

文章编号: 1000-7598 (2010) 09-2781-05

灰土的浸水强度及残余强度的试验研究

米海珍¹, 王 昊^{1,2}, 高 春¹, 朱浩稳¹

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 兰州 730050; 2. 长江大学 工程技术学院 湖北 荆州 434020)

摘 要: 灰土的浸水强度和残余强度在续建工程、改建工程及工程事故分析中经常遇到, 故对其进行研究有着重要的工程应用价值。笔者对 40 余件 2: 8 灰土 (兰州黄土与石灰配制) 试样进行静三轴试验, 探讨其残余强度和浸水条件下强度的变化规律。试验结果发现, 灰土的残余强度 σ_R 与其围压 σ_3 呈线性关系: $\sigma_R = A\sigma_3 + B$ 。其规律类似于岩石, 原因是由于残余强度阶段灰土碎裂成块, 破裂面上的摩擦作用类似于岩石碎裂时的作用; 灰土首次浸水后强度有所下降, 但随着浸水次数的增加其强度有所回升, 最后稳定于一个不高于其原始强度的值; 另外还观察到, 灰土不可简单地判断为一种脆断性的材料, 其脆断性受围压和含水率等因素的制约, 围压越大, 脆性越不明显, 当含水率降低到某一值时灰土表现为脆断性。

关 键 词: 灰土; 静三轴试验; 干湿循环; 残余强度; 黄土; 应力-应变曲线

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Study of immersion strength and residual strength of lime-loess

MI Hai-zhen¹, WANG Hao^{1,2}, GAO Chun¹, ZHU Hao-wen¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Yangtze University College of Technology & Engineering, Jingzhou, Hubei 434020, China)

Abstract: The immersion strength and residual strength of lime-loess is an operation frequently encountered in subsequent projects, reconstruction projects and analyzing the engineering accident. So there will be an important engineering significance if we work for it. The conventional triaxial test was conducted with forty samples of loess-lime of Lanzhou in China, the immersion strength and residual strength of lime-loess were discussed specially. From these tests results it was found that the residual strength σ_R with the confining pressure σ_3 appears a linear relationship. This law is similar to rock, because the lime-loess was broken into masses in the period of the residual strength, and the friction effect on the crack face was so similar to the rock.; the strength will decrease after the lime-loess was immersed; but the strength will appear up after a few times immersion; and the strength will remain on a constant volume which is not more than its original strength. In addition, we can't define it brittle materials simply. It is found that the lime-loess fragility is depended on confining pressure and water content; the loess-lime' fragility will be more evident when the confining pressure become more high. It will be fragility when the water content decrease to a certain value.

Key words: lime-loess; static triaxial test; wet-dry cycling test; residual strength; loess; stress-strain curve

1 前 言

灰土能很好地改善和增强土体的力学性能, 是用于改良黄土地区的地基最常用的一种方法, 且应用极其广泛, 尤其对大厚度黄土地基上的多层或小高层建筑更适用。

灰土的性质受含水率、干密度、龄期、围压、浸水等因素的影响。对于灰土的研究比较多, 例如, 西安建筑科技大学的韩晓雷等^[1-2]对其影响因素和本构模型做了较多地研究, 也对灰土的最佳含水率

和最大干密度也进行了不少研究^[3-5]。其他对灰土的研究多数是具体工程中的灰土挤密桩、灰土垫层等的相关研究以及二灰土、水泥石等类似性质的符合土工材料的研究。总之, 对灰土的强度影响因素还未得到比较系统的解释, 仍然值得进一步探究。

灰土的浸水强度和残余强度在工程事故分析、续建工程以及改造工程中是经常遇到的, 故对其进行研究有一定的应用价值。本文根据兰州黄土和石灰拌制的灰土的三轴试验结果, 对其残余强度和反

收稿日期: 2009-04-15

基金项目: 甘肃省自然科学基金项目 (No. 3ZSO42-B25-031); 兰州理工大学校基金项目。

第一作者简介: 米海珍, 男, 1956 年生, 博士, 教授, 主要从事岩土工程方面教学与科研工作。E-mail: Mihaizhen@126.com

复浸水后的强度变化进行了分析, 得出几点新的认识, 并简单阐述了其产生的原因和对工程的实际意义, 以供同行参考。

2 试验条件

2.1 试验材料

试验所用土样为 2:8 灰土, 其中黄土取于兰州市兰工坪, 此处为黄河 III 级阶地。各物理性质指标见表 1。石灰为新鲜消解石灰, CaO 含量为 74.8%, MgO 含量为 8.1%。

表 1 试验用黄土的物理性质指标

Table 1 Performances of test specimens of loess

土粒相对密度	液限/%	塑限/%	塑性指数
2.69	25.4	16.1	9.3

2.2 试样制备

灰土的配合比为 2:8 (体积比), 换算成质量比为 1.004: 8.996。灰土含水率参考文献[1]取为 22% (接近其最优含水率), 分 4 层夯实每层 35 击 (锤重为 0.7 kg, 落距为 300 mm)。所得灰土干密度为 1.54 g/cm³。与文献[1]结果比较接近。试样为圆柱体, 底面直径为 61.8 mm, 高 125 mm。

2.3 试样养护条件及干湿循环

试样制好后, 在塑料袋中用相同黄土包裹, 密封后养护, 养护土的含水率为 5%~7%。

循环前和一般试样同等条件养护。干湿循环一次周期为 7 d, 试样完全浸没于装满水的大容器内, 浸水时间为 2 d。然后, 用细干黄土盖一层并与空气接触放置 5 d。每一个浸水次数都有“干”与“湿”两种状态, “湿”表示刚浸完水, 此时的含水率为 21%, “干”表示浸完水后按上面所说的方法放置 5 d 后的状态, 此时的含水率为 7%。第一次浸水前试样含水率为 11%, 即正常养护试件养护后的含水率。本次试验只针对养护龄期为 90 d 的 2:8 灰土做了干湿循环试验。

2.4 试验概述

对灰土性质的影响因素较多, 本试验只考虑了最主要的 3 个因素: 龄期、围压及干湿循环次数。

试验分为两部分: 不同龄期、不同围压下的灰土常规三轴试验和干湿循环下灰土常规三轴试验。

试验试样共 40 件, 不浸水试样 25 件, 浸水试样 15 件。浸水循环使用 6 件试样, 最后一次仅考虑“干”的情况, 使用 3 件试样。龄期考虑 10、20、30、90、120 d, 浸水试样仅考虑 90 d 龄期。围压采用 50、100、150、200、300 kPa 共 6 种情况。对龄期

30 d 的试样和浸水试样只做围压 150 kPa 和 300 kPa 的情况, 龄期 120 d 的试样只做围压 50 kPa 和 100 kPa 的情况。

本次试验采用 TSZ30-2.0 型应变控制式三轴仪 (南京土壤仪器厂有限公司生产), 人工读数和计数。

3 试验结果与分析

3.1 干湿循环对灰土强度影响

工程界认为浸水会降低灰土强度^[2]。本次试验中测定了 15 件浸水试样, 将其结果绘于图 1, 可见灰土浸水后强度确实会降低, 但笔者发现, 灰土首次浸水后强度降低, 随着浸水次数增加其强度又有回升的趋势, 最后稳定于某一定值。

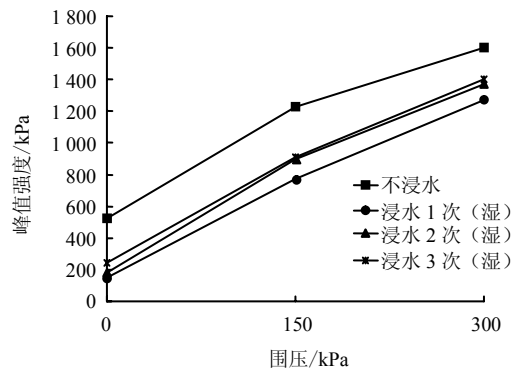


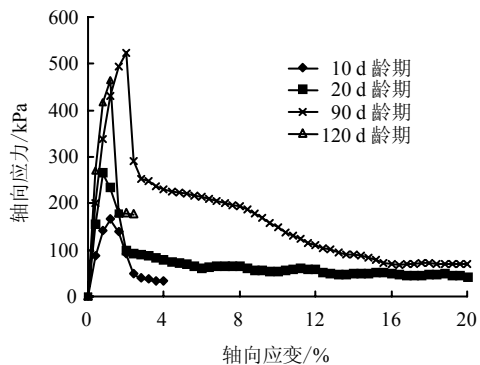
图 1 不同围压下的浸水峰值强度变化对比
Fig. 1 Comparison between peak values of the immersion strengths under different confining pressures

根据现有理论依据^[6-9]可知, 石灰与土混合后的反应作用大致有 3 方面: 离子交换作用、固结反应作用以及碳酸化作用。在一定浸水次数范围内, 浸水有利于离子交换反应和固结反应的发生, 同时也促使了胶结物质的均匀分布, 而干湿循环主要是为碳酸化作用提供了很好的反应条件, 使胶结物的形成更加有利, 从而实现土体力学性质的改善和加强。

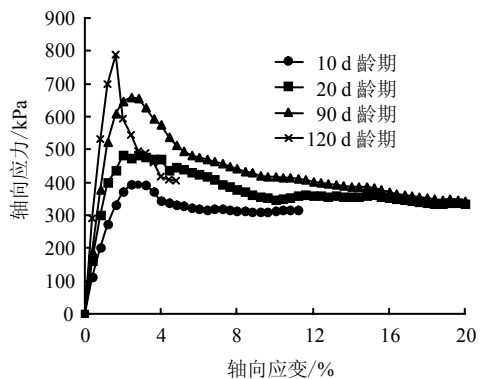
已有试验^[2]表明, 1 次浸水会降低其灰土的强度, 且其强度的下降随着龄期的增加而减小。这里把这种现象解释为: 由于灰土配制中灰和土搅拌得并不十分均匀, 浸水过程中灰土的相关反应如离子交换和固结反应所受影响不大仍然可以进行, 而碳酸化反应将会减弱, 胶结物不会减少, 只是减小其形成的速率, 即灰土有一定的水硬性。不过, 这时候含灰量较少的区域由于胶结物比较少, 甚至部分区域没有胶结, 加上水的浸泡, 其强度明显会变弱。而含灰量较多区域, 胶结反应充分, 强度得到提高。

这样灰土的局部差异性变得较大，强度受弱化区域控制，从而其强度反而下降。

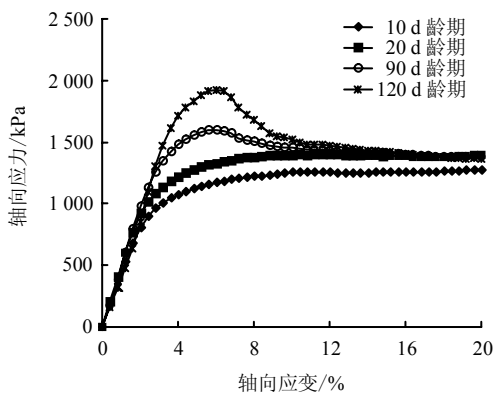
随着养护龄期的逐渐增长，灰土的含灰量少的部分胶结反应比较充分，而含灰量比较多的地方胶结反应的速率随着其反应的进行，土颗粒间越来越密实，水、离子、空气等的介入受阻，其增长速率反而降低。局部差异性减小，即使灰土这时浸水，其强度降低的比率较养护龄期较短的灰土低。



(a) 无围压

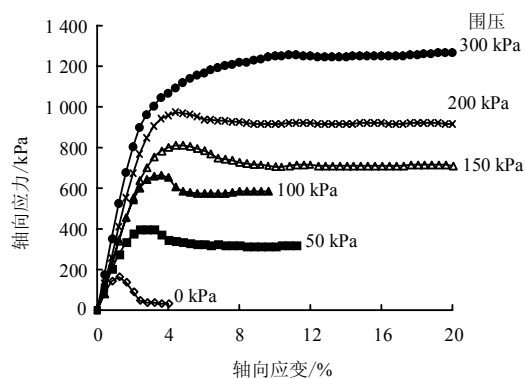


(b) 50 kPa 围压

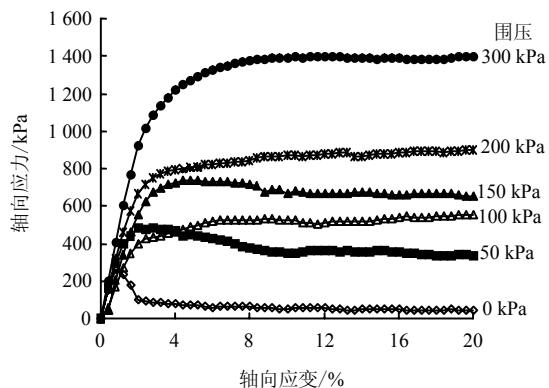


(c) 300 kPa 围压

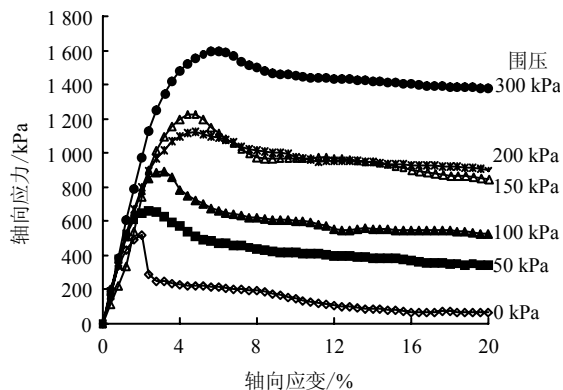
图 2 不同围压下的应力-应变曲线
Fig.2 The stress-strain curves at different confining pressures



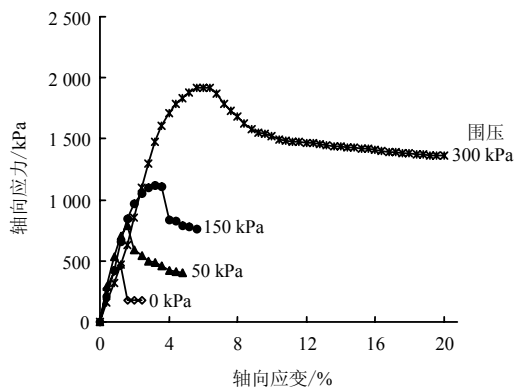
(a) 10 d 龄期



(b) 20 d 龄期



(c) 90 d 龄期



(d) 120 d 龄期

图 3 不同龄期下的应力-应变曲线
Fig.3 The stress-strain curves with different ages

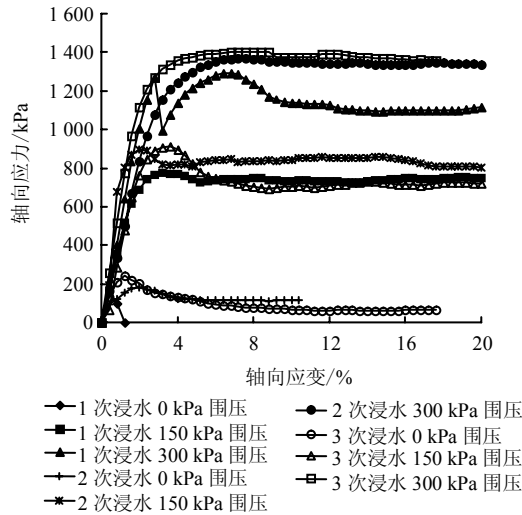


图4 龄期为90 d时各围压不同浸水次数(湿)情况下的应力-应变曲线
 Fig.4 The stress-strain curves at different confining pressures and different immersion times (wet) with 90-day curing age

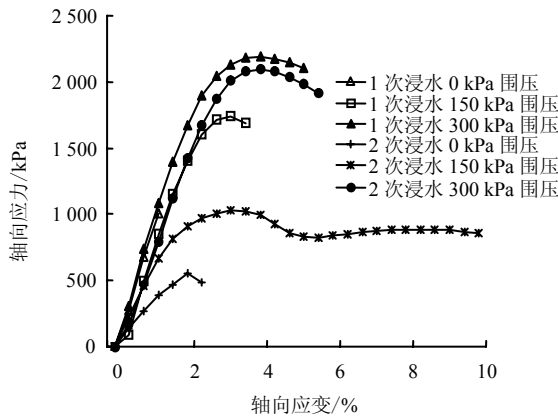


图5 龄期为90 d时各围压不同浸水次数(干)情况下的应力-应变曲线
 Fig.5 The stress-strain curves at different confining pressures and immersion times (dry) with 90-day curing age

浸水次数越多,必定会造成Ca²⁺和(OH)⁻的含量降低,使得离子交换减少,固结反应程度降低,碳酸化作用减少,即生成的胶结物减少。所以推测在过多浸水次数或过长浸水时间情况下灰土的强度增长速率应表现为先上升,然后缓慢下降的特点,强度会趋近于一个稳定水平,这时浸水对其强度的影响将不再明显。

根据本次试验结果,浸水后灰土的强度降低20%~50%,降低程度随围压增加而有所减少。

3.2 残余强度

现将0、50、300 kPa围压3种情况下不同龄期残余强度(取值为试样破坏后的轴向应力稳恒值)列于表2并将其绘于图6中。

表2 不同龄期各围压下的残余强度

Table 2 The residual strength at different confining pressures with different curing ages

围压 /kPa	不同龄期的残余强度/kPa			
	10 d	20 d	90 d	120 d
0	32	39	69	177
50	315	335	344	404
100	582	551	530	
150	713	650	735	765
200	913	898	903	
300	1 269	1 395	1 379	1 365

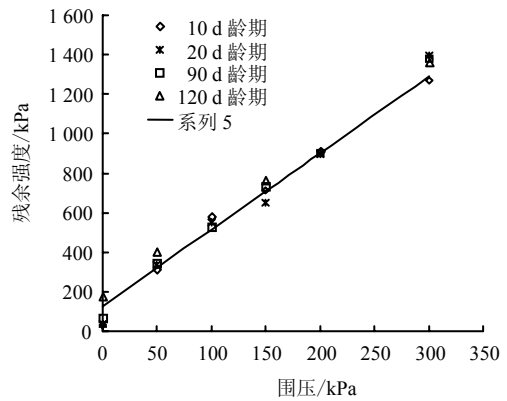


图6 各龄期残余强度-围压曲线
 Fig.6 The residual strength-confining pressure curve with different curing ages

图6表明,围压与残余强度呈线性关系,利用最小二乘法拟合表2中的数据得到残余强度σ_R与围压σ₃的线性关系:

$$\sigma_R = A\sigma_3 + B \quad (1)$$

计算得到: A = 3.87, B = 127.28, 相关系数 r = 0.983, R² = 0.966。这可解释为:围压的大小影响着土体破坏面的形成。而本试验过程中通过肉眼观察发现,土体开裂后开始进入残余应力阶段,试样碎裂成几个大的土体单元,之间相互作用。在这个状态中,几个大的土体块之间的相对滑动比较明显,称之为土体变形的“滑移阶段”,这时土块之间产生相对“滑移”,故各土块一直保持在土体破裂时的物理状态。

综上分析可以看出,龄期对残余强度的影响非常小,而灰土的龄期越长,其土颗粒之间的胶结程度越强,且胶结程度是灰土的物理力学性质的一个主要因素,说明这时灰土“残余强度”与灰土的结构组成的相关性不大,所以此时土体的强度主要是依靠土体块之间的“摩擦”产生的。这一现象类似于岩石^[5-8, 10-11],因灰土在峰值强度时出现碎裂现象,碎成块状,岩石在峰值强度也有碎裂现象,因此二

者的力学行为相似就成为必然了。

3.3 灰土脆断性的影响因素

刘友科等^[2]的研究表明, 无侧限情况下得出灰土具有很强的脆断性。本次试验发现不能简单地认为灰土就是一种脆断性材料: ①在有围压的情况下灰土的脆断性并不明显, 围压越大, 脆断性越不明显, (图 2)。②灰土的养护龄期越长, 脆断性越明显, (图 3)。③灰土的脆断性还与受压破坏时的含水率有关。从 90 d 龄期的灰土试样的试验可以看出, 干湿循环中含水率较低时, 即状态为“干”时(含水率为 7%)灰土有明显的脆断现象(图 5), 与相应龄期和浸水次数的试样相比, 含水率较高时, 即状态为“湿”时(含水率为 21%), 灰土的脆断现象减弱(图 4)。正常养护下的(含水率为 11%)试样(图 3(c)), 这时其脆性同样不明显。

灰土的脆断性在很大程度上取决于受压破坏时的含水率和围压, 本次试验结果说明, 90 d 龄期的 2:8 灰土的脆断性界限值低于 11%; 在围压为 0~50 kPa 范围内, 围压对其脆断性影响较为明显。

4 结 论

(1) 灰土的残余强度随围压的增大而增大呈线性关系, 其规律与岩石相近。据从试验过程中的观察, 残余强度与土体破坏时的破碎程度及破裂面上的摩擦相关。

(2) 灰土的干湿循环试验证明了灰土浸水后强度有所下降, 但随着浸水次数的增加其强度又有所回升, 最后稳定在某一值上, 但这一强度不大于未浸水的原始灰土强度, 这一现象对今后灰土的应用提供了新的应用思路。

(3) 从应力-应变曲线中可看出, 灰土是否具有脆性的影响因素主要是其含水率和围压, 含水率的影响较大。

参 考 文 献

- [1] 韩晓雷, 郅彬, 郭志勇. 灰土强度影响因素研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 667—669.
HAN Xiao-lei, ZHI Bing, GUO Zhi-yong. Research on the principal factors in strength of the lime-loess[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(5): 667—669.
- [2] 刘友科. 灰土强度影响因素及其本构关系的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004.
- [3] 王希玲. 灰土击实试验及其应用[J]. 西北建筑工程学院学报(自然科学版), 2002, 19(3): 18—21.
WANG Xi-ling. Study of compaction test of lime-soil and its use[J]. **Journal of Northwestern Institute of Architectural Engineering (Natural Sciences)**, 2002, 19(3): 18—21.
- [4] 董玉文, 张伯平, 唐林. 黄土灰土的击实性与抗剪性试验研究[J]. 西北水资源与水工程, 2001, 12(1): 62—64.
DONG Yu-wen, ZHANG Bo-ping, TANG Lin. Test about compaction and shearing properties of lime-loess[J]. **Water Resources & Water Engineering**, 2001, 12(1): 62—64.
- [5] 关文章. 湿陷性黄土工程性能新篇[M]. 陕西: 西安交大出版社, 1990.
- [6] 熊厚金, 林天健, 李宁. 岩土工程化学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [7] 杨志强, 郭见杨. 石灰处理土的物理力学性质及其微观机理的研究[J]. 岩土力学, 1991, 12(3): 11—22.
YANG Zhi-qiang, GUO Jian-yang. The physio-mechanical properties and micro-mechanism in lime-soil system[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1991, 12(3): 11—22.
- [8] 刘志刚. 灰土在建筑物软基处理中的应用[C]//第四届全国地基处理学术讨论会论文集. 杭州: 浙江大学出版社, 1995.
- [9] 林彤, 刘祖德. 粉煤灰与生石灰加固软土的室内试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 1049—1052.
LIN Tong, LIU Zu-de. Study on indoor tests of fly ash and quick lime improving soft soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(6): 1049—1052.
- [10] 卢允德, 葛修润. 大理岩常规三轴压缩全过程试验和本构方程的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 15(23): 406—411.
LU Yun-de, GE Xiu-run. Study on conventional triaxial compression test of complete process for marble and its constitutive equation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 15(23): 406—411.
- [11] 龙明庆, 勾攀峰. 岩样三轴压缩的对角破坏和残余承载力[J]. 矿山压力与顶板管理, 2002, (1): 98—99.