

冻融循环作用下 PVA 改良粗粒土无侧限抗压强度劣化规律研究

李超^{1,2} 桑鼎^{1,2} 周钺^{1,2} 王培清^{1,2*}

1. 西藏农牧学院水利土木工程学院西藏林芝 860000 中国;

2. 西藏农牧学院西藏土木水利电力工程技术研究中心西藏林芝 860000 中国

DOI: 10.12238/ems.v7i2.11591

[摘要] 冻融循环作用下粗粒土边坡的失稳垮塌是藏东南地区工程建设中常见的病害。为探讨和分析藏东南地区边坡失稳的成因,本文以波密县粗粒土边坡为研究对象,在粗粒土中添加聚乙烯醇(PVA)进行改良加固,并在冻融循环条件下开展无侧限抗压强度试验,研究确定聚乙烯醇(PVA)的最优掺量比例,为藏东南地区的改良粗粒土边坡在冻融循环作用下的稳定性提供技术指导。

[关键词] 粗粒土; 聚乙烯醇(PVA); 冻融稳定性; 无侧限抗压强度; 藏东南地区

Study on Unconfined Compressive Strength of Coarse-grained Soil Improved by PVA under Freeze-thaw Cycle

Li Chao^{1,2} SANG Ding^{1,2} ZHOU Yue^{1,2} WANG Peiqing^{1,2*}

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Tibet Agriculture and Animal Husbandry University, Linzhi 860000, China; 2. Research Center of Civil, Hydraulic and Power Engineering of Tibet, Tibet Agriculture and Animal Husbandry University, Linzhi 860000, China)

[Abstract] In The instability and collapse of coarse-grained soil slopes under the action of freeze-thaw cycle is a common disease in engineering construction in Southeast Tibet. In order to explore and analyse the causes of slope instability in southeastern Tibet, this paper takes the coarse granular soil slope in Bomi County as the research object, adds polyvinyl alcohol (PVA) in the coarse granular soil for improvement and reinforcement, and carries out the test of unconfined compressive strength under the conditions of freezing and thawing cycle, and researches to determine the optimal mixing ratio of polyvinyl alcohol (PVA), and provides technical guidance for the stability of the improved coarse granular soil slopes under the action of freezing and thawing cycles in the southeastern Tibet region. Provide technical guidance for the stability of improved coarse-grained soil slopes under freeze-thaw cycles in Southeast Xizang.

[Keywords] Coarse-Grained Soil; Polyvinyl Alcohol (PVA); Freeze-Thaw Stability; Unconfined Compressive Strength; Southeastern Tib

藏东南地区广泛分布的粗粒土边坡^[1], 具有高强度、低变形特性及良好的透水能力^[2-3]。同时, 该粗粒土边坡还表现出较强的抗震液化潜能^[4]。然而, 这类边坡在面对冻融循环作用时, 稳定性方面却表现出一定的脆弱性^[5-9]。春夏季节, 当冻结的土层开始解冻, 这些土体易受重力作用形成融冻泥流, 给基础设施及人民生命财产损失带来严重威胁^[10-12]。目前, 尽管已有研究对边坡改良加固方法(如聚乙烯醇(PVA)和硅灰添加)进行了深入探讨^[13-18], 但在冻融循环条件下对改良边坡稳定性的研究还存在一定的不足。

鉴于此, 本文在冻融循环条件下, 利用聚乙烯醇(PVA)对粗粒土进行改良, 研究冻融循环条件下的最优掺比, 为藏东南地区的工程建设提供技术指导。

1 试验材料及方案

1.1 试验用土

试验土样取自西藏自治区的波密县, 靠近 318 国道(坐标: 东经 95° 14', 北纬 30° 06')。这里的土壤是一种自然堆积的松散土体, 采样深度在 1.0 m 至 1.5 m 之间。土样经风干和筛分后, 根据《GB/T50123-2019 土工试验方法标准》, 对其进行了初步的土工性质分析。土样的基本物理性质如表 1 所示, 粒径级配曲线如图 1 所示。从粒径级配曲线可知, 该土样以中等粒径颗粒为主, 大于 0.075 mm 的颗粒占比超过 50%, 大于 0.5 mm 的颗粒粒径超过 5%。小于 0.075 mm 的颗粒含量也超过 5%, 但不超过 15%。不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 表明, 这些土样具有良

好的级配特性。

表 1 试验粗粒土基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of tested coarse-grained soil

最优含水率/%	最大干密度 / (g · cm ⁻³)	有效粒径 /mm	控制粒径 /mm	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c
12	1.79	0.13	0.8	21.489	1.603

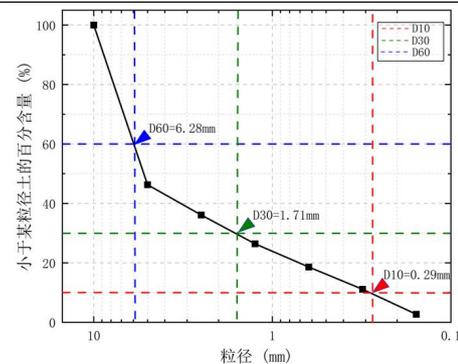


图 1 试验粗粒土粒径级配曲线

Fig. 1 Grain size grading curve of test coarse-grained soil

1.2 试验所用改良材料

1.2.1 聚乙烯醇(PVA)

聚乙烯醇(PVA)是一种合成聚合物, 其主链为碳碳单链,

侧链上携带羟基 (-OH), 赋予其出色的水溶性和亲水性。聚乙烯醇 (PVA) 的物理化学性质因其聚合度和醇解度的不同而异, 其中, 高聚合度的聚乙烯醇 (PVA) 显示更高的机械强度和热稳定性, 而高醇解度的聚乙烯醇 (PVA) 具有更佳的溶解性和成膜性。这些特性使聚乙烯醇 (PVA) 在岩土工程中尤其适用于边坡改良。

本试验使用的是 PVA 20-99 型号, 具有高聚合度和 99% 的醇解度, 非常适合用于边坡改良和加固。PVA 的物理化学特性对于实验结果的解释至关重要。PVA 的物理化学参数如表 2 所示:

表 2 PVA 基本物理性质

粘度/mPas	挥发分/%	灰分/%	pH
34.0~42.2	5	0.5	5~7

1.3 试验方案

1.3.1 试样制作

实验中使用的粗粒土经过风干处理, 根据最优含水率, 向土样中添加 6%、8%、10%、12%、14% 不同比例的 PVA, 旨在评估 PVA 掺量对土体性能的影响范围。使用静压制土器制作直径 50 mm、高 100 mm 的圆柱形试样。试样制作完成后, 于模拟自然环境 (温度 20°C, 湿度 40%) 下进行养护, 养护时间分别为 3 d、7 d、14 d、28 d。

1.3.2 无侧限抗压试验和冻融循环试验

试样用保鲜膜包裹后, 放入冻融箱进行冻融循环。考虑到藏东南地区冻融季节温度波动 (-20°C 至 20°C), 实验设定的最低和最高温度分别为 -20°C 和 20°C。根据 [参考文献] [19-20], 在 -20°C 下冻结 12 h 可确保试样内部水分完全冻结, 20°C 下融化 12 h 则可使水分完全融化。试验遵循此冻融循环模式 (每次循环包括冻结 12 h 与融化 12 h), 设置了 3、7、14、28 次冻融循环, 试验方案如表 3 所示。

冻融周期结束后, 取出试样, 去除保鲜膜, 在无侧限抗压仪上进行测试, 记录应力-应变曲线。测试过程中, 加载速率设定为 1 mm/min。

表 4 自然养护下 PVA 改良粗粒土强度特性

参数	素土 (kPa)	6%PVA (kPa)	8%PVA (kPa)	10%PVA (kPa)	12%PVA (kPa)	14%PVA (kPa)
自然养护 3 d 无侧限抗压强度	10.18	147.7	178.25	234.28	320.86	642.04
自然养护 7 d 无侧限抗压强度	15.28	315.76	499.11	713.01	1130.96	2053.50
自然养护 14 d 无侧限抗压强度	25.46	407.44	555.13	789.41	1115.36	2012.74
自然养护 28 d 无侧限抗压强度	25.46	417.62	560.23	814.87	1115.38	2012.74

2.2 冻融循环条件下 PVA 改良土的改良效果分析

2.2.1 PVA 掺量对强度的影响

为了研究不同 PVA 掺量对试样无侧限抗压强度随冻融循环次数的影响, 其试验结果如图 2a 所示。从图中可以看出, 经过 3 至 7 次冻融循环, 改良试样的无侧限抗压强度显著增加, 均达到峰值。经过 7 次冻融循环后, 无侧限抗压强度呈现缓慢的下降趋势。经过 14 次冻融循环后, 含量低于 10% 的 PVA 改良试样无侧限抗压强度趋于稳定, 但含量超过 10% 的 PVA 改良试样无侧限抗压强度还呈现逐步下降趋势。由此可以看出, 过度增加 PVA 含量, 经过 14 次以上冻融循环, 其对土体的改良效果并不理想。

为了研究在相同冻融循环次数下, 无侧限抗压强度随 PVA 掺量的变化情况, 其试验结果如图 2b 所示。经过 3 次冻融循环, 不同 PVA 掺量试样的无侧限抗压强度存在显著差异。随着 PVA 掺量的增加, 无侧限抗压强度持续增加, 其中 14%PVA 掺量试样体现出最高的强度, 经历 28 次冻融循环后达到 1847.13 kPa。分析原因这种强度的增加主要在于 PVA 分子在土粒子表面的吸附, 形成保护膜。在冻结过程中, 水分子结成冰晶, 导致 PVA 分子和土颗粒在未冻结水相中的浓缩, 从而增强了二者间的相互作用。PVA 和土粒子的浓缩促使 PVA 在土颗粒周围形成弹性立体丝网, 增强了土粒子间的结合力, 从而提高了土体的强度和稳定性。当 PVA 掺比达到 14% 时,

表 3 试验方案

组别	PVA 溶液掺量/%	自然养护天数/d	冻融循环/次
第一组	0	3、7、14、28	—
第二组	6	3、7、14、28	3、7、14、28
第三组	8	3、7、14、28	3、7、14、28
第四组	10	3、7、14、28	3、7、14、28
第五组	12	3、7、14、28	3、7、14、28
第六组	14	3、7、14、28	3、7、14、28

2 试验结果与分析

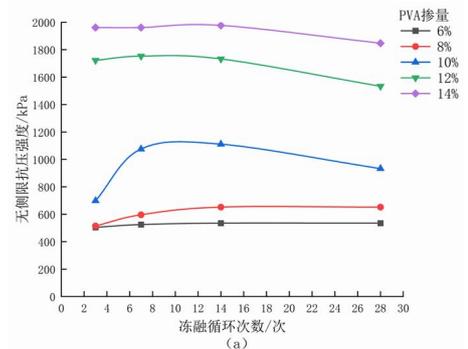
2.1 自然养护条件下 PVA 改良土的改良效果分析

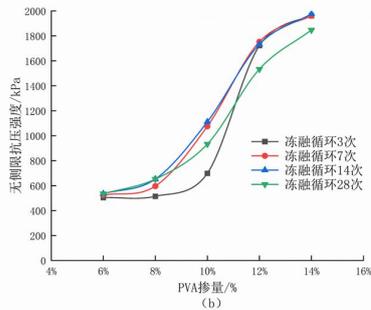
在试验中, 通过添加不同掺比的 PVA, 在自然养护条件下, 对改良粗粒土的无侧限抗压强度进行了测试, 试验结果如表 4 所示。试验结果表明, 在不同养护时期, 无侧限抗压强度与 PVA 掺量之间存在显著的正相关关系。分析原因是 PVA 的添加, 明显改善了土体的粘结力和微观结构, 增强了整体稳定性。

在养护的初期阶段 (如自然养护 3 d), 观察到无侧限抗压强度的增加幅度较小。分析原因, 土体中含有较多自由水, 且 PVA 未完全形成弹性立体网络结构。随着养护时间增长至 7 d, 无侧限抗压强度的增长显著。例如, 当 PVA 掺量为 6% 时, 7 d 养护后的无侧限抗压强度约为 3 d 的两倍以上; 当 PVA 掺量达到 14% 时, 无侧限抗压强度超过 3 d 养护强度的三倍以上, 表明此时 PVA 在土体中已形成完整的立体网络结构, 将土颗粒包裹, 从而显著提高了土体的胶结强度。

PVA 改良粗粒土试样的无侧限抗压强度随自然养护天数的延长呈现逐渐增加的趋势。具体来说, 当 PVA 含量低于 14% 时, 随着养护时间的增长, 无侧限抗压强度可提高 250% 至 348%, 特别是在养护初期, 强度通常提升超过 210%, 特别是 10%PVA 掺量时, 养护初期强度提高了 3.04 倍。当养护天数超过 14 d 时, 含量超过 10% 的试样的无侧限抗压强度趋于稳定, 表明过度增加 PVA 含量对试样的强度增加意义不大, 反而增加了经济上的成本, 因此确定经济下的最优掺比尤为重要。

PVA 分子能够充分包裹土颗粒。在融化阶段, 虽然冰晶融化使 PVA 和土颗粒重新分散于水中, 但由于 PVA 链在土颗粒表面已形成较稳定的结构, 这一过程并非完全可逆。随着冻融循环的重复, PVA 与土颗粒间的相互作用进一步增强, 导致试样的机械和热性质发生显著变化, 尤其是在抗压强度、热稳定性和抗冻性方面的显著提升。从图 2b 中可以看出, 随着冻融循环次数的增加, 改良试样的强度增长还是低于冻融循环次数较低情况下强度的增长量。表明过度增加 PVA 含量对土体改良并非是好事情, 同时也没有表现良好的经济性。





a-不同养护时间无侧限抗压强度变化曲线;
b-不同PVA掺量无侧限抗压强度变化曲线。

图 2 PVA 掺量及冻融循环次数与改良试样无侧限抗压强度关系

Fig. 2 Relationship between PVA dosage and number of freeze-thaw cycles and unconfined compressive strength of modified specimens

2. 2. 2 冻融循环作用对强度的影响

从图 3a 和表 5 中可以看出, 经过 3 次冻融循环后, 不同 PVA 掺量下试样的应力-应变曲线。掺量分别为 6%, 8%, 10%, 12% 和 14% 的改良粗粒土试样的无侧限抗压强度分别达到了 504.46 kPa、514.65 kPa、698.09 kPa、1722.29 kPa 和 1961.78 kPa。与自然养护条件相比, 相应的无侧限抗压强度提高了约 3.42 倍、2.89 倍、2.98 倍、5.37 倍和 3.06 倍。在自然养护条件下, 养护 3 d 时, 试样内部的含水率较高, 导致部分 PVA 以溶液形式存在, 未能形成完整的弹性立体丝网结构。而在冻融循环条件下, 由于自由水的冻结, 加速了弹性立体丝网结构的形成以及土体骨架的稳定性, 从而显著提高了土体的强度。

表 5 冻融循环条件下 PVA 改良粗粒土强度特性

Table 5 Strength characteristics of PVA-amended coarse-grained soil under freeze-thaw cycle conditions

参数	6%PVA (kPa)	8%PVA (kPa)	10%PVA (kPa)	12%PVA (kPa)	14%PVA (kPa)
冻融循环 3 次无侧限抗压强度	504.46	514.65	698.09	1722.29	1961.78
冻融循环 7 次无侧限抗压强度	524.84	596.18	1075.16	1752.87	1961.78
冻融循环 14 次无侧限抗压强度	535.03	652.23	1110.83	1732.53	1977.07
冻融循环 28 次无侧限抗压强度	535.03	652.23	1140.67	1533.26	1847.13

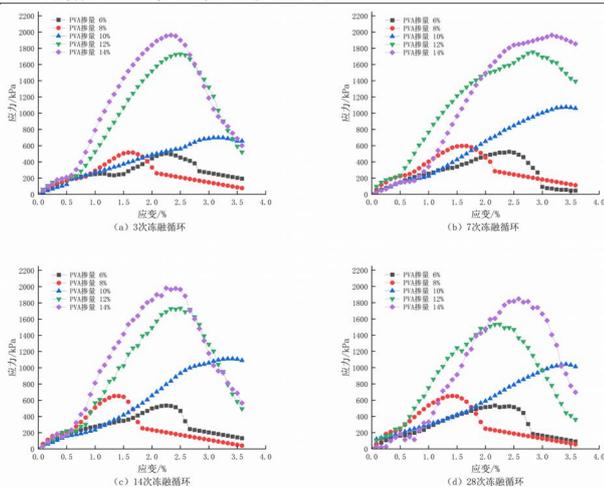


图 3 冻融前后 PVA 改良土的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of PVA amended soil before and after freezing and thawing

2. 3 冻融前后 PVA 改良土质量变化

从图 4 可以看出, PVA 改良土试样在经历冻融循环过程中, 其质量在最初几次循环后出现下降, 随后逐渐趋于稳定。特别地, 当 PVA 掺量为 14% 时, 在 3 次冻融循环后, 质量损

从图 3b 和表 5 中可以看出, 经过 7 次冻融循环后, 不同 PVA 掺量下试样的应力-应变曲线。掺量为 6%、8%、10%、12%、14% 的改良粗粒土试样, 在经历 7 次冻融循环后, 无侧限抗压强度分别为 524.84 kPa, 596.18 kPa, 1075.16 kPa, 1752.87 kPa, 1961.78 kPa, 强度较冻融循环 3 次时的强度有较小幅度的提升, 只有 10%PVA 改良的强度较冻融循环 3 次时的强度有所提升, 其他四个比例的提升均不是很大。分析原因是因为冻融循环对土体的微观结构和物理性质有显著影响。初期的冻融循环导致 PVA 在土体中更加均匀地分布, 从而增强强度。随着冻融循环次数的增加, 这种效应逐渐减弱, 导致强度提升幅度减小。

从图 3c 和表 5 中可以看出, 经过 14 次冻融循环后, 不同 PVA 掺量下试样的应力-应变曲线。所有试样的强度在经历 14 次冻融循环后相较于自然养护条件有所提高, 但 14%PVA 改良试样在冻融循环 14 次后的强度却略微下降了 1.7%, 达到 1977.07 kPa。此外, 不同 PVA 掺量的应力-应变曲线在达到峰值的时间上表现出明显的差异, 且各试样的曲线峰值波动较大, 这表明随着冻融循环次数的增加, PVA 掺量增加对土体强度增加影响不大, 表现出过度增加 PVA 含量并非是件好事。

从图 3d 和表 5 中可以看出, 经过 28 冻融循环后, 不同掺量 PVA 的应力-应变曲线。掺量为 6%、8%、10%、12%、14% 的改良粗粒土试样, 在经历 28 次冻融循环后, 无侧限抗压强度分别为 535.03 kPa, 652.23 kPa, 1140.67 kPa, 1533.26 kPa, 1847.13 kPa, 与 14 次冻融循环相比, 均发生了下降。分析原因, 经过多次冻融循环后, 土体的微观结构发生变化。初期的冻融循环可能有助于 PVA 与土颗粒间形成更紧密的结合, 但随着循环次数的增加, 因为冻融循环的反复作用, 反而破坏了土体结构, 从而降低了土体的整体强度。

失极小, 不超过 1.3%; 当 PVA 掺量为 10% 时, 在 3 次冻融循环后, 质量损失不超过 3.8%; 而 6%PVA 掺量的试样在 7 次冻融循环后质量趋于稳定, 但质量损失达到 11.25%。分析原因, 冻融循环导致土体微观结构的变化, 特别是在初期冻融循环中, 较低的 PVA 掺量不足以在土体内部形成足够强的结合力, 导致冻融循环期间更多的颗粒和水分丢失, 从而导致较大的质量损失。较高掺量的 PVA 在土体表面形成更为稠密和完整的保护层, 有效防止了水分和细粒的流失, 因此质量损失较小。

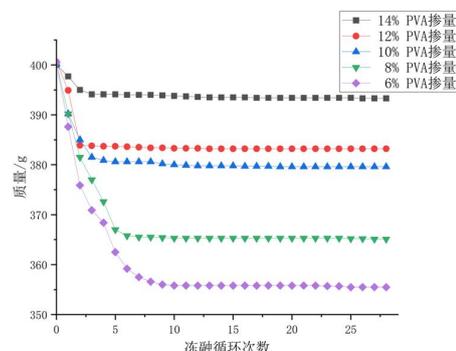


图 4 冻融前后改良粗粒土的质量变化

Fig. 4 Changes in quality of improved coarse-grained

soil before and after freezing and thawing

3结论

通过添加不同 PVA 含量改良粗颗粒土, 经过冻融循环试验, 并开展无侧限抗压强度试验研究, 可以得出以下几方面的结论。

(1) 研究揭示了冻融循环对 PVA 改良土无侧限抗压强度的重要影响。经过 3 至 7 次冻融循环, 试样强度显著增加并达到峰值; 经过 7 至 14 次冻融循环后, 试样强度逐渐降低, 超过 14 次冻融循环后试样强度逐渐趋于稳定。这反映了冻融循环对土体微观结构和物理性质的影响。

(2) 冻融循环初期质量略有下降随后趋于稳定。较低的 PVA 掺量不足以在土体内部形成足够强的结合力, 导致冻融循环期间更多的颗粒和水分丢失, 从而导致较大的质量损失。较高掺量的 PVA 在土体表面形成更为稠密和完整的保护层, 有效防止了水分和细粒的流失, 因此质量损失较小。

(3) 在冻融循环条件下, 使用聚乙烯醇 (PVA) 改良粗颗粒土时, 最优的 PVA 掺入比例约为 10% 左右。当 PVA 的掺入比例超过此值时, 试样在经历 7 次冻融循环后无侧限抗压强度达到峰值。然而, 随着冻融循环次数达到 28 次, 含有 12% 和 14% PVA 的样品的无侧限抗压强度分别下降了 12.5% 和 4.47%。这表明, 虽然在初始阶段无侧限抗压强度有所提高, 但随着冻融次数的增加, 较高掺量的 PVA 对于土体长期稳定并不利。与之相比, 当 PVA 掺量低于最优比例如 6%、8%, 试样的无侧限抗压强度仅分别达到 10% 掺量时的 46.9% 和 57.2%。因此, 为了确保在冻融循环条件下土体的强度和长期稳定性, 建议使用 10% 的 PVA 掺量。

(4) 利用 PVA 对粗粒土进行改良, 在聚乙烯醇 (PVA) 最优掺量 10% 的条件下, 体现出了较好的抗冻性。经 28 次冻融循环后, 试样的无侧限抗压强度测定值达到 1140.67 kPa, 相比于 7 d 龄期养护的强度, 强度提高了 1.06 倍; 与同龄期自然养护条件下的强度相比, 强度提高了 1.4 倍。这一发现对于改良土在寒冷地区工程应用的设计评估和粗颗粒土边坡治理具有重要意义。

【参考文献】

[1] 赵哲苇, 李家欢, 李中尧, 等. PVA/硅灰改良砂土力学性能试验研究[C]//2022年工业建筑学术交流会议论文集(下册), 2022: 672-676, 820.

[2] 史海平, 李中尧, 李文伟, 等. 聚丙烯酰胺改良黏土边坡稳定性分析[J]. 建筑施工, 2022, 44(3): 512-516.

[3] 史海平, 李文伟, 李中尧, 等. 降雨强度对川藏公路 102 滑坡群 2[#]滑坡体影响[J]. 土工基础, 2022, 36(5): 701-704, 708.

[4] 褚福永, 朱俊高, 贾华, 等. 粗粒土卸载-再加载力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1061-1066.

[5] 徐明, 宋二祥. 粗粒土的一种应变硬化模型[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2967-2972, 2986.

[6] 张以晨, 李欣, 张喜发, 等. 季冻区公路路基粗粒土的冻胀敏感性及其分类研究[J]. 岩土工程学报, 2007, (10): 1522-1526.

[7] 周小军, 邹强, 向灵芝. 粗粒土应力-应变特征试验[J]. 西南科技大学学报, 2012, 27(4): 40-43.

[8] 陈晓斌, 张家生, 封志鹏. 红砂岩粗粒土流变工程特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, (3): 601-607.

[9] 王光进, 杨春和, 张超, 等. 粗粒土三轴试验数值模拟与试样颗粒初始架构初探[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 585-592.

[10] 王习敏, 黄荣刚, 徐志达, 等. 基于深度学习和高分遥感影像的青藏高原东部融冻泥流阶地提取研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(5): 1419-1428.

[11] 娄佩卿, 吴通华, 陈杰, 等. 基于高分遥感影像和集成机器学习的祁连山区融冻泥流识别研究[J]. 冰川冻土, 2023, 45(2): 786-797.

[12] 祁有辉, 张志军. 蠕动的土地: 融冻泥流[J]. 地球, 2021, (6): 32-37.

[13] Zhao Z, Li W, Shi H, et al. Strength of Coarse-Grained Soil Stabilized by Poly (Vinyl Alcohol) Solution and Silica Fume under Wet-Dry Cycles[J]. Polymers, 2022, 14(17): 3555.

[14] Liao G, Wei J, ang R, et al. Experimental Study on Shearing Strength of Sand Pebble in Southeast Tibet[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2020, 440(5): 052068.

[15] Li Z, Zhao Z, Shi H, et al. Experimental Investigation of Mechanical, Permeability, and Microstructural Properties of PVA-Improved Sand Under Dry-Wet Cycling Conditions[J]. Frontiers in Physics, 2021, 9: 761754.

[16] Shi H, Li Z, Li W, et al. Effect of freeze-thaw cycles on the mechanical properties of polyacrylamide-and lignocellulose-stabilized clay in Tibet[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, 2021: 1-16.

[17] Zhongyao L, Zhewei Z, Haiping S, et al. Experimental Study on PVA-MgO Composite Improvement of Sandy Soil[J]. Materials, 2022, 15(16): 5609-5609.

[18] Jianfei W, Guangchen L, Yonggang G, et al. Numerical Simulation Study on Mechanical Properties of Coarse-Grain Mixed Soil High and Steep Slope at Different Water Contents[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 440052067-052067.

[19] JING J J, WU Z J, YAN W J, et al. Experimental Study on Progressive Deformation and Failure Mode of Loess Fillslopes under Freeze-thaw Cycles and Earthquakes[J]. Engineering Geology, 2022, 310: 106896.

[20] LU Y, LIUS, WENGL, et al. Fractal Analysis of Cracking in a Clayey Soil under Freeze-thaw Cycles[J]. Engineering Geology, 2016, 208: 93-99.

作者简介: 李超 (1999—), 男, 汉族, 内蒙古人, 研究生, 主要从事土体改良及土工测试技术研究。

通信作者简介: 王培清 (1972—), 男, 汉族, 四川射洪县人, 教授, 博士, 主要从事岩土工程及土木工程试验研究。

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点支持项目 (U22A20594); 西藏自治区科技厅自然科学基金重点项目 (XZ202201ZR0068G)