

文章编号:1671-6833(2010)05-0040-04

膨胀岩膨胀潜势多指标判别方法探讨

司友深^{1,2}, 高丹盈¹, 高英²

(1. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省水利勘测设计研究有限公司, 河南 郑州 450006)

摘要: 膨胀岩与膨胀土在物理性质、亲水性质及胀缩性方面存在显著的差别, 采用单指标判定带来不准确性, 需要建立膨胀岩多指标体系. 通过对南水北调中线工程黄河北—冀河北渠段的膨胀性黏土岩物理性能试验数据的统计分析, 得出影响黏土岩自由膨胀率的主要物理性质指标为液限. 考虑到粒度组成中的黏粒含量和胶粒含量一定程度上可以反映出膨胀岩亲水性的强弱, 建立了自由膨胀率与液限、黏粒含量、胶粒含量的定量关系, 给出了同时考虑自由膨胀率、液限、黏粒含量、胶粒含量的膨胀岩膨胀潜势等级划分的建议值, 为膨胀岩的判别提供参考.

关键词: 膨胀岩; 自由膨胀率; 拉依达准则; 回归分析; 判别

中图分类号: TU375.4 **文献标识码:** A

0 引言

膨胀岩问题是当今工程地质学和岩石力学领域中复杂的研究课题之一^[1]. 目前对膨胀岩的定量判别和等级划分还没有统一的标准, 美国的霍尔兹、英国的泰勒提出的判别指标简单, 未能引入直接反映膨胀岩膨胀性的指标; 南非威廉姆斯分类法^[2]简单明了, 但分类结果明显偏高, 且理论依据不是很明确; 其他判别指标如矿物成分、阳离子交换量等, 则不易测定或不易快速有效的测定. 依据现行的 GB50021-2001《岩土工程勘察规范》^[3]以及 GBJ112-87《膨胀土地区建筑技术规范》^[4], 在勘察设计过程中一般采用自由膨胀率作为膨胀岩(土)膨胀潜势的终判指标, 如表1所示.

尽管膨胀岩与膨胀土都具有吸水膨胀、失水干缩的特性, 但二者在物理性质、亲水性及胀缩性方面有着显著差别^[5]. 因此, 采用膨胀土的分级标准来判定膨胀岩是不尽合理的, 需要根据工程实际情况, 对膨胀岩的膨胀特性进行深入的研究, 建立快速便捷的多指标判定体系, 避免单指标判定带来的不准确性. 笔者根据膨胀性黏土岩物理性能试验数据的统计分析, 给出了同时考虑自由膨胀率、液限、黏粒含量和胶粒含量等因素的划分

等级.

表1 膨胀土膨胀潜势的判别

Tab.1 The discriminant of swelling soil's expansion potential

自由膨胀率 δ_{ef}	膨胀潜势
$40\% \leq \delta_{ef} < 65\%$	弱
$65\% \leq \delta_{ef} < 90\%$	中
$\delta_{ef} \geq 90\%$	强

1 膨胀岩物理性能试验及数据分析

膨胀岩之所以具有胀缩特性, 主要受亲水性黏土矿物成分、含量、天然含水率、湿度变化、胶结程度、应力变化等因素的影响. 自由膨胀率作为能够反映黏性岩土膨胀性的重要指标之一, 与黏土矿物成分、胶粒含量、化学成分和水溶液性质有着密切的关系^[6].

常规试验条件下测定的膨胀岩物理性质指标主要有含水量、干密度、液限、塑限、黏粒含量、胶粒含量. 其中, 液限、塑限作为界限含水率, 在一定程度上反映了岩土的亲水性能, 它与岩土的颗粒组成、黏土矿物成分、阳离子交换性能和比表面积以及水溶液的性能等有关. 粒度组成中的黏粒含量、胶粒含量, 特别是小于 0.002 mm 的胶粒成分, 反映了土中细粒含量的多少或土样的分散程

收稿日期:2010-02-29; 修订日期:2010-05-30

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划(2006BAB04A10)

作者简介:司友深(1985-), 男, 山东泰安人, 郑州大学硕士研究生, 主要从事新型复合建筑材料及其结构性能研究,

E-mail:sys010@hotmail.com; 通讯作者:高丹盈(1962-), 男, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师.

度,胶粒成分愈多,分散性愈好,亲水性愈强.因此,对膨胀岩的物理性质指标进行综合分析,找出影响膨胀岩性能的主要指标,建立多指标判定体系,是研究膨胀岩膨胀等级划分十分有效的途径.

河南省水利勘测有限公司对南水北调中线工程黄河北—姜河北渠段(以下简称为黄姜段)内

分布的黏土岩做了大量的现场原样试验.试验数据中完整的试验组数为 95 组,表 2 列出了其中的 8 组原始试验数据.笔者对该段黏土岩含水量、干密度、液限、塑限、黏粒含量、胶粒含量等物理性质指标进行统计分析,研究影响自由膨胀率的主要物理性质指标,建立等级划分方法.

表 2 部分原始数据和正态化转换后的胶粒含量、自由膨胀率
Tab.2 Partial raw data and data of modified colloid content, free swell

含水量 ω /%	干密度 ρ_d /($g \cdot cm^{-3}$)	液限 ω_L /%	塑限 ω_p /%	黏粒含量 ρ_c /%	胶粒含量 ρ'_c / %		自由膨胀率 δ_{f1} / %	
					转换前	转换后	转换前	转换后
22.0	1.63	45.0	25.0	40.4	24.0	3.18	63	7.94
16.1	1.83	37.2	18.3	42.4	20.0	3.00	49	7.00
12.6	1.84	28.1	16.6	29.5	19.0	2.94	23	4.80
19.9	1.74	35.8	20.8	23.2	16.7	2.81	25	5.00
24.1	1.55	52.7	29.5	42.2	27.7	3.32	65	8.06
20.6	1.67	45.4	26.3	31.0	12.0	2.48	42	6.48
13.2	1.87	35.1	17.7	50.6	20.0	2.99	31	5.57
24.2	1.63	51.1	29.2	49.8	33.0	3.50	54	7.35

由于膨胀岩基本力学性质、膨胀机理、空间分布上的复杂性以及试验过程中人为造成的误差,导致试验数据的离散性很大,影响试验结论的准确性,因此需要对试验异常数据进行判别和剔除,保证分析结果的真实性.统计分析大都要求分析数据呈正态分布^[7],并且异常数据的剔除准则也多以数据为正态分布为前提.因此,首先进行数据分布形态的检验,对于非正态分布的数据进行正态化转换,然后选取合适的检验方法进行异常值的剔除.

根据各指标试验数据的累积概率对应于正态分布累积概率绘制散点图,它能直观地检测样本数据是否与正态分布的统计图形一致.经正态检验,物理性质指标中的含水量、干密度、液限、塑限、黏粒含量符合正态分布,胶粒含量和自由膨胀率为非正态分布.

选用常用的 Box-Cox 幂转换^[8],对不符合正态分布的胶粒含量和自由膨胀率进行正态化转换.

设原始数据为 $x_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$, 令

$$\begin{cases} x'_i = \ln x_i, & p = 0 \\ x'_i = x_i^p, & p \neq 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, p 为使对数似然函数 L 取最大值时相应的值.

$$L = -\frac{v}{2} \ln S^2 + (p - 1) \frac{v}{n} \sum \ln x_i \quad (2)$$

式中, v 和 n 分别代表样本的自由度和样本容量,

对 m 维数据, $v = n - m$, S^2 为变换后数据的方差.

当自由膨胀率和各物理性质指标均符合正态分布后,采用拉依达准则进行粗大误差的剔除,其表达式为:

$$|x_i - \bar{x}| > 3s \quad (3)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

当数据 x_i 与测量数据的算术平均值 \bar{x} 的偏差的绝对值大于 3 倍的标准偏差 s 时,此数据即为异常数据,应舍弃^[9].经拉依达准则检验,黄姜段黏土岩有效试验数据组数共 90 组.

2 影响自由膨胀率的主要物理性质指标

为找出影响自由膨胀率的主要物理性质指标,对自由膨胀率和物理性质指标进行偏相关分析和逐步回归分析.偏相关分析是在控制其他物理性质指标影响的情况下分析自由膨胀率与某一物理性质指标之间的相关性,消除其他指标的影响,计算出的相关系数被称为偏相关系数.

1 阶偏相关系数为:

$$r_{y_{x1}, x_2} = \frac{r_{y_{x1}} - r_{y_{x2}} r_{x_1 x_2}}{\sqrt{(1 - r_{y_{x2}}^2)(1 - r_{x_1 x_2}^2)}} \quad (5)$$

...

5 阶偏相关系数为:

$$r_{y_{x1}, x_2 x_3 x_4 x_5 x_6} = \frac{r_{y_{x1}, x_2 x_3 x_4 x_5} - r_{y_{x6}, x_2 x_3 x_4 x_5} r_{x_1 x_6, x_2 x_3 x_4 x_5}}{\sqrt{(1 - r_{y_{x6}, x_2 x_3 x_4 x_5}^2)(1 - r_{x_1 x_6, x_2 x_3 x_4 x_5}^2)}} \quad (6)$$

...

式中: r_{ij} 表示变量 i 和变量 j 之间的简单相关系数; $r_{ij,k}$ 表示变量 i 和变量 j 之间的偏相关系数, 变量 k 为控制变量。

逐步回归分析是按全部物理性质指标对自由膨胀率的作用大小, 由大到小地逐个引入回归方程, 而对自由膨胀率作用不显著的变量可始终不被引入回归方程。对已引入模型中的物理性质指标 x_i 进行 F 检验时, 采用式(7); 对未引入模型中的物理性质指标 x_a 进行 F 检验时, 采用式(8)。具体计算公式为:

$$F_{(1, n-j-1)} = \frac{S_{SE(j-x_i)} - S_{SE(j)}}{M_{SE(j)}} \quad (7)$$

$$F_{(1, n-j-1)} = \frac{S_{SE(j)} - S_{SE(j+x_a)}}{M_{SE(j+x_a)}} \quad (8)$$

式中: n 表示所有自变量的个数; j 表示已引入方程中自变量的个数; S_{SE} 表示误差平方和; M_{SE} 表示误差平方和的均方差。

根据表2的试验结果, 5阶偏相关系数理论的偏相关计算结果见表3, 逐步回归分析计算结果见表4。

表3 偏相关分析结果表

Tab. 3 Results of partial correlation analysis

指标名称	偏相关系数	T 检验	判断标准
含水量与自由膨胀率	0.052	$p=0.634$	p 值小于 0.05 时,
干密度与自由膨胀率	-0.076	$p=0.487$	表示偏相关显著,
液限与自由膨胀率	0.328	$p=0.002$	具有统计学意义。
塑限与自由膨胀率	0.107	$p=0.330$	否则代表相关性
黏粒含量与自由膨胀率	-0.006	$p=0.960$	不好, 正负号代表
胶粒含量与自由膨胀率	0.072	$p=0.514$	正相关或负相关

表4 逐步回归分析结果

Tab. 4 Results of stepwise regression analysis

引入模型 的指标	未引入模型的指标	判别的标准
液限	含水量、干密度、黏粒 含量、胶粒含量、塑限	引入模型的 p 值 ≤ 0.05 , 未 引入模型的 p 值 ≥ 0.10

由表3和表4可见, 影响自由膨胀率的最主要因素是液限, 其原因是, 黏土矿物成分含量越高, 其吸水率越高, 对含水量的变化越敏感。黄姜段黏土岩的黏土矿物成分含量是 60%~70%, 液限作为界限含水量, 对膨胀岩的膨胀性能影响就更显著。由于测定自由膨胀率的试验过程中多采用烘干试样, 因此干密度、含水量与自由膨胀率没有直接的关系。考虑粒度组成中的黏粒含量和胶粒含量一定程度上可以反映出膨胀岩亲水性的强弱, 因此在构建膨胀岩膨胀潜势多指标判别体系

时, 可以选取自由膨胀率、液限、黏粒含量、胶粒含量作为判别基准。

3 膨胀岩自由膨胀率统计公式

为建立膨胀岩膨胀潜势多指标判别体系中膨胀性指标与物理性质指标的定量关系, 下面根据黄姜段黏土岩的 90 组有效试验数据, 对自由膨胀率与液限、黏粒含量、胶粒含量之间的关系进行回归分析。

在线性回归模型中, 常用最小二乘法计算回归系数。当存在多重共线性时, 最小二乘法的估计结果不很理想, 因为此时其误差平方和的均方差 M_{SE} 大, 使估计不稳定。对黏粒含量与胶粒含量进行偏相关分析发现, 二者的偏相关系数高达 0.888, 存在共线性。

为避免共线性带来的影响, 运用主成份回归分析方法建立关系式。主成份回归可以克服“估计不稳定”的缺点, 其原理为通过线性变换, 将原来的多个指标组合成相互独立的少数几个能充分反映总体信息的指标, 从而在不丢掉主要信息的前提下避开变量间共线性的问题。通过主成份回归的方法解决了黏粒含量和胶粒含量之间的共线性问题, 建立了自由膨胀率与液限、黏粒含量、胶粒含量之间的关系式:

$$y = -17.9 + 1.266x_1 + 0.134x_2 + 0.167x_3 \quad (9)$$

式中: x_1 为液限, %; x_2 为黏粒含量, %; x_3 为胶粒含量, %; y 为自由膨胀率, %。

利用公式(9)对黄姜段黏土岩 90 组原始数据进行拟合, 并与自由膨胀率的实测值进行比较, 实测值与计算值之比的均值、标准差和变异系数分别为 1.004, 0.318, 0.317, 这说明二者符合较好。

4 膨胀岩的判别与分级建议

根据岩石野外地质特征^[3], 若疑为膨胀岩, 则应首先取样并测定其自由膨胀率, 若自由膨胀率大于 40%, 则可初判为膨胀岩, 然后结合常规试验条件下测定的液限、黏粒含量、胶粒含量等物理性质指标, 进行膨胀岩膨胀潜势的等级划分。

根据黄姜段黏土岩现场试验和室内试验情况, 由自由膨胀率、液限、黏粒含量、胶粒含量构成膨胀岩多指标判别体系, 提出了该判定标准的建议值(表5), 以供参考。

对黄姜段黏土岩分别进行单指标判别和多指标判别, 对比发现多指标判别略微提高了岩石的

膨胀等级,增大了工程的安全系数,其中黏粒含量和胶粒含量的作用尤为突出,进一步证明了黏土矿粉含量在膨胀岩判别中的重要性。同时多指标判别解决了膨胀岩自由膨胀率过高,而矿物成分含量偏低的矛盾,为膨胀岩的精确判别提供了理论依据。

表5 判别指标的建议值

Tab. 5 Suggestive values of discriminative indexes

%				
自由膨胀率 δ_{er}	液限 ω_{L10}	黏粒含量 ρ_c	胶粒含量 ρ'_c	分级结果
<40	<30	<20	<10	非膨胀
40~65	30~40	20~32	10~20	弱膨胀
65~90	40~50	32~45	20~30	中膨胀
>90	>50	>45	>30	强膨胀

5 结论

(1)在进行地质数据统计分析时,对离散性较大的数据,应首先进行数据分布的检验,对不符合正态分布的数据进行正态化转换,然后选取基于正态分布的数据剔除准则,剔除由于人为操作、仪器操作不当、仪器失常等主客观因素造成的粗大误差。

(2)影响黄河北—美河北渠段黏土岩自由膨胀率的主要物理性质指标为液限,这与该渠段黏土岩的黏土矿物含量有关,黏土矿物成分含量越高,膨胀岩对含水量的变化就越敏感。

(3)对疑似膨胀岩的岩体应首先进行自由膨胀率的测定,待初步判定为膨胀岩后,结合物理性质指标中的液限、黏粒含量、胶粒含量进行等级划分,从而达到经济合理、安全可靠的判定效果。

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): 44-48.
- [2] WILLIAMS A A B, DONALDSON G. Building on expansivesoils in South Africa[C]//Proceedings of 4th International Conference on Expansive Soils. Colorado Denver: ASCE, 1980: 834-838.
- [3] 建设部综合勘察研究设计院. GB50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [4] 中国建筑科学研究院. GBJ112—87 膨胀土地区建筑技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
- [5] 林宗元. 岩土工程勘察设计手册[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1996.
- [6] 郭爱国, 孔令伟, 陈建斌. 自由膨胀率试验的影响因素[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 1949-1953.
- [7] 李洪成. 数据的正态性检验方法及其统计软件实现[J]. 统计与决策, 2009, 12: 155-156.
- [8] 赵慧, 甘仲惟, 肖明. 多变量统计数据中异常值检验方法的探讨[J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2003, 37(2): 133-137.
- [9] 张敏, 袁辉. 拉依达(PauTa)准则与异常值剔除[J]. 郑州工业大学学报, 1997, 18(1): 84-88.

Measures for Multi-index Discriminant of Expansion Potential of Swelling Rock

SI You-shen^{1,2}, GAO Dan-ying¹, GAO Ying²

(1. School of Water Conservancy & Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Water & Power Engineering Consulting CO., LTD, Zhengzhou 450006, China)

Abstract: There are prominent differences in physical appearance, hygroscopicity, swell-shrink characteristics between expanded swelling rock and soil. There is a need to build up a comprehensive evaluation model. By an analysis of physical performance data of the claystone distributing along the middle route of the South-to-North water transfer project area in the section of the north of Yellow River to the north of the Youhe River, the most important index of free swelling is presented, which is liquid limit. Considering important function of clay content and colloid content which can reflect hydrophilicity to a certain point, the comprehensive evaluation model and regression equation were built up by free swelling, liquid limit, clay content, colloid content. The suggestive value of the four indexes under different expansive potentia were listed, which provided a reference to assess the swell rock.

Key words: expanded swelling rock; free swelling; PauTa code; stepwise regression analysis; discrimination