

DOI: 10.11779/CJGE20240364

压实度和疏水剂掺量对疏水土料击穿压力影响规律研究

李璐^{1,2}, 林承鑫^{1,2}, 柴雨萱^{1,2}, 石硕¹, 吴永康^{*1}, 李旭¹

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 北京交通大学土木工程国家级实验教学示范中心, 北京 100044)

摘要: 水的入渗、迁移及温度相变是寒区土体发生冻害的重要原因, 对土体进行改性使其具备疏水性可有效提升其阻水性能, 是增强寒区土体抗渗抗冻害性能的新思路。选取具有寒区代表性的青海粉质黏土, 采用新型疏水剂制备了不同压实度和疏水剂掺量的土样, 通过一系列接触角测试和击穿压力试验, 研究了压实度和疏水剂掺量对土样斥水能力和击穿压力的影响规律。研究结果表明: 青海粉质黏土经改性处理后, 其斥水能力接近超疏水平; 提高压实度及优化疏水剂掺量可显著提高土体的接触角和击穿压力。击穿压力与压实度呈正相关, 并随着疏水剂掺量的变化呈现单峰分布; 在压实度为 0.95、疏水剂掺量为 13.0% 的条件下, 疏水土展现出最高击穿压力, 达到约 50 kPa。研究为寒区土体抗渗设计提供了新的试验依据, 并为未来疏水土在寒区工程的应用提供参考。

关键词: 疏水土; 压实度; 斥水性; 接触角; 击穿压力

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)11-2441-06

作者简介: 李璐(2003—), 女, 本科生, 主要从事铁道工程方面的研究。E-mail: 21231016@bjtu.edu.cn。

Influences of compaction and content of hydrophobic agent on breakthrough pressure of hydrophobic soil

LI Lu^{1,2}, LIN Chengxin^{1,2}, CHAI Yuxuan^{1,2}, SHI Shuo¹, WU Yongkang¹, LI Xu¹

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. National Experimental Teaching Demonstration Center for Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Water infiltration, migration, and phase change of temperature are the crucial causes of frost damage in soils in cold regions. Modifying the soils to impart hydrophobic properties can effectively enhance their water resistance, offering a new approach to improving the frost and seepage resistance of the soils in these regions. The representative silty clay from Qinghai, a typical cold region, is selected, and the soil samples with varying compaction degrees and contents of hydrophobic agent using a novel hydrophobic agent are prepared. Through a series of contact angle tests and breakthrough pressure experiments, the effects of the compaction degree and the content of hydrophobic agent on the water repellency and breakthrough pressure of the soil samples are investigated. The results indicate that the water repellency of the modified Qinghai silty clay approaches superhydrophobic levels. Increasing the compaction degree and optimizing the content of hydrophobic agent significantly improves the contact angle and breakthrough pressure of the soils. There is a positive correlation between the breakthrough pressure and the compaction degree, and the breakthrough pressure exhibits a unimodal distribution with varying contents of hydrophobic agent. Under the conditions of a compaction degree of 0.95 and a content of hydrophobic agent of 13.0%, the hydrophobic soil exhibits the highest breakthrough pressure, reaching approximately 50 kPa. This study provides new experimental evidence for the design of seepage-resistant soils in cold regions and offers a reference for the future application of hydrophobic soils in cold region engineering.

Key words: hydrophobic soil; compaction; water repellency; contact angle; breakthrough pressure

0 引言

受全球气候变化的影响, 寒区土壤的冻害问题日

益突出。据统计, 青海省约有 50%~60% 的渠道遭受冻害侵蚀^[1]。冻害与土体中水分密切相关, 水在土中

基金项目: 北京市自然科学基金项目 (8222028, 8242017); 北京交通大学人才基金项目 (2024XKRC066, 2022XKRC005); 国家级大学生创新创业训练计划资助项目 (202410004193) This work was supported by Beijing Natural Science Foundation (Grant Nos.8222028, 8242017), Talent Fund of Beijing Jiaotong University (Grant No.2024XKRC066, 2022XKRC005), and National Undergraduate Training Program for Innovation and Entrepreneurship (Grant No.202410004193).

收稿日期(Received): 2024-04-16 修回日期(Revised): 2024-08-11 接受日期(Accepted): 2024-08-21 网络出版日期(Online): 2024-08-22

*通信作者 (E-mail: ykwu@bjtu.edu.cn)

的入渗、迁移和相变是引起寒区路基冻胀、边坡失稳等工程问题的根本原因。因此，从土体本身改良的角度出发，提高其阻水能力对于解决上述工程问题尤为关键。目前，工程界广泛采用的隔水措施包括土工合成材料^[2]、不透水隔离层等。这些方案应用于具体工程时能展现一定的隔水作用，但存在工艺复杂、耐久性欠佳等问题。疏水改性处理技术作用一种全新的技术路线，有望解决传统措施的不足。疏水土的完全不亲水特性，可从源头阻滞水在土中的渗透运移，进而从根本上降低或避免冻害风险。

已有众多学者针对改性黏土斥水性能的变化规律展开研究。杨松等^[3]通过化学方法对砂土表面进行改性，归纳了斥水性变化规律，即随着掺入斥水性砂土的增加，土样的接触角呈增大趋势。吴宏伟^[4]指出，压实度较高的土可获得较小的渗透系数。刘新喜等^[5]指出，压实度影响土体各向渗透性能，并基于稳定性评价提出工程填土的压实度须大于 0.90 的指标。游阳等^[6]探究了 SHOIP 改性黏土的斥水能力，发现随着 SHOIP 掺量的增加，改性黏土的接触角逐渐增大，渗透系数呈现降低趋势。胡峰等^[7]基于两种黏土的外加剂改性提出控制土体水分迁移量以抗冻害的处理方案。然而，现有研究对材料的实际工程应用效果评估不足。在评估由水头差引起的水分渗透现象方面，Wang 等^[8]最初提出将进水值作为评估土壤斥水性和湿润性的一种替代指标，研究了土壤从排斥水转变为可湿状态的临界水压力。Carrillo 等^[9]引入突破压力头的概念，利用电压信号测量突破压力头，作为土壤对水的最初反应的量化指标。但文献[8, 9]的研究工作在测量条件和土壤适用性方面受限。在此基础上，Choi 等^[10]总结得到基于有机硅烷（zycosoil）改性的防水高岭土进水压力变化规律，指出疏水土在低静水压力下可以显著提高土体的抗渗性能。然而，现有研究的局限性在于对改性疏水土的应用场景方面研究不足，在评估其隔水能力的临界压力方面缺少统一的指标，难以用于指导工程应用。

本研究结合现有毛细管突破压力的相关理论^[11]，引入土的击穿压力（breakthrough pressure，亦称突破压力）指标，即在一定静水压力条件下，土从完全隔水状态转为可透水状态的临界水压条件，进一步完善对疏水土的抗渗性及其适用范围的评价方法。以青海粉质黏土为研究对象，制备了具有不同压实度和疏水剂掺量的疏水土样，通过开展接触角与击穿压力试验，探究疏水土的斥水性能并分析压实度和疏水剂掺量与击穿压力的关系，总结击穿压力的变化规律，以期为解决工程中的渗透问题提供有益参考。

1 试验材料与试样制备

1.1 试验材料

青海粉质黏土是中国西北地区特有的一种土壤类型，广泛分布在中国青海省东部地区。由于其特定的工程性质和地理分布特征，易受到冻害的影响。本文以青海粉质黏土这一典型的寒区冻土为例，通过对其疏水改性，使其具备良好的疏水、阻水性能，为疏水土的寒区工程应用提供参考。青海粉质黏土基本物性参数如表 1 所示，其级配曲线如图 1 所示。

表 1 青海粉质黏土物理性质参数

Table 1 Physical property parameters of Qinghai silty clay				
液限	塑限	最大干密度	最优含水	土粒相对质量密度
w _L /%	w _p /%	ρ _{dmax} /(g·cm ⁻³)	量 w/%	G _s /(g·cm ⁻³)
27.2	15.1	1.75	15.5	2.71

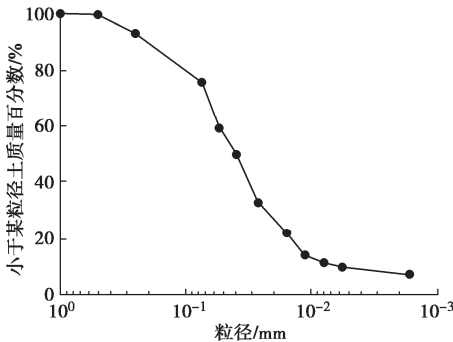


图 1 青海粉质黏土级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve of Qinghai silty clay

选用 CN01C 泥土超疏水乳液对青海粉质黏土进行改性处理。处理前需对 CN01C 乳液进行稀释处理，配制成质量分数为 6%的疏水剂。然后再将配制好的疏水剂按一定比例与土体进行拌合。CN01C 的基本物化性质如表 2 所示。

表 2 CN01C 泥土超疏水乳液物化性质

Table 2 Chemical and physical properties of CN01C			
项目	技术指标	项目	技术指标
pH	7±1	气味	无明显气味
黏度 μ/(Pa·s)	0.50	单位面积吸水量/(g·cm ⁻²)	≤1000
有机物挥发 VOR 值/%	≤3.00	疏水角/(°)	≥100
外观	乳白色液体	黏性	可自由流动

1.2 试样制备

按照制样模具容积、制样压实度和土的基本物性参数，计算制样所需的土质量 m ：

$$m = (1 + 0.01w_0)\rho_d V \quad (1)$$

式中： ρ_d 为制样的干密度（g/cm³）； V 为击实后的土样体积或压样器容积（cm³）； w_0 为土的天然含水率（%）。

以疏水剂掺量为控制指标。配制不同疏水剂掺量的土样, 所需的疏水剂质量 m_w 为

$$m_w = \rho_d V \times 0.01 w' \quad (2)$$

式中: w' 为土样的疏水剂掺量 (%)。

采用重塑土样的制备方案, 对青海粉质黏土进行粉碎、密封装袋处理。分别依式 (1), (2) 的计算值称取相应质量的土料和疏水剂, 将二者混合拌匀后置于圆柱状模具 (规格 $\Phi 39.1$ mm、高 80.0 mm, 总体积 96.1 cm^3) 中, 利用液压千斤顶将土样压制成型。

本研究选取了 5 种不同疏水剂掺量 (w' 为 18.0%, 15.5%, 13.0%, 10.5%, 8.0%) 和 3 种不同压实度 (K 为 0.85, 0.90, 0.95) 进行制样, 依照上述制样方案制作得到 15 组土样用于后续试验。

2 试验方法

2.1 接触角试验

如图 2 所示, 接触角是指在气、液、固三相交点处, 气-液界面的切线与固-液交界线之间的夹角, 用 θ 表示。该角度是衡量液体在固体表面润湿性的重要参数^[12]。在土壤疏水性难以量化的背景下, 接触角可直观表征疏水土斥水能力。通常认为, $\theta < 90^\circ$ 时材料表面亲水; $90^\circ < \theta < 150^\circ$ 时材料表面疏水; $\theta \geq 150^\circ$ 时材料超疏水。

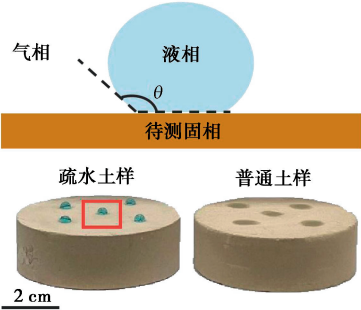


图 2 接触角示意图

Fig. 2 Schematic diagram of contact angle

目前接触角的测量方法主要有躺滴法、毛细管上升法和 Wilhelmy 平板法^[13]。为减少间接测量带来的误差, 保障试验结果的准确度, 接触角试验选择基于躺滴法测量接触角。

接触角试验采用德国 Dataphysics 公司的 DCAT21 型表面张力-光学接触角测量仪, 如图 3 所示。该测量仪用于测量粉末等固体材料的动态接触角, 测量范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$, 分辨率 $\pm 0.01^\circ$ 。利用测量仪对 1.2 节中制备得到的土样进行接触角测量。

2.2 击穿压力试验

击穿压力指土从完全隔水状态转为可透水状态的临界水压条件。击穿压力作为疏水土的重要特性之一, 决定其在不同水压场景下的适用性, 其原理如图 4(a) 所示。根据非饱和土力学中的毛细作用原理, 将土体

孔隙简化为直径为 d 的毛细管 (图 4 (b)), 则基于水-气交界面处力学平衡及 Young-Laplace 方程有

$$p = -\frac{4T_s \cos \theta}{d} \quad (3)$$

式中: θ 为固-液接触角; T_s 为水的表面张力; d 为土体的等效孔径; p 为液相的压强。

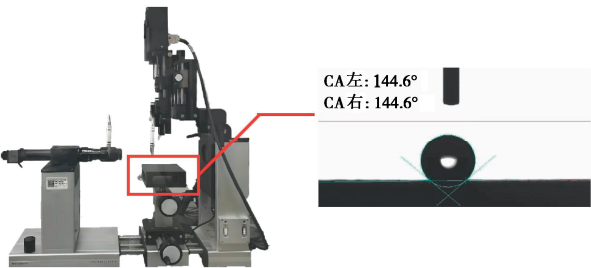
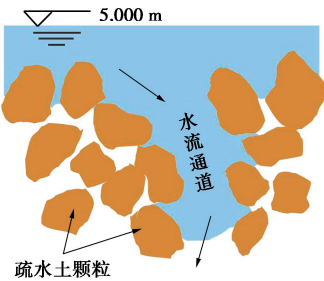
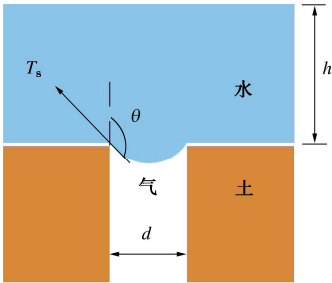


图 3 接触角测量示意图

Fig. 3 Diagram of measurement of contact angle



(a) 压力作用下水侵入疏水土的过程



(b) 疏水材料中的毛细作用

图 4 疏水土击穿压力的原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of breakthrough pressure of hydrophobic soil

在表面张力作用下, 非饱和土中通常只存在负的孔隙水压力, 这是因为土颗粒通常具有亲水性, 与孔隙水的接触角较小或接近于 0° ^[14]。由式 (3) 可知, 当土体的接触角 $\theta > 90^\circ$ 时 (即疏水土), 须施加正压力才能强制使水进入土体。接触角显著影响疏水土的击穿压力, 两者呈正相关。

击穿压力试验采用英国 GDS 公司生产的一款岩土三轴试仪进行, 如图 5 所示。为保证橡皮膜与土样的有效贴合, 防止水从试样与橡皮膜之间的界面流出, 试验过程中设置围压值高于进水压力值^[15]。以 1.2 节中制备得到的土样为试验组, 引入 PVC 完全不透水材料作为对照组, 试验过程中逐步增大施加于待测试样

顶面的进水压力, 并获取进水量-进水压力关系数据, 进而评估试样的击穿压力值。

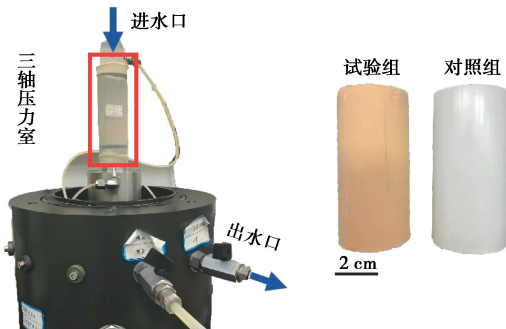


图 5 击穿压力试验装置及试样

Fig. 5 Devices and samples of breakthrough pressure tests

3 试验结果与讨论

3.1 超疏水能力评估

采用躺滴法对各土样的接触角进行测量, 以疏水剂掺量 w' 为横坐标, 接触角 θ 为纵坐标, 建立疏水剂掺量-接触角的关系曲线, 如图 6 所示。

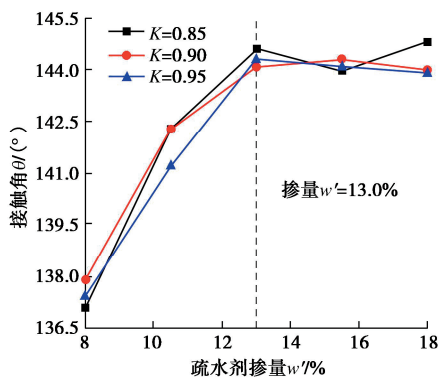


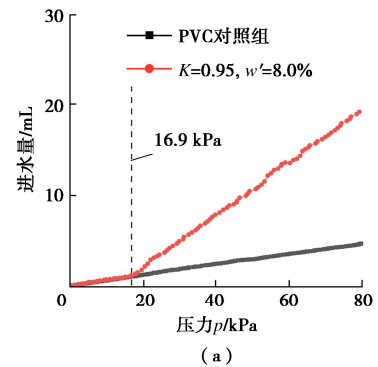
图 6 疏水剂掺量-接触角关系

Fig. 6 Relationship between content of hydrophobic agent and contact angle

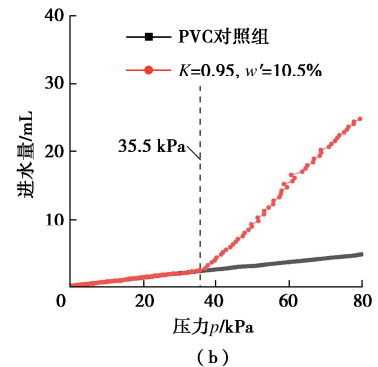
接触角测试结果表明, 经疏水改性处理后的土样展现出良好的斥水性能, 其接触角达 145° 左右, 接近超疏水水平。接触角在压实度 0.85, 掺量 18.0% 时取得最大值, 即 $\theta = 144.8^\circ$ 。由图 6 可知, 掺量小于 13.0% 时, 接触角随疏水剂掺量的增加呈现明显的增大趋势, 增量可达 8° ; 当疏水剂掺量大于 13.0% 时, 接触角随掺量增加变化较小。需要指出的是, 因躺滴法测量接触角所用土经碾碎处理后得到, 故制样压实度对接触角的影响被弱化, 因此图中不同试验曲线的分布基本一致。

3.2 击穿压力分析

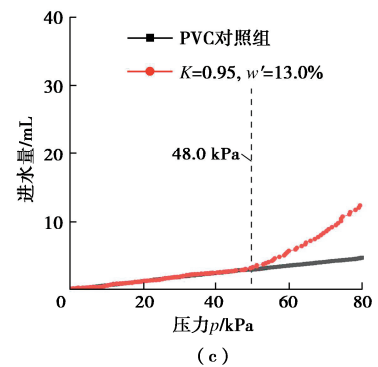
分析进水量随施加进水压力的变化情况, 并对数据进行处理, 可进一步确定各疏水土样的击穿压力。以压实度 0.95 土样为例, 对照组、试验组的进水量-压力关系曲线如图 7 所示。



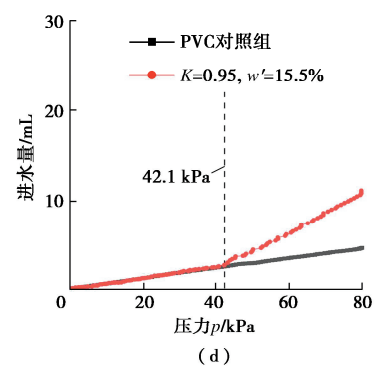
(a)



(b)



(c)



(d)

图 7 土样进水量-压力关系曲线 (以压实度 0.95 为例)

Fig. 7 Relationship between water inflow volume and pressure (taking soil samples with compaction degree of 0.95 as an example)

由图 7 可知, 当试样完全不透水时 (例如对照组), 试样所受的进水压力与进水量测量值呈线性关系。需要说明的是, 该进水量是由加压泵的步进电机测量得到的, 尽管其值大于 0, 但这部分体积是由加压泵及连接管路在加压过程中产生的形变所引起的, 实际渗入试样中的水量为 0。鉴于此, PVC 对照组的试验

曲线可作为基准数据: 若土样的进水曲线与对照组一致, 则表明无水渗入土样; 若土样的进水曲线高于对照组, 则表明有水渗入土样。换言之, 疏水土样在被击穿前应具备完全不透水性, 因此其进水量-压力曲线应呈现与对照组相同的线性增长趋势, 且曲线斜率相同。当压力达到一定值时, 水侵入土体孔隙, 土体内部形成渗流通道, 使其由完全不透水状态转变为可渗水状态。此时, 进水量-压力曲线丧失原有的线性关系, 其斜率发生明显改变, 土样视为被击穿。该点的压力值即为土样的击穿压力。

基于上述方法, 可确定各组试验的击穿压力。分别绘出击穿压力与压实度、疏水剂掺量的关系曲线, 如图 8 所示。根据图 8 中曲线的分布规律, 可得到 4 点结论。

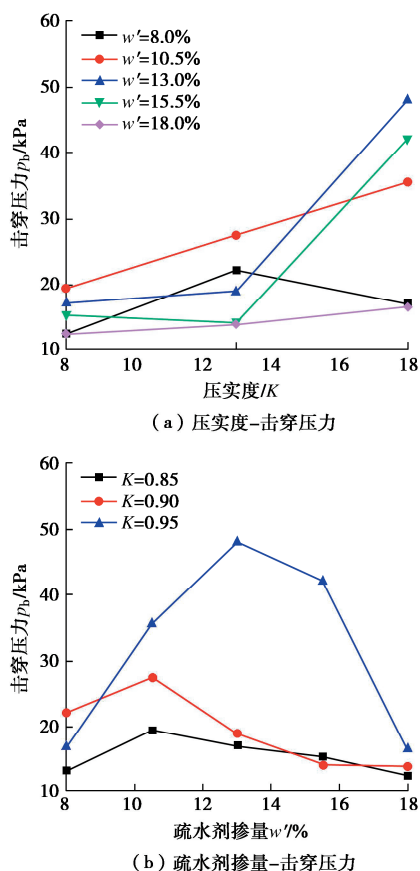


图 8 压实度和疏水剂掺量对疏水土击穿压力的影响

Fig. 8 Effects of compaction degree and content of hydrophobic agent on breakthrough pressure of hydrophobic soil

(1) 由图 8 (a) 可知, 在不同的疏水剂掺量下, 疏水土样的击穿压力整体上随着压实度的增大呈现增加趋势。疏水剂掺量为 10.5%, 13.0%, 15.5%, 18.0% 时, 压实度 0.95 的疏水土样取得最高的击穿压力。

(2) 由图 8 (b) 可知, 土体击穿压力随着疏水剂掺量的增加先增大后减小, 呈现单峰分布特征。峰值处对应的疏水剂掺量为相应压实度下的最优掺量。压实度为 0.85, 0.90, 0.95 时, 土样击穿压力峰值分别为 19.7, 27.4, 48.0 kPa。不同压实度对应的最优掺

量不尽相同, 最优疏水剂掺量介于 10.0%~14.0%。

(3) 随着土体压实度的增大, 土颗粒排列更加紧密, 其孔隙尺寸变小, 这是突破压力随压实度增大增大的直接原因。此外, 突破压力还受疏水剂掺量的影响, 土体斥水性 (如接触角) 的提升对与提高土体突破压力同样具有显著的积极作用。

(4) 本研究疏水土最高击穿压力接近 50 kPa, 适用于水深 5 m 以内的寒区渠道的抗渗抗冻处理。

3.3 讨论

在试样制备过程发现, 低压实度土样中出现土颗粒团聚的现象。该情况下水的运移将主要通过团聚体间相对疏松的孔隙, 导致低压实度土样的击穿压力偏低。当压实度达到 0.95 时, 其表观形态上土颗粒相对致密且无团聚现象发生。因此, 高压实度土样的击穿压力显著高于低压实度土样。关于压实度与土中水的运移微观机理的关系研究, 在未来还应加以拓展。

考虑到压实度对击穿压力的显著影响, 有必要针对高压实度土样的制备方法和性能进行研究。同时, 选用不同粒径级配土料, 并调整疏水剂配方和配比, 有助于对疏水土料的疏水特性进行全面的评估。此外, 现有研究尚无针对疏水土抑冰、抗冻机理的相关探究, 仍主要停留在冰层与土层之间黏附力的范德华键合自由能和化学键^[16]方面。本文也未针对疏水土防冻害机制进行专门研究, 未来进一步开展针对该问题的相关研究将对冻土区岩土工程建设和维护具有重要指导意义。

4 结 论

(1) 接触角测试结果表明, 经疏水剂改性处理的青海粉质黏土表现出优良的斥水性能。整体上, 接触角随疏水剂掺量的增加而增大; 当掺量达到 13.0% 时, 继续增大疏水剂掺量对土体的斥水性影响较小, 此时, 土体接触角达到最大值 (约 145°)。由于受接触角测量方法所限, 压实度并未表现出对接触角的明显影响。

(2) 疏水土样的击穿压力与压实度呈正相关, 较高压实度的土样能取得更高的击穿压力。压实度增大使得土样孔隙比降低, 孔径变小, 是导致击穿压力增大的主要原因。击穿压力还受疏水剂掺量的影响, 二者呈现单峰分布特征; 不同压实度条件下的最优掺量略有差别, 介于 10.0%~14.0%。在 0.95 压实度和 13.0% 疏水剂掺量下, 青海粉质黏土的击穿压力达到最大值 (50 kPa), 此时可阻隔约 5 m 静水头作用下的水入渗。

本研究围绕疏水土的斥水特性和击穿压力开展试验, 进一步明确了斥水性能评估指标。通过试验确定了改性青海粉质黏土的最大击穿压力和最优掺量, 为疏水土在冻土区岩土工程中的应用提供理论参考, 为工程抗渗设计提供新的思路。

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: 李璐获取研究数据, 分析解释研究数据, 撰写文章; 林承鑫获取研究数据, 分析解释研究数据, 撰写文章; 柴雨萱获取研究数据, 分析解释研究数据, 撰写文章; 石硕获取研究数据, 分析解释研究数据; 吴永康提出研究理念和设计研究, 对重要文章内容进行关键性修改, 对最终提交版本进行确认; 李旭对重要文章内容进行关键性修改。LI Lu: research data acquisition, analysis and interpretation of research data, manuscript writing. LIN Chengxin: research data acquisition, analysis and interpretation of research data, manuscript writing. CHAI Yuxuan: research data acquisition, analysis and interpretation of research data, manuscript writing. SHI Shuo: research data acquisition, analysis and interpretation of research data. WU Yongkang: proposal of research concept, design of study, manuscript revision, final version confirmation. LI Xu: manuscript revision.

参考文献:

- [1] LI S Y, LAI Y M, ZHANG M Y, et al. Study on long-term stability of Qinghai-Tibet Railway embankment[J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, **57**(2/3): 139-147.
- [2] 郑刚, 龚晓南, 谢永利, 等. 地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, **45**(2): 127-146. (ZHENG Gang, GONG Xiaonan, XIE Yongli, et al. State-of-the-art techniques for ground improvement in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, **45**(2): 127-146. (in Chinese))
- [3] 杨松, 龚爱民, 吴珺华, 等. 接触角对非饱和土中基质吸力的影响[J]. 岩土力学, 2015, **36**(3): 674-678. (YANG Song, GONG A-ming, WU Junhua, et al. Effect of contact angle on matric suction of unsaturated soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(3): 674-678. (in Chinese))
- [4] 吴宏伟. 大气-植被-土体相互作用: 理论与机理[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(1): 1-47. (WU Hongwei. Atmosphere-plant-soil interactions: theories and mechanisms[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(1): 1-47. (in Chinese))
- [5] 刘新喜, 夏元友, 蔡俊杰, 等. 降雨入渗下强风化软岩高填方路堤边坡稳定性研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(8): 1705-1709. (LIU Xinxi, XIA Yuanyou, CAI Junjie, et al. Study on stability of high-filled embankment slope of highly weathered soft rock under rainfall infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(8): 1705-1709. (in Chinese))
- [6] 游阳, 肖衡林, 谭燕. 疏水材料改性黏土渗透性能试验研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2022, **44**(1): 14-19. (YOU Yang, XIAO Henglin, TAN Yan. Experimental research on permeability of hydrophobic material modified clay[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2022, **44**(1): 14-19. (in Chinese))
- [7] 胡峰, 朱汉华, 徐璟, 等. 寒区路基抗冻害阻水改良土设计试验研究[J]. 路基工程, 2023(3): 6-12. (HU Feng, ZHU Hanhua, XU Jing, et al. Experimental research on design of frost-resistant water blocking modified soil for subgrade in cold regions[J]. Subgrade Engineering, 2023(3): 6-12. (in Chinese))
- [8] WANG Z, WU L, WU Q J. Water-entry value as an alternative indicator of soil water-repellency and wettability[J]. Journal of Hydrology, 2000, **231/232**(1/2/3/4): 76-83.
- [9] CARRILLO M L K, YATES S R, LETEY J. Measurement of initial soil-water contact angle of water repellent soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, **63**(3): 433-436.
- [10] CHOI Y, CHOO H, YUN T S, et al. Engineering characteristics of chemically treated water-repellent Kaolin[J]. Materials, 2016, **9**(12): 978.
- [11] 张文涛. 毛细管突破压力模拟实验及页岩封闭能力[J]. 石油实验地质, 2018, **40**(4): 577-582. (ZHANG Wentao. Experimental study of the breakthrough pressure of capillaries and the sealing ability of shale[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, **40**(4): 577-582. (in Chinese))
- [12] 栾茂田, 李顺群, 杨庆. 非饱和土的理论土-水特征曲线[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(6): 611-615. (LUAN Maotian, LI Shunqun, YANG Qing. Theoretical soil-water characteristic curve for unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(6): 611-615. (in Chinese))
- [13] RAMÍREZ-FLORES J C, BACHMANN J, MARMUR A. Direct determination of contact angles of model soils in comparison with wettability characterization by capillary rise[J]. Journal of Hydrology, 2010, **382**(1/2/3/4): 10-19.
- [14] 杨松, 吴珺华, 黄剑峰. 表面张力与接触角对膨胀土干缩开裂影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(9): 1645-1652. (YANG Song, WU Junhua, HUANG Jianfeng. Effects of pore water surface tension and contact angle on dry-shrinkage cracking of expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(9): 1645-1652. (in Chinese))
- [15] 杨家琦, 刘东海, 王泽帆. 相变黏土在三轴压缩下的渗透和应力应变特性研究[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(12): 2584-2593. (YANG Jiaqi, LIU Donghai, WANG Zefan. Permeability and strain-stress characteristics of phase-change clay under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(12): 2584-2593. (in Chinese))
- [16] 刘佳佳, 黄凯健, 王家庆, 等. 路面用超疏水材料的抑冰研究进展[J]. 化工新型材料, 2023, **51**(2): 223-228. (LIU Jiajia, HUANG Kaijian, WANG Jiaqing, et al. Research progress on ice suppression of superhydrophobic materials for road surface[J]. New Chemical Materials, 2023, **51**(2): 223-228. (in Chinese))