

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2020.01.013

## 石灰改良路基填料的动力特性试验研究

谭毓清, 彭成\*, 田宗坤

(南华大学 土木工程学院, 湖南 衡阳 421001)

**摘要:**利用 GDS 动三轴仪对石灰改良路基填料开展动三轴 UU 试验,以石灰掺量、围压及动应力幅值为变量,分析了石灰改良土的累积轴向应变及应力应变滞回特性的变化规律。试验结果表明:首级加载下,各土样的轴向变形随循环加载次数增加先增大后趋于稳定,素土变形最大,2 000 次振动后累积轴向应变接近 6%,各石灰改良土在 2 000 次振动后累积轴向应变低于 2%,其中  $L_c=6%$  约 0.57%;同一石灰掺量下,土体变形随动应力幅值增大而增大,随围压增大而减小;土样的应力应变滞回圈随围压增大越靠近竖轴,面积越大,抵抗变形能力变强,滞回圈随动应力幅值增大距离竖轴越远,抵抗变形能力越弱。

**关键词:**石灰改良土;累积轴向应变;动应力幅值;滞回圈;围压

**中图分类号:**U416.1 **文献标志码:**B **文章编号:**1673-0062(2020)01-0081-07

## Experimental Study of Dynamic Characteristics of Lime Modified Roadbed Filler

TAN Yuqing, PENG Cheng\*, TIAN Zongkun

(School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

**Abstract:** The dynamic triaxial UU test was carried out on the lime-improved soil by using the GDS dynamic triaxial apparatus, to analyze the variation rules of cumulative axial strain and stress-strain hysteresis characteristics of lime-improved soil by taking lime content, confining pressure and dynamic stress amplitude as variables. The test results show that the axial deformation of each soil sample first increased and then tended to be stable with the increase of cyclic loading times under the first stage of loading, the deformation of prime soil was the largest, with the cumulative axial strain of nearly 6% after 2 000 vibrations,

收稿日期:2019-10-29

基金项目:湖南省教育厅项目(16C1380);水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室开放基金项目(YK319008)

作者简介:谭毓清(1994-),女,硕士研究生,主要从事环境岩土方面的研究。E-mail:tanyuqing816@163.com。\*通信作者:彭成(1983-),男,讲师,博士,主要从事土石坝的数值模拟和本构模型方面的研究。E-mail:uscemonk@126.com

and that of each lime improved soil is less than 2% after 2 000 vibrations, while that of  $L_c=6\%$  is about 0.57%. With the same content of lime, the deformation of soil increases with the increase of dynamic stress amplitude and decreases with the increase of confining pressure. The stress-strain hysteresis cycle of soil samples gets closer to the vertical axis with the increase of confining pressure, and its area is bigger, and the resistance to deformation becomes stronger. The hysteresis cycle gets the further distance from the vertical axis, the weaker the resistance to deformation is.

**key words:** lime-improved soil; accumulated axial strain; dynamic stress amplitude; hysteresis loop; confining pressure

## 0 引言

随着我国经济的快速发展,各地公路路基地建设不断增多,随之也出现了较多的路基工程问题,如长期荷载作用下的路基不均匀沉降、路基路面开裂及冒浆等。石灰是一种具有较好经济性的建筑材料,对土具有固化稳定作用,常用于处理路基填土等,能有效提高土体的强度,改善路基工程变形问题。目前,国内外学者关于各种石灰改良土体的力学性能研究较多,并取得了许多有借鉴价值的研究成果。

应力应变特性方面,罗小艳<sup>[1]</sup>和战高峰<sup>[2]</sup>研究发现石灰改良土的应力应变关系曲线形式呈应变硬化型或应变软化型,且王天亮<sup>[3]</sup>研究发现围压对石灰改良土应力应变关系曲线形式影响不明显。不同环境方面,宋金华<sup>[4]</sup>对石灰改良路基填料在冻融循环下的动力特性进行了试验研究,试验发现素土和石灰改良土在不同条件下的破坏形式均是塑性破坏,且在冷却温度和动应力幅值相同的条件下,围压与破坏振次成反比。曹豪荣<sup>[5]</sup>对石灰改良红黏土在干湿循环下的路用性能进行了试验研究,发现石灰能显著提高土体的强度和变形参数,明显改善干湿循环下的路用性能。强度方面,也有学者针对石灰掺量对土体剪切模量<sup>[6]</sup>、无侧限抗压强度<sup>[7-9]</sup>、回弹模量<sup>[10-11]</sup>及阻尼比<sup>[12-13]</sup>等力学特性进行了研究,取得了丰富的成果。

但是,石灰改良不同土类效果各异,且目前石灰改良土大多集中在膨胀土<sup>[14-16]</sup>和盐渍土<sup>[17-19]</sup>等特殊土类,石灰改良粉质黏土的研究较少,对其动力特性的研究更是鲜有涉及。本文通过对石灰改良粉质黏土进行动三轴试验,研究不同石灰掺量及动应力幅值下改良土累积轴向应变和应力应变滞回圈等力学特性,具有重要的工程实际意义。

## 1 试验简介

### 1.1 试验材料

试验中的土料取自湖南某地公路路基填料场的粉质黏土,其主要物理性质指标见表1。掺和料为优质生石灰粉,其CaO质量百分比为83.41%,MgO质量百分比为2.53%,烧失量为14.06%。

表1 土的物理性能指标

Table 1 Physical property indices of soil

比重	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	最大干密度 /( $g \cdot cm^{-3}$ )	最优含水率 /%
2.72	34.0	20.0	14	1.75	19.5

### 1.2 试验设备

本试验采用GDS振动三轴仪,其主要由压力室、轴向加压设备、围压施加系统及计算机控制与分析系统所构成,其具体见图1。本试验选用轴向力精度0.2 N(荷重传感器2 kN),试验波形为单向正弦波,频率范围为0~2 Hz。

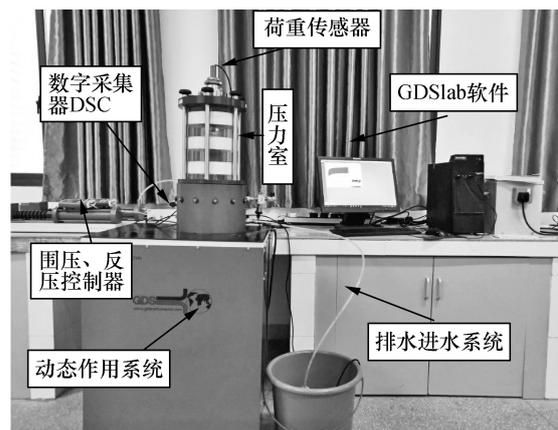


图1 GDS三轴仪控制系统

Fig. 1 GDS triaxial control system

1.3 试验方案

试验土料经捣碎与翻晒后过 2 mm 筛,参考现有的研究成果<sup>[3-4,20-21]</sup>,确定石灰体积掺量分别为 0%、3%、6%、9% 和 12%,并测出不同石灰掺量改良土的最优含水率,见表 2 所示。

表 2 石灰改良粉质黏土物理性质  
Table 2 Basic physical properties of lime-improved silty clay

石灰掺量 $L_c/\%$	最大干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	最优含水率/ $\%$
3	1.70	19.8
6	1.69	20.2
9	1.67	20.5
12	1.66	20.9

测出的不同石灰掺量改良土的最优含水率约均在 20% 左右,故将各配比下的土料在含水率为 20% 下拌合均匀并进行闷料 24 h,其后按压实度为 96% 在内径为 50 mm、高为 100 mm 的三瓣饱和器内分 4 层进行击实成型。试样制成后均采用塑料薄膜紧密包裹后密封,并在养护箱中养护 7 天后进行不固结不排水动三轴试验(UU)。其中,振动波波形采用正弦波,振动频率为 2 Hz,动应力幅值施加从 150 kPa 以 100 kPa 为增量等距逐级加载,直至试样破坏,破坏标准为累积轴向应变达到 10%,其中每级加载的循环次数为 2 000 次,围压分别取 50、100 及 150 kPa。其动三轴试验方案如表 3 所示,试样轴向荷载施加方法示意图如图 2 所示。

表 3 三轴试验方案  
Table 3 Plan of triaxial tests

动应力 增值/kPa	振动频率 $f/Hz$	循环次数 $N/次$	围压 $\sigma_3/kPa$	石灰掺量 $L_c/\%$
100	2	2 000	100	0,3,6,9,12
			50,100,150	6

2 累积轴向应变分析

累积轴向应变可以反映土体在动荷载作用下的变形特性。根据动三轴试验所得数据,分析了不同石灰掺量、围压及动应力幅值下的试样的累积轴向应变变化规律。

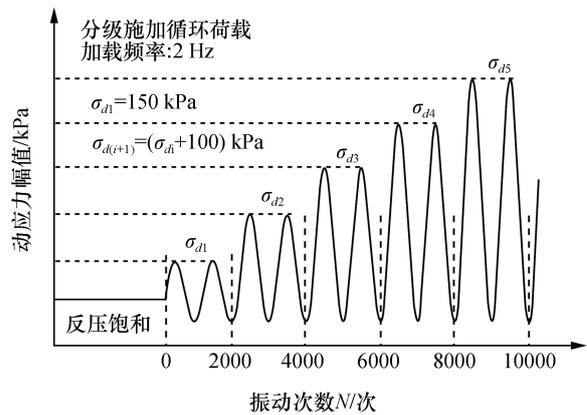


图 2 轴向荷载施加方法示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of exerting method of axial loading

2.1 石灰掺量对累积轴向应变的影响

图 3 表示石灰掺量对动力作用下累积轴向应变的影响( $\sigma_3 = 100$  kPa)。由图 3 可知,素土在第 2 级加载( $\sigma_{d2} = 250$  kPa)破坏,且第 2 级加载的轴向应变急剧增大,在 100 次循环内达到破坏(图 3(a));不同石灰掺量改良土均在第 4 级加载( $\sigma_{d4} = 450$  kPa)破坏,前 2 级加载的轴向应变变化幅度较小,后 2 级加载的轴向应变变化幅度较大,其中  $L_c = 12\%$  的改良土最先破坏, $L_c = 6\%$  的改良土最后破坏,其破坏先后顺序为: $L_c = 0\% \rightarrow L_c = 12\% \rightarrow L_c = 3\% \rightarrow L_c = 9\% \rightarrow L_c = 6\%$ ,说明  $L_c = 6\%$  的改良土抵抗变形能力最强。这是由于随着石灰含量的增加,土颗粒间生成的胶凝化合物增多,胶结能力增强,土体强度提高,当石灰含量达到一定值时,石灰与水土之间的反应完全,继续增加石灰量,石灰与水土之间的反应不充分,胶结能力会变弱,从而强度降低。

2.2 围压对累积轴向应变的影响

图 4 表示围压对动力作用下累积轴向应变的影响( $L_c = 6\%$ )。由图 4 可知,围压为 50 kPa 和 100 kPa 的土样在第 4 级加载( $\sigma_{d4} = 450$  kPa)破坏,围压为 150 kPa 的土样在第 5 级加载( $\sigma_{d5} = 550$  kPa)破坏。在第 4 级加载,围压为 50 kPa 的土样的轴向应变随振动次数增加而急剧增加,并在 100 次循环内破坏,而围压为 100 kPa 的土样循环次数达到 1 500 次后才破坏,且随着围压的增大,土样在同级加载下的累积轴向变形逐渐减小,说明高围压对土样的变形具有一定的抑制作用。

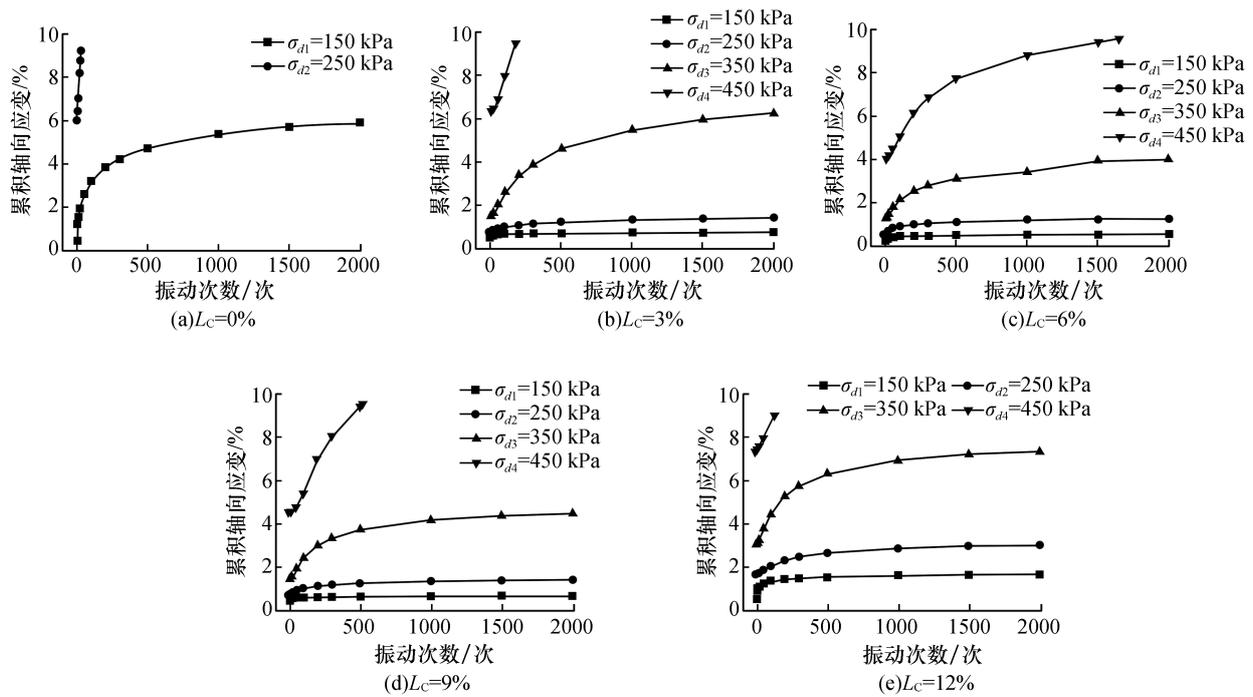


图3 不同石灰掺量下累积轴向应变与振动次数的关系图

Fig. 3 Relationship between cumulative axial strain and vibration times under different lime content

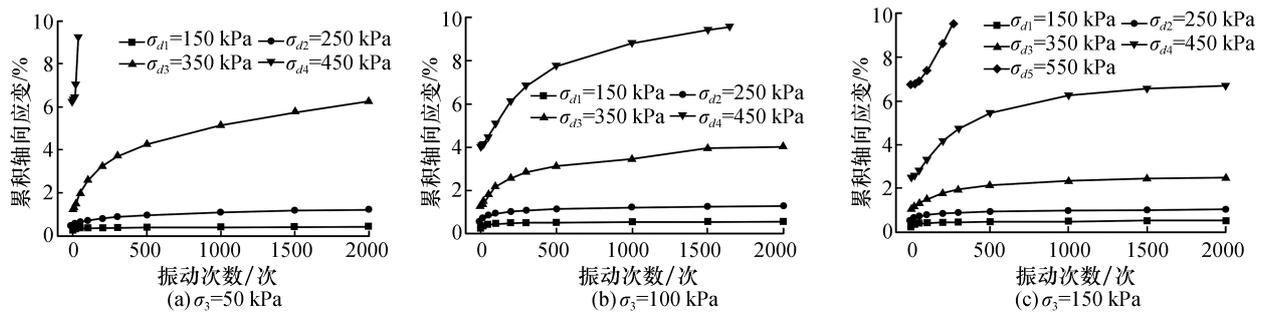


图4 不同围压下累积轴向应变与振动次数的关系图

Fig. 4 Relationship between cumulative axial strain and vibration times under different confining pressures

### 2.3 首级加载下累积轴向应变分析

图5表示首级加载下累积轴向应变与振动次数的关系曲线。由图5可知,随着循环加载次数增加,各土样的轴向变形呈先增大后趋于稳定的趋势,素土变形最大,2000次振动后轴向应变接近6%(图5(a)),各石灰改良土在2000次振动后轴向应变低于2%,改良效果明显。同一围压下,随着石灰掺量增大,土样的轴向变形先减小后增大,其中 $L_c = 6\%$ 的土样轴向变形最小,约0.57%(图5(a))。同一石灰掺量下,改良土样变形随着围压增大而减小,前100振次下,改良土样的变形呈直线增长,之后,随着振动次数增多各土样变形趋于稳定(图5(b))。

## 3 应力应变关系分析

动应力-动应变关系曲线可以反映土体的变形和强度特性。根据试验所得数据,绘制不同应力应变曲线,分析各影响因素下改良土的变形及强度特性。

### 3.1 改良土应力应变骨干曲线

为了获得改良土的应力应变骨干曲线,取每级加载第2000次振次的最大应力应变值(最后一级加载取最终破坏振次)绘制应力应变关系曲线,见图6所示。

图6(a)表示不同石灰掺量下的应力应变关系曲线,从图中可以看出,素土的应力水平明显低于石灰改良土的应力水平,且随着石灰掺量增大,

土样承受的应力水平能力呈先增大后减小的趋势,其中  $L_c=6\%$  的应力水平最高,且同一应力水平下的变形最小,说明  $L_c=6\%$  改良土强度最

大。图6(b)表示不同围压下的应力应变关系曲线,从图中可以看出,随着围压的增大,改良土的应力水平提高,抵抗塑性变形能力增强。

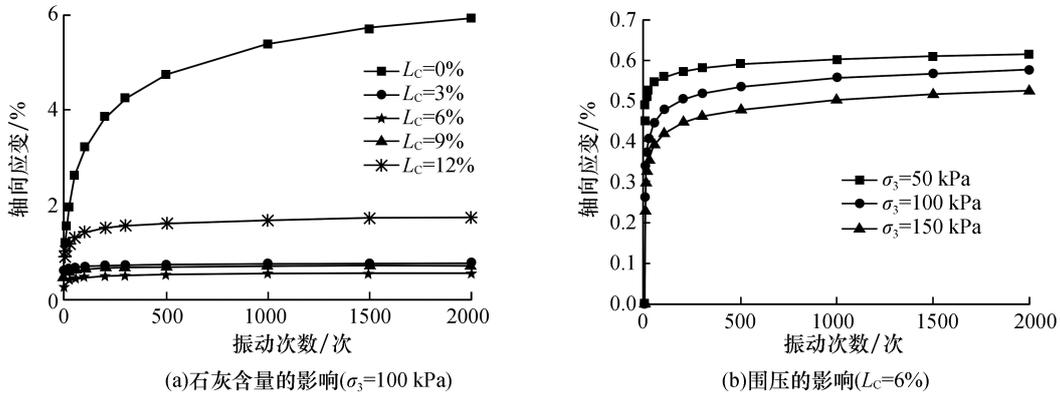


图5 首级加载下振动次数与应变关系

Fig. 5 Relationship between vibration times and strain under first stage loading

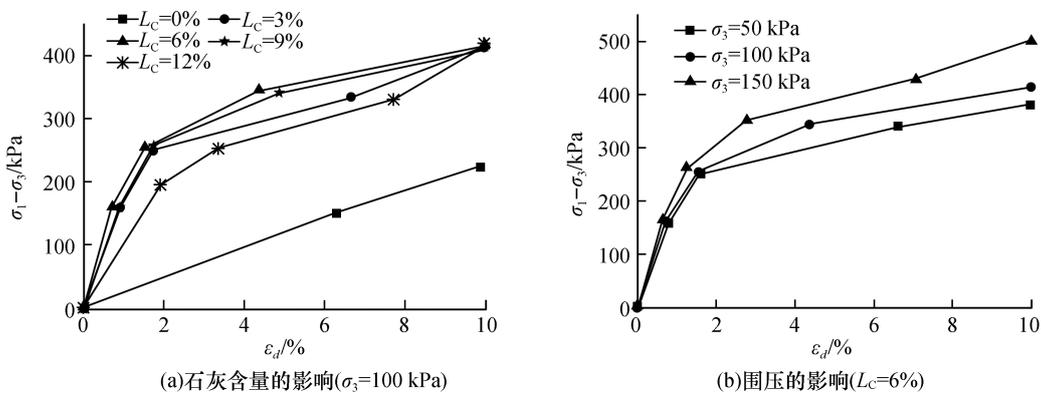


图6 动应力与动应变关系

Fig. 6 Relationship between dynamic stress and dynamic strain

3.2 滞回特性分析

为了更好地观察不同的石灰掺量、围压、振次和动应力幅值下应力应变滞回圈的变化规律,绘制出不同变量下的的滞回圈,如图7所示。

图7(a)表示不同石灰掺量下的滞回特性曲线( $\sigma_3=100\text{ kPa}$ ,  $N=2\ 000$ 次,  $\sigma_{dl}=150\text{ kPa}$ ),从图中可以看出,  $L_c=6\%$  的滞回圈比其他改良土滞回圈更饱满,面积更大,变形时内摩擦作用消耗的能量更大,抵抗变形能力更强,  $L_c=9\%$  的滞回圈次之,  $L_c=12\%$  的滞回圈变形时内摩擦作用消耗的能量最小。

图7(b)表示不同动应力幅值下的滞回特性曲线( $\sigma_3=100\text{ kPa}$ ,  $N=1\ 500$ 次,  $L_c=6\%$ ),从图中可以看出,随着动应力幅值增大,滞回圈之间的水平间距加大,滞回圈距离坐标轴越远,土体变形

越大。

图7(c)表示不同振动次数下的滞回特性曲线( $\sigma_3=100\text{ kPa}$ ,  $\sigma_{dl}=150\text{ kPa}$ ,  $L_c=3\%$ ),由图可知,滞回圈的面积随着振动次数的增加而增大,前1500次循环的变化明显,当振动次数超过1500次,滞回圈的形状几乎保持不变,试样的变形趋于稳定,这是由于土体中大量粘粒矿物成份及石灰中钙质发生化学反应形成较强的胶结作用,在循环荷载作用下,土体逐渐被挤密压实,当达到一定振动次数后,土体的变形趋于稳定。

图7(d)表示不同围压下的滞回特性曲线( $\sigma_{dl}=150\text{ kPa}$ ,  $N=2\ 000$ 次,  $L_c=6\%$ ),由图可知,随着围压增大,滞回圈越靠近纵坐标轴,其面积也逐渐增大,变形时内摩擦作用消耗的能量逐渐增大,抵抗变形能力逐渐变强,但总体上围压对改良土变形影

响并不显著,土体变形增减幅度约0.06%。

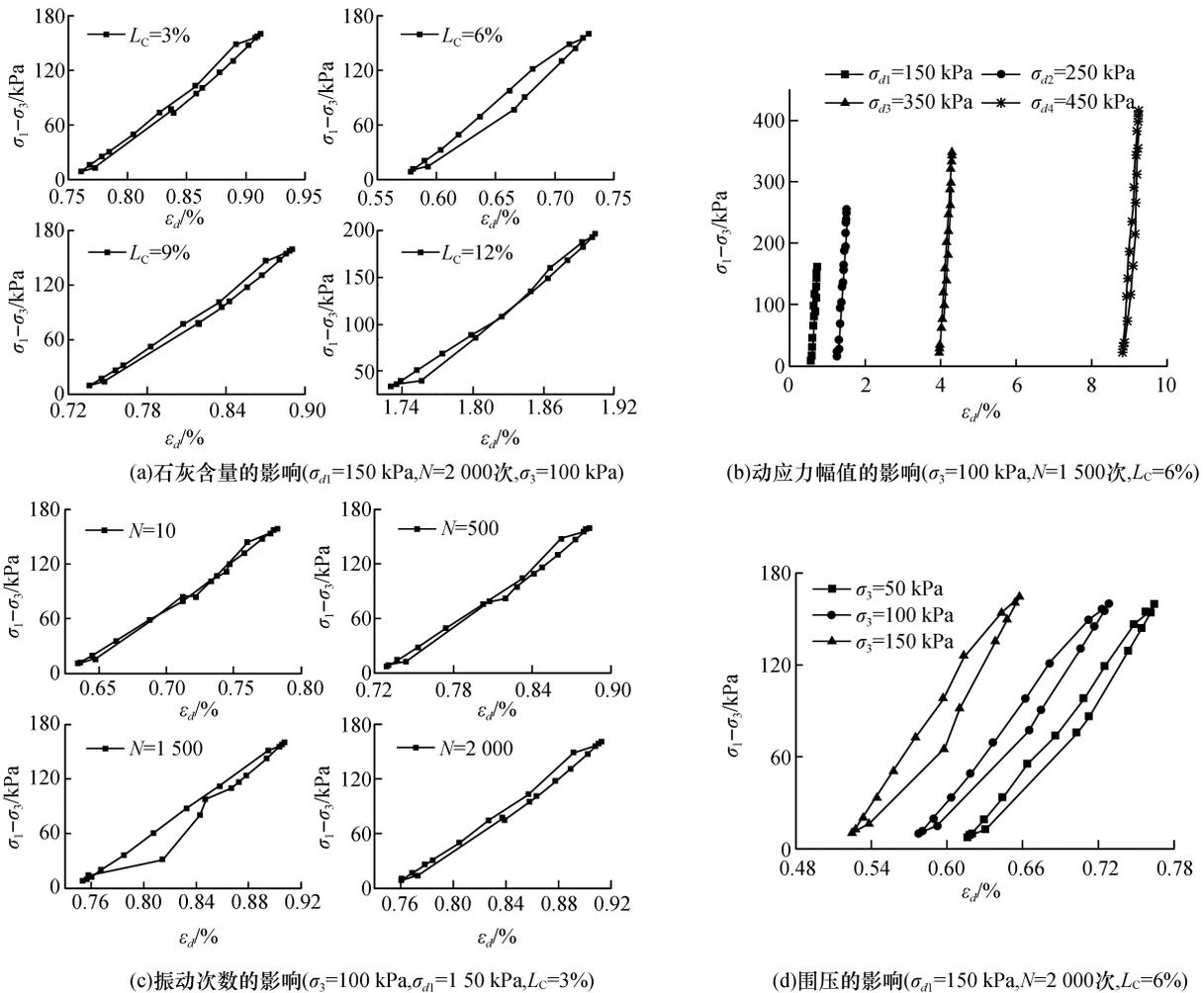


图7 应力应变滞回圈

Fig.7 Stress-strain hysteresis loop

## 4 结论

通过对石灰改良粉质黏土进行UU动三轴试验,并分析研究了石灰掺量、围压及动应力幅值等因素对试样的变形和滞回圈特性的影响,得出以下主要结论:

1) 石灰改良土  $L_c=6\%$  的抵抗塑性变形能力最强。

2) 首级加载下,各土样的轴向变形随循环加载次数增加先增大后趋于稳定,且素土变形最大,2000次振动后轴向应变接近6%,各石灰改良土在2000次振动后轴向应变低于2%,其中  $L_c=6\%$  约0.57%,改良效果明显。

3) 同一石灰掺量下,随动应力幅值增大,滞回圈之间的水平间距加大,滞回圈距离纵轴越远,

土体变形越大;随围压增大,滞回圈越靠近纵轴,其面积逐渐增大,抵抗变形能力逐渐变强,土体变形增减幅度约为0.06%。

## 参考文献:

- [1] 罗小艳,扶名福. 石灰改良土的非饱和土变形与强度特性试验[J]. 人民长江,2017,48(17):86-90.
- [2] 战高峰,张群,朱福,等. 冻融循环对石灰处置粉质黏土静强度影响研究[J]. 岩土力学,2015,36(增刊2):351-356.
- [3] 王天亮,刘建坤,田亚护. 水泥及石灰改良土冻融循环后的动力特性研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(11):1733-1737.
- [4] 宋金华,李博楠,王亮,等. 冻融循环作用下石灰改良土路基填料的动力特性研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(2):47-54;65.

- [5] 曹豪荣,李新明,樊友杰,等. 考虑干湿循环路径的石灰改性红黏土路用性能试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2619-2624.
- [6] CONSOLI N C, LUIZMAR D S L J, PRIETTO P D M, et al. Variables controlling stiffness and strength of lime-stabilized soils[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2011, 137: 628-632.
- [7] MCCARTHY J, CSETENYI L J, SACHDEVA A, et al. Engineering and durability properties of fly ash treated lime-stabilised sulphate-bearing soils[J]. Engineering geology, 2014, 174: 139-148.
- [8] 阮波,彭学先,马超,等. 玻璃纤维加筋石灰土无侧限抗压强度试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(9): 2246-2251.
- [9] MODARRES A, NOSOUDY Y M. Clay stabilization using coal waste and lime-Technical and environmental impacts [J]. Applied clay science, 2015, 116-117: 281-288.
- [10] 韩春鹏,何东坡,贾艳敏,等. 变温度区间冻融循环下石灰改良路基土回弹模量衰减规律及原因解析[J]. 公路, 2013(9): 14-18.
- [11] 邓长青,曾超. 控制 CBR 条件下路基化学改良土的动力特性研究[J]. 中外公路, 2018, 38(4): 253-258.
- [12] FAHOUM K, AGGOUR M S, AMINI F. Dynamic properties of cohesive soils treated with lime[J]. Journal of geotechnical engineering, 1996, 122(5): 382-389.
- [13] 张向东,曹启坤,潘宇. 二灰改良土动力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2560-2564.
- [14] BHUVANESHWARI S, ROBINSON R G, GANDHI S R. Behaviour of lime treated cured expansive soil composites[J]. Indian geotechnical journal, 2014, 44(3): 278-293.
- [15] 汪明武,秦帅,李健,等. 合肥石灰改良膨胀土的非饱和和强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊2): 4233-4238.
- [16] TONOZ M, GOKCEOGLU C, ULUSAY R. A laboratory-scale experimental investigation on the performance of lime columns in expansive Ankara (Turkey) Clay[J]. Bulletin of engineering geology and the environment, 2003, 62(2): 91-106.
- [17] LI M, CHAI S X, ZHANG H Y, et al. Feasibility of saline soil reinforced with treated wheat straw and lime [J]. Soils and foundations, 2012, 52(2): 228-238.
- [18] 文桃,米海珍,马连生,等. 石灰改良黄土状硫酸盐渍土强度的影响因素研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(2): 104-110.
- [19] 王勇,李国芬,黄凯健,等. 水泥/石灰对滨海盐渍路基土性能的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, 38(5): 165-169.
- [20] 余帆,黄煜镔,孙大权. 石灰土和水泥土的减水剂改性效果[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(2): 283-287; 309.
- [21] 庄心善,余晓彦. 石灰-玄武岩纤维改性膨胀土强度特性的试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊1): 166-170.

(责任编辑:扶文静)