

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201910007

岩土体吸水膨胀应力系数的试验研究

郭永春, 许福周, 许嘉伦, 屈智辉

(西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 基于岩土体膨胀性是其含水量的函数的认识, 提出了岩土体吸水膨胀应力系数的概念。从膨胀应力与含水率的变化关系出发, 研制出吸水膨胀应力系数试验装置; 根据试验得到的膨胀应力与含水率增量的关系曲线和计算得到的岩土体吸水膨胀应力系数, 对不同状态与类型重塑土样吸水膨胀应力系数的变化规律进行了深入研究。试验研究结果表明: 试验装置所测土样的最终含水率误差在 1.0% 左右, 能够较好地得到不同岩土体的吸水膨胀应力系数; 由于黏土颗粒水化程度的不断增加, 各岩土体的膨胀应力都随含水率的增加而增大, 且膨胀应力与含水率增量呈线性关系; 初始含水率 15.0% 条件下云南呈贡强膨胀土、成都弱膨胀土、成都粉质黏土的膨胀应力系数分别为 92.2 (kPa/%)、42.6 (kPa/%)、0.9 (kPa/%), 是由于不同类型岩土中黏粒含量的差别, 导致不同类型岩土体的膨胀应力系数有较大的差别; 膨胀应力系数能够有效地区分岩土体的膨胀性, 可以用膨胀应力系数对岩土体的膨胀性进行分类。

关键词: 膨胀岩土; 膨胀应力; 膨胀应力系数; 膨胀岩土分类

中图分类号: TU411.2; TU411.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)03-0086-07

Experimental research on water absorption expansion stress coefficient of rock and soil mass

GUO Yongchun, XU Fuzhou, XU Jialun, QU Zhihui

(Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Based on the understanding that the expansibility of rock and soil mass is a function of water content, the concept of water absorption expansion stress coefficient of rock and soil mass is proposed. Starting from the relationship between the expansion stress and the water content, a test device for water absorption expansion stress coefficient is developed. According to the relationship curve between the expansion stress and the increase of water content obtained by the test and the calculated water absorption expansion stress coefficient of rock and soil mass, the change law of the water absorption expansion in different states and types is studied in depth. The experimental research results show that the error of final water content of the soil sample is about 1.0%, and the water absorption expansion stress coefficient of different type of rock and soil mass can be obtained effectively. Due to the increasing hydration degree of clay particles, the expansion stress of each rock and soil mass increases with the increase of water content, and the expansion stress is linearly related to the increase of water content. The water absorption expansion stress coefficient of the Chenggong (Yunnan Province) expansive soil, Chengdu expansive soil, and Chengdu silty clay are 92.2 (kPa/%), 42.6 (kPa/%) and 0.9 (kPa/%) respectively under the initial water content of 15.0%. Because of difference of clay content in different types of rock and soil mass, there is a large difference in the water absorption expansion stress coefficient of different types of rock and soil mass. The water absorption expansion

收稿日期: 2019-10-09; 修订日期: 2019-12-30

第一作者: 郭永春(1973-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为特殊岩土工程。E-mail: ycguo@swjtu.edu.cn

stress coefficient can effectively distinguish the expansibility of rock and soil mass, and it can be used to classify the expansibility of rock and soil mass.

Keywords: expansive rock and soil; expansion stress; expansion stress coefficient; classification of expansive rock and soil

在膨胀土相关规范中,对膨胀土的定义有如下几种:膨胀土是指含有大量亲水矿物,湿度变化时有较大体积变形,变形受约束时产生较大内应力的岩土^[1];膨胀土是土中黏粒成分主要由亲水矿物组成,同时具有显著的吸水膨胀和失水收缩两种变形特性的黏性土^[2];膨胀土是指土中黏粒成分主要由亲水性矿物组成,具有吸水显著膨胀、软化、崩解和失水急剧收缩、开裂,并能产生往复胀缩变形的黏性土^[3]。在这些定义中,“较大体积变形”、“显著膨胀”等词语,已经说明对黏性土是否为膨胀土的判断设定了一个潜在的“临界值”。

以自由膨胀率为例,规范中都规定了自由膨胀率 $\geq 40\%$ 的黏性土才判定为膨胀土^[1-5],这个“40%”就是潜在的“临界值”。从工程实践的角度来说,设定“临界值”是有意义的,一方面简化勘察设计的复杂性,另一方面,可以降低工程造价。对于自由膨胀率低于40%的黏性土则当作普通土处理,通常可以认为其膨胀效应对工程安全影响不大。基于这样的判断标准,在特殊岩土工程实践中,就出现了一些问题。当一种黏性土的自由膨胀率仅为39%时,按照规范要求,把它当作普通土处理。然而,根据作者对成都地区膨胀土18个基坑边坡工程调查,自由膨胀率低于40%的黏性土,在吸水过程中产生的膨胀变形或膨胀压力,是能够引起工程构筑物的变形和破坏的,影响工程安全。

膨胀指标低于临界值的黏性土中的膨胀性问题说明,现有规范中临界值的规定可能存在着一定的局限性,是值得反思和研究的。仔细分析膨胀性指标在各类规范中的应用,主要有2个方面的作用。一是判别黏性土是否是膨胀土,作为膨胀土的识别指标,二是在膨胀土分级分类时使用,根据这些膨胀参数的大小,将膨胀土分为强、中、弱三级,作为工程设计的定性依据。一个突出的问题是,在相关的规范中,膨胀变形和膨胀应力参数是没有直接参与岩土工程设计计算的。膨胀性岩土工程实践亟需能够参与设计计算的膨胀参数。那么,制约膨胀参数参与设计计算的因素又是什么呢?

现阶段,对于膨胀土样的膨胀特性有了大量的研究成果^[6-7]。从定义来说,岩土体的吸水膨胀性主要

是指岩土体吸水产生膨胀变形的现象,这类似于岩土体在温度作用下的热膨胀变形现象^[8]。因此,吸水膨胀性应该是各类土体都应具有的一种性能,只是由于岩土体中成分结构的差异性,决定了其膨胀变形的大小。从这个角度来说,应测试所有土体的膨胀性,选择一个类似于岩土体热膨胀(应变)系数的吸水膨胀(应变)参数,如岩土体的“吸水膨胀(变形或应力)系数”,作为土体吸水膨胀性的通用分类参数^[9],使其既能像热膨胀系数那样用于岩土体的膨胀性分类,又能计算膨胀应力场^[10],将膨胀系数应用于岩土体的设计计算之中,解决目前膨胀岩土工程设计难题。

参考岩土体热膨胀系数的定义,岩土体“吸水膨胀应力系数”可以定义为膨胀应力增量与含水率增量的比值,表达岩土体吸收单位含水率的水量产生的膨胀应力的大小^[9]。通过研制膨胀性试验装置^[11-14],同时测试岩土体膨胀应力和吸水量,通过吸水膨胀曲线计算得到“吸水膨胀应力系数”。

基于岩土体的膨胀性是其含水率的函数的认识,论文从膨胀应力和含水率增量的关系入手,研制出一套可以测试膨胀应力与含水率增量关系试验装置和试验方法,得到了单个膨胀土试样吸水膨胀过程曲线。根据试验曲线,可以计算得到膨胀土的吸水膨胀应力系数。通过测试不同岩土体的吸水膨胀应力系数进行岩土体膨胀性分类。

1 吸水膨胀应力系数的概念

关于膨胀土吸水膨胀机理,已经有了非常丰富的研究成果。基本的共识是,在实际岩土工程中,膨胀土吸水膨胀过程是连续的,其吸水膨胀过程的理论曲线应该是一条连续的吸水膨胀应力过程曲线^[11-14],如图1所示。在曲线OABC中,OA段表示土体初始吸水膨胀阶段,进入土体中的水一部分填充孔隙,一部分产生膨胀应力。AB段是土体膨胀应力显著增长阶段,大致呈线性形态,表示进入土体中的水分产生了显著的膨胀应力。BC段表示随着土体膨胀应力的增加,土体的膨胀能力逐渐减弱。到达C点时,土体膨胀应力基本稳定,不再表现出膨胀。

AB段直线的斜率,可以表示膨胀土试样吸水膨

胀系数,其物理意义是膨胀土吸水膨胀性能的大小。

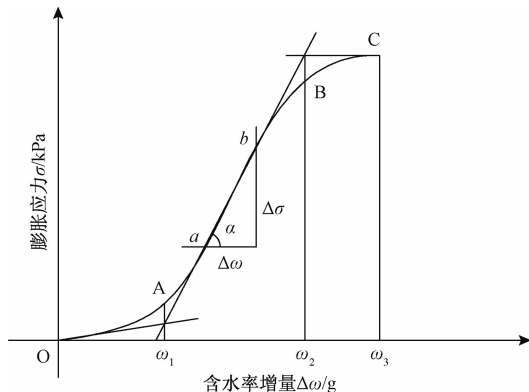


图1 土体吸水膨胀过程曲线

Fig.1 Curve of soil water absorption and expansion process

因此,吸水膨胀应力系数的定义主要是指膨胀岩土吸水膨胀应力增量与吸水含水率增量的比值,即:

$$\alpha = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\omega}$$

式中:α——岩土体吸水膨胀应力系数;

$\Delta\sigma$ ——岩土体吸水膨胀应力增量/kPa;

$\Delta\omega$ ——岩土体吸水含水率增量/%。

膨胀应力系数在物理意义和工程意义上类似于岩土材料的热膨胀系数,表示岩土体含水率增量与膨胀应力的线性变化关系。依据不同岩土体吸水膨胀应力系数的大小,可以计算岩土体含水率增加时对应的膨胀应力的大小,同时也可以根据膨胀应力系数对膨胀土的膨胀性能进行分类或分级。

根据膨胀应力系数的定义,只要设计的试验仪器能够同时测试试样在吸水膨胀过程中的应力增量、含水率的变化量,就可以根据公式计算岩土体的吸水膨胀应力系数。岩土体的成因、结构、构造、成分等基本性质则可以作为其膨胀性能大小的地质基础。膨胀应力系数直接将膨胀应力与含水率的变化联系起来,可以直接根据膨胀应力系数的大小评价岩土膨胀性的强弱,回避了用多个系数进行膨胀性判别的麻烦,概念明确,简单易行。同时,也可以仿照温度应力场原理,计算岩土体的湿度应力场^[10],将膨胀应力直接纳入岩土体应力场计算之中。

2 膨胀应力系数的测试方法

对于岩土体而言,通过试验测试其膨胀应力系数,就可以根据膨胀应力系数的大小进行岩土体的膨胀性判别。郭永春等^[11]、章李坚^[12]、陈伟乐^[13]、赵海涛^[14]等人研制了可以测试膨胀岩土连续/断续吸水膨胀的

单轴试验装置,可以测试膨胀岩土试样完全浸水、连续或断续吸水过程中的膨胀性能,提出了可以测试岩土体的膨胀系数的试验方法。

吸水膨胀应力系数的试验装置如图2所示,吸水膨胀应力试验装置主要包括反力系统、测力系统、进水系统三部分。

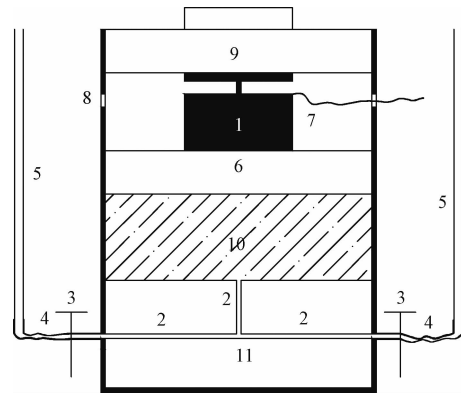


图2 吸水膨胀应力系数试验装置

Fig.2 Testing device of the water absorption expansion stress coefficient

1—反力盒;2—进水管;3—阀门;4—橡胶管;5—带刻度滴管;
6—不透水垫块;7—荷重传感器;8—观察孔;9—反力垫块;
10—试样;11—反力盒底座

测试岩土体的膨胀应力,需要反力装置,反力系统主要包括反力盒、反力垫块两部分。反力垫块通过螺纹与反力盒连接,提供传感器的反力。测力系统主要是荷重传感器,通过配套的数据采集器,获取试样膨胀力的变化数据。进水系统主要包括带刻度滴定管、连接软管、反力盒底座中预留的进水管。试样通过进水管吸收水分,产生膨胀。由于试样上下均被约束,不允许变形,荷重传感器可以直接测得试样产生的膨胀压力,经过换算,得到等体积法原理下的膨胀应力参数。

在试验时,通过带刻度滴定管读取进入试样的水量,可以根据需要换算成试样的含水率;利用荷重传感器测试试样的膨胀力,通过一个膨胀土试样,就可以得到膨胀土膨胀力和含水率增量之间的关系曲线,可以认为是膨胀土吸水膨胀的全过程曲线。根据试验曲线的斜率,即可求得膨胀土的吸水膨胀应力系数。

利用此装置对重塑试样吸水膨胀应力系数进行大量测试,试验后测量试样的最终含水率进行对比。如利用该仪器测试了初始含水率为15.0%、干密度为1.6 g/cm³的云南呈贡重塑强膨胀土膨胀吸水全过程。将理论最终含水率与实测最终含水率进行对比

(表 1), 可以认为该仪器所测得到的数据是合理的, 用该仪器测试膨胀应力系数是可靠的。

表 1 云南呈贡膨胀土最终含水率对比

Table 1 Comparison of final moisture content of the Chenggong expansive soil

初始含水率/%	10.0	15.0	18.0	20.0	23.0
进水量/g	11.4	9.2	7.7	6.7	6.1
理论最终含水率/%	26.5	24.2	22.6	21.6	20.9
实测最终含水率/%	25.5	23.2	21.8	20.9	20.1
差值/%	1.0	1.0	0.8	0.7	0.8

3 膨胀应力系数的变化规律

3.1 试验土样的基本物理参数

试验分别选取了四川成都弱膨胀土、云南呈贡强膨胀土、四川成都粉质黏土、细砂土 4 种不同的土类进行试验测试(表 2)。

表 2 试验土样的基本物理参数

Table 2 Basic physical parameters of the test soil samples

土样	土的类型	自由膨胀率/%	试样干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
呈贡膨胀土	强膨胀土	120	1.6
成都膨胀土	弱膨胀土	60	1.6
成都粉质黏土	普通土	13	1.6
成都细砂土	普通土	0	1.6

试样按照《岩土工程勘察规范》建议的方法, 进行自由膨胀率试验, 分别测得 4 种土样的自由膨胀率。按照膨胀土膨胀性的分类, 呈贡膨胀土的自由膨胀率大于 100%, 定为强膨胀土, 成都膨胀土自由膨胀率为 60%, 定为弱膨胀土。成都粉质黏土和细砂土的自由膨胀率远低于 40% 的临界值, 为普通土。试验时, 控制所有土的干密度为 1.6 g/cm^3 , 所有试样均为体积 60 cm^3 的环刀样。通过重塑的方法, 制备不同初始含水率的试样, 进行吸水膨胀应力系数试验。

3.2 连续吸水试验的全过程曲线特征

图 3 是初始含水率为 15.0%、干密度为 1.6 g/cm^3 的呈贡强膨胀土重塑土试样膨胀吸水全过程曲线。在开始时, 虽然试样在吸水, 但并没有产生明显的膨胀应力, 随着吸水量的增加, 在含水率增量达到 2.8% 时, 曲线出现了第一个明显的拐点(A 点), 膨胀应力达到 29.4 kPa。之后, 随着吸水量的增加, 膨胀应力大幅增加, 近似呈线性增加。在含水率增量达到 6.2% 时, 吸水膨胀曲线出现第二次拐点(B 点), 膨胀应力达到 395.3 kPa。之后, 吸水膨胀曲线逐渐趋于平缓, 膨胀应力不再显著增加, 试样吸水膨胀逐渐停止。

到达 C 点时, 土体膨胀应力基本稳定, 不再表现出膨胀。

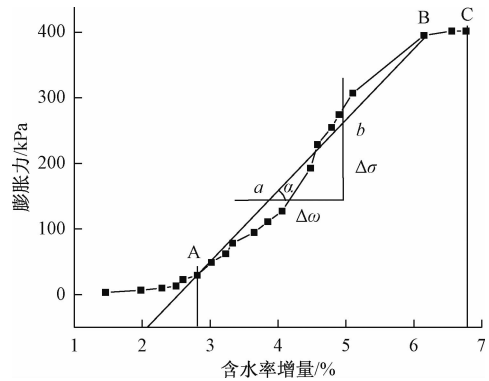


图 3 呈贡膨胀土吸水膨胀过程试验曲线

Fig. 3 Test curve of water absorption and expansion process of the Chenggong expansive soil

试验测试曲线的形态和发展趋势与理论曲线的形态基本上是相似的。吸水膨胀全过程曲线直线段部分的斜率, 可以看作是膨胀土试样吸水膨胀应力系数。如呈贡强膨胀土, 当其初始含水率 15.0%、干密度 1.6 g/cm^3 时, 通过吸水膨胀全过程曲线计算得到其吸水膨胀应力系数是 $92.2 (\text{kPa}/\%)$, 即重塑呈贡膨胀土含水率每增加 1.0%, 其膨胀应力将会增加 92.2 kPa。

3.3 呈贡强膨胀土的吸水膨胀应力系数试验结果

根据上述实验方法, 制备干密度均为 1.6 g/cm^3 重塑呈贡膨胀土试样 15 个, 配置 10.0%, 15.0%, 18.0%, 20.0%, 23.0% 不同含水率试样, 每个含水率配置 3 个平行样进行试验。经试验数据整理后, 云南呈贡强膨胀土不同初始含水率试样膨胀力与吸水量的关系如图 4 所示。

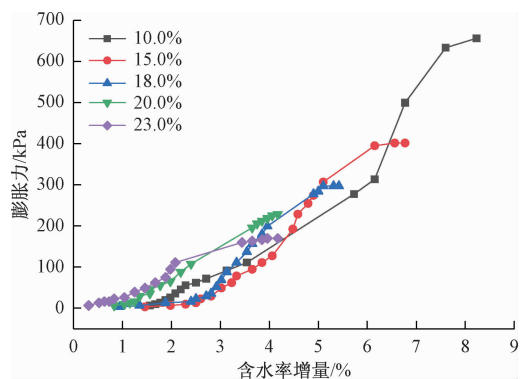


图 4 呈贡膨胀土不同初始含水率试样膨胀过程曲线

Fig. 4 Curve of expansion process of different initial moisture content of the Chenggong expansive soil

为了进行不同试样试验结果的对比,根据吸水膨胀试验方法,数据仅截取吸水膨胀曲线拐点之前的数据,进行膨胀系数的分析讨论。

对于 10.0% ~ 23.0% 的不同初始含水率的试样,其膨胀力都是随着含水率的增加而不断增大的趋势,说明水量进入土体确实引起了土体的膨胀。初始含水率越小,其产生的膨胀力越大。如:初始含水率 10.0% 的试样,其膨胀力可以达到 650 kPa,而当初始含水率达到 23.0% 时,试样的膨胀力为 150 kPa,二者相差有 4 倍之多,充分说明初始含水率对膨胀力的影响是较大的。

通过对比 5 条试验曲线,在保证干密度相同即相同质量的重塑样时,发现其初始含水率不同,其膨胀力随着吸水量增加的曲线斜率也不同,大致为:初始含水率越小,其拟合曲线的斜率越大。反之,初始含水率越大,拟合曲线的斜率越小。根据拟合曲线的斜率,呈贡强膨胀土膨胀系数的变化范围为 47.3 ~ 95.1 (kPa/%)。

以初始含水率 15.0%、初始干密度 1.6 g/cm^3 的呈贡膨胀土试样为例,其膨胀应力系数为 92.2 (kPa/%),即呈贡膨胀土每增加 1.0% 的含水率,其膨胀力增加 92.2 kPa,可见其膨胀性能是较强的。

3.4 成都弱膨胀土吸水膨胀应力系数试验结果

根据上述实验方法,制备干密度均为 1.6 g/cm^3 的重塑成都膨胀土试样 15 个,配置 10.0%、15.0%、18.0%、20.0%、23.0% 不同含水率试样,每个含水率配置 3 个平行样进行试验。经试验数据整理后,成都膨胀土不同初始含水率试样膨胀力与吸水量的关系如图 5 所示。

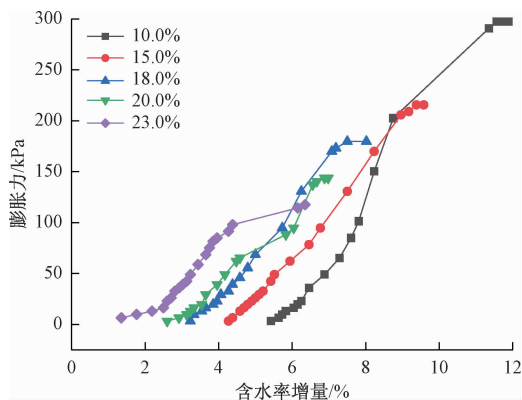


图 5 成都膨胀土不同初始含水率试样膨胀过程曲线
Fig.5 Curve of expansion process of different initial moisture content of the Chengdu expansive soil

对于不同初始含水率 10.0% ~ 23.0% 的重塑成都弱膨胀土试样,其膨胀力都呈随着吸水量的增加而

不断增大的趋势,说明水量进入土体确实引起了土体的膨胀。初始含水率越小,其产生的膨胀力越大。如:初始含水率 10.0% 的试样,其膨胀力可以达到 300 kPa,而当初始含水率达到 23.0% 时,试样的膨胀力为 120 kPa,二者相差有 2 ~ 3 倍,充分说明初始含水率对膨胀力的影响是较大的。

通过对比 5 条试验曲线,在保证干密度相同即相同质量的重塑样时,发现其初始含水率不同,其膨胀力随着吸水量增加的曲线的斜率也不同,大致为:初始含水率越小,其拟合曲线的斜率越大。反之,初始含水率越大,拟合曲线的斜率越小。根据拟合曲线的斜率,呈贡强膨胀土的膨胀系数的变化范围为 26.8 ~ 49.9 (kPa/%)。

以初始含水率 15.0%、初始干密度 1.6 g/cm^3 的成都弱膨胀土试样为例,其膨胀应力系数为 42.6 (kPa/%),即成都膨胀土每增加 1.0% 的含水率,其膨胀力增加 42.6 kPa,可见其膨胀应力还是较大的。

4 试验结果的讨论与分析

4.1 膨胀土吸水膨胀应力系数变化规律的讨论

对比呈贡强膨胀土和成都弱膨胀土不同含水率试样吸水膨胀应力系数的大小(表 3),可以看到,2 种膨胀土的吸水膨胀应力系数均随着初始含水率的增加逐渐降低,呈贡强膨胀土的吸水膨胀应力系数从 10.0% 含水率的 95.1 (kPa/%)衰减到 23.0% 含水率的 47.3 (kPa/%)。呈贡强膨胀土的吸水膨胀系数从 10.0% 含水率的 49.9 (kPa/%)衰减到 23.0% 含水率的 26.8 (kPa/%)。说明初始含水率对试样膨胀性能的影响是显著的。

表 3 呈贡强膨胀土和成都弱膨胀土不同含水率试样膨胀应力系数对比

初始含水率/%	10.0	15.0	18.0	20.0	23.0
呈贡强膨胀土/(kPa/%)	95.1	92.2	83.5	72.2	47.3
成都弱膨胀土/(kPa/%)	49.9	42.6	41.9	33.8	26.8
呈贡/成都	1.91	2.17	2.00	2.13	1.76

按照文献[2]中膨胀土的自由膨胀率标准,呈贡膨胀土的自由膨胀率为 120%,属于强膨胀土,成都膨胀土的自由膨胀率为 60%,属于弱膨胀土。对应的膨胀应力系数,呈贡膨胀土的膨胀应力系数总体上是成

都膨胀土的 1.76 ~ 2.17 倍,平均是 1.9 倍。也就是说,膨胀应力系数和自由膨胀率有较好的对应关系,可以用来进行土体膨胀性的判别。

在土体膨胀性的判别时,文献[2]中规定,土体的自由膨胀率是将试样粉碎成 0.5 mm 试样,烘干后进行自由膨胀率试验,所有试样的初始试验条件是相同的。对于膨胀应力系数试验,也应规定试样的基本的初始条件,作为不同土类膨胀性的对比试验。

4.2 膨胀应力系数作为膨胀性分类的初始条件

在对土的膨胀性研究中,影响土膨胀性的含水率参数有缩限和胀限。其中,缩限是土体失水收缩的界限,低于缩限时,土体将会开裂破坏。胀限是土体吸水膨胀的最大含水量,是土体膨胀的上限。因此,在膨胀应力系数的试验中,缩限含水率对应的膨胀应力系数是土体吸水膨胀最强烈时的膨胀参数。建议选择土体缩限含水率对应的膨胀应力系数作为膨胀性分类的初始条件。土体缩限的确定则应以土体天然干密度和天然含水率为基础,进行土体的收缩试验,根据试验曲线确定土体的缩限含水量。

对于成都膨胀土和呈贡膨胀土,通过天然含水率和天然干密度的收缩试验,确定其缩限含水率分别为 15.0% 和 18.0%。因此,作为统一对比,成都膨胀土的膨胀系数为初始含水率 15.0% 时对应的收缩系数 42.6 (kPa/%);呈贡膨胀土的膨胀系数为初始含水率 18.0% 时对应的膨胀系数 83.5 (kPa/%)。以此为膨胀系数的确定原则,通过积累大量的试验数据,可以建立根据膨胀系数进行土体膨胀性分类的方法。

4.3 膨胀应力系数在土体分类中的应用

为研究膨胀应力系数在土体膨胀性分类方面的应用,选择了将普通土和膨胀土进行对比试验研究。配制相同初始干密度 1.6 g/cm³ 的环刀重塑试样,初始含水率为 15.0% 的成都粉质黏土、粉细砂土进行了膨胀应力系数测试,并将其试验结果与呈贡膨胀土、成都膨胀土进行综合对比(表 4)。

表 4 不同土类的膨胀系数

Table 4 Expansion coefficients of different soils

土类	呈贡强 膨胀土	成都弱 膨胀土	成都粉 质黏土	成都粉 细砂土
吸水膨胀应力系数/(kPa/%)	92.2	42.6	0.9	0
自由膨胀率/%	120	60	13	0

通过表 4 中数据可以看出,在相同初始条件下,呈贡强膨胀土、成都弱膨胀土、成都粉质黏土、成都粉砂土的膨胀系数差异显著,是能够将不同土类的膨胀性

进行区别的。

5 结论与建议

(1)通过研制的膨胀过程试验装置,可以有效地测试岩土体的膨胀应力和膨胀应力系数,为深入认识岩土体的膨胀机理提供了丰富的试验数据。

(2)强弱膨胀土吸水过程试验结果表明,膨胀应力系数能够有效区分岩土体的膨胀性,与规范中的自由膨胀率判别方法有较好的对应性,可以应用膨胀应力系数进行岩土体膨胀性的分类研究。

(3)不同土类的对比实验结果表明,用论文的方法,不同土类的膨胀性的差异是能够用膨胀应力系数来区分的。限于时间和条件,论文研究成果还需要不断的积累数据和进一步完善。

参考文献 (References):

- [1] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. [Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for investigation of geotechnical engineering: GB50021—2001 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)]
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 膨胀土地区建筑技术规范: GB50112—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for buildings in expansive soil regions: GB50112—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)]
- [3] 中铁第一勘察设计院集团有限公司. 铁路工程特殊岩土勘察规程: TB10038—2012 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2015. [China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd. Code for special soil and rock investigation of railway engineering: TB10038—2012 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2015. (in Chinese)]
- [4] 中交第一公路勘察设计研究院有限公司. 公路工程地质勘察规范: JTG C20—2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011. [CCCC First Highway Consultants Co., Ltd. Code for highway engineering geological investigation: JTG C20—2011 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese)]
- [5] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程地质勘察规范: GB50487—2008 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2009. [Ministry of Water Resources of the People's

- Republic of China. Code for engineering geological investigation of water resources and hydropower: GB50487—2008[S]. Beijing: China Planning Press, 2009. (in Chinese)]
- [6] 张连杰,武雄,张耀国,等. 无荷条件下原状膨胀土膨胀特性分析[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(4): 96–100. [ZHANG L J, WU X, ZHANG Y G, et al. Analysis of swelling characteristics of the original expansive soils without loads [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(4): 96–100. (in Chinese)]
- [7] 周建普,李献民,王永和. 潭邵高速公路膨胀土特性与外部影响因素的关系[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(5): 79–82. [ZHOU J P, LI X M, WANG Y H. Relation of exterior influencing factors and characteristics of swelling soil in Xiangtan-Shaoyang expressway [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2003, 30(5): 79–82. (in Chinese)]
- [8] 林睦曾. 岩石热物理学及其工程应用[M]. 重庆:重庆大学出版社, 1991. [LIN M Z. Rock thermal physics and applying [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1991. (in Chinese)]
- [9] 漆宝瑞,秦小林. 膨胀土的膨胀系数、收缩系数求解及应用[J]. 铁道标准设计, 2005(6): 11–14. [QI B R, QIN X L. Derivation and application on expansion coefficient and contraction coefficient of expansion soil [J]. Railway Standard Design, 2005(6): 11–14. (in Chinese)]
- [10] 缪协兴,陈智纯. 软岩力学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 1995. [MIAO X X, CHEN Z C. Soft rock mechanics [M]. Xuzhou, China: China University of Mining & Technology Press, 1995. (in Chinese)]
- [11] 郭永春,陈伟乐,赵海涛. 膨胀土吸水过程的试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(4): 108–112. [GUO Y C, CHEN W L, ZHAO H T. Experimental research of water-uptake process of the expansive soil [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(4): 108–112. (in Chinese)]
- [12] 章李坚. 膨胀土膨胀性与收缩性对比试验研究[D]. 成都:西南交通大学, 2014. [ZHANG L J. Experimental research for comparing swelling and shrinkage of expansive soil [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese)]
- [13] 陈伟乐. 膨胀土膨胀性与强度衰减关系的试验研究[D]. 成都:西南交通大学, 2016. [CHEN W L. The study on comparing the swelling and strength characters of expansive soil [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese)]
- [14] 赵海涛. 改制三轴仪测试膨胀土吸水膨胀系数的试验研究[D]. 成都:西南交通大学, 2017. [ZHAO H T. The experimental study of the coefficient of expansion about expansive soil by restructured triaxial apparatus [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese)]

编辑:张明霞