

[9] 周惠城, 王国立, 杨庆. 基于 DRASTIC 的地下水易污性多目标模糊模式识别模型[J]. 水科学进展, 2000, 11(2): 173-179.

(收稿日期: 2005-05-30 编辑: 熊水斌)

(上接第 64 页)

4 结 语

专家数据系统属前人经验的总结, 如何利用和开发是人们所要讨论的课题。从实例分析看, 根据岩石膨胀特性的多个参数, 运用模糊综合评判方法对膨胀岩进行综合分类, 避免了单因素分类的不确定性。这种方法简便易行, 充分利用了人们对膨胀岩膨胀特性的认识, 便于在实际工作中为工程技术人员所采用。

参考文献:

[1] 王小军. 膨胀岩的判别与分类和隧道工程[J]. 水文地质工程地质, 1995, 50(2): 45-49.

[2] 文江泉, 韩会增. 膨胀岩的判别与分类初探[J]. 铁道工程学报, 1996(2): 231-237.

[3] 杨庆, 缪国华, 吴顺川. 膨胀岩三维膨胀本构关系的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(6): 33-38.

[4] 张颖均, 王小军. 云台山隧道膨胀岩的膨胀特性[J]. 中国铁道科学, 1994, 15(2): 96-105.

[5] 张玉军, 唐仪兴. 李家窑膨胀岩膨胀性能的试验研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(3): 5-40.

[6] KOMINE H, OGATA N. Observation of swelling of bentonite by new electron microscope[R]. Kamon: Institute of Environmental Geotechnics, 1996.

[7] 刘绍军. 岩土分类方法探讨[J]. 湖南水利, 1998(2): 19-21.

[8] 李胡生, 熊文林. 岩体力学参数的工程模糊处理[J]. 水利学报, 1994(1): 76-85.

[9] 曲永新. 对中国东部膨胀岩的研究[J]. 软岩工程, 1991(1/2): 45-54.

(收稿日期: 2005-04-20 编辑: 高建群)