

掺黄土粉煤灰的渗透特性

郭 鸿, 骆亚生, 杨永俊

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

【摘 要】 【目的】探求黄土掺量对粉煤灰最大干密度和渗透特性的影响。【方法】分别向粉煤灰中参加质量分数为 0%, 10%, 20%, 30%, 40% 和 50% 的黄土, 进行击实试验及不同压实度(98%, 93%, 85%) 下的渗透试验, 研究掺土量对粉煤灰最大干密度和渗透特性的影响。【结果】掺土粉煤灰最大干密度是所掺黄土最大干密度和粉煤灰最大干密度的线性组合, 当掺黄土量为 50% 时, 粉煤灰的最大干密度较纯粉煤灰提高 45%; 随着掺土比例和压实度的增大, 粉煤灰的渗透系数明显减小, 其中压实度为 98% 和 85% 时, 50% 的掺土量可将粉煤灰的渗透系数减小到原来的 23.8%; 压实度为 93% 时, 50% 掺土量可将粉煤灰渗透系数减小到原来的 14.5%。【结论】掺土粉煤灰的最大干密度增加, 渗透性减弱。

【关键词】 粉煤灰; 黄土掺量; 干密度; 渗透特性

【中图分类号】 TU411.4

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2009)09-0219-05

Permeability characteristic of fly ash added by loess

GUO Hong, LUO Ya-sheng, YANG Yong-jun

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 The research studied effects of loess addition amount on the maximum dry density and permeability. 【Method】 Respectively 0%, 10%, 20%, 30%, 40% and 50% of loess was added to fly ash, compaction test and seepage test under different coefficients of consolidation(98%, 93%, 85%) of fly ash added by different amounts of loess were operated to study the effects of loess addition amount on the maximum dry density and permeability. 【Result】 Maximum dry density of the mixture is the linear combination of loess maximum dry density and fly ash maximum dry density. When 50% loess was added, the dry density of fly ash increased by 45%. Also, with the increase of the proportion of soil added and the degree of compaction, the fly ash permeability reduced significantly. When coefficient of compaction was 98% and 85%, the permeability coefficient of fly ash reduced to 23.8% of the original; while at 93%, it was 14.5% of the original. 【Conclusion】 The maximum dry density increased while the permeability weakened after adding loess into fly ash.

Key words: fly ash; amount of loess added; dry density; permeability

粉煤灰是火电厂燃煤的副产品, 粉煤灰被大量贮存堆放, 不仅占用耕地、污染环境, 而且危害人体健康, 如何对其进行处理和利用是国内外相关研究人员十分关注的问题^[1]。目前解决这一问题的途径很多, 其中利用粉煤灰进行筑坝或作为基础填筑材

料, 是比较有效的消纳方式^[2-4]。粉煤灰在许多方面具有比较优越的工程性能, 但因为纯粉煤灰缺少必要的粘聚力, 对水的反应较为敏感, 从而给工程的安全运行带来了不利影响^[5-7]。另外, 粉煤灰渗透系数偏大, 容易使坝内灰水外泄, 不仅对坝体渗透稳定性

* [收稿日期] 2008-12-28

[基金项目] 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-06-0864)

[作者简介] 郭 鸿(1984—), 男, 陕西长武人, 在读硕士, 主要从事岩土工程研究。E-mail: wwwhhbox@163.com

[通信作者] 骆亚生(1967—), 男, 陕西泾阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事黄土动力学研究。E-mail: yt02@nwsuaf.edu.cn

不利,也会对环境造成污染^[8-15]。崔龙森^[16]对某电厂粉煤灰所做的渗透试验表明,粉煤灰的渗透性很强。涂光灿^[17]采用向粉煤灰中添加高强高耐水土体固结剂的办法,来提高其凝聚力和粘结力,减小其透水性。我国西北地区经济较落后,黄土分布极广,将黄土作为改善粉煤灰渗透特性的掺合剂,有望改善粉煤灰的工程性能。因此,对不同掺土量粉煤灰渗透特性的研究,有助于更好地促进粉煤灰在工程中的应用,但目前尚未见此方面的研究报道。为此,本试验以咸阳渭河电厂粉煤灰为研究对象,通过击

实试验、渗透试验等,研究不同黄土掺量下粉煤灰的渗透特性,以期粉煤灰在工程填筑方面的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用粉煤灰采自咸阳渭河电厂粉煤灰储灰场,其物理性质见表 1。作为掺和料的黄土取自陕西杨凌某砖厂,属 Q₃ 黄土,取土深度 4 m,其物理性质见表 2。

表 1 粉煤灰的物理性质
Table 1 Physical indicators of fly ash

比重 Specific gravity	有效粒径/mm Effective diameter	不均匀系数 Uniformity coefficient	曲率系数 Coefficient of curvature	颗粒组成/% Particle size distribution of soils		
				2~0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm
2.07	0.005	11	1.31	27	63	10

表 2 黄土的物理性质
Table 2 Physical properties of loess

比重 Specific gravity	液限 Liquid limit	塑限 Plastic limit	塑性指数 Plasticity index	颗粒组成/% Particle size distribution of soils			按颗粒组成分类 Classification by particle size distribution	按塑性图分类 Classification by plastic figure
				>0.05 mm	0.05~0.005 mm	<0.005 mm		
2.68	35.20	21.56	13.64	48.67	31.00	20.33	低液限粘土 Low liquid limit clay	低液限粘土 Low liquid limit clay

1.2 研究方法

试验操作和数据计算依据《土工试验规程-SL 237-1999》进行,击实试验用标准击实仪击实,渗透试验用南京水科所研制的南 55 常规渗透仪测定。

1.2.1 击实试验 分别对黄土和不同黄土掺量(质量分数分别为 0%,10%,20%,30%,40%和 50%)的粉煤灰进行击实试验,探求黄土掺量对粉煤灰最大干密度的影响。

1.2.2 渗透试验 高坝压实度工程要求不低于 96%~99%,其他级别坝的压实度不低于 93%~96%^[18],本试验选择 98%压实度为高坝标准,93%压实度为普通坝标准,并设 85%压实度用于测定压实度较低时,掺土粉煤灰的渗透特性。按照不同压

实度将不同掺土量的粉煤灰制成常规渗透试样,充分抽气饱和和 90 min 后,再入水浸泡 5 h。然后对所制试样进行渗透试验。

1.2.3 渗透系数函数的建立 在渗透试验的基础上,整理试验结果,探求不同压实度和黄土掺量下粉煤灰渗透特性的变化,建立以压实度和掺土量为参数的渗透系数函数。

2 结果与分析

2.1 掺土量对粉煤灰最大干密度的影响

由表 3 可知,随着黄土掺量的增大,粉煤灰的最大干密度(ρ_d)线性增加,最优含水率(ω)线性减小。

表 3 掺土粉煤灰的击实试验结果
Table 3 Compaction results for loess added fly ash

指标 Index	黄土掺量/% Loess added						
	0	10	20	30	40	50	100
$\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	0.821	0.905	0.945	1.022	1.135	1.193	1.650
$\omega/\%$	43	38	36	34	31	28	16

掺土粉煤灰的最大干密度是黄土和粉煤灰各自最大干密度的线性组合,公式如下:

$$\rho_d = m\rho_{sd} + (1 - m)\rho_{fd} \quad (1)$$

式中: ρ_d 为掺土粉煤灰的最大干密度(g/cm^3), m 为

掺土量(%), ρ_{sd} 为黄土的最大干密度(g/cm^3), ρ_{fd} 为粉煤灰的最大干密度(g/cm^3)。用式(1)计算掺土粉煤灰的最大干密度,并将计算值与实测值进行比较,结果见图 1。从图 1 可以看出,掺土粉煤灰 ρ_d

的实测值与计算值几乎重合,而且误差均小于5%。因此,任意掺土量(0%~50%)的粉煤灰,其最大干密度都可以在已知纯土和纯灰最大干密度的情况下,直接用式(1)计算。当掺土量为50%时,掺土粉煤灰的最大干密度较纯粉煤灰提高了45%。

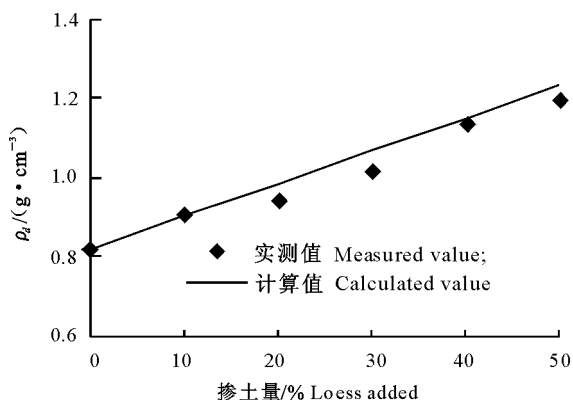


图1 掺土粉煤灰最大干密度的实测值与计算值的比较
Fig.1 Comparison between measured value and calculated value of amount of loess added and maximum dry density

2.2 掺土量和压实度对掺土粉煤灰渗透系数的影响

为了分别研究压实度和掺土量对掺土粉煤灰渗透系数的影响,根据变水头渗透试验结果,绘制不同压实度条件下掺土量与渗透系数的关系曲线(图2)。

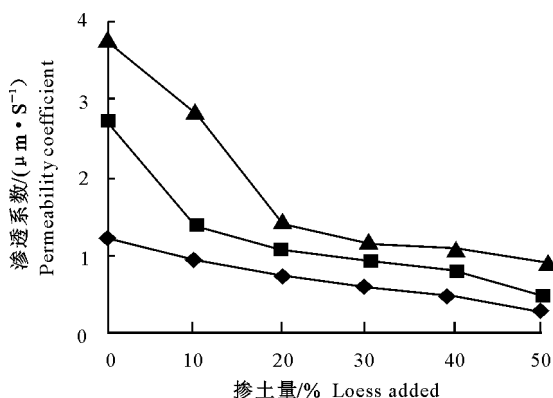


图2 掺土粉煤灰掺土量与渗透系数的关系曲线
—◆—压实度98%; —■—压实度93%; —▲—压实度85%

Fig.2 Relationship curves of loess added and permeability coefficient of mixed flyash
—◆—Coefficient of consolidation 98%;
—■—Coefficient of consolidation 93%;
—▲—Coefficient of consolidation 85%

从图2可以看出,随掺土量和压实度的增加,粉煤灰的渗透系数呈减小趋势。这是由于比较大的压实度(如压实度98%)使得粉煤灰颗粒和黄土颗粒

变得更加密实、孔隙比变得更小的缘故。在掺土量为0%~20%时,渗透系数随压实度变化的幅度较大,其余掺土量时变化幅度较小。这说明在掺土粉煤灰被压实的过程中,松散粉煤灰内部颗粒的重新排列占主导地位。压实度为98%和85%时,50%的掺土量可将粉煤灰的渗透系数减小到原来的23.8%;压实度为93%时,50%掺土量可将粉煤灰渗透系数减小到原来的14.5%。

2.3 以掺土量和压实度为参数的渗透系数(k)函数的建立

由以上结果可知,掺土量和压实度均通过改变粉煤灰的孔隙比来影响渗透系数。基于该原理,笔者试图通过孔隙比来推导掺土量、压实度与渗透系数的关系。粉煤灰和黄土在最大干密度时的孔隙比(e)可用下式计算^[18]:

$$e = \frac{G_s \rho_w}{\rho_d} - 1. \quad (2)$$

式中: G_s 为土或粉煤灰的比重, ρ_w 为水的密度, ρ_d 为土或粉煤灰的最大干密度、将表1、表2和表3中的数据代入式(1),可求得粉煤灰和黄土的孔隙比分别为1.521和0.624。若掺土量为 m ,则掺土粉煤灰的比重(G)可按下式计算:

$$G = G_s m + G_f (1 - m). \quad (3)$$

考虑压实度,则掺土粉煤灰的最大干密度为:

$$\rho = \rho_d \lambda_c. \quad (4)$$

式中: ρ 是掺土粉煤灰的干密度, λ_c 是压实度。

由(1)、(3)、(4)式,可以推导出不同掺土量粉煤灰的孔隙比计算公式为:

$$e = \frac{[G_s m + G_f (1 - m)] \rho_w}{[m \rho_{s,d} + (1 - m) \rho_{f,d}] \lambda_c} - 1. \quad (5)$$

式中: $\rho_{s,d}$ 和 G_s 分别是土的干密度和比重, $\rho_{f,d}$ 和 G_f 分别是粉煤灰的干密度和比重。

根据试验结果,掺土粉煤灰的孔隙比和渗透系数存在指数曲线关系,如图3所示。从图3可以看出,孔隙比较大时(>1.6),其对渗透系数的影响非常大,此时渗透系数增大加快。渗透系数 k 试验散点的拟合公式为:

$$k = A \exp(B \cdot e). \quad (6)$$

式中: A 、 B 为系数。本试验取 $A = 0.0365$, $B = 2.389$,则 $k = 0.0365 \exp(2.389e)$, $R^2 = 0.934$ 。 k 的单位为 $\mu\text{m/s}$ 。

将式(5)代入式(6)中,可直接得到渗透系数关于压实度和掺土量的表达式:

$$k = A \exp \left\{ B \left[\frac{[G_s m + G_f (1 - m)] \rho_w}{[m \rho_{s,d} + (1 - m) \rho_{f,d}] \lambda_c} - 1 \right] \right\}. \quad (7)$$

式(7)反映了掺土粉煤灰的压实度和掺土量对粉煤灰渗透系数的影响。通过此式,可以推算出不同压实度和不同掺土量时粉煤灰的渗透系数。

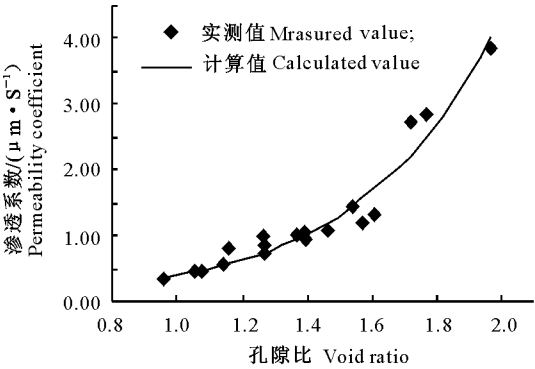


图 3 掺土粉煤灰孔隙比和渗透系数的关系

Fig. 3 Relationship curve of permeability coefficient and void ratio of mixed flyash

2.4 试验验证

为了验证式(7)的正确性,用相同的试验材料和仪器进行相应的验证试验。验证试验取压实度为 90%和 95%,掺土量为 15%和 35%,相互组合成 4 个试验,试验 1 和 2 的压实度均为 90%,掺土量分别为 15%和 35%;试验 3 和 4 的压实度均为 95%,掺土量分别为 15%和 35%。从图 4 可以看出,渗透系数的计算值和测定结果很相近,表明式(7)是正确合理的。

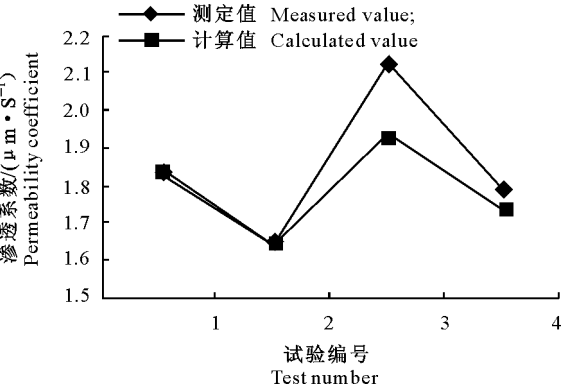


图 4 不同压实度和掺土量时渗透系数的实测值与计算值比较

Fig. 4 Comparison between measured value and calculated value of permeability coefficient under different coefficients of consolidation and amount of loess added

3 结论与讨论

掺土粉煤灰的渗透系数随掺土量的增加而减小,可能主要是由于以下 2 个原因所致:①黄土的粘粒、部分矿物质成分和黄土颗粒的静电作用,使得粉

煤灰颗粒由最初的松散逐渐变得紧凑,也就是说掺入的黄土颗粒对粉煤灰颗粒之间的胶结起到了比较明显的作用,尤其是在掺土量小于 20%时,粉煤灰渗透系数的减小程度最大,说明粉煤灰的渗透性对黄土的掺量比较敏感。②粉煤灰是由结晶体、玻璃体及少量未燃炭组成的一个混合体,其中结晶体包括石英、莫来石、磁铁矿等,玻璃体包括光滑的球形体玻璃体粒子、形状不规则且孔隙少的小颗粒、疏松多孔且形状不规则的玻璃体球等;未燃炭多呈疏松多孔形态。正是由于粉煤灰和黄土的成分不同,颗粒形状相异,两者的颗粒互相交错、互相填补,比如粉煤灰中疏松多孔的未燃炭颗粒可能吸附黄土中的粘粒和粉粒,而其中光滑的玻璃体粒子就可能进入黄土颗粒的孔隙,这使得粉煤灰的孔隙比减小,从而导致粉煤灰渗透系数的减小。

通过本试验可得出以下结论:①掺土粉煤灰的最大干密度可以通过所掺黄土最大干密度和粉煤灰最大干密度按照掺和比例进行线性组合计算;②饱和掺土粉煤灰在同一压实度下,渗透系数随着黄土掺量的增大而减小;在同一黄土掺量下,渗透系数随着压实度的增大而减小;③掺黄土粉煤灰的渗透系数是关于掺黄土量和压实度的指数函数。

[参考文献]

[1] 梁晓平,苏成德.粉煤灰综合利用现状及发展趋势[J].河北理工学院学报,2005,27(3):148-150.
Liang X P, Su C D. The comprehensive utilization of powdered coal ash and the focal point of further development [J]. Journal of Hebei Institute of Technology, 2005, 27 (3): 148-150. (in Chinese)

[2] 李时亮,周全能.粉煤灰作为路基填料的动力特性试验研究[J].岩土力学,2005,26(2):311-314.
Li S L, Zhou Q N. Experimental research on dynamic properties of fly ash for embankment filling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(2): 311-314. (in Chinese)

[3] 尹亚雄,梁波,王生新.粉煤灰铁路路基的静动力特性研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(2):2825-2828.
Yi Y X, Liang B, Wang S X. Study on static and dynamic behaviours of railway roadbed filled with flyash [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 2825-2828. (in Chinese)

[4] 张爱军,骆亚生,李鹏.水力冲填粉煤灰坝施工固结特性分析[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2004,32(11):138-142.
Zhang A J, Luo Y S, Li P. Analysis of consolidation characteristics in construction of hydraulic filling fly ash dam [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2004, 32(11): 138-142. (in Chinese)

[5] 尹 鹏,何蕴龙,熊 政,等. 株洲电厂钟家冲灰场灰坝渗流有限元分析 [J]. 中国水运,2007,7(5):69-70.
Yi P, He Y L, Xiong Z, et al. Finite element analysis on ash dam in Zhuzhou power plant [J]. China Water Transport, 2007,7(5):69-70. (in Chinese)

[6] 冯海宁,杨有海,龚晓南. 粉煤灰工程特性的试验研究 [J]. 岩土力学,2002,23(5):579-582.
Feng H N, Yang Y H, Gong X N. Test research on engineering characteristic of flyash [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002,23(5):579-582. (in Chinese)

[7] 李 振,骆亚生,邢义川. 动扭剪荷载作用下粉煤灰动力特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报,2005,25(增刊 1):3080-3086.
Li Z, Luo Y S, Xing Y C. Experimental study on dynamic properties of saturated flyash under dynamic torsional shear [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,25(suppl. 1):3080-3086. (in Chinese)

[8] 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 T T, Zhang B P, Tian Z G. Study on engineering characteristic of lime-flyash loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004,26(5):719-721. (in Chinese)

[9] 周志军,袁桌亚. 复合粉煤灰的工程力学性质试验研究 [J]. 中外公路,2007,27(3):202-204.
Zhou Z J, Yuan Z Y. Engineering mechanics research on complex flyash [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2007,27(3):202-204. (in Chinese)

[10] 李大可. 粉煤灰渗透变形特性 [J]. 防渗技术,2001,7(2):8-15.
Li D K. Seepage deformation characteristics of flyash [J]. Technique of Seepage Control, 2001,7(2):8-15. (in Chinese)

[11] 蔡 红,温彦锋,边京红. 粉煤灰的透水性及各向异性 [J]. 水利水电技术,1999,30(12):27-29.
Cai H, Wen Y F, Bian J H. Permeability and its anisotropy of flyash [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1999,30(12):27-29. (in Chinese)

[12] 李守义,张晓飞,冯海波,等. 汉江城固段防洪河堤渗透机理与防治方案研究 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2003,31(5):183-186.
Li S Y, Zhang X F, Feng H B, et al. Analysis of the osmotic failure mechanism and study on the preventive measure on the dike of Chenggu Section of Hanjiang river [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2003,31(5):183-186. (in Chinese)

[13] Li H F, Wen X G, Gong X N. Flyash properties and analysis of flyash dam stability under seismic load [J]. Journal of Coal Science, 2003,9(2):95-98.

[14] 王治中,王建林,李德君,等. 陕西黄龙县尧门河水库大坝的渗透稳定分析 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2003,31(4):175-178.
Wang Z Z, Wang J L, Li D J, et al. Analysis of permeation stability of the Yaomenhe Reservoir Dam in Huanglong County of Shaanxi Province [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2003,31(4):175-178. (in Chinese)

[15] 娄宗科,阎宁夏,周亚娟. 大掺量粉煤灰配制高性能渠道衬砌混凝土的研究 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2004,32(12):103-106.
Lou Z K, Yan N X, Zhou Y J. Study on properties of high fly-ash amount concrete for canal liner [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2004,32(12):103-106. (in Chinese)

[16] 崔龙森. 电厂粉煤灰的工程性质研究 [J]. 科技信息,2008(33):131-132.
Cui L S. Study on project characteristic of flyash in electric power plan [J]. Science & Technology Information, 2008(33):131-132. (in Chinese)

[17] 涂光灿. 粉煤灰固结填筑灰坝的试验研究及应用 [J]. 电力勘测设计,2003(3):71-76.
Tu G C. Test research and application of flyash consolidation build dam [J]. Electricity Power Survey and Design, 2003(3):71-76. (in Chinese)

[18] 张伯平,党进谦. 土力学与地基基础 [M]. 西安:西安地图出版社,2001.
Zhang B P, Dang J Q. Soil Mechanics and Foundation [M]. Xi'an:Xi'an Cartographic Press, 2001. (in Chinese)