

DOI: 10.11779/CJGE20240953

膨胀土自由膨胀率影响因素及试验机理研究

陈熠坤¹, 储 亚^{*1}, 蔡国军², 闫 超³, 刘松玉⁴, 韩爱民¹

(1. 南京工业大学交通运输工程学院, 江苏 南京 211816; 2. 安徽建筑大学, 安徽 合肥 230009; 3. 安徽省膨胀土力学与工程研究院, 安徽 合肥 236025; 4. 东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096)

摘要: 自由膨胀率是膨胀土膨胀性能判别和划分的重要参数, 现有的《土工试验规程: GB/T 50123—2019》中自由膨胀率试验影响因素较多, 试验机理尚不完善。亟需完善自由膨胀率试验机理以提高指标的科学性。以人工配置膨胀土为研究对象, 深入研究国内 GB/T 50123—2019 和美国 ASTM D5890—19 两种主流自由膨胀率试验方法, 讨论分析两种试验方法的影响因素和相关关系, 提出了基于质量体积比的自由膨胀率修正方法。研究结果表明, 土样类型、粒径、操作流程等因素都会对自由膨胀率 δ_{ef} (GB/T 50123—2019) 和膨胀指数 SI (ASTM D5890—19) 产生显著影响。对于同种土样而言, 粒径、颗粒形态引起的质量变化和操作流程中搅拌次数与遍数是自由膨胀率差异的主要原因。膨胀指数的变化受土膜覆盖程度影响。人工配置膨胀土中钠基膨润土占比增加, 使膨胀体积、自由膨胀率 δ_{ef} 和膨胀指数 SI 呈线性增加; 自由膨胀率和膨胀体积的增长速率受粒径和颗粒形态的影响明显。随钠基膨润土占比的提升, GB/T 50123 方法下, 土体比膨胀体积呈线性函数增加; ASTM D5890 方法下, 比膨胀体积则呈向下开口的幂函数关系增加。为屏蔽粒径导致的质量差异, 提出采用土颗粒相对质量密度 G_s 对土体自由膨胀参数进行修正, 修正后的真实自由膨胀体积 V_{tsf} 不会受到颗粒形态、粒径大小、密实度等与质量相关的因素影响, 且具有了更为严谨的物理意义, 能更有效地反映出土体固有的膨胀性能。

关键词: 膨胀土; 自由膨胀率; 膨胀指数; 影响因素; 试验机理

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)10-2195-09

作者简介: 陈熠坤(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事环境岩土工程等方面的研究。E-mail: 202261125022@njtech.edu.cn。

Study on influencing factors and experimental mechanism of free swelling rate of expansive soil

CHEN Yikun¹, CHUYa¹, CAI Guojun², YAN Chao³, LIU Songyu⁴, HAN Aimin¹

(1. College of Transportation Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China; 2. Anhui Jianzhu University, Hefei 230009, China; 3. Anhui Institute of Expansive Soil Mechanics and Engineering, Hefei 236025, China; 4. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Free swelling rate is a critical parameter for identifying and classifying swelling properties of expansive soils. In the current "Standard for Geotechnical Testing Method GB/T 50123—2019", numerous influencing factors affect free swelling rate tests, and the testing mechanism remains incomplete. It is crucial to refine the free swelling rate test mechanism to enhance the parameter's scientific validity. This study examines artificially prepared expansive soils, thoroughly investigating two main free swelling rate testing methods: China's GB/T 50123—2019 and the American ASTM D5890—19. The study discusses and analyzes the influencing factors and relationships between these methods, proposing a correction method for the free swelling rate based on mass-to-volume ratio. The results indicate that factors such as soil type, particle size, and operational procedures significantly impact the free swelling rate δ_{ef} (GB/T 50123—2019) and the swell index SI (ASTM D5890—19). For the

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(42225206); 国家自然科学基金青年项目(42202303); 江苏省自然科学基金青年项目(BK20220355); 安徽省膨胀土力学与工程研究院开放课题项目(AHPZY2023KF02); 江苏省地质工程环境智能监控工程研究中心开放基金项目(2023-ZNJKJJ-07); 江苏省“双创博士”计划项目(JSSCBS20210385); 江苏省高等学校自然科学研究项目(21KJB170019) National Science Fund for Distinguished Young Scholars (Grant No. 42225206), National Natural Science Foundation of China-Young Scientists Fund (CN) (Grant No. 42202303), Natural Science Foundation of Jiangsu Province-Basic Research Program (CN) (Grant No. BK20220355), Anhui Institute of Expansive Soil Mechanics and Engineering (AHPZY2023KF02), Jiangsu geological engineering environment Intelligent Monitoring Engineering Research Center (Grant No. 2023-ZNJKJJ-07), High Level Innovation and Entrepreneurial Research Team Program in Jiangsu (Grant No. JSSCBS20210385), Natural Science Research of Jiangsu Higher Education Institutions of China (Grant No. 21KJB170019).

收稿日期(Received): 2024-09-25 修回日期(Revised): 2025-02-26 接受日期(Accepted): 2025-03-13 网络出版日期(Online): 2025-03-14

*通信作者 (E-mail: chuya@njtech.edu.cn)

same soil sample, discrepancies in free swelling rates are primarily caused by variations in particle size, shape-induced mass changes, and stirring frequency. Swell index changes are influenced by the degree of soil film coverage. As the proportion of sodium bentonite in the prepared expansive soil increases, the swelling volume, free swelling rate (δ_{ef}), and swell index (SI) increase linearly, with the growth rates of the free swelling rate and swelling volume significantly affected by particle size and shape. With an increase in sodium bentonite proportion, the specific swelling volume of the soil exhibits a linear function increase under GB/T 50123, while it follows a downward-opening power function under ASTM D5890. To offset mass differences resulting from particle size, the study uses specific gravity G_s to correct the free swelling parameters of the soil. The corrected true free swelling volume V_{tsf} is not affected by particle shape, particle size, compaction, or other mass-related factors and exhibits greater physical rigor, effectively reflects the inherent swelling properties of the soil.

Key words: expansive soil; free swelling rate; swell index; influencing factor; testing mechanism

0 引 言

膨胀土因其吸水膨胀和脱水收缩的特性, 极易导致上部结构变形、开裂和沉陷等工程问题。在不同的原生条件下, 如土壤成分^[1]、含水率^[2]、干密度^[3]、干湿循环及冻融循环^[4]等因素的影响下, 膨胀土膨胀性能存在显著差异。因此, 如何精确、高效地对膨胀土进行分类判别及评估膨胀特性, 已成为岩土工程领域的重要研究课题。

目前, 国内外学者主要通过膨胀土的自由膨胀率来评估和预测膨胀潜势。自由膨胀率能够快速判别膨胀土颗粒在无结构力影响下的膨胀特性, 且设备简单、操作便捷, 广泛应用于土体膨胀性能评价中。然而, 中国现行的《土工试验规范: GB/T 50123—2019》^[5] (以下简称 GB/T 50123) 关于自由膨胀率 δ_{ef} 的测试机制尚不完善, 操作步骤也存在瑕疵, 导致测试结果偏差较大, 从而影响膨胀土膨胀潜能的评估。

松散土颗粒在水中和空气中的自由堆积体积差与在空气中自由堆积体积之比可用于判定无结构力下松散土粒的膨胀特性, 这一数值被定义为土体的自由膨胀率^[6]。然而, 相关研究表明, 自由膨胀率受到多种人为和环境因素的显著影响^[7]。粒径大小的差异也对自由膨胀率影响明显。10 mL 粒径为 0.25~0.5 mm 的土样质量比粒径小于 0.1 mm 的土样大 15%, 导致自由膨胀率偏差高达 42%^[8]; 同时, 小粒径比例较大的土体其自由膨胀率更低^[9]。此外, 搅拌次数对自由膨胀率影响较大。一次搅拌与二次搅拌后, 自由膨胀率的差异为 7%~17%^[10]。环境温度的变化同样会显著影响膨胀特性, 在低温条件下, 自由膨胀率可下降 43%^[11]。而对于粒径小于 0.075 mm 的膨胀土, 干湿循环次数的增加也会导致自由膨胀率明显变化^[12]。

针对 GB/T 50123 中的不足, 许多学者建议要缩短制样研磨过程, 勤过筛, 将筛分后的土样按合理的级配混合^[10], 或缩小试验土样粒径范围^[8]; 提高搅拌次数,

以第三次搅拌后的自由膨胀率数值为准^[7, 10]。Sridharan^[13]、Prakash 等^[14]提出采用土壤自由膨胀比代替自由膨胀率, 作为评价膨润土类型及膨胀性的新指标。现有的改进方法大多仅局限于对土颗粒粒径的限定, 未深入探讨自由膨胀试验中误差产生的机理, 对误差来源的解决方案也不够深入。要进一步提高自由膨胀率试验的准确性和可靠性, 要针对试验方法机理进提出针对性的修正方法。

除了 GB/T 50123 规范外, 美国 ASTM D5890—19^[15]标准 (以下简称 ASTM D5890) 的膨胀指数 (swell index SI) 也是评价土体膨胀性的重要参数, 具有应用范围广泛、试验设计严谨、设备简单等优点。然而, 由于膨胀指数与自由膨胀率的定义不同, 在国际标准转换中存在一定困难。因此, 本文以 ASTM D5890 膨胀指数试验为参照对象, 深入讨论了 GB/T 50123 与 ASTM D5890 方法在试验设计、影响因素和相关性方面的差异, 并研究了不同因素对自由膨胀参数的影响规律。

为满足膨胀土场地中多类型工程建设对土体膨胀特性评价的需求^[16~18], 本文通过结合微观试验和 GB/T 50123 与 ASTM D5890 规范下单位质量土样膨胀体积变化, 分析了膨胀体积与土样质量之间的关系, 并基于颗粒质量体积比关系, 提出采用土颗粒相对质量密度 G_s 对自由膨胀参数进行修正公式。旨在提出更为精准、全面的土体膨胀性能评估方法, 为工程实践提供支持和指导。

1 自由膨胀率试验机理

1.1 试验机理差异

GB/T 50123 规范将粒径小于 0.5 mm 的 10 mL 自由堆积土样膨胀后的体积增量比作为土体的自由膨胀率。由于 GB/T 50123 规范对粒径的界定较为宽泛, 在实际试验中, 粒径差异可能导致 10 mL 土样质量波动, 从而对自由膨胀率的测定产生较大影响。相比之下, ASTM

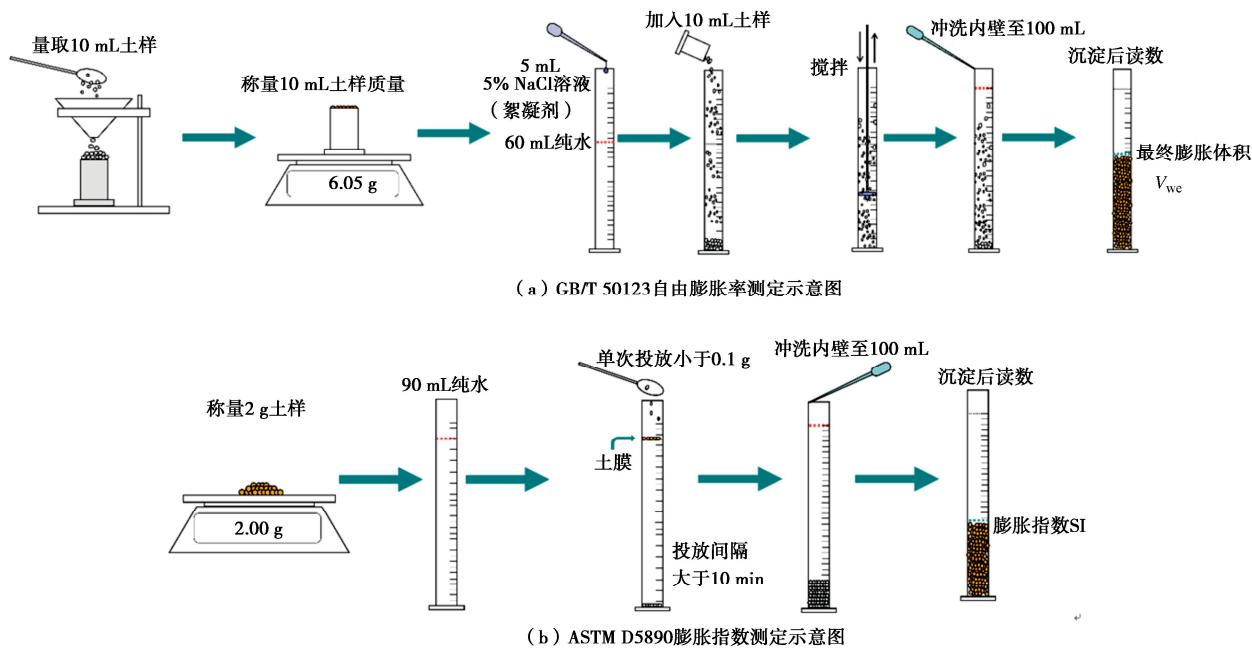


图1 自由膨胀率与膨胀指数测定流程示意图

Fig. 1 Flow diagram of free swelling rate and swelling index measurement

D5890 规范更加精确地划定了粒径范围, 并采用体积质量比作为土体的膨胀系数(SI), 在很大程度上减少了粒径因素引起的试验误差。GB/T 50123 与 ASTM D5890 规范的操作流程如图 1 所示。

1.2 试验操作差异

(1) GB/T 50123 自由膨胀率试验要求土粒粒径小于 0.5 mm, 使用量土器中 10 mL 的自由堆积土样作为单次试验样品。将 10 mL 的土样一次性加入量筒, 使用 5 mL、5% 的 NaCl 溶液作为絮凝剂, 并通过搅拌器上下搅拌以使土体充分分散。待土体悬浊液体积稳定后, 读取最终膨胀体积。自由膨胀率 δ_{ef} 可由下述公式计算得出:

$$\delta_{ef} = \frac{V_{we} - V_0}{V_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: δ_{ef} 为 GB/T 50123 测定的自由膨胀率(%); V_{we} 为土样在量筒中膨胀稳定后的体积(mL); V_0 为初始体积, 取量杯体积 10 mL。

(2) ASTM D5890 膨胀指数试验规定土样的粒径应小于 0.15 mm, 且其中 65% 的土颗粒粒径需小于 0.074 mm。每次试验所用土样质量为 2 g。试验过程中, 将土样逐次添加至量筒中以覆盖液面, 单次投放量不超过 0.1 g。静置 10 min 以上, 待土颗粒完全湿润并沉降后, 再次投放, 直至 2 g 土样全部加入。膨胀指数 SI 即为土体的最终膨胀体积, 单位为 mL/(2g)。

2 试验材料及方法

2.1 试验用土

本文试验中采用商用钠基膨润土与高岭土, 相应参数均严格按照 GB/T 50123 与 ASTM D5890 规范进行测试, 土样物理参数如表 1 所示。

表1 土样基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of soil samples

土样	颗粒相对质量密度 G_s	塑限 I_p /%	液限 I_L /%	自由膨胀率 δ_{ef} /%	膨胀指数 SI / $(mL \cdot 2^{-1} \cdot g^{-1})$
钠基膨润土	2.5	23	208	1100	26.3
高岭土	2.6	35	56	-40	2

2.2 微观特性

(1) 矿物成分

试验土样的矿物成分通过 X 射线衍射分析仪 (thermo fisher scientific X-TRA) 进行检测, 并利用 Jade 5.0 分析软件对比特征峰解析其矿物结构。通过对钠基膨润土和高岭土的 X 射线衍射图像分析 (如图 2 所示), 获得了试验土样的矿物组成信息。结果显示, 钠基膨润土主要由蒙脱石、伊利石、石英和方解石等矿物构成, 其中蒙脱石含量是影响土体膨胀性的关键因素。而高岭土则主要由高岭石和方解石组成, 几乎不具备膨胀性。

(2) 颗粒级配

试验土样的初始粒径采用马尔文激光粒度分析仪 Mastersizer 2000 进行干法分析。由图 3 试验土样的级配曲线可以看出, 高岭土和钠基膨润土粒径存在显著差异, 高岭土颗粒粒径远小于钠基膨润土。高岭土有效粒径 D_{10} 为 2.14 μm , 中值粒径 D_{30} 为 3.20 μm , 限制粒径 D_{60} 为 5.41 μm ; 钠基膨润土有效粒径 D_{10} 为 3.64 μm , 中值粒径 D_{30} 为 6.91 μm , 限制粒径 D_{60} 为 16.64 μm 。

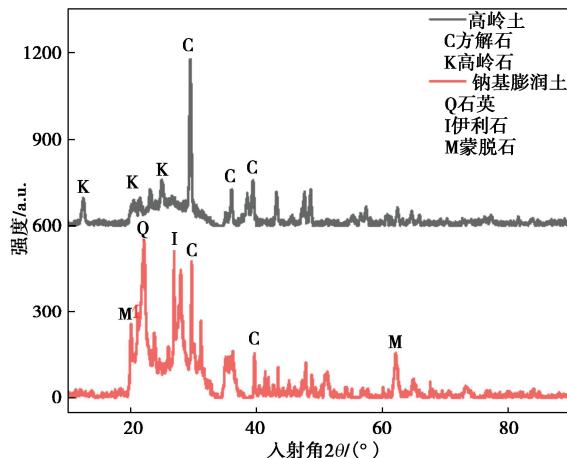


图 2 试验土样 X 射线衍射图像

Fig. 2 X-ray diffraction pattern of test soil samples

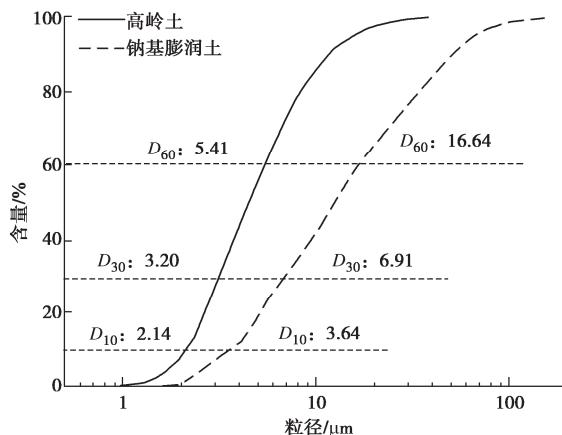


图 3 试验土样级配曲线

Fig. 3 Particle size distribution curves of test soil samples

2.3 膨胀特性

(1) 试样制备

对于 GB/T 50123 中的自由膨胀率测定试验, 将钠基膨润土与高岭土进行筛分, 选取 0.5~0.25 mm、0.25~0.075 mm、<0.075 mm 粒径土样按照质量比 6:3:1 (以下简称 GB-631) 与 1:3:6 (以下简称 GB-136) 进行掺和。后将不同粒径掺比的钠基膨润土与高岭土按照 0:10, 2:8, 4:6, 6:4, 8:2, 10:0 质量比混合, 制备 12 种不同粒径与土样配比的样品作为试验组。

对于 ASTM D5890 膨胀指数测定试验, 由于规范中有对粒径范围的明晰要求, 不再进行额外的粒径控制, 仅做 6 种土样掺比。表 2 为试验土样配置安排。

(2) 膨胀特性试验

自由膨胀率试验依据 GB/T 50123 规范, 对 GB-631 和 GB-136 两种粒径掺比的土样进行测试。试验中称量 10 mL 土样共 5 组, 选取质量最接近的 3 组进行试验, 最终取 3 组自由膨胀率的中间值作为测定结果。

膨胀指数测定参照 ASTM D5890 膨胀指数测量方

法, 进行 3 组平行样, 取中间值进行记录。

表 2 试验土样配置安排表

Table 2 Configuration schedule of test soil sample

编号	粒径掺比 0.5~0.25 mm: 0.25~0.075 mm: <0.075 mm	钠基膨润土占比 <i>P</i>
GB-631-0.0		0.0
GB-631-0.2		0.2
GB-631-0.4	6:3:1	0.4
GB-631-0.6		0.6
GB-631-0.8		0.8
GB-631-1.0		1.0
GB-136-0.0		0.0
GB-136-0.2		0.2
GB-136-0.4	1:3:6	0.4
GB-136-0.6		0.6
GB-136-0.8		0.8
GB-136-1.0		1.0
ASTM-0.0		0.0
ASTM-0.2		0.2
ASTM-0.4	全部土样<0.15 mm; 且 65%<0.075 mm	0.4
ASTM-0.6		0.6
ASTM-0.8		0.8
ASTM-1.0		1.0

3 试验结果分析

按 GB/T 50123 和 ASTM D5890 规范对土样进行相应试验后, 各种配置土样的膨胀情况如表 3 所示, GB/T 50123 自由膨胀率试验结果如图 4 所示。试验结果表明, 随着钠基膨润土占比的增加, 土样的自由膨胀率和膨胀指数基本呈现出线性增长趋势 (见图 5)。然而, 粒径掺比对自由膨胀率的增长速率影响较大, 其中大粒径占比高的土样表现出更高的自由膨胀率。具体而言, GB-631 的自由膨胀率比 GB-136 高出 17.7%~30.5%。

此外, 当钠基膨润土占比为 0 时, 自由膨胀率呈负值。这是因为纯高岭土本身膨胀性极小。颗粒投入水中后, 水的表面张力促进颗粒间的黏附作用。同时, 颗粒在下沉过程中受碰撞、浮力及水动力学作用的影响, 趋向以最小势能状态排列, 颗粒间的接触面积增大, 孔隙减少, 从而导致同质量的高岭土颗粒在水中的体积小于在空气中的自由堆积体积。

3.1 土样粒径差距影响

GB/T 50123 自由膨胀率试验以 10 mL 土样作为试验用量标准。10 mL 不同粒径及钠基膨润土掺比土样称量质量结果和堆积密度如图 6, 7 所示。

GB-631 组土样的粒径略大于 GB-136 组。对 6 组试验结果的比较显示, 10 mL 土样的质量和堆积密度存在显著差异。粒径较大的土样表现出更高的土样质量和更大的堆积密度。随着钠基膨润土占比的增加, 质量和堆积密度的差异进一步增大, 最大质量差可达 19.34%, 堆积密度差异达到 0.04 g/cm³。

表3 试验土样膨胀结果
Table 3 Swelling results of test soil samples

编号	粒径掺比		10 mL 土样重量 m _{GB} /g	膨胀体积 V/mL	自由膨胀 率 δ_{ef} /%	膨胀指数 SI/(mL ² ·g ⁻¹)
	0.5~0.25 mm: mm: 0.25~0.075 mm: <0.075 mm	钠基膨润土占比				
GB-631-0.0	6:3:1 6:3:1:1:3:6 6:3:1:1:3:6 6:3:1:1:3:6 6:3:1:1:3:6 6:3:1:1:3:6	0.0	5.48	6.0	-40	—
GB-631-0.2		0.2	5.86	21.0	110	—
GB-631-0.4		0.4	6.36	46.4	364	—
GB-631-0.6		0.6	7.10	73.8	638	—
GB-631-0.8		0.8	7.58	97.5	875	—
GB-631-1.0		1.0	8.23	127.3	1173	—
GB-136-0.0	1:3:6 1:3:6 1:3:6 1:3:6 1:3:6 1:3:6	0.0	5.40	6.0	-40	—
GB-136-0.2		0.2	5.91	21.0	110	—
GB-136-0.4		0.4	6.11	38.3	283	—
GB-136-0.6		0.6	6.49	58.9	489	—
GB-136-0.8		0.8	6.74	84.3	743	—
GB-136-1.0		1.0	7.17	107.7	977	—
ASTM-0.0	全部土样<0.15 mm; 且 65%<0.075 mm	0.0	—	2.0	—	2
ASTM-0.2		0.2	—	8.0	—	8
ASTM-0.4		0.4	—	14.1	—	14.1
ASTM-0.6		0.6	—	18.4	—	18.4
ASTM-0.8		0.8	—	22.5	—	22.5
ASTM-1.0		1.0	—	26.3	—	26.3

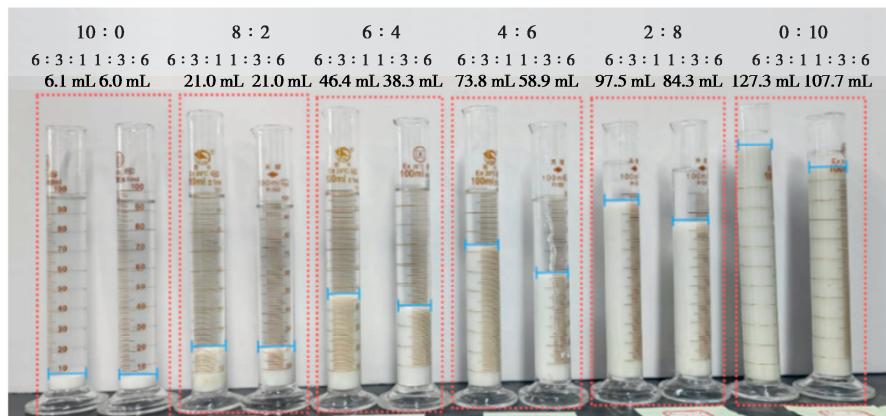


图4 不同掺比与粒径组合土样膨胀结果(GB/T 50123)

Fig. 4 Swelling results of soil samples with different mix ratios and particle size combinations (GB/T 50123)

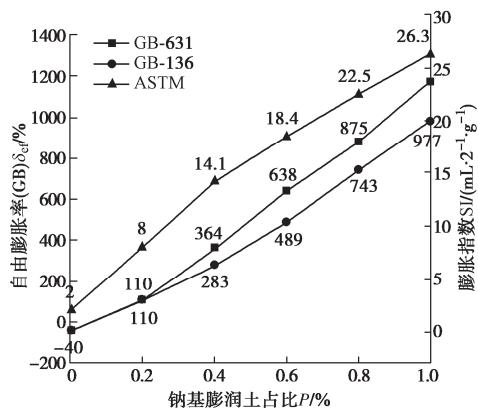


图5 钠基膨润土占比与自由膨胀率、膨胀指数

Fig. 5 Relationship among sodium-based bentonite proportion, free swelling rate, and swelling index

对于散体材料而言, 粒径较小的材料在自由堆积后空隙较大, 因此堆积密度和单位体积内的质量相对较低。此外, 由于钠基膨润土和高岭土颗粒表面形态不同(如图8所示), 高岭土颗粒多呈片状或块状结构, 表

面平整, 边缘清晰; 而钠基膨润土颗粒呈不规则的类球形, 表面布满褶皱、裂纹和孔洞, 边缘模糊。钠基膨润土占比的增加降低了土体的整体堆积密度。

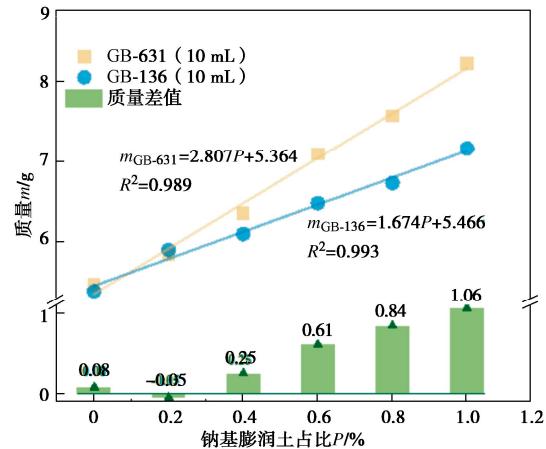


图6 不同粒径下10 mL 土样质量对比

Fig. 6 Mass comparison of 10 mL soil samples with different particle sizes

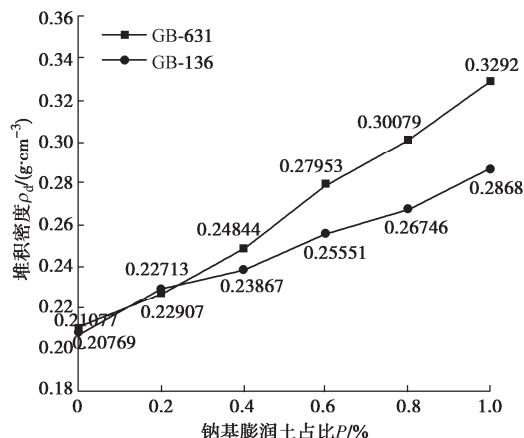


图 7 不同粒径下 10 mL 土样堆积密度对比

Fig. 7 Comparison of bulk density of 10 mL of soil samples with different particle sizes

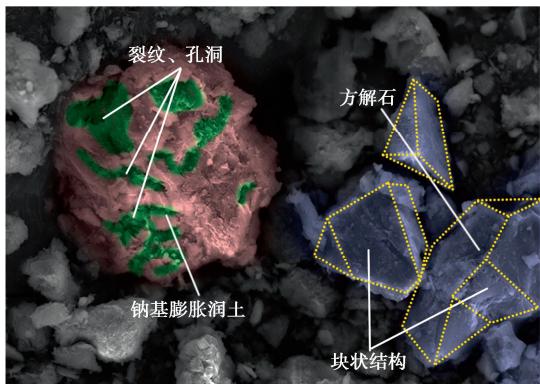


图 8 试验土样颗粒形貌图

Fig. 8 Morphology diagram of test soil sample particles

3.2 操作过程影响

为验证操作过程对自由膨胀率的影响, 选用 GB-631-0.4 作为试验样品, 分别进行 10, 20, 30, 40 次搅拌, 重复搅拌循环 4 轮, 对比对自由膨胀率的变化情况, 试验结果如图 9 所示。

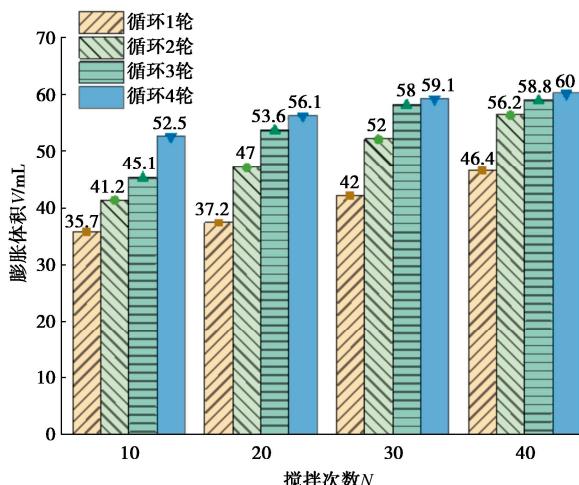


图 9 搅拌次数与搅拌遍数对膨胀体积的影响

Fig. 9 Influence of stirring frequency and number of stirring cycles on expansion volume

随着搅拌次数的增加, 土体自由膨胀率明显上升, 但增长速率逐渐减缓。在第二轮搅拌时, 自由膨胀率显著增加, 之后趋于稳定。在本试验中, GB-631-0.4 样品在量筒中经过 40 次搅拌后, 基本形成悬浊液, 土颗粒完全分散。经过两轮搅拌循环后, 土样膨胀性能达到极限, 此后搅拌流程中土体的最终膨胀体积保持相对稳定。根据 GB/T 50123 的要求, 仅采用搅拌器上下搅拌十次, 但对于膨胀性较大的土体而言, 搅拌次数过少可能导致土体在水中形成团聚块, 土颗粒不能完全吸水饱和, 无法准确反映土样的真实膨胀性能。

液面覆盖程度是影响 ASTM D5890 膨胀指数 SI 的关键因素。土样投放量不可超过 0.1 g, 应刚好形成覆盖液面的土膜, 避免颗粒团聚。投放间隔应不少于 10 min, 待液面上土膜吸水膨胀并完全沉入量筒后方可进行下一次投放。不断重复, 直至 2.0 g 土样完全投放完成。试验过程中单次投放量的限定过于主观, 不能够试下能精确的量化, 若单次投放量过大或间隔过短, 都会导致膨胀指数 SI 降低。

对比两种规范, GB/T 50123 的整体流程较为简单, 试验设备普及, 但对粒径要求不明确, 以体积为用量标准可能导致不同粒径掺比引起的自由膨胀率差异较大。此外, 操作流程不够明确, 重复性较差。相比之下, ASTM D5890 以质量为用量标准, 消除了粒径影响, 数据更加稳定, 但 2.0 g 的用量标准缺乏实际的物理意义, 且试验步骤较繁琐, 主观影响较大, 整体周期较长, 限制了工程中的实际应用。

4 结果讨论

4.1 质量体积关系

在 GB/T 50123 与 ASTM D5890 试验规范要求下, 膨胀特性评价参数与钠基膨润土占比均呈线性关系, 但不同规范定义的评价参数存在差异, 膨胀体积更能直接反映出土体的膨胀性能。如图 10 所示, 随着人工配置膨胀土中钠基膨润土占比的增加, 在 ASTM D5890 下, 2.0 g 土样的膨胀体积呈线性增加; 在 GB/T 50123 下, 10 mL 土样的膨胀体积呈线性变化。相同体积下, 大粒径占比高的土样拥有更大的膨胀体积。

$$V_{GB631} = aP + b = 123.271P + 0.381 \quad (2)$$

$$V_{GB136} = aP + b = 102.714P + 1.343 \quad (3)$$

$$V_{ASTM} = aP + b = 24.186P + 3.124 \quad (4)$$

式中: V_{GB631} 为 GB/T 50123 要求下粒径掺比为 6:3:1 土样的膨胀体积 (mL); V_{GB136} 为 GB/T 50123 要求下粒径掺比为 1:3:6 土样的膨胀体积 (mL); V_{ASTM} 为 ASTM D5890 要求下测得的土样膨胀体积 (mL); P 为钠基膨润土占比; a, b 为土壤相关变量。

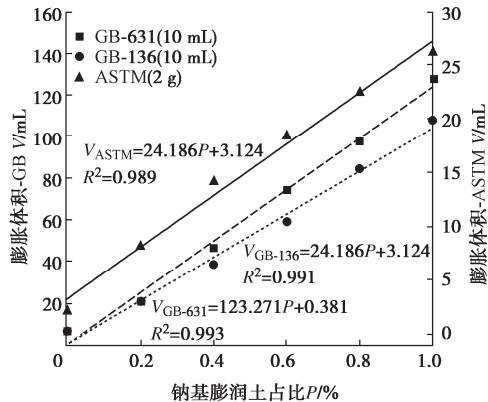


图 10 不同规范下钠基膨润土占比与膨胀体积关系图

Fig. 10 Relationship between sodium-based bentonite proportion and swelling volume under different standards

单位质量土样膨胀体积(比膨胀体积)能够消除土样粒径差异所带来的质量影响,能更为准确的体现出土体的膨胀性能和不同试验工法的区别。

$$v_{GB} = cP + d = 14.423P + 0.976 \quad , \quad (5)$$

$$v_{ASTM} = cP + d = 12.09P + 1.562 \quad . \quad (6)$$

式中: v_{GB} 为 GB/T 50123 要求下土样的比膨胀体积 (mL/g); v_{ASTM} 为 ASTM D5890 要求下土样的比膨胀体积 (mL/g); P 为钠基膨润土占比; c, d 为土壤相关变量。

从图 11 可以看出,当钠基膨润土占比比较低 (<0.4) 时,3 种试验土样的比膨胀体积基本一致,最大差异不超过 1.32 mL/g。随着钠基膨润土占比的增加,GB/T 50123 规范下的比膨胀体积呈现出较高的线性增幅,且粒径对比膨胀体积的影响较小,GB-631 的比膨胀体积仅略高于 GB-136。相比之下,ASTM D5890 规范下的比膨胀体积增速明显减缓,与 GB/T 50123 规范的最大差距达到 2.31 mL/g。

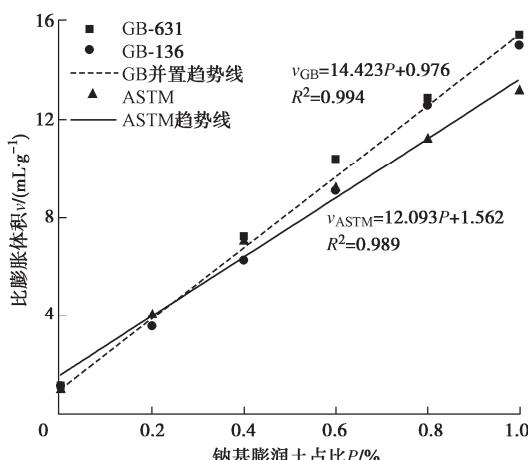


图 11 钠基膨润土占比与单位质量土样膨胀体积关系

Fig. 11 Relationship between sodium-based bentonite proportion and unit weight swelling volume of soil samples

两种规范下比膨胀体积差异的主要原因在于,自由膨胀率的测定中使用搅拌器充分搅拌土样,使土颗粒在理想状态下得到完全分散。而膨胀指数测定过程中,土样逐次少量投入量筒中,土颗粒在液面上吸水膨胀。此过程中,亲水性矿物颗粒的表面水膜增厚,不仅增加了颗粒体积,还增强了颗粒间的接触和黏性,最终在液面上形成一层薄土膜。土膜不断吸水膨胀,最终崩解为片状小团聚体并沉入量筒中。因此,在 GB/T 50123 规范下,土样的分散、吸水和膨胀过程更为充分,而在 ASTM D5890 规范下则不可避免地形成团聚体,导致其比膨胀体积略低于 GB/T 50123 的测定值。

4.2 自由膨胀参数优化

上文提到,由于未考虑粒径与自由堆积密度间的关系,使得粒径大小明显影响了 GB/T 50123 自由膨胀率试验中土样质量,同种土样出现自由膨胀率悬殊的现象; ASTM D5890 膨胀指数试验中虽以质量作为土样用量标准,避免了粒径对试验土样质量的影响,但采用 2.0 g 作为质量标准缺乏实际物理意义,且不能够反映不同土样的物理性质差异。为此,本文针对以上问题对膨胀土膨胀特性参数进行修正,旨在得到能屏蔽粒径影响,且土样用量标准拥有实际物理意义的自由膨胀评价参数。

涉及到土体粒径与堆积密度或土体质量间关系的研究较少,所以本文将土样简化为粉体,以粉体自由堆积密度作为修正的理论基础。自由堆积密度是指粉体进行自由填充后,固定体积容器中固体物质质量与包括空隙在内的整个粉体总体积的比值:

$$\rho_b = \rho_p(1 - \varepsilon) \quad . \quad (7)$$

式中: ρ_b 为粉体堆积密度 (g/cm^3), 可类比为土样自由堆积后的密度; ρ_p 为粉体真实密度 (g/cm^3), 可类比为土体土颗粒相对质量密度,在数值上等于土颗粒的密度; ε 为物料静止时的孔隙率 (%)。

土颗粒相对质量密度 G_s 是一个无量纲的数值,直接反映土体的物理性质。在粉体自由堆积理论基础上,将粒径 \varPhi -体积 V -质量 m 关系转换为土颗粒相对质量密度 G_s -质量 m 关系。以土颗粒相对质量密度 G_s 作为质量指标代替原有的 10 mL 体积指标对 GB/T 50123 中自由膨胀率 δ_{ef} 进行了修正,消除了粒径不同导致的质量差异,反映了不同土样物理性质的差异,构建了更为准确的体积-质量-膨胀性关系,提出了土体真实自由膨胀体积 V_{tsf} 。土体真实自由膨胀体积 V_{tsf} 的物理含义是土颗粒相对质量密度标准质量下的土体自由膨胀体积。自由膨胀率 G_s 可通过以下公式直接转换为真实自由膨胀体积 V_{tsf} :

$$V_{tsf} = \frac{G_s}{M_{GB}} \cdot \left(\frac{\delta_{ef}}{10} + 10 \right) = \frac{G_s(\delta_{ef} + 100)}{10M_{GB}} \quad . \quad (8)$$

式中: V_{tsf} 为土的真实自由膨胀体积 (mL); G_s 为土的土颗粒相对质量密度; M_{GB} 为自由膨胀率试验中 10 mL 土的质量 (g); δ_{ef} 为土的自由膨胀率 (%)。

同样可以采用土颗粒相对质量密度对 ASTM D5890 膨胀指数进行修正, 将没有实际物理意义的 2.0 g 标准替换为土颗粒相对质量密度标准, 从而使修正后的土体真实自由膨胀体积 V_{tsf} 更具物理逻辑性和严谨性。

在 GB/T 50123 与 ASTM D5890 试验规范的自由膨胀参数经过土颗粒相对质量密度修正后的膨胀体积结果如图 12 所示。可以明显观察到, 与传统的自由膨胀率 δ_{ef} 相比, 土颗粒相对质量密度修正后的真实自由膨胀体积 V_{tsf} 显著减少了颗粒形态、大小和密实度对土样自由膨胀体积的影响。这一修正优势在针对高膨胀风险土体尤为明显。同时, 与 ASTM D5890 试验中的膨胀指数 SI 相比, 土体真实自由膨胀体积 V_{tsf} 具有更全面的物理意义。

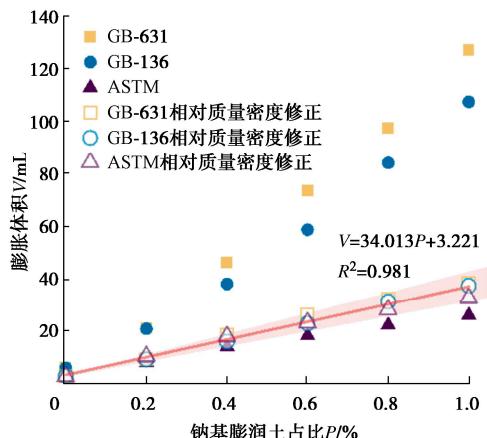


图 12 修正前后自由膨胀参数对比

Fig. 12 Comparison of free swelling parameters before and after correction

综上所述, 采用土颗粒相对质量密度修正方法评估膨胀土的自由膨胀参数, 具有更高的可信度和实用价值。土颗粒相对质量密度修正从数值上有效缩小了两种规范下自由膨胀参数的差异, 促进了自由膨胀参数的国际互通。双规范的操作流程仅对膨胀体积产生微小影响。真实自由膨胀体积 V_{tsf} 能够更精准地表征土体的固有膨胀特性, 有效区分不同土样的膨胀性能, 尤其是在高膨胀性土体的评价中具有更高的准确性和可靠性。

5 结 论

(1) 颗粒粒径引起的质量变化, 以及操作中搅拌次数与循环次数, 是自由膨胀率差异的主要原因; 膨胀指数的差异则与土膜覆盖程度的变化有关。

(2) 随着钠基膨润土的占比的增加, 土壤自由膨胀率、膨胀系数和膨胀体积呈线性增长关系。GB/T

50123 规范下, 土体自由膨胀率和膨胀体积的增长速率与土样质量正相关。

(3) 钠基膨润土占比高及大粒径土体通常在单位体积下拥有更大的质量和自由膨胀率。在 ASTM D5890 方法下, 比膨胀体积增幅略小, 这是因为不可避免土颗粒形成片状小团聚体。

(4) 结合 ASTM D5890 方法中的质量-体积比对 GB/T 50123 规范土体自由膨胀率进行优化, 基于自由堆积原理, 采用土颗粒相对质量密度修正土样质量标准, 有效减少土粒粒径变化对试验结果的影响, 从而显著降低质量因素对自由膨胀率测定的干扰。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 陈熠坤直接参与了研究的实施与数据采集, 并参与了论文的撰写工作。储亚负责研究的整体设计与指导, 对文章的内容进行了审阅并修改稿件。蔡国军提供了技术与实验设备支持。闫超对部分实验进行了指导。刘松玉为本研究提供了理论指导与学术支持。韩爱民在项目执行过程中给予了行政与资源支持。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。CHEN Yikun directly participated in the implementation of the study and data collection, and contributed to the drafting of the manuscript. CHU Ya was responsible for the overall design and supervision of the research, and conducted critical review and revision of the manuscript. CAI Guojun provided technical and experimental equipment support. YAN Chao offered guidance on part of the experiments. LIU Songyu provided theoretical and academic support for the study. HAN Aimin provided administrative and resource support during the project execution. All the authors have read the last version of manuscript and consented for submission.

参考文献:

- [1] IJAZ N, DAI F C, MENG L C, et al. Integrating lignosulphonate and hydrated lime for the amelioration of expansive soil: a sustainable waste solution[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 254: 119985.
- [2] SONG C, YANG L G, XIA W, et al. Experimental study on relationship between free load swelling rate and water content of medium expansive soil[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021(1): 8871694.
- [3] 叶云雪, 邹维列, 韩仲, 等. 考虑初始状态影响的膨胀土一维膨胀特性研究 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43(8): 1518-1525. (YE Yunxue, ZOU Weile, HAN Zhong, et al. One-dimensional swelling characteristics of expansive soils considering influence of initial states[J]. Chinese Journal of

- Geotechnical Engineering, 2021, **43**(8): 1518-1525. (in Chinese))
- [4] 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 Guitao, HAN Zhong, ZOU Weilie, 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))
- [5] 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [6] 公路土工试验规程: JTG 3430—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020. (Test Methods of Soils for Highway Engineering: JTG 3430 — 2020[S]. Beijing: China Communications Press, 2020. (in Chinese))
- [7] 向天兵, 程芸, 杨纬卿, 等. 自由膨胀率试验结果影响分析及胀缩机理探讨[J]. 土工基础, 2021, **35**(6): 792-797. (XIANG Tianbing, CHENG Yun, YANG Weiqing, et al. Influence factors in free swelling ratio tests and mechanism of expansion and shrinkage[J]. Soil Engineering and Foundation, 2021, **35**(6): 792-797. (in Chinese))
- [8] 陈善雄, 余颂, 柳治国, 等. 土样制备对自由膨胀率的影响及其改进方法[J]. 岩土力学, 2006, **27**(8): 1327-1330. (CHEN Shanxiong, YU Song, LIU Zhiguo, et al. Effect of soil sample preparation on free swelling ratio and its improved measures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(8): 1327-1330. (in Chinese))
- [9] 朱德余, 刘爱叶, 谭永平. 粒径对黏性土自由膨胀率的影响规律研究[J]. 铁道勘察, 2015, **41**(3): 40-43. (ZHU Deyu, LIU Aiye, TAN Yongping. Study on the effect of particle size on free swelling ratio of clayey soil[J]. Railway Investigation and Surveying, 2015, **41**(3): 40-43. (in Chinese))
- [10] 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. (GUO Aiguo, KONG Lingwei, CHEN Jianbin. Influential factors on free swell test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(11): 1949-1953. (in Chinese))
- [11] 张伟利, 李永红, 党进谦, 等. 提高膨胀土自由膨胀率试验精度的研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, **43**(9): 203-209. (ZHANG Weili, LI Yonghong, DANG Jinqian, et al. Study on improving Improving the accuracy of free swelling ratio test[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2015, **43**(9): 203-209. (in Chinese))
- [12] WANG L L, WANG Z T, DING Z P, et al. Factors influencing accuracy of free swelling ratio of expansive soil[J]. Journal of Central South University, 2022, **29**(5): 1653-1662.
- [13] SRIDHARAN A, RAO S M, MURTHY N S. A rapid method to identify clay type in soils by the free-swell technique[J]. Geotechnical Testing Journal, 1986, **9**(4): 198-203.
- [14] PRAKASH K, SRIDHARAN A. Free swell ratio and clay mineralogy of fine-grained soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 2004, **27**(2): 220-225.
- [15] American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners: ASTM D5890-19[S]. USA: West Conshohocken, ASTM International, 2019.
- [16] 段伟, 赵泽宁, 蔡国军, 等. 尾矿生态脆弱区场地测试技术与土工参数评价方法研究进展[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2025, **55**(4): 1001-1016. (DUAN Wei, ZHAO Zening, CAI Guojun, et al. A review of site testing technology and geotechnical parameter evaluation method in tailings ecological fragile area[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2025, **55**(4): 1001-1016. (in Chinese))
- [17] 段伟, 赵泽宁, 蔡国军, 等. 基于 CPT 土分类图及其指标的土体液化评价模型[J]. 岩土工程学报, 2024, **46**(1): 1-10. (DUAN Wei, ZHAO Zening, CAI Guojun, et al. Soil liquefaction evaluation model based on soil behavior type classification chart and its indices from cone penetration testing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, **46**(1): 1-10. (in Chinese))
- [18] ZHAO Z N, UNIV S, DUAN W, et al. Robust geotechnical design of piles incorporating system reliability[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2025, **151**(4): 04025012.