

DOI: 10.11779/CJGE202208019

基于国标试验的黏土真实缩限值确定

周葆春, 单丽霞, 郎梦婷, 李 颖

(信阳师范学院河南省非饱和土与特殊土工程技术研究中心/建筑与土木工程学院, 河南 信阳 464000)

摘 要: 提出了一种黏土真实缩限值的确定方法, 修正了《土工试验方法标准: GB/T 50123—2019》“缩限试验”与“收缩试验”方法测试步骤和数据处理。采用 6 种黏土开展泥浆样“缩限试验”与泥浆固结样“收缩试验”, 将 GB/T 50123—2019 方法与所提方法获得的缩限结果进行了系统性的比较, 结果表明: ①由基于“缩限试验”的泥浆样与“收缩试验”的泥浆固结样获得的真实缩限值几乎相同, 表明缩限取值与所采用的试验方法无关而具有唯一性。②GB/T 50123—2019 中“缩限试验”“收缩试验”方法确定出的缩限值约为真实缩限值的 2.7 倍。③真实缩限状态下, 土是非饱和的, 其饱和度介于 22%~57%。GB/T 50123—2019 高估缩限的原因是: “缩限试验”方法假定收缩至体积不变时土是饱和的; “收缩试验”方法用收缩曲线初始线性段与最终水平段的交点而非收缩至体积不变点确定缩限。

关键词: 黏土; 缩限; 稠度界限; 缩限试验; 收缩试验; 泥浆样; 泥浆固结样

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4858(2022)08-1535-06

作者简介: 周葆春(1978—), 男, 教授, 主要从事非饱和土与特殊土力学方面的研究工作。E-mail: zhoubc@xynu.edu.cn。

Identifying true shrinkage limit of clay by updating experiments in Chinese standard GB/T 50123—2019

ZHOU Bao-chun, SHAN Li-xia, LANG Meng-ting, LI Ying

(Henan Unsaturated Soil and Special Soil Engineering Technology Research Center, College of Architecture and Civil Engineering,
Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)

Abstract: The methods to determine the true shrinkage limit of clay are proposed by updating both the testing procedure and the data processing of the shrinkage limit and shrinkage test methods in the Chinese standard for geotechnical testing method (GB/T 50123—2019). The shrinkage limit tests on slurry specimens and the shrinkage tests on reconstituted specimens of six types of clay are carried out. A systemic comparison is carried out between the specified shrinkage limits in GB/T 50123—2019 and the true shrinkage ones yielded by the proposed methods. The conclusions are drawn as follows: (1) The true shrinkage limits obtained from the slurry specimens (shrinkage limit tests) almost coincide with those obtained from the reconstituted specimens (shrinkage tests). This agreement indicates the true shrinkage limit is independent of testing methods, which is an inherent property denoting the consistency limit of clay. (2) The shrinkage limits given by the original methods in GB/T 50123—2019 are about 2.7 times larger than the true ones. (3) Upon the true shrinking limit, the clays are all unsaturated with the saturation between 22 % and 57 %. The reasons of the overestimation of the original standard-specified methods are speculated as: The method for the shrinkage limit tests assumes that the soil is saturated at the end of shrinking, while that for the shrinkage tests uses the intersection of the initial best-fitting inclined straight line and the final horizontal straight line of the shrinkage curve as the shrinkage limit.

Key words: clay; shrinkage limit; consistency limit; shrinkage limit test; shrinkage test; slurry; reconstituted specimen

0 引 言

土的缩限是 Atterberg (1911) 提出的稠度界限之一, 最早被 Terzaghi (1925) 引入土力学, 指湿土干燥(脱湿)过程中, 土从半固态转变为固态时的含水率^[1], 低于该含水率土体积不再收缩^[2](即土体不再收缩时对应的最大含水率^[3])。《岩土工程基本术语标准: GB/T 50279—2014》^[4]中缩限定义为: 饱和黏性土的含

水率因干燥减少至体积不再变化时的界限含水率。值得注意的是, 虽然黏土的收缩行为^[5-7]及其收缩曲线^[8-9]的研究成果非常丰富, 但有关于土的缩限^[10]的研究较少。本文工作聚焦于缩限的准确确定。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11772290); 信阳师范学院“南湖学者奖励计划”青年项目

收稿日期: 2021-06-23

作为黏土重要的物理性质指标之一，缩限的确定方法大体分 2 类。

第 1 类方法针对扰动样（泥浆样），将土制成含水率稍大于液限的泥浆，填入收缩皿后排气，刮平试样表面，擦净收缩皿外部，测试样质量与体积（收缩皿容积），将收缩皿试样风干至颜色变淡，烘干后测干土质量与烘干后体积（认为不再收缩时的体积与烘干后体积相同），在假定收缩至体积不变时土是饱和的前提下计算出缩限。英国标准 BS 1377—2:1990^[2]与 ASTM D427—04^[11]均采用此法，由于体积量测采用汞，后均因安全原因被撤回。ASTM D4943—18^[12]与《土工试验方法标准：GB/T 50123—2019》^[13]中“9.5 缩限试验”用蜡封（浮称）法取代汞测烘干后体积，是现行的国内外标准。

第 2 类方法针对原状样与压实样（块状样），将圆柱试样（或环刀试样）置于收缩皿上风干，试验过程中测试样体积收缩（或高度变化）与质量变化，直至试样体积不变为止，从而获得试样的收缩曲线（用体积变化/线缩率/孔隙比—含水率关系表达），在收缩曲线上用初始线性段与最终水平段的交点确定缩限。BS 1377—2:1990^[2]即采用该方法，亦由于其体积量测采用汞被撤回。GB/T 50123—2019^[13]中“26 收缩试验”采用该方法，与 BS 方法^[2]不同的是：采用百分表量测试样高度变化以获得线缩率，避免了采用汞造成的危害。

以上 2 类缩限确定方法存在的问题是：第 1 类方法假定收缩至体积不变时土是饱和的，实际上土体收

缩至体积不变时，土是非饱和的，假定饱和，高估了缩限；第 2 类方法在收缩曲线上用初始线性段与最终水平段的交点而非收缩至体积不变点确定缩限，与缩限的定义不符，亦高估了缩限。

为此，本文从缩限定义^[4]出发，分别建议了基于“缩限试验”与“收缩试验”的真实缩限值确定方法，并采用 6 种黏土开展系统的“缩限试验”与“收缩试验”，结果表明：由基于“缩限试验”的泥浆样与“收缩试验”的泥浆固结样获得的真实缩限值几乎相同；GB/T 50123—2019 中“缩限试验”、“收缩试验”方法确定出的缩限值约为真实缩限值的 2.7 倍；真实缩限状态下，土是非饱和的，其饱和度介于 22%~57%。本文试图为在土工测试中更准确地确定缩限提供参考。

1 研究方案

1.1 试验土样

试验采用 6 种土样：荆门黄褐色膨胀土、Denver claystone、荆门棕褐色膨胀土、信阳黏土、武汉黏土、三门峡粉质黏土，其物理性质指标测试结果见表 1。

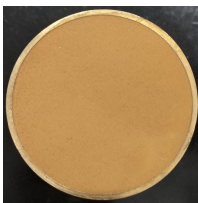
1.2 缩限试验

参照 GB/T 50123—2019^[13]中“9.5 缩限试验”方法，将含水率稍大于液限的泥浆填入收缩皿开展缩限试验。收缩皿规格为：直径 5 cm，高 3 cm。缩限试验开始时的 6 种泥浆试样照片见图 1。

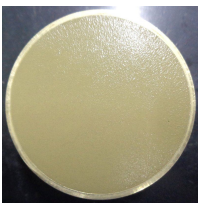
与国标方法有区别的是：将泥浆试样室内风干至

表 1 试验用土的物理性质指标
Table 1 Physical property indices of test soils

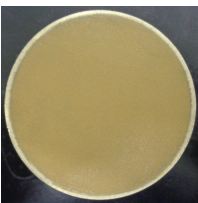
土样名称	$G_s^{[13]}$	> 0.075 mm/% ^[13]	$0.005\sim 0.075$ mm/% ^[13]	$0.002\sim 0.005$ mm/% ^[13]	< 0.002 mm/% ^[13]	液限 /% ^[13]	塑限 /% ^[13]	塑性指 数 ^[13]	USCS 定名 ^[14]	比表 面积 EGME /(m ² ·g ⁻¹) [15]	CEC (NH ₄ ⁺) /(mmol·kg ⁻¹) [13]	标准 吸湿 含水 率/% [16]	自由 膨胀 率/% [17]	膨胀 潜势 [17]
荆门黄褐色膨胀土	2.75	2.1	47.4	21.5	29.0	62.9	25.5	37.4	CH	236.5	309	7.3	75	中
Denver claystone	2.72	8.5	44.2	20.6	26.7	46.0	23.2	22.8	CL	88.7	160	3.8	38	—
荆门棕褐色膨胀土	2.72	11.6	42.4	26.7	19.3	41.8	20.7	21.1	CL	110.4	254	5.1	40	弱
信阳黏土	2.72	0.5	57.0	13.3	29.1	41.6	18.8	22.8	CL	110.2	206	4.8	40	弱
武汉黏土	2.73	5.5	63.9	9.6	21.0	40.3	18.2	22.1	CL	112.5	154	3.7	39	—
三门峡粉质黏土	2.72	0.5	82.8	5.7	11.1	35.2	19.1	16.1	CL	108.5	149	4.3	30	—



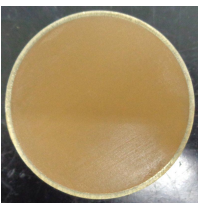
(a)荆门黄褐色膨胀土



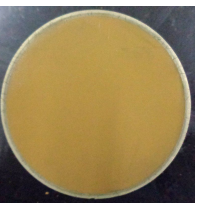
(b)Denver claystone



(c)荆门棕褐色膨胀土



(d)信阳黏土



(e)武汉黏土



(f)三门峡粉质黏土

图 1 缩限试验开始时的泥浆试样

Fig. 1 Slurry specimens of shrinkage limit tests

试样与收缩皿脱开后, 将试样置于收缩仪上风干至百分表读数不变 (体积不变) 为止, 见图 2, 此时测试样质量, 根据此状态 (体积不变) 下的质量与干土质量确定出含水率, 即为真实缩限值 (土体积不再收缩时对应的最大含水率)。

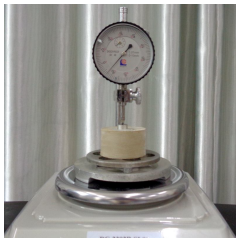


图 2 缩限试验试样置于收缩仪上风干(Denver claystone)

Fig. 2 Specimen dried on shrinkage apparatus

其余试验步骤均按国标方法执行。《土工试验标准: GB/T 50123—2019》^[13]中缩限公式为

$$w_s = \left(0.01w' - \frac{V_0 - V_d}{m_d} \cdot \rho_w \right) \times 100\% \quad , \quad (1)$$

式中, w_s 为缩限 (%), w' 为泥浆制备含水率 (%), V_0 为收缩皿容积 (cm^3), V_d 为烘干后土的体积 (cm^3), m_d 为烘干后土的质量 (g), ρ_w 为水的密度 (g/cm^3)。其中, $V_0 - V_d$ 指收缩过程中土的体积收缩量, 乘以水的密度 ρ_w , 是由于收缩减少的水的质量; 但是, 土样开始收缩时是饱和的, 达到缩限状态时是非饱和的, 式 (1) 没有考虑由饱和状态过渡到非饱和状态减少的水质量, 即假定了缩限相应的含水状态是饱和的。

1.3 收缩试验

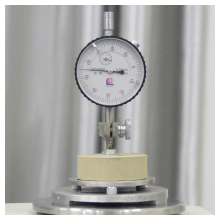
参照 GB/T 50123—2019^[13]中“26 收缩试验”方法开展试验。为更好地比对试验结果, 采用泥浆固结样, 其制备方法为: 将土样风干、碾散、过 0.5 mm 筛, 在真空搅土器中加水至 2 倍液限搅拌均匀后, 倒入固结容器; 再置入高压固结仪施加目标固结压力 (本文为 34.7 kPa)。固结完成后, 将试样推出用保鲜膜包好, 试验前用环刀沿泥浆固结样竖向切取环刀试样。

与国标方法有区别的是: 试验过程中测记百分表读数 (目的是获得线缩率 δ) 与称质量 (目的是获得含水率 w) 时记录风干历时 t , 试验结束后, 绘制 δ 与 w 为双 y 轴、 t 为 x 轴的双 y 轴图, 由线缩率不变的起始点找到同一时刻对应的含水率, 即为真实缩限值 (土体积不再收缩时对应的最大含水率)。

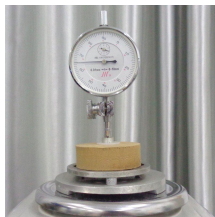
其余试验步骤均按国标方法执行。收缩试验过程中的试样照片见图 3。



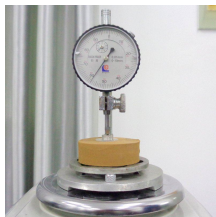
(a) 荆门黄褐色膨胀土



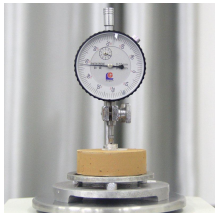
(b) Denver claystone



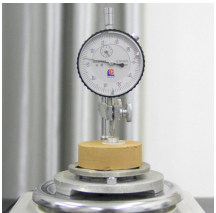
(c) 荆门棕褐色膨胀土



(d) 信阳黏土



(e) 武汉黏土



(f) 三门峡粉质黏土

图 3 收缩试验过程照片

Fig. 3 Shrinkage tests on 6 types of clay

2 试验结果分析

2.1 缩限试验

采用 GB/T 50123—2019^[13]中“9.5 缩限试验”方法测得 6 种土样缩限试验数据 w' , V_0 , V_d , m_d 见表 2, 假定水的密度为 $1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$ (文中水的密度均作此假定), 代入式 (1) 获得缩限 w_s 列入表 2。

基于土的三相图, 缩限 w_s 与相应饱和度 S_r (%) 的关系为

$$S_r = \frac{\frac{m_d w_s}{V_d - \frac{m_d}{G_s \rho_w}}}{\rho_w} \times 100\% \quad , \quad (2)$$

式中, G_s 为土粒相对质量密度, 6 种土样的 G_s 见表 1。据式 (2) 计算 S_r 列入表 2, 可见 S_r 介于 93%~99%, 表明处于饱和状态, 证实: 国标方法是在假定收缩至体积不变时土是饱和的前提下计算缩限。

表 2 6 种土样缩限试验数据

Table 2 Shrinkage limit test data of 6 types of clay

试验土样	w' /%	V_0 / cm^3	V_d / cm^3	m_d /g	w_s /%	S_r /%
荆门黄褐色膨胀土	79.9	59.88	24.62	51.116	10.9	93
Denver claystone	60.7	59.61	33.56	60.942	18.0	98
荆门棕褐色膨胀土	56.9	59.69	32.27	63.292	13.6	95
信阳黏土	47.5	59.4	36.06	70.222	14.3	98
武汉黏土	44.6	58.97	36.00	72.193	12.8	97
三门峡粉质黏土	45.5	59.73	38.50	72.433	16.2	99

计算出饱和度不是 100%, 有以下原因: ①初始泥浆不一定完全饱和; ②收缩皿口不一定完全刮平; ③试样烘干前后可能有体积变化; ④水的密度不一定

等于 1.0 g/cm³；⑤土粒相对质量密度 G_s 有偏差可能等。但从另一视角看，6 种土样，最小偏差 1%，最大偏差 7%，是一个较为理想的推算。

将收缩皿试样置于收缩仪上风干至体积不变时的试样质量 m 、烘干后土的质量 m_d 、烘干后土的体积 V_d 列在表 3 中，由缩限的定义（土体积不再收缩时对应的最大含水率）确定出真实缩限 w_s ：

$$w_s = \frac{m - m_d}{m_d} \times 100\% \quad (3)$$

由表 3 可见真实缩限比国标方法测得的缩限（表 2）要低 39%~77%，偏差幅度较大。假定试样烘干前后体积不变（实测数据表明偏差在 1%以内），根据式（2）计算 S_r 列入表 3，可见其饱和度介于 22%~57%，证实“实际上土体收缩至体积不变时，土是非饱和的，假定饱和，高估了缩限。”

表 3 6 种土样真实缩限状态（基于缩限试验）

Table 3 Physical properties of 6 types of clays under realistic state of shrinkage limit based on the shrinkage limit test

试验土样	m /g	m_d /g	V_d /cm ³	w_s /%	S_r /%
荆门黄褐色膨胀土	54.56	51.116	24.62	6.7	57
Denver claystone	63.43	60.942	33.56	4.1	22
荆门棕褐色膨胀土	66.93	63.292	32.27	5.7	40
信阳黏土	74.31	70.222	36.06	5.8	40
武汉黏土	74.99	72.193	36.00	3.9	29
三门峡粉质黏土	75.43	72.433	38.50	4.1	25

2.2 收缩试验

采用 GB/T 50123—2019^[13]中“26 收缩试验”方法测得 6 种土样用线缩率 δ （%）与含水率 w （%）表达的收缩曲线见图 4，在收缩曲线上用初始线性段与最终水平段的交点确定出缩限及其相应的线缩率。可

见其确定的缩限与缩限的定义不符：交点相应线缩率均小于体积不变时的线缩率，交点相应含水率均高于收缩至体积不变时的最大含水率，即国标方法得到的缩限高估了缩限值。

从缩限定义（土体积不再收缩时对应的最大含水率）出发，采用以下步骤，求取真实缩限值：①绘制线缩率 δ -含水率 w -时间 t 双 y 轴图（图 5）；②从 δ - t 关系曲线上找到 δ 最大值（代表线缩率不变，即体积不变）的起始点（脱湿过程中，体积不变条件下，这一点对应的含水率最大），确定出相应 t 值；③由 t 值在 w - t 关系曲线上确定出相应 w 值，即为真实缩限值。

将基于收缩试验结果的国标方法与本文方法获得的缩限列入表 4，可见真实缩限值比国标方法测得的缩限值要低 43%~76%，幅度亦很大。将土体积不再收缩时的质量 m 、干土质量 m_d 、烘干后土的体积 V_d 列入表 4，根据式（2）计算得到真实缩限对应的 S_r （表 4），可见其饱和度介于 22%~47%，再次证实“土体收缩至体积不变时，土是非饱和的”。

表 4 6 种土样的收缩试验数据

Table 4 Shrinkage test data of 6 types of clay

试验土样	国标方法 w_s /%	本文方法 w_s /%	w_s 降幅 /%	土体积不再收缩时			
				m /g	m_d /g	V_d /cm ³	S_r /%
荆门黄褐色膨胀土	11.6	6.6	43	69.42	65.093	32.80	47
Denver claystone	16.9	4.0	76	82.41	79.270	43.63	22
荆门棕褐色膨胀土	14.1	6.1	57	82.56	77.833	40.65	39
信阳黏土	15.2	6.4	58	82.16	77.246	40.15	42
武汉黏土	13.0	3.7	72	87.29	84.140	43.61	24
三门峡粉质黏土	15.0	4.1	73	85.81	82.440	45.52	22

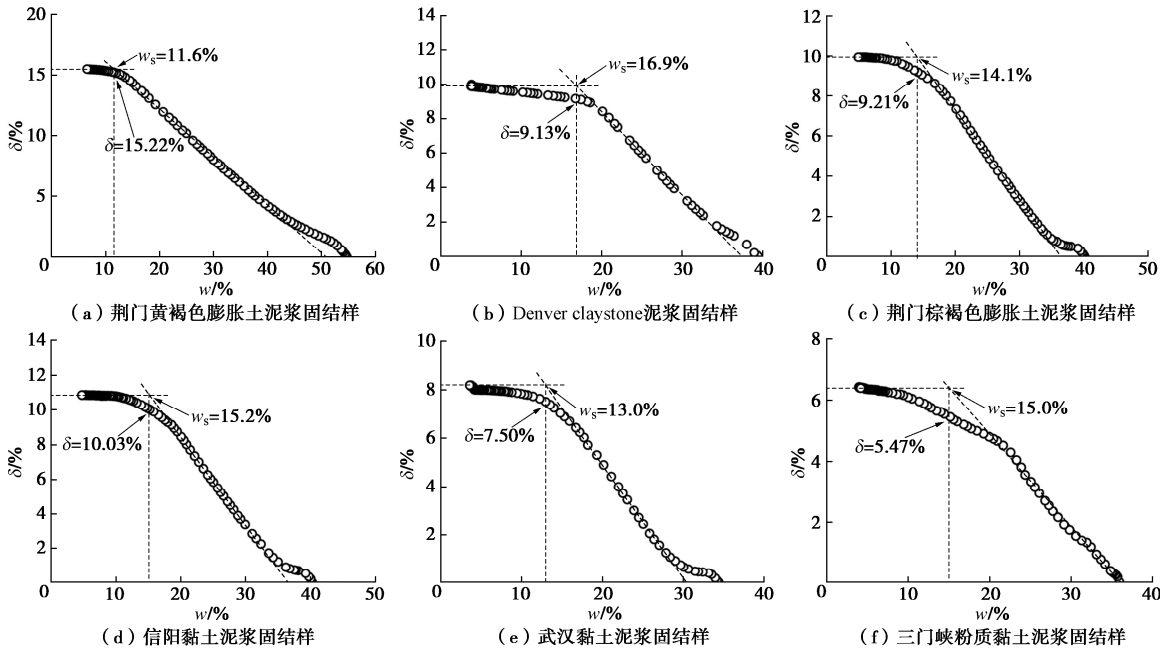


图 4 由收缩试验确定缩限（国标方法）

Fig. 4 Shrinkage limits determined by shrinkage tests proposed by GB/T 50123—2019

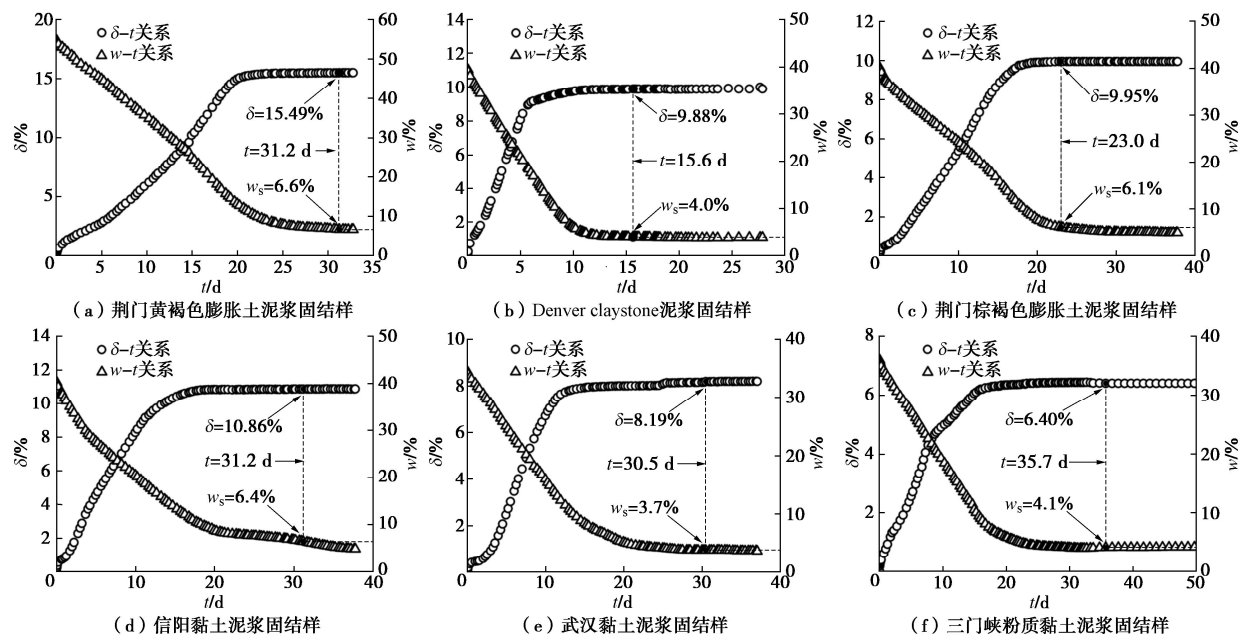


图 5 由收缩试验确定缩限 (本文方法)

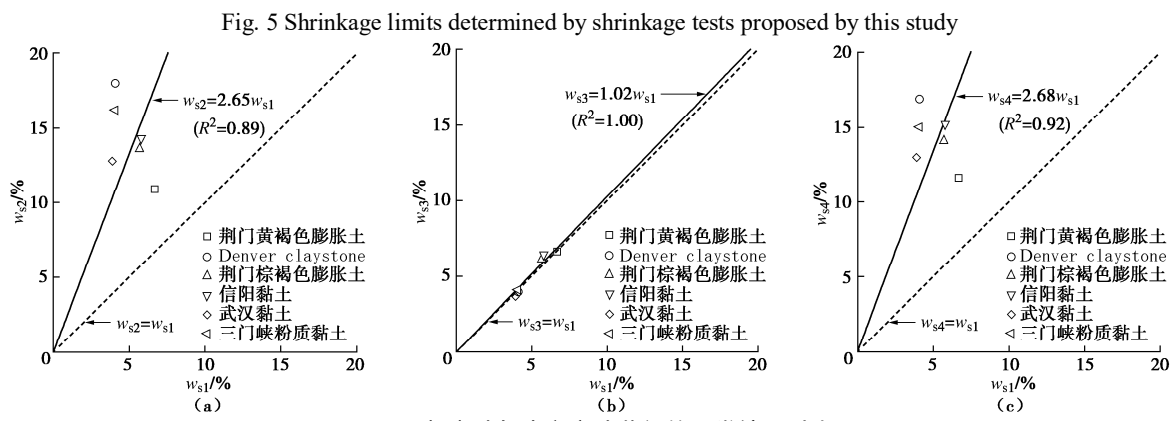


图 6 国标方法与本文方法获得的 4 类缩限对比

Fig. 6 Comparison of shrinkage limits determined by GB/T 50123—2019 and this study

3 讨 论

与缩限同为稠度界限的液限与塑限的定义和试验方法均针对扰动样,从这个意义上讲,由基于扰动样(泥浆样)的缩限试验而非基于原状样与压实样(块状样)的收缩试验确定出的缩限更符合稠度界限的物理实质。

因此,采用由缩限试验获得的真实缩限值作为比较的基准,探讨基于缩限试验与收缩试验的国标方法与本文方法获得的 6 种黏土的 4 类缩限之间的量化关系,为便于比较,4 类缩限值依次命名为 w_{s1} , w_{s2} , w_{s3} , w_{s4} , 见表 5, 其对比见图 6。

由 w_{s2} 与 w_{s1} 的对比可见: $w_{s2} = 2.65w_{s1}$, $R^2 = 0.89$;表明 GB/T 50123—2019 中“9.5 缩限试验”方法获得的缩限值大约为真实缩限值的 2.7 倍, $R^2 = 0.89$, 表明二者间具有较好的相关性。

由 w_{s3} 与 w_{s1} 的对比可见: $w_{s3} = 1.02w_{s1}$, $R^2 = 1.00$;表明采用泥浆样的缩限试验与采用泥浆固结样的收缩试验获得的真实缩限值非常接近,几乎相同,

缩限作为稠度界限之一,取值与试验方法无关而具有唯一性。

表 5 国标方法与本文方法获得的 4 类缩限值

Table 5 Shrinkage limits determined by GB/T 50123—2019 and this study (%)				
试验土样	缩限试验		收缩试验	
	本文方法	国标方法	本文方法	国标方法
	w_{s1}	w_{s2}	w_{s3}	w_{s4}
荆门黄褐色膨胀土	6.7	10.9	6.6	11.6
Denver claystone	4.1	18.0	4.0	16.9
荆门棕褐色膨胀土	5.7	13.6	6.1	14.1
信阳黏土	5.8	14.3	6.4	15.2
武汉黏土	3.9	12.8	3.7	13.0
三门峡粉质黏土	4.1	16.2	4.1	15.0

对比 w_{s4} 与 w_{s1} 可见: $w_{s4} = 2.68w_{s1}$, $R^2 = 0.92$, 表明 GB/T 50123—2019 中“26 收缩试验”获得的缩限值亦大约为真实缩限值的 2.7 倍, $R^2 = 0.92$ 表明二者间亦具有较好的相关性。

此处需要补充说明的是: 2.7 倍是统计结果,不具普适性;表 5 表明这个倍数介于 1.6~4.4,具有相当大的离散性。

4 结 论

(1) 基于缩限定义, 在 GB/T 50123—2019 中“9.5 缩限试验”方法基础上, 建议: 将泥浆试样室内风干至与收缩皿脱开后, 将试样置于收缩仪上风干至百分表读数不变为止, 据此状态下的质量与干土质量确定出真实缩限值。

(2) 基于缩限定义, 在 GB/T 50123—2019 中“26 收缩试验”方法基础上, 建议: 试验过程中测记百分表读数与称质量时记录风干历时 t , 试验结束后, 绘制线缩率与含水率为双 y 轴、时间为 x 轴的双 y 轴图, 由线缩率不变的起始点找到同一时刻对应的含水率, 即真实缩限值。

(3) 由基于“缩限试验”的泥浆样与“收缩试验”的泥浆固结样获得的真实缩限值几乎相同, 表明作为稠度界限之一的缩限, 取值与所采用的试验方法无关而具有唯一性。

(4) 6 种黏土试验结果表明: GB/T 50123—2019 中“9.5 缩限试验”“26 收缩试验”方法确定出的缩限值约为真实缩限值的 2.7 倍, 偏差是相当大的。

(5) 6 种黏土试验结果表明: 真实缩限状态下, 土是非饱和的, 其饱和度介于 22%~57%。

(6) GB/T 50123—2019 高估缩限的原因是: “缩限试验”方法假定收缩至体积不变时土是饱和的; “收缩试验”方法用收缩曲线初始线性段与最终水平段的交点而非收缩至体积不变点确定缩限。

参考文献:

- [1] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013. (LI Guang-xin, ZHANG Bing-yin, YU Yu-zhen. Soil Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese))
- [2] British Standard Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes-Part 2: Classification Tests: BS 1377—2:1990[S]. London: British Standards Institution, 1990.
- [3] Standard Terminology Relating to Soil, Rock, and Contained Fluids: ASTM D653—21[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2021.
- [4] 岩土工程基本术语标准: GB/T 50279—2014[S]. 2015. (Standard for Fundamental Terms of Geotechnical Engineering: GB/T 50279—2014 [S]. 2015. (in Chinese))
- [5] 栾茂田, 汪东林, 杨庆, 等. 非饱和和重塑土的干燥收缩试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(1): 118 - 122. (LUAN Mao-tian, WANG Dong-lin, YANG Qing, et al. Experimental study on drying shrinkage of unsaturated compacted soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(1): 118 - 122. (in Chinese))
- [6] 唐朝生, 施斌, 崔玉军. 高放废物地质处置库中缓冲回填材料的收缩特征[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(7): 1192 - 1200. (TANG Chao-sheng, SHI Bin, CUI Yu-jun. Shrinkage characteristics of buffer-backfilling materials in high-level radioactive waste geological disposal[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(7): 1192 - 1200. (in Chinese))
- [7] 赵贵涛, 韩仲, 邹维列, 等. 干湿、冻融循环对膨胀土土水及收缩特征的影响[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(6): 1139 - 1146. (ZHAO Gui-tao, HAN Zhong, ZOU Wei-lie, et al. Influences of drying-wetting-freeze-thaw cycles on soil-water and shrinkage characteristics of expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(6): 1139 - 1146. (in Chinese))
- [8] CHEN P, LU N. Generalized equation for soil shrinkage curve[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, 144(8): 04018046.
- [9] LI L, ZHANG X. A new approach to measure soil shrinkage curve[J]. Geotechnical Testing Journal, 2019, 42(1): 1 - 18.
- [10] HOBBS P R N, JONES L D, KIRKHAN M P, et al. A new apparatus for determining the shrinkage limit of clay soils[J]. Geotechnique, 2014, 64(3): 195 - 203.
- [11] Standard Test Method for Shrinkage Factors of Soils by the Mercury Method: ASTM D427—04[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2004.
- [12] Standard Test Method for Shrinkage Factors of Cohesive Soils by the Water Submersion Method: ASTM 4943—18[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2018.
- [13] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 2019. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. 2019. (in Chinese))
- [14] 土工试验规程: SL237—1999[S]. 1999. (Specification of Soil Test: SL237—1999[S]. 1999. (in Chinese))
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. (LU Ru-kun. Agriculture Chemical Analysis Methods of Soil[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. (in Chinese))
- [16] 公路土工试验规程: JTG E40—2007[S]. 2007. (Test Methods of Soils for Highway Engineering: JTG E40—2007[S]. 2007. (in Chinese))
- [17] 膨胀土地区建筑技术规范: GB 50112—2013[S]. 2013. (Technical Code for Buildings in Expansive Soil Regions: GB 50112—2013[S]. 2013. (in Chinese))