

石灰改良黄土物理力学与抗冻性能研究分析

Research and Analysis of Physics Mechanics and Antifreeze Properties of Lime Improved Loess

魏 东¹, 张海洋², 李旭瑞²

(1. 河南省交通建设技术中心, 郑州 450016; 2. 中犇检测认证有限公司, 郑州 450003)

摘 要: 为了分析石灰掺入对黄土物理力学与抗冻性能的影响规律, 制备了 6 组不同生石灰掺量的改良黄土试样, 测试了其界限含水率、最优含水率、最大干密度、抗压强度、黏聚力、内摩擦角以及抗冻性能。结果表明: 随着石灰掺量的增大, 改良黄土塑性指数呈现先减小后缓慢增大的变化趋势, 最优含水率逐渐提高, 最大干密度逐渐减小; 改良黄土的抗压强度、黏聚力和内摩擦角随石灰掺量的增大而逐渐提高; 石灰掺入可以有效改善改良黄土的抗冻性能; 综合考虑改良黄土的含水率、干密度、抗压强度、黏聚力、内摩擦角和抗冻性能, 最佳石灰掺量为 8%。为相关工程应用提供理论基础。

关键词: 石灰改良黄土; 界限含水率; 抗压强度; 抗剪强度; 冻融循环

中图分类号: U416.1 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 03-0145-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.03.026

WEI Dong¹, ZHANG Haiyang², LI Xurui²

(1. Henan Provincial Transportation Construction Technology Center, Zhengzhou 450016, China;
2. Zhongben Testing and Certification Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: In order to analyze the influence of lime incorporation on physical mechanics and frost resistance of loess, Preparation of six sets of stabilized loess specimens with various lime contents, and their limit water content, optimal water content, maximum dry density, compressive strength, cohesion, internal friction angle and frost resistance were tested. The results show that: With the increase of lime dosage, the plasticity index of improved loess decreases first and then increases slowly, the optimal water content increases gradually, and the maximum dry density decreases gradually. The compressive strength, cohesion and internal friction angle of the improved loess gradually increased with the increase of lime dosage. The addition of lime can effectively improve the frost resistance of the improved loess. Considering the moisture content, dry density, compressive strength, cohesion, internal friction angle and freezing resistance of the improved loess, the optimal lime dosage is 8%. Provide a theoretical basis for relevant engineering applications.

Key words: lime improved loess; boundary moisture content; compressive strength; shear strength; freeze-thaw cycle

0 引言

道路施工过程中土体的物理力学和抗冻性能关系到基坑的稳定性, 特别是以软土为主的沿海地区。沿河地区土体, 难以达到路基的稳定性要求^[1-2], 需要加入石灰、粉煤灰、水泥等固化剂进行处理^[3-4], 提升整体的工程性能指标, 目前改良土技术已经在

道桥技术

铁路、公路、基坑等工程中得到广泛的应用^[5-6]。

学者们也在此方面开展了大量的研究工作，李春雨等^[7]通过控制变量法研究水泥掺量及养护龄期对水泥改良青海黄土的力学性能影响；赵雄飞等^[8]研究了干湿循环下木质素改良红黏土抗剪强度指标及动剪切模量变化规律；马玲等^[9]针对我国冻土地区公路建设问题，提出采用石灰改良粪土，并对改良土的不同石灰掺量下的温度场、变形场和水分场变化规律进行分析，给出了最佳石灰掺量；王红旗等^[10]分析了石灰改良红黏土的导热系数随石灰掺量的变化规律，建立了经验函数和神经网络预测模型；许海亮等^[11]研究了石灰改良高液限土的路基路用性能，根据室内试验确定了最佳的石灰掺量，并建立数值计算模型分析了改良土路基的抗震效果；龚锦林等^[12]研究了石灰改良膨润土的抗压强度、压缩系数、黏聚力、内摩擦角等力学性能，确定了石灰的最佳掺量；滕琴^[13]为提升石灰改良膨胀土路基施工质量，结合工程实例，提出膨胀土对公路路基产生的危害与石灰改良膨胀土路基施工要点；刘俊等^[14]针对红黏土不良工程性质，采用硫酸渣和石灰对红黏土进行改良，通过室内试验对改良后红黏土的强度特征和变形特征进行分析，得到硫酸渣和石灰混合改良红黏土的最佳混合配比；杜文博等^[15]为探讨压实度、掺灰量及养护龄期和含水率对石灰土强度的影响，配制 5% 石灰的宿迁黏土，制样并在标准养护室养护 7 d 后进行无侧限抗压强度试验，并讨论了石灰土无侧限抗压强度的影响因素；卢瑞峰^[16]为提高路基结构的强度和整体稳定性，结合实际工程，阐述石灰改良低液限黏土机理，分别结合室内击实试验、CBR 试验、膨胀率试验及无侧限抗压强度试验来确定石灰最佳掺量，并对石灰改良低液限黏土路基施工技术要点进行研究。

在上述研究的基础上，现场取样制备石灰改良黄土的室内试验样品，开展含水率、密度、抗压强度、黏聚力、内摩擦角和冻融循环测试，分析改良土的力学性能和抗冻性能随石灰掺量的变化规律，综合考虑力学性能和抗冻性能给出了改良黄土的最佳石灰掺量。研究成果可为石灰改良黄土的工程应用提供理论基础。

1 试验材料与试验方法

1.1 试验材料

试验所用黄土取自郑州某临近黄河的道路工程工地 3~5 m 深处，主要矿物成分为石英、长石、辉石、角闪石、高岭石、蒙脱石、方解石，主要化学成分见表 1。试验所用的石灰属于以 CaCO₃ 为主的天然石灰，主要物理力学参数见表 2。

表 1 黄土的主要化学成分

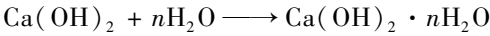
Table 1 The main chemical composition of loess							/%
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	其他
60.95	8.12	2.08	5.28	9.61	2.36	0.66	10.94

表 2 石灰的主要物理力学参数

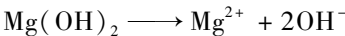
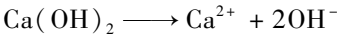
Table 2 Main physical and mechanical parameters of lime				
重度 /(kN/m ³)	比重	莫氏硬度	抗压强度 /MPa	自然倾斜角 /(°)
11.23	3.45	2.5	6.2	53

1.2 加固机理

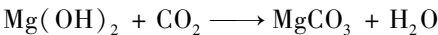
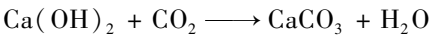
石灰改良黄土的加固机理主要由结晶反应、离子交换反应、碳酸化反应和火山灰反应组成。其中，结晶反应主要为石灰吸水形成含水晶格：



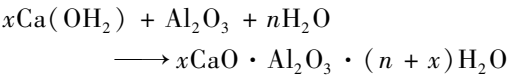
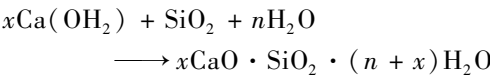
离子交换反应主要是 Ca(OH)₂ 和 Mg(OH)₂ 的离解：



碳酸化反应主要是生石灰与黄土中的二氧化碳发生反应：



火山灰反应是活性硅、铝矿物在石灰作用下发生解离：



黄土中加入石灰后，经过复杂的结晶反应、离子交换反应、碳酸化反应和火山灰反应，发生团聚并形成凝胶物从而增加改善黄土的使用性能。

1.3 试验方法

依据 JTGE40—2007 《公路土工试验规程》制备石灰改良黄土试样，需将石灰过 5 mm 筛进行筛选，并将黄土全部粉碎后与石灰混合。为了分析石灰掺

人对黄土物理力学与抗冻性能的影响规律,分别在黄土中掺入 2%、4%、6%、8%、10% 的石灰,共制备 5 组石灰改良黄土,1 组空白组试样。利用高低温试验箱进行石灰改良黄土试样的冻融循环试验,低温为 $(-18 \pm 2)^\circ\text{C}$,时间为 3 h,融化温度为 $(5 \pm 2)^\circ\text{C}$,时间为 1 h,最大冻融循环次数为 20 次。利用电热干燥箱开展含水率试验测试石灰改良黄土试样的含水率(界限含水率和最优含水率)和最大干密度;利用万能压力机测试石灰改良黄土试样的抗压强度;利用直剪仪测试石灰改良黄土试样的黏聚力和内摩擦角。

2 试验结果分析

2.1 界限含水率

不同石灰掺量条件下,改良黄土的塑限、液限以及塑性指数试验结果如图 1 所示。随着石灰掺量的增大,改良黄土的液限呈现逐渐增大的趋势,当石灰掺量超过 4% 后,其值增长就不太明显。改良黄土塑限呈现先增大后减小的变化趋势,当石灰掺量为 4% 时,改良黄土的塑限最高。改良黄土塑性指数呈现先减小后缓慢增大的变化趋势;当石灰掺量为 2% 时,改良黄土的塑性指数最小;当石灰掺量超过 6% 后,改良黄土塑性指数增长变化很小。

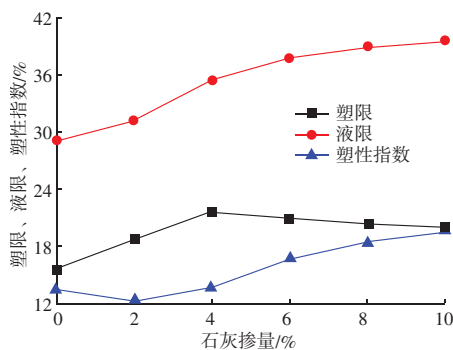


图1 改良黄土界限含水率随石灰掺量的变化曲线
Fig. 1 Variation curve of limit water content of improved loess with lime dosage

2.2 最优含水率与最大干密度

不同石灰掺量条件下,改良黄土的最优含水率和最大干密度变化如图 2 所示。随着石灰掺量的增大,改良黄土的最优含水率逐渐提高,而其最大干密度则逐渐减小,当石灰掺量超过 8% 后,改良黄土的最优含水率和最大干密度则变化较小。

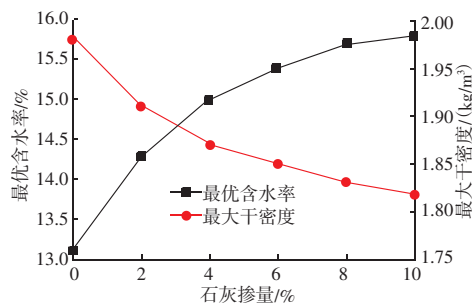


图2 改良黄土最优含水率和最大干密度随石灰掺量的变化曲线
Fig. 2 Variation curve for optimal moisture content and maximum dry density of improved loess with lime dosage

2.3 抗压强度

不同石灰掺量条件下,改良黄土的单轴抗压强度变化如图 3 所示。未掺石灰时,黄土的单轴抗压强度为 0.42 MPa。石灰掺量为 2%、4%、6%、8% 以及 10% 时,改良黄土的单轴抗压强度变为 0.70、0.85、0.90、0.95 及 1.05 MPa,比未掺石灰条件下分别提高了 66.7%、102.4%、114.3%、126.2% 和 150.0%。可见,随着石灰掺量的增大,改良黄土的抗压强度将逐渐提高,但提高的幅度却会慢慢减小。

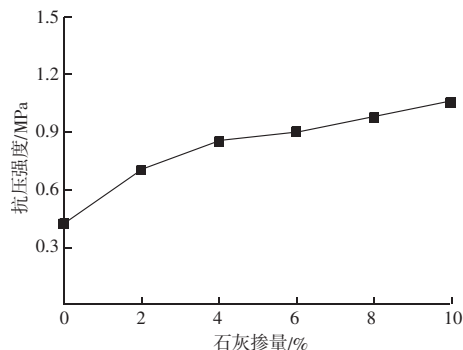


图3 改良黄土抗压强度随石灰掺量的变化曲线
Fig. 3 Variation curve of compressive strength of improved loess with lime dosage

2.4 黏聚力和内摩擦角

不同石灰掺量条件下,改良黄土抗剪强度的两个指标参数黏聚力和内摩擦角变化如图 4 所示。未掺石灰时,黄土的黏聚力和内摩擦角为 22 kPa 和 25.8° 。石灰掺量为 2%、4%、6%、8% 以及 10% 时,改良黄土的黏聚力为 82、125、141、158 及 169 kPa,比未掺石灰条件下分别提高了 272.7%、468.2%、540.9%、618.2% 和 668.2%;改良黄土的内摩擦角为 30.5° 、 33.4° 、 34.9° 、 36.1° 及 36.7° ,比未掺石灰条件下分别提高了 18.2%、29.5%、35.3%、39.9% 和 42.2%;可见,随着石灰掺量的增大,改

道桥技术

良黄土的黏聚力和内摩擦角都将逐渐提高，但提高的幅度却会慢慢变小。

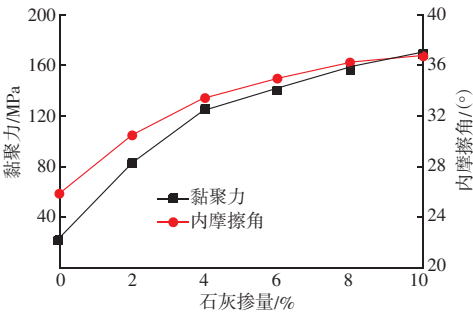


图4 改良黄土黏聚力和内摩擦角随石灰掺量的变化曲线
Fig.4 Variation curve for cohesion and internal friction angle of improved loess with lime dosage

2.5 抗冻性

不同冻融循环次数下改良黄土抗压强度随石灰掺量的变化曲线如图5所示。冻融循环次数为10次时，未掺石灰和石灰掺量为2%、4%、6%、8%及10%条件下黄土的单轴抗压强度分别为0.30、0.56、0.71、0.77、0.87及0.94 MPa，是冻融前（图3）的71.4%、80.0%、83.5%、85.6%、91.6%和89.5%。冻融循环次数为20次时，未掺石灰和石灰掺量为2%、4%、6%、8%及10%条件下黄土的单轴抗压强度分别为0.14、0.31、0.44、0.52、0.58及0.64 MPa，是冻融前的33.3%、44.3%、51.8%、57.8%、61.1%和61.0%。可见，冻融循环次数越大，改良黄土抗压强度下降越明显；相同冻融循环下，石灰掺量越大，改良黄土的抗压强度下降比例就越小，说明在黄土中加入石灰能够提高黄土的抗冻性能，但石灰掺量超过8%后，改良黄土抗冻性能再提升就比较有限。

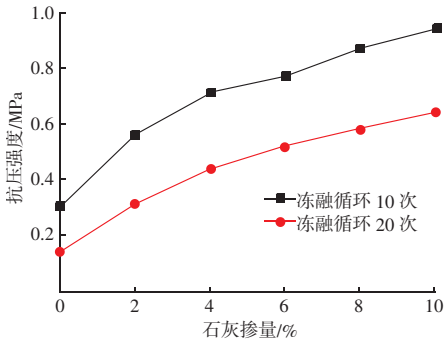


图5 冻融循环下改良黄土抗压强度随石灰掺量变化曲线
Fig.5 Variation curves of compressive strength of improved loess with lime dosage under freeze-thaw cycles

3 结论

对不同石灰掺量条件下黄土的界限含水率、最大干密度与最优含水率、抗压强度、抗剪强度以及抗冻性能展开试验研究，得到以下主要结论：

- (1) 随着石灰掺量的增大，改良黄土塑性指数呈现先减小后缓慢增大的变化趋势，当石灰掺量为2%时，改良黄土的塑性指数最小；当石灰掺量超过6%后，改良黄土塑性指数增长逐渐变缓。
- (2) 随着石灰掺量的增大，改良黄土的最优含水率逐渐提高，而其最大干密度则逐渐减小，当石灰掺量超过8%后，改良黄土的最优含水率和最大干密度则变化很小。
- (3) 随着石灰掺量的增大，改良黄土的抗压强度、黏聚力和内摩擦角都将逐渐提高，但提高的幅度慢慢变小。
- (4) 相同冻融循环下，石灰掺量越大，改良黄土的抗压强度下降比例就越小，说明在黄土中加入石灰能够提高黄土的抗冻性能，但石灰掺量超过8%后，改良黄土抗冻性能再提升就比较有限。

参 考 文 献

[1] 汪焕玲. 沿海地区道路软基处理设计 [J]. 科学技术创新, 2022 (36): 115-118.

[2] 谢东. 加筋土挡土墙在城市沿河道路中的应用 [J]. 建材与装饰, 2020 (17): 277-278.

[3] 崔宏环, 赵嘉, 胡峻晖, 等. 水泥粉煤灰改良粗粒土路基填料力学与收缩特性 [J]. 铁道建筑, 2023, 63 (3): 137-142.

[4] 刘世宇, 雷学文, 李江山, 等. MSWIBA 改良海相淤泥质工程渣土性能与机理研究 [J]. 水利与建筑工程学报, 2023, 21 (2): 121-127, 148.

[5] 任昆, 于泽宁, 王海涛. 水泥煤渣改良土累计变形特性试验研究 [J]. 铁道学报, 2022, 44 (10): 123-130.

[6] 谭定杰. 粉土化学改良对基坑边坡稳定性影响研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.

[7] 李春雨, 刘佳凡, 刘晶磊. 水泥改良青海黄土的力学性能研究 [J]. 河北建筑工程学院学报, 2023, 41 (1): 75-80.

[8] 赵雄飞, 陈开圣. 木质素改良红黏土的抗剪能力及动剪切特性研究 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2023, 48 (1): 68-78.

[9] 马玲, 彭丽云, 刘德欣, 等. 石灰改良粉土的冻胀特性试验研究 [J]. 冰川冻土, 2023, 45 (1): 212-221.

响分析 [J]. 铁道标准设计, 2015, 59 (8): 122-126.

[4] 邱洪志. 交通荷载作用下基坑支护结构受力变形分析 [D]. 郑州: 郑州大学, 2012.

[5] 吴飞海. 考虑车辆动力作用的地铁深基坑施工过程扰动位移特性 [D]. 上海: 上海交通大学, 2017.

[6] 张义平. 交通荷载作用下基坑变形性状研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2018.

[7] 薛清伟, 苟学登, 杨琛, 等. 车辆荷载作用下邻近软土深基坑动力响应研究 [J]. 科技通报, 2022, 38 (8): 92-95, 117.

[8] ZHAO J, LIU S, SHI M, et al. Experimental study on dynamic response of low embankment under traffic load [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2007 (5): 921-925.

[9] 郑坚昭. 复杂荷载作用下软土基坑变形特性研究 [D]. 广州: 暨南大学, 2011.

[10] 陈梅, 郑坚昭, 莫玮宏, 等. 车辆超载作用下软弱基坑变形特性研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10 (3): 539-546, 565.

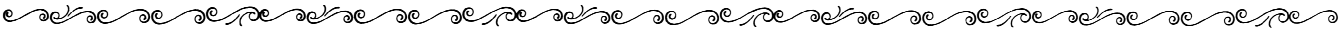
[11] 王旭东, 李林, 柳猷, 等. 盖挖施工荷载确定方法及邻近建筑结构变形分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5 (增刊 2): 1675-1680.

[12] 郭传创. 深基坑结构变形特征实例与分析 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.

[13] 潘杰麟. 车辆移动荷载作用下基坑支护桩—土相互作用研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.

[14] 徐长节, 陈金友, 郭鲁军, 等. 交通动荷载对基坑围护结构的影响分析 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35 (增刊 2): 884-887.

[15] 冯阵图, 李达. 砂卵石深基坑支护嵌入比安全优化研究 [J]. 中国安全科学学报, 2021, 31 (1): 125-131.



(上接第 148 页)

[10] 王红旗, 李栋伟, 钟石明, 等. 石灰改良红黏土导热系数影响因素及模型预测 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23 (5): 2084-2092.

[11] 许海亮, 朱万字, 谭安福, 等. 石灰改良高液限土路基路用性能研究 [J]. 国防交通工程与技术, 2023, 21 (2): 32-35.

[12] 龚锦林, 柳厚祥, 王真. 石灰改良膨胀土压缩特性及力学特性研究 [J]. 交通科学与工程, 2022, 38 (4): 35-40.

[13] 滕琴. 石灰改良膨胀土路基施工技术研究 [J]. 交通建设与管

理, 2023 (3): 126-127.

[14] 刘俊, 孙树林. 掺硫酸渣、石灰改良红黏土的室内试验研究 [J]. 西部资源, 2023 (6): 91-94.

[15] 杜文博, 刘磊, 拾亭, 等. 考虑压实度、掺灰量及养护龄期的石灰土强度经验预估公式 [J]. 土工基础, 2023, 37 (6): 998-1002.

[16] 卢瑞峰. 改良低液限黏土在高速公路路基施工中的应用 [J]. 工程建设与设计, 2023 (21): 95-97.