

DOI: 10.16799/j.cnki.esdqyfh.241164

不同压实度粉煤灰力学特性试验研究

裴军军^{1,2}, 杨永恒^{1,2}, 甘季中^{1,2}, 苗强强^{1,2}

(1. 西北民族大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730124; 2. 甘肃省绿色工程材料与低碳建造重点实验室, 甘肃 兰州 730124)

摘要: 粉煤灰作为火电厂排出的工业废渣, 不仅需要大量场地堆放, 而且严重污染环境。将粉煤灰作为路堤填料用于路基填筑, 既可解决火电厂无处堆放和难以处理的问题, 又可以满足路基填筑的材料供应, 实现固废利用。对粉煤灰的液塑限、最大干密度、最优含水率、自由膨胀率等基本指标进行试验, 基于最大干密度和最优含水率, 分别测定压实度为90%、92%、95%、97%、100%时的CBR值, 回弹模量, 压缩模量, 快剪强度, 三轴压缩强度及耐崩解性能, 并对试验结果进行总结分析。试验表明: 相比土质细粒填料, 粉煤灰液塑限偏高, 密度偏小, 遇水具有膨胀性; CBR随压实度增大而增大, 最大为1.61%, 从CBR角度考虑, 该粉煤灰不符合路基设计规范中对路基填料CBR的要求; 粉煤灰回弹模量随压实度增大而增大, 压实度95%时, 回弹模量为54.119 MPa, 从回弹模量角度考虑, 粉煤灰不能作为高速公路与一级公路极重交通下的路床填料, 可以用于二级及二级以下公路重交通条件下的路基填筑; 内摩擦角和黏聚力均随压实度的增大而增大, 快剪试验抗剪强度比三轴压缩试验更高, 内摩擦角相近, 黏聚力相差较大; 粉煤灰的耐崩解时间随压实度增大而增大, 在水浸环境下粉煤灰颗粒容易脱散, 颗粒间黏结力较弱; 纯粉煤灰遇水后没有表现出明显的水化硬化, 颗粒间没有明显的黏结现象, 没有明显地强度形成。

关键词: 粉煤灰; 压实度; CBR; 回弹模量; 剪切强度; 耐崩解

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)07-0317-05

Experimental Study on Mechanical Properties of Fly Ash with Different Degrees of Compaction

PEI Junjun^{1,2}, YANG Yongheng^{1,2}, GAN Jizhong^{1,2}, MIAO Qiangqiang^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Northwest Minzu University, Lanzhou 730124, China; 2. Key Laboratory of Green Engineering Materials and Low-carbon Construction of Gansu Province, Lanzhou 730124, China)

Abstract: Fly ash, as an industrial waste residue discharged from thermal power plants, not only requires a large amount of space for storage, but also seriously pollutes the environment. The use of fly ash as embankment filler for roadbed filling can not only solve the problems of nowhere to stack and difficult to treat in thermal power plants, but also meet the material supply of roadbed filling, which realizes the utilization of solid waste. The basic indexes of liquid plastic limit, maximum dry density, optimal moisture content and free swelling ratio of fly ash are tested. Based on the maximum dry density and the optimal moisture content, the CBR value, rebound modulus, compression modulus, fast shear strength, triaxial compression strength and disintegration resistance are measured respectively when the compaction degrees are 90%, 92%, 95%, 97% and 100%, and the test results are summarized and analyzed. The test shows that compared with the soil fine-grained filler, the liquid plastic limit of fly ash is relatively high, its density is relatively low, and it has expansibility when exposed to water. The CBR increases with the increase of compaction degree, and the maximum is 1.61%. From the perspective of CBR, the fly ash does not meet the requirements of the CBR of the roadbed filler in the roadbed design specification. The resilient modulus of fly ash increases with the increase of compaction degree. The resilient modulus is 54.119 MPa when the compaction degree is 95%. From the perspective of resilient modulus, fly ash can not be used as roadbed filler under extremely heavy traffic of expressways and first-class highways, and can be used for the roadbed filling under heavy traffic conditions of highways of second class and below. The internal friction angle and cohesion increase with the increase of compaction degree. The shear strength of the fast shear test is higher than that of the triaxial compression test. The internal friction angle values are similar, and the cohesion values are quite different. The disintegration resistance time of fly ash increases with the increase of compaction degree. In the water immersion environment, fly ash particles are easy to disintegrate, and the

收稿日期: 2024-11-29

基金项目: 中央高校基本科研业务项目(31920230028)

作者简介: 裴军军(1987—), 男, 硕士, 实验师, 从事高校土木工程专业实验教学与管理工。

bonding force between particles is weak. Pure fly ash will not show obvious hydration hardening after encountering water. There is no obvious bonding phenomenon between particles, and there is no obvious formation of strength.

Keywords: fly ash; degree of compaction; CBR; modulus of resilience; shearing strength; disintegration resistance

0 引言

粉煤灰是煤燃烧后的烟气中收捕的细灰,是火电厂排出的主要固体废物,目前火力发电仍是我国电力的主要来源。随着国家工业快速发展,用电量需求剧增,排出了大量的粉煤灰,不仅需要占用大量的场地进行堆放,还会产生扬尘,污染大气,其中的有毒物质还会对人体和生物造成危害。公路施工中,路堤部分需要大量的填料,将粉煤灰作为路堤填料应用于公路的路基施工,不仅可以解决粉煤灰堆放的诸多问题,还可以解决路堤填料的供应,实现固废利用。因此,为了满足路用性能,粉煤灰的力学特性有待进行全面的试验与分析。王海波^[1]通过室内试验,结合相关理论计算与分析,对粉煤灰的路用性能及承载机理进行了系统研究;刘铁军^[2]通过室内试验研究了不同电厂粉煤灰的最大干密度、渗透系数、静力强度以及动力强度参数;孙恩吉^[3]通过颗粒分析试验、密度试验、击实试验和压实渗透试验,研究了粉煤灰颗粒的大小分布规律,干密度与含水率规律、压缩与渗透特性;钱磊对遵毕高速公路沿线粉煤灰的材料性质和工程特性进行了研究,并对高填方粉煤灰纯灰路堤的稳定性进行了力学分析计算;刘军等^[4]通过室内试验和现场试验的方法,对施工工艺、重要施工参数、施工过程控制和压实质量检测与评价等方面进行研究,总结了粉煤灰的路用性能以及施工控制要点。本文对粉煤灰基本性能指标进行试验,并对不同压实度时的CBR、回弹模量、剪切强度、耐崩解性能进行测试,其试验结果与规律可以为公路路基设计与制定路堤填筑方案等提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 原材料及基本指标

根据粉煤灰的细度、需水量比和烧失量,粉煤灰可分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级^[5],本文试验中采用甘肃宏大投资开集团有限公司生产的Ⅱ级粉煤灰,基本指标见表1。

由表1可知,相比一般的细粒填料(如黄土),液限与塑限稍偏大,且遇水后具有一定的膨胀性,最优含水率偏高,最大干密度较轻,其击实曲线见图1。

由图1可知,击实曲线比较平滑,随着含水率增

表1 粉煤灰基本指标

指标	结果	测试方法
液限/%	29	T 0118—2007
塑限/%	19	T 0118—2007
塑性指数/%	10	T 0118—2007
最优含水率/%	19.2	T 0131—2019
最大干密度/(g·cm ⁻³)	1.55	T 0131—2019
自由膨胀率/%	7.92	T 0124—1993

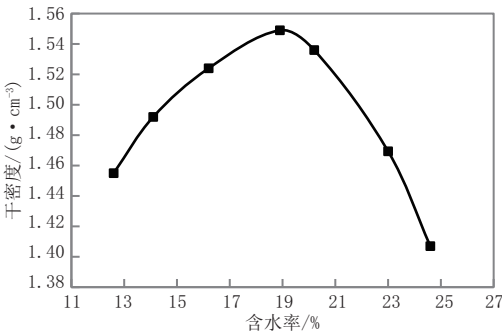


图1 粉煤灰击实试验曲线

大干密度增高,19%时达到峰值,随后随着含水率增大干密度降低,且降低幅度较大,因此最优含水率较为明显,在击实过程中也发现含水率在19%左右时粉煤灰比较密实,含水率23%时,击实时粉煤灰已略显发软,含水率25%时,粉煤灰很软并显泥样,击实时部分粒团会黏贴在击实锤底部,无法达到击实效果。

1.2 试验方法

基于击实试验结果,采用最优含水率19.2%配制粉煤灰,并根据最大干密度压制压实度为90%、92%、95%、97%、100%的CBR、回弹模量、直接剪切、三轴压缩试样,制样过程采用静力压实法,加压设备为微机液压压力试验机(WEY—2000),试验过程按照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)中相应的方法,CBR试验按T 0134—2019进行,回弹模量试验采用杠杆压力仪法,按T 0135—1993进行,直接剪切采用快剪试验,按T 0142—2019进行,三轴压缩采用不固结不排水试验,按T 0144—1993进行,耐崩解试验按照《铁路工程土工试验规程》(TB 10102—2023)中崩解试验的方法进行。

2 试验结果及分析

2.1 压实度对CBR的影响

CBR是表征路基填料在水泡环境下强度大小的

指标,膨胀率可以衡量路基填料水泡后的体积稳定性,因此 CBR 试验结果是评价路基填料质量好坏的一个重要参数,本文对粉煤灰分别在压实度为 90%、92%、95%、97%、100% 时进行 CBR 试验,其结果见表 2。

表 2 不同压实度粉煤灰 CBR 试验结果 单位: %

压实度	CBR (2.5)	CBR (5.0)	膨胀率
90	1.12	1.41	2.94
92	1.15	1.43	3.13
95	1.22	1.48	3.46
97	1.29	1.53	4.18
100	1.40	1.61	5.05

由表 2 可知: CBR (2.5) 与 CBR (5.0) 均随着压实度的增大而增大,且压实度越大, CBR 增长的越快,粉煤灰颗粒接触的更紧密,颗粒间的空隙更小,颗粒间的嵌挤作用更明显,因此贯入杆每贯入单位长度受到的阻力更大,所以压实度越大, CBR 越大;在相同压实度下, CBR (5.0) 均大于 CBR (2.5),由于纯粉煤灰颗粒间黏聚力较小,且密度相对较轻,试件经过泡水 4 d 后,最表层的一小部分粉煤灰颗粒悬浮于试件表层,没有硬化团聚,因此表层强度偏小,越往试件内部,水对颗粒间的作用力的影响越弱,受到的影响越小,所以,相同压实度下 CBR (5.0) 大于 CBR (2.5);随着压实度的增大,膨胀率从 2.94% 增长到 5.05%,由于压实度增大,单位体积内粉煤灰颗粒越多,且颗粒间隙越小,颗粒间隙抵消掉的颗粒膨胀也越小,因此,压实度越大,膨胀也越明显;公路路基设计^[6]中,三、四级公路下路堤填料的最小 CBR 要达到 2%,该试验中,粉煤灰最大 CBR 为 1.61%,因此,从 CBR 角度考虑,该粉煤灰不能直接用于路堤填筑,需要进行改良或其他处理才可以使用。

2.2 压实度对回弹模量的影响

回弹模量是材料承受竖向应力与回弹变形的比值,是评价路基填料抵抗竖向变形能力的重要指标,也是路面结构设计时影响路面厚度比较敏感的参数,本文对粉煤灰分别在压实度为 90%、92%、95%、97%、100% 时进行回弹模量试验,回弹模量、压缩模量见表 3,回弹变形见图 2。

由表 3 可知,回弹模量与压缩模量对压实度的变化比较敏感,随着压实度增大,回弹模量与压缩模量增大,回弹模量与压缩模量的增长幅度也在增大,压实度 97% 时比 95% 的回弹模量增大 26.3%,压缩模量增大 45.5%,压实度 100% 时比 97% 的回弹模量增大 43.7%,压缩模量增大 55.7%,压实度从 95% 增大到

表 3 不同压实度粉煤灰回弹模量试验结果

压实度/%	回弹模量/kPa	压缩模量/kPa
90	47 199	27 667
92	49 826	31 399
95	54 119	38 993
97	68 329	56 909
100	98 217	88 586

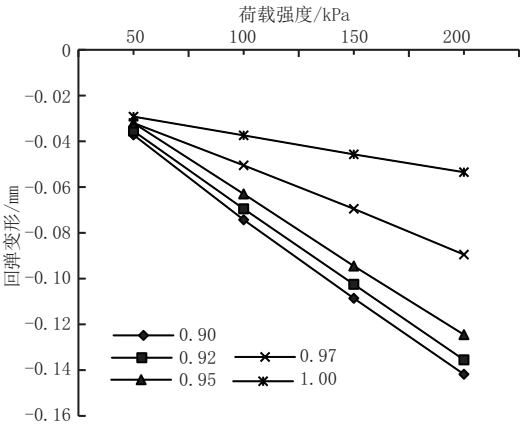


图 2 不同压实度粉煤灰回弹变形随垂直压力变化曲线

100% 过程中,回弹模量与压缩模量增大较快,100% 时达到最大值。沥青路面设计中^[7],极重交通条件下路基顶面回弹模量要求不小于 70 000 kPa,特重交通条件下不小于 60 000 kPa,重交通条件下不小于 50 000 kPa,高速公路与一级公路要求上路床压实度不小于 96%,二级公路不小于 95%,三、四级公路不小于 94%,由此可见,该粉煤灰不适合用于高速公路与一级公路极重交通下的路床填料,如要使用,就需要提高压实度,但在施工中压实度在 97% 以上再增高将会带来成本的极大增加,工程中除了提高压实度也可以考虑对粉煤灰进行改良来提高回弹模量。二级及二级以下公路重交通条件下,该粉煤灰压实度达到路基设计规范值就可直接用于路床的填筑,不需要改良。

回弹变形是加载变形与卸载变形的差值,由图 2 可知,不同压实度条件下,随着竖向荷载增大,回弹变形随竖向荷载增大而增大,成线性相关,且相关性较好。各级荷载下,回弹变形随压实度增大而减小,压实度在 90%、92%、95% 时,3 条线比较贴近,回弹变形减小幅度不是特别明显,压实度 97%、100% 时,回弹变形减小比较明显,减小幅度增大,线条间距拉大。由此可见,增大压实度(尤其是 95% 以上时)是提高粉煤灰填料路基抗变形能力非常有效的一种手段,也是提高道路质量与寿命非常重要的方法。

2.3 压实度对剪切强度的影响

剪切强度是评价路基填料抵抗剪应力大小的重

要指标,抗剪强度不是定值,随着垂直正应力或者围压的变化而变化,因此采用内摩擦角和黏聚力表征抗剪强度大小,本文对粉煤灰分别在压实度为90%、92%、95%、97%、100%时进行快剪试验和三轴压缩试验,试验结果见表4。

表4 不同压实度粉煤灰快剪试验与三轴压缩试验结果

压实 度/%	快剪试验		三轴压缩试验	
	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
90	26.24	42.02	26.85	30.58
92	26.78	46.37	27.16	31.10
95	27.91	52.33	27.94	32.08
97	29.28	58.69	29.37	32.64
100	31.46	65.87	31.65	33.87

通过快剪试验与三轴压缩试验都可以得出材料的内摩擦角和黏聚力,但两个试验的原理不同,快剪试验是通过直接的剪切力破坏来测得抗剪强度,三轴压缩试验是通过竖向压应力破坏圆柱体试件来间接地测出抗剪强度,所以同种材料用两种试验测得的内摩擦角和黏聚力也有差别。由表4可知,随着压实度增大,内摩擦角和黏聚力也在增大,这是由于压实度增大,粉煤灰颗粒更密实,颗粒与颗粒贴得更

紧密且接触面积更大,嵌挤作用更明显,在剪切作用下,破裂面产生滑动时颗粒间相互嵌挤产生的咬合力使得摩擦力增大,表现为内摩擦角和黏聚力增大,从而抗剪强度提高。对比两组试验结果可知,内摩擦角和黏聚力随压实度的变化规律相似,内摩擦角的值也比较相近,黏聚力的值相差较大,这是由于内摩擦角和黏聚力都不是直接测试得出,而是通过试件破坏时的两个垂直方向的应力值经过作图间接得出的指标,并且快剪试验与三轴压缩试验在原理与构造上完全不同,所以所得到的实验结果也有差异。在实际工程中,应结合场地条件,地下水文情况,根据实际工况不同选择更加适合的试验方法与参数。

2.4 压实度对耐崩解性能的影响

耐崩解试验中耐崩解时间是指用试验材料制成的立方体试件在完全浸水环境中全部崩解所经历的时间,该指标可以衡量试验材料抵抗水浸分解的能力,时间越长,耐崩解性越强。由于道路路堤经常会受到水浸影响,因此,路基填料的耐崩解性能至关重要。本文对粉煤灰分别在压实度为90%、92%、95%、97%、100%时进行耐崩解试验,试验结果见表5。

表5 不同压实度粉煤灰耐崩解试验结果

耐崩解时间/ min	不同压实度试验读数/mL				
	90%	92%	95%	97%	100%
0	90	92	98	105	110
1	89	91	95	102	108
2	80	83	90	94	101
3	69	76	78	82	90
4	3 min 32 s时全部崩解	3 min 55 s时全部崩解	61	64	72
5	—	—	4 min 6 s时全部崩解	4 min 45 s时全部崩解	63
6	—	—	—	—	5 min 15 s时全部崩解

由表5可知,在0时刻,试验读数随压实度增大而增大,这是由于同体积的粉煤灰试块,压实度越大质量越大,因此试验量筒需要更多的体积产生浮力来抵抗增加的质量。随着压实度增大,粉煤灰试件耐崩解时间增长,这是由于随着压实度增大,粉煤灰颗粒被压缩地越紧密,颗粒间的空隙越小,水浸入空隙所需要的时间就会更长,水浸入空隙后,由于颗粒间接触面增大且越紧密,要使颗粒间产生剥离从而整个试件最后完全崩解需要的时间就越长。路基填料的崩解会造成承载力严重的降低,影响道路质量和行车安全,针对该粉煤灰耐崩解性差的特点,在路堤填筑时,需设置防水隔离层,保证粉煤灰层不被水浸泡以保证道路的安全使用。

3 结 语

粉煤灰作为火电厂排出的主要固体废物,量大且污染环境,将其运用于道路路基的填筑,既可以解决火电厂无处堆放和难以处理的问题,又可以满足路基填筑的材料供应。本文通过对粉煤灰在不同压实度下测定各项性能和力学指标,得出如下结论,供路基设计与填料选择提供参考。

(1)粉煤灰相比一般土质细粒填料(如黄土),液塑限偏高,最优含水率较高,最大干密度较低,材料偏轻,遇水后具有膨胀性,自由膨胀率为7.92%。

(2)粉煤灰CBR随压实度增大而增大,但整体值较低,压实度为100%时CBR(5.0)仅为1.61%,从CBR角度考虑,该粉煤灰不符合路基设计规范中对

路基填料的要求,如需使用可以设置防水隔离层或对粉煤灰进行改良。

(3)粉煤灰回弹模量随着压实度增大而增大,压实度 100% 时达到最大值 98.217 MPa,压实度 95% 时,回弹模量较低为 54.119 MPa,因此,从回弹模量角度考虑,粉煤灰不能作为高速公路与一级公路极重交通下的路床填料,但可以用于二级及二级以下公路重交通条件下的路基填筑。

(4)快剪试验和三轴压缩试验得出的内摩擦角和黏聚力都随压实度的增大而增大,快剪试验抗剪强度比三轴压缩更高,内摩擦角值相近,黏聚力值相差较大,实际工程中,应结合场地条件,地下水文情况,根据实际工况选择试验方法与参数。

(5)粉煤灰的耐崩解时间随压实度增大而增大,压实度 100% 时崩解时间为 5 min 15 s,在水浸环境下粉煤灰颗粒容易分散,颗粒间黏接力较弱。

(6)粉煤灰在最优含水量条件下,力学性能较好,承载力较高,在水浸泡环境下,粉煤灰容易崩解,颗粒容易分散,强度损失较大。纯粉煤灰遇水后没有表现出明显的水化硬化,颗粒间没有明显的黏结现象,没有明显地表现出强度的形成。

参考文献:

[1] 王海波.粉煤灰路用性能及其承载能力研究[D].长沙:湖南大学,2014.
[2] 刘铁军.粉煤灰用作路堤填料的力学特性试验研究[J].粉煤灰综合利用,2018(6):62-65.
[3] 孙恩吉,张兴凯,李全明.火电厂粉煤灰力学特性试验研究[J].中国安全生产科学技术,2015,11(3):29-33.
[4] 刘军,何森,夏炎.粉煤灰作为路基填料的室内外试验研究[J].中外公路,2015,35(2):61-64.
[5] GB/T 1596—2005,用于水泥和混凝土中的粉煤灰[S].
[6] JTG D30—2015,公路路基设计规范[S].
[7] JTG D50—2017,公路沥青路面设计规范[S].

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadbridgeflood@163.com

