

# 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<sup>1,2,3</sup> 徐瑞娇<sup>1</sup> 罗敬松<sup>1</sup> 王培清<sup>2,3\*</sup>

(1. 中国水利水电第九工程局有限公司, 贵州贵阳 550081; 2. 西藏农牧大学 水利土木工程学院; 3. 西藏农牧大学 西藏土木水利电力工程技术研究中心, 西藏林芝 860000)

**摘要** 冻融循环作用导致的粗颗粒土边坡失稳垮塌, 是藏东南地区工程建设面临的典型病害, 而粗颗粒土在冻融条件下的强度劣化是引发该问题的关键因素之一。为提升藏东南地区粗颗粒土边坡的冻融稳定性, 本文以波密县粗颗粒土为研究对象, 采用聚乙烯醇 (PVA) 对其进行改良加固, 通过开展冻融循环条件下的无侧限抗压强度试验, 分析不同 PVA 掺量、冻融循环次数及养护时间对改良土强度的影响规律, 并确定 PVA 的最优掺量比例。研究结果可为藏东南地区改良粗颗粒土边坡的设计与施工提供技术支持, 进而保障该区域工程建设的安全性及稳定性。

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

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 2096-4781 (2025) 06-0748-08

DOI: 10.19707/j.cnki.jpa.2025.06.008

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

LI Chao<sup>1</sup>, XU Ruijiao<sup>1</sup>, LUO Jingsong<sup>1</sup>, WANG Peiqing<sup>\*</sup>

(1. China Hydropower Ninth Engineering Bureau. Co., LTD., Guiyang, Guizhou 550081, China; 2. Water Conservancy Project & Civil Engineering College, Xizang Agriculture & Animal Husbandry University, Linzhi 860000, China; 3. Research Center of Civil, Hydraulic and Power Engineering of Xizang, Xizang Agricultural and Animal Husbandry University, Linzhi, Xizang 860000, China)

**Abstract:** The instability and collapse of coarse-grained soil slopes caused by freeze-thaw cycles are typical hazards in engineering construction in the southeastern Xizang region. The strength degradation of coarse-grained soil under freeze-thaw conditions is one of the key factors triggering this problem. To improve the freeze-thaw stability of coarse-grained soil slopes in southeastern Xizang, this study takes the coarse-grained soil in Bomi County as the research object and uses polyvinyl alcohol (PVA) for its modification and reinforcement. Through unconfined compressive strength tests under freeze-thaw cycle conditions, it analyzes the influence laws of different PVA contents, freeze-thaw cycle times and curing periods on the strength of the modified soil, and determines the optimal PVA content ratio. The research results can provide technical support for the design and construction of modified coarse-grained soil slopes in southeastern Xizang, thereby ensuring the safety and stability of engineering

收稿日期: 2024-09-15

作者简介: 李超 (1999-), 男, 汉族, 内蒙古人, 硕士。研究方向: 主要从事土体改良及土工测试技术方面的研究。

通信作者: 王培清 (1972-), 男, 汉族, 四川射洪县人, 博士, 教授。研究方向: 主要从事岩土工程及土木工程试验方面的研究。

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)。

construction in this region.

**Key words:** Coarse-Grained Soil; Polyvinyl Alcohol (PVA); Freeze-Thaw Stability; Unconfined Compressive Strength; Southeastern Xizang

藏东南地区广泛分布的粗颗粒土边坡<sup>[1]</sup>，具有高强度、低变形特性及良好的透水能力<sup>[2,3]</sup>。同时，该粗颗粒边坡还表现出较强的抗震液化潜能<sup>[4]</sup>。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<sup>[5-8]</sup>。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造成严重损失<sup>[9]</sup>。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<sup>[10]</sup>，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）对粗颗粒土进行改良，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1.0~1.5 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

Tab.1 Basic physical properties of tested coarse-grained soil

最优含水率/%	最大干密度/ $g \cdot cm^{-3}$	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

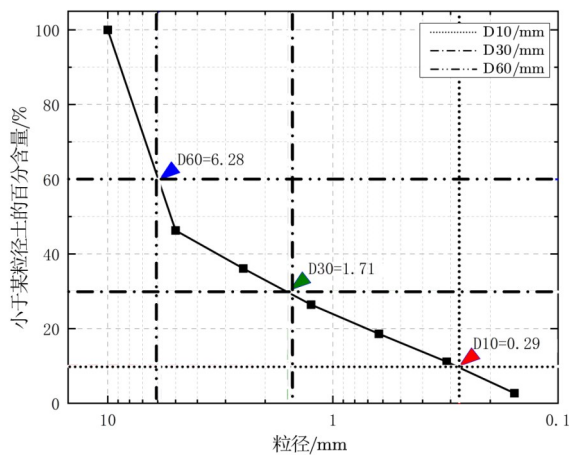


图1 试验粗粒土粒径级配曲线

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试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  
Tab.2 Basic physical properties of PVA

黏度/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

试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℃, 湿度 40%) 下进行养护, 养护时间分别为 3、7、14、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。根据取样地气候条件, 试验设定的冻结温度为 -20℃, 熔解温度为 20℃。根据文献<sup>[10]</sup>, 在 -20℃ 下冻结 12 h 可确保试样内部水分完全冻结, 20℃ 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, 设置了 3、7、14、28 次冻融循环, 试验方案表 3 所示。

表 3 试验方案  
Tab.3 Pilot program

组别	PVA 溶液掺量/%	自然养护天数/d	冻融循环/次
第 1 组	0	3、7、14、28	-
第 2 组	6	3、7、14、28	3、7、14、28
第 3 组	8	3、7、14、28	3、7、14、28
第 4 组	10	3、7、14、28	3、7、14、28
第 5 组	12	3、7、14、28	3、7、14、28
第 6 组	14	3、7、14、28	3、7、14、28

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。

## 1.4 试验设备

### 1.4.1 冻融循环箱

冻融循环箱型号为TYC-HDM慢速冻融试验机，控温范围 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，温控精度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，采用空气中制冷冻结、空气加热融解的方法进行周期性冻融循环。

### 1.4.2 无侧限抗压仪

无侧限抗压试验采用TWSZ-100型应变控制式无侧限抗压仪，用于测定试样的无侧限抗压强度及绘制应力—应变曲线；试样尺寸为直径50 mm、高度100 mm，高径比控制为2:1；仪器最大竖向压力为100 kN，试验时不施加围压，仅进行单轴压缩；剪切速度设定为1 mm/min，当试样轴向变形达到25 mm时停止试验。

## 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3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显重要。

表4 自然养护下PVA改良粗粒土强度特性

Tab.4 Strength characteristics of PVA-amended coarse-grained soil under natural conservation

无侧限抗压强度/d	素土 /kPa	6%PVA /kPa	8% PVA /kPa	10% PVA /kPa	12% PVA /kPa	14% PVA /kPa
自然养护 3	10.18	147.7	178.25	234.28	320.86	642.04
自然养护 7	15.28	315.76	499.11	713.01	1 130.96	2 053.50
自然养护 14	25.46	407.44	555.13	789.41	1 115.36	2 012.74
自然养护 28	25.46	417.62	560.23	814.87	1 115.38	2 012.74

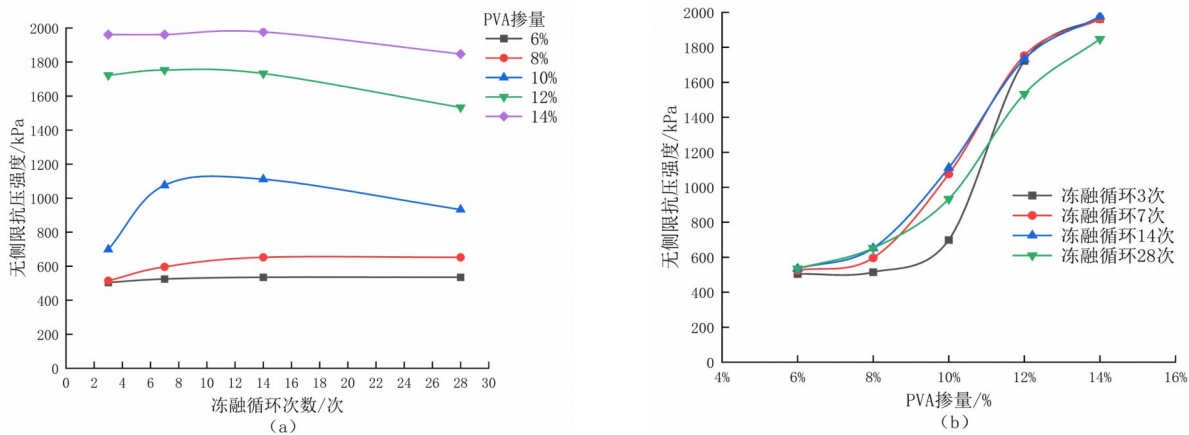
### 2.2 冻融循环条件下PVA改良土的改良效果分析

#### 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2 a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1 847.13 kPa。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，详见图3。当PVA掺比达到14%时，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好事，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4a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、1 722.29 kPa和1 961.78 kPa。与自然养护条件相比，相应的无侧限抗压强度提高了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。

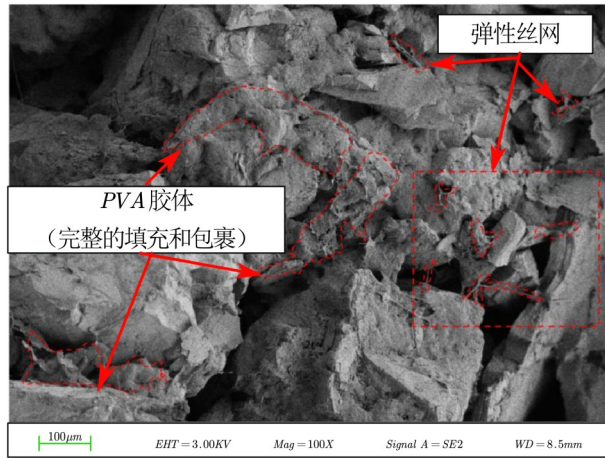


图3 PVA 形成立体弹性丝网连接和填充粗颗粒土

Fig.3 PVA forms a three-dimensional elastic mesh to connect and fill coarse-grained soil

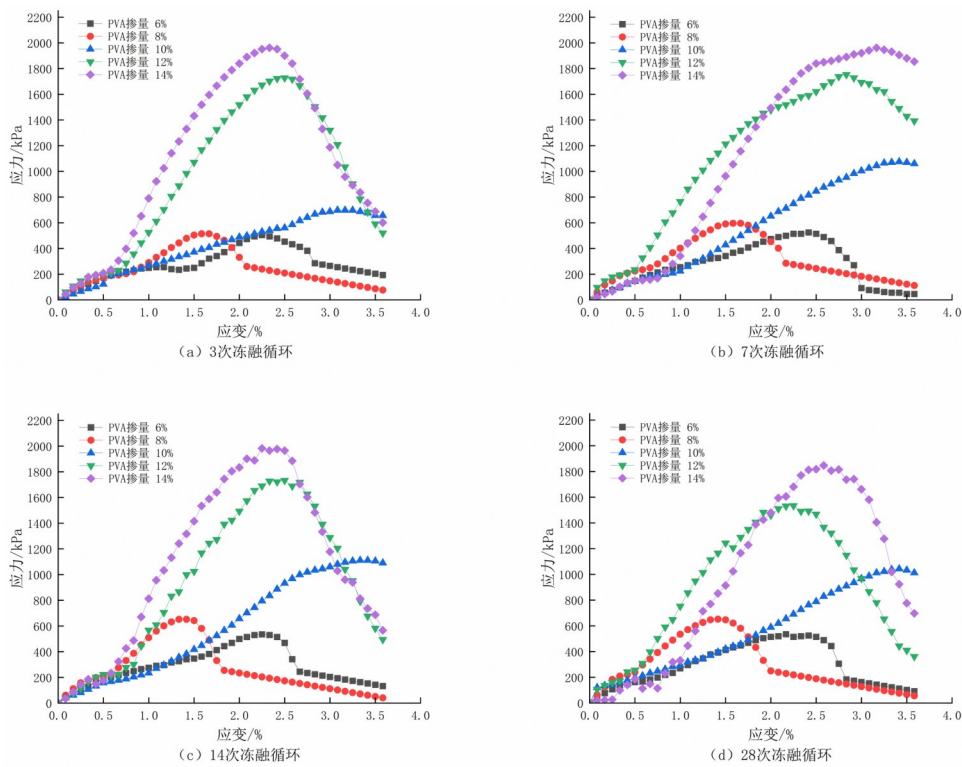


图4 冻融前后PVA改良土的应力—应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of PVA amended soil before and after freezing and thawing

从图4b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，1 075.16 kPa，1 752.87 kPa，1 961.78 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，其他四个比例的强度提升均不是很大。分析原因是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4c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1 977.07 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含量并非件好事。

从图4d和表5表明，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，1 140.67 kPa，1 533.26 kPa，1 847.13 kPa，与14次冻融循环相比，均发生下降。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。

表5 冻融循环条件下PVA改良粗粒土强度特性

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

无侧限抗压强度/次	6%PVA /kPa	8%PVA /kPa	10%PVA /kPa	12%PVA /kPa	14%PVA /kPa
冻融循环3次	504.46	514.65	698.09	1 722.29	1 961.78
冻融循环7次	524.84	596.18	1 075.16	1 752.87	1 961.78
冻融循环14次	535.03	652.23	1 110.83	1 732.53	1 977.07
冻融循环28次	535.03	652.23	1 140.67	1 533.26	1 847.13

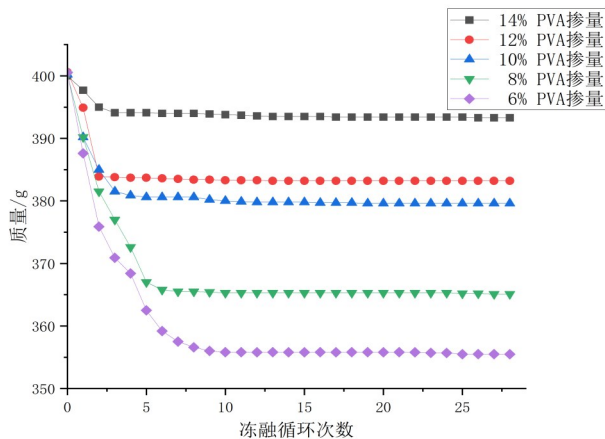


图5 冻融前后改良粗粒土的质量变化

Fig.5 Changes in quality of improved coarse-grained soil before and after freezing and thawing

### 2.3 冻融前后PVA改良土质量变化

从图5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。

### 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14次冻融循环，试样强度显著增加并达到峰值；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）改良粗粒土时，最优的PVA掺入比例为10%。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,李文炜,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] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Liao G, Wei J, ang R, et al. Experimental Study on Shearing Strength of Sand Pebble in Southeast Xizang[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2020, 440(5): 052068.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.