

# 粉喷桩固化剂新型材料强度的影响因素

## Factors affecting strength of new material of solidification in DJM pile

梁伟平

黄宏伟

陆善飞 支国华

(上海普陀区住宅发展局, 210333) (同济大学地下建筑与工程系, 上海, 200092) (上海西部企业集团, 200063)

**文 摘** 介绍一种新型材料与水泥的混合物作为粉喷桩固化剂的混合料加固土, 分析了其无侧限抗压强度的主要影响因素, 并得到了几个预测强度的回归公式。

**关键词** 粉喷桩, 固化剂, 新型材料。

**中图法分类号** TU 472.36

**作者简介** 梁伟平, 男, 1974 年生, 工学硕士, 主要从事住宅建设管理及新技术、新材料在住宅建设中的应用、推广研究。

*Liang Weiping*

*Huang Hongwei*

*Lu Shanfei Zhi Guohua*

(Putuo house developing bureau of Shanghai) (Dept. of Geotech. Engng., Tongji University, Shanghai 200092) (Shanghai West Group, 200063)

**Abstract** In this paper, mixture of slag and cement used as solidifying agent of DJM pile was studied, then several main factors affecting unconfined compression strength of specimen were analyzed, and some general laws for prediction of unconfined compression strength were obtained.

**Key words** dry jet mixing pile, solidification material, new material.

## 1 前 言

1967 年瑞典人首先提出一种采用生石灰粉与原位软土搅拌形成石灰柱的软土加固法, 即石灰桩法, 这标志着粉喷桩技术的问世<sup>[1]</sup>。日本 1970 年开发了一种类似石灰桩的地基加固方法, 称为 DIM 法, 该法采用水泥、石灰和粉煤灰等粉状加固料作为固化剂<sup>[2]</sup>。上海地区于 1989 年开始引进粉喷法施工工艺, 由于粉喷技术在各项领域软土加固中日益显示出造价低、效果好和安全可靠等优点, 粉喷法施工工艺得到迅速的推广, 加固的工程大部分为工业与民用建筑的基础。然而最近由于粉喷桩复合地基出现事故较多, 上海、南京等地相继暂停该项技术的使用。粉喷桩复合地基事故很大一部分是由于桩身强度不够引起的, 尽管人们通过在水泥加固土中加入一定量的外掺剂来

提高水泥土的强度, 但效果不是十分理想。为了寻找一种既适合粉喷桩复合地基的加固又能大幅度提高桩体强度的加固材料, 本文在控制造价的基础上对粉喷桩的加固材料作了深入的研究。

## 2 试验介绍

### 2.1 土样

试验土样取自上海市西部某地区的第四层灰色淤泥质粘土。本次试验仅对第四层灰色淤泥质粘土进行加固土室内试验研究是因为该层土是上海地区最为典型的深厚软土层, 建筑物的沉降主要是由于该层土的变形引起的, 土的物理力学性质见表 1。为了防止土样水分的减小, 钻孔取样后密封运回试验室, 并在 1~2 天内完成试验。

表 1 试验土的物理力学性质

Table 1 The physics and mechanics properties of experimental soil

| 土质名称    | 含水量<br>$w(\%)$ | 重度<br>$\gamma(\text{kN/m}^3)$ | 比重<br>$G$ | 孔隙比<br>$e$ | 塑限<br>$w_p(\%)$ | 液限<br>$w_L(\%)$ | 塑性指数<br>$I_p(\%)$ | 液性指数<br>$I_L(\%)$ | 压缩模量<br>$E_{s1-2}(\text{MPa})$ | 内摩擦角<br>$\varphi(^{\circ})$ | 抗剪强度<br>$c(\text{kPa})$ | 承载力<br>$f(\text{kPa})$ |
|---------|----------------|-------------------------------|-----------|------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------------|
| 灰色淤泥质粘土 | 50.9           | 17.1                          | 2.75      | 1.43       | 24.4            | 44.5            | 20.1              | 1.32              | 2.2                            | 6.5                         | 8                       | 60                     |

### 2.2 固化剂

固化剂为纯水泥或水泥与新型材料的混合料。水泥为<sup>#</sup>425 普通硅酸盐水泥。新型材料的主要原料来源于工业废料, 其来源广, 批量生产成本低于水泥, 其生产工艺流程图如图 1 所示, 一般水泥厂的粉磨车间经过适当的调整即可满足这种新型材料的生产要求<sup>[3]</sup>。本次试验的新型材料选用了上海宝钢的粒化高炉矿渣为原材料。



图 1 新型材料生产工艺流程图

Fig. 1 Production technological process of the new material

### 2.3 试件的制作与养护

根据混合料固化剂的掺入比及混合料固化剂中新型材料掺入量, 计算水泥和新型材料的用量。例如, 某组试验需加固土的质量为 2kg, 混合料固化剂的掺入比

为 13%, 混合料固化剂中新型材料的掺入量为 60%, 其余为水泥, 则在 2kg 的土样中加入的水泥量为  $2 \times 13\% \times (1 - 60\%) = 0.104\text{kg}$ , 需加入新型材料量为  $2 \times 13\% \times 60\% = 0.156\text{kg}$ 。加固土采用机械搅拌, 人工插捣, 试件制作在  $7.07\text{cm} \times 7.07\text{cm} \times 7.07\text{cm}$  的标准立方试模中, 成型一天后放入标准养护室的室内架上养护, 标准养护室的温度为  $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$ , 相对湿度为 100%。

3 试验结果分析

3.1 混合料加固土与纯水泥加固土强度对比

表 2 两种加固土的无侧限抗压强度对比表

Table 2 Comparison of unconfined compression strength of two types of specimens

| 纯水泥加固土    |                                   | 混合料加固土     |                                   | $\frac{f_{cu2}}{f_{cu1}}$ |
|-----------|-----------------------------------|------------|-----------------------------------|---------------------------|
| 水泥掺入比 (%) | 28 天无侧限抗压强度 $f_{cu1}(\text{MPa})$ | 混合料掺入比 (%) | 28 天无侧限抗压强度 $f_{cu2}(\text{MPa})$ |                           |
| 10        | 0.80                              | 10~ 60     | 2.39                              | 2.99                      |
| 11        | 1.20                              | 11~ 60     | 3.35                              | 2.79                      |
| 12        | 1.22                              | 12~ 60     | 3.64                              | 2.98                      |
| 13        | 1.39                              | 13~ 60     | 3.90                              | 2.80                      |
| 14        | 1.45                              | 14~ 60     | 4.69                              | 3.23                      |
| 15        | 1.51                              | 15~ 60     | 5.00                              | 3.31                      |

3.2 影响加固土强度的主要因素

影响加固土无侧限抗压强度的因素有: 固化剂掺入比, 固化剂中新型材料的掺入量, 养护龄期, 水泥标号, 含水量, 有机质含量, 养护条件及土性等。下面将根据试验得到的结果来分析影响加固土无侧限抗压强度的几个主要因素。

(1) 固化剂掺入比

一般情况下, 水泥加固土的强度随水泥掺入比的增大而增大<sup>[4]</sup>。

图 2 为不同加固土的 28 天无侧限抗压强度随固化剂掺入比的变化曲线图。从图中可以看出, 纯水泥加固土和不同新型材料掺入量的混合料加固土的强度均随固化剂掺入比的增大而增大。图 2 还表明, 当水泥掺入比大于 13% 后曲线较为平缓, 增加水泥掺入比对强度的提高幅度不大, 当水泥掺入比为 10%~ 13% 时, 水泥掺入比每增加一个百分点, 加固土强度平均增长 21.8%, 当水泥掺入比为 13%~ 15% 时, 水泥掺入比每增加一个百分点, 加固土强度平均增长 8.2%。掺入新型材料的混合料加固土的强度随固化剂掺入比的增长有较大幅度的提高, 混合料固化剂中新型材料掺入量为 20% 时, 强度随混合料固化剂的增加而线形增长, 混合料固化剂每增加一个百分点, 加固土强度平均增长 18%。图 2 亦较为直观地反映了当混合料固化剂中新型材料的掺入量小于 60% 时, 新型材料的掺入量越大,

为了较为直观地说明加入新型材料后加固土强度的提高幅度, 表 2 对这两种加固土的 28 天无侧限抗压强度进行了对比。从表中可以看出, 在相同的固化剂掺入比情况下, 固化剂中新型材料掺入量为 60% 的混合料加固土的 28 天无侧限抗压强度是纯水泥加固土的 2.79~ 3.31 倍。根据试验结果, 也得到了在相同的固化剂掺入比情况下, 固化剂中新型材料掺入量为 60% 的混合料加固土的 7 天无侧限抗压强度是纯水泥加固土的 2.79~ 3.50 倍, 14 天无侧限抗压强度是纯水泥加固土的 2.65~ 3.10 倍, 60 天无侧限抗压强度是纯水泥加固土的 2.81~ 3.79 倍。

加固土的强度越高。

(2) 固化剂中新型材料的掺入量

固化剂中新型材料的掺入量是影响加固土强度的一个主要因素。图 3 为加固土的 28 天无侧限抗压强度与固化剂中新型材料掺入量的关系曲线。图中表明, 在不同的固化剂掺入比情况下, 加固土的强度均随固化剂中新型材料的掺入量的增加而线形增加, 这说明新型材料的加入对提高加固土的强度有着重要的作用。

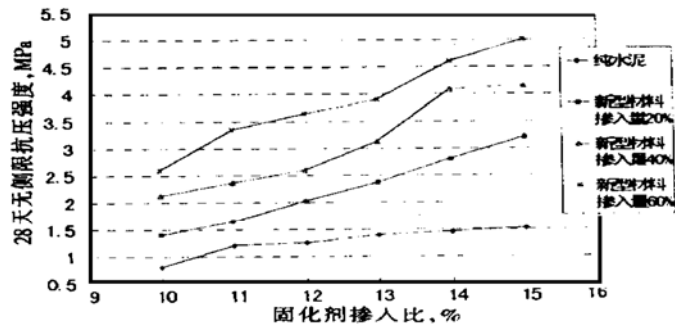


图 2 固化剂掺入比对强度的影响

Fig. 2 The effect of mixing ratio of solidifying agent on strength

(3) 养护龄期

图 4 为不同固化剂掺入比的加固土无侧限抗压强度与养护龄期间的关系曲线。从图中可以看出, 纯水泥加固土和混合料加固土的强度均随养护龄期的增大而提高, 而且两种加固土的强度在养护龄期超过 28 天后仍有明显的增长。纯水泥加固土在龄期达 28 天后其强

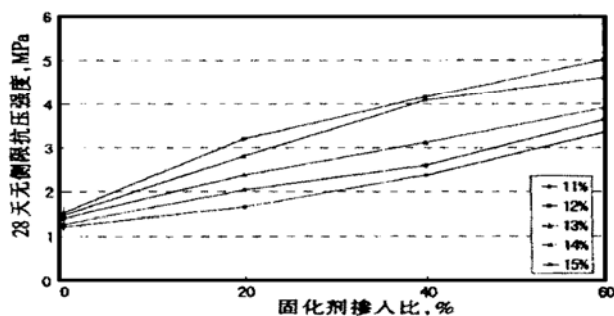


图3 固化剂中新型材料的掺入量对强度的影响

Fig. 3 The effect of mixing ratio new material of on strength

度的增长速率相对缓慢,到龄期60天后基本稳定,而混合料加固土的强度在龄期达28天后继续增长,而且增长幅度较大,到龄期90天后才基本稳定下来。另外,从图中还可以看到,对同样固化剂掺入比的加固土,有新型材料掺入的其早期强度要高于纯水泥加固土,因此这种新型材料不同于以往在水泥加固土中加入的各种早强剂,它不仅能提高水泥加固土的早期强度,而且后期强度也相对提高。

加固土的无侧限抗压强度随养护时间渐增到某一临界后不再增加<sup>[6]</sup>。在实际水泥加固土应用中,比较关心如何用加固土的早期强度预测其最终加固效果。由试验中不同龄期的加固土无侧限抗压强度的试验结果的回归分析,得到在其它条件相同时两个不同龄期加固土的无侧限抗压强度之间大致呈线形关系(图5),其关系如下:

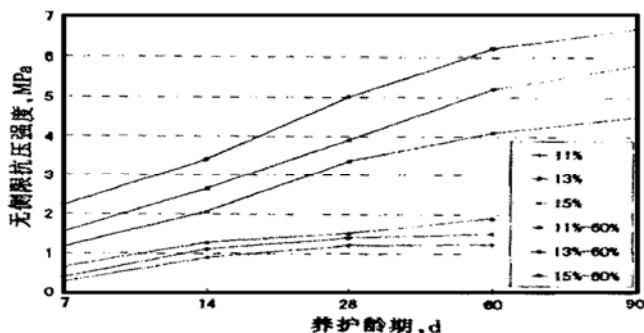
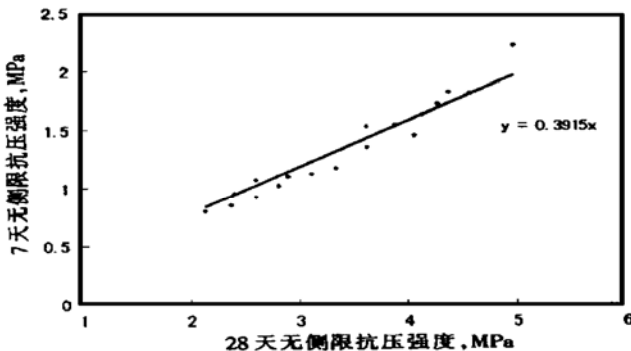


图4 养护龄期对强度的影响

Fig. 4 The effect of curing period on strength

图5 加固土 $f_{cu28}$ 与 $f_{cu7}$ 的关系曲线Fig. 5 Relationship between  $f_{cu28}$  and  $f_{cu7}$ 

$$f_{cu7} = (0.37 \sim 0.44)f_{cu28} \quad (1a)$$

$$\text{回归式为: } f_{cu7} = 0.39f_{cu28} \quad (1b)$$

$$f_{cu14} = (0.61 \sim 0.72)f_{cu28} \quad (2a)$$

$$\text{回归式为: } f_{cu14} = 0.66f_{cu28} \quad (2b)$$

$$f_{cu60} = (1.19 \sim 1.46)f_{cu28} \quad (3a)$$

$$\text{回归式为: } f_{cu60} = 1.33f_{cu28} \quad (3b)$$

$$f_{cu90} = (1.40 \sim 1.75)f_{cu28} \quad (4a)$$

$$\text{回归式为: } f_{cu90} = 1.56f_{cu28} \quad (4b)$$

$$f_{cu90} = (3.66 \sim 4.67)f_{cu7} \quad (5a)$$

$$\text{回归式为: } f_{cu90} = 4.10f_{cu7} \quad (5b)$$

$$f_{cu90} = (2.14 \sim 2.65)f_{cu14} \quad (6a)$$

$$\text{回归式为: } f_{cu90} = 2.33f_{cu14} \quad (6b)$$

$$f_{cu90} = (1.07 \sim 1.35)f_{cu60} \quad (7a)$$

$$\text{回归式为: } f_{cu90} = 1.14f_{cu60} \quad (7b)$$

## 4 结 论

(1) 在水泥中加入这种新型材料后的混合料加固土的强度相对于纯水泥加固土有大幅度提高,提高幅度随总的固化剂掺入比和固化剂中新型材料掺入量的增大而增大。

(2) 这种新型材料的来源广,批量生产成本大大低于水泥;在强度一定的前提下,加固土混合料掺入比要比纯水泥加固土的水泥掺入比少2%~3%,这样将大大节约粉喷桩加固材料用量,混合料固化剂在粉喷桩加固软基中推广使用将会有良好的经济效益和社会效益。

(3) 掺有新型材料的混合料固化剂不仅可以提高加固土的早期强度,而且亦可以提高其后期强度。

(4) 加固土7天、14天、28天、60天、90天龄期时的无侧限抗压强度具有相关关系,可以用不同龄期间的回归关系式来预测加固土的强度。

(5) 有关混合料加固土的抗拉强度和变形模量试验结果见文献5,有关现场试验结果将另文发表。

## 参 考 文 献

- 1 《地基处理手册》编写委员会. 地基处理手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988.
- 2 铁道部第四勘测设计院粉喷手册编译组. 粉体喷射搅拌法技术手册. 1994.
- 3 张 雄等. 高强混凝土第六组份一特殊混合材的制备及应用. 混凝土与水泥制品, 1996(3): 8~10.
- 4 孙立川, 韩 杰. 水泥加固土无侧限抗压强度影响因素分析及预测. 地基处理, 1994, 5(4): 31~37.
- 5 黄宏伟, 梁伟平等. 粉喷桩固化剂新型材料试验与分析. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(1): 111~116.
- 6 Yoshio Suzuki. Deep mixing chemical method using cement as harding agent. Symposium on soil and rock improvement techniques, Bangkok, 1983.