

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0020

ZHOU Yu, LI Guoyu, WU Hongjuan, et al. Experimental study on the unconfined compressive strength of lime stabilized red-mudstone[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(2):535-543. [周宇, 李国玉, 武红娟, 等. 石灰改良红层无侧限抗压强度试验研究[J]. 冰川冻土, 2021, 43(2):535-543.]

石灰改良红层无侧限抗压强度试验研究

周 宇^{1,2}, 李国玉^{1,2,3}, 武红娟⁴, 穆彦虎¹, 赵文斌⁵, 毛云程¹

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院西北生态环境资源研究院 大兴安岭冻土工程与环境观测试验研究站, 黑龙江 加格达奇 165000;

4. 西北民族大学, 甘肃 兰州 730030; 5. 甘肃民航机场集团有限公司, 甘肃 兰州 730020)

摘 要: 红层是一种特殊岩土, 作为路基材料时, 常会导致不均匀沉陷、翻浆冒泥等病害。为改善其力学性质, 工程上通常掺入一定剂量的石灰($\text{Ca}(\text{OH})_2$)进行改良。由于降水-蒸发的周期性变化, 运营期间反复干湿循环作用对路基土的工程性质造成较大影响。基于此, 结合室内无侧限抗压强度试验, 研究了干湿循环作用对不同掺量的石灰改良红层无侧限抗压强度的影响。结果表明: 在最佳含水率下, 石灰改良红层的无侧限抗压强度随石灰掺量的增加而增大; 干湿循环作用对改良红层无侧限抗压强度的影响与石灰掺量有关, 石灰掺量较低时, 改良红层的抗压强度随干湿循环次数的增加而减小, 石灰掺量较高时, 改良红层的无侧限抗压强度随干湿循环次数的增加而显著增大; 未改良红层塑性较大, 试样均为塑性鼓胀破坏, 掺入石灰后, 红层强度增大, 脆性增强, 呈脆性剪切破坏, 经历干湿循环作用后, 石灰改良红层试样呈多缝锥形破坏。

关键词: 红层; 干湿循环作用; 石灰改良红层; 无侧限抗压强度

中图分类号: TU446 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)02-0535-09

0 引言

红层是外观以红色为主色调的中、新生代的碎屑沉积岩层, 以陆相沉积为主, 岩性以砂岩、泥岩、页岩为主, 岩性组合以互层为特性^[1]。我国红层分布总面积约 826 400 km², 在我国华北、华东、中南、西南、西北等地均有广泛分布^[2]。红层形成时代较新, 钙质、泥质胶结物含量较高, 以软岩为主且软弱结构面发育^[2-4], 岩土体工程性质较差, 主要表现为强度低, 水稳定性差, 易风化、崩解, 具有一定的膨胀性和流变性^[5-9]。直接使用红层软岩风化物作为填筑材料时, 常会导致不均匀沉陷、承载力不足、路面鼓包和翻浆冒泥等工程病害^[10-11]。但受制于工程造价、填料缺乏等原因, 工程填筑一般都就地取材。因此, 开展红层改良研究十分必要。

国内外学者在大量工程实践和室内研究的基础上, 提出诸多红层改良措施, 主要包括预崩解法、隔水保护法、压实法、化学加固法等^[12-15]。其中, 通过掺加固化剂对红层软岩进行改良是工程中较为常见的处治方法。研究表明, 传统固化剂如水泥、石灰和粉煤灰等能够大幅改善红层的抗压强度、击实特性、浸水崩解特性、浸水后软化系数和 CBR 值等^[16-20], 并在实际工程应用中得到验证^[21-22]。此外, 钱普舟等^[23]、吴丹^[24]还通过新型固化剂对红层的工程性质进行改良, 也取得良好的效果。一般认为经固化剂改良的红层软岩结构状态发生改变, 基本满足建筑物的强度及稳定性要求, 然而在遭受周期性的降雨及蒸发、地下水位升降等干湿循环过程后, 岩土体的工程性质会发生显著变化^[25-26]。大量研究表明, 红层区边坡、路基、坝基等的失稳问题大多与

收稿日期: 2019-12-21; 修订日期: 2020-04-22

基金项目: 甘肃省交通运输厅科技项目(201600009); NSFC-新疆联合基金项目(U1703244); 国家自然科学基金项目(41672310; 41702333); 甘肃省科技重大专项(143GKDA007); 国家重点研发计划项目(2017YFC0405101)资助

作者简介: 周宇, 博士研究生, 主要从事寒区岩土工程研究. E-mail: zhouyu@lzb.ac.cn

通信作者: 李国玉, 研究员, 主要从事冻土工程与寒区环境研究. E-mail: guoyuli@lzb.ac.cn

水的影响有关^[27-30]。就红层而言,富含亲水膨胀性矿物是其特殊水-岩作用的关键,在干湿循环过程中,土颗粒间不仅存在失水收缩的拉破坏,还存在吸水膨胀引起的压剪破坏^[31]。长期的干湿循环作用会引起土体结构发生改变,最终导致其抗压强度^[32-33]、抗剪强度^[33-34]、水稳性^[35]等力学性能不同程度降低。然而,关于干湿循环作用对改良后红层工程性质的影响研究仍然较少

因所处环境和气候条件的差异,不同地区红层性质差距很大。甘肃陇南成州机场地处陇南徽成盆地,第三系红层软岩分布广泛^[36],气候潮湿,降水量大,土体经常遭受干湿循环作用。目前的研究多针对干湿循环对红层结构、强度、崩解性等方面的影响,而对改良后红层在干湿循环作用下性质变化的研究较少。无侧限抗压强度对评价土体的承载力及抗剪强度具有重要意义,是设计、施工中重要的力学参数。因此,本文依据成州机场实际工况,针对不同石灰掺量下的改良红层试样进行干湿循环试验和无侧限抗压强度试验,分析干湿循环作用对陇南石灰改良红层无侧限抗压强度特性的影响规律,以期能为工程施工及病害防治提供依据。

1 试验材料及方法

1.1 材料与试样制备

试验用土取自陇南成州机场跑道附近的红层软岩风化物。成州机场地处徽成盆地,上部土层主要为第四系黄土,其下为暗红色泥质砂岩、粉砂岩、砂质泥岩及互层状红层,红层矿物成分主要有石英石、石灰石、多水高岭石以及无定形游离氧化铁等^[37-39]。根据土工试验方法标准(GB/T 50123—1999)^[40]及公路工程无机结合料稳定材料试验规程(JTG E51—2009)^[41]进行颗分、比重、液塑限、最优含水率及最大干密度试验,试验结果如图1、表1所示。试验选用熟石灰作为固化剂对红层进行改良。该石灰产自天津市致远化学试剂有限公司,为白色结晶性粉末,Ca(OH)₂含量大于等于95%。

为保证试验用土物理性质的均匀性,将土料平铺使其自然风干,并充分拌匀,然后反复碾压过筛(2 mm)。试样均采用两头压实法制备,分别按照0%、3%、5%和10%的掺量称量熟石灰,将风干过筛后的红层与石灰搅拌均匀,因试样制备过程中有水分损失,按稍大于11%含水率来称取蒸馏水,与灰、土搅拌均匀后放入密封袋静置24 h,采用冻土工程

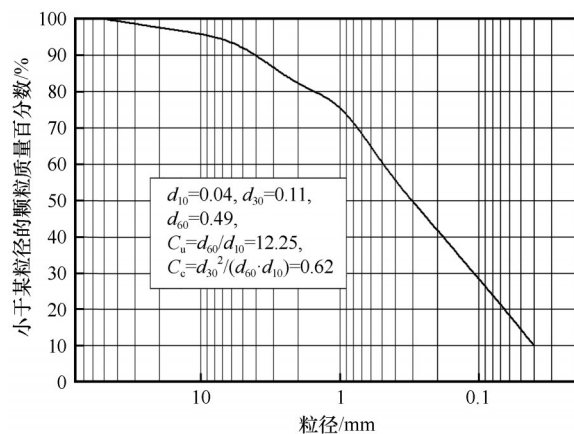


图1 土样颗分曲线

Fig. 1 Grain size distribution for sample

表1 土样基本物理性质指标

Table 1 Basic physical parameters of soils

| 液限/% | 塑限/% | 比重 | 最优含水率/% | 最大干密度/(g·cm ⁻³) | 塑性指数 |
|-------|-------|------|---------|-----------------------------|-------|
| 27.70 | 17.26 | 2.78 | 11.2 | 2.01 | 10.44 |

国家重点实验室自动制样机,按照干密度为2.01 g·cm⁻³制备φ39.1 mm×80 mm圆柱形土样。为保证压实土样的均匀性,压实过程采用变形控制,垂向压实速率为0.05 mm·min⁻¹^[42]。将制好的土样在保湿条件下养护,龄期为28 d。

1.2 试验内容与方法

为尽可能模拟干湿循环作用过程,采用浴霸灯照射的方式模拟日照干燥土样,通过调整浴霸灯与土样间的距离保证每次干湿循环时的温度一致。将素土和经养护后的不同掺量石灰土试样干燥至含水率基本不变(2%左右),然后在饱和器中抽真空3 h,浸水饱和12 h,饱和含水率为14%。将饱和后的土样继续干燥至含水率为11%,即完成一次干湿循环,一次完整干湿循环约48 h。有研究表明,在经历第一次干湿循环后土样强度急剧下降,随后对于干湿循环次数的增加逐渐趋于稳定^[43]。考虑到目前研究的干湿循环次数均较少,为得到长期干湿循环作用下土体的强度,对不同掺量石灰土分别进行0、1、5、20次干湿循环。

为使土样中水分分布均匀,将完成干湿循环作用的试样用保鲜膜包好,静置12 h。利用GDS非饱和三轴仪测试试样无侧限抗压强度,试验过程中轴向应变速率设定为0.5 mm·min⁻¹,每2 s收集一次应力应变数据。为准确获得土样破坏时的原貌,试验中用一层薄膜对土样进行轻微的包裹,既不影响其

受力,也不至土样破坏时大块脱落。试验完成后,观察并记录试样破坏形态。为控制变量,试验采用的不掺灰红层试样与改良土样采用相同规格和养护条件。每组试验有3个平行样。

2 结果与讨论

2.1 不同石灰掺量对红层抗压强度的影响

对未经历干湿循环的不同石灰掺量土样进行无侧限抗压强度试验,得到应力-应变曲线如图2所示。由图可知,在无侧限压缩应力条件下,不同石灰掺量土样的应力-应变关系均表现出一定的应变软化特性,其中素土的无侧限抗压强度较小,峰值强度不明显,强度达到峰值后,曲线形态趋于平缓,强度降低速率逐渐减慢。随着石灰掺量的增大,红层抗压强度逐渐增大,在变形发展初期,应力应变曲线呈现陡直的上升趋势,随着荷载的增大,土体由弹性变形转向塑性屈服,最终导致破坏。峰值强度随石灰掺量的增大而增大,其中石灰掺量为10%的改良土无侧限抗压强度最高,达685.67 kPa,是素土强度的4.60倍,石灰掺量为5%和3%的改良土抗压强度也较高,分别是素土的4.17倍和3.91倍,可见掺入石灰能大幅提高红层抗压强度,含量越大改良效果越好(掺量 $\leq 10\%$)。

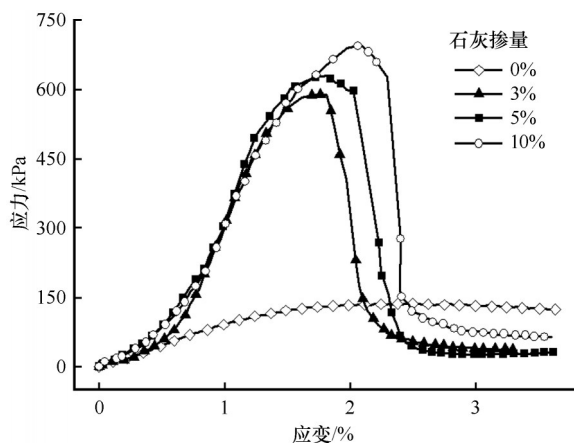


图2 轴向应力与轴向应变的关系

Fig. 2 Relationship between axial stress and axial strain

计算应力应变曲线中的直线段斜率,得到不同掺灰量下红层试样的弹性模量变化曲线(图3)。由图可知,土样在掺入石灰后弹性模量显著增大,其中10%掺量的改良土弹性模量是素土的7.25倍,可见在力学性质差的红层软岩中加入石灰具有明显改良效果。对不同掺量下土体弹性模量试验值进行拟合,发现弹性模量与石灰掺量呈指数关系。当

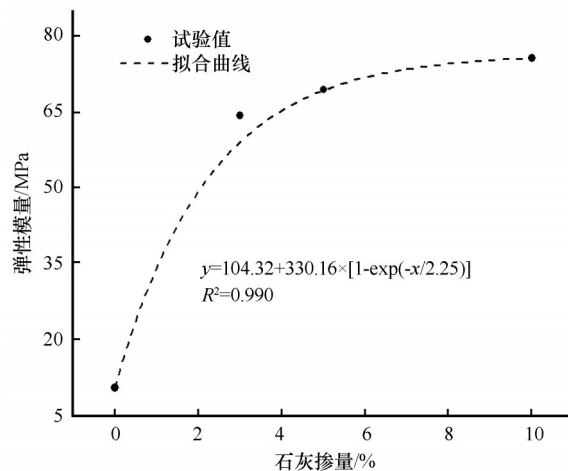


图3 石灰掺量与弹性模量的关系

Fig. 3 Relationship between lime content and elasticity modulus

石灰掺量较小时,土体弹性模量随石灰掺量的增大而迅速增大,当石灰掺量继续增大时,弹性模量增长幅度逐渐减小,曲线趋于平缓。

将土样破坏时对应的点记为失效应变,绘制不同掺灰量下红层试样的失效应变变化曲线如图4所示。由图可知,失效应变随石灰掺量的变化趋势则与弹性模量相反。掺入石灰后,土体的失效应变显著降低,随着石灰掺量的增大,失效应变的降低幅度逐渐减小。可见,石灰在增加红层软岩强度和刚性的同时,也增加了其脆性,其失效应变随石灰掺量的增大而逐渐减小。

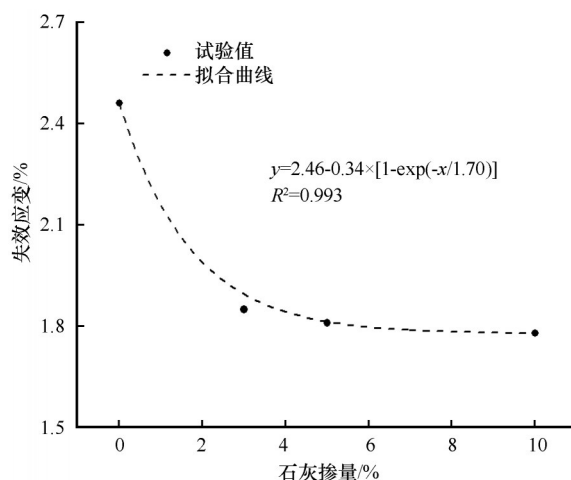


图4 石灰掺量与失效应变的关系

Fig. 4 Relationship between lime content and failure strain

2.2 干湿循环作用对红层抗压强度的影响

为了研究干湿循环作用对红层无侧限抗压强度的影响,对经历0、1、5、20次干湿循环后的试样进

行无侧限抗压强度试验,整理无侧限抗压强度-干湿循环次数曲线如图 5 所示。由图可知,不同石灰掺量下干湿循环作用对改良土无侧限抗压强度的影响不尽相同。当石灰掺量低于 5% 时,随着干湿循环次数的增加,改良土的无侧限抗压强度不断降低,其中素土在经历 1 次干湿循环后,土样强度急剧衰减,随后降幅逐渐减小,趋于稳定。当石灰掺量高于 5% 时,改良土的无侧限抗压强度随着干湿循环次数的增加而不断增加,在经历 20 次干湿循环后,土样强度得到显著提升。当石灰掺量等于 5% 时,随着干湿循环次数的增加,土样抗压强度略微提升。素土和石灰掺量为 3% 的改良土在经历 20 次干湿循环后抗压强度急剧衰减,降幅分别为 60.03% 和 31.65%,而石灰掺量为 5% 和 10% 的改良土在经历 20 次干湿循环作用后抗压强度增大,增幅分别为 2.63% 和 82.36%,在一定程度上可以说明,当石灰掺量较低时,随着干湿循环次数的增加,改良红层强度越低,而当石灰掺量较高时,随着干湿循环次数的增加,改良红层强度越高。但高石灰掺量改良土在经历多次(20 次以上)干湿循环作用后抗压强度的变化规律仍需进一步研究,才能更好

地揭示干湿循环对石灰改良红层特性影响的过程和机制。

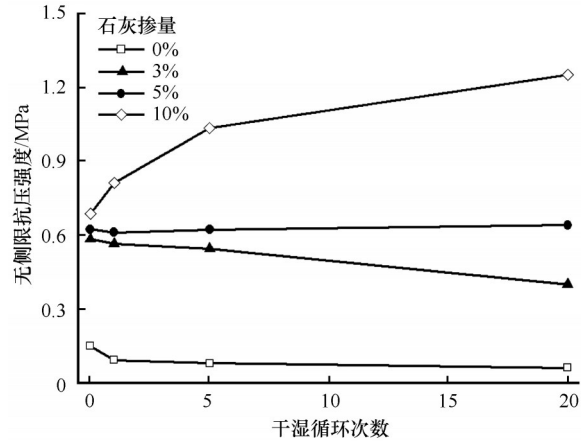


图 5 无侧限抗压强度与干湿循环次数的关系
Fig. 5 Relationship between the unconfined compressive strength and number of drying-wetting cycles

整理不同干湿循环次数下单轴抗压试验数据,拟合得到石灰掺量 C_L 与无侧限抗压强度 q_u 的关系曲线,如图 6 所示。当土样经历干湿循环作用较少(0 次、1 次、5 次)时,试样无侧限抗压强度 q_u 与石灰

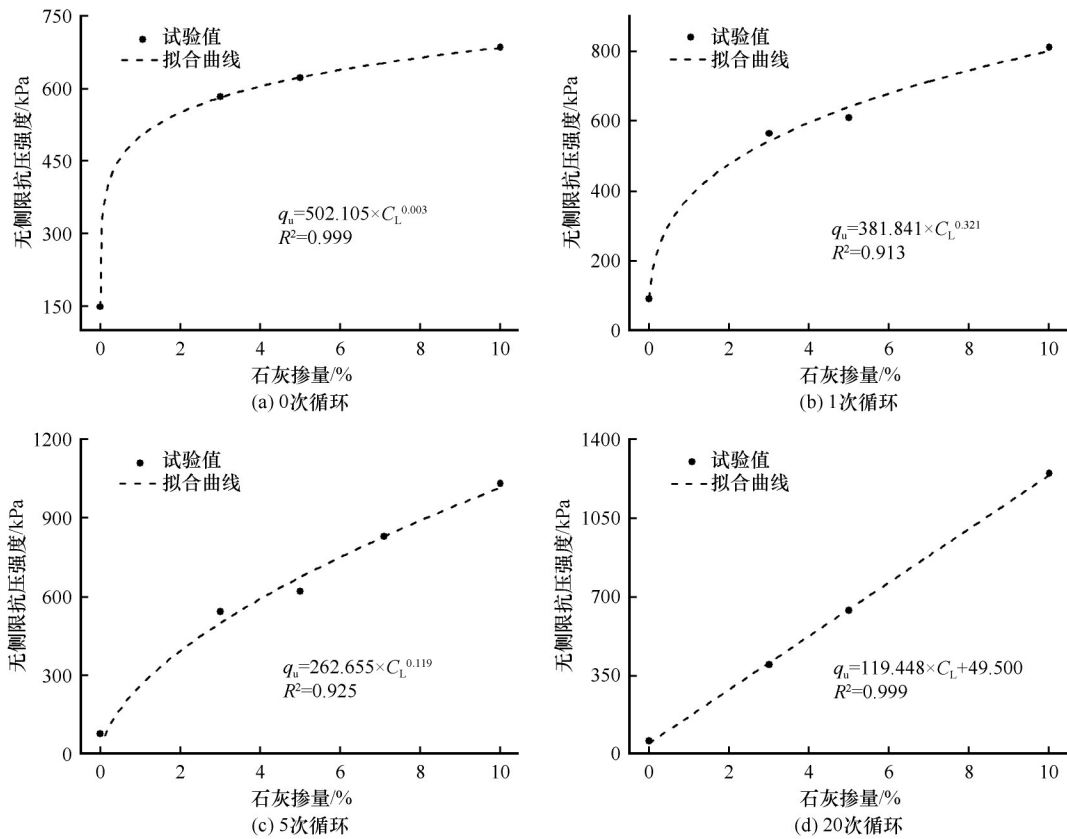


图 6 石灰掺量与无侧限抗压强度的关系
Fig. 6 Relationship between lime content and the unconfined compressive strength

掺量 C_L 呈指数关系, 关系式为

$$q_u = a \times C_L^b \quad (1)$$

式中: a 、 b 为常数, 可通过试验获得。

随着干湿循环次数的增加, 曲线的切线斜率逐渐减小。当干湿循环作用达到 20 次时, 试样无侧限抗压强度 q_u 与石灰掺量 C_L 呈线性关系, 关系式为

$$q_u = a \times C_L + b \quad (2)$$

式中: a 、 b 为常数, 可通过试验获得。

由此可见, 当干湿循环次数较少时, 土体中掺入少量石灰即可获得较大的强度增长, 而随着掺灰量的继续增加强度增长幅度不大; 当干湿循环次数较大时, 土体无侧限抗压强度随石灰掺量的增加而不断增大。因此, 考虑改良土耐久性情况下, 干湿循环作用对石灰改良红层最佳掺量的确定有很大影响。

以上分析表明, 干湿循环作用对不同掺灰量红层试样抗压强度的影响明显不同。当掺灰量较少时, 土体在干旱条件体积缩小, 引起土颗粒的集聚和排列发生变化, 原生隐微裂隙扩张和加深, 部分短小裂隙贯通, 发展形成长大裂隙, 为土中水分蒸发和地表水下渗提供了良好通道, 土体的整体性与均一性得到破坏^[44]; 湿润条件下, 水分沿裂隙渗入土体, 红层中蒙脱石及其混层矿物具有较强的亲水性及弱膨胀性, 吸水后膨胀软化, 强度降低。扫描电镜、超声波测速等微细观试验表明, 反复干湿循环作用下, 不断胀缩交替导致土体结构重新调整, 颗粒之间距离增大, 胶结变弱, 黏聚力下降, 最终导致土体强度大幅降低^[45-47]。与此不同的是, 当掺灰量较大时, 随着干湿循环次数的增大, 石灰土的强度显著增大, 这与石灰土强度形成机制有关。一般

认为熟石灰改良土强度的形成主要源于离子交换作用、碳化作用和灰结作用等, 无论哪种强度形成机理, 都需要水分参与或水分为强度形成的条件^[48-49]。显然, 常规的保温保湿养护并不能满足高石灰掺量石灰土的强度形成条件, 仍有部分石灰未参与反应。随着干湿循环的进行, 水分与土颗粒充分接触, 尚未反应完全的熟石灰继续进行离子交换作用、碳化作用和灰结作用等, 使得石灰土的强度随干湿循环次数的增加而不断增加。但 20 次以上干湿循环作用后强度的变化规律尚不明确, 可以推测, 随着干湿循环次数的增加, 石灰反应完全后土体强度将逐渐减小。该结论对石灰改良红层的设计与施工有一定的指示意义。

2.3 土样破坏形态

土样的破坏形态与其强度特性密切相关。在本次试验过程中, 土样在无侧限压缩条件下的破坏形态主要有三种; 一种是脆性剪切破坏, 在荷载作用下有明显的剪切带形成, 试样破坏集中在剪切带发展部位, 而其他部位结构性破坏程度相对较小; 另一种是多缝锥形破坏, 土体受各向异性的影响, 在无侧限压缩条件下, 形成多条剪切带, 最终形成多缝锥形破坏面; 第三种是塑性鼓胀破坏, 在外部荷载作用下未形成明显的剪切带, 在无侧限压缩过程中土样逐渐向侧向鼓胀, 土样并不沿某个特定破坏面发生相对位移, 而是呈现出中间大, 两端小的鼓胀型。

图 7 为不同石灰掺量下未经干湿循环作用土体的破坏形态, 结合应力应变曲线(图 2)可知, 素土与石灰土的破坏形态有明显差别。素土为塑性鼓胀破坏, 裂缝数量较多, 抗压强度小, 且抗压强度与残

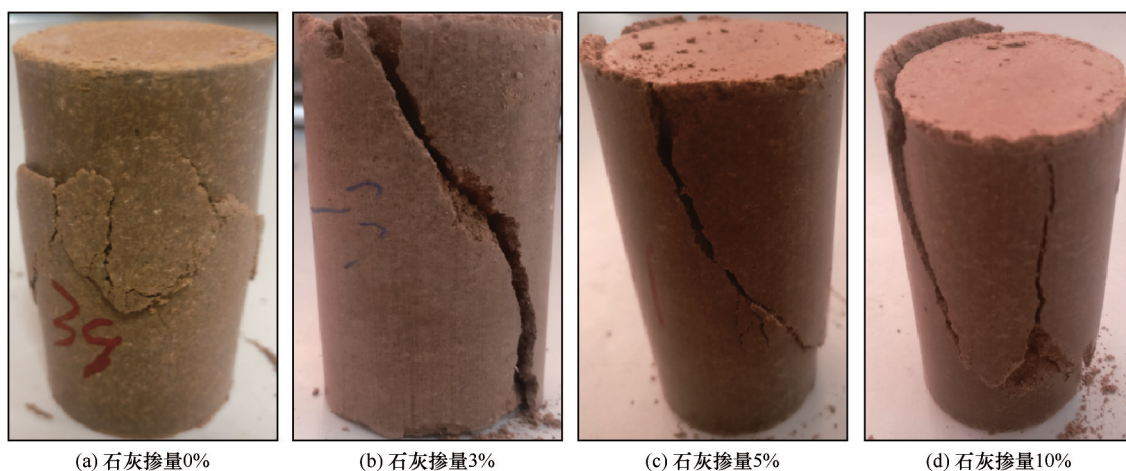


图 7 破坏后的试样(未经干湿循环)

Fig. 7 Damaged soil samples (after 0 drying-wetting cycle)

余强度差距不大,强度达到峰值后,应力应变曲线趋于平缓。石灰土则为脆性剪切破坏,未经历干湿循环条件下,3%和5%掺量改良土的破坏形态与应力应变曲线均类似,试样均形成了近 $(45^{\circ}+\varphi/2)$ 倾角的破坏面,抗压强度与弹性模量均显著提高。10%石灰掺量红层虽然仍沿一个倾斜剪切面破坏,但侧面已形成多条交叉裂缝,土体破坏需要更多的能量。

图8为20次干湿循环作用后不同石灰掺量红层试样的无侧限压缩破坏形态。结合应力应变曲

线(图9)可知,素土在经历干湿循环作用后仍为塑性鼓胀破坏,破坏形态与干湿循环作用前相似,但强度大幅降低,横向变形较大,表面形成纵横交错的裂纹。3%掺量的改良土仍以沿一条剪切带破坏为主,但已形成多条贯通的剪切带,初步具有多缝锥形破坏面形态。随着石灰掺量的增大,土体抗压强度和弹性模量显著增加,微裂纹增多,石灰土则由于干湿循环作用前的脆性剪切破坏变为多缝锥形破坏。

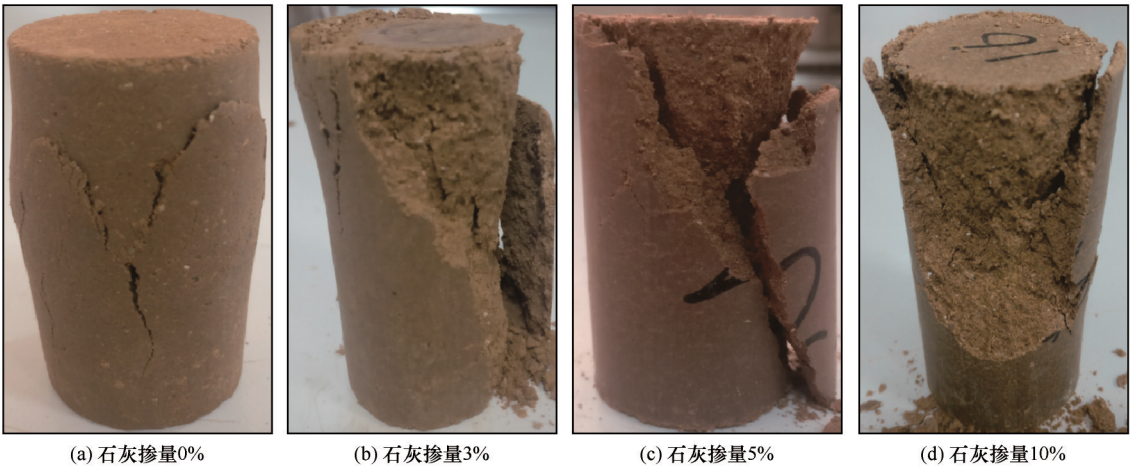


图8 破坏后的试样(20次干湿循环)
Fig. 8 Damaged soil samples (after 20 drying-wetting cycles)

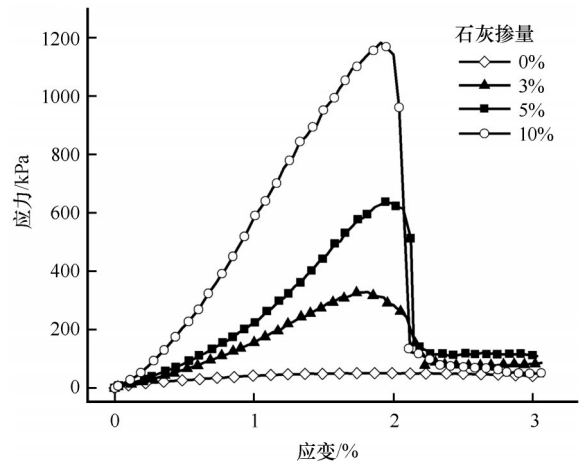


图9 轴向应力与轴向应变的关系(20次干湿循环)
Fig. 9 Relationship between axial stress and axial strain
(after 20 drying-wetting cycles)

试样破坏形态的不同与红层自身结构及石灰土加固机制有关。素土本身塑性较强,颗粒间连结力较弱,在经历干湿循环作用后连结力降低,在无侧限荷载作用下,土颗粒间容易发生错动,产生塑性的侧向变形。素土中掺入石灰后,土颗粒间连结增强,由松散粒状结构逐渐转变为胶结土颗粒,强

度增大,脆性增强,试样沿近 $(45^{\circ}+\varphi/2)$ 倾角的剪切面破坏。随着干湿循环次的增多,土样中石灰全部参与反应,在土颗粒间形成较强的连结,各向异性增强,当裂纹扩展遇到较强颗粒连结时,能够有效的约束裂纹发展,使裂纹扩张和发展的方向不断改变,因此土样的破坏不再沿着某一固定的剪切面,而是形成了具有多条裂缝的锥形破坏面。

3 结论

通过对不同石灰掺量下改良红层试样进行干湿循环试验,研究了石灰掺量和干湿循环作用对改良红层无侧限抗压强度影响规律,得出以下主要结论:

- (1)在未经历干湿循环作用时,掺入石灰能够显著提高红层的抗压强度,石灰改良红层的无侧限抗压强度及弹性模量均随石灰掺量的增大而增大,而失效应变则随石灰掺量的增大而减小。
- (2)不同含灰量下,石灰改良红层的无侧限抗压强度对干湿循环作用的响应不同。当石灰掺量低于5%时,随着干湿循环次数的增加,改良土的无

侧限抗压强度不断降低;当石灰掺量高于5%时,改良土的无侧限抗压强度随着干湿循环次数的增加而显著增加。当石灰掺量等于5%时,干湿循环作用对改良土的无侧限抗压强度影响不大,随着干湿循环次数的增加,土样抗压强度略微提升。

(3)未改良红层塑性较大,颗粒间连结对力较弱,试样均为塑性鼓胀破坏。掺入石灰后,红层强度增大,脆性增强,呈脆性剪切破坏。随着干湿循环次数的增多,改良土样各向异性增强,石灰改良红层呈多缝锥形破坏。

(4)在常规的保湿养护条件下,石灰掺量较低的改良红层中石灰反应完全,干湿循环作用对石灰改良红层产生不可逆转的弱化作用,强度不断降低。而石灰掺量较高时,改良土中仍有部分石灰未反应完全,干湿循环作用促使石灰继续发生反应,土体强度增大。

参考文献(References):

- [1] Cheng Qiang, Kou Xiaobing, Huang Shaobin, et al. The distributes and geologic environment characteristics of red beds in China[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(1): 34-40. [程强, 寇小兵, 黄绍彬, 等. 中国红层的分布及地质环境特征[J]. 工程地质学报, 2004, 12(1): 34-40.]
- [2] Guo Yongchun, Xie Qiang, Wen Jiangquan. Red beds distribution and engineering geological problem in China[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2007, 34(6): 67-71. [郭永春, 谢强, 文江泉. 我国红层分布特征及主要工程地质问题[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(6): 67-71.]
- [3] Cheng Qiang, Zhou Depei, Feng Zhijun. Research on shear creep property of typical weak intercalation in red bed soft rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Suppl 1): 3176-3180. [程强, 周德培, 封志军. 典型红层软岩软弱夹层剪切蠕变性质研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊1): 3176-3180.]
- [4] Wang Jian, Gao Yingchang, Liu Keyu, et al. Diagenesis and evolution of the lower Eocene red-bed sandstone reservoirs in the Dongying depression, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 94: 230-245.
- [5] Feng Qiang. The distribution and road behavior of Sichuan red mudstone [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011. [冯强. 四川红层泥岩的分布及其路用性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.]
- [6] Wei Yongxing, Zhang Shizhong, Gan Ying, et al. Experimental study on the basic characteristics, expansibility and softening of red mudstone in Sichuan Basin[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2010(Suppl 1): 61-68. [魏永幸, 张仕忠, 甘鹰, 等. 四川盆地红层泥岩的基本特性和膨胀性及软化的试验研究[J]. 工程勘察, 2010(增刊1): 61-68.]
- [7] Chen Wenwu, Yuan Pengbo, Liu Xiaowei. Study on creep properties of red-bed soft rock under step load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Suppl 1): 3076-3081. [谌文武, 原鹏博, 刘小伟. 分级加载条件下红层软岩蠕变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊1): 3076-3081.]
- [8] Zhang Chonglei, Tang Huiming, Huang Lei, et al. Dynamic behaviour of weathered red mudstone in Sichuan (China) under triaxial cyclic loading[J]. Journal of Mountain Science, 2018, 15(8): 1789-1806.
- [9] Shen Peiwu, Jiang Guanlu, Su Lijun, et al. Experimental study of slaking properties of red bed mudstones from the Three Gorges Reservoir area[J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2018, 37(8): 891-901.
- [10] Feng Qiyang, Han Baoping, Sui Wanguo. Characteristics of water-rock interaction of red-beds and its application to engineering in southwestern Shandong [J]. Journal of Engineering Geology, 1999, 7(3): 266-271. [冯启言, 韩宝平, 隋旺华. 鲁西南地区红层软岩水岩作用特征与工程应用[J]. 工程地质学报, 1999, 7(3): 266-271.]
- [11] Cheng Qiang, Zhou Depei, Kou Xiaobing. The main geotechnical engineering problems of highway construction in red beds [C]// Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering. Proceedings of the 8th National Conference on Rock Mechanics and Engineering. Beijing: Science Press, 2004: 128-131. [程强, 周德培, 寇小兵. 红层软岩地区公路建设中的主要岩土工程问题[C]//中国岩石力学与工程学会. 第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 科学出版社, 2004: 128-131.]
- [12] Wei Shenggen. Test and analysis of compaction measures for red-bed soft rock fill subgrade[J]. Technology of Highway and Transport, 2014(1): 11-14. [韦生根. 红层软岩填方路基压实方法的试验与分析[J]. 公路交通技术, 2014(1): 11-14.]
- [13] Luo Yinhuai, Deng Xingli, Wang Xing'an. Elementary discussion on the function of water draining for landslide remediation in red beds area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14(3): 61-63. [骆银辉, 邓星理, 王兴安. 试论疏排水在红层地区滑坡治理中的重要作用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(3): 61-63.]
- [14] Liu Junxin, Xie Qiang, Bai Mingzhi, et al. Settlement analysis of bed mudstone embankments with different degrees of compaction through centrifugal model tests and finite element modeling[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(5): 683-688. [刘俊新, 谢强, 白明志, 等. 不同压实度下红层泥岩路堤沉降研究[J]. 工程地质学报, 2006, 14(5): 683-688.]
- [15] Wang Zhimeng. Study and application in high speed line of mechanical characteristics on red beds and it's improved soil [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005. [王智猛. 红层泥岩土及其改良土力学特性研究与在高速铁路中的应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.]
- [16] Li Chuanhua. Modifier of cement using in red mudstone's research[J]. Northern Communications, 2016(9): 38-41. [李传华. 水泥对红层泥岩路基的改良研究[J]. 北方交通, 2016(9): 38-41.]
- [17] Qing Rongxiu, He Xin, Li Qiongfang, et al. Test on water stability of red soil layer solidified with mixture of new solidification agent and cement[J]. New Building Materials, 2017, 44(8): 5-9. [卿容秀, 何鑫, 李琼芳, 等. 新型固化剂与水泥混合料固化红层土水稳定性试验研究[J]. 新型建筑材料, 2017, 44(8): 5-9.]
- [18] Wang Zhimeng. Study on application and technology for filling subgrade using red-mudstone and improved soil in high-speed railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009. [王智猛. 红层泥岩及其改良土填筑高速铁路路基适应性及工程技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.]
- [19] Zhu Yanbo, Yu Hongming, Yang Yanxia, et al. Indoor experimental research on characteristics of improved red-mudstone

- [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2): 425-432. [祝艳波, 余宏明, 杨艳霞, 等. 红层泥岩改良土特性室内试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2): 425-432.]
- [20] Xiong Li. Study and application of slaking mechanism of red bed soft rock[D]. Changsha: Hunan University, 2011. [熊力. 红层软岩崩解机理研究及工程应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.]
- [21] Xu Peng, Jiang Guanlu, Ren Shijie, et al. Experimental study of dynamic response of subgrade with red mudstone and improved red mudstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(2): 678-683. [徐鹏, 蒋关鲁, 任世杰, 等. 红层泥岩及其改良填料路基动力响应试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 678-683.]
- [22] Zhang Zhongyun. Centrifugal model test research of subgrade about red mudstone and its improved soil[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007. [张中云. 红层泥岩及其改良土路基离心模型试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.]
- [23] Qian Puzhou, Cao Qingxia, Wei Dingbang, et al. Based on the spectrum analysis of SBS modified asphalt regeneration mechanism research[J]. Highway Engineering, 2016, 41(6): 194-199. [钱普舟, 曹青霞, 魏定邦, 等. 聚合物水泥加固红层泥岩性能研究[J]. 公路工程, 2016, 41(6): 194-199.]
- [24] Wu Dan. Soil curing agent improves red soil slope study on scour resistance test[D]. Chengdu: Southwest University of Science and Technology, 2017. [吴丹. 土壤固化剂改善红层土边坡抗冲刷性试验研究[D]. 成都: 西南科技大学, 2017.]
- [25] Hall K D, Rao S. Predicting subgrade moisture content for low-volume pavement design using in situ moisture content data[J]. Transportation Research Record, 1999, 1652(1): 98-106.
- [26] Cantón Y, Sole-Benet A, Queralt I, et al. Weathering of a gypsum-calcareous mudstone under semi-arid environment at Tabernas, SE Spain: laboratory and field-based experimental approaches[J]. Catena, 2001, 44(2): 111-132.
- [27] Zhang Dan, Chen Anqiang, Liu Gangcai. Laboratory investigation of disintegration characteristics of purple mudstone under different hydrothermal conditions[J]. Journal of Mountain Science, 2012, 9(1): 127-136.
- [28] Guo Yongchun, Xie Qiang, Wen Jiangquan. Effect of the alternation of heat and water on the slaking phenomenon of redbeds[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2012, 39(5): 69-73. [郭永春, 谢强, 文江泉. 水热交替对红层泥岩崩解的影响[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(5): 69-73.]
- [29] Zhang Shuai, Xu Qiang, Hu Zeming. Effects of rainwater softening on red mudstone of deep-seated landslide, Southwest China[J]. Engineering Geology, 2016, 204: 1-13.
- [30] Feng Meimei, Wu Jiangyu, Ma Dan, et al. Experimental investigation on the seepage property of saturated broken red sandstone of continuous gradation[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2018, 77(3): 1167-1178.
- [31] Chai Bo, Yin Kunlong, Jian Wenxing, et al. Analysis of water-rock interaction characteristics and bank slope failure process of red-bed[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, 40(4): 1092-1098. [柴波, 殷坤龙, 简文星, 等. 红层水岩作用特征及库岸失稳过程分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(4): 1092-1098.]
- [32] Liu Xiongong, Jin Meihai, Li Dongliang, et al. Strength deterioration of a Shaly sandstone under dry-wet cycles: a case study from the Three Gorges Reservoir in China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2018, 77(4): 1607-1621.
- [33] Yao Huayan, Zhang Zhenhua, Zhu Chaohui, et al. Experimental study of mechanical properties of sandstone under cyclic drying and wetting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(12): 3704-3708. [姚华彦, 张振华, 朱朝辉, 等. 干湿交替对砂岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3704-3708.]
- [34] Liu Xinrong, Fu Yan, Wang Yongxin, et al. Deterioration rules of shear strength of sand rock under water-rock interaction of reservoir[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(9): 1298-1302. [刘新荣, 傅晏, 王永新, 等. (库)水-岩作用下砂岩抗剪强度劣化规律的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1298-1302.]
- [35] Shen Peiwu, Tang Huiming, Wang Dingjian, et al. Disintegration characteristics of red-bed mudstone of Badong Formation under wet-dry cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(7): 1990-1998. [申培武, 唐辉明, 汪丁建, 等. 巴东组紫红色泥岩干湿循环崩解特征试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 1990-1998.]
- [36] Ke Yutian, Liang Shuoyun, Zhou Jianji, et al. Paleo-weathering zone of Cretaceous red mudstone underlying Quaternary loess deposit: a case study on a typical profile[J]. Indian Journal of Geo Marine Sciences, 2018, 47(7): 1398-1408.
- [37] Yu Xiaolong, An Yuke. Characteristics of engineering landslide in red bed rock area of the Hui-Cheng basin in Gansu Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(3): 31-35. [余小龙, 安玉科. 甘肃徽-成盆地红层工程滑坡特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(3): 31-35.]
- [38] Wang Peng, Yu Yunyan, Bao Dexiang, et al. Experimental study on physical and mechanical properties of red-mudstone filling in Gansu[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(2): 522-529. [王鹏, 余云燕, 包得祥, 等. 甘肃红层泥岩填料物理力学特性的试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(2): 522-529.]
- [39] Wang Qihu. Study on engineering geological characteristics and slope stability of red beds in Gansu Province[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016. [王骑虎. 甘肃红层工程地质特性与边坡稳定性研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.]
- [40] Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—1999[S]. Beijing: China Planning Press, 1999. [土工试验方法标准: GB/T 50123—1999[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.]
- [41] Test methods of materials stabilized with inorganic binders for highway engineering: JTG E51—2009[S]. Beijing: China Communications Press, 2009. [公路工程无机结合料稳定材料试验规程: JTG E51—2009[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.]
- [42] Zheng Jianfeng, Ma Wei, Zhao Shuping, et al. Development of the specimen-preparing technique for remoulded soil samples[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(3): 494-500. [郑剑锋, 马巍, 赵淑萍, 等. 重塑土室内制样技术对比研究[J]. 冰川冻土, 2008, 30(3): 494-500.]
- [43] Liu Hongtai, Zhang Aijun, Duan Tao, et al. The influence of alternate dry-wet on the strength and permeability of remolded loess[J]. Hydro-Science and Engineering, 2010(4): 38-42. [刘宏泰, 张爱军, 段涛, 等. 干湿循环对重塑黄土强度和渗透性的影响[J]. 水利水运工程学报, 2010(4): 38-42.]
- [44] Yang Heping, Li Yushi, Li Huiyuan. Analysis of roadbed diseases and damage causes of expansive earth highway[J]. Central South Highway Engineering, 1995(1): 15-17. [杨和平, 李宇峙, 李惠远. 膨胀土公路路基病害及破坏原因分析[J].

- 中南公路工程, 1995(1): 15-17.]
- [45] Zhang Zhenhua, Jiang Qinghui, Zhou Chuangbing, et al. Strength and failure characteristics of Jurassic red-bed sandstone under cyclic wetting-drying conditions[J]. Geophysical Journal International, 2014, 198(2): 1034-1044.
- [46] Wu Enjiang, Han Baoping, Wang Guiliang. Micro-information of water-rock interaction and its influence on pore evolution of red-bed in Yanzhou mining area[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2005, 34(1): 123-128. [吴恩江, 韩宝平, 王桂梁. 红层中水-岩作用微观信息特征及对孔隙演化的影响: 以兖州矿区为例[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(1): 123-128.]
- [47] Zhao Yunfeng, Ren Song, Jiang Deyi, et al. Influence of wetting-drying cycles on the pore structure and mechanical properties of mudstone from Simian Mountain[J]. Construction and Building Materials, 2018, 191: 923-931.
- [48] Gao Guorui. Discussion on the mechanism of lime soil strengthening[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1982, 4(1): 113-117. [高国瑞. 灰土增强机理探讨[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(1): 113-117.]
- [49] Mei Shuzhen. Study on the hardening mechanism and properties of lime soil materials[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1982, 5(7): 47-53. [梅淑贞. 灰土材料的硬化机理及其性能研究[J]. 水利学报, 1982, 5(7): 47-53.]

Experimental study on the unconfined compressive strength of lime stabilized red-mudstone

ZHOU Yu^{1,2}, LI Guoyu^{1,2,3}, WU Hongjuan⁴, MU Yanhu¹,
ZHAO Wenbin⁵, MAO Yuncheng¹

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Da Xing'anling Observation and Research Station of Frozen-ground Engineering and Environment, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Jiagedaqi 165000, Heilongjiang, China; 4. Northwest Minzu University, Lanzhou 730030, China; 5. Gansu Civil Aviation Airport Group Co., Ltd., Lanzhou 730020, China)

Abstract: Red-mudstone is a kind of special soil. When the weathering red-mudstone was used as the filling materials, lots of engineering problems appeared, such as the uneven settlement, the lower bearing capacity and shoulder of road gushing, etc. In order to improve its mechanical properties, a certain amount of lime ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) is usually added in engineering. However, the cyclic drying and wetting during operation has a great influence on the engineering properties of roadbed soil due to periodic variation of rainfall and draught. A series of unconfined compression tests were conducted to study the influence of wetting-drying cycle on the unconfined compressive strength of the stabilized red-mudstone with different content of lime. The test results show that the unconfined compressive strength of the stabilized red-mudstone increases with the increase of the content of lime. The influence of wetting-drying cycle on the unconfined compressive strength of the stabilized red-mudstone is related to the content of lime. When the content of lime is low, the compressive strength of the stabilized soil decreases with the increase of the number of wetting-drying cycles. When the content of lime is high, the unconfined compressive strength of the stabilized soil increases significantly with the increase of the number of wetting-drying cycles. The destruction model of untreated red-mudstone specimens is plastic bulging failure. Due to the increase of soil strength and brittleness, the lime stabilized red-mudstone specimens show brittle shear failure. After the wetting-drying cycle, the destruction model of lime stabilized red-mudstone specimens is cone-shape failure.

Key words: red-mudstone; wetting-drying cycle; lime stabilized red-mudstone; unconfined compressive strength

(责任编辑: 温智; 编辑: 武俊杰)