

# 新型注浆材料加固基坑粉细砂力学性质及影响因素分析\*

Analysis on Mechanical Properties and Influencing Factors of Fine Sand Reinforced by New Grouting Material

胡璇

(陕西铁路工程职业技术学院, 陕西 渭南 714000)

**摘要:** 城市地下工程施工中, 富水基坑边坡粉细砂地层稳定性较差, 易出现涌水、涌砂等地质灾害。为研究富水基坑边坡粉细砂地层加固防渗技术, 室内利用聚氨酯 (PU) 和粉煤灰材料制备了新型 PU/粉煤灰注浆材料, 并对新型注浆材料注浆加固的粉细砂结石体展开了力学试验和细观特征观察。试验结果表明: (1) 养护龄期越长, 结石体的抗压强度则越大。当粉煤灰掺量为 10%、养护龄期为 12 h 时, 结石体的抗压强度最大, 达到 6.89 MPa; (2) 浸水后注浆结石体的抗压强度明显变低, 试件的抗压强度与浸水时间之间成负指数关系。当浸水时间为 9 d 时, 粉煤灰掺量为 10% 的注浆结石体抗压强度最大, 此时其抗压强度为 3.55 MPa; (3) 含水率越高, 则注浆结石体的内部结构越松散; 而当水解时间达到 9 d 后, 注浆结石体内部产生了大量的裂隙, 结石体内部结构破坏严重, 因此结石体的力学性质变差。

**关键词:** 基坑工程; 富水; 粉细砂地层; 注浆加固; 力学试验; 细观特征

**中图分类号:** TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2023) 03-0013-05

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.03.013

HU Xuan

(Shaanxi Railway Institute, Weinan 714000, China)

**Abstract:** In the construction of urban underground engineering, the stability of silty fine sand stratum on the slope of water rich foundation pit is poor, and geological disasters such as water gushing and sand gushing are easy to occur. In order to study the anti-seepage technology of silty fine sand stratum of water rich foundation pit slope, a new polyurethane (PU) fly ash grouting material was prepared by using PU and fly ash materials indoors, and the mechanical tests and meso characteristics of the silty fine sand stone body reinforced by the new grouting material were carried out. The results show that: (1) the longer the curing age, the stronger the bearing capacity of the stone body. When the content of fly ash is 10% with the curing age at 12 h, the compression strength of the stone body reaches the maximum, reaching 6.89 MPa; (2) The compression strength of the grouted stone becomes lower obviously after immersion, and there is a negative exponential relationship between the compression strength and immersion time. When the soaking time is 9 d, the bearing capacity of grouting stone body with 10% fly ash is the best, and its compression strength is 3.55 MPa; (3) the higher the water content is, the looser the internal structure of the grouting stone body is; when the hydrolysis time reaches 9D, a large number of cracks are produced in the interior of the grouting stone, and the internal structure of the stone is seriously damaged, so the mechanical properties of the stone become worse.

**Keywords:** foundation pit engineering; rich water; silty fine sand stratum; grouting reinforcement; mechanical test; mesoscopic features

\* 基金项目: 陕西铁路工程职业技术学院科研项目, 富水基坑边坡粉细砂地层注浆防渗加固技术研究 (KY2022-47)

作者简介: 胡璇 (1993—), 女, 硕士。主要研究方向: 隧道与边坡。

收稿日期: 2022-06-10

## 0 引言

城市地下工程施工中，富水基坑边坡粉细砂地层稳定性较差，易出现涌水、涌砂等地质灾害，严重威胁了城市地下深基坑工程的安全性<sup>[1-3]</sup>。因此，如何有效加固富水基坑边坡粉细砂地层对于保障城市建设以及人民生命财产安全具有重要意义。

目前，学者们对富水深基坑地层加固展开了多方面的研究。部分学者指出，通过采用设计方案的优化，可以有效降低富水基坑的破坏风险。其中，钢管桩、灌注桩以及多种降水方案是常见的优化手段，能够降低基坑范围内土层的水位高度，达到保护基坑边坡安全的目的。然而，通过优化设计方案提升富水基坑土层的工程性能成本较高，且仅适用于工程建设前期，不能完全满足现场需求<sup>[4-6]</sup>。针对上述问题，我国学者提出可以通过开发新型高效注浆材料实现土层的加固。其中，高聚物注浆材料得到广泛利用，特别是聚氨酯材料、水反应高聚物以及乙烯基环氧树脂等材料，在粉细砂层注浆加固取得了良好的工程应用效果<sup>[7-10]</sup>。

粉煤灰是燃煤电厂排出的主要固体废物，近年来，利用粉煤灰替代水泥或其他成分制备改良注浆材料被推广。一方面，通过在注浆材料中掺入一定量的粉煤灰能够合理改良注浆材料的工程性能<sup>[11-13]</sup>；另一方面，可以实现固体废物粉煤灰的回收利用，绿色环保且降低了工程成本<sup>[14-15]</sup>。

因此，本文室内制备了聚氨酯注浆材料并掺入不同量粉煤灰，制备了新型 PU/粉煤灰珠江材料，并深入研究了养护时间、粉煤灰掺量、浸水时间以及含水率对注浆结石体力学性质和细观特征的影响，为富水基坑粉细砂地层的加固提供了一定的借鉴作用。

## 1 试验设计

### 1.1 原材料

室内制备新型 PU/粉煤灰注浆材料所需要的主要原材料如下：（1）主剂。包括 A 液二苯基甲

烷异氰酸酯和 B 液环氧丙烷聚醚；（2）催化剂。三乙酰胺；（3）扩链剂。1, 4 丁二醇；（4）溶剂。丙酮；（5）粉煤灰。II 级粉煤灰，生产自陕西西安某矿产品有限公司，主要成分如下表 1 所示。此外，本次试验的砂土试样级配曲线如图 1 所示，由图可知，试样属于粉细砂，平均粒径为 0.171 mm，不均匀系数为 1.77，曲率系数为 0.99，比重为 2.71。

表 1 II 级粉煤灰的化学组成  
Table 1 Chemical composition of Grade II fly ash

| 成分   | SiO <sub>2</sub> | CaO   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SO <sub>3</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> |
|------|------------------|-------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|-------------------------------|
| 含量/% | 50.19            | 11.71 | 25.61                          | 5.06                           | 1.80            | 2.18                          |

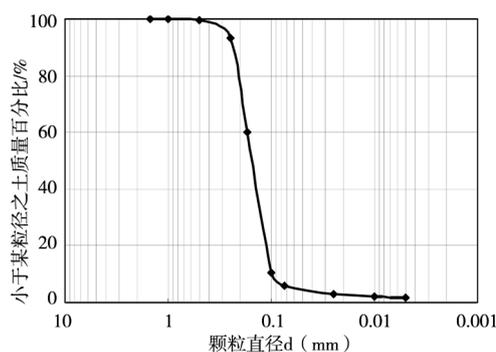


图 1 粉细砂试样级配曲线

Fig. 1 Grading curve of fine sand sample

### 1.2 注浆材料制备

将等量（50 mL）的二苯基甲烷二异氰酸酯（主剂）和环氧丙烷聚醚（主剂）均匀混合，再分别加入 1 mL 的 1, 4 丁二醇（催化剂、扩链剂）、三乙酰胺（催化剂）的辅助剂，再将混合液溶于 1 mL 的丙酮（溶剂）溶液中，反应温度控制在 40 至 50 ℃，制得聚氨酯预聚体，再将预聚体与 1 mL 乳化剂混合配得聚氨酯浆液。最后，取 25 g 聚氨酯浆液材料，再向聚氨酯浆液中加入 II 级粉煤灰，其中，粉煤灰的掺量分别为聚氨酯预聚体质量掺量的 0%、4%、8%、12% 以及 16%，即在聚氨酯浆液中分别加入 0 g、1.0 g、2.0 g、3.0 g 以及 4.0 g 的 II 级粉煤灰材料，制备得到新型 PU/粉煤灰注浆材料。

### 1.3 试验方案

本次试验旨在探讨 PU/粉煤灰注浆材料在富水基坑粉细砂层加固中的应用，本次试验主要从三个角度展开，分别研究了粉煤灰掺量、养护时

## 材料科学

间、浸水时间以及含水率对注浆结石体抗压强度和细观特征的影响。首先, 需要制备不同含水率的粉细砂试样, 且需要控制粉细砂试样的含水率分别为 6%、9%、12% 和 15%; 之后, 需要制备圆柱体的粉细砂试样。通过切割 PVC 管得到多组直径为 5cm、高度为 10 cm 的模具, 将粉细砂试样导入模具中并压密击实后, 再在粉细砂试样中心钻出一个圆柱小孔, 以方便注浆液体的灌注; 再之后, 利用注射器将注浆材料灌注到粉细砂试样的圆柱孔隙中, 分别养护 3 h、6 h、9 h 和 12 h, 得到注浆结石体试样; 最后, 利用 YAW-2000 型万能试验机对注浆结石体试样开展抗压强度力学试验, 并利用显微镜对不同条件下的注浆结石体试样的断面细观特征进行观察。

## 2 试验结果分析

### 2.1 养护时间影响分析

图 3 展示了不同粉煤灰掺量和养护时间条件下注浆结石体的无侧限抗压强度试验结果。由图 2 可知, 养护时间越长, 则注浆结石体的抗压强度高。以粉煤灰掺量为 5% 的试验组为例, 不同养护时间下, 注浆结石体的抗压强度分别为 0.55 MPa、2.65 MPa、5.35 MPa 以及 6.27 MPa。分析认为, 这是由于养护时间越长, 则注浆材料在粉细砂试样中的渗透效果越好, 同时注浆材料的凝结越充分, 因此注浆结石体的抗压强度越高。

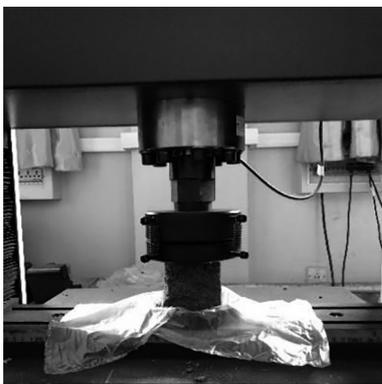


图 2 试样加载示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sample loading

当养护时间比较短时, 注浆结石体的抗压强度随粉煤灰掺量的增大而逐渐增大, 而当养护时

间较长时, 注浆结石体的抗压强度则呈现出先增大后减小的变化趋势。当养护时间为 6 h 时, 不同粉煤灰掺量条件下注浆结石体的抗压强度分别为 0.52 MPa、0.55 MPa、0.73 MPa 和 0.82 MPa, 呈逐渐增大变化趋势; 当养护时间达到 9 h 时, 不同粉煤灰掺量条件下注浆结石体的抗压强度分别为 4.98 MPa、5.35 MPa、5.78 MPa 和 5.69 MPa, 呈先增大后减小的变化趋势。当粉煤灰掺量为 10%、养护时间为 12 h 时, 注浆结石体的抗压强度最大, 可以达到 6.89 MPa。

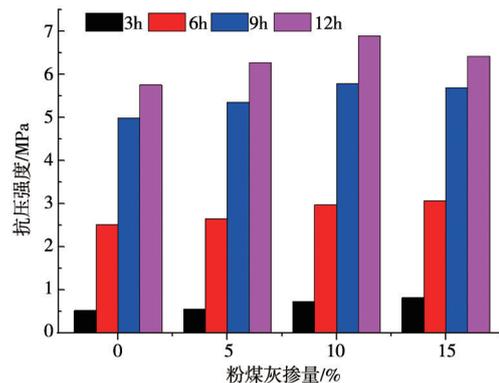


图 3 不同养护时间下结石体抗压强度随粉煤灰掺量变化关系

Fig. 3 The relationship between the compressive strength of the stone body and the content of fly ash under different curing time

### 2.2 结石体水解特征

表 2 展示了不同浸水时间和粉煤灰掺量条件下注浆结石体的无侧限抗压强度试验结果。由表 2 可知, 在相同的粉煤灰掺量条件下, 浸水时间越长, 则注浆结石体的抗压强度越小。以粉煤灰掺量为 5% 的试验组为例, 不同浸水时间下, 注浆结石体的抗压强度分别为 6.27 MPa、5.43 MPa、4.09 MPa 以及 2.91 MPa。分析认为, 这是由于水分会导致注浆结石体内部结构变得松散, 凝胶体被软化, 因此浸水时间越长, 注浆结石体的抗压强度越小。

相同浸水时间条件下, 注浆结石体的抗压强度随粉煤灰掺量均先增大后减小。以浸水时间为 3 d 试验组为例, 不同粉煤灰掺量条件下, 注浆结石体的抗压强度分别为 5.12 MPa、5.43 MPa、5.55 MPa 以及 5.37 MPa。进一步分析在浸水时间和粉煤灰掺量的共同影响下注浆结石体抗压能力的变化规律。由表 2 可知, 当粉煤灰掺量分别为

0、5%、10%以及15%时，以浸水时间为0 d的试样为标准，当浸水时间达到9 d时，注浆结石体的抗压强度衰减率分别为51.65%、53.59%、48.48%以及50.93%。由此可见，当粉煤灰掺量为10%时，浸水对注浆结石体抗压强度的影响最弱，这也表明当粉煤灰掺量为10%时，新型PU/粉煤灰注浆材料的防水性最好，最适合用于富水地层的注浆加固工程。

表2 不同浸水时间、粉煤灰掺量条件下注浆结石体抗压强度  
Table 2 Compressive strength of grouting stones under different immersion time and fly ash content

| 粉煤灰掺量/% | 浸水时间/d | 抗压强度/MPa | 强度衰减率/% |
|---------|--------|----------|---------|
| 0       | 0      | 5.75     | 0       |
|         | 3      | 5.12     | 10.96   |
|         | 6      | 3.77     | 34.43   |
|         | 9      | 2.78     | 51.65   |
|         | 0      | 6.27     | 0.00    |
| 5       | 3      | 5.43     | 13.40   |
|         | 6      | 4.09     | 34.77   |
|         | 9      | 2.91     | 53.59   |
| 10      | 0      | 6.89     | 0.00    |
|         | 3      | 5.55     | 19.45   |
|         | 6      | 4.76     | 30.91   |
| 15      | 9      | 3.55     | 48.48   |
|         | 0      | 6.42     | 0.00    |
|         | 3      | 5.37     | 16.36   |
| 15      | 6      | 4.22     | 34.27   |
|         | 9      | 3.15     | 50.93   |

### 2.3 含水率影响

图4为不同含水率下注浆结石体试件无侧限抗压强度变化曲线。由图4可知，注浆结石体试件的含水率越大，则其抗压强度越小。随着含水率的增大，注浆结石体的抗压强度呈现出线性递减的变化关系，不同含水率下（6%、9%、12%和15%）注浆结石体的抗压强度分别为6.89 MPa、5.52 MPa、4.13 MPa以及2.88 MPa。分析认为，当粉细砂试样的含水率越高，注浆材料无法有效渗透到空隙中，同时水分的存在也会导致注浆材料与粉细砂颗粒之间不能紧密胶结，因此注浆结石体试件的抗压强度随含水率的增大而逐渐降低。

### 2.4 细观特征

室内利用光学显微镜对破坏后的注浆结石体进行细观特征观察，选取粉煤灰掺量为10%，含

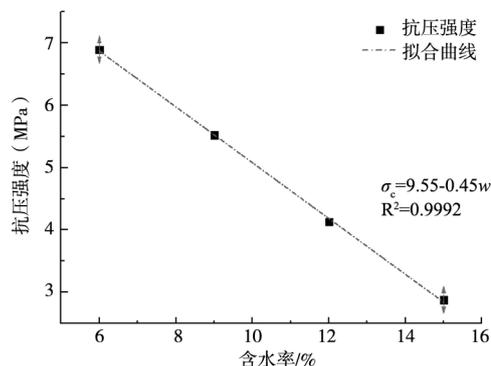
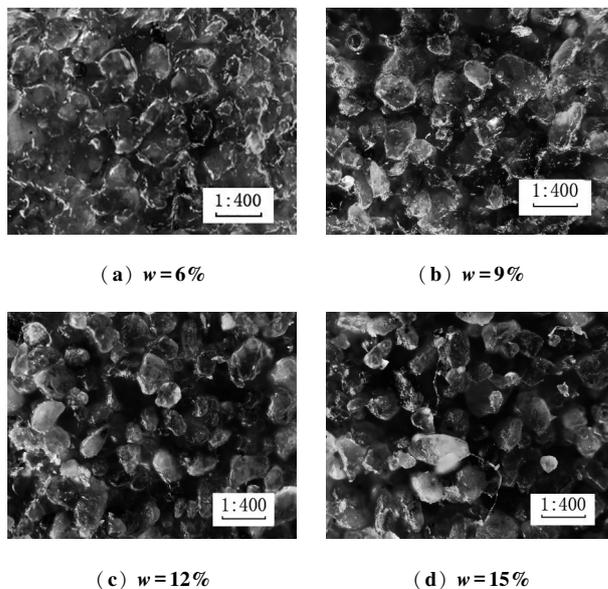
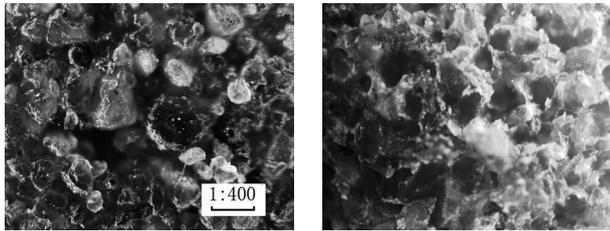


图4 不同含水率下结石体抗压强度变化曲线  
Fig. 4 Change curve of compressive strength of stone body under different moisture content

水率分别为6%、9%、12%和15%的试样以及“10%粉煤灰+浸水9 d”、“0%粉煤灰+浸水9 d”的试样进行探讨。由图5可知，随着含水率的逐渐增加，注浆结石体的颜色逐渐变深。同时，我们也可以观察到，当含水率较低时，粉细砂颗粒之间明显存在大量的胶结物质填充，这表明粉细砂颗粒之间被注浆材料充分填充；而当含水率较高时，粉细砂颗粒之间存在大量孔隙，土体本身的完整性较差，这也解释了注浆结石体抗压强度随含水率增大而逐渐减小的原因。进一步对比在浸水时间为9 d条件下粉煤灰掺量对注浆结石体细观特征的影响。由图可知，当经历9 d的水利浸泡后，0%粉煤灰注浆材料加固的试件内部的侵蚀破坏程度较大，而10%粉煤灰注浆材料加固的试件



## 材料科学



(e) 10%粉煤灰+浸水 9 d

(f) 0%粉煤灰+浸水 9 d

图 5 不同注浆结石体试件的微观特征图

Fig.5 Micrographic characteristics of different grouting stone specimens

内部结构的完整性较好, 粉细砂颗粒之间能够牢固胶结, 因此其经历 9 d 浸水后抗压强度仍然较大。

### 3 结论

(1) 养护时间越长, 注浆结石体的抗压强度越高。在相同的粉煤灰掺量条件下, 注浆结石体的抗压强度随养护时间而逐渐增大。以粉煤灰掺量为 5% 的试验组为例, 养护 3 h 的注浆结石体的抗压强度为 0.55 MPa, 随养护时间增长抗压强度分别是养护 3 h 试样的 4.82 倍、9.76 倍和 11.40 倍。

(2) 在相同的粉煤灰掺量条件下, 浸水时间越长, 则注浆结石体的抗压强度越低。以粉煤灰掺量为 5% 的试验组为例, 原始注浆结石体的抗压强度为 6.27 MPa, 随浸水时间分别下降 13.40%、34.77% 和 53.59%。

(3) 微观特征观察结果显示, 当含水率较低时, 粉细砂颗粒之间明显存在大量的胶结物质填充, 这表明粉细砂颗粒之间被注浆材料充分填充; 而当含水率较高时, 粉细砂颗粒之间存在大量孔隙, 土体本身的完整性较差。当经历 9 d 的水利浸泡后, 0% 粉煤灰注浆试件内部的侵蚀破坏程度较大, 而 10% 粉煤灰注浆试件内部粉细砂颗粒之间能够牢固胶结。

### 参 考 文 献

[1] 马加志, 廖正根, 李聪. 富水砂层超深基坑开挖突涌应急

处置技术 [J]. 现代隧道技术, 2021, 58 (S2): 160-164.

[2] 张龙应, 梁博, 李泱, 等. 富水砂层区域深基坑局部降水施工技术 [J]. 智能城市, 2021, 7 (2): 151-152.

[3] 郑选荣, 祁嘉辉, 成炜康, 等. 南通富水砂层盾构隧道开挖对邻近桩基影响分析 [J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18 (1): 146-151.

[4] 彭沉彬, 郭郅威, 姜瑜, 等. 高压富水砂层超大直径盾构隧道下穿既有地铁影响分析和控制措施 [J]. 铁道建筑, 2022, 62 (2): 127-130.

[5] 熊仲明, 覃泽宏, 张自光, 等. 富水砂层盾构始发遇困地段降水技术研究 [J]. 铁道工程学报, 2022, 39 (1): 114-120.

[6] 曹鹏飞, 袁宗义, 陈昭阳, 等. 富水砂层地下水位变化对盾构隧道衬砌结构的影响分析 [J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25 (1): 134-140.

[7] 张德志. 新型聚氨酯注浆加固材料应用研究 [J]. 江西煤炭科技, 2022 (2): 82-84+87.

[8] 杨仁凯, 张双, 刘继成, 等. 高分子材料注浆在松散粉细砂加固中的应用研究 [J]. 中国市政工程, 2021 (4): 95-97+114.

[9] 朱先发, 宋普涛, 杜峰, 等. 富水砂层高性能盾构同步注浆材料的配制及现场注浆性能研究 [J]. 新型建筑材料, 2021, 48 (3): 98-101.

[10] [1] 王亚龙, 王鸿凯, 甄聪, 等. 盾构法同步注浆新型双液注浆材料性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (5): 68-72.

[11] 夏冲, 李传贵, 冯啸, 等. 水泥粉煤灰-改性水玻璃注浆材料试验研究与应用 [J]. 山东大学学报 (工学版), 2022, 52 (1): 66-73+84.

[12] 沙飞, 李木才, 刘人太, 等. 富水砂层高效注浆材料试验与应用研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38 (7): 1420-1433.

[13] 李款, 潘友强, 解建光, 等. 粉煤灰基地质聚合物注浆材料的性能研究及工程应用 [J]. 新型建筑材料, 2021, 48 (1): 57-63.

[14] 秦传睿, 陆伟, 李金亮. 降温型聚氨酯/纳米粉煤灰注浆材料的降温机理分析 [J]. 煤炭学报, 2019, 44 (S1): 178-186.

[15] 连会青, 杨俊文, 雷玉娟. 水泥-粉煤灰-水玻璃注浆材料强度影响因素试验研究 [J]. 煤炭工程, 2018, 50 (12): 107-112.