

# 粉煤灰在建筑工程地基处理中的应用

郭志强 王文东 刘景言

(机械工业部第四设计研究院, 洛阳 471039)

**【摘要】** 介绍了粉煤灰在建筑工程地基处理中的应用工程实例, 通过对不同配合比的二灰土试样的物理、力学性能分析, 确定二灰土垫层的最佳配合比。在现场进行了最佳配合比的压实试验。现场静载试验结果表明, 该方法是成功的, 具有显著的经济效益, 值得推广。

**【关键词】** 粉煤灰; 二灰土垫层; 最佳配合比; 地基处理

**【中图分类号】** TU 472

## Application of Flyash in Building Ground Treatment

**【Abstract】** A project example in which flyash is used in ground treatment is introduced. The optimum mixture ratio of lime-flyash-soil cushion is determined through the analysis of physical and mechanical properties of lime-flyash-soil samples with different mixture ratios. Field compaction test is done under the optimum mixture ratio. Field bearing tests show that this treatment method is successful. Lime-flyash-soil cushion is prominently economical and worth popularizing.

**【Key words】** flyash; lime-flyash-soil cushion; optimum mixture ratio; ground treatment

## 0 引言

随着经济建设的发展, 粉煤灰的排放量越来越大, 粉煤灰的综合利用日益受到人们的重视, 粉煤灰在建材、市政、道路、冶金等方面的利用已取得了一定的成果。在国外, 粉煤灰作为地基材料已应用多年, 但在国内建筑工程地基处理中的应用还比较少。笔者在一些工程中做了粉煤灰作为地基材料的应用研究工作, 并取得满意的效果。

## 1 工程概况

洛阳某电厂  $2 \times 135$  MW 机组技改工程, 该厂投产多年, 排放大量粉煤灰, 为了变废为宝, 静化环境, 主厂房拟采用二灰土垫层进行地基处理。

## 2 场地岩土工程条件

据该项目的岩土工程勘察报告, 该场区地貌属河流 II 级阶地, 为非自重湿陷性黄土场

地, 地基的湿陷等级为 I 级, 地基土主要由人工填土、第四纪冲积形成的黄土状粉质粘土、粉土, 各土层的特征如下:

①<sub>1</sub> 填土: 主要为建筑垃圾, 分布不均, 厚度  $0 \sim 0.8$  m。

①<sub>2</sub> 素填土: 以粉质粘土和粉土为主, 含少量砖粒、炭末等, 结构性差, 厚度  $0 \sim 2.5$  m。

② 黄土状粉质粘土及粉土: 分布范围广, 厚度大, 埋藏浅, 强度较高, 工程性能较好, 在该层中未发现软弱夹层, 可作为持力层。

③ 黄土状粉质粘土及粉土: 分布范围广, 厚度为  $2.0 \sim 6.0$  m, 强度及压缩模量较低, 为相对软弱下卧层。

④ 黄土状粉质粘土及粉土: 分布范围广, 厚度为  $2.4 \sim 7.7$  m, 强度及压缩模量较高。在勘探深度  $33.20$  m 范围内未见地下水, 设计和施工可不考虑地下水的影响。

地基土主要物理力学性质指标统计见表1。

表1 地基物理力学性质指标统计表

| 土层          | 天然含水量<br>$w/\%$ | 天然重度<br>$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$ | 天然孔隙比<br>$e$ | 塑性指数<br>$I_p$ | 压缩模量<br>$E_s/\text{MPa}$ |            |            | 地基土承载力标准值<br>$f_k/\text{kPa}$ |
|-------------|-----------------|--|--------------|---------------|--------------------------|------------|------------|-------------------------------|
|             |                 |  |              |               | $E_{s100}$               | $E_{s200}$ | $E_{s300}$ |                               |
| ②黄土状粉质粘土及粉土 | 21.9            | 18.7   | 0.769        | 12.0          | 11.1                     |            |            | 150                           |
| ③黄土状粉质粘土及粉土 | 24.7            | 17.8   | 0.897        | 11.3          | 9.0                      | 11.5       |            | 140                           |
| ④黄土状粉质粘土及粉土 | 23.3            | 18.7   | 0.792        | 11.9          | 12.7                     | 14.8       | 16.0       | 190                           |

### 3 原材料物理化学性质分析

#### 3.1 粉煤灰

粉煤灰是一种以硅、铝氧化物为主的人工火山灰质材料，化学成份随着煤种、燃烧工况

和收尘方式不同而变化<sup>[1]</sup>。粉煤灰采用该厂排放的粉煤灰，排放形式为湿排。粉煤灰的化学成份见表2。

表2 粉煤灰化学成份质量分数一览表

| $w(\text{SiO}_2)/\%$ | $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/\%$ | $w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$ | $w(\text{CaO})/\%$ | $w(\text{MgO})/\%$ | $w(\text{SO}_3)/\%$ | $w(\text{TC})/\%$ | $w(\text{Loss})/\%$ |
|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------|---------------------|
| 47.83                | 6.32                          | 27.77                         | 2.52               | 0.92               | 0.40                | 8.85              | 10.85               |

粉煤灰的天然含水量为45.2%，天然状态下松散密度为7.94 kN/m<sup>3</sup>，松散干密度为5.46 kN/m<sup>3</sup>。

#### 3.2 石灰

石灰中CaO与MgO的质量分数为83.8%，使用时把未消解的残渣过筛排掉。

#### 3.3 土料

采用黄土状粉质粘土，塑性指数为14.4，土中Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>的含量小于0.3%。

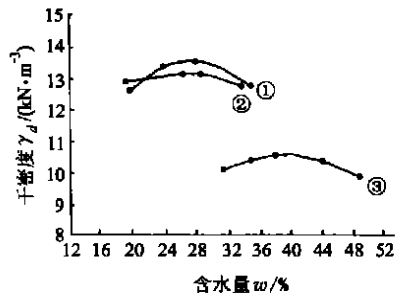
#### 3.4 作用机理

该厂排放的粉煤灰属硅铝型粉煤灰，不具备独立硬化能力，只有在加入一定的水和石灰时，才能激发其活性，发生火山灰反应。石灰是二灰土混和料中的主要碱性激发剂。

### 4 室内工作试验

在室内进行配合比为  $m(\text{石灰}):m(\text{粉煤灰}):m(\text{土})=10:30:60$  或  $12:36:52$  及  $m(\text{石灰}):m(\text{粉煤灰})=20:80$  的二灰击实试验，比值为干质量比，不同配合比的轻型击实试验曲线见图1。

从上述击实试验曲线可看出，随着粉煤灰



①  $m(\text{石灰}):m(\text{粉煤灰}):m(\text{土})=10:30:60$   
②  $m(\text{石灰}):m(\text{粉煤灰}):m(\text{土})=12:36:52$   
③  $m(\text{石灰}):m(\text{粉煤灰})=20:80$

图1 轻型击实试验曲线图

含量的增加，最优含水量亦增大，最大干密度减小。随着粉煤灰含量的增加，干密度与含水量的关系曲线变得比较平缓，说明达到同样的干密度，含水量允许在较大范围内变化，这样在施工中易于控制。

不同配合比下的最大干密度、最优含水量见表3。

将室内轻型击实试验制作的不同压实系数的试样，埋入土中进行自然养护7d、90d后的无侧限抗压强度见表4。

表3 击实试验结果表

| 配合比<br>$m(\text{石灰}):m(\text{粉煤灰}):m(\text{土})$ | 击实仪类型 | 最大干密度<br>$\gamma_{d\max}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$ | 最优含水量<br>$w_{\text{op}}/\%$ |
|---|-------|---|-----------------------------|
| 10:30:60  | 轻型    | 13.65   | 26.85                       |
| 10:30:60  | 重型    | 15.00   | 24.00                       |
| 12:36:52  | 轻型    | 13.20   | 27.80                       |
| 12:36:52  | 重型    | 14.35   | 26.30                       |
| 20:80:0   | 轻型    | 10.60   | 39.23                       |

表4 不同配合比、不同压实系数、不同龄期无侧限抗压强度表

| 配合比<br>$m(\text{石灰}):m(\text{粉煤灰}):m(\text{土})$ | 压实系数<br>$\lambda_c$ | 无侧限抗压强度 $R/\text{MPa}$ |       |
|---|---------------------|------------------------|-------|
|   |                     | 7 d                    | 90 d  |
| 10:30:60  | 0.930               | 0.724                  | 1.730 |
| 10:30:60  | 0.980               | 1.168                  | 2.785 |
| 12:36:52  | 0.955               | 0.997                  | 2.472 |
| 20:80:0   | 0.980               | 1.249                  | 3.114 |

从表4可看出,在压实系数接近的情况下,随着石灰、粉煤灰含量的增加,同龄期的强度增大,试样的后期强度比早期强度增加幅度大。同一配合比,试样强度随着压实系数的增大而增大。10:30:60配合质量比的二灰土试样,在压实系数为0.980时,其7 d强度已达1.168 MPa,强度较高,可满足使用要求,该配合比石灰用量小,比较经济,施工时只要控制好压实系数即能满足要求。由于试样全封闭埋在湿土中,而二灰土属气硬性材料,所以其试样与后来现场试验中暴露在空气中的相比,其强度明显偏小。

### 5 现场压实试验

在现场长17.5 m、宽7.5 m、深1.8 m的试坑内进行压实试验,现场压实采用室内试验确定的最佳配合质量比10:30:60进行,碾压采用18 t的振动压路机,压路机行驶速度为2.0 km/h。由于振动压路机压实能量大,施工控制采用室内重型击实试验的结果,含水量控制在最优含水量-4%~+2%的范围内。现场压实试验分9层碾压,不同碾压遍数与各层的平均干密度曲线见图2。

碾压3、6、8、10遍时的干密度平均值分别为

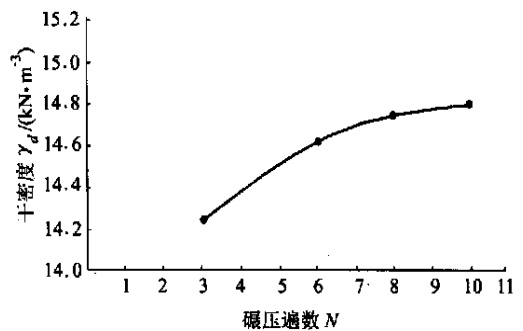


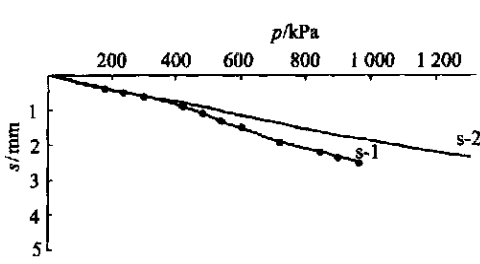
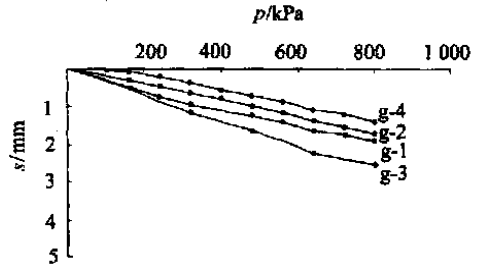
图2 碾压遍数与干密度曲线图

14.25  $\text{kN}/\text{m}^3$ 、14.62  $\text{kN}/\text{m}^3$ 、14.75  $\text{kN}/\text{m}^3$ 、14.80  $\text{kN}/\text{m}^3$ ,其压实系数分别为0.950、0.975、0.983、0.987。施工时,由于二灰的比例偏低,因此造成干密度偏大。从图2可看出,碾压遍数超过8遍后,干密度随碾压遍数的变化比较小,因此在大面积施工时,碾压遍数控制为8遍。

### 6 现场静载试验

静载试验采用圆形压板,压板面积为0.5  $\text{m}^2$ 、直径798 mm。在试验区,二灰土垫层施工完后12 d,进行两个点的静载试验,其静载试验曲线见图3。

在工程区,大面积施工完后15 d进行了4个点的静载试验,其静载试验曲线见图4。

图3 试验区载荷试验  $p-s$  曲线图图4 工程区载荷试验  $p-s$  曲线图

从上述曲线可看出,二灰土垫层的沉降均较小。主要是由于二灰土垫层暴露于空气中十几天后,其上部形成一硬壳层,强度形成较快。试验区的垫层均未压至破坏,若取最后一

级荷载做为极限荷载,取极限荷载的  $1/3$  为承载力基本值,则基本值不小于  $350 \text{ kPa}$ ,工程区的静载试验,压到设计荷载的  $2$  倍多一级。各点静载试验的详细情况见表 5。

表5 静载试验结果表

| 试验点位置 | 试验点号 | 最大加荷量<br>$p/\text{kPa}$ | 最大沉降量<br>$s/\text{mm}$ | 最大荷载下<br>$s/b/\%$ | 对应最大荷载下的<br>变形模量 $E_0/\text{MPa}$ |
|-------|------|-------------------------|------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| 试验区   | s-1  | 960                     | 2.51                   | 0.314             | 218                               |
| 试验区   | s-2  | 1300                    | 2.34                   | 0.293             | 316                               |
| 工程区   | g-1  | 800                     | 1.92                   | 0.241             | 237                               |
| 工程区   | g-2  | 800                     | 1.72                   | 0.216             | 265                               |
| 工程区   | g-3  | 800                     | 2.54                   | 0.318             | 179                               |
| 工程区   | g-4  | 800                     | 1.40                   | 0.175             | 325                               |

由于二灰土垫层具有较高的粘结强度,其性质接近于软质岩石的性质,在设计值时,对其标准值不再进行深度、宽度修正。从上述结果可看出,二灰土垫层的承载力设计值可用得再高一些,可达到  $400 \text{ kPa}$  以上。

## 7 结论

工程实践证明,采用二灰土垫层进行地基处理,具有重要的应用价值和推广意义,尤其是在黄土地区电厂的扩建工程中,可以做到废物利用,减少粉煤灰对环境造成的污染。二灰土垫层具有强度高、成本低的优点,同传统 $3:7$

灰土质量比相比,可节约石灰用量的  $75\% \text{①}$ 。二灰土垫层的渗透系数相对较大,宜在垫层的最后一层施工时,用水泥代替粉煤灰,采用水泥土垫层,一方面可起防水作用,另一方面强度又不降低。

## 参 考 文 献

- 凌逸飞等. 压实粉煤灰地基的试验研究和应用. 工业建筑, 1992(3): 17~22

收稿日期: 2002-03-14

① 刘利民等. 二灰土在地基处理中的应用研究. 地基基础工程. 1998(3): 14~18