

文章编号:1673-9469(2021)03-0007-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2021.03.002

# 利用最大面积收缩率对膨胀土进行判别与分类的试验研究

韩少阳<sup>1,2</sup>,王保田<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098;

2. 河海大学 江苏省岩土工程技术工程研究中心,江苏 南京 210098)

**摘要:** 提出一种对膨胀土进行判别和分类的新指标——最大面积收缩率(SCR),其定义为最大面积收缩率试验中试样干燥后收缩裂隙的总面积与试样初始面积的比值。通过对不同地区土样开展试验,研究了制样初始含水率、初始厚度、接触面粗糙度以及环境温度对试验结果的影响,并对SCR作为膨胀土判别与分类指标的可靠度进行了分析,最终提出了利用SCR对膨胀土进行分类的界限指标。试验结果表明:初始含水率和界面粗糙度对SCR用于膨胀土的判别和分类没有影响;当初始厚度限制在8 mm以内时,可以忽略厚度对试验结果的影响;建议烘干温度为105 ℃。SCR与蒙脱石含量、阳离子交换量线性相关,能较好地反应膨胀土的胀缩特性;SCR与标准吸湿含水率和塑性指数线性相关,体现出利用SCR对膨胀土进行判别与分类具有较高的可信度。最大面积收缩率试验操作简单、周期短且可重复性高。

**关键词:** 膨胀土;最大面积收缩率;判别及分类

**中图分类号:** TU44

**文献标识码:** 文献标识码:A

## Experimental Study on Identification and Classification of Expansive Soil Using Maximum Area Shrinkage-cracking Ratio

HAN Shaoyang<sup>1,2</sup>, WANG Baotian<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

**Abstract:** An index parameter called the maximum area shrinkage-cracking ratio (SCR) was proposed in this paper. It was defined as the ratio of the total area of shrinkage cracks of soil after drying to the initial surface area of the soil sample in a standardized mold. The effect of four factors namely, initial water content, initial sample thickness, mold surface roughness and test temperature were investigated using the soil samples from many different regions. After that, the reliability of using SCR to classify expansive soil was analyzed. Finally, the classification of expansive soil by SCR is proposed. The test results show that the initial water content and mold roughness have little influence on the identification and classification. When the sample initial thickness is limited to 8 mm, the influence can be ignored. The recommended drying temperature is 105 ℃. Besides, SCR is linearly correlated with the montmorillonite content and cation exchange capacity, which can reflect the nature of expansive soil; The linear correlations between SCR and standard moisture absorption water content and plasticity index indicate that it is highly reliable to identify and classify expansive soil using SCR. The maximum area shrinkage-cracking ratio test is simple and credible.

**Key words:** expansive soil; maximum area shrinkage-cracking ratio; identification and classification

收稿日期:2021-06-07

基金项目:江苏省普通高校学术学位研究生科研创新计划项目(KYZZ16\_0270);中央高校基本业务经费资助项目(2017B647X14);国家自然科学基金资助项目(51778211)

作者简介:韩少阳(1990-),女,内蒙古锡林浩特人,博士研究生,主要从事岩土工程专业软土地基处理和岩土工程测试方面的研究。

膨胀土是一种高塑性、强亲水性的特殊黏土<sup>[1]</sup>。不同地区膨胀土的胀缩性质差别很大,对具体工程的影响大小不同。因此,对膨胀土胀缩等级进行判别分类尤为重要。目前,膨胀土的判别与分类方法主要有两类,一类是直接指标法,该方法的操作方案较为复杂,且需要精密的仪器,不适合常规的工程实践。另一类是间接指标法,该方法简单易行,具有一定的科学依据,在工程建设中经常被使用<sup>[2-3]</sup>。膨胀土地区建筑技术规范(GB 50112—2013)<sup>[4]</sup>提出的按自由膨胀率划分膨胀土膨胀潜力的方法是目前最常用的判别方法之一,这种方法的主要缺点是操作复杂,对操作人员的要求相对较高,试验时间较长。公路路基设计规范(JTG30—2015)<sup>[5]</sup>提出了将标准吸湿含水率作为判别膨胀土等级的依据。标准吸湿含水率指标具有较高的可信度。但是测试方法需要严格的试验条件,在工程中难以大范围实践。众所周知,膨胀土具有显著的干缩开裂特性<sup>[6]</sup>。膨胀土的失水收缩开裂现象主要与其中富含黏土矿物及其强亲水性有关。许多研究表明,膨胀土的收缩性随黏粒含量尤其是蒙脱石含量的增加而显著增强<sup>[7-8]</sup>。因此,研究土体的收缩特性对分析土体的矿物组成和膨胀性有着重要的意义。缩限和 Liner Shrinkage<sup>[9]</sup>是两种用于表征黏土收缩特性的指标。Holtz 等<sup>[10]</sup>和 Altmeyer<sup>[11]</sup>通过大量试验提出了利用缩限对膨胀土进行分类和判别的标准。但是缩限的测量对操作人员有着很强的依赖性。Liner Shrinkage 是指土样干燥后的长度与初始长度的比值(土样的初始状态为泥浆),与缩限相比线缩率试验更容易进行,且重复性极高,可以更加准确地描述土体的收缩特性。然而土体的收缩同时会产生很多裂隙,线性收缩试验中仅通过测量土样的长度变化而忽略了裂隙的面积会低估真实的收缩量。

基于上述理论,本文通过对 Liner Shrinkage 方法进行改进,引入了一种对膨胀土进行判别分类的新指标,即最大面积收缩率(Maximum area shrinkage-cracking ratio, SCR)。此外,本文还讨论了 SCR 试验的影响因素,并对 SCR 的可信度和可靠性进行了分析。

## 1 试验材料和方法

### 1.1 试验用土及材料

试验所用膨胀土分别取自中国 8 个不同地区(图 1)以及美国科罗拉多州的 2 个不同地区,土样

基本性质如表 1 所示。试验所用收缩圆盘为金属材质,直径为 152 mm,高度为 24 mm(图 2)。圆盘表面为黑色哑光、光滑、耐高温的喷涂铁氟龙涂料,可以降低圆盘内腔侧面对土体粘聚力,黑色材料可以提高土体与圆盘的对比度,哑光特性可以有效地避免相机采集图像数据时产生反光而引起的误差。

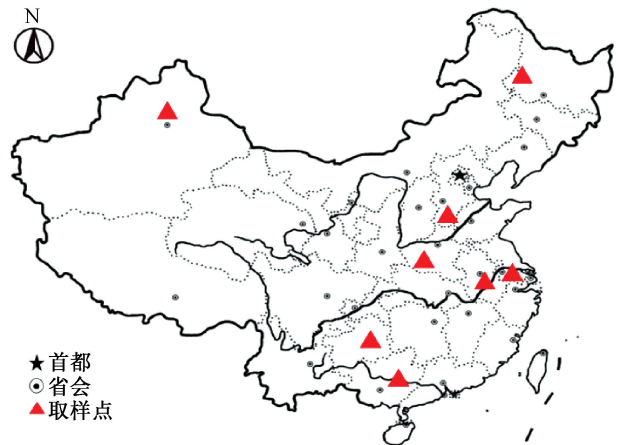


图 1 试验用土分布图

Fig. 1 Locations of sampling areas

表 1 膨胀土的基本性质

Tab. 1 Basic properties of expansive soils

试样 编号	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	黏粒 含量 ( $< 2 \mu\text{m}$ )	自由 膨胀率 /%	取样 地点
S1	51.2	21.6	29.6	30.0	64	合肥
S2	38.5	20.7	17.8	11.0	30	南京
S3	38.7	22.4	16.3	10.0	24	南京
S4	89.5	42.0	47.5	34.0	80	贵州
S5	33.5	20.5	13.0	14.0	49	佳木斯
S6	62.9	22.6	40.3	33.0	115	邯郸
S7	65.9	20.3	45.6	39.0	100	克拉玛依
S8	56.3	22.5	33.8	34.0	75	南阳
S9	70.5	22.1	48.4	41.0	110	南阳
S10	57.6	24.5	33.1	40.0	107	南宁
S11	61.0	23.3	37.7	—	—	科罗拉多 州,美国
S12	29.5	19.0	10.5	—	—	科罗拉多 州,美国

### 1.2 试验方法

本试验以初始饱和的泥浆作为研究对象,主要因为泥浆质地均匀,操作简单,易于制备,且试验的重复性强。试验的具体步骤为:(1)将取回的土样风干敲碎,称取一定量的膨胀土碎块,按液限的 1.1~2.0 倍加入蒸馏水,充分搅拌均匀,配制初始饱和泥浆。值得注意的是,为保证泥浆试样不



图2 收缩试验圆盘  
Fig.2 The test disc

受土体初始干密度影响,在每次试验称取干土时,应保证干土质量和体积一致;(2)搅拌均匀后称取定量的泥浆,缓缓倒入收缩圆盘,轻轻震动圆盘以排除气泡并使试样表面平整;(3)将制作好的试样水平放入控温烘箱烘干至不再收缩;(4)将烘干试样取出,放置于光照条件充足的试验台上。将数码相机固定在试样正上方,对试样表面进行拍照。拍照后通过图像处理软件 ImageJ 对图像进行分析,并根据公式(1)对最大面积收缩率指标进行计算。试验过程如图3所示。

$$SCR = \frac{S_0 - S_n}{S_n} \times 100\% \quad (1)$$

式中:SCR—土体的最大面积收缩率(%); $S_0$ —土体初始面积( $cm^2$ ); $S_n$ —烘干后土块的面积( $cm^2$ )。

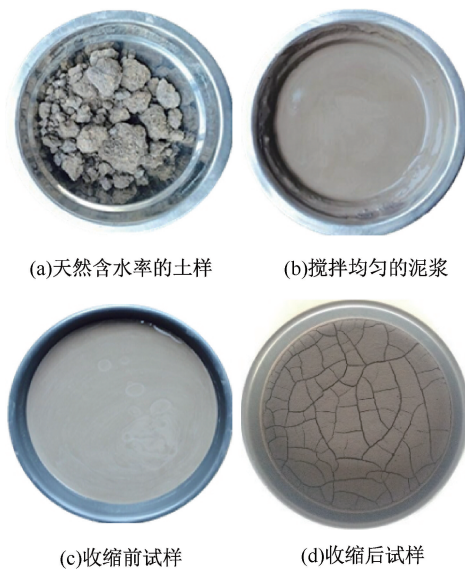


图3 试验过程示意图  
Fig.3 Testing procedures

为了研究初始含水率对试验结果的影响,试验选取编号为S3,S4,S5以及S7的土样,分别配制初始含水率为1.1,1.2,1.4,1.5,1.6,1.7,1.8以及2.0倍液限的饱和泥浆试样进行试验,其中每个含水率条件下分别设置2个平行试样,根据试验

结果选定合适的初始含水率对其他影响因素进行研究。

为了研究试样厚度对试验结果的影响,试验挑选编号为S3,S5,S7以及S10的土样,每个编号的土样分别配制5,6,7,8,10,12 mm以及14 mm厚度的泥浆试样,其中每个厚度条件下设置2个平行试样,根据试验结果选定合适的初始试样厚度对其他影响因素进行研究。

为了探究温度对试验结果的影响,选取编号为S4的土样,共配制6组试样,分别放置于温度为25℃、60℃和105℃的烘箱中进行烘干,其中每个温度条件下同时放置2个平行试样,根据试验结果选定合适的烘干温度对其他影响因素进行研究。

## 2 试验结果

### 2.1 初始含水率对 SCR 的影响

图4给出了编号为S3,S4,S5以及S7的土样在不同初始含水率条件下(1.1~2.0倍液限)的试验结果及统计数据(均值和标准差)。结果显示,在不同初始含水率条件下,SCR值均无明显变化,四组土样中标准差最大(试样S7)仅为2.27%,体现出数据较小的离散性,可以认为,初始含水率对SCR几乎没有影响。值得注意的是,初始含水率不同导致SCR数值的微小波动对膨胀土的判别和分类(见下文)均没有影响。

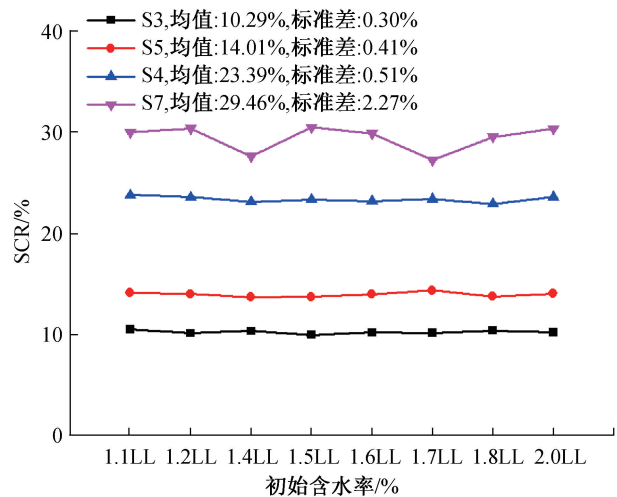


图4 不同初始含水率下最大面积收缩率试验结果  
Fig.4 Results of maximum area shrinkage-cracking ratio test with different initial water content.

### 2.2 初始厚度对 SCR 的影响

利用图像处理技术只能对膨胀土试样表面收

缩和开裂进行分析,而试样的收缩实际上是由两部分组成的:横向面积的收缩和垂直方向的收缩。因此,研究试样厚度对判别结果的影响至关重要。本文根据唐朝生<sup>[12]</sup>提出的填充法对4组土样干燥后的收缩和裂隙体积进行测量。图5给出了不同初始厚度下干燥结束后试样的平均最大体积收缩率 $\delta_v$ 和最大面积收缩率SCR。从图5中可以看出,当初始试样厚度限制在8 mm以内时,平均最大体积收缩率 $\delta_v$ 和平均最大面积收缩率SCR值非常接近,可以忽略厚度对试验结果的影响。这主要是因为当试样初始厚度小于8 mm时,样品厚度较薄,因此假设裂隙可以贯穿整个土层,且裂隙沿深度方向截面呈矩形。而当试样土层厚度较大时,会产生顶部较宽、底部较窄的裂隙,此时体积收缩不能简化为面积收缩。综上所述,当试样初始厚度在8 mm以内时,试样的收缩开裂特征可通过测量表面的最大面积收缩率SCR来对膨胀土进行判别。

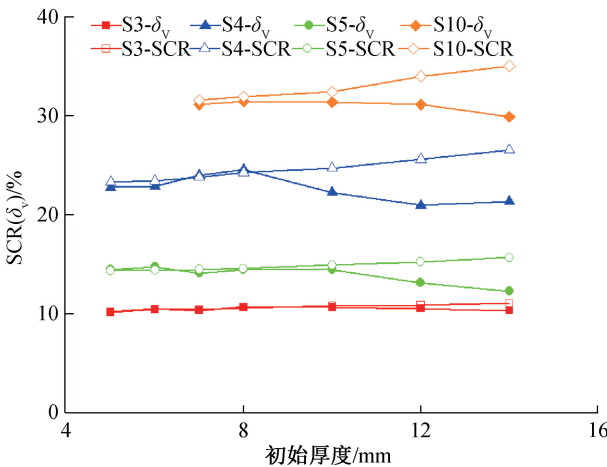


图5 不同初始厚度下最大面积收缩率试验结果  
Fig. 5 Results of maximum area shrinkage-cracking ratio test with different initial thickness

### 2.3 界面粗糙度对SCR的影响

为了分析接触条件对试验结果的影响,选取编号为S6的土样,通过在试验收缩圆盘底部涂抹凡士林来减少界面摩擦,研究界面接触特性对最大面积收缩率判别结果的影响。图6和图7分别给出了两种不同粗糙度下试样的收缩开裂过程。从试样收缩过程可以看出,当圆盘底部未涂抹凡士林时,土体在干燥过程中表面会率先出现一些裂隙,随着干燥的持续进行,裂隙会逐渐扩展直至相交,最终形成裂隙网络。而在圆盘底部涂抹了凡士林的土样在干燥过程中呈整体均匀收缩,未在土体中形成常规裂隙。根据公式(1)计算可得

涂抹凡士林的试样SCR为“29.25”,未涂抹凡士林的试样SCR为“30.97”。显然,无论是否使用凡士林,得到的平均最大面积收缩率SCR值均在30%左右,说明接触条件对土样表面收缩开裂的几何结构有一定影响,但对最大面积收缩率SCR指标的影响不大。

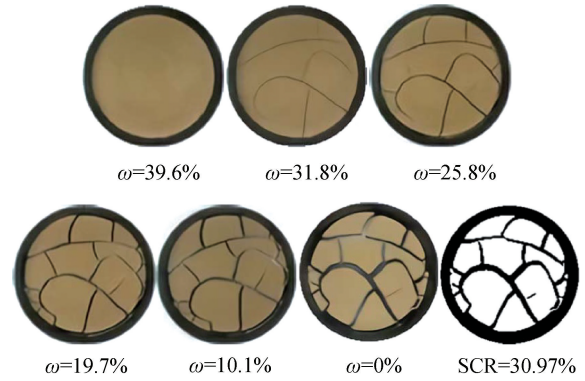


图6 圆盘底部未涂抹凡士林  
Fig. 6 Mold surface without Vaseline

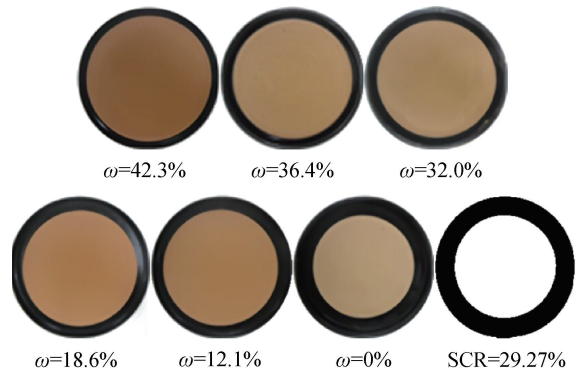


图7 圆盘底部涂抹凡士林  
Fig. 7 Mold surface with Vaseline

### 2.4 温度环境对SCR的影响

为了研究温度环境对SCR的影响,选取编号为S4的土样配制泥浆,分别在3种不同温度(105℃、60℃和25℃)下进行烘干。试验结果表明:105℃、60℃和25℃下的平均SCR分别为23.39%、21.17%和19.32%,最大收缩率随温度的升高而明显增大。这主要是由于在较高温度下孔隙中的残余含水量较小,导致颗粒间距减小,裂纹扩展增大。通常认为,在105℃下烘干的试样最终残余含水量为0,试样已经达到收缩极限,因此,选取105℃作为最大面积收缩率试验的烘干温度。

### 3 判别与分类标准

通过自由膨胀率指标 $\delta_{ef}$ 对膨胀土进行判别是目前工程实践中最广泛使用的方法。因此,本文

参考自由膨胀率  $\delta_{ef}$  与最大面积收缩率 SCR 的关系,对膨胀土的分类界限值进行确定,自由膨胀率试验按《土工试验方法标准》<sup>[13]</sup> 进行。

自由膨胀率  $\delta_{ef}$  与最大面积收缩率 SCR 的关系如图 7 所示。为了提高试验的准确性,除上述 S1—S10 试样外,本文又添加了 82 组样本进行试验。由图 8 可知,随着  $\delta_{ef}$  增加,SCR 增大,SCR 与  $\delta_{ef}$  呈现较好的线性关系。本文在自由膨胀率  $\delta_{ef}$  分类基础上建立了最大面积收缩率 SCR 的分类标准,结果如表 2 所示。

表 2 膨胀土膨胀潜势等级判定标准  
Tab. 2 Classification of soil expansivity

SCR/%	自由膨胀率 $\delta_{ef}/\%$	膨胀等级
SCR < 15	$\delta_{ef} < 40$	非膨胀土
15 ≤ SCR < 20	40 ≤ $\delta_{ef}$ < 65	弱膨胀土
20 ≤ SCR < 25	65 ≤ $\delta_{ef}$ < 90	中膨胀土
SCR ≥ 25	$\delta_{ef} \geq 90$	强膨胀土

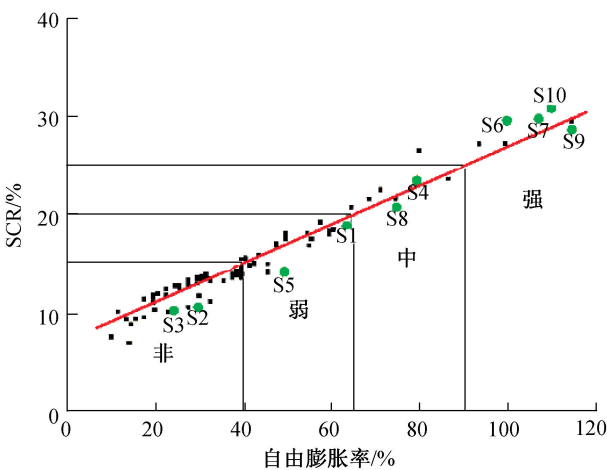


图 8 最大面积收缩率与自由膨胀率的关系  
Fig. 8 Maximum area shrinkage-cracking ratio versus free swelling index

## 4 讨论和验证

### 4.1 最大面积收缩率可信度分析

从矿物学角度出发,膨胀土的胀缩性主要取决于黏土矿物的种类和含量,其中蒙脱石含量是膨胀土胀缩的物质基础;而阳离子交换量可以反应膨胀土晶格的吸附能力,是膨胀土胀缩的外在影响因素<sup>[14]</sup>。所以,研究最大面积收缩率与蒙脱石含量以及阳离子交换量的关系具有重要意义。

图 9 与图 10 分别给出了土样 SCR 与蒙脱石含量以及阳离子交换量的关系。可以看出,SCR

与蒙脱石含量线性关系较好,其相关系数为  $R^2 = 0.86$ ;SCR 与阳离子交换量之间也呈线性关系,相关系数  $R^2 = 0.82$ 。由此可见,SCR 与蒙脱石含量以及阳离子交换量具有良好的相关性,这说明最大面积收缩率可以反映膨胀土的本质特性,作为膨胀土判别和分类的指标具有较高的可信度。

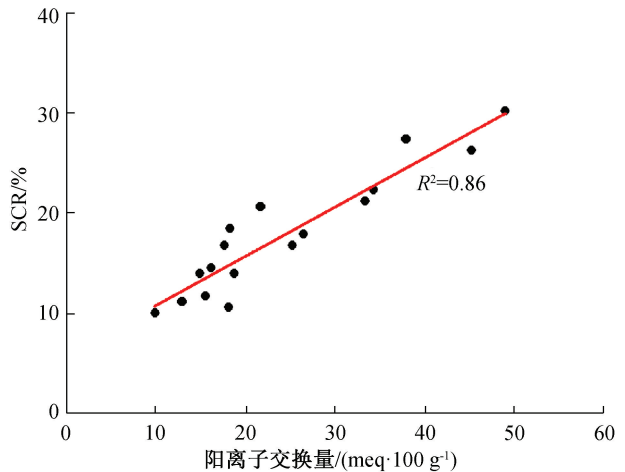


图 9 最大面积收缩率与阳离子交换量之间的关系  
Fig. 9 Relationship between maximum area shrinkage ratio and cation exchange capacity (CEC)

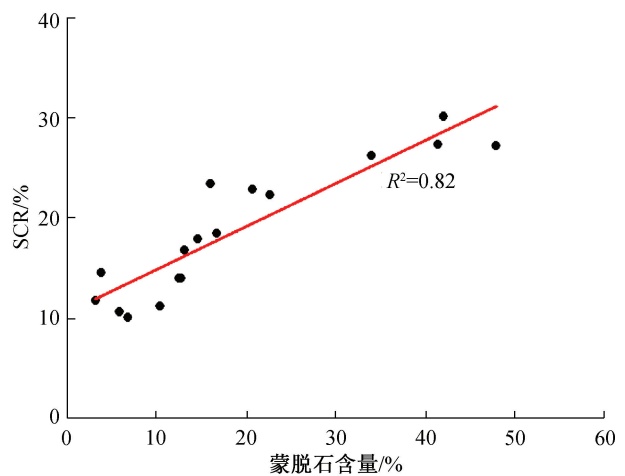


图 10 最大面积收缩率与蒙脱石含量之间的关系  
Fig. 10 Relationship between maximum area shrinkage ratio and montmorillonite content

### 4.2 最大面积收缩率与其他判别方法的比较

《公路路基设计规范》(JTG D20—2015)提出了按标准吸湿含水率和塑性指数进行判别和分类的方法。其中塑性指数可以反映土颗粒与水的相互作用,在一定程度上反映了土体的亲水性<sup>[15]</sup>;而标准吸湿含水率与比表面积、阳离子交换量和蒙脱石含量之间存在线性关系,这两项指标也经常用于工程实践中。为了研究最大面积收缩率 SCR 作为分类指标的准确性,本文研究了最大面积收缩率 SCR 与

塑性指数和标准吸湿含水率之间的关系。

图 11 与图 12 为 SCR 与塑性指数和标准吸湿含水率之间的关系图。可以看出,SCR 与塑性指数  $I_p$ 、标准吸湿含水率线性关系良好,其相关系数接近于 1 (相关系数分别为  $R^2 = 0.93$  与  $R^2 = 0.97$ ),说明最大面积收缩率作为膨胀土判别和分类指标的可靠度很高。

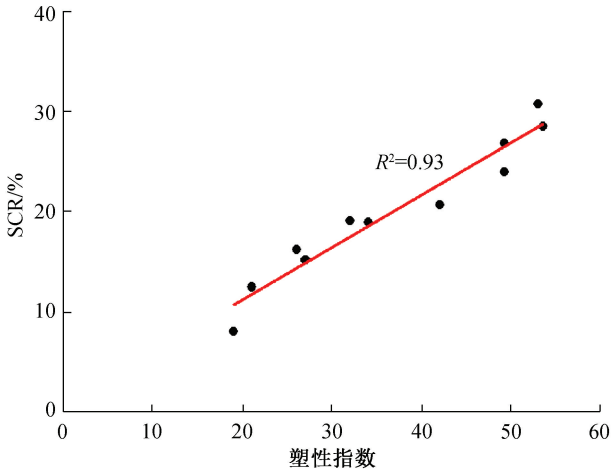


图 11 最大面积收缩率与塑性指数之间的关系

Fig. 11 Relationship between maximum area shrinkage ratio and plasticity index

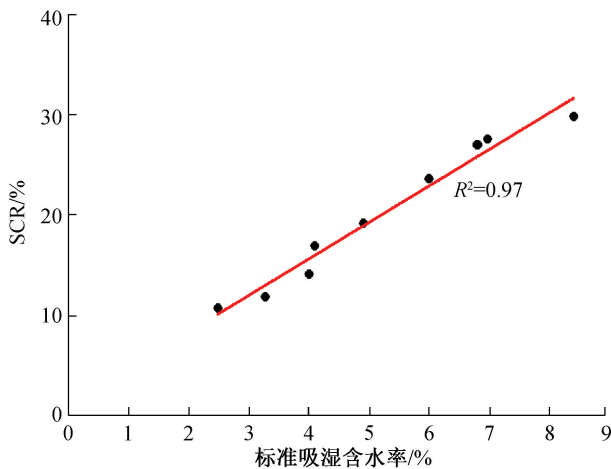


图 12 最大面积收缩率与标准吸湿含水率之间的关系

Fig. 12 Relationship between maximum area shrinkage ratio and standard moisture

## 5 结论

本文提出利用最大面积收缩率 SCR 指标对膨胀土进行判别及分类,该方法具有简便、可靠、重复性高、周期短、对试验环境无限制且不需要复杂仪器的优点。通过大量的平行室内试验和统计分析,研究了试验的影响因素,验证了该指标的可行性,可以得到如下几点结论:

1) 初始含水率和界面粗糙度对最大面积收缩率用于膨胀土的判别和分类没有影响。当初始厚度限制在 8 mm 以内时,可以忽略厚度对试验结果的影响。建议试验条件为:初始含水率为 1.8 倍液限,初始试样厚度为 5 mm,烘干温度为 105 ℃。

2) 最大面积收缩率与蒙脱石含量和阳离子交换量相关性良好,线性相关系数分别为 0.82 和 0.86,说明最大面积收缩率可以反映膨胀土的本质属性。

3) 最大面积收缩率与塑性指数和标准吸湿含水率呈良好的线性关系,其相关系数分别为 0.93 与 0.97,说明最大面积收缩率方法具有很强的可靠性。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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): 1895-1900.
- [3] 龚壁卫, 鞠佳伟, 叶艳雀. 用电导率测定自由膨胀率的方法研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(8): 1280-1283.
- [4] GB 50112—2013, 膨胀土地区建筑技术规范[S].
- [5] JTGD 30—2015, 公路路基设计规范[S].
- [6] 周明涛, 杨 森, 秦健坤, 等. 土壤裂隙研究的回顾与展望[J]. 土壤通报, 2017, 48(4): 988-995.
- [7] VOGEL H J, HOFMANN H, ROTH K. Studies of Crack Dynamics in Clay Soil I: Experimental Methods, Results, and Morphological Quantification[J]. Geoderma, 2005, 125: 203-211.
- [8] 唐朝生, 施 斌, 刘 春. 膨胀土收缩开裂特性研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(5): 663-673.
- [9] BSI. BS 1377-3: 1990, Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes (Chemical and Electro-chemical Tests) [S].
- [10] HOLTZ W G, GIBBS H J. Engineering Properties of Expansive Clays [J]. Transactions of ASCE, 1956, 121(1): 641-663.
- [11] DAWSON R F, ALTMAYER W T, BARBER E S, et al. Discussion of "Engineering Properties of Expansive Clays" [J]. Transactions of the ASCE, 1956, 121(1): 664-675.
- [12] 唐朝生, 崔玉军, TANG Anh-Min, 等. 膨胀土收缩开裂过程及其温度效应[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2181-2187.
- [13] GB/T 50123—2019, 土工试验方法标准[S].
- [14] 余 颂, 陈善雄, 许锡昌, 等. 膨胀土的自由膨胀比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(Z1): 3330-3335.
- [15] 余 颂, 陈善雄, 余 飞, 等. 膨胀土判别与分类的 Fisher 判别分析方法[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 499-504.

(责任编辑 王利君)