

# 动荷载作用下粉煤灰改性黄土的震陷特性<sup>①</sup>

王 峻<sup>1,2,3</sup>, 高中南<sup>1</sup>, 车高凤<sup>1,2,3</sup>, 钟秀梅<sup>1,2,3</sup>,  
王 强<sup>1,2,3</sup>, 王 平<sup>1,2,3</sup>, 王 谦<sup>1,2,3</sup>, 柴少峰<sup>1,2,3</sup>

(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:**针对黄土地区实现工程施工材料本土化和科学利用粉煤灰问题, 对不同配比条件下粉煤灰改性黄土进行重塑非饱和试件的动三轴震陷试验, 研究其在动荷载作用下的震陷特性, 分析粉煤灰掺入量对动变形模量和动残余应变的影响变化规律。研究表明: 粉煤灰掺入量对黄土震陷性质的影响较大。相同固结应力水平下, 动变形模量和动残余应变随粉煤灰掺入量呈现出不同的变化规律, 随着粉煤灰掺入量的增加, 黄土动变形模量也随之增大, 残余应变则减小。动变形模量与动残余应变之间的变化趋势满足幂函数关系; 黄土掺加约 20% 粉煤灰改性后就能够有良好的抗震震陷性能。研究成果可为黄土地区地基的抗震防震设计提供借鉴依据, 具有重要的工程实用价值。

**关键词:**粉煤灰; 黄土; 震陷特性; 动变形模量; 动残余应变

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2016)05-751-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2016.05.751

## Seismic Subsidence Behavior of Fly-ash-modified Loess under Dynamic Loading

WANG Jun<sup>1,2,3</sup>, GAO Zhong-nan<sup>1</sup>, CHE Gao-feng<sup>1,2,3</sup>, ZHONG Xiu-mei<sup>1,2,3</sup>,  
WANG Qiang<sup>1,2,3</sup>, WANG Ping<sup>1,2,3</sup>, WANG Qian<sup>1,2,3</sup>, CHAI Shao-feng<sup>1,2,3</sup>

(1. Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, Gansu, China;

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

**Abstract:** In order to obtain raw material locally and make optimal use of fly ash in engineering construction in loess areas, we conducted a series of dynamic triaxial tests on unsaturated remolded loess specimens that had been modified with different proportions of fly ash. Based on the test results, we studied the seismic subsidence properties of loess based on the improvement afforded by the fly ash, and derived change laws for the dynamic modulus of deformation and the dynamic residual strain for different proportions of fly ash. The results show that the quantity of dope in fly ash significantly influences the seismic subsidence properties of loess. The changes in the dynamic modulus of deformation and in the dynamic residual strain vary with respect to the improvement afforded by fly ash under the same consolidation stress, i. e., the former becomes larger while the latter become smaller and the relationship between them is well described by the power function. Moreover, we verified that the anti-seismic subsidence behavior of the loess specimens was much better when the proportion of fly ash is about 20%.

① 收稿日期: 2016-03-10

基金项目: 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费项目(2014IESLZ02, 2012IESLZ02); 甘肃省自然科学基金资助项目(1308RJZA153); 国家自然科学基金(51408567)

作者简介: 王 峻(1957-), 男, 高级工程师, 主要从事土动力学与地震工程研究。E-mail: wangjunlz@163.com。

These research findings provide a scientific basis for establishing anti-seismic designations for foundations in loess areas, and thus have important application value.

**Key words:** fly ash; loess; seismic subsidence; dynamic deformation modulus; dynamic residual strain

## 0 引言

黄土在我国分布广、厚度大,且主要分布在多地震的中西部地区。由于黄土是具大孔性、弱粘结的特殊土类,对地震有很敏感的效应<sup>[1-2]</sup>。地震时黄土容易产生破裂、滑移和地震沉陷等灾害,给当地人民的生命和财产造成巨大损失;黄土地区修筑的公路等交通干线也易因地震而遭到严重破坏。可以看出,黄土与地区工农业生产、工程建设和人类生存环境有着密切关系。

黄土具有特殊的工程性质,有时虽经压实还是不能满足工程建设需要。因此,如何利用当地土料,通过工程改良措施,简单、经济地达到工程需要,对实现工程施工材料本土化显得尤为重要。

粉煤灰是从煤粉炉排出的烟气中收集到的细颗粒粉末,是工业“三废”之一。我国的火电厂每年产生大量的粉煤灰,给国民经济建设及生态环境造成了巨大的压力。我国是一个人均占有资源储量有限的国家,综合利用粉煤灰,使其变废为宝,已成为我国经济建设一项重要的技术经济政策。推广和应用粉煤灰不仅能节约土地和能源,而且能保护和治理环境,实现可持续发展,具有良好的社会效益和经济效益。

国外从20世纪20年代起开始对粉煤灰的处理和利用进行研究,取得了不少成果<sup>[3-5]</sup>。20世纪80年代随着我国公路和铁路建设的飞速发展,许多学者开始对粉煤灰等为掺合料的改性土进行研究,取得了一系列有价值的研究成果,并将这些成果广泛应用于工程建设中<sup>[6-12]</sup>。但这些成果基本是关于此类土静力学方面的研究成果,相关动力学研究相对较少,而专门针对粉煤灰改性黄土的动力学研究则更少见。随着车辆速度的提高、车辆荷载的增加以及地震等动荷载对路基的影响,动荷载作用下土体的动力性质越来越引起人们的关注<sup>[13-18]</sup>。因此为满足工程建设的需要,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密切的关系,对于减轻灾害具有重要意义。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震陷试验,获得动荷载作用下粉煤灰改性黄土的动变形模量、动残余应变等参数,并将不同配比粉

煤灰改性黄土的震陷试验结果进行比较,研究其在动荷载作用下的震陷(动变形)特性及变化规律,得到一些重要结论,以期黄土地区实现工程施工材料本土化和科学利用粉煤灰提供依据,对粉煤灰改性黄土地基抗震设计具有参考价值。

## 1 试验概述

### 1.1 材料的性质

所选粉煤灰为国电兰州热电有限责任公司产出的,其主要技术指标的测试结果如表1。

表1 粉煤灰主要成分

化学成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	SO <sub>3</sub>	烧失量
含量/%	52.04	20.22	4.19	12.57	5.47	0.45	4.93

所选黄土为甘肃省临夏县东北部黄土塬上的Q<sub>3</sub>黄土,其主要物理性质及颗粒级配试验结果如表2。

表2 土样物理性质指标

天然密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	天然 含水率/%	比重	液限 /%	塑限 /%	颗粒组成/%		
					黏粒	粉粒	砂粒
1.38	12.6	2.70	25.6	16.4	18.5	74.0	7.5

### 1.2 试样制备

黄土风干后,碾碎过2 mm筛,其后置于烘箱中,烘干后测定土的含水率,并将粉煤灰按一定的配比掺入土中(粉煤灰配比分别按5%、10%、15%、20%及25%进行),然后加水搅拌均匀,使水和粉煤灰颗粒充分接触,闷料2 d。用标准制样器制备粒度、密度、饱和度、均匀性一致的粉煤灰黄土试样,试样高 $H=100$  mm,直径 $D=50$  mm。将试样放置在保湿缸中,土样养护龄期为3 d。其组平均干密度介于 $1.43\sim 1.44$  g/cm<sup>3</sup>,组平均含水率介于 $15.91\sim 16.14$ 。为了更好地进行对比,同时还制作了一组素土样。

### 1.3 试验方法

试验在DSD-160型电磁式振动三轴试验系统上进行。仪器由主机、静压力系统、动力控制系统和测量系统组成。试验过程中各试样的静压力、动应力及动应变等均可由相应的配套系统采集记录。试验系统如图1所示。

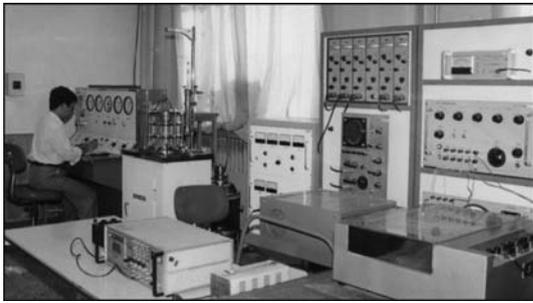


图 1 DSD-160 型电磁式振动三轴试验系统

Fig.1 DSD-160 electromagnetic dynamic triaxial test system

试验参照《土工试验规程 SL237—1999》中振动三轴试验进行操作。试样采用固结不排水,每种试样先在固结应力比  $K_C = 1.69$  下固结,侧向固结压力采用  $\sigma_{3C} = 118 \text{ kPa}$ 。固结过程中测轴向变形量,以 30 min 轴向变形量不大于 0.01 mm 为稳定标准;然后控制一定的动应力对每个试样进行试验,其所加的动应力分 4~5 种。即对固结变形稳定后的一组试样分别施加不同幅值的动应力,测定不同振次下的残余应变  $\epsilon_P$ 。

模拟的地震荷载为频率 1 Hz 的正弦波,试验时按等效正弦波的形式施加周期性垂直动荷载。每个试样进行 40 次循环荷载试验。试验中震陷用残余应变  $\epsilon_{PN}$  来表示:

$$\epsilon_{PN} = \frac{H - H'(N)}{H}$$

式中: $N$  为振次; $H$  为动应力作用前的试样高度; $H'(N)$  为动应力作用  $N$  次后的试样高度。

由动三轴震陷试验记录的动应力  $\sigma_d$  与动残余应变  $\epsilon_P$  时程可得到任一振次  $N$  所对应的残余应变  $\epsilon_P$ ,即动应力  $\sigma_d$  恒定时的振次  $N$  与残余应变  $\epsilon_P$  关系曲线。对一组试样均可获得一簇不同动应力  $\sigma_d$  下的  $N$ - $\epsilon_P$  曲线(图 2),利用这一簇曲线可得到不同振次下的动应力  $\sigma_d$  与残余应变  $\epsilon_P$  关系曲线,即震陷曲线。

## 2 试验结果与分析

黄土震陷是地震时地震动引起黄土层的附加沉陷;有时也把这种附加沉陷叫做地震引起的永久变形或残余变形。震陷是黄土的残余变形特性,所以把动变形(震陷)试验结果作为反映黄土震陷性的主要土动力学参数,并把黄土动变形试验取得的残余应变参数称作震陷系数。

### 2.1 粉煤灰改性黄土的震陷(残余应变)特性

图 2 为动应力和振次对残余应变的影响。由图 2

可以看出,在同一固结应力条件下残余应变随动应力幅值和振动历时的增加而增加,初期增长较快随后逐渐变缓。其原因主要是由于振动初始阶段,土体孔隙迅速被压密,从而变形迅速;随着振动次数的增加,颗粒间密实度增加,土体的次生结构强度逐渐形成,由动应力作用产生的动变形将会越来越小,变形将越来越困难,从而使残余应变增长速率减缓。

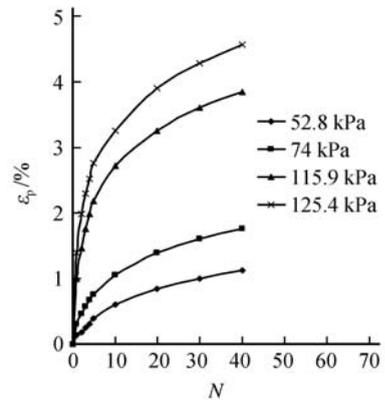


图 2 动应力和振次对残余应变的影响

Fig.2 Impact of dynamic stress and loading cycles on residual strain

由图 2 可见,残余应变一定时,动应力越大需要的振次越少;振次一定时,动应力越大产生的残余应变越大。

图 3 为振次  $N = 10$  次时不同粉煤灰配比下改性黄土的震陷曲线。由于振次  $N = 20, 30, 40$  次下的震陷曲线具有相同特征,限于篇幅,图形不再展示。由图 3 可以看出,在同一振次条件下,动荷载作用下不同配比粉煤灰改性黄土的残余应变随动应力的增大而增大,随粉煤灰掺入量的增加而减小。从图中还可看出,不同配比粉煤灰改性黄土的震陷曲线具有相同的变化规律,但震陷曲线随粉煤灰掺入量的不同表现出不同的变化趋势;素黄土的残余应变随动应力变化曲线均处在其他改性黄土的震陷曲线之下,说明随着粉煤灰掺入量的增大,相同动应力作用下土体所产生的震陷变形变小,这主要是由于粉煤灰与黄土混合后,在一定含水率条件下与土体反应,生成晶体氢氧化钙和含水硅铝酸钙等胶结物,在黄土中形成了凝块状胶接结构,增强了土体颗粒间的联结结构强度<sup>[19-20]</sup>,从而在相同的动应力下减弱了改性黄土的震陷性,表现出残余应变减小的性质。

由图 3 可见,残余应变一定时,粉煤灰掺入量越大需要的动应力越大;动应力一定时,粉煤灰掺入量越大产生的残余应变越小。

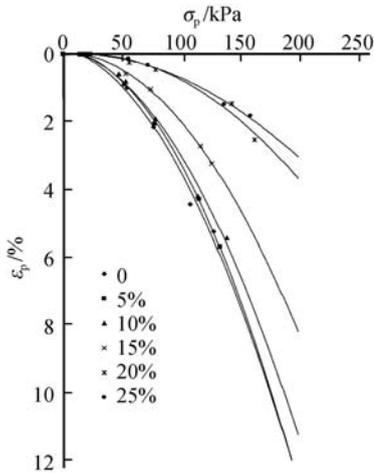


图3 粉煤灰改性黄土的震陷曲线( $N=10$ )

Fig.3 Curves of seismic subsidence of fly-ash-modified loess ( $N=10$ )

综上,动应力幅值、振次和粉煤灰掺入量是影响动荷载作用下粉煤灰改性黄土震陷特性的主要因素。

## 2.2 粉煤灰掺入量对动变形模量的影响

动变形模量  $E_b$  是土动力特性的重要参数之一<sup>[21]</sup>。图4为振次  $N=10$  次时不同配比下  $E_b$ - $\epsilon_p$  关系曲线。由图4可知,在相同固结压力下,黄土动变形模量  $E_b$  改性后大于改性前。随着粉煤灰掺入量的增加,黄土的动变形模量增大,当粉煤灰配比达到20%时,若再增加粉煤灰量对黄土动变形模量影响甚微。说明适量掺入粉煤灰可以大大减小黄土的变形能力。进一步分析发现,不同配比粉煤灰改性黄土的动变形模量  $E_b$  均随残余应变  $\epsilon_p$  的增大而减小,且具有明显的非线性特征,即随着  $\epsilon_p$  的逐渐增大,  $E_b$  的衰减速率不断减小,在残余应变达到3%左右时逐渐趋于平稳;相同  $\epsilon_p$  对应的  $E_b$  随粉煤灰掺入量的增加明显增大。不同配比粉煤灰改性黄土的  $E_b$ - $\epsilon_p$  关系曲线具有相同的变化趋势,其关系曲线较好地符合幂函数关系,即

$$E_b = A\epsilon_p^B \quad (1)$$

其中:  $A$ 、 $B$  为模型参数。

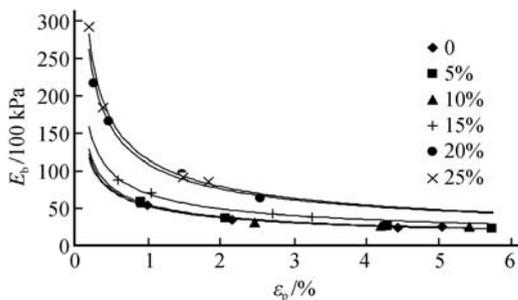


图4 不同配比粉煤灰改性黄土的  $E_b$ - $\epsilon_p$  关系( $N=10$ )

Fig.4  $E_b$ - $\epsilon_p$  curves of loess doped with different proportions of fly ash ( $N=10$ )

不同配比粉煤灰改性黄土的模型参数及相关系数如表3所列。

表3 幂函数模型参数

Table 3 Parameters of power function model

粉煤灰配比/%	模型参数		相关系数 $R^2$
	A	B	
0	53.299	-0.498 8	0.983 5
5	55.501	-0.507 1	0.998 2
10	53.273	-0.471 4	0.964 4
15	69.866	-0.495 1	0.996 4
20	109.71	-0.524 4	0.989 6
25	115.42	-0.540 2	0.996 0

由此可见,粉煤灰掺入量对黄土动变形模量有很大影响,说明在黄土中适量掺入粉煤灰可以提高其抗变形能力。

## 2.3 粉煤灰掺入量对改性黄土残余应变的影响

由试验测得6组试样的震陷曲线(图3)可以看出,粉煤灰掺入量对黄土的残余应变有明显影响。在相同固结应力和振次条件下,残余应变随动应力的增大而增大,同一动应力对应的残余应变随粉煤灰掺入量的增大而减小。不同粉煤灰配比组黄土的震陷曲线随着粉煤灰掺入量的增大逐渐靠近应力轴,即在相同动应力下,粉煤灰掺入量越大残余应变越小。掺入量不同,改性土的残余应变随动应力幅值增长的速率有所不同;随着粉煤灰掺入量的变化,粉煤灰改性黄土的残余应变发生了显著改变,即随着粉煤灰掺入量的增大残余应变逐渐减小,粉煤灰的改良作用逐渐显现。从图3中还可以明显看出,粉煤灰配比为20%和25%的改性黄土强度明显增大,在相同动应力作用下震陷系数明显变小;配比为15%的改性黄土虽然强度有所增加,但不如前两种的效果好;而粉煤灰配比为5%和10%的改性土与素黄土的震陷曲线很接近,说明在黄土中掺入少量粉煤灰起不到改良作用。

为了更具体、直观地研究粉煤灰掺入量对改性黄土残余应变的影响,利用图3得到图5。图5为动应力幅值等于100 kPa时粉煤灰改性黄土的震陷系数  $\epsilon_p$  与粉煤灰掺入量  $m$  的关系。

从图5可以看出,随着粉煤灰掺入量  $m$  的增加,改性土的  $\epsilon_p$  均有所减小,但  $m$  对黄土  $\epsilon_p$  降低效果不同:掺入5%、10%的粉煤灰,黄土的  $\epsilon_p$  减小幅度较小,改良作用不明显;掺入15%的粉煤灰,  $\epsilon_p$  减小至2.02%,减小了1.76倍,改性作用开始显现;而掺入20%、25%的粉煤灰,  $\epsilon_p$  分别减小至0.8%、0.73%,减小了4.44~4.86倍,改性作用明显;但粉

煤灰掺入超过 20% 后若再增加其掺入量,改性黄土的  $\epsilon_p$  变化甚微。通过以上分析可知,黄土中加入 20% 和 25% 的粉煤灰后,改性土震陷系数与素土相比成倍减小。由此可见,在黄土中适量掺入粉煤灰可提高其抗震陷性能。

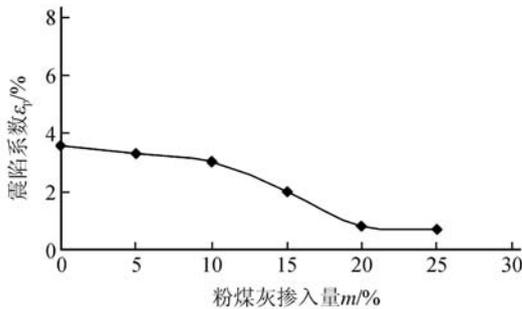


图 5 不同掺入量下粉煤灰改性黄土的  $\epsilon_p$ - $m$  关系曲线

Fig.5  $\epsilon_p$ - $m$  curves of loess doped with different proportions of fly ash

## 2.4 改性方案的对比确定

根据对黄土采用不同粉煤灰配比改性处理的比较试验分析可知,掺入一定量的粉煤灰可以较好地改善黄土的震陷(动变形)特性,增加其强度。综合分析表明,粉煤灰掺入较少时对减小黄土变形能力的效果不明显,而掺入 20% 时改性黄土就具有良好的抗变形性能。

综合考虑粉煤灰改性处理对黄土的动变形模量和震陷等的影响可以看出,粉煤灰改性是处治黄土震陷的较为有效的措施,且掺入 20% 的粉煤灰就可以有效提高黄土的抗震陷能力。

## 3 结论

(1) 通过试验分析了动荷载作用下不同配比粉煤灰改性黄土的震陷特性,结果表明,动应力幅值、振次和粉煤灰掺入量是影响动荷载作用下粉煤灰改性黄土震陷特性的主要因素。

(2) 在同一固结应力条件下,残余应变随动应力幅值和振动历时的增加而增加,初期增长较快随后逐渐变缓,即在动荷载振动 10 次以后,不同配比粉煤灰改性黄土残余应变的增长均十分缓慢,且已完成震陷量的 80% 左右。

(3) 在同一振次条件下,动荷载作用下不同配比粉煤灰改性黄土的残余应变随动应力的增大而增大,随粉煤灰掺入量的增加而减小。粉煤灰改性黄土的震陷曲线具有相同的变化规律,但震陷曲线随

粉煤灰掺入量的不同表现出不同的变化趋势。

(4) 对粉煤灰改性黄土动变形模量的分析可知,在相同固结应力下黄土改性后的动变形模量大于改性前,且随着粉煤灰掺入量的增加,其动变形模量增大。当粉煤灰配比达到 20% 时再增加粉煤灰对其影响甚微。粉煤灰改性黄土的动变形模量随残余应变的增大而减小,具有明显的非线性特征,其变化趋势满足幂函数关系。

(5) 改性黄土的震陷试验表明,加入粉煤灰后黄土的性状得到了改善,但对 5% 和 10% 粉煤灰配比的改性黄土,其变化不太明显;15% 粉煤灰配比的改性黄土,效果一般;而 20%、25% 粉煤灰配比的改性黄土改良效果明显。因此,粉煤灰改良黄土可以使黄土的动变形模量和震陷(残余应变)特性得到大的改善,主要表现为动变形模量增大和震陷系数的减小。

(6) 从研究资料来看,黄土用粉煤灰改良的效果显著。综合考虑黄土改性后的动变形模量和震陷特性,粉煤灰改性是处治黄土震陷的较为有效的措施,且掺入约 20% 的粉煤灰就可以有效提高黄土的抗震陷(动变形)能力。

## 参考文献(References)

- [1] 陈昌禄,邵生俊,方娟,等.不同结构性黄土的强度规律及传统强度准则适应性分析[J].地震工程学报,2013,35(4):851-857. CHEN Chang-lu, SHAO Sheng-jun, FANG Juan, et al. Analysis of Strength Variation of Different Kinds of Structural Loess and Adaptability of Traditional Strength Criterion[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(4): 851-857. (in Chinese)
- [2] 王峻,王兰民,李兰.永登 5.8 级地震中黄土震陷灾害的探讨[J].地震研究,2005,28(4):393-397. WANG Jun, WANG Lan-min, LI Lan. Discussion on the Loess Subsidence Disaster Caused by the Yongdeng  $M_s$  5.8 Earthquake[J]. Journal of Seismological Research, 2005, 28(4): 393-397. (in Chinese)
- [3] 黄谦.国内外粉煤灰综合利用现状及发展前景分析[J].中国井矿盐,2011,42(4):41-43. HUANG Qian. Analysis of Development Prospects and Status Quo of Comprehensive Utilization of Fly Ash at Home and Abroad[J]. China Well and Rock Salt, 2011, 42(4): 41-43. (in Chinese)
- [4] 邓元林,杨同军.粉煤灰的应用现状及展望[J].交通工程与安全,2011(11):144-147. DENG Yuan-lin, YANG Tong-jun. Application Status and Prospect of Fly Ash[J]. Transport Engineering & Safety, 2011(11): 144-147. (in Chinese)
- [5] 陈仕奇.浅析应用粉煤灰作铁路路基填料[J].铁道工程学报,

- 2003(2):42-47.
- CHEN Shi-qi. Analysis of Application of Fly ash as Filling Material for Railway Embankment[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2003(2):42-47. (in Chinese)
- [6] 王德卿, 贾刚, 贾喜荣, 等. 粉煤灰对湿陷性黄土工程性质的影响[J]. 粉煤灰综合利用, 2001(6):47-48.
- WANG De-qing, JIA Gang, JIA Xi-rong, et al. The Effect of Fly Ash on the Engineering Characters of Watercrish Loss[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2001(6):47-48. (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] 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.
- ZHU Yan-bo, YU Hong-ming, YANG Yan-xia, et al. Indoor Experimental Research on Characteristics of Improved Red-mudstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2):425-432. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 夏琼, 杨有海, 耿焯. 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)
- [11] 张向东, 冯胜洋, 潘宇. 二灰改良风积土动力特性试验[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(2):89-93.
- ZHANG Xiang-dong, FENG Sheng-yang, PAN Yu. Experimental Study on Dynamic Performance for Lime-flyash-improved Aeolian Soil[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(2):89-93. (in Chinese)
- [12] 兰常玉, 薛鹏, 周俊英. 粉煤灰改良膨胀土的动强度试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(增刊):79-81.
- LAN Chang-yu, XUE Peng, ZHOU Jun-ying. Experiment Research on Fly Ash Modified Expansive Soil of Dynamics Strength[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(Supp):79-81. (in Chinese)
- [13] 王峻, 王谦, 王兰民, 等. 随机地震荷载作用下高速铁路黄土路基震陷试验分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊2):4239-4245.
- WANG Jun, WANG Qian, WANG Lan-min, et al. Laboratory Analysis of Seismic Subsidence of Loess Subgrade of High-Speed Railway under Random Seismic Loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Supp2):4239-4245. (in Chinese)
- [14] 谷天峰, 王家鼎, 王峻. 郑西客运专线黄土路基震陷研究[J]. 工程地质学报, 2009, 17(4):557-562.
- GU Tian-feng, WANG Jia-ding, WANG Jun. Laboratory and Numerical Studies on Seismic Subsidence of Loess Subgrade a Long Zhengzhou—Xi' an High-Speed Railway[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(4):557-562. (in Chinese)
- [15] 穆坤, 郭爱国, 柏巍, 等. 循环荷载作用下广西红黏土动力特性试验研究[J]. 地震工程学报, 2015, 37(2):487-493.
- MU Kun, GUO Ai-guo, BAI Wei, et al. Experimental Study on Dynamic Properties of Red Clay in Guangxi under Cyclic Loading[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(2):487-493. (in Chinese)
- [16] 邓龙胜, 范文. 随机地震荷载作用下黄土震陷的影响因素研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(9):1924-1931.
- DENG Long-sheng, FAN Wen. Study of Influencing Factors of Loess Seismic Subsidence Induced by Stochastic Seismic Load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(9):1924-1931. (in Chinese)
- [17] 王峻, 王强, 杨宝平, 等. 基于含水率变化的黄土场地震陷评价预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(10):2155-2160.
- WANG Jun, WANG Qiang, YANG Bao-ping, et al. Seismic Subsidence Predication of Loess Site Based on Changes of Water Content[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(10):2155-2160. (in Chinese)
- [18] 郭乐, 王家鼎, 谷天峰. 宝鸡市渭北台塬马兰黄土震陷特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(2):61-65.
- GUO Le, WANG Jia-ding, GU Tian-feng. A Study of Loess Seismic Subsidence of Tableland to the North Weihe River in Baoji City[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2012, 39(2):61-65. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] 王峻, 王谦, 王平, 等. 粉煤灰掺入量对改性黄土动本构关系的影响[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊1):156-160.
- WANG Jun, WANG Qian, WANG Ping, et al. Effect of Adding Amount of Fly Ash on Dynamic Constitutive Relationship of Modified Loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Supp1):156-160. (in Chinese)
- [21] 谢定义. 黄土动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- XIE Ding-yi. Soil Dynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011. (in Chinese)