

[文章编号] 1003-4684(2022)02-0070-05

粉煤灰改良膨胀土动弹性模量与阻尼比试验研究

孟 靖, 庄心善, 周睦凯, 周 荣

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 以合肥某高速公路膨胀土为研究对象,利用 GDS 真动三轴仪对不同粉煤灰掺量与不同围压条件下的改良膨胀土进行分级荷载动力试验,研究改良膨胀土动弹性模量与阻尼比的变化规律。结果表明:掺入粉煤灰可以显著提高膨胀土的动弹性模量,当掺灰率小于 10%时,改良土动弹性模量 E_d 及其峰值 E_{dmax} 随着掺灰率的增大而增大,当掺灰率大于 10%时,改良土 E_d 与 E_{dmax} 随着掺灰率的增大而减小;改良土阻尼比 λ 随着围压的增大而增大,每 50 kPa 能提高 5%~10%,但掺灰率对阻尼比无明显影响。

[关键词] 膨胀土;粉煤灰;动三轴试验;动弹性模量;阻尼比

[中图分类号] TU443 [文献标识码] A

膨胀土被称为世界工程中的“病症”,是一种主要成分为蒙脱石、伊利石与高岭石的粉质粘土。由于膨胀土广泛分布且易于采集,使其在建筑,铁路,高速交通道路等领域大量应用。此类土体由于具有吸水膨胀,失水收缩的特性,会在季节性地区引起较为明显的建筑物沉降与破坏。为了减少此类土体特性带来的损失,可以掺入掺料来改变土体的性质,改善土体内部构造,降低变形能力。国内外许多土力学者对膨胀土特性进行了大量的研究^[1-10],Hardin^[1]对膨胀土阻尼与剪切模量公式进行了定义,鄢黎明^[8]等向膨胀土中掺入粉煤灰进行改良,进行不同天数的养护,研究表明粉煤灰能有效抑制膨胀土的膨胀性,养护龄期与抗压强度呈乘幂关系。庄心善^[9]采用粉煤灰—玄武岩纤维改良膨胀土,得出玄武岩纤维在定量粉煤灰掺量下对膨胀土的影响规律,黄勇杰^[11]等采用风化砂对膨胀土进行改良,结论表明风化砂可以提升膨胀土的动弹性模量及阻尼比,毛成^[12]等采用石灰等改性膨胀土,对比在重复荷载与永久变形下素膨胀土与改性后土体动弹性模量与阻尼比变化,结论表明改性后土体各方面性能均有提升。

综上所述,目前对于改良膨胀土大多针对于改良后膨胀特性以及物理力学性能进行研究,但对粉煤灰改良土体动力特性研究甚少,因此,本文采用不同掺量粉煤灰对膨胀土进行改良,通过 GDS 真三轴仪对养护 7 天不同掺量的膨胀土进行分级加载荷载

来研究其动力特性,通过分析滞回曲线数据来计算土体动弹性模量、阻尼比等物理性质与土体动应变关系的作用规律。

1 试验简介

1.1 试验土体

膨胀土选用自安徽合肥某高速公路工程,呈浅褐色,根据国家标准及试验规范,自由膨胀率试验测得土样的自由膨胀率为 46%,塑性指数为 38,参考《膨胀土地区建筑基础规范》(GBJ112-87),定义此类膨胀土为弱膨胀土。具体参数如表 1 所示。

表 1 膨胀土物理性质

自由膨胀率 F_s / %	46
液限 W_L / %	68
塑限 W_p / %	30
最大干密度 ρ_d / (g · cm ⁻³)	1.7
最佳含水率 ρ / (g · cm ⁻³)	17%

1.2 试验材料

粉煤灰取自河南某新材料有限公司,检测具体成分含量为二氧化硅 45.1%,三氧化二铝 24.2%,含水量 0.85%,氯离子 0.015%,氧化钙 5.6%,烧失量为 2.8%,铁含量 0.85%,定义此类粉煤灰为 F 类粉煤灰。

1.3 试验仪器

试验仪器为 GDS 真动三轴仪(图 1),不同于传统三轴仪,该仪器中增加计算机控制与分析系统,实

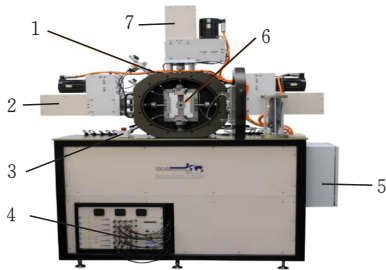
[收稿日期] 2021-04-25

[基金项目] 国家自然科学基金(51708190)

[第一作者] 孟 靖(1996-),男,湖北武汉人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为岩土工程

[通信作者] 庄心善(1964-),男,河南周口人,湖北工业大学教授,研究方向为岩土工程及边坡工程

现控制精度高且数字化操作的优点,使得测量系统能够精准向压力室施加轴向力、围压、反压,准确测量土体的孔压、轴向应力、形变量等并实时记录数据,通过 GDS 真动三轴仪可以开展饱和土或非饱和土的各种应力试验。



1—围压和反压传感器;2,7—作动器;3—荷重传感器;
4—安全制动按钮;5—电源箱;
6—可选 LVDT 或者高精度 proximity 升级

图 1 GDS 真动三轴仪

1.4 试样制备

根据《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)采用高 100 mm,直径为 50 mm 的规范圆柱体模具进行土样制备,以最佳含水率进行土样重塑;设置粉煤灰掺量^[7-8]分别为 0,5%,10%,15%,按表 2 方案制作,每组 4 个试样,3 组共 12 个,击实试样时分 5 层,按每层 2 cm 进行击实且每层土击实次数不低于 25 次,分层处凿毛刮平,制备完成后将试样静置 1 d,待粉煤灰颗粒与膨胀土充分反应,再将试样放入饱和器内抽气真空饱和 8 h 来排净重塑试样土体间隙的气体,并在标准温度恒温箱下养护 7 d。

表 2 试验方案

组别	围压 σ_3/kPa	粉煤灰掺 量/%	频率 f/Hz	动应力 幅值
1	50	0,5, 10,15	1	$10+19\times 10$
2	100	0,5, 10,15		
3	150	0,5, 10,15		

1.5 试验方案

根据现场勘查以及土体取样深度,确定试验围压为 50、100、150 kPa。将在标准环境下养护 7 d 的试样取出,装进 GDS 真三轴仪使用反压装置对土体进行饱和,待饱和度 S_r 达到 0.95 时,再按设计方案施加围压与轴压进行排水固结 7 h,待排水固结完成,采用频率 $f=1\text{ Hz}$ 的正弦波的应力幅值加载方式,如图 2 所示,其中 OA 为施加轴向力阶段,OB 为施加围压固结阶段,BC 为动力加载过程。正弦波加载公式如下:

$$\sigma_d = \sigma_s + \sigma_m \sin(2\pi ft)$$

(1)

式中: σ_d 为动应力值, σ_s 为起始动应力值, σ_m 为动应力幅值, f 为荷载频率, t 为加载时间,将动应力幅值从初始阶段分 20 级逐次加载,每级提高 10 kPa 动应力幅值,并循环振动 10 次,每振级取 10 圈滞回曲线,当轴向形变达到 5%时,视为土体破坏,但不中止试验,直至 20 阶段全部加载完成,具体试验方案如表 2 所示。

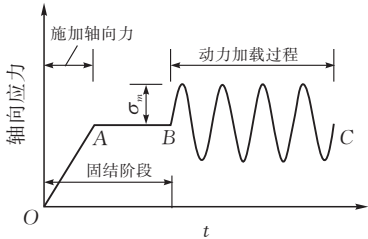


图 2 正弦波荷载加载方式

2 试验结果及分析

2.1 膨胀土动弹性模量变化规律

每个振级震动 10 次,获取 10 圈滞回曲线,每个振级中第 i 圈滞回曲线动弹性模量计算公式:

$$E_{di} = \frac{\sigma_{dimax} - \sigma_{dimin}}{\epsilon_{dimax} - \epsilon_{dimin}}$$

(2)

每个振级平均滞回曲线模量计算公式:

$$E_d = \frac{\sum_{i=1}^n E_{di}}{n} (n = 10)$$

(3)

式(2)中: E_{di} 为第 i 圈滞回曲线动弹性模量值, σ_{dimax} 为第 i 圈滞回曲线最大动应力, σ_{dimin} 为第 i 圈滞回曲线最小动应力, ϵ_{dimax} 为第 i 圈滞回曲线最大动应变, ϵ_{dimin} 为第 i 圈滞回曲线最大动应变。

分别获取十圈滞回曲线中各项动应力与动应变数据,计算对应动弹性模量,将十圈动弹性模量相加并取平均值以减小误差。计算公式如式(3)所示。计算土体动弹性模量并绘制出 $E_d-\epsilon_d$ 曲线。

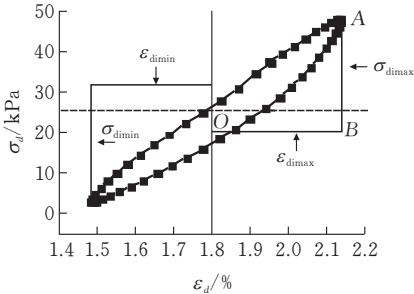


图 3 某一个周期动荷载产生的滞回曲线

由图 4 可知,在不同围压以及不同掺量的条件下,动弹性模量随着动应变皆呈现先急剧增大至一个峰值后再快速下降并逐渐趋于平缓的过程,当 $0.5\% < \epsilon_d < 1\%$ 时,土体主要处于弹性形变阶段,塑性形变较小,土体回弹性能良好,导致 E_d 急速增大

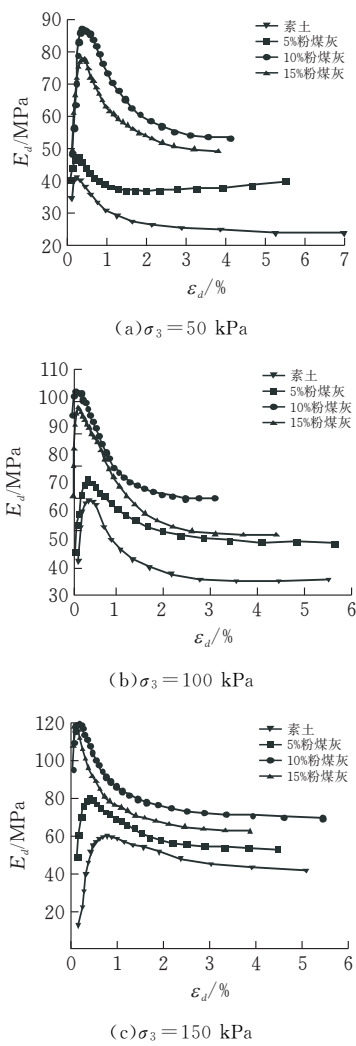


图4 动弹性模量-动应变曲线

并快速达到峰值,随着动应变增大,部分土体进入塑性变形阶段,引起土体抵抗变形能力减弱, E_d 快速减小,当 $3\% < \epsilon_d < 5\%$ 时, E_d 减小的速率降低并逐渐趋于平缓,该曲线走势说明土体发生应变硬化,改良土刚度提升。

由图4可得,在围压为50、100、150 kPa的情况下,10%掺灰率对比素土的 E_{dmax} 分别提升了110.4%、60.9%、79.6%,可见动弹性模量及峰值受围压影响明显。

由图4c可知,在150 kPa围压下,土体压缩已较为密实,改良膨胀土动弹性模量明显高于素土,10%掺灰率的 E_{dmax} 为119.5 MPa,相较于素土66.5 MPa提升了79.6%,但15%掺灰率的 E_{dmax} 为115 MPa,对比10%掺灰率 E_{dmax} 反而降低了3.9%,说明动弹性模量随着掺灰率的提高先增大后减小。在各项加载条件相同情况下,掺粉煤灰可以明显提高土体强度,但5%的掺灰率改良土由于包含离子成分明显不足,导致土体间的离子反应与颗粒胶结作用不够明显,所以低掺量的土体 E_d 值提升不显著。15%掺灰率的土体动弹性模量在各个围压下均

小于10%掺灰率土体,因为粉煤灰在微观下是许多空心球状颗粒^[12],过多的粉煤灰颗粒致使土体缺乏足够的水分子进行电离,抑制了土体内部的离子反应,多余粉煤灰颗粒在土体内部形成粉煤团状物,但粉煤灰本身强度较小,当受到外力荷载时,这些脆弱结构会先被破坏,进而降低试样动弹性模量,导致15%掺灰率土样的 E_d 小于10%的土样。

总结数据可知10%掺灰率膨胀土对动弹性模量提升效果优于15%掺灰率,根据本次试验结果可认为10%掺灰率为最佳掺量。

2.2 膨胀土阻尼比变化规律

膨胀土的阻尼比 λ 是指在周期性动荷载下衡量土体在振动下吸收能量的参数。

阻尼比 λ 为阻尼系数 C 与临界阻尼比系数 C_r 之比:

$$\lambda = \frac{C}{C_r} = \frac{1}{4\pi} \psi \tag{4}$$

其中,能量损失数 ψ 的公式为一次循环振级所消耗能量 ΔW 与该振级总能量 W 之比:

$$\psi = \frac{\Delta W}{W} \tag{5}$$

如图3所示,该振级所储存总能量 W 为滞回曲线最大动应力 σ_{dmax} 、最大动应变 ϵ_{dmax} 与原点所围成三角形OAB面积:

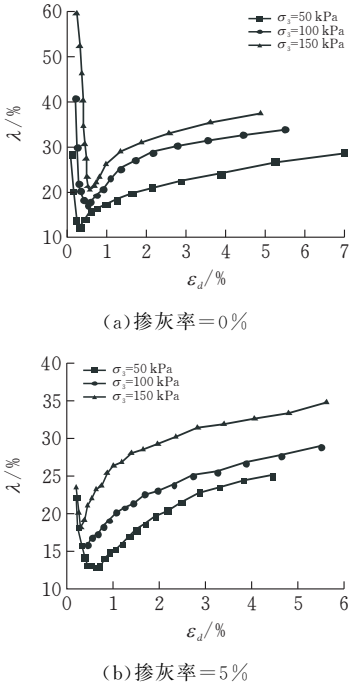
$$W = \frac{1}{2} \epsilon_{dmax} \sigma_{dmax} \tag{6}$$

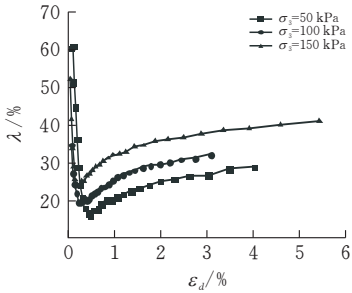
滞回曲线面积为一次循环荷载消耗能量 ΔW 。

阻尼比 λ 公式为:

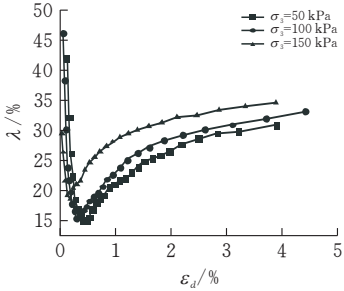
$$\lambda = (1/4\pi) \cdot (\Delta W/W) \tag{7}$$

取每个振级下第5~8圈滞回曲线计算,绘制同掺量下阻尼比-动应变曲线,如图5所示。





(c) 掺灰率=10%



(d) 掺灰率=15%

图 5 阻尼比-动应变曲线

由图 5 得知,在不同掺量与不同围压情况下, $\lambda-\epsilon_d$ 曲线与 $E_d-\epsilon_d$ 曲线呈现出完全相反的走势,在应变初期,由于土体尚处于弹性形变阶段,土体阻尼比值非常高,随着动应变增大先急剧减小然后逐渐增大后直至稳定。

通过对比不同掺量下阻尼比-动应变曲线走势,可以发现不同加载围压与不同掺量的土体均在 $0.5\% < \epsilon_d < 1\%$ 时取得 λ_{min} ,此时滞回曲线面积变化较大,每振级循环消耗能量不断加大,所以阻尼比变化幅度较大,在动应变范围为 $3\% < \epsilon_d < 5\%$ 时对应的滞回曲线面积数值相近,此时每循环振级所消耗能量几乎不变化,阻尼比值已趋于稳定。

相同掺量的土样阻尼比 λ 随着围压的增大而增大,围压每增大 50 kPa,阻尼比值提升 $5\% \sim 10\%$,因为随着围压增大,粉煤灰颗粒可以更加紧密的填满膨胀土体内的颗粒间隙,从而降低孔隙率,使土体结构密实,整体阻尼比值升高。

由图 5 总结可知, $\epsilon_d > 4\%$ 后,土体阻尼比值均已接近稳定值,围压为 50 kPa 时,所有试样的阻尼比值均处于 $20\% \sim 30\%$ 。在围压为 100 kPa 时,所有试样的阻尼比值均处于 $25\% \sim 35\%$,在围压为 150 kPa 时,所有试样的阻尼比值均处于 $35\% \sim 40\%$,可见粉煤灰掺量对阻尼比的影响不明显。

3 结论

在一定含水率和干密度的条件下,向膨胀土加入不同掺量的粉煤灰,使用 GDS 动三轴仪器对改良土进行动力特性试验研究,主要结论如下:

1) $E_d-\epsilon_d$ 曲线走势相似且具有明显规律性,随着应变增加,动弹性模量先急剧增长至一个峰值,随后快速下降,在 $\epsilon_d > 5\%$ 后曲线趋于平缓,证明土体具有“应变硬化”特点。

2) 动弹性模量在应变初期变化幅度较大, E_d 在范围为 $0.5\% < \epsilon_d < 1\%$ 时可取到峰值,证明改良土体在应变较小时具有优秀的抗形变能力。

3) 经粉煤灰改良土体的弹性模量与阻尼比较于素土有明显的提升,且在相同围压加载条件下, E_d 随着掺灰率的提升先增大后减小,根据本试验数据可认为 10% 掺灰率为最佳掺量。

4) 围压可显著提升膨胀土的阻尼比值,每增加 50 kPa 围压可提高 $5\% \sim 10\%$ 的膨胀土阻尼比值。

5) 围压条件相同情况下,粉煤灰掺量对阻尼比提升不明显,因此,粉煤灰掺量对 $\lambda-\epsilon_d$ 曲线没有明显影响。

[参 考 文 献]

[1] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils: design equation and curves[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1972, 98(7):667-692.

[2] DU Y, LI S, HAYASHI S. Swelling-shrinkage properties and soil improvement of compacted expansive soil, Ning-Liang Highway, Chin[J]. Engineering Geology, 1999, 53(3-4): 351-358

[3] 周葆春,孔令伟,郭爱国.石灰改良膨胀土的应力-应变-强度特征与本构描述[J].岩土力学,2012,33(4):999-1005.

[4] 查甫生,刘松玉,杜延军.石灰-粉煤灰改良膨胀土试验[J].东南大学学报(自然科学版),2007(2):339-344.

[5] 贾东亮,丁述理,杜海金,等.膨胀土工程性质的研究现状与展望[J].河北建筑科技学院学报,2003(1):33-39.

[6] 李生林,施斌,杜延军.中国膨胀土工程地质研究[J].自然杂志,1997(2):82-86.

[7] 毕海民,祁凤祥.粉煤灰混合聚丙烯纤维改良膨胀土性能试验研究[J].粉煤灰综合利用,2018(3):62-64.

[8] 鄢黎明.粉煤灰改良膨胀土强度及膨胀特性试验研究[J].陕西水利,2017(6):143-145+156.

[9] 庄心善,游鹏,周谈.粉煤灰-玄武岩纤维改良膨胀土试验研究[J].公路工程,2016,41(3):1-48.

[10] 杨俊,许威,张国栋,等.不同改良材料对膨胀土工程性能影响的对比试验[J].工业建筑,2014,44(2):89-93

[11] 黄勇杰,庄心善,赵汉文.风化砂改良膨胀土动弹性模量试验研究[J].价值工程,2020,39(15):220-221. DOI: 10.14018/j.cnki.cn13-1085/n.2020.15.096.

[12] 毛成,邱延峻.膨胀土与改性膨胀土的动力特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005(10):1783-1788.

An Experimental Study on Elastic Modulus and Damping Ratio of Expansive Soil Improved by Fly Ash

MENG Jing, ZHUNG Xinshan, ZHOU Mukai, ZHOU Rong

(School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

Abstract: Taking the expansive soil of a certain expressway in Hefei as the research object, using the GDS true dynamic triaxial instrument to carry out the graded load dynamic test of the improved expansive soil under different fly ash content and different confining pressure conditions, the dynamic elastic modulus and The changing law of damping ratio is studied. The results show that mixing fly ash can significantly increase the dynamic elastic modulus of expansive soil. When the ash mixing rate is less than 10%, the modified soil dynamic elastic modulus E_d and its peak E_{dmax} increase with the increase of the ash mixing rate. When the ash mixing rate is greater than 10%, the E_d and E_{dmax} of the modified soil decrease with the increase of the ash mixing rate; the damping ratio λ of the modified soil increases with the increase of the confining pressure, and it can increase by 5% every 50kPa~10%, but the ash mixing rate has no obvious effect on the damping ratio.

Keywords: expansive soil; fly ash; dynamic triaxial test; dynamic elastic modulus; damping ratio

[责任编辑: 裴 琴]

(上接第 64 页)

Optimization of High Cell Density Fermentation of Bacillus Subtilis

DAI Hang^{1,2,3}, DING Yue^{1,2,3}, CHEN Xiong^{1,2,3}, WANG Zhi^{1,2,3}

(1 Key Laboratory of Fermentation Engineering (Ministry of Education),

Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China;

2 Hubei Collaborative Innovation Center of Industrial Fermentation,

Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China;

3 Hubei Key Laboratory of Industrial Microbiology, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

Abstract: The industrial production of animal probiotics Bacillus subtilis suffers from problems such as long fermentation cycle, high cost, and unstable spore rate. The effects of different fermentation strategies on the growth efficiency of Bacillus subtilis were studied at the level of 30 L tanks, and the optimal medium and fermentation conditions were determined: corn starch $35\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, soybean meal $40\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, glucose $5\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, yeast extract $3\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, peptone $8\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, light calcium carbonate $3\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, magnesium sulfate heptahydrate $0.5\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, sodium chloride $2\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, dipotassium hydrogen phosphate trihydrate $2\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, manganese sulfate monohydrate $0.3\text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, fermentation temperature increased from 35°C to 40°C for 24 h, biomass (36 h) reached $217 \times 10^8\text{ CFU/mL}$, the number of spores was 20.8 billion/mL, which were increased by 28.4% and 31.6% respectively compared with before optimization, which provided an important reference for the rate of stable spores in the industrial production of Bacillus subtilis.

Keywords: bacillus subtilis; spore; fermentation optimization; high cell density fermentation

[责任编辑: 张 众]