

粉煤灰地基土工程性质研究

贾尚星^{1,2}, 周 亮¹

(1. 郑州工业贸易学校, 河南 郑州 450007; 2. 郑州岩土工程勘察设计院, 河南 郑州 450007)

摘 要: 粉煤灰具有不同于一般土的工程性质。通过野外勘探、原位测试和室内试验, 研究结果表明粉煤灰颗粒组成与粉砂相似, 具有孔隙比高、高液限、天然密度低的特点, 不饱和时具有粘聚力; 粉煤灰浸水后其强度显著降低; 用一元线性回归分析方法, 建立的静力触探试验确定粉煤灰地基承载力和变形模量计算公式, 可推广应用。

关键词: 粉煤灰; 物质成分; 工程性质; 线性回归分析; 计算公式

中图分类号: TU441

文献标识码: A

文章编号: 1671-1211(2007)03-0249-03

0 引言

随着经济发展及城市规模的急剧扩大, 土地资源日益紧张, 在城市周边分布的电厂废弃的粉煤灰排放场地的整治利用问题研究显得十分重要。郑州西部城区分布有面积约 18 万平方米的湿排粉煤灰场地, 粉煤灰填冲沟谷形成的堆放场地已 16 年, 地表平坦, 粉煤灰厚 17~21.0 m, 需在该场地上进行工程建设。粉煤灰作为建筑材料研究较多, 而直接在粉煤灰场地上进行工程建设, 可用借鉴的研究资料很少。为了全面掌握这种土的工程性质, 采用野外勘探、原位测试与室内试验相结合的方法, 对其进行分析研究。

1 物质成分特征

1.1 物质化学成分

粉煤灰的化学成分主要由煤中无机物经燃烧后成为灰渣, 其主要成分为硅、铝、铁氧化物及少量的钙、镁、硫化物, 见表 1^[1]。

表 1 粉煤灰的化学成分

单位: %

Table 1 Chemical compositions of powdered coal ash

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	烧失量
范围值	33.9~16.5	5~1.5	0.8~0.7	0~0.2	0.7~0.1	0~0.2	0.7~0.1	1.2~0.9	23.5
平均值	50.6	27.2	7.0	2.8	1.2	0.3	0.5	1.3	8.2

由表 1 可知, 粉煤灰中氧化硅、氧化铝及氧化铁含量占粉煤灰的 85%, 氧化硫及氧化镁的含量较低, 氧化钙含量较低, 属低钙粉煤灰, 无自硬性。

1.2 矿物成分

粉煤灰在形成过程中经历了分解、烧结、熔融及冷却的过程。冷却后的粉煤灰可分为玻璃体及晶体矿物两大类。其矿物成分见表 2。

表 2 粉煤灰的矿物组成

单位: %

Table 2 Mineral components of powdered coal ash

矿物名称	石英	莫来石	赤铁矿	磁铁矿	玻璃体
范围	0.9~18.5	2.7~34.1	0~4.7	0.4~13.8	50.2~79.0
均值	8.1	21.2	1.1	2.8	60.4

1.3 颗粒组成

测定粉煤灰粒径时, 对于 >0.075 mm 的颗粒用筛分析, <0.075 mm 的颗粒用比重计法。本次测定粉煤灰颗粒组成见表 3^[2]。

表 3 粉煤灰的颗粒组成统计分析

Table 3 Grain size in the powdered coal ash

粒径组	2~0.5/ mm	0.5~0.1/ mm	0.1~0.075/ mm	0.075~0.005/ mm
样本容量	10	10	10	10
分布区间	3.9~23.1	8.3~19.0	35.3~52.0	20.4~41.3
平均值	13.8	14.8	41.5	29.9

从测定结果可以看出, 粉煤灰颗粒组成主要与粉砂相似, 不含粘粒组分, 因此粉煤灰具有粉砂的某些工程性质。

粉煤灰的基本物理力学性质指标按《土工试验规程》(GB/T50023—1999) 要求测定, 结果见表 4。

收稿日期: 2006-12-19; 改回日期: 2007-01-08

作者简介: 贾尚星 (1963-), 男, 国家注册岩土工程师, 水文地质与工程地质专业, 从事岩土工程勘察与教学工作。E-mail: gxianmei@sina.com

表 4 粉煤灰物理性质指标

Table 4 Physical properties of the powdered coal ash

指 标	含水量 $\omega/\%$	天然重度 $\rho/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	比重 G_s	孔隙 比 e	饱和度 $S_r/\%$	液限 $\omega_l/\%$	干重度 $\rho_d/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
样本容量	16	16	16	16	16	16	16
分布区间	22.3 ~ 68.8	11.7 ~ 14.9	2.15 ~ 2.32	1.015 ~ 1.738	42.3 ~ 98	35.0 ~ 52	7.71 ~ 8.84
平均值	46.1	13.4	2.19	1.413	73.4	49.0	8.24

2 物理性质

2.1 比重

本场地粉煤灰的比重介于 2.15 ~ 2.32 之间,与正常沉积土相比,其比重小得多,主要由于粉煤灰具有相当多的空心玻璃微珠。

2.2 孔隙比

粉煤灰的孔隙比一般在 1.015 ~ 1.738 之间,变化范围很大,比一般正常土孔隙比大 1.5 ~ 2 倍。究其原因因为粉煤灰中含有形状不规则的玻璃体颗粒,颗粒中发育大量的孔穴。

2.3 液限

粉煤灰的液限范围宽,一般 30.3% ~ 52%,与砂性土(16% ~ 23%)相比,大很多,与粘性土相近。这是由粉煤灰孔隙相对发育造成,颗粒愈细,熔渣状颗粒愈多,孔隙愈发达,其液限就大,这是粉煤灰所特有的。

3 力学性质

3.1 抗剪强度

土的抗剪强度由土的内摩擦力和内聚力两部分组成。粘性土颗粒细小,含较多亲水矿物,粒间主要由结合水连接和胶接连接,抗剪强度取决于粒间连接强度;砂土一般无连接,颗粒粗大,抗剪强度主要决定于内摩擦力,包括粒间相对滑动的阻力、滚动阻力和土粒间咬合力^[3]。粉煤灰虽然从颗粒组成上看像粉砂,但由于颗粒表面有大量小孔隙,粉煤灰同时具有砂土和粘性土的两种特性,即内聚力和内摩擦力。

采用快剪方法对 16 组原状粉煤灰土样进行直剪试验,测定粉煤灰抗剪强度指标。测定结果粉煤灰的内摩擦角平均值 27°,内聚力 7.1 kPa,与轻型标准击实粉煤灰相比 φ 值(29° ~ 36°)和 c 值(15 ~ 20 kPa)低;与本地区粉土相比 φ 值(20° ~ 28°)高, c 值(10 ~ 20 kPa)低。表明粉煤灰力学性质介于粉细砂与粉土之间。通常认为低钙粉煤灰颗粒较粉土粗,不具粘聚力,但从现场可见由粉煤灰形成的直立达 12.0 m 陡坎,证明粉煤灰具有一定的粘聚力。这是因为粉煤灰颗粒中有大量的熔渣状颗粒,孔隙发育,易于保存水份,使粉

煤灰含水量保持在最佳含水量附近。若含水量达到饱和或绝对干燥情况下,内聚力将消失。

3.2 承载力特征值与压缩性

3.2.1 静力载荷试验

本次采用 JCQ-503A 型静力测试仪,试验承压板选择 0.5 m² 圆型承压板,测试坑深 1.0 m,静力载荷试验结果见表 5。通过试验测定粉煤灰承载力特征值在 90 ~ 150 kPa 之间,压缩变形模量 8.9 ~ 14.5 MPa,荷载—沉降(Q—s)曲线出现陡降段,沉降不稳定结束试验,三点沉降量 17.73 ~ 24.01 mm。均出现比例界线,按比例界线值确定承载力特征值。

表 5 静力载荷试验成果表

Table 5 Data from static load testing

点号	极限荷载 /kPa	比例界线 /kPa	承载力特征值 f_{ak}/kPa	变形模量 E_s/MPa
1	180	90	90	8.9
2	240	120	120	11.0
3	300	150	150	14.5

3.2.2 标准贯入试验和静力触探试验

为了原位测试资料的对比分析,标准贯入试验和静力触探试验点选在距静力载荷试验点 2.0 m 处,测试结果见表 6。

表 6 标准贯入试验和静力触探测试结果表

Table 6 The injection test and static contact test

试验方法	标准贯入试验	静力触探试验
样本容量	61	38
范围值	3 ~ 8	1.85 ~ 3.03
平均值	4.5	1.66
承载力特征值 f_{ak}/kPa	105 ~ 210	110 ~ 154

3.2.3 静力触探试验与静力载荷试验关系

静力触探试验较静力载荷试验具有成本低、速度快等特点。利用静力触探试验无法直接确定地基土的承载力特征值和变形模量。目前为了利用静力触探确定地基土的承载力和变形指标,国内外都是根据对比试验结果提出经验公式,以解决生产上的应用问题。建立经验公式的主要途径是将静力触探试验结果与载荷试验求得的比例界限值进行对比,并通过对比数据的相关分析得到经验公式^[4]。相关分析的回归模式选用多种模式进行回归分析,其中一元线性回归以剩余均方差最小者为最佳拟合,并进行显著性检验。

$$Y = a + bx$$

①

根据静探试验和静力载荷试验资料可建立如下回归经验公式,显著检验结果②式 $r = 0.948$,③式 $r = 0.956$,相关性较好。

$$f_{ak} = 40q_c + 13.8 \quad (2)$$

$$E_0 = 3.79q_c + 1.35 \quad (3)$$

按建立的经验公式计算的地基土承载力特征值和变形参数见表7。

表7 静探试验公式与静载荷试验结果对比表

Table 7 The static contact and load testings

试验点号	29	33	70
锥尖阻力 q_c /MPa	1.85	2.80	3.03
静载荷试验 f_{ak} /kPa	90	120	150
按②计算 f_{ak} /kPa	88	125.8	145.8
误差/%	2.2	4.8	2.8
静载荷试验 E_0 /MPa	8.7	11.0	14.5
按③式计算 E_0 /MPa	8.4	11.96	13.86
误差/%	-3.9	8.7	-4.4

4 湿陷性及水稳定性

4.1 湿陷性

湿陷性的测定是在探井中采取原状土样,在室内进行固结试验,试验方法采用双线法,测定结果表明粉煤灰地基土湿陷系数均 <0.015 ,不具湿陷性。

4.2 水稳定性

压实的粉煤灰浸水后其强度将明显降低,粉煤灰浸水后强度降低,通常以浸水前后的强度比即软化系数来表示,本次在工程现场对长期浸水和非长期浸水区采用静力触探试验测定软化系数,测定结果见表8。

表8 静力触探试验测定软化系数

Table 8 Softening coefficient in static contact test

状态	比贯入阻力 P_s /MPa	地基承载力 f_{ak} /kPa	压缩模量 E_s /MPa
未浸水	1.16 ~ 1.80	85 ~ 110	3.5 ~ 6.3
浸水	0.56 ~ 1.12	65 ~ 85	2.0 ~ 3.5
软化系数范围值	0.48 ~ 0.62	0.76 ~ 0.77	0.56 ~ 0.57
软化系数平均值	0.55	0.77	0.57

从测定结果分析,粉煤灰浸水后强度显著降低,降低33%,压缩模量降低43%。另外,在未浸水区,0~0.5 m深度内比贯入阻力 $P_s = 1.66$ MPa,5.0~7.0 m深度内比贯入阻力 $P_s = 2.14$ MPa,7.0~17.0 m深度内比贯入阻力 $P_s = 2.78$ MPa,17~20.0 m深度内(地下水位以下)比贯入阻力 $P_s = 1.24$ MPa。同样表明浸水的粉煤灰强度明显降低,软化系数为0.44,强度降低56%。

上述两种测试结果表明,粉煤灰浸水后强度降低明显,与粉煤灰颗粒组成及孔穴发育颗粒有关。因此,在地基基础设计时应采取相应的防水措施,避免地基强度降低,产生不均匀变形对工程产生不良后果。

5 结论

(1) 粉煤灰具有孔隙发育、天然密度、干密度低等特点,这与粉煤灰的物质组成及颗粒孔穴发育有关。

(2) 粉煤灰具有较好的强度,因粉煤灰中熔渣状颗粒孔隙发育,易保持最优含水量,使粉煤灰具有一定的粘聚力。

(3) 粉煤灰的水稳定性较差,在工程设计时应采取防水措施。

(4) 通过回归分析,建立的用静力触探试验计算承载力特征值和变形模量公式,可在粉煤灰地基勘察中应用。

参考文献:

- [1] 王福元,等.粉煤灰利用手册[M].北京:中国电力出版社,2004.
- [2] 贾尚星,等.郑州启福花园场地岩土工程勘察报告[R].河南:郑州岩土工程勘察设计院,2005.
- [3] 唐大雄,等.工程岩土学[M].北京:地质出版社,1999.
- [4] 常士骧,等.工程地质手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1992.

Analysis of Engineering Properties of Powdered Coal Ash

JIA Shang-xing^{1,2}, ZHOU Liang¹

(1. Zhengzhou Industry Trade School, Zhengzhou, Henan 450007; 2. Zhengzhou Geotechnical Investigation & Design, Zhengzhou, Henan 450007)

Abstract: The powdered coal ash is different with ordinary soil, with high porosity ratio, high liquefaction threshold, and lower density, which are shown in field investigation, measurement in situ, and experiment indoors. The static contact test is carried out on its foundation and linear regression analysis is done for the data, the model from which is useful in other places.

Key words: powdered coal ash; composition; engineering feature; linear regression analysis; formula