

粉煤灰掺入量对改性黄土动本构关系的影响

王峻^{1, 2, 3}, 王谦^{1, 2, 3}, 王平^{1, 2, 3}, 钟秀梅^{1, 2, 3}, 柴少峰^{1, 2, 3}

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国地震局黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

3. 甘肃省岩土防灾工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 通过重塑非饱和试件的动三轴试验, 开展了粉煤灰改性黄土的动力特性研究。探讨了动荷载作用下粉煤灰改性黄土的动应力-动应变关系, 考察了粉煤灰掺入量对改性黄土动本构关系、动弹性模量和阻尼比的影响。研究结果表明, 对应于不同粉煤灰掺入量的改性黄土其动本构关系均服从双曲线模型, 但试验参数 a 、 b 均随粉煤灰掺入量的增大而减小。动弹性模量随着粉煤灰掺入量的增加而增加, 而阻尼比明显减小。粉煤灰改性黄土的最佳粉煤灰含量在 15%~20% 之间。

关键词: 粉煤灰; 黄土; 动三轴试验; 动本构关系; 动弹性模量

中图分类号: TU411.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)S1-0156-05

作者简介: 王峻(1957-), 男, 河南汤阴人, 高级工程师, 主要从事工程地震和黄土动力学研究工作。E-mail: wangjunlz@163.com。

Effect of adding amount of fly ash on dynamic constitutive relationship of modified loess

WANG Jun^{1, 2, 3}, WANG Qian^{1, 2, 3}, WANG Ping^{1, 2, 3}, ZHONG Xiu-mei^{1, 2, 3}, CHAI Shao-feng^{1, 2, 3}

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China; 2. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, CEA, Lanzhou

730000, China; 3. Geotechnical Disaster Prevention Engineering Technology Research Center of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the dynamic triaxial tests on disturbed unsaturated samples, a study on the dynamic characteristics of modified fly ash loess is carried out. The dynamic stress-strain relationship of fly ash loess under loading function is discussed. The influence of adding amount of fly ash on the dynamic constitutive relationship, dynamic modulus of elasticity and damping ratio of the modified loess is analyzed. The results show that the dynamic constitutive relationship of the modified loess with different adding amounts of fly ash obeys the hyperbolic equation. The test constants a and b decrease with the increase of the adding amount of fly ash. The dynamic modulus of elasticity increases with the increase of fly ash amount, but the damping ratio noticeably reduces. The optimal content of fly ash of the fly ash-modified loess is 15%~20%.

Key words: fly ash; loess; dynamic triaxial test; dynamic constitutive relationship; dynamic modulus of elasticity

0 引言

黄土是具大孔性的弱粘结的特殊土类, 以粉粒为主, 矿物亲水性较弱, 粒度细而均一, 联接虽较强但不抗水; 未经很好压实, 结构疏松多孔, 大孔性明显, 虽经压实, 但有时还是不能满足工程需要。因此工程中常用掺入水泥、石灰、粉煤灰等作为地基的一种处理方法, 越来越广泛地应用于工程实践中。以往对粉煤灰等改性土的研究基本为静力学特性试验, 这些方面已经有许多专家学者进行了研究^[1-8]。然而, 在更多情况下是由于地震、车辆和机械等振动, 使土体将产生动应力和变形, 并附加于静应力和变形之上, 使土体或路基趋于极限状态。由此可见, 在动荷载作用下土体的稳定性和变形是个需要进一步研究的问题。从

以往的研究成果可以看出, 有关粉煤灰改性黄土的动力学研究则不多见, 这对黄土地区公路等交通设施的地震安全是不利的。因此开展粉煤灰改性黄土的动力学研究, 为黄土地区公路等路基工程的地震变形分析和抗震稳定性分析提供合理可靠的基本参数是十分必要的。它能够对公路等路基填料的选择和应用提供科学的指导和重要的参考建议。

土的动应力-动应变关系或称动本构关系, 是表征土动态力学特性的基本关系, 也是分析土体动力失

基金项目: 甘肃省地震局地震科技发展基金项目(2012S01); 国家自然科学基金项目(50978239); 中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项项目(2012IESLZ07)

收稿日期: 2013-03-02

稳过程一系列特性的重要基础。而土的动弹性模量和阻尼比是土动力学特性的首要参数, 地基地震反应分析中必备的两个重要参数, 也是场地地震安全性评价中必不可少的内容, 同时也是地震等动荷载作用下土工建筑物设计和计算所必需的基本依据。这两个参数的选择是否合理, 将直接影响到工程结构的安全性和经济性。因此, 为了满足工程建设抗震设计的需要, 研究粉煤灰改性黄土的动力性质是非常必要的, 它与黄土地区的工程建设有着密切的关系, 对于减轻地震灾害具有重要的意义。本文以粉煤灰改性黄土为研究对象, 通过重塑非饱和试件的动三轴试验, 探讨了粉煤灰改性黄土的动本构关系, 考察了粉煤灰掺入量对黄土动弹性模量和阻尼比的影响。

1 试验概述

1.1 土样、粉煤灰的各项性质指标

试验所用土样取自甘肃省临夏县东北部的黄土塬上, 取样深度4 m, 属Q₃黄土。据室内土工试验, 黄土的物理性质指标: 天然含水率=12.6%, 天然密度=1.38 g/cm³, 天然干密度=1.23 g/cm³, 天然孔隙比=1.195, 比重=2.70, 塑性指数=9.2, 颗粒组成, 黏粒为18.5%, 粉粒为74.0%, 砂粒为7.5%。

试验所用粉煤灰取自国电兰州热电有限责任公司, 化学成分: SiO₂含量为52.04%, Al₂O₃含量为20.22%, CaO含量为5.47%, MgO含量为12.57%, SO₃含量为0.45%, Fe₂O₃含量为4.19%, 物理性质: 细度(80 μm筛余)为23.2%, 烧失量4.93%, 堆积密度为0.802 g/cm³, 含水率为2.5%。

1.2 土样制备

在黄土中分别掺入占黄土质量5%, 10%, 15%, 20%, 25%的粉煤灰。首先将粉煤灰与干土按比例均匀混合后, 然后按照试验方案中所需的含水率(16.00%)调配成湿土, 搅拌均匀后闷料24 h, 待其内部水分分布均匀后, 利用土工试样制备仪将闷料处理的土料分3层击实。最后将土样制成直径为50 mm, 高为100 mm的圆柱形试样, 养护龄期3 d。试样物性参数见表1。

表 1 试样的物理性质指标

Table 1 Physical properties of samples

粉煤灰 掺入量/%	含水率 <i>w</i> /%	密度 <i>ρ</i> /(g·cm ⁻³)	干密度 <i>ρ_d</i> /(g·cm ⁻³)
5	16.51	1.67	1.43
10	16.27	1.66	1.43
15	16.01	1.65	1.42
20	16.24	1.66	1.43
25	16.12	1.65	1.42

1.3 试验仪器及方法

试验采用DSD—160型电磁式振动三轴试验系统,

参照《土工试验规程》SL237—1999 中振动三轴试验进行操作。

试验在固结不排水条件下进行。在静压力σ_{1C}(轴向压力)和σ_{3C}(侧向压力)下固结。根据土性, 土样轴向压力按1.0 kg/cm²施加, 侧向固结压力σ_{3C}=K₀σ_{1C}, 侧压力系数K₀为0.59。待固结稳定后, 向试样的轴向逐级由小到大施加动应力, 每级动应力的振次为10次, 这样直到试样产生较大变形为止。在试验过程中固结压力保持不变。模拟地震动荷载作用确定如下: 在上述固结压力状态下开始施加轴向振动荷载, 振动波形为正弦波, 频率为1 Hz, 振幅随试样性质确定。

2 粉煤灰改性黄土的试验结果及分析

2.1 粉煤灰改性黄土的动本构关系

根据动弹性模量试验记录的动应力σ_d-动应变ε_d时程, 可得到不同掺合比的粉煤灰改性黄土的动应力-动应变曲线, 见图1。根据动弹性模量E_d=σ_d/ε_d, 还可做出1/E_d-ε_d曲线和E_d-ε_d曲线, 图2为不同掺合比的粉煤灰改性黄土的1/E_d-ε_d关系曲线。由图1、2可以明显看出, 不同掺合比的粉煤灰改性黄土的1/E_d-ε_d关系较为一致, 可用下式表示^[9-10]:

$$\frac{\varepsilon_d}{\sigma_d} = \frac{1}{E_d} = a + b\varepsilon_d \quad , \quad (1)$$

式中, ε_d为轴向动应变, σ_d为轴向动应力, *a*, *b*为试验参数。由式(1)可得

$$\sigma_d = \frac{\varepsilon_d}{a + b\varepsilon_d} \quad . \quad (2)$$

式(1)表明 1/E_d-ε_d关系为线性关系。对不同掺合比的粉煤灰改性黄土的 1/E_d-ε_d关系进行了计算拟合, 将*a*, *b*值列于表2中。由表2可见, 1/E_d-ε_d之间呈线性相关。由图2、表2可知, 粉煤灰改性黄土的动应力-动应变关系符合式(2)所示的双曲线模型。

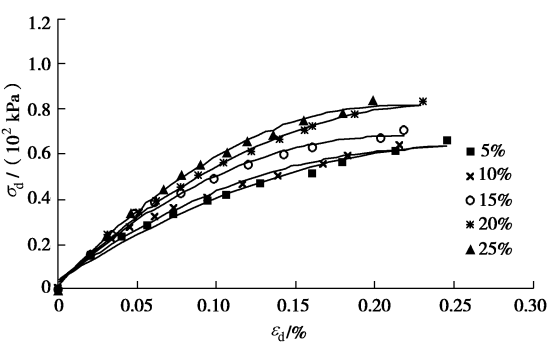


图 1 粉煤灰改性黄土的动应变 - 动应力关系曲线
Fig. 1 Dynamic strain-stress curves of fly ash-modified loess

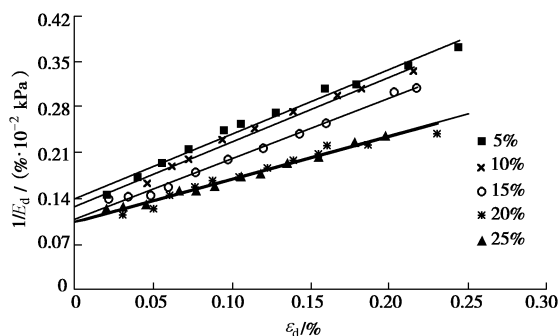


图2 粉煤灰改性黄土的动应变-动弹模倒数拟合曲线

Fig. 2 Fitting curves of dynamic strain-elasticity modulus of fly ash-modified loess

表2 粉煤灰改性黄土的 a 值和 b 值Table 2 Values of a and b of fly ash-modified loess

粉煤灰掺入量 $m/\%$	观测次数 n	a $/ (10^{-3})$	b	相关系数 r
5	11	1.320	1.091	0.9919
10	11	1.214	1.044	0.9923
15	11	1.082	0.928	0.9962
20	11	1.081	0.726	0.9977
25	11	1.069	0.632	0.9932

2.2 试验常数 a , b 随粉煤灰掺入量 m 的变化

如图2所示, 不同掺合比的粉煤灰改性黄土的 $1/E_d - \epsilon_d$ 关系均可用一条直线来较好地拟合, 且直线在 $1/E_d$ 轴上的截距 a 和斜率 b 均随粉煤灰掺入量 m 的增大而减小, 见表2。由表2可得 a , b 与 m 有如下关系:

$$a = (1.5849 - 0.1682 \ln m) \cdot 10^{-3} \quad (r = 0.9667), \quad (3)$$

$$b = 1.255 - 0.0247m \quad (r = 0.9807), \quad (4)$$

式中, m 为粉煤灰掺入量, r 为相关系数。

根据动弹性模量试验原理, a , b 值的主要影响因素是土性参数和动荷载的基本要素, 即振幅、频率、持续时间(或振次) 及波型的变化。

由于试验方法相同, 根据动弹性模量 $E_d = \sigma_d / \epsilon_d$, E_d 反映的是产生单位应变所需的动应力, $1/E_d$ 则是单位动应力所产生的应变, 据此可消除动荷载振幅对 a , b 值的影响。本文试验中各级动荷载均取振动次数 $N=5$ 次时的 σ_d 及相应的 ϵ_d 值。因此对于不同掺合比的粉煤灰改性黄土的 a , b 值, 振次是相同的。试验所施加动荷载均为等幅正弦波, 波型无变化。

上述分析表明, 在粉煤灰改性黄土动弹性模量试验中, 试验参数 a , b 的变化主要是由于粉煤灰掺入量不同所致。式 (3)、(4) 也表明, a , b 值与粉煤灰掺入量 m 存在着密切的相关关系。

2.3 粉煤灰掺入量 m 对动弹性模量的影响

图3为粉煤灰改性黄土试样的动弹性模量 E_d - 动

应变 ϵ_d 拟合曲线, 由图3可见, 动弹性模量 E_d 在不同粉煤灰掺入量条件下的变化趋势基本相同, 随轴向动应力 σ_d 的逐级加载, 轴向动应变 ϵ_d 逐渐增大, 而动弹性模量 E_d 相应减小, 起初衰减较快, 随 ϵ_d 的不断增大, 这种衰减趋势逐渐变缓, 动弹性模量随动应变幅值的增大而非线性地降低。对应于同一轴向动应变 ϵ_d , E_d 随粉煤灰掺入量的增高而增大。对应同一动弹性模量 E_d , 粉煤灰掺入量越高, 动应变 ϵ_d 越大。经研究认为^[11-12], 粉煤灰与黄土混合后, 在一定含水率条件下与土体相互作用, 粉煤灰中诸如钙硅或钙铝等氧化物与水反应, 生成了一种胶结物, 而正是这种胶结物使土与粉煤灰混合物的强度得到了增强。这可能就是由于粉煤灰掺入量越高, 粉煤灰改性黄土的动弹性模量增大的缘故。

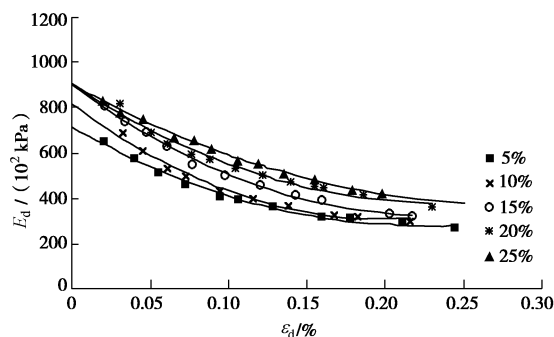


图3 粉煤灰改性黄土的动应变-动弹性模量拟合曲线

Fig. 3 Fitting curves of dynamic strain-elasticity modulus of fly ash-modified loess

从以上分析可以看出, 粉煤灰改性黄土的动弹性模量随粉煤灰掺入量的增加而增大。为了对比分析, 将不同粉煤灰掺入量黄土的初始动弹性模量 E_0 绘于图4中。由图4可知, 粉煤灰掺入量的大小对粉煤灰改性黄土的初始动弹性模量 E_0 影响明显, 粉煤灰掺入量越高, 初始动弹性模量 E_0 越大, 对同一动应变 ϵ_d 随着粉煤灰掺入量的增高, 动弹性模量 E_d 也呈增加趋势。黄土动力学研究表明^[13], 在相同固结压力下动弹性模量的大小本身就反映了土的地耐力的大小和抗震性能的好坏, 动弹性模量大说明土的承载力和抗震性能是比较好的。

从图4还可看出, 粉煤灰改性黄土的初始动弹性模量存在一最佳剂量, 当剂量达到某一数值后, 继续增加粉煤灰, 混合料的初始动弹性模量变化不大。另外, 当黄土中掺入15%的粉煤灰后, 初始动弹性模量提高不大, 从而说明粉煤灰改性黄土的最佳粉煤灰含量在15%~20%之间。

2.4 粉煤灰掺入量 m 对阻尼比 D 的影响

土的阻尼比反映在周期性动荷载作用下, 动应力-动应变关系滞回圈表现的滞后性。它是由土体变形

时摩擦作用消耗能量造成的, 反映动荷载作用下能量因土的内部阻力而损失的性质, 是土动力特性的一个重要参数。

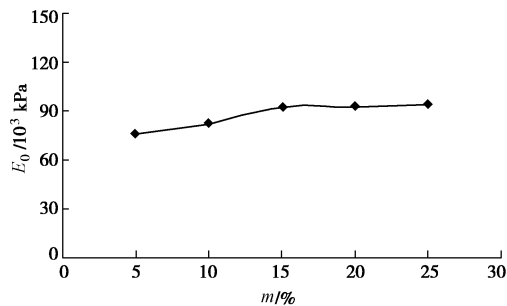


图 4 粉煤灰改性黄土的初始动弹性模量 E_0 随粉煤灰掺入量 m 变化曲线

Fig. 4 Variation of initial dynamic modulus of elasticity of fly ash-modified loess with adding amount of fly ash

本次土样的动应变 ε_d 与阻尼比 D 的关系曲线见图 5。由图 5 可知, 粉煤灰改性黄土的阻尼比均随动应变的增加而增大, 但粉煤灰掺入量不同阻尼比增加趋势差异较明显, 粉煤灰掺入量少时增加趋势较为迅速, 粉煤灰掺入量多时增加趋势较为平缓。随粉煤灰掺入量的增加, 对应同一动应变, 粉煤灰改性黄土的阻尼比呈明显减小的趋势。

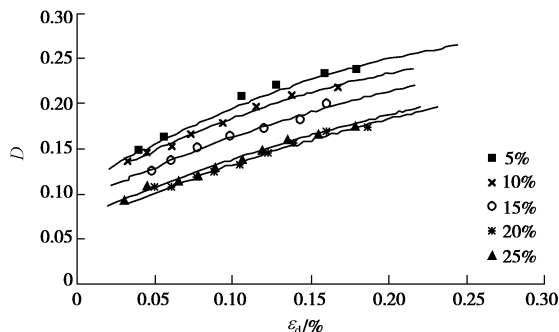


图 5 粉煤灰改性黄土的动应变 - 阻尼比关系曲线

Fig. 5 Curves of dynamic strain-damping ratio of fly ash-modified loess

上述结果表明, 粉煤灰掺入量对改性黄土的阻尼比具有较大影响, 阻尼比随粉煤灰掺入量的增加而减小, 其原因可能是由于粉煤灰掺入量所造成的。粉煤灰掺入量越高, 土体强度增大, 阻尼比减小。

3 结 论

(1) 不同粉煤灰掺入量 (5%, 10%, 15%, 20%, 25%) 条件下, 粉煤灰改性黄土的动本构关系均服从双曲线模型, 但试验常数 a , b 均随粉煤灰掺入量的增大而减小。

(2) 随粉煤灰掺入量的增大, 对应于同一动应变

ε_d , 动弹性模量 E_d 增加, 而粉煤灰改性黄土的阻尼比 D 明显减小。

(3) 粉煤灰掺入量的大小对粉煤灰改性黄土的动弹性模量影响明显, 粉煤灰改性黄土的最佳粉煤灰含量在 15%~20% 之间。

参考文献:

- [1] 杨广庆, 管振祥. 高速铁路路基改良填料的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(6): 682 - 685. (YANG Guang-qing, GUAN Zhen-xiang. Experimental study on improved soil for high-speed railway subgrade[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(6): 682 - 685. (in Chinese))
- [2] 严耿升, 张虎元, 赵天宇. 改性黄土内摩擦角变化研究[J]. 粉煤灰, 2009(4): 14 - 17. (YAN Geng-sheng, ZHANG Hu-yuan, ZHAO Tian-yu. Study of change of modified loess f internal friction angle[J]. Coal Ash, 2009(4): 14 - 17. (in Chinese))
- [3] 郭婷婷, 张伯平, 田志高, 等. 黄土二灰土工程特性研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(5): 719 - 721. (GUO Tin-tin, ZHANG Bai-ping, TIAN Zhi-gao, et al. Study on engineering characteristic of lime-fly ash loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(5): 719 - 721. (in Chinese))
- [4] 李凤起, 姚建平, 赵冬生, 等. 黄土湿陷性与黄土粉煤灰石灰混合料试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2005, 21(2): 111 - 113. (LI Feng-qi, YAO Jian-ping, ZHAO Dong-sheng, et al. The experimental study of loess collapsibility and mixture of fly ash of loess and lime[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science), 2005, 21(2): 111 - 113. (in Chinese))
- [5] 夏 琼, 杨有海, 耿 焱. 粉煤灰与石灰、水泥改良黄土填料的试验研究[J]. 兰州交通大学学报, 2008, 27(3): 40 - 43. (XIA Qiong YANG You-hai, GENG Xuan. Experimental study on fly ash-lime or fly ash-cement loess filling[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2008, 27(3): 40 - 43. (in Chinese))
- [6] 李志清, 余文龙, 范林峰, 等. 改良黄土强度特性与工程处置试验研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(1): 116 - 121. (LI Zhi-qing, YU Wen-long, FAN Lin-feng, et al. Experimental research on strength characteristics and engineering treatment of improved loess soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(1): 116 - 121. (in Chinese))
- [7] 高春华, 李 娜, 张庆伟. 粉煤灰改性膨胀土与膨胀土抗

- 剪强度比较研究[J]. 建筑科学, 2011, **27**(7): 50 - 52. (GAO Chun-hua, LI Na, ZHANG Qing-wei. A comparative study on shear strength of the fly ash-treated expansive soil and the expansive soil[J]. Building Science, 2011, **27**(7): 50 - 52. (in Chinese))
- [8] 杨广庆. 水泥改良土的动力特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(7): 1156 - 1160. (YANG Guang-qing. Study of dynamic performance of cement-improved soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(7): 1156 - 1160. (in Chinese))
- [9] 王 峻, 王 强, 王杰民. 震后黄土动力学特性试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, **37**(4): 63 - 67. (WANG Jun, WANG Qiang, WANG Jie-min. Experimental study on the dynamic characteristics of post-earthquake loess[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, **37**(4): 63 - 67. (in Chinese))
- [10] 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. (ZHANG Xiang-dong, CAO Qi-kun, PAN Yu. Experiment research of lime-fly ash Soil's dynamics characteristics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(8): 2560 - 2564. (in Chinese))
- [11] 赵少强, 别大华, 邓剑辰. 粉煤灰改良黄土填料的试验研究[J]. 铁道建筑技术, 2006(3): 47-50. (ZHAO Shao-qiang, BIE Da-hua, DENG Jian-chen. A study on fly ash improved loess filling material[J]. Railway Construction Technology, 2006(3): 47 - 50. (in Chinese))
- [12] 贾存兴. 粉煤灰改良高速公路路基填料的试验研究[J]. 华东公路, 2009(1): 42 - 44. (JIA Cun-xing. Experimental study on fly ash Improved highway subgrade filling[J]. East China Highway, 2009(1): 42 - 44. (in Chinese))
- [13] 王 峻, 王兰民, 李 兰. 不同地震荷载对黄土动模量与阻尼比的影响[J]. 自然灾害学报, 1992, **1**(4): 75 - 79. (WANG Jun, WANG Lan-min, LI Lan. The effect on dynamics module and damping ratio of loess induced by different seismic loads[J]. Journal of Natural Disasters, 1992, **1**(4): 75 - 79. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)