DOI：10.11779/CJGE2023S10043

路液（Roadyes™）固化剂改性黄土的力学特性研究

李宏儒[1,2]，赵伟龙[1,2]，楠钟凯[1,2]

(1. 西安理工大学土木建筑工程学院，陕西 西安 710048；2. 陕西省黄土力学与工程重点试验室，陕西 西安 710048)

摘 要：黄土具有结构性，难以碾压密实，如何解决黄土压实问题一直是黄土场地地基处理挑战性的技术难题。选取路液（Roadyes™）固化剂分别结合石灰和水泥对黄土进行不同组合方案下的改性处理研究。通过压缩、三轴剪切试验，研究了添加剂不同组合下改性黄土的压缩和回弹指数及抗剪强度指标差异性。研究结果表明：路液、路液分别结合石灰、水泥改性黄土，发现固化剂并非掺量越大，改性效果越好。综合对比分析后，路液掺量 0.25%，并将其分别和 7%石灰，3%的水泥组合使用效果最优，改性黄土抗压缩性、抗剪强度指标均远大于未改性黄土，可显著提高重塑黄土的强度指标，并随着养护期延长，改性黄土力学特性向硬脆性发展。研究成果能够为路液结合石灰或水泥改性黄土的应用提供重要的参考。

关键词：路液；改性黄土；压缩指数；回弹指数；抗剪强度指标

中图分类号：TU431 **文献标识码**：A **文章编号**：1000–4548(2023)S1-0106-04

作者简介：李宏儒(1972—)，男，博士，副教授，主要从事黄土力学与工程的教学和科研工作。E-mail: lhr2008@126.com。

Mechanical properties of Roadyes™-modified loess

LI Hongru[1,2], ZHAO Weilong[1,2], NAN Zhongkai[1,2]

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an 710048, China)

Abstract: The loess is structural and difficult to compact. How to solve the problem of loess compaction has always been a challenging technical problem in treatment of loess site foundation. In this study, the Roadyes™ curing agent combined with lime or cement is used to modify loess under different combinations. Through the compression and triaxial shear tests, the differences of compression and resilience indexes and shear strength indexes of the modified loess with different additive combinations are studied. The results show that for the Roadyes™-modified loess with lime or cement respectively, the modification effects are not better with the increasing dosage of the curing agent. Among them, the combination scheme of adding 0.25% Roadyes™ and 3% cement is better than the 3% cement-modified loess without Roadyes™, and it can significantly improve the strength index of the remolded loess. With the extension of the curing period, the modified loess develops towards hard and brittle. The research results may provide important reference for the application of the Roadyes™-modified loess with lime or cement.

Key words: Roadyes™; modified loess; compression index; rebound index; shear strength index

0 引 言

黄土广泛分布在中国西北和黄河中游地区,分布面积大。黄土是特殊土之一，因其来源地的原生矿物性质，富含钙质成分，又因其独特的形成方式，堆积松散生成大孔隙结构，具有湿陷性[1]和震陷性[2]。因此，对黄土进行改性处理，减小其压缩性，提高其抗剪强度和防渗性，对解决黄土地区工程问题具有重要意义[3]。

针对黄土改性的研究，以减小其增湿变形特性，提高抗剪强度的研究，从来就没有停止。首先人们一般从身边最常见的建筑胶结物石灰开始，通过向黄土中添加石灰或石灰结合粉煤灰[4]来提高黄土密实度，达到提高抗剪强度和地基承载力的目的。将水泥作为添加剂来处理黄土湿陷性也是一种常见的地基处理方法，对其加固机理进行了相关研究[5-8]。作为工业“三废”之一的粉煤灰，开展了其增强黄土的静力力学性质和用于改性黄土的动力特性的研究[9]。

近年来，出现了多种工业废材来改性黄土力学性质的方法。如采用尾矿渣赤泥[10]来改性黄土，提高黄

基金项目：陕西省自然科学基础项目（2017JM5059）；陕西省黄土力学与工程重点试验室项目（13JS073）

收稿日期：2023-07-05

土力学性质。木质素是一种高分子化合物，能够有效增强散体材料的胶结强度，可改良黄土的持水性和水稳性[11]。高分子材料[12]和酸性物质[13]等均可在一定程度上提高黄土压实性和水稳性。

本文选取高分子聚合物纳米材料路液（Roadyes™）为添加剂，将其和石灰、水泥等材料单独和组合使用来改性黄土，基于侧限压缩试验和三轴剪切试验，研究了路液结合石灰、水泥使用对改性黄土的压缩特性以及抗剪强度等多个方面的影响，分析了压缩指数、回弹指数和抗剪强度指标随路液、石灰和水泥掺量变化的规律，研究成果对改性黄土提供理论依据。

1　试验材料与试验方法

1.1　试验材料

试验所用黄土取自陕西渭南华州大道，取土深度为 2 m，基本物理性质见表 1。

表 1　黄土基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties of loess

干密度 /(g·cm^{-3})	含水率/ %	塑限/ %	液限/ %	塑性指数 I_p	土粒相对质量密度 G_s
1.44	17.2	20.1	30.3	10.2	2.70

1.2　试验方法

对试验所用黄土进行风干、碾碎和过筛处理，并将路液加入水中搅拌均匀，后装入密封袋中备用。

（1）压缩试验

采用压缩仪，分别作不同路液掺量（0%，0.05%，0.25%，0.5%）下的重塑黄土，路液（0.25%）分别结合石灰（7%，10%，13%）和水泥（3%，6%，9%）掺入黄土的压缩试验，分析各添加剂掺量和养护时间对改性黄土压缩特性的影响

（2）三轴剪切试验

采用与压缩试验相同的路液、石灰和水泥配比方案，开展三轴剪切试验，分析各成分掺量和养护时间对改性黄土的抗剪强度的影响。

2　试验结果与分析

2.1　压缩试验分析

针对纯素黄土（简称 RE），掺入不同掺量路液（3S）、0.25%路液和不同掺量石灰（简称 LT）、0.25%路液和不同掺量水泥(简称 CT)的方案对应的改性黄土，压缩回弹试验，均是在各自掺量对应的最大干密度和最优含水量下进行试验，对比分析孔隙比、压缩指数和回弹指数的差异性。

图 1 反映只掺入路液的黄土，具有了结构强度，土在压力作用下，孔隙比的变化趋势有转折发展特性，添加路液结合石灰，路液结合水泥的黄土压缩没有明显的结构强度，随压力孔隙比直线性降低。分别掺入路液 0.25%和 0.5%的改性黄土在压力作用下孔隙比均小，但两条压缩曲线非常接近，发展趋势相似，也说明路液掺量增加，改性黄土压缩性并非持续减小，掺入路液和水泥改性黄土的孔隙比比掺入路液和石灰要小。

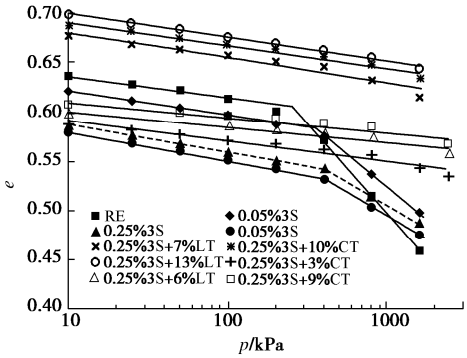


图 1　不同配方改性黄土压缩试验曲线

Fig. 1 Compression test curves of modified loess with different formulations

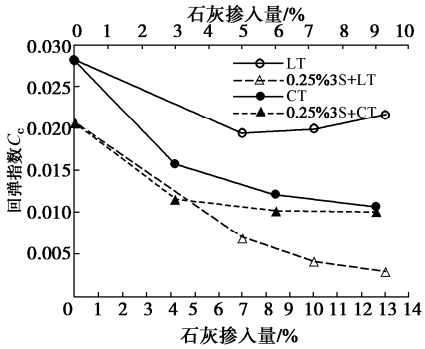


图 2　不同配方改性黄土压缩指数曲线

Fig. 2 Compression index curves of modified loess with different formulas

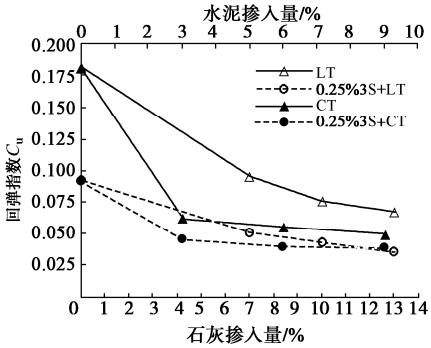


图 3　不同配方改性黄土回弹指数曲线

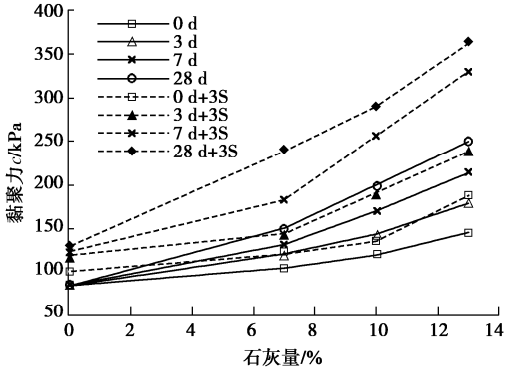
Fig. 3 Rebound index curves of modified loess with different formulas

对比分析是否掺入路液的石灰和水泥改性黄土的压缩和回弹特性（见图 2 和图 3），发现掺入了路液的

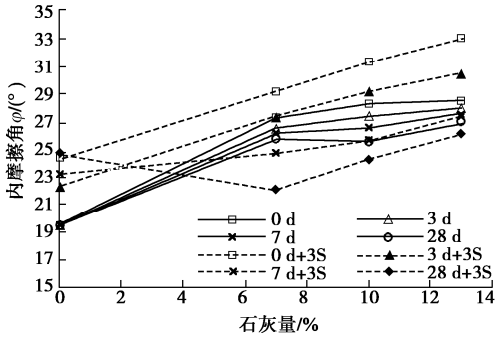
改性黄土，压缩指数均减小。其中水泥结合路液比石灰结合路液改性黄土的效果更明显。当掺入 0.25%路液后，改性土的压缩特性并非随掺入的石灰和水泥量增加而增大，石灰掺量 7%和水泥掺量 3%时，效果明显。添加路液的改性黄土压缩指数的变化率比回弹指数变化率大，这反映出在路液与土中化学物质反应生成凝胶的起到了促进土更易于压缩，抑制了土的回弹特性。

2.2 三轴剪切试验分析

通过三轴剪切试验，对比分析了不同方案改性黄土的抗剪强度指标随养护时间的演化规律及差异性（见图 4）。首先是养护时间越长，改性土的黏聚力均增大。当路液和石灰结合改性黄土时，黏聚力明显比单纯石灰改性的黄土增大近 50%，当石灰掺量小于 7%时，路液的添加会提高改性黄土黏聚力 75%；其次在 3 d 养护条件下，内摩擦角表现为添加路液的均大于未添加路液的，养护大于 3 d 的表现为掺入路液后，摩擦角随着石灰掺量增加增幅相对减小，低于未掺入路液的纯石灰改性黄土。分析这是因为黄土中的 SiO_2 和石灰中的 $Ca(OH)_2$ 在路液的作用下产生大量的 $CaO{\cdot}SiO_2{\cdot}H_2O$ 凝胶，填充孔隙和在固化作用下，使土颗粒间的结合力提高，进而增大了改良黄土的黏聚，其应力-应变曲线像硬化型转变，强度提高，破坏特性向硬脆性发展。



（a）黏聚力与石灰掺量的关系曲线

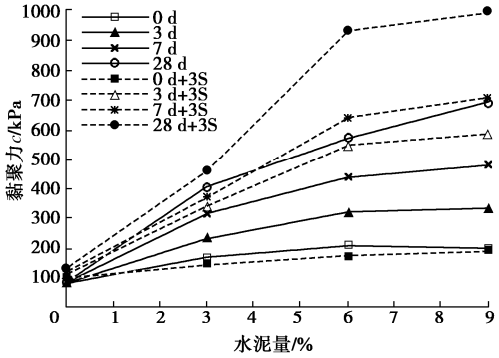


（b）内摩擦角与石灰掺量的关系曲线

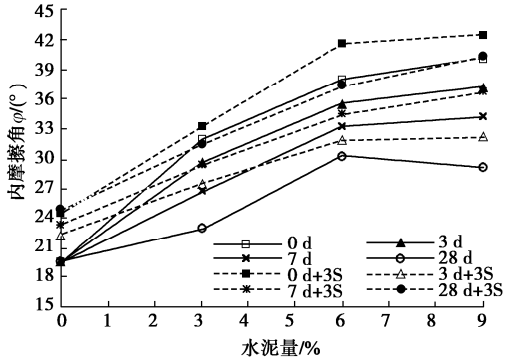
图 4 不同条件下改性黄土抗剪强度指标与石灰掺量关系曲线

Fig. 4 Curves of shear strength index and lime content of modified loess under different conditions

分析路液对水泥改性黄土抗剪强度指标的影响（见图 5），发现在水泥改性黄土中加入路液，对黏聚力和内摩擦均有提高，其中黏聚力增加显著。对比 28 d 养护条件下，当水泥掺入 9%时，添加路液的改性黄土可比未添加路液的黏聚力提高近 70%，但当水泥含量 3%时，有无添加路液，黏聚力提高不明显。添加了路液和水泥的改性黄土摩擦角得以提高。



（a）黏聚力与水泥掺量关系曲线

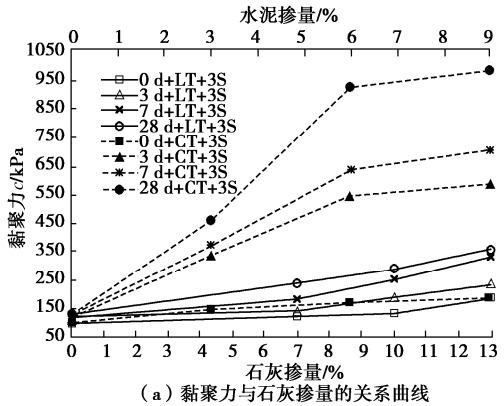


（b）内摩擦角与水泥掺量关系曲线

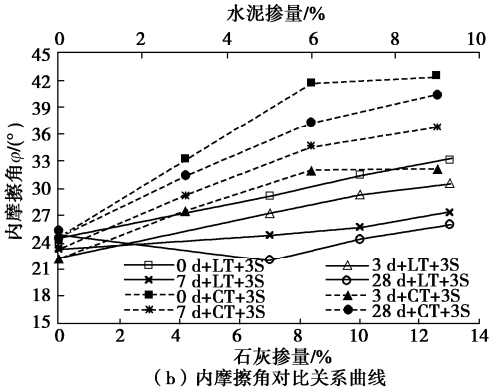
图 5 不同条件下改性黄土抗剪强度指标与水泥掺量关系曲线

Fig. 5 Curves of shear strength index and cement content of modified loess under different conditions

对比分析添加了路液与石灰和水泥分别改性黄土的抗剪强度指标（见图 6），表明 28 d 养护期对应的水泥（6%）和路液组合改性黄土的黏聚力要比石灰（8%）和路液组合改性黄土高 700 kPa。且随着养护时间增大，提高幅值更加明显。摩擦角同样表现为路液结合水泥改性黄土高于路液结合石灰改性黄土。



（a）黏聚力与石灰掺量的关系曲线



（b）内摩擦角对比关系曲线

图 6 不同条件下改性黄土抗剪强度指标的对比曲线

Fig. 6 Comparison curves of shear strength indexes of modified loess under different conditions

3 结　　论

本文分别对路液、石灰和水泥单独和组合方案下改性黄土的力学特性随掺量和养护时间的演变特性进行了研究，取得了以下两点结论。

（1）通过压缩试验，发现路液分别和石灰、水泥组合方案改性黄土的压缩指数和回弹指数均减小明显，提高了黄土的抗压缩性，且组合改性效果更优。

（2）采用三轴剪切试验对比了不同改性方案对应的黄土抗剪强度指标演化规律，0.25%路液结合 3%水泥的改性黄土黏聚力远大于其他方案改性黄土，路液结合水泥改性黄土随养护时间的增大，内摩擦角减小，改性黄土向硬脆性土发展。

参考文献：

[1] YUAN Z X, WANG L M. Collapsibility and seismic settlement of loess[J]. Engineering Geology, 2010, **105**(S1/2): 119-123.

[2] 邓　津, 王兰民, 张振中. 黄土显微结构特征与震陷性[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(4): 542-548. (DENG Jin, WANG Lanmin, ZHANG Zhenzhong. Microstructure characteristics and seismic subsidence of loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(4): 542-548. (in Chinese))

[3] 王　谦, 王兰民, 王　峻, 等. 基于密度控制理论的饱和黄土地基抗液化处理指标研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 2): 844-847. (WANG Qian, WANG Lanmin, WANG Jun, et al. Indices of anti-liquefaction treatment of saturated compacted loess foundation based on theory of density control[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 844-847. (in Chinese))

[4] 郭婷婷, 张伯平, 田志高, 等. 黄土二灰土工程特性研究[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(5): 719-721. (GUO Tingting, ZHANG Boping, TIAN Zhigao, et al. Study on engineering characteristic of lime-flyash loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(5): 719-721. (in Chinese))

[5] CHEN X, YU F, HONG Z M, et al. Comparative investigation on the curing behavior of GS-stabilized and cemented soils at micromechanical and microstructural scales[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2022, **50**(6): 20200631.

[6] YANG B H, WENG X Z, LIU J Z, et al. Strength characteristics of modified polypropylene fiber and cement-reinforced loess[J]. Journal of Central South University, 2017, **24**(3): 560-568.

[7] SU X P. Research on the properties of collapsible loess reinforced by cement[J]. Advanced Materials Research, 2014, 3441(1015): 110-113.

[8] 王　谦, 刘红玫, 马海萍, 等. 水泥改性黄土的抗液化特性与机制[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(11): 2128-2134. (WANG Qian, LIU Hongmei, MA Haiping, et al. Liquefaction behavior and mechanism of cement-stabilized loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(11): 2128-2134. (in Chinese))

[9] NG Qing-wei. A comparative study on shear strength of the fly ash-treated expansive soil and the expansive soil[J]. Building Science, 2011, 2(7): 50-52.

[10] 陈瑞锋, 田高源, 米栋云, 等. 赤泥改性黄土的基本工程性质研究[J]. 岩土力学, 2018, **39**(S1): 89-97. (CHEN Ruifeng, TIAN Gaoyuan, MI Dongyun, et al. Study of basic engineering properties of loess modified by red mud[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(S1): 89-97. (in Chinese))

[11] 刘钊钊, 王　谦, 钟秀梅, 等. 木质素改良黄土的持水性和水稳性[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, **39**(12): 2582-2592. (LIU Zhaozhao, WANG Qian, ZHONG Xiumei, et al. Water holding capacity and water stability of lignin-modified loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, **39**(12): 2582-2592. (in Chinese))

[12] 徐　菲, 蔡跃波, 钱文勋, 等. 脂肪族离子固化剂改性水泥土的机理研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(9): 1679-1687. (XU Fei, CAI Yuebo, QIAN Wenxun, et al. Mechanism of cemented soil modified by aliphatic ionic soil stabilizer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(9): 1679-1687. (in Chinese))

[13] 张　耀, 胡再强, 陈　昊, 等. 酸性溶液对黄土结构改良的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(4): 681-688. (ZHANG Yao, HU Zaiqiang, CHEN Hao, et al. Experimental study on evolution of loess structure using acid solutions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(4): 681-688. (in Chinese))

（编校：黄贤沙）