

粉煤灰与动载耦合作用下黄土震陷试验研究

王 峻^{1,2,3}, 王 谦^{1,2,4}, 钟秀梅^{1,2,3}, 王 平^{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; 4. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为了探讨粉煤灰与动载耦合作用下黄土的震陷问题, 找出粉煤灰改良黄土的最佳配比, 通过动三轴震陷试验, 定性分析了黄土在不同粉煤灰掺量下的震陷特性。研究了粉煤灰掺量对黄土震陷性的定量影响规律, 建立了黄土的震陷曲线方程, 得到了粉煤灰掺量与残余应变的定量关系。研究结果表明: (1) 粉煤灰掺量增加、动载作用均会引起黄土震陷性发生改变, 即随着粉煤灰掺量的增大, 土的残余应变逐渐减小, 动应力幅值逐渐增大; (2) 当动应力幅值相同时, 残余应变随动载振次的增多而增大, 其增长速率随动载振次的增多而减小, 粉煤灰掺量越大, 残余应变随动载振次的增长越缓慢; (3) 在不同动载振次下, 黄土的震陷临界动应力曲线随粉煤灰掺量的增加均经历了一个从平稳、快速、再收敛至最大震陷临界动应力的发展过程; (4) 震陷试验得到的最佳粉煤灰掺量为 20%。

关键词: 粉煤灰; 动荷载; 黄土; 震陷

中图分类号: TU 441. 8

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2014)06-0070-06

我国西北地区黄土分布具有范围广、厚度大、成因类型复杂等特点, 同时又是多地震区。由于黄土是具有大孔性的弱粘结的特殊土类, 对地震有很敏感的效应。历史上黄土地区曾发生过多次强烈地震, 给当地人民的生命和财产造成了巨大损失, 黄土地区修筑的公路等交通干线也因地震而遭到严重破坏。可以看出, 黄土与工农业生产、工程建设和人类生存环境有着密切关系。近年来, 随着国民经济的快速发展, 国家加大了对中西部地区基础建设的投资, 黄土地区的公路等交通干线等级不断提高, 然而由于黄土的工程性质比较特殊, 有时虽经压实还是不能满足工程需要, 所以研究改良黄土的动力性质, 对进行震害预测、地基抗震性能的评价有着特别重要的理论和实际意义。

国外从 20 世纪 20 年代开始, 就将粉煤灰用于公路建设^[1]。在我国, 粉煤灰于 20 世纪 80 年代开始被用来填筑公路路基, 铁路部门于 20 世纪 90 年代开始进行粉煤灰填筑路基试验。近年来, 粉煤灰改良作为地基的一种处理方法, 越来越广泛地应用于

公路等路基的建设中。陈存礼等^[2]用国道 312 线兰州柳忠高速公路段黄土分别掺合一定比例的水泥、石灰、粉煤灰后, 对其力学性能进行试验, 为选择较好的掺合料修筑路堤提供了试验依据, 得到了一些规律性的结论; 赵少强等^[3]研究了粉煤灰改良黄土的作用机理、压缩特性、水稳性、强度特性以及龄期、掺合比对粉煤灰改良黄土工程力学特性的影响, 为郑-西客运专线路基填料的选择和应用提供了科学的指导和重要的参考建议; 高振林等^[4]对掺入适量粉煤灰的黄土试块进行室内压缩实验, 得出其压缩系数和湿陷系数, 并对黄土粉煤灰混合料的力学性能进行探讨, 证明粉煤灰能改变湿陷性黄土的工程性质, 使其能满足工程对地基土的要求; 夏琼等^[5]结合兰新铁路兰(州)-武(威南)复线工程, 对素黄土、粉煤灰黄土、粉煤灰与石灰(二灰)、水泥改良黄土填料, 在不同掺合比、不同含水量下进行无侧限抗压强度试验, 探讨粉煤灰与石灰、水泥改良黄土的强度特性与水稳性。试验结果表明, 粉煤灰可在一定程度上改善黄土强度特性; 张向东等^[6]通过对素土和不同比例的二灰改良土进行动强度、动弹性模量试验, 研究二灰含量对动力参数的影响, 并列出了几种配比的试验结果供比较和参考; 兰常玉等^[7]以粉煤灰改良的膨胀土为研究对象, 通过压实非饱和试件的动三轴试验, 考察了粉煤灰掺入量确定的条件下, 循环次数、动荷大小、围压等对土体动强度的

收稿日期: 2014-05-26; **修订日期:** 2014-06-17

基金项目: 甘肃省科技计划资助项目(1308RJZA153); 中国地震局兰州地震研究所地震科技发展基金(2012S01)

作者简介: 王峻(1957-), 男, 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

影响;祝艳波等^[8]采用石灰、水泥、粉煤灰对泥岩风化物进行改良试验研究,从宏观和微观角度研究泥岩改良土的工程特性,为现场改良路基土填筑施工提供了依据。

综上所述,利用粉煤灰改良黄土是一个较理想的办法,它不仅能提高改良土的工程性能,增强改良土的强度和稳定性,使其满足工程要求,而且又可解决粉煤灰作为废弃物,其堆量大、占地多、严重污染环境等问题,具有良好的社会效益、经济效益和环境效益。尽管以往的研究中对粉煤灰等作为土的改良材料进行了研究,但基本是有关此类土静力学方面的研究成果,有关动力学方面的研究则较少。而专门针对粉煤灰改良黄土的动力学研究几乎未见到,这对黄土地区公路等交通设施的地震安全是不利的。因此,研究粉煤灰改良黄土的动力特性,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十分必要。

本文以不同掺量粉煤灰改良黄土的震陷试验为基础,从粉煤灰和动荷载作用等方面考察了黄土的震陷特性,通过粉煤灰掺量的改变来反映黄土在动荷载作用下的震陷性变化,建立了相应的黄土震陷特性关系。这些关系反映了粉煤灰和动载耦合作用所导致的黄土震陷特性的变化,对研究粉煤灰与动载耦合作用下的黄土震陷性质有着重要意义,对于粉煤灰改良黄土的工程应用提供了一种理论参考。

1 试验简介

1.1 试验仪器

本次试验在中国地震局黄土地震工程重点实验室的 DSD-160 型电磁式振动三轴仪上进行。该仪器可以稳定输出多种荷载波形,频率范围为 0.1~100Hz。

表 3 试样的物理性质指标
Table 3 Physical property of sample

粉煤灰掺入量 (%)	含水率 (%)	组平均含水率 (%)	密度 (g/cm ³)	组平均密度 (g/cm ³)	干密度 (g/cm ³)	组平均干密度 (g/cm ³)
0	15.76~16.01	15.91	1.66~1.69	1.68	1.43~1.46	1.45
5	16.24~16.37	16.32	1.64~1.68	1.66	1.41~1.44	1.43
10	15.95~16.16	16.06	1.65~1.69	1.67	1.42~1.46	1.44
15	15.68~15.99	15.78	1.65~1.67	1.66	1.43~1.44	1.43
20	15.79~16.39	16.04	1.64~1.67	1.66	1.42~1.44	1.43
25	15.94~16.24	16.14	1.63~1.67	1.65	1.40~1.44	1.42

1.4 试验方法

在动三轴试验中,黄土震陷通常表示为动荷载作用前后试样高度差与动荷载作用前试样高度之比^[9~10],即:

1.2 试验材料

(1)土样:土样取自甘肃省临夏县北塬地表以下 4m 处,其基本物理性质如表 1 所示。按照《土工试验规程》SL237-001-1999 分类法,为黄土。

表 1 黄土的物理性质
Table 1 Physical properties of loess

土名	液限 (%)	塑限 (%)	塑性指数	比重	颗粒组成 (%)		
					粘粒	粉粒	砂粒
黄土	25.6	16.4	9.2	2.70	18.5	74.0	7.5

(2)粉煤灰:粉煤灰为取自国电兰州热电有限责任公司的Ⅱ级粉煤灰,其化学成分见表 2。

表 2 粉煤灰化学成分含量
Table 2 Chemical composition of coal ash

化学成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	烧失量
含量 (%)	52.04	20.22	5.47	12.57	0.45	4.19	4.93

(3)灰-土配比:为了研究粉煤灰和动荷载耦合作用下黄土的震陷特性,并通过对比分析,找出粉煤灰改良黄土的最佳配比。本文粉煤灰掺量选用如下比例:5%、10%、15%、20%、25%(重量比)。其目的是用来研究不同掺量粉煤灰黄土的震陷特性以及粉煤灰掺量的变化对其的影响。

1.3 试样制备

首先将粉煤灰与干土按比例均匀混合后,以含水率(16.0%)为标准制备土样,搅拌均匀后闷料 24 h。然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 50mm、高为 100mm 的圆柱形试样,养护龄期 3d。在制样时统一物性指标以消除由此带来的差异。为了对比分析,同时还制备了一组素土样。各试样的基本物理指标见表 3。

$$\varepsilon_{pN} = \frac{H - H'(N)}{H} \tag{1}$$

式中:ε_{pN}——动应力 σ_d 作用 N 次所产生的残余应变;
H、H'(N)——动应力作用前和作用 N 次后黄

土试样的高度;

N ——动载振次。

试验中,固结压力模拟地基土有附加荷载下的应力状态,即: $\sigma_{1c} = 200\text{kPa}$, $\sigma_{3c} = 118\text{kPa}$ 。在该固结压力下,对同一组的 4~5 个试样分别施加不同幅值的动应力,就可获得不同振次下的动应力 σ_d 和残余应变 ε_p 关系曲线,即震陷曲线。

2 试验结果及分析

2.1 粉煤灰改良黄土的震陷性特征

图 1 分别给出了动载振次 N 为 10~40 次时,由试验测得 6 组试样的震陷曲线。可以看出,在动荷载作用下黄土的震陷特性随粉煤灰掺量变化的特征是非常明显的:随粉煤灰掺量的增加,黄土的抗震陷性逐渐增强。在粉煤灰掺量较小(5%、10%)时,改良黄土的震陷曲线与素黄土接近,表明粉煤灰掺量较少时对黄土震陷性质影响不大,起不到减轻黄土震陷性的作用。当粉煤灰掺量增大时,震陷曲线逐渐抬高,表明改良黄土的抗震陷性在逐渐增强。粉煤灰掺量大于 15% 后,震陷曲线明显抬高,在 15% 和 20% 粉煤灰掺量之间震陷曲线跨度较其它粉煤灰掺量为大,显示出这期间是一个抗震陷性快速增长区间,这说明随着粉煤灰掺量的增加,改良土强度大大提高,主要原因是参与水合

作用和絮凝作用的粉煤灰的数量增加,改良黄土性质发生了变化,土体的结构性增强所致^[11];其机理主要是灰-土反应,这些反应的结果使土颗粒的结合水膜厚度减薄,土胶粒絮凝,生成晶体氢氧化钙和含水硅铝酸钙等胶结物,这些胶结物逐渐由胶凝状态向晶体化状态转化,致使改良土的刚度增大,强度和水稳定性不断提高^[12]。当粉煤灰掺量大于 20% 后,震陷曲线的变化就不明显了,20% 和 25% 粉煤灰掺量的黄土震陷曲线非常接近,说明粉煤灰改良黄土的震陷规律存在一最佳剂量,当剂量达到某一数值后,继续增加粉煤灰对提高土体的抗震陷性是非常有限的,主要原因是过多的粉煤灰将沉积于土中孔隙而不参加反应,反而不利于粉煤灰改良土抗震陷性的提高。

由图 1 可将粉煤灰-动载耦合作用下的试验现象归纳为:随着粉煤灰掺量 m 的增大,土样的残余应变 ε_p 逐渐减小,动应力 σ_d 幅值逐渐增大。

对图 1 的震陷曲线进行拟合,结果表明,不同掺量粉煤灰黄土的震陷曲线均可利用如下二次函数进行拟合:

$$\varepsilon_p = a\sigma_d^2 + b\sigma_d + c \quad (r > 0.99) \quad (2)$$

式中: ε_p ——残余应变(%);

σ_d ——动应力(kPa);

a 、 b 、 c ——震陷曲线参数。

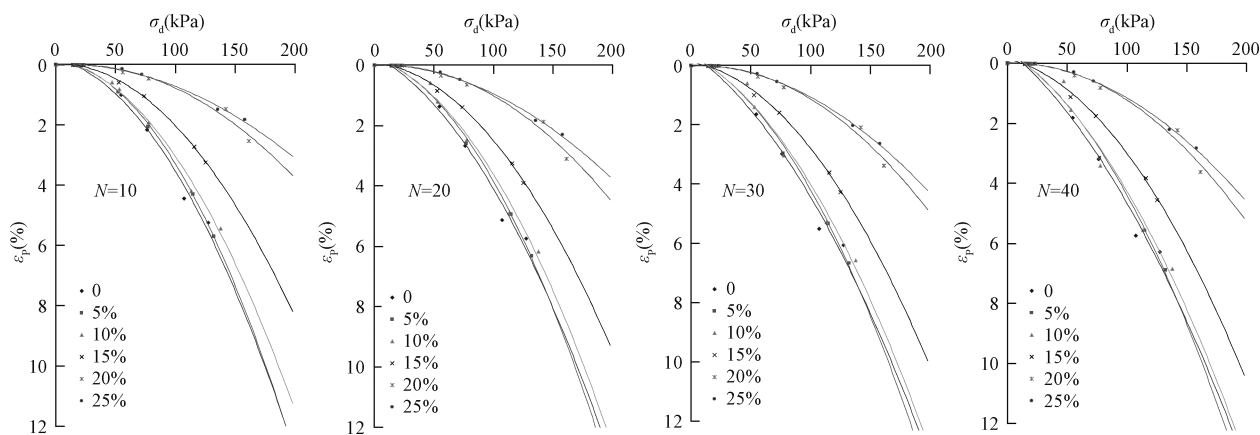


图 1 不同粉煤灰掺量下黄土的震陷曲线

Fig.1 Seismic subsidence curves of loess under different fly ash amount

为更具体、直观地研究粉煤灰-动载耦合作用下,黄土的残余应变 ε_p 随粉煤灰掺量 m 和动应力 σ_d 变化趋势,以动载振次 $N = 10$ 次的震陷曲线为例进行讨论。即在相同动荷载条件下,取不同粉煤灰掺量试样的残余应变,分析其随粉煤灰掺量的变化趋势,其变化关系经回归分析见表 4 和图 2。

可以看出,在相同振次和动应力条件下,残余变形与粉煤灰掺量之间显示出较好的相关性,即在同一动载水平下,粉煤灰掺量 m 愈大,残余应变 ε_p 愈小。该曲线可以用下述表达式表示:

$$\varepsilon_p = a \times e^{bm} \quad (3)$$

式中: a 、 b ——粉煤灰掺量对残余应变的影响参数。

表 4 不同动应力下黄土残余应变与粉煤灰掺量关系对比
Table 4 Relationship between fly ash amount and dynamic residual strain of loess under different dynamic stress

动载 σ_d (kPa)	残余应变 ε_p (%)	相关系数 r
40	$\varepsilon_p = 0.8453e^{-0.0942m}$	0.9294
60	$\varepsilon_p = 1.6466e^{-0.0757m}$	0.9345
80	$\varepsilon_p = 2.9964e^{-0.0795m}$	0.9294
100	$\varepsilon_p = 4.6159e^{-0.073m}$	0.9358
120	$\varepsilon_p = 6.379e^{-0.0695m}$	0.9309
140	$\varepsilon_p = 8.6193e^{-0.0673m}$	0.9343
160	$\varepsilon_p = 11.021e^{-0.066m}$	0.9328
180	$\varepsilon_p = 13.798e^{-0.0647m}$	0.9328

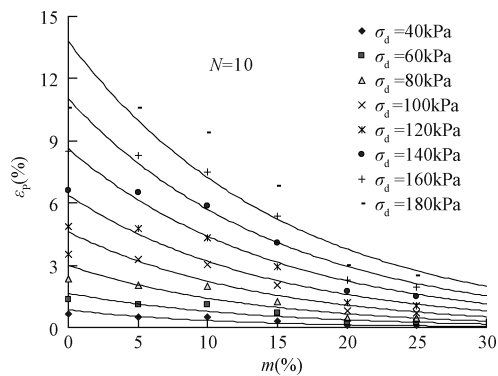


图 2 不同动应力下 ε_p - m 曲线 ($N=10$ 次)
Fig. 2 Relationship between ε_p - m under different σ_d ($N=10$)

需要说明的是,当粉煤灰掺量较大时,不同动应力下的拟合曲线之间的差异变小,收敛靠近,此时,黄土在动荷载作用下残余应变增长缓慢。

2.2 动载振次对粉煤灰改良黄土震陷的影响

为了研究动荷载的振次对不同粉煤灰掺量黄土震陷性的影响,图 3 给出了一定动应力 ($\sigma_d=100\text{kPa}$) 下不同粉煤灰掺量黄土的残余应变与随动载振次的增长曲线。

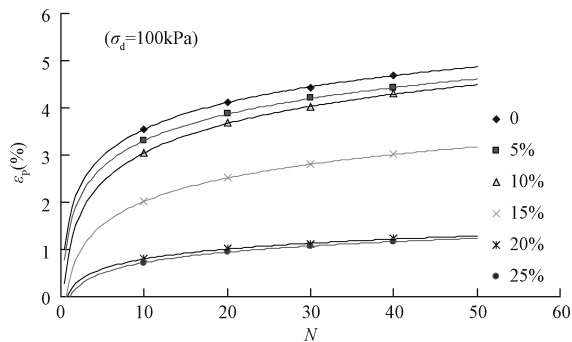


图 3 不同粉煤灰掺量时 ε_p - N 曲线 ($\sigma_d=100\text{kPa}$)
Fig. 3 Relationship between ε_p - N under different m ($\sigma_d=100\text{kPa}$)

由图 3 可知,残余应变随动载振次的增多而增大,其增长速率随动载振次的增多而减小,粉煤灰掺量越大,残余应变随动载振次的增长越缓慢,但不论哪种配比的土样残余应变主要发生在前 10 次振动中,且粉煤灰掺量越大,表现越明显。

从图 3 中还可发现,粉煤灰掺量是影响黄土震陷的一个重要因素。粉煤灰掺量越大,改良黄土的残余应变越小。但当 $m\geq 20\%$ 后,粉煤灰掺量的增加对改良黄土震陷影响甚微,表明此时再增加粉煤灰含量对增强改良黄土的抗震陷性能意义不大。可以明显看出粉煤灰改良黄土的最佳掺量为 20%。

对图 3 曲线进行拟合(表 5),不同粉煤灰掺量下黄土的残余应变与动载振次关系可用下式表示:

$$\varepsilon_p = a + b \ln(N) \tag{4}$$

式中: a 、 b ——动载振次对残余应变的影响参数。

表 5 不同粉煤灰掺量下黄土残余应变与动载振次关系
Table 5 Relationship between ε_p - N under different m

粉煤灰掺量 m (%)	残余应变 ε_p (%)	相关系数 r
0	$\varepsilon_p = 1.6566 + 0.8212 \ln(N)$	0.9996
5	$\varepsilon_p = 1.4366 + 0.8123 \ln(N)$	0.9997
10	$\varepsilon_p = 0.9892 + 0.8954 \ln(N)$	0.9998
15	$\varepsilon_p = 0.3668 + 0.7178 \ln(N)$	0.9999
20	$\varepsilon_p = 0.1013 + 0.3039 \ln(N)$	0.9982
25	$\varepsilon_p = -0.0124 + 0.3196 \ln(N)$	0.9995

2.3 粉煤灰改良黄土的震陷临界动应力

震陷临界动应力通常指使土试样发生明显震陷变形时的动应力。当动应力大于临界动应力后,残余应变将急剧增大,因此其可作为判断黄土是否发生震陷的标准。文献[13]将残余应变为 0.015 时对应的动应力称为震陷临界动应力。为了对比分析,本文仍取残余应变为 0.015 对应的动应力称为震陷临界动应力 $\sigma_{d0.015}$ 。

图 4 和表 6 为不同粉煤灰掺量时黄土震陷临界动应力 $\sigma_{d0.015}$ 的变化规律。可以看出,震陷临界动应力随粉煤灰掺量的增加先缓慢增大然后迅速增大直至保持基本稳定。在缓慢增大阶段,粉煤灰掺量对震陷临界动应力影响甚微,其值变化不大,此阶段粉煤灰掺量 $m\leq 10\%$ 。在迅速增大阶段,随着粉煤灰掺量的升高,粉煤灰改良黄土的震陷临界动应力明显增大,此阶段粉煤灰掺量在 15%~20%。在保持基本稳定的阶段,相同动载振次条件下粉煤灰改良黄土的震陷临界动应力基本相等,粉煤灰掺量为 20% 和 25% 土样的震陷临界动应力值 ($N=10$) 仅相差 9kPa,且随着动载振次的增大其差值在逐渐减小,动载振次 $N=40$ 次时两者仅

差 3 kPa,表明粉煤灰掺量为 20% 时,改良黄土的震陷临界动应力基本上达到最大值,也进一步证明了粉煤灰改良黄土的最佳配比为 20%。

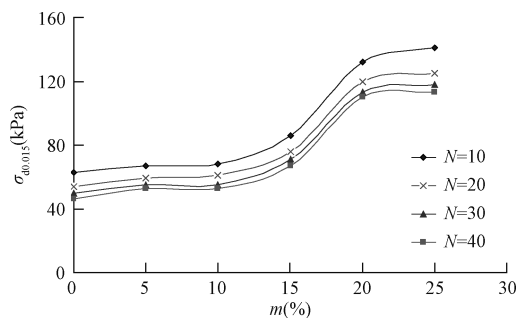


图 4 不同动载振次下 $\sigma_{d0.015} - m$ 曲线

Fig. 4 Relationship between $\sigma_{d0.015} - m$ under different N

表 6 不同动载振次下震陷临界动应力与粉煤灰掺量关系

Table 6 Relationship between $\sigma_d - m$ under different N

粉煤灰掺量 (%)	震陷临界动应力 (kPa)			
	$N = 10$	$N = 20$	$N = 30$	$N = 40$
0	63	54	50	46
5	67	59	55	53
10	68	61	55	53
15	86	76	71	67
20	132	120	113	110
25	141	125	118	113

从表 6 中可以看出,不同动载振次下,震陷临界动应力随粉煤灰掺量的变化规律是相似的。粉煤灰掺量越高,震陷临界动应力值越大;动载振次越大,震陷临界动应力值越小;当粉煤灰掺量较高时,震陷临界动应力值相差较小,且随动载振次的增大越来越明显。

3 结论

(1) 粉煤灰与动载耦合作用对黄土震陷性有显著的影响。在一定固结应力下,黄土的震陷性随着粉煤灰掺量增大而单调减弱。这种影响具体体现在震陷曲线的形态、残余应变的大小、残余应变随着动载振次变化的规律以及震陷临界动应力等方面。

(2) 随着粉煤灰掺量的增大,土的残余应变逐渐减小,动应力幅值逐渐增大。

(3) 残余应变随动载振次的增多而增大,其增长速率随动载振次的增多而减小;粉煤灰掺量越大,残余应变随动载振次的增长越缓慢;但不论哪种配比的土样残余应变主要发生在前 10 次振动中,且粉煤灰掺量越大,表现越明显。

(4) 黄土的震陷临界动应力的发展受粉煤灰掺量影响显著。在不同动载振次下,黄土的震陷临界动应

力随粉煤灰掺量增大均经历了平稳增长、急剧上升、再稳定收敛的发展过程,说明在黄土中适量加入粉煤灰可提高改良黄土的抗震陷性。

(5) 粉煤灰掺量的增加改良黄土的抗震陷性有明显提高,但当粉煤灰掺量 $\geq 20\%$ 后,粉煤灰掺量的增加对改良黄土震陷影响甚微。根据本试验结果,并借鉴已有的研究成果,得到粉煤灰改良黄土的最佳粉煤灰掺量为 20%。

参考文献:

- [1] 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 Y L, YANG T J. Application Status and Prospect of Fly Ash [J]. Transport Engineering & Safety, 2011 (11): 144 - 147. (in Chinese)]
- [2] 陈存礼,胡再强,骆亚生. 兰州黄土掺合无机结合料的力学特性试验研究[J]. 西安理工大学学报, 2001, 17 (3): 288 - 291. [CHEN C L, HU Z Q, LUO Y S. Research on the Mechanical Characteristics of Loess Mixed in to Inorganic Combinative Material in Lanzhou [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2001, 17 (3): 288 - 291. (in Chinese)]
- [3] 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 S Q, BIE D H, DENG J C. A study on fly ash improved loess filling material [J]. Railway Construction Technology, 2006 (3): 47 - 50. (in Chinese)]
- [4] 高振林,刘嘉学,韦寒波,等. 粉煤灰影响湿陷性黄土工程性质试验[J]. 北方工业大学学报, 2007, 19 (1): 91 - 94. [GAO Z L, LIU J X, WEI H B, et al. Experimental Study of Effect of Fly Ash on Engineering Characteristics of Waterish Loess [J]. Journal of North China University of Technology, 2007, 19 (1): 91 - 94. (in Chinese)]
- [5] 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 Q, YANG Y H, GENG X. 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] 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 X D, CAO Q K, PAN Y. Experiment research of lime-fly ash soil's dynamics characteristics

- [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(8): 2560 – 2564. (in Chinese)]
- [7] 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1): 79 – 81. [LAN C Y, XUE P, ZHOU J Y. Experiment research on fly ash modified expansive soil of dynamics strength [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2010, 30 (Sup1): 79 – 81. (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 Y B, YU H M, YANG Y X, *et al.* Indoor experimental research on characteristics of improved red-mudstone [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22 (7): 1156 – 1160. (in Chinese)]
- [9] 王峻, 刘旭. 白兰高速公路沿线黄土地震陷区判定与评价[J]. *水文地质工程地质*, 2004, 31(3): 13 – 16. [WANG J, LIU X. Discrimination and evaluation for seismic subsidence areas in loess sites along the highway from Baiyin to Lanzhou [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2004, 31(3): 13 – 16. (in Chinese)]
- [10] 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 L, WANG J D, GU T F. A study of loess seismic subsidence of tableland to the north Weihe River in Baoji City [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2012, 39 (3): 61 – 65. (in Chinese)]
- [11] 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1): 156 – 160. [WANG J, WANG Q, WANG P, *et al.* Effect of adding amount of fly ash on dynamic constitutive relationship of modified loess [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35 (s1): 156 – 160. (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 C X. Experimental study on fly ash improved highway subgrade filling [J]. *East China Highway*, 2009 (1): 42 – 44. (in Chinese)]
- [13] 巫志辉, 谢定义, 余雄飞. 洛川黄土动变形强度特性的研究[J]. *水利学报*, 1994(12): 67 – 71. [WU Z H, XIE D Y, YU X F. Study on dynamic deformation and strength characteristics of Luochuan loess [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1994 (12): 67 – 71. (in Chinese)]

Experimental study of loess seismic subsidence under the coupling effect of fly ash and dynamic loading

WANG Jun^{1, 2, 3}, WANG Qian^{1, 2, 4}, ZHONG Xiu-mei^{1, 2, 3},
WANG Ping^{1, 2, 3}, CHAI Shao-feng^{1, 2, 3}

(1. *Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou, Gansu 730000, China*; 2. *Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, CEA, Lanzhou, Gansu 730000, China*; 3. *Geotechnical Disaster Prevention Engineering Technology Research Center of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730000, China*; 4. *School of Civil Engineering and Mechanic, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China*)

Abstract: In order to discuss seismic subsidence problem of loess under coupling effect of fly ash and dynamic loading, and determine the best ratio of fly ash improved loess, seismic subsidence behavior of loess with different fly ash amount are quantitative analyzed based on dynamic triaxial tests. Furthermore, quantitative influence of fly ash amount on seismic subsidence behavior of loess are studied, seismic subsidence curve equation of loess is established, and quantitative relationship between fly ash amount and dynamic residual deformation is proposed. The results show that: (1) the increase of fly ash amount and dynamic loading can change seismic subsidence behavior of loess, in other word, with the increase of fly ash amount, the dynamic residual deformation is reduced gradually, and the dynamic amplitude is mounting. (2) When the dynamic

(下转第81页)

- Engineering, 2012, 31 (7): 1499 - 1505. (in Chinese)]
- [7] 陈希哲. 土力学地基基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006. [CHEN X Z. Soil Mechanics and Geotechnical Engineering [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese)]
- [8] 曹文贵, 罗忠涛, 王江营, 等. 柔性基础下柔性桩复合地基沉降计算研究 [J]. 水文地质工程地质, 2010, 37 (6): 27 - 32. [CAO W G, LUO Z T, WANG J Y, *et al.* Study on Settlement Calculation of Deformable Piles Composite Ground Under Flexible Foundation [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37 (6): 27 - 32. (in Chinese)]
- [9] 张忠苗. 桩基工程 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 165 - 174. [ZHANG Z M. Pile Foundation Engineering [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2011: 165 - 174. (in Chinese)]

Design optimization of reinforcing member of GRF pile foundation

HU Yi-fu^{1,2}, LIU Xiao-bo^{1,2}, MA Li^{1,2}

(1. School of Resource and Safety Engineering, Central South university, Changsha, Hunan 410083, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Hydropower Development Key Technology, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: Study the design on reinforcing member of geo-reinforcement foundations by using FLAC3D software to achieve security, economic, and environmental benefits of integrated. This article mainly focuses on bolt diameter, angle and strength parameters which have effects on the settlement of the pile top. Numerical analysis shows that with the bolt diameter increasing, the pile top settlement displacement decreases, and the settlement bounce increases after a certain increasing value; Lager anchor angle is not conducive for GRF piles to bear loads. It should be decided by the strength relationship between pile, soil and anchor. When anchor strength is less than the threshold intensity, its increases lead pile settlement decreases linearly. But when it is greater than the threshold intensity, the settlement of the pile top will be hardly effected with anchor strength increases.

Key words: GRF; reinforcing member; settlement displacement; design optimization; FLAC^{3D}

责任编辑: 张明霞

(上接第 75 页)

amplitude being equal, dynamic residual strain increase with the number of cyclic loads increase, whereas the growth rate of it is decreased. The more the fly ash amounts, the slower the growth of dynamic residual deformation with increase of cyclic number. (3) Under different cyclic numbers, the critical dynamic stress of the loess seismic subsidence, with the increase of fly ash amount, goes through a process which contain smooth development, sharply increase and converging to the maximum critical dynamic stress of loess seismic subsidence; (4) The best ratio of fly ash amount is 20%.

Key words: fly ash; dynamic loading; loess; seismic subsidence

责任编辑: 张明霞