

# 膨胀土的自由膨胀比试验研究

余 颂<sup>1,2</sup>, 陈善雄<sup>1,3</sup>, 许锡昌<sup>1</sup>, 余 飞<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 中铁大桥勘测设计院 有限公司, 湖北 武汉 430050;  
3. 华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 自由膨胀率是膨胀土判别与分类的一项重要指标, 由于自由膨胀率的测试人为干扰因素较多, 自由膨胀率的科学性和可靠性被广泛质疑, 因此, 寻求一种人为干扰因素少, 又能反映膨胀土本质的合理而适用的指标具有重要意义。为此, 引进了一种新的试验方法即自由膨胀比试验, 膨胀比是 10 g 烘干土样分别在盛有蒸馏水和煤油(或 CCl<sub>4</sub>)的标准量筒(通常为 50 mL)中沉积稳定时的体积之比。阐述该指标的意义和试验方法, 系统开展自由膨胀比试验和膨胀土物理力学指标试验, 试验表明: 相对自由膨胀率而言, 自由膨胀比与阳离子交换量、比表面积、蒙脱石含量具有更好的相关性, 能较好反映膨胀土的胀缩特性; 将自由膨胀比与公路规范中常用的指标液限、塑性指数、标准吸湿含水量进行对比分析, 发现自由膨胀比作为膨胀土判别与分类指标具有更高的可信度, 同时自由膨胀比与这些指标相关关系也较好, 可将其结合起来用于膨胀土的判别分类中。

**关键词:** 土力学; 膨胀土; 自由膨胀率; 自由膨胀比; 相关性; 可信度; 判别分类

**中图分类号:** TU 43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2006)增 1 - 3325 - 06

## TESTING STUDY ON RELATIVE FREE SWELLING RATIO FOR EXPANSIVE SOIL

YU Song<sup>1,2</sup>, CHEN Shanxiong<sup>1,3</sup>, XU Xichang<sup>1</sup>, YU Fei<sup>1</sup>

(1. *Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;*  
2. *China Zhongtie Major Bridge Reconnaissance and Design Institute Co., Ltd, Wuhan, Hubei 430050, China;*  
3. *School of Civil Engineering and Engineering Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China*)

**Abstract:** Free swelling ratio is an important index for identification and classification of expansive soil. In the process of its tests many artificial factors exist, and its scientific and reliability are widely doubted, so searching an adequate and applicable index with fewer artificial factors and representing the nature of expansive soil is of significance. A new kind of testing measure is introduced. That is relative free swelling ratio test. The relative free swelling ratio is defined as the ratio of the equilibrium sediment volume of 10 g oven-dried soil in distilled water to that in coal soil(or CCl<sub>4</sub>). The significance of the index and the testing measure are described. Relative free swelling ratio and physical and mechanical properties tests for expansive soil are conducted systematically. From the tests it is found out that when compared to free swelling ratio, relative free swelling ratio shows better correlation with cation exchange capacity, specific surface and montmorillonite content, so it is concluded that relative free swelling ratio is consistent with the index which exhibits the nature of expansive soil. The credence is compared with the indices suggested by specifications for highways including liquid limit, plastic index and standard moisture absorption water content and the results indicate that the former shows a higher credence and possesses more feasibility, meanwhile the correlations between the relative free swelling ratio and other indices are

**收稿日期:** 2005 - 08 - 23; **修回日期:** 2005 - 11 - 28

**作者简介:** 余 颂(1981 - ), 男, 2003 年毕业于浙江大学水工结构专业, 现为硕士研究生, 主要从事非饱和土工程性质方面的研究工作。E-mail: songy615@163.com

good, so these indices should be considered together for identification and classification of expansive soil.

**Key words:** soil mechanics; expansive soil; free swelling ratio; relative free swelling ratio; correlation; credence; identification and classification

## 1 引言

自由膨胀率<sup>[1, 2]</sup>是反映土的膨胀特性的量度指标之一。不同黏土矿物成分的土粒具有不同的亲水性能, 其膨胀性也有显著差异。研究表明, 当膨胀土的结构相似时, 土中黏土矿物成分蒙脱石含量愈多, 自由膨胀率愈大。同时该指标具有试验设备少、操作简单易行、试验周期短等特点, 能快速简便地对膨胀土进行判别与分类。但是自由膨胀率试验本身受试验人员的操作方法、试验仪器等因素的影响, 存在着缺陷和不足, 不能真实反映膨胀土的本质特性。寻求一种人为干扰因素少, 又能反映膨胀土本质的合理而适用的指标是十分必要的。

自由膨胀比试验是由印度的 K. Prakash 和 A. Sridharan<sup>[3]</sup>首先提出来的, 它操作简单、意义明确、可靠性强, 但对我国膨胀土是否适用尚未得到验证, 本文试图引进这一概念并运用到国内膨胀土的判别分类中来。以下介绍了这种试验方法, 开展了自由膨胀比试验, 并与阳离子交换量、蒙脱石含量、比表面积及公路规范<sup>[4]</sup>中常用的指标如自由膨胀率、液限、塑性指数、标准吸湿含水率<sup>[5]</sup>进行了对比, 探讨了其作为膨胀土判别与分类指标的可信度, 同时就自由膨胀比在膨胀土判别与分类中的应用作了初步研究。

## 2 自由膨胀比的意义

### 2.1 自由膨胀比的定义

膨胀土的自由膨胀比指 10 g 过 0.5 mm 筛的烘干土样在分别盛有蒸馏水和煤油(或  $\text{CCl}_4$ )的标准量筒(通常为 50 mL)中沉积稳定时的体积之比。

### 2.2 自由膨胀比的物理意义

膨胀土的黏土矿物代表性成分为蒙脱石、伊利石和高岭石。根据黏土矿物晶格扩张理论, 蒙脱石是亲水性矿物, 尽管它们都是由硅氧四面体和氢氧化铝八面体两种基本单位所构成, 但由于两种基本单位间联接的不同, 造成了它们与水结合时体积变化的差异, 蒙脱石类矿物体积变化最大, 在水化吸

附过程中晶格间阳离子间距增大, 产生膨胀并形成微细颗粒, 并引起体系结构的调整, 使其体积可增大到原来的 20 倍, 而高岭石体积变化则很小<sup>[6]</sup>。在煤油(或  $\text{CCl}_4$ )有机溶剂中, 煤油对蒙脱石晶格扩展具有抑制作用, 相反高岭石在煤油中膨胀性得到了发挥。自由膨胀比考虑了矿物在不同溶剂中产生的差异体积, 得到一量纲一的常数, 此常数可近似为矿物中蒙脱石或高岭石含量的单调函数, 试验方法上又能够定量操作, 因此该指标的物理意义明确。

### 2.3 自由膨胀比的试验方法

自由膨胀比的试验方法比较简单, 首先称取 50 g 过 0.5 mm 筛的风干土样, 在 105 °C~110 °C 烘箱内烘至恒重, 在干燥器内冷却至室温后再称取 10 g 土样倒入 50 mL 量筒内, 并注入 30 mL 蒸馏水, 静置 24 h 后沉积平衡时的试样体积记为  $V_d$ ; 用煤油代替蒸馏水, 以同样的操作方法, 读取沉积平衡的试样体积  $V_k$ ,  $V_d$  与  $V_k$  之比即为自由膨胀比。

### 2.4 自由膨胀比的优点

目前常用自由膨胀率  $F_s$  作为膨胀土判别分类的一项指标, 这种方法是采用风干土碾细过 0.5 mm 筛, 并在 105 °C~110 °C 下烘干至恒重, 在干燥器中冷却后用标准量土杯取 10 mL 土样进行自由膨胀率测试的。由于测试过程中有较多人为因素干扰, 例如阳高样的 1~2  $\mu\text{m}$  粒级, 10 mL 体积土质量约为 5 g, 高岭样则约为 4 g, 这说明用标准量筒取得土样的密度相差很大, 因此该指标的可靠性及能在多大程度上反映膨胀土的本质等方面, 一直存在着争议。自由膨胀比试验摒弃了传统自由膨胀率试验采用的量取体积的方法, 取而代之的是称取一定质量的土样, 因此其重复性强、易于操作、可信度高。同时保留了自由膨胀率试验周期短、试验仪器少、试验方法简单等特点, 用于膨胀土分类时有较好的应用前景。

## 3 自由膨胀比与膨胀土物化性质、矿物成分之间的关系

为了对土样的自由膨胀比有较全面地认识, 在合肥(肥)一六(安)高速公路沿线选取了 6 种土样, 进行

了自由膨胀比试验(图 1, 2), 同时, 开展了物化分析、界限含水量、颗粒分析及标准吸湿含水量等系统的试验研究, 试验结果如表 1 所示。

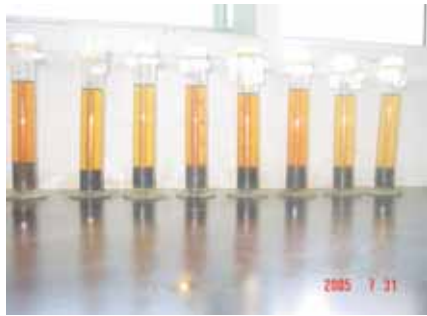


图 1 在煤油中进行的自由膨胀比试验

Fig.1 Relative free swelling ratio test conducted in the solvent of coal oil



图 2 在蒸馏水中进行的自由膨胀比试验

Fig.2 Relative free swelling ratio test conducted in the solvent of distilled water

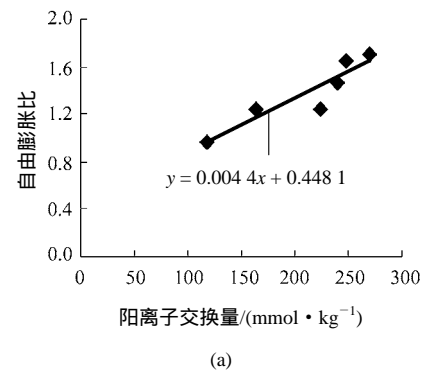
表 1 膨胀土样的物理性质指标

Table 1 Indices of physical properties for expansive soil

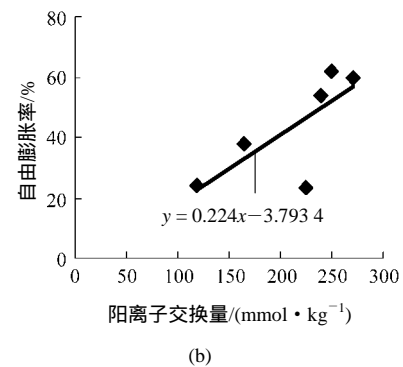
土样编号	自由膨胀比	自由膨胀率/%	液限/%	塑性指数	标准吸湿含水量/%	阳离子交换量/(mmol · kg <sup>-1</sup> )	比表面积/(m <sup>2</sup> · g <sup>-1</sup> )	蒙脱石含量/%
K143+200	0.97	24	38.9	18.9	3.8	118.30	—	6.10
K132+990	1.24	23	41.5	21.5	3.8	224.96	106.25	12.40
K145+060	1.25	38	42.7	21.1	4.3	164.02	67.24	11.51
K140+260	1.47	54	54.6	31.1	6.2	240.16	124.11	18.81
K70+800	1.64	62	71.0	44.2	8.6	248.98	163.32	23.41
K84+400	1.71	60	79.9	53.3	8.9	270.63	191.51	23.93

鉴别某种土是否属于膨胀土以及判断膨胀性的强弱程度, 应根据土体本身的主要属性来进行区分, 阳离子交换量和比表面积能反映出黏土矿物类型, 蒙脱石含量更是膨胀土胀缩性的本质因素<sup>[6]</sup>。研究自由膨胀比、自由膨胀率与阳离子交换量、比表面积和蒙脱石含量的关系对自由膨胀比的性质、指标合理性等全面了解具有重要意义。根据表 1 的结

果, 绘制自由膨胀比、自由膨胀率与以上 3 项指标的关系如图 3~5 所示, 为方便起见, 将本文所有相关性方程及相关系数成果列于表 2 中。

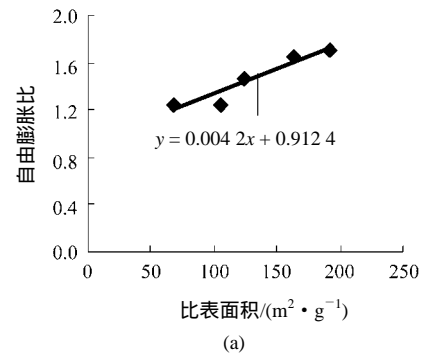


(a)

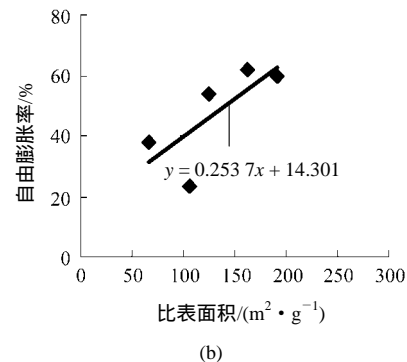


(b)

图 3 自由膨胀比、自由膨胀率与阳离子交换量的关系  
Fig.3 Relationships between relative free swelling ratio, free swelling ratio and cation exchange capacity



(a)



(b)

图 4 自由膨胀比、自由膨胀率与比表面积的关系  
Fig.4 Relationships between relative free swelling ratio, free swelling ratio and specific surface

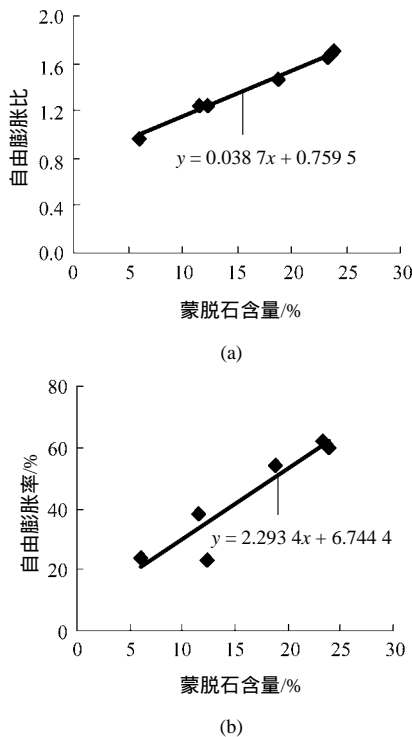


图5 自由膨胀比、自由膨胀率与蒙脱石含量的关系

Fig.5 Relationships between relative free swelling ratio, free swelling ratio and montmorillonite content

表2 各指标相关性方程及决定系数

Table 2 Results for equations and coefficients of determination

相关性方程	$R^2$
$y = 0.0044x + 0.4481$	0.843
$y = 0.224x - 3.7934$	0.543
$y = 0.0042x + 0.9124$	0.892
$y = 0.2537x + 14.301$	0.552
$y = 0.0387x + 0.7595$	0.989
$y = 2.2934x + 6.7444$	0.868
$y = 2.2512x + 18.6870$	0.886
$y = 1.8428x + 2.1491$	0.869
$y = 0.3100x + 0.9318$	0.892
$y = 0.0159x + 0.5212$	0.865
$y = 0.0183x + 0.7997$	0.865
$y = 0.1111x + 0.7414$	0.823

由图3~5可知,自由膨胀比与阳离子交换量、比表面积、蒙脱石含量相关性比较好(相关系数均满足  $R^2 > 0.84$ ); 相比而言,自由膨胀率与以上3项指标间相关性相对较差,且自由膨胀率因操作方面的误差,其结果的可信度也一直受到质疑。因此自由膨胀比与反映膨胀性本质的阳离子交换量、比表面积、蒙脱石含量有着更好的一致性,更适用于膨胀土判别分类。

#### 4 自由膨胀比可信度分析

从矿物学观点看,膨胀土的胀缩性主要取决于黏土矿物的种类、含量,其中蒙脱石的含量是其本质因素,对其影响程度最大。目前规范中还推荐采用液限、塑性指数、标准吸湿含水量等3项指标作为膨胀土判别分类的指标,为比较自由膨胀比与这3项指标用作膨胀土判别分类的可信度,图6~8给出了液限、塑性指数、标准吸湿含水量与蒙脱石含量的关系图。

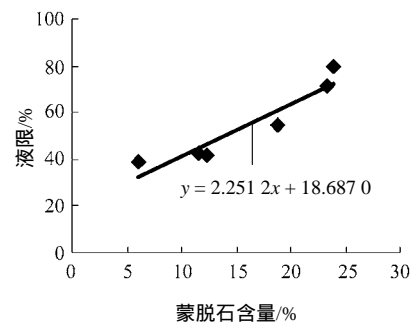


图6 液限与蒙脱石含量关系

Fig.6 Relationship between liquid limit and montmorillonite content

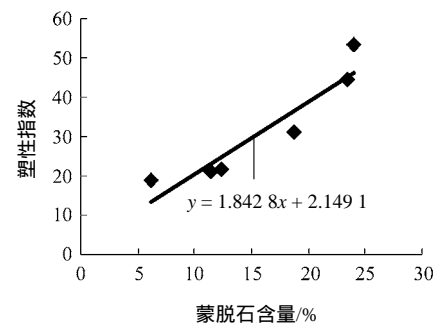


图7 塑性指数与蒙脱石含量关系

Fig.7 Relationship between plastic index and montmorillonite content

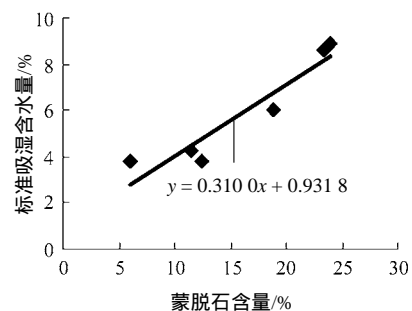


图8 标准吸湿含水量与蒙脱石含量关系

Fig.8 Relationship between stand moisture absorption water content and montmorillonite content

一元线性回归方程的拟合优度检验采用  $R^2$  统计量,  $R^2$  越接近于 1, 说明回归方程对样本数据点的拟合优度越高, 被解释变量和解释变量线性相关越强。由图 6~8 可知: 液限、塑性指数、标准吸湿含水量与蒙脱石含量均有较好的相关性(相关系数满足  $0.86 < R^2 < 0.9$ ), 这些指标作为膨胀土分类指标具有科学性; 自由膨胀比与蒙脱石含量的相关系数满足  $R^2 = 0.9891$ , 相比而言自由膨胀比与蒙脱石含量相关性更好, 更适合作为膨胀土分类指标。

从以上分析可以看出, 自由膨胀比与反映膨胀土胀缩本质的因素具有很好的一致性, 可以在工程中加以推广应用。需要通过大量的试验制定一个合适的分类标准, 但不可能对每一个土样都进行微观分析, 因此其分类标准仍需要结合其他判别指标来制定。对国内外十几种膨胀土判别与分类方法的评判指标综合统计分析表明: 液限、塑性指数指标被采用的次数最多, 用这 2 个指标作为膨胀土判别指标具有较高的可靠性; 标准吸湿含水量能较好反映膨胀土的本质<sup>[5, 7, 8]</sup>。研究自由膨胀比与这 3 项指标的相关性有很好的现实意义, 图 9~11 给出了自由膨胀比与这 3 项指标的关系图。

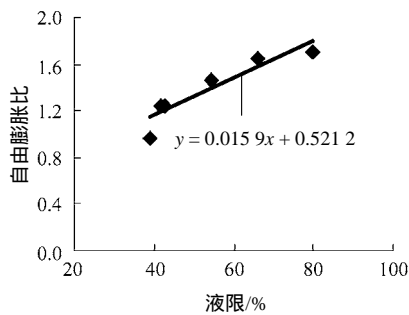


图 9 自由膨胀比与液限关系

Fig.9 Relationship between relative free swelling ratio and liquid limit

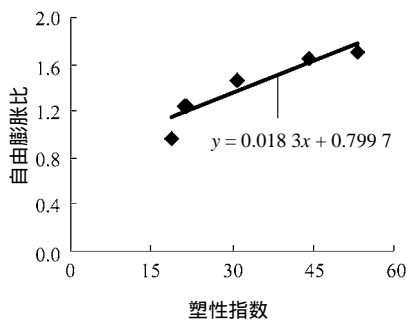


图 10 自由膨胀比与塑性指数关系

Fig.10 Relationship between relative free swelling ratio and plastic index

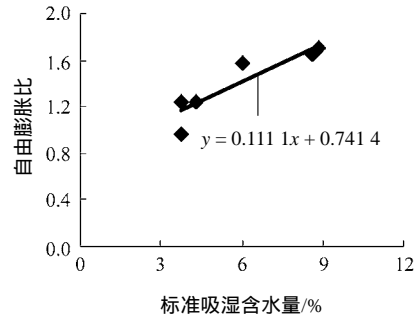


图 11 自由膨胀比与标准吸湿含水量关系

Fig.11 Relationship between relative free swelling ratio and standard moisture absorption water content

由图 9~11 可知, 自由膨胀比与规范推荐的分类标准液限、塑性指数、标准吸湿含水量也有较好的相关性。因此自由膨胀比完全有可能取代自由膨胀率试验, 成为膨胀土的判别分类的依据。

### 5 结合自由膨胀比对膨胀土进行判别与分类

根据现有的资料显示, 靠单一指标对膨胀土进行判别和分类不能全面反映土性, 有时甚至会出现误判漏判现象, 采用能够反映膨胀土本质的指标进行多指标联合分析是一个较理想的分类方法<sup>[7]</sup>。这里简述利用常见的几个指标如液限、塑性指数、标准吸湿含水量和本文推荐的自由膨胀比对膨胀土进行判别与分类的方法。

塑性指数能很好地反映粒度组成、分散特性和阳离子与黏土矿物的相互作用程度, 对膨胀土进行分类时, 可选用塑性指数作为一个较好的分类指标<sup>[8]</sup>; 通过前文分析研究, 自由膨胀比能够较好地反映膨胀土的本质, 也可作为另外一个判别与分类的合理指标。因此, 对膨胀土进行判别与分类, 可首先用塑性指数、自由膨胀比进行初判, 再结合其他指标进行终判。自由膨胀比的分类标准有待进一步研究, 其他指标的分类标准可参考已有的研究成果。

### 6 结 论

本文介绍了土壤的自由膨胀比试验, 它弥补了传统自由膨胀率试验的受人为因素干扰较多的不足, 试验设备少、周期短、操作简单、重复性强、可靠性高。通过对合肥地区膨胀土开展自由膨胀比

试验、物化分析、界限含水量及标准吸湿含水量等系统的试验研究,得出自由膨胀比与土壤的阳离子交换量、比表面积和蒙脱石含量之间具有良好的线性相关性,决定系数  $R^2 > 0.84$ ,能够比自由膨胀率更好地反映膨胀土的本质,可取代之而用于膨胀土的判别分类中来;与规范推荐的判别分类指标如液限、塑性指数、标准吸湿含水量相比,其可靠性更高;同时自由膨胀比与以上三项指标具有较好的相关性,因此可作为一项指标来进行膨胀土的判别与分类工作。另外需要说明的是本文仅就自由膨胀比在合肥地区膨胀土判别分类的可行性进行了探讨,具体的分类指标需建立在对全国各地膨胀土进行大量试验的基础上。

### 参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国行业标准编写组. 公路土工试验规程(JTJ051 - 93)[S]. 北京: 人民交通出版社, 1993.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Testing Methods of Soils for Highway Engineering(JTJ051 - 93)[S]. Beijing: China Communications Press, 1993.(in Chinese))
- [2] 张 倩. 谈谈自由膨胀率试验的局限性[J]. 交通标准化, 2004, (4): 24 - 25, 18.(Zhang Qian. Discussion on limitations in free expansive rate test[J]. Communications Standardization Issue, 2004, (4): 24 - 25, 18.(in Chinese))
- [3] Prakash K, Sridharan A. Free swell ratio and clay mineralogy of fine-grained soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 2004, 27(2): 220 - 225.
- [4] 中华人民共和国行业标准编写组. 公路路基设计规范(JTGD30 - 2004)[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Specifications for Design of Highway Subgrades(JTGD30 - 2004)[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.(in Chinese))
- [5] 姚海林, 杨 洋, 程 平, 等. 膨胀土标准吸湿含水率试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 3 009 - 3 013.(Yao Hailin, Yang Yang, Cheng Ping, et al. Testing study on moisture content of standard absorption for expansive soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(17): 3 009 - 3 013.(in Chinese))
- [6] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.(Liu Tehong. Problem of Expansive Soil in Engineering Construction[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997.(in Chinese))
- [7] 陈善雄, 余 颂, 孔令伟, 等. 膨胀土判别与分类方法探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1 895 - 1 900.(Chen Shanxiong, Yu Song, Kong Lingwei, et al. Study on approach to identification and classification of expansive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(12): 1 895 - 1 900.(in Chinese))
- [8] 姚海林, 程 平, 杨 洋, 等. 标准吸湿含水率对膨胀土进行分类的理论与实践[J]. 中国科学(E 辑), 2005, 35(1): 43 - 52.(Yao Hailin, Cheng Ping, Yang Yang, et al. Testing study on moisture water content of standard absorption for expansive soil[J]. Science in China(Series E), 2005, 35(1): 43 - 52.(in Chinese))