

膨润土石灰改良黄土强度及微观结构试验研究

高梦娜, 王旭, 李建东, 张延杰, 蒋代军

Experiment study on the strength and microstructure of bentonite-lime improved loess

GAO Mengna, WANG Xu, LI Jiandong, ZHANG Yanjie, JIANG Daijun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20210818003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

EHP工法桩强度性状试验研究

Experimental study on the strength behavior of EHP

水利水运工程学报. 2020(6): 94 <https://doi.org/10.12170/20191213001>

冻融循环对膨胀土变形和力学特性的影响研究

Study on the influence of freeze-thaw cycles on the deformation and mechanical properties of expansive soil

水利水运工程学报. 2021(5): 112 <https://doi.org/10.12170/20210116001>

膨胀复合浆液的物理力学性能试验研究

Experimental study on physical and mechanical properties of expanded composite slurry

水利水运工程学报. 2020(3): 92 <https://doi.org/10.12170/20190227002>

低速水流作用下水泥砂浆溶蚀特性研究

Study on leaching characteristics of cement mortar under flowing water with low velocity

水利水运工程学报. 2019(1): 50 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.01.007>

黄土地基地下连续墙基础竖向抗压特性试验研究

Experimental study on vertical compressive bearing capacity of underground diaphragm wall foundation in loess area

水利水运工程学报. 2018(5): 89 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.05.013>

腐蚀介质对硬化水泥浆体溶蚀特性的影响

Influence of corrosion solution on calcium leaching behavior of hardened cement pastes

水利水运工程学报. 2018(3): 113 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.03.015>



扫码进入官网, 阅读更多精彩内容



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20210818003

高梦娜, 王旭, 李建东, 等. 膨润土石灰改良黄土强度及微观结构试验研究 [J]. 水利水运工程学报, 2022(5): 86-93. (GAO Mengna, WANG Xu, LI Jiandong, et al. Experiment study on the strength and microstructure of bentonite-lime improved loess[J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(5): 86-93. (in Chinese))

膨润土石灰改良黄土强度及微观结构试验研究

高梦娜¹, 王旭^{1,2}, 李建东¹, 张延杰¹, 蒋代军¹

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 道桥工程灾害防治技术国家地方联合工程实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 黄土工程性能较差, 必须经过处理才能作为路基填料使用。为了提高黄土路基的承载力, 更好地解决黄土路基的工程病害问题, 在黄土路基填料中加入膨润土和石灰, 通过不同组合掺量的膨润土-石灰-黄土的无侧限抗压强度试验与核磁共振试验, 分别从土体强度和孔隙结构的角度出发, 研究各掺量膨润土-石灰对黄土路基填料强度及孔隙结构的改良效果。试验结果表明: 膨润土可以有效填充黄土的孔隙, 石灰能使土体内分散的颗粒连成整体, 并使土体无侧限抗压强度提高 4.01 倍; 改良黄土的无侧限抗压强度随着养护龄期的增大而增大; 与素黄土相比, 改良黄土的孔隙度降低, 大孔隙占比显著减少。通过微观电镜扫描发现土颗粒之间连成整体, 且颗粒间的大孔隙也基本被填充。因此, 膨润土和石灰对黄土填料的改良效果较为显著。

关键词: 膨润土; 石灰; 无侧限抗压强度; 微观结构; 黄土改良

中图分类号: TU472

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2022)05-0086-08

我国西部地区分布着大面积低含水量、高孔隙度和碳酸盐含量的黄土, 在路基工程建设中经常出现沉降变形、冲蚀和滑坡等灾害。黄土是一种较差的路基填料, 在高速铁路及公路路基建设中不能被直接使用, 需要进行合理的改良。Tabarsa 等^[1-2] 在黄土中添加纳米黏土和蔗渣灰渣等, 通过微观、化学分析技术及强度试验, 证实了可增强试件的塑性、强度和刚度特性。Latifi 等^[3-5] 通过击实、无侧限抗压强度等试验及微观技术, 研究了红土与固化剂(TX-85、SH-85)、黄原胶与膨胀土这两种改良土的改良特性和固化机理。Onyejekwe 等^[6-8] 在土壤中添加磺化油、聚合物固化剂及离子固化剂等, 研究了其对土壤各种特性的影响及固化机制。我国科研人员对粉煤灰、HEC 固化剂、水泥、工业废弃木质素、硅微粉、乙酸等材料的加固机理和改良土强度、结构特性做了大量的研究^[9-16]。

膨润土具有吸水膨胀的特性, 可用以改良粒径和改善孔隙结构, 石灰具有良好的胶凝作用, 若利用膨润土和石灰同时对黄土进行改良, 有望从连接强度和孔隙结构两方面提高黄土强度。鉴于此, 本文对不同龄期、不同膨润土-石灰掺量的改良黄土进行无侧限抗压强度试验、核磁共振试验和扫描电子显微镜试验, 研究掺量及龄期对改良黄土强度的影响, 为实际工程应用提供新思路。

1 试验内容及方法

试验所用黄土取自甘肃省兰州新区, 土样基本物理性质见表 1。利用水分法测得黄土颗粒级配曲线见

收稿日期: 2021-08-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51868038)

作者简介: 高梦娜(1997—), 女, 陕西华阴人, 硕士研究生, 主要从事岩土力学理论及试验研究。E-mail: 1511017470@qq.com
通信作者: 王旭(E-mail: publicwang@163.com)

图 1。试验所用膨润土中蒙脱石的质量分数为 70%~95%，具有显著吸水膨胀的性质。试验所用石灰为熟石灰，干燥且活性强，钙的质量分数约为 95%。

根据试验设计，膨润土和石灰的掺入质量分别为改良土总质量的 3%、5% 和 7%。将天然黄土风干后过筛，与称取的膨润土和黄土搅拌均匀后，进行轻型击实试验，测得不同配比的改良土的最优含水率及最大干密度。然后取相应配比的膨润土石灰与土样，加水至最优含水率并搅拌均匀，采用液压千斤顶按 95% 压实度和不同的最大干密度制备直径 39.1 mm、高 84 mm 的标准试样，用保鲜膜包紧置于实验室内养护，到达养护龄期 7、14、28 d 后对不同掺量的改良土进行无侧限抗压强度与核磁共振试验。具体试验工况及基本物理参数见表 2。

表 1 黄土试样基本物理性质

Tab. 1 Basic physical properties of loess soil samples

土粒相对密度	最优含水率/%	最大干密度 / (g·cm ⁻³)	液限/%	塑限/%	塑性指数
2.68	16.61	1.72	29.70	19.46	10.23

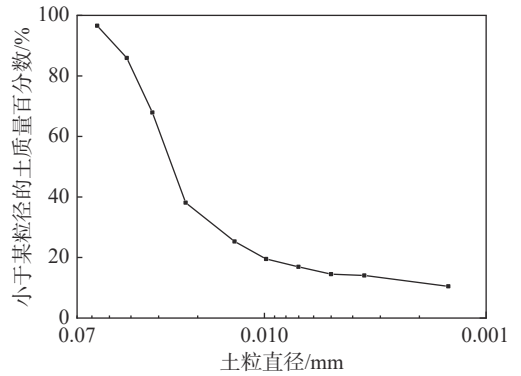


图 1 黄土颗粒级配曲线

Fig. 1 Loess grain gradation curve

表 2 试验工况

Tab. 2 Test conditions

试验工况	膨润土掺量/%	石灰掺量/%	最优含水量/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	液限/%	塑限/%	塑性指数
1	3	3	18.17	1.60	40.32	21.69	18.63
2	3	5	19.39	1.58	41.58	20.30	21.28
3	3	7	20.58	1.55	38.85	25.12	13.73
4	5	3	19.36	1.63	36.54	17.42	19.12
5	5	5	21.29	1.61	40.21	25.10	15.11
6	5	7	23.40	1.58	35.67	17.15	18.53
7	7	3	21.47	1.66	41.10	27.26	13.84
8	7	5	23.91	1.65	42.06	27.19	14.88
9	7	7	24.58	1.60	38.63	19.77	18.85

试验参照《土工试验方法标准》^[17]在三轴压力机上进行，当量力计读数出现峰值并开始下降时停止，记录轴向位移，通过计算数据得到试样的应力-应变曲线，峰值即为试样的无侧限抗压强度。

先将达到龄期的改良土试样进行真空饱和试验，为尽量避免膨润土和石灰与水的进一步反应而影响孔隙结构，选择质量分数为 98% 的乙醇作为饱和液体；然后通过苏州纽迈分析仪器公司生产的 MacroMR12-150H-I 多功能核磁共振微结构分析与成像系统对试样进行核磁共振分析。

2 试验结果及分析

2.1 无侧限抗压强度试验

2.1.1 膨润土和石灰掺量的影响 对不同龄期和掺量的改良黄土开展无侧限抗压强度试验，绘制改良土的应力-应变曲线见图 2。由图 2 可见，不同掺量下改良黄土的应力随着应变的增大先增大后减小，峰值点对应的应力即为无侧限抗压强度，并且超过峰值点后试件就发生破坏。不同膨润土-石灰掺量的改良黄土试件在弹性阶段的斜率都要大于素土的斜率，且峰值均在素土之上，这说明膨润土和石灰能有效改善黄土的力学性能。

通过试验获得不同膨润土-石灰掺量和不同养护龄期下的改良黄土无侧限抗压强度试验结果。从图 3 可以看出, 相同龄期下控制其中一个掺量, 无侧限抗压强度均随着另一掺量的增加先增大后减小, 即在膨润土和石灰掺量均为 5% 时无侧限抗压强度最高, 其平均无侧限抗压强度是素黄土的 4.01 倍。

在膨润土-石灰掺量为 3%+3%、3%+7%、5%+3% 和 7%+3% 时, 无侧限抗压强度并没有显著增大, 主要原因是石灰的碳化作用需要 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 CO_2 和水, 当膨润土-石灰掺量为 3%+3% 时, 两者掺量均较少, 土体中水未被反应完全, 膨润土的亲水作用由于掺量少未发挥出来, 导致多余的水分留在土颗粒之间成为自由水影响改良土强度; 当膨润土-石灰掺量为 3%+7% 时, 土体中可供碳化反应的 CO_2 和自由水不足, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 粉末未充分反应生成 CaCO_3 晶体增强土体的连接强度, 且多余的石灰未和土颗粒连成整体导致土体强度分布不均; 当膨润土-石灰掺量为 5%+3% 和 7%+3% 时, 一方面因为石灰掺量少反应不完全, 另一方面则因为膨润土的吸水膨胀导致孔隙中 CO_2 被排出土体之外及自由水含量被消耗, 使改良土强度未显著提高^[18]。

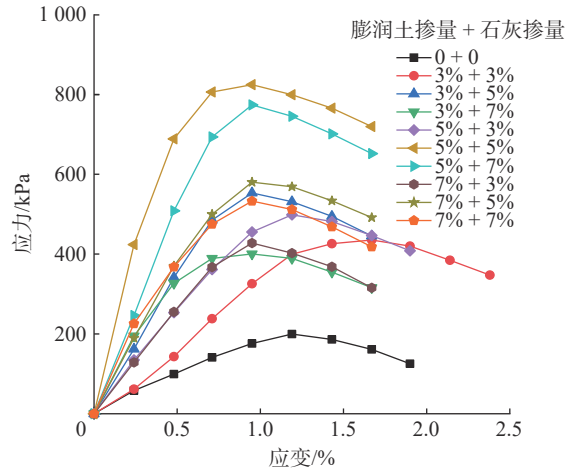


图 2 膨润土及石灰改良黄土应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of bentonite and lime modified loess

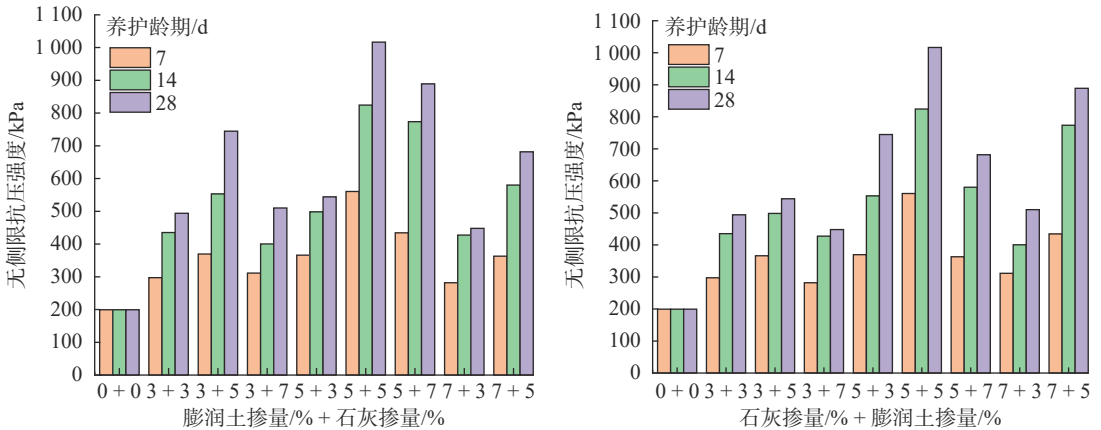


图 3 膨润土-石灰掺量与黄土无侧限抗压强度关系

Fig. 3 Relationship between bentonite and lime content and unconfined loess compressive strength

图 4 为养护龄期 14 d, 不同膨润土和石灰分别对应的无侧限抗压强度。从图 4 可看出, 任一掺量改良黄土的无侧限抗压强度均大于素土, 且相同膨润土或石灰掺量下的无侧限抗压强度总表现为先增大后减小。膨润土和石灰掺量均在 5% 时, 无侧限抗压强度在另一种物质掺量变化下出现明显的先增大后减小现象。且已有研究^[19]表明, 不同改良剂对土体的改良作用主要表现在两个方面: 一方面是改善土体不良的孔隙结构, 尽可能地填充土体内部的孔隙, 使土体的结构更加密实; 另一方面是在土体中发生化学反应, 生成胶结物质将土颗粒之间连接起来, 有效增强土颗粒之间的连接强度^[20]。当膨润土-石灰掺量较少时, 土体中的孔隙不能被膨润土填满, 较少的石灰也无法有效增强土体的连接强度, 导致改良效果并不显著。但当两者掺量过高时, 吸水膨胀后的膨润土确实较好地填充了土颗粒之间的孔隙, 但多余的膨润土吸水膨胀导致土体内部发生细微开裂, 再加上未与土颗粒反应完全的石灰代替了土颗粒的位置, 生成的胶结物质碳酸钙留存在土体内部, 以及与水未反应的石灰完全以粉质状态残留在土颗粒之间, 使土体局部强度分布不均匀, 进而导致改良土试样无侧限抗压强度的降低。

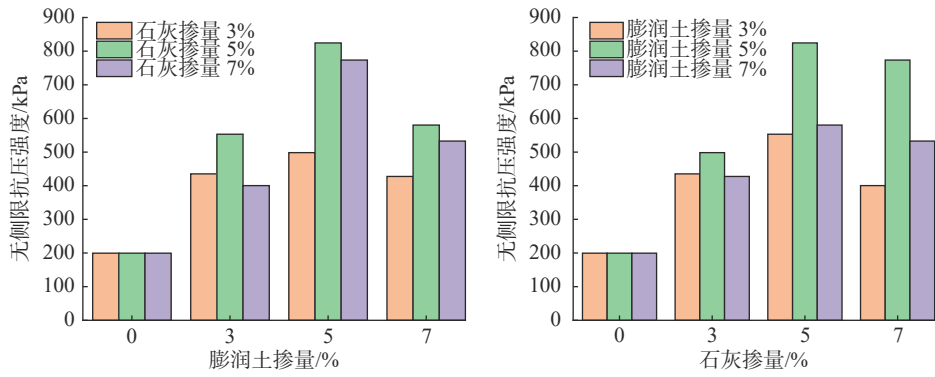


图 4 龄期 14 d 膨润土和石灰掺量与无侧限抗压强度关系

Fig. 4 Relationship between bentonite and lime content at 14 d and unconfined compressive strength

2.1.2 养护龄期的影响 试验进行了 3 个养护龄期 (7、14、28 d) 试件的测试, 图 5 为养护龄期对改良土无侧限抗压强度的影响曲线。

从图 5 可以看出, 当膨润土和石灰掺量不变时, 试件的无侧限抗压强度随养护龄期的增加而增大, 但斜率都是先大后小, 这说明时间越长提升效果越不明显。

2.2 核磁共振 (NRM) 试验

以养护龄期为 14 d 的改良黄土核磁共振结果为例, 表 3 为不同掺量的改良黄土孔隙度, 掺量均为 0 时孔隙度最大, 膨润土-石灰掺量为 5%+5% 时孔隙度最小, 较素土的孔隙度相比减少 13.5%。表 4 为不同掺量改良黄土最大孔隙值及其占比。

图 6 为 NRM 试验中得到的不同膨润土-石灰掺量下的改良黄土试样孔隙体积分布曲线。从图 6 可以看出, 试样孔隙分布主要有两个峰值, 峰值越大表明其对应的孔径孔隙体积比所占比例越大, 孔径分布就越集中, 反之亦然。膨润土-石灰 5%+5% 掺量的两个峰值均最小, 较大孔隙分布最均匀; 素土和膨润土-石灰 3%+3% 掺量的两个峰值都较高, 孔径分布较集中, 这说明膨润土-石灰 3%+3% 掺量的改良效果最不明显。孔隙变化最大的是小孔隙, 原因在于: (1) 小孔隙占比远远超过中孔隙和大孔隙 (图 7(a)), 因此变化也更明显; (2) 膨润土和石灰本身质量占比少且粉质细腻, 又分散在黄土颗粒的孔隙之间, 遇水后膨胀凝结, 对小孔隙影响较大。

采用核磁共振测试土体孔隙中的氢原子时, 可以按照孔径大致分为 3 类孔隙^[20]: 小孔隙($d < 0.4 \mu\text{m}$), 中孔隙($0.4 \mu\text{m} \leq d < 4.0 \mu\text{m}$), 大孔隙($d \geq 4.0 \mu\text{m}$)。如图 7(a) 所示, 试样中的小孔隙占比最大, 其次是中孔隙、大孔隙。小孔隙体积比从掺量 0+0 开始依次减小, 到 5%+5% 时孔隙体积比达到最小, 随后又依次增大; 中

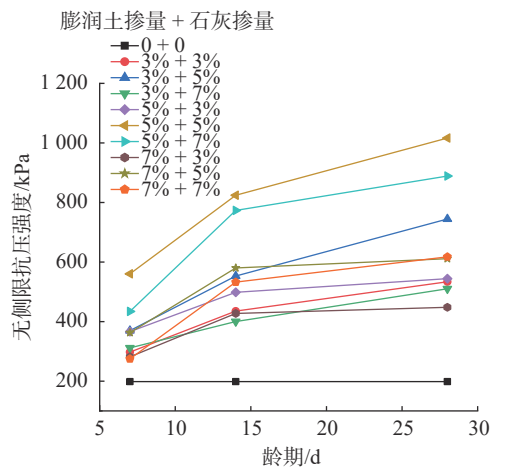


图 5 养护龄期对改良土无侧限抗压强度的影响

Fig. 5 Influence of curing age on unconfined compressive strength of improved soil

表 3 不同膨润土-石灰掺量的孔隙度

Tab. 3 Porosity of different bentonite and lime contents

膨润土掺量/%	孔隙度/%			
	石灰掺量0	石灰掺量3%	石灰掺量5%	石灰掺量7%
0	32.00	/	/	/
3	/	29.91	28.79	28.20
5	/	28.26	27.68	28.71
7	/	29.32	29.45	30.51

孔隙各个掺量体积比变化并不明显;掺量为 0 时大孔隙体积比明显最大,其余膨润土-石灰掺量除 3%+3% 和 3%+5%,剩下的大孔隙占比非常小。

表 4 最大孔隙值及占比

Tab. 4 Maximum pore value and proportion

膨润土掺量/%	石灰掺量/%	最大孔径值/ μm	所占百分比/%
0	0	70.594 15	1.09
3	3	61.442 26	0.53
3	5	61.442 26	0.10
3	7	61.442 26	9×10^{-4}
5	3	70.594 15	0.12
5	5	61.442 26	0.29
5	7	70.594 15	0.15
7	3	75.669 25	1×10^{-4}
7	5	65.859 43	0.35
7	7	65.859 43	0.39

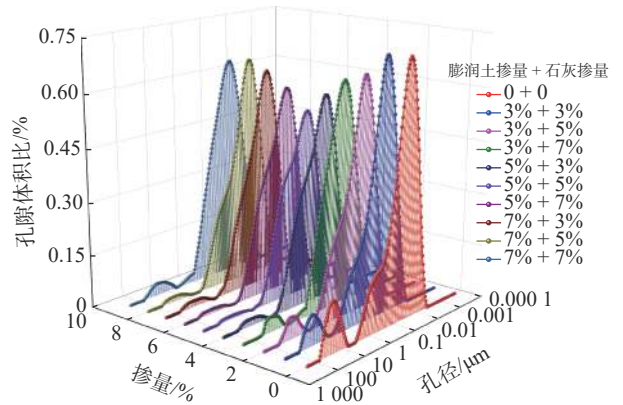


图 6 改良黄土孔隙分布

Fig. 6 Porosity distribution of improved loess

综上,膨润土和石灰掺量为 5%+5% 时对孔隙结构的改良效果最明显,故以膨润土掺量为 5% 的试样结果为例,其孔隙体积分布如图 7(b)所示。从图 7(b)可以看出,大孔隙的体积比几乎都可以忽略不计。因此,膨润土掺量为 5% 时能够有效填充土体中的大孔隙。

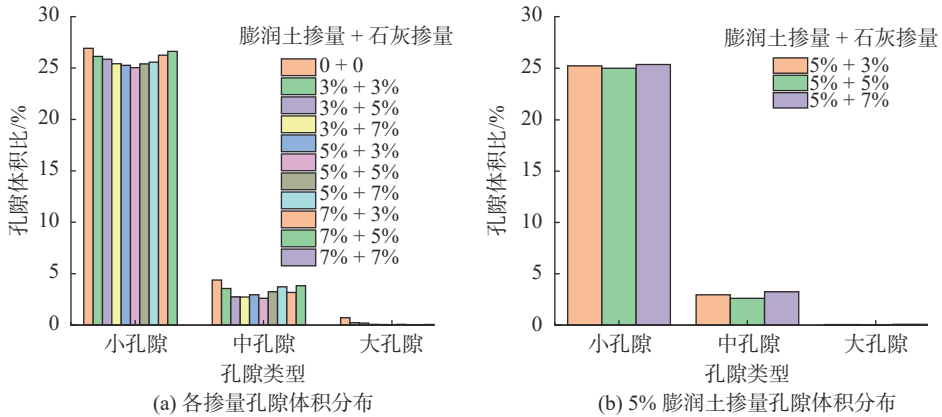


图 7 孔隙体积分布

Fig. 7 Pore volume distribution

3 扫描电镜微观孔隙结构试验结果分析

为研究不同掺量对改良黄土特性的影响,采用日本电子光学公司生产的 JSM-5600LV 低真空扫描电子显微镜观测了养护龄期为 14 d 的改良黄土及素土微结构特征。由于篇幅限制,为突出各掺量之间的明显差异,此处只对比素土和膨润土-石灰掺量为 3%+3%、5%+5%、7%+7% 的 SEM 照片(图 8)。

从电子显微镜拍摄的放大 500 倍后照片可见,素土颗粒间存在很多大孔隙,并且颗粒之间呈分散状态。添加膨润土-石灰后,颗粒间的大孔隙变少,且反应生成的碳酸钙因其胶凝性使得土颗粒之间连成整体。在 3 种掺量中,膨润土-石灰掺量为 3%+3% 时明显掺量不足,一些土颗粒仍呈分散状态,孔隙比例依旧较高;膨润土-石灰掺量为 5%+5% 的明显可看出孔隙率已经很小,颗粒之间基本连成一个整体;膨润土-石

灰掺量为 7%+7% 时,掺量过多,导致膨润土吸水膨胀使土体内部产生微裂缝,且未与土颗粒反应完全的石灰也变成单独的碳酸钙固体积聚在土颗粒之间,不能增强土颗粒间的连接强度,也不能成为土颗粒间的骨架,起不到提高强度的效果。

4 结 语

(1)改良黄土的无侧限抗压强度随着某一掺量的增加均出现先增大后降低的情况,膨润土和石灰掺量均为 5% 时改良效果最明显,强度提高了 4.01 倍。

(2)改良黄土的无侧限抗压强度随着龄期的增大而增大,在养护龄期 28 d 时明显高于 7 d 的无侧限抗压强度,但随着养护龄期的延长无侧限抗压强度的增长效果并不明显。养护时间 14~28 d 内可达到较为理想的强度,时间允许条件下可将填料养护至 28 d。

(3)运用核磁共振技术检测改良土试样的孔隙结构,可以看出改良黄土的大孔隙占比显著减少。在膨润土掺量为 5% 时大孔隙体积率几乎可以忽略,孔隙度降低 13.5%,但掺量过多或过少时改良效果一般。

(4)通过扫描电子显微镜,可以看到膨润土和石灰的填充和胶凝作用,在膨润土和石灰掺量均为 5% 时尤为明显,大孔隙几乎消失,土颗粒之间连成整体。实际工程中,在黄土路基填料中掺入 5% 左右的膨润土和石灰,路基性能会显著提高。

参 考 文 献:

- [1] TABARSA A, LATIFI N, MEEHAN C L, et al. Laboratory investigation and field evaluation of loess improvement using nanoclay-A sustainable material for construction[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 158: 454-463.
- [2] JULPHUNTHONG P. Chemical stabilization of loess in northeast Thailand using the mixture of calcined marble dust waste and sugarcane bagasse ash waste[J]. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 2015, 46: 103-108.
- [3] LATIFI N, EISAZADEH A, MARTO A. Strength behavior and microstructural characteristics of tropical laterite soil treated with sodium silicate-based liquid stabilizer[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(1): 91-98.
- [4] LATIFI N, HORPIBULSUK S, MEEHAN C L, et al. Improvement of problematic soils with biopolymer—an environmentally friendly soil stabilizer[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(2): 04016204.
- [5] LATIFI N, EISAZADEH A, MARTO A, et al. Tropical residual soil stabilization: a powder form material for increasing soil strength[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 147: 827-836.
- [6] ONYEJEKWE S, GHATAORA G S. Soil stabilization using proprietary liquid chemical stabilizers: sulphonated oil and a polymer[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2015, 74(2): 651-665.
- [7] TINGLE J S, NEWMAN J K, LARSON S L, et al. Stabilization mechanisms of nontraditional additives[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2007, 1989: 59-67.
- [8] KATZ L E, RAUCH A F, LILJESTRAND H M, et al. Mechanisms of soil stabilization with liquid ionic stabilizer[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2001, 1757(1): 50-57.
- [9] 高中南,钟秀梅,王峻,等.粉煤灰改良饱和黄土动力特性研究[J]. *世界地震工程*, 2019, 35(3): 91-98. (GAO Zhongnan,

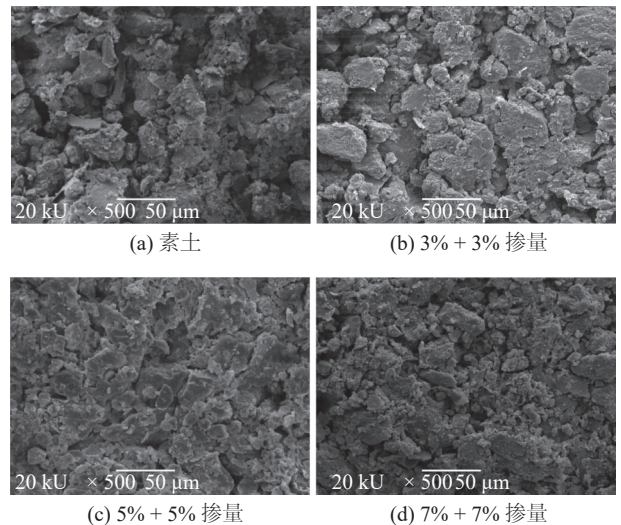


图 8 不同掺量下改良黄土 SEM 图

Fig. 8 SEM diagram of improved loess at different mixing amounts

- ZHONG Xiumei, WANG Jun, et al. Dynamic characteristics of saturated loess improved by fly ash[J]. *World Earthquake Engineering*, 2019, 35(3): 91-98. (in Chinese))
- [10] 高中南, 周仲华, 王峻, 等. 粉煤灰改良饱和黄土的抗液化特性[J]. *地震工程学报*, 2018, 40(1): 105-110. (GAO Zhongnan, ZHOU Zhonghua, WANG Jun, et al. Anti-liquefaction properties of saturated loess improved by fly ash[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2018, 40(1): 105-110. (in Chinese))
- [11] 马文杰, 王博林, 王旭, 等. 改性黄土的力学特性试验研究[J]. *水利水电技术*, 2018, 49(10): 150-156. (MA Wenjie, WANG Bolin, WANG Xu, et al. Experimental study on mechanical properties of modified loess[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(10): 150-156. (in Chinese))
- [12] 张沛云, 马学宁, 李善珍, 等. 高速铁路水泥改良黄土路基长期动力稳定性评价[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(11): 80-87. (ZHANG Peiyun, MA Xuening, LI Shanzhen, et al. Long-term dynamic stability evaluation for cement-improved loess subgrade of high speed railway[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(11): 80-87. (in Chinese))
- [13] 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))
- [14] 刘熙媛, 赵玮, 马占海, 等. 水泥改良黄土在冻融循环作用下的渗透性能[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(34): 221-225. (LIU Xiyuan, ZHAO Wei, MA Zhanhai, et al. Permeability of cement modified loess under freezing-thawing cycle[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(34): 221-225. (in Chinese))
- [15] 葛菲, 巨玉文, 蒋宗耀, 等. 水泥硅微粉改良黄土的抗剪强度试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(16): 6565-6569. (GE Fei, JU Yuwen, JIANG Zongyao, et al. Experimental research on shear strength of improved loess with cement and silicon micropowder[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(16): 6565-6569. (in Chinese))
- [16] 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))
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准 GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [18] 倪修全, 殷和平, 陈德鹏. 土木工程材料[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2014. (NI Xiuquan, YIN Heping, CHEN Depeng. Civil engineering materials[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2014. (in Chinese))
- [19] 张建伟, 亢飞翔, 边汉亮, 等. 冻融循环下木质素改良黄泛区粉土无侧限抗压强度试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(增刊 2): 1-6. (ZHANG Jianwei, KANG Feixiang, BIAN Hanliang, et al. Experiments on unconfined compressive strength of lignin modified silt in Yellow River flood area under freezing-thawing cycles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(Suppl2): 1-6. (in Chinese))
- [20] 尤梓玉. 冻融作用下黄土损伤及对边坡稳定性影响的研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2019. (YOU Ziyu. Study on loess damage and its influence on slope stability under freezing and thawing[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019. (in Chinese))

Experiment study on the strength and microstructure of bentonite-lime improved loess

GAO Mengna¹, WANG Xu^{1,2}, LI Jiandong¹, ZHANG Yanjie¹, JIANG Daijun¹

(1. *School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China*; 2. *National and Provincial Joint Engineering Laboratory of Road & Bridge Disaster Prevention and Control, Lanzhou 730070, China*)

Abstract: Loess has poor engineering performance and must be treated before it can be used as a roadbed filler. In order to improve the bearing capacity of the loess subgrade, and better solve the engineering disease problem of the loess subgrade, bentonite and lime are added to the loess roadbed filler, and the unconfined compressive strength test and nuclear magnetic resonance test of different combinations of bentonite-lime-loess are carried out. From the perspective of soil strength and pore structure, each content is studied. Bentonite-lime improves the strength and pore structure of loess roadbed fillers. The test results show that bentonite can effectively fill the pores of loess, lime can make the dispersed particles in the soil form a whole, and increase the unconfined compressive strength of the soil by 4.01 times; the unconfined compressive strength of the improved loess increases with the maintenance. Compared with plain loess, the porosity of modified loess decreases, and the proportion of large pores decreases significantly. Scanning through a microscopic electron microscope found that the soil particles were connected as a whole, and the large pores between the particles were basically filled. Therefore, the improvement effect of bentonite and lime on loess filler is more significant.

Key words: bentonite; lime; unconfined compressive strength; microstructure; improved loess