

# 暗挖地铁车站施工中靶向注浆技术的影响因素及效果控制

查丽娟

(河南建筑职业技术学院工程管理部, 450001, 郑州)

**摘要** [目的] 常规注浆施工技术中浆液无效扩散较为严重, 对岩土体的加固效果不理想。对此, 需研究靶向注浆技术在地铁车站及隧道预注浆施工中的应用。[方法] 阐述了靶向注浆技术的加固机理, 基于双液浆的流变方程, 并结合均匀毛管组理论, 分析靶向注浆技术的影响因素, 推导得到双液浆柱形渗透扩散时扩散半径及浆液压力计算式。将推导得到的理论计算式应用于某地铁车站的预注浆工程施工中, 以验证预注浆施工的效果。[结果及结论] 靶向注浆技术将压密注浆技术和渗透注浆技术相结合, 在保证注浆效果的同时能节约材料的用量并保护周边环境。参数分析显示: 浆液扩散半径值受地下水压、浆液流速、双液浆黏性参数  $A$  和黏性参数  $B$  的显著影响, 在所假定的参数变化范围内, 浆液扩散半径的变化规律得到了较好的体现。现场监测数据表明, 整个预注浆施工过程中未造成地表抬升和环境污染, 注浆加固效果可达到安全开挖要求, 达到了预期的效果。

**关键词** 地铁车站; 靶向注浆技术; 压密注浆; 渗透注浆

**中图分类号** TU94+3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.01.029

are derived. These theoretical formulas are applied to the pre-grouting construction of a metro station to verify the effectiveness. [Result & Conclusion] Targeted grouting technology combines pressure grouting and permeation grouting, ensuring grouting effectiveness while saving material and protecting the surrounding environment. Parameter analysis indicates that the grout diffusion radius is significantly affected by groundwater pressure, grout flow speed, the viscosity parameters  $A$  and  $B$  of the dual-fluid grout. Within the assumed parameter change ranges, the variation law of the grout diffusion radius is well reflected. The field-monitored data shows that the entire pre-grouting construction process does not cause land uplift or environmental pollution, the grouting reinforcement effect meets the safety excavation requirements, and the expected results are achieved.

**Key words** metro station; targeted grouting technology; pressure grouting; permeation grouting

## Influencing Factors and Control Effects of Targeted Grouting Technology for Underground-excavated Metro Station Construction

ZHA Lijuan

(Department of Engineering Management, Henan Technical College of Construction, 450001, Zhengzhou, China)

**Abstract** [Objective] In conventional grouting construction technology, the ineffective diffusion of grout is comparatively severe and leads to unsatisfactory reinforcement effects on surrounding rock and soil mass. Therefore, it is essential to investigate the application of targeted grouting technology in metro station and tunnel pre-grouting construction. [Method] The reinforcement mechanism of targeted grouting technology is expounded. Based on the rheological equation of dual-fluid grout and the theory of uniform capillary groups, the influencing factors of targeted grouting technology are analyzed, and the calculation formulas for the diffusion radius and grout pressure during the cylindrical permeation diffusion of dual-fluid grout

为了保证地铁车站施工的安全, 在黄土、破碎岩体等不良地质条件下往往采用预注浆的方式加固开挖范围内及周边的岩土体。目前, 地铁车站施工中常采用的超前注浆方法有: ①从地面垂直打设注浆管, 对开挖范围实施注浆; ②从平行的导洞内侧向打设注浆管, 对开挖范围实施注浆; ③从开挖面向前打设注浆管, 对开挖范围实施注浆等方式<sup>[1-2]</sup>。针对不同的岩土体力学特性以及浆体性质, 浆体在被注介质中的扩散大致可分为: 劈裂注浆、压密注浆、渗透注浆和岩体注浆等形式<sup>[3]</sup>。此外, 根据浆体的流变方程, 浆体流型还可以划分为牛顿、宾汉姆及幂律型流体等<sup>[4]</sup>。

由于注浆加固区域内水文地质条件的复杂性及浆液自身理化性能的不确定性, 在一定的时间和成本内, 单靠一种方法或普通的注浆工艺难以实现对浆液扩散的控制, 跑浆、串浆现象普遍发生, 还会造成环境污染和材料浪费。由此, 采用复合控制的

靶向注浆技术应运而生。靶向注浆技术将压密注浆法和渗透注浆法结合起来,进而限定浆液的扩散范围,将浆液留存于目标加固区域内,从而达到控域注浆的目的。

靶向注浆技术已在隧道超前注浆施工中得到应用。该技术不仅能防止浆液沿注浆管壁和岩层裂隙无效扩散,还能有效地解决袖阀管注浆等常用施工方法扰动大和质量不易控制的问题<sup>[5]</sup>。

本文以某临海地区的地铁车站为例,阐述靶向注浆的力学机理,讨论浆液扩散半径的影响因素,并分析采用靶向注浆技术对地层进行预加固的效果,以期为类似工程提供参考。

1 车站概况

某地铁站临近黄海、渤海区域,围岩强度较低。现场钻孔取芯发现,岩土体主要为稀疏的砾石、粉质黏土和砂土,自稳能力较差。站址范围内沿道路两侧主要有燃气管、污水管、雨水暗渠、通信及电力等管线,且周边河流等水系发达。因此,采用暗挖施工存在较大的安全风险,需采用靶向注浆技术对车站周边岩土体进行注浆加固。浆液采用具有速凝特性的水泥-水玻璃双液浆。地表注浆加固区域的宽度为 25 m,高度为 6 m,注浆孔终孔间距为 3 m,注浆分段长度为 5~6 m。

2 靶向注浆的工作原理

靶向注浆技术的工作原理如图 1 所示。该技术将压密注浆技术和渗透注浆技术相结合,在围岩较差的土层中注浆时:首先,使用压密注浆法(在土工模袋内注浆,使模袋膨胀进而挤密土体)对地层的挤密效应形成止浆岩盘;止浆岩盘形成后,对目标加固区域进行渗透注浆加固,填充岩土体内部的孔

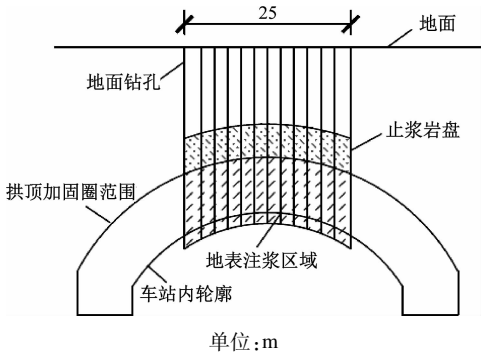


图 1 靶向注浆工作原理

Fig. 1 Working mechanism of targeted grouting

隙,使之形成较高强度的结石体,从而达到加固的目的<sup>[6]</sup>,以此来提高注浆的“靶向性”。

2.1 压密注浆部分的力学计算

在向模袋内注浆的过程中,模袋向四周呈柱形扩张,使周围土体均匀压缩。由此,可以按照平面应变轴对称问题分析土体的受力状态。根据弹塑性理论,在任意时刻,模袋周围土体中任一点的平衡方程、几何方程和物理方程按文献<sup>[7]</sup>计算。

2.2 渗透注浆部分的力学计算

渗透注浆过程中,浆液的流速较小,浆液仅在注浆孔周围局部区域呈紊流状态,在其余区域皆为层流状态,且注浆管内浆液的流速不变。浆液以渗透扩散的形式进入地层。在常用的袖阀管注浆中,浆液在被注介质中呈柱形扩散<sup>[8]</sup>。浆液柱形扩散的理论模型见图 2。

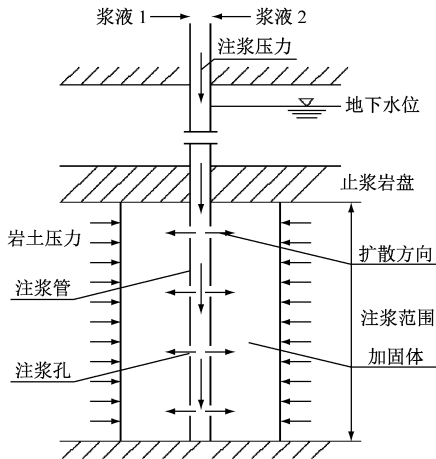


图 2 浆液柱形扩散理论模型

Fig. 2 Theoretical model of grout cylindrical diffusion

根据渗流力学基本理论,假定受注地层为由直径相同的毛细管排列而成的多孔介质,即符合均匀毛管组模型,双液浆的渗流等效为浆液质点在所有毛细管道中流动的叠加<sup>[9]</sup>。由此可以建立流体柱微元素的平衡方程如下:

$$P\pi r^2 - \pi r^2(P + dP) - 2\pi r\tau dl = 0 \quad (1)$$

式中:

$r$ ——流体柱半径;

$P、P + dP$ ——流体柱左、右两端分别作用的压力;

$dl$ ——流体柱微扩散半径;

$dP$ ——流体柱两端的压力差;

$\tau$ ——流体柱的表面上所受剪切应力。

解得浆液的流动速度  $v$  为:

$$v = \frac{1}{4\mu} \frac{dP}{dl} (r^2 - r_0^2) + \frac{\tau_0}{\mu} (r - r_0) \quad (2)$$

式中:

$r_0$ ——毛细管半径;

$\mu$ ——浆液的黏度。

### 2.3 柱形渗透扩散半径和浆液压力的计算公式

在靶向注浆技术中,渗透注浆起到对目标加固区域进行有效加固的作用,其浆液扩散半径的大小和浆液压力的衰减规律对整个注浆过程的控制至关重要。因此,考虑水泥-水玻璃双液浆为黏度时变性的宾汉姆流体,基于渗流力学基本理论,对双液浆浆液扩散半径  $l_1$  和浆液压力  $P$  的理论计算公式进行推导。

根据式(2)可得到:

$$\begin{cases} v_p = \frac{1}{4\mu} \frac{dP}{dl} (r_p^2 - r_0^2) + \frac{\tau_0}{\mu} (r_p - r_0), 0 \leq r \leq r_p \\ v = \frac{1}{4\mu} \frac{dP}{dl} (r^2 - r_0^2) + \frac{\tau_0}{\mu} (r - r_0), r_p < r \leq r_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:

$v_p$ ——浆液活塞式运动的速度;

$r_p$ ——浆液活塞式运动的半径;

$\tau_0$ ——浆液的屈服剪切力,用来表征浆液的塑性性质。

则浆液在毛细管中的平均流速为:

$$\bar{v} = -\frac{1}{8} \frac{r_0^2}{\mu} \frac{dP}{dl} - \frac{1}{3} \frac{\tau_0 r_0}{\mu} - \frac{2}{3} \frac{\tau_0^4}{r_0^2 \mu (dP/dl)^3} \quad (4)$$

由 Dupuit-Forchheimer 公式可知,被注介质内任意一点的渗流速度  $v_s$  同该点处浆液的平均速度  $\bar{v}$  及被注介质孔隙度  $\phi$  满足如下关系:

$$v_s = \phi \bar{v} \quad (5)$$

根据注浆过程中注浆管流量与扩散断面处流量相等,即  $\pi l_0^2 v_0 = 2\pi l m v_s$ ,可得到:

$$-\frac{dP}{dl} = \frac{A\phi^B}{2K} \left( \frac{l_0^2 v_0}{m} \right)^{1-B} l^{2B-1} + \frac{4}{3} \lambda \quad (6)$$

式中:

$l_0$ ——浆液初始扩散半径,即注浆管半径;

$v_0$ ——注浆管内浆液的流速;

$m$ ——浆液柱形扩散的高度;

$A$ 、 $B$ ——双液浆的黏度参数,为常数,可根据双液浆的黏度-时间曲线拟合得到;

$K$ ——被注介质渗透率;

$\lambda$ ——浆液的启动压力梯度。

代入注浆边界条件:

$$\begin{cases} l = l_0, P = P_0 \\ l = l_1, P = P_w \end{cases} \quad (7)$$

式中:

$P_0$ ——注浆孔处的注浆压力;

$P_w$ ——地下水压;

$l_1$ ——浆体扩散半径。

令  $\Delta P = P_0 - P_w$ ,可得到:

$$l_1 = \left\{ \left[ \Delta P + \frac{4}{3} \lambda (l_0 - l_1) \right] \frac{4KB}{A\phi^B} \left( \frac{m}{l_0^2 v_0} \right)^{1-B} + l_0^{2B} \right\}^{\frac{1}{2B}} \quad (8)$$

浆体压力表达式为:

$$P = P_0 - \frac{A\phi^B}{4KB} \left( \frac{l_0^2 v_0}{m} \right)^{1-B} (l^{2B} - l_0^{2B}) - \frac{4}{3} \lambda (l - l_0) \quad (9)$$

### 3 浆液扩散半径的影响因素分析

本节主要讨论双液浆扩散半径在不同  $P_w$ 、 $v_0$ 、 $A$  和  $B$  条件下的变化规律。为了充分反映以上各参数对  $l_1$  的影响规律,假定  $P_w$  的变化范围为 15 ~ 1 915 kPa,  $v_0$  的变化范围为 0.2 ~ 4.0 m/s,  $A$  的变化范围为 0.000 1 ~ 0.010 0 之间,  $B$  的变化范围为 1.73 ~ 3.13。选定  $l_0 = 0.025$  m,  $\tau_0 = 1.563$  Pa,  $P_0 = 2$  MPa,  $\phi = 0.3$ ,  $m = 6$  m, 渗透系数  $K' = 0.12$  cm/s, 20 °C 时水的黏度  $\mu_w = 1.005 \times 10^{-3}$  Pa · s, 对各因素影响规律进行分析。

#### 3.1 注浆点处的 $P_w$ 对 $l_1$ 的影响

假定  $P_w$  的变化范围为 15 ~ 1 915 kPa,  $v_0 = 2.4$  m/s,  $A = 0.003 182$ ,  $B = 2.23$ , 代入式(8)计算可得  $l_1$ - $P_w$  曲线,如图 3 所示。

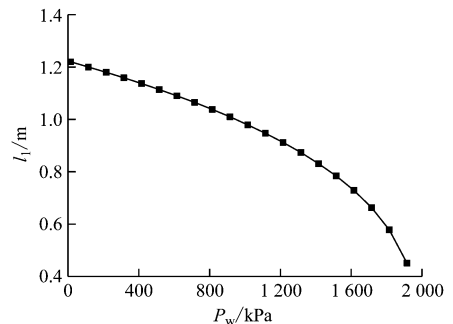


图 3  $l_1$ - $P_w$  曲线

Fig. 3  $l_1$ - $P_w$  curve

由图 3 可知,随着  $P_w$  的增大,  $l_1$  逐渐减小。当  $P_w$  从 15 kPa 增至 1 515 kPa 时,  $l_1$  近似呈线性减小,减小量为 0.44 m; 当  $P_w$  从 1 515 kPa 增至 1 915 kPa 时,  $l_1$  快速减小,减小量为 0.33 m。由此可见,

在注浆压力一定的条件下,  $P_w$  越大, 则  $l_1$  越小; 尤其当  $P_w$  接近注浆压力时,  $l_1$  会迅速减小。

### 3.2 $v_0$ 对 $l_1$ 的影响

假定  $v_0$  的变化范围在 0.2 ~ 4.0 m/s 之间,  $P_w = 115$  kPa,  $A = 0.003\ 182$ ,  $B = 2.23$ , 代入式(8)计算可得  $l_1$ - $v_0$  曲线, 如图 4 所示。

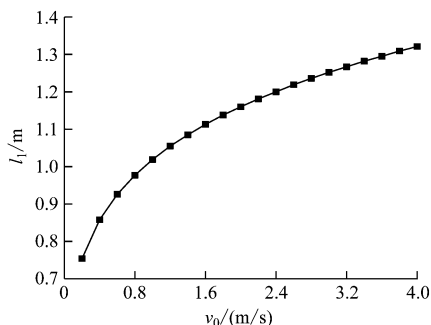


图 4  $l_1$ - $v_0$  曲线

Fig. 4  $l_1$ - $v_0$  curve

由图 4 可知, 随着  $v_0$  的增大,  $l_1$  逐渐增大。当  $v_0$  从 0.2 m/s 增至 1.2 m/s 时,  $l_1$  快速增大, 增大量为 0.3 m; 当  $v_0$  从 1.2 m/s 增至 4.0 m/s 时,  $l_1$  的增大速率逐渐减小, 增大量仅为 0.3 m。由此可见, 在一定的范围内增大  $v_0$  有助于改善注浆加固效果, 但是随着  $v_0$  的增大,  $l_1$  的增大幅度不断减小, 因此不能单纯依靠增大  $v_0$  来改善注浆效果。

### 3.3 $A$ 对 $l_1$ 的影响规律

假定  $A$  的变化范围为 0.000 1 ~ 0.010 0,  $P_w = 115$  kPa,  $v_0 = 2.4$  m/s,  $B = 2.23$ , 代入式(8)计算可得  $l_1$ - $A$  曲线, 如图 5 所示。

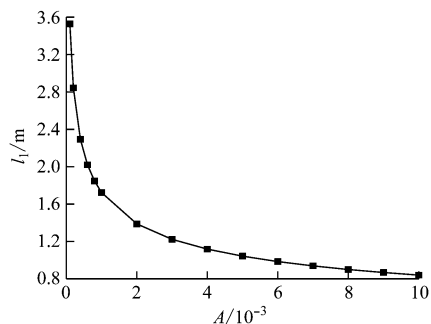


图 5  $l_1$ - $A$  曲线

Fig. 5  $l_1$ - $A$  curve

由图 5 可知, 随着  $A$  的增大,  $l_1$  逐渐减小。当  $A$  从 0.000 1 增至 0.002 0 时,  $l_1$  快速减小, 减小量为 2.14 m; 当  $A$  从 0.002 增至 0.006 时,  $l_1$  的减小速率有所减缓, 减小量为 0.40 m; 当  $A$  从 0.006 增至

0.010 时,  $l_1$  缓慢减小, 减小量为 0.15 m。由此可见, 适当减小  $A$ , 有助于扩大双液浆的加固范围。

### 3.4 $B$ 对 $l_1$ 的影响

假定  $B$  的变化范围在 1.73 ~ 3.13 之间,  $P_w = 115$  kPa,  $v_0 = 2.4$  m/s,  $A = 0.003\ 182$ , 代入式(8)计算可得  $l_1$ - $B$  曲线, 如图 6 所示。

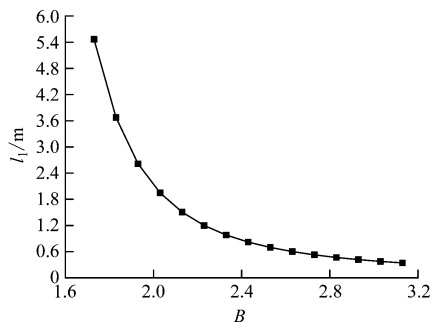


图 6  $l_1$ - $B$  曲线

Fig. 6  $l_1$ - $B$  curve

由图 6 可知, 随着  $B$  的增大,  $l_1$  逐渐减小。当  $B$  从 1.73 增至 2.33 时,  $l_1$  快速减小, 减小量为 4.49 m; 当  $B$  从 2.33 增至 3.13 时,  $l_1$  缓慢减小, 减小量为 0.64 m。由此可见, 适当减小  $B$ , 同样有助于扩大双液浆的加固范围。

## 4 工程应用

由工程设计资料可知: 注浆点处  $P_w = 115$  kPa,  $v_0 = 2.4$  m/s,  $A = 0.003\ 182$ ,  $B = 2.23$  (水泥浆水灰比为 1, 且双液体积比也为 1), 其他注浆参数取值与前文保持一致。

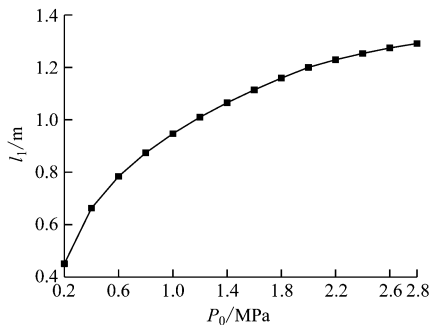
在双液浆注入过程中, 如果  $P_0$  太小, 则无法将浆液快速注入到地层中, 从而无法对目标加固区域的土体进行有效加固; 如果  $P_0$  太大, 则双液浆在地层中的作用方式可能由渗透扩散演变为压密扩散, 甚至发生劈裂, 得不偿失。

在现场施工中, 既要获得较大的浆液加固半径又要兼顾安全性。将相关参数代入式(8)计算可得  $l_1$ - $P_0$  曲线, 如图 7 所示。

由图 7 可知, 随着  $P_0$  的增加,  $l_1$  亦增大。相应曲线大致呈现三阶段变化: 即当  $P_0$  从 0.2 MPa 增加至 0.8 MPa 时,  $l_1$  快速增加; 当  $P_0$  从 0.8 MPa 增加至 2.0 MPa 时, 增加速率开始减小; 当  $P_0$  从 2.0 MPa 增加至 2.8 MPa 时,  $l_1$  缓慢增加。

一般而言, 为了获得较好的注浆加固效果, 往往需要较大的  $l_1$ , 并且对地层的影响较小, 由图 8 可

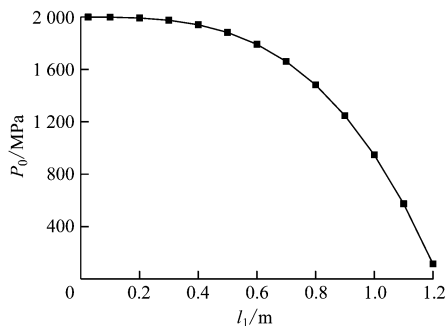


图7  $l_1$ - $P_0$  曲线Fig. 7  $l_1$ - $P_0$  curve

知,较理想的  $P_0$  为 2.0 MPa,此时浆液得以充分扩散, $l_1$  为 1.2 m。

选定  $P_0 = 2.0$  MPa,由式(9)及其他基本参数,计算可得  $P_0 = 2.0$  MPa 时的  $P_0$ - $l_1$  曲线,如图 8 所示。

由图 8 可知,随着  $l_1$  的增加, $P_0$  逐渐减小。当  $l_1$  从 0.025 m 增加至 0.300 m 时, $P_0$  缓慢减小;当  $l_1$  从 0.3 m 增加至 0.8 m 时, $P_0$  的减小速率加快;当从 0.8 m 增加至 1.2 m 时, $P_0$  急剧减小。由此可见,在  $P_0$  一定的条件下,逐渐增至接近最终的扩散半径时,地下水对浆液渗透扩散的阻碍作用愈加明显,并最终导致  $P_0$  呈现出快速衰减的趋势。

图8  $P_0 = 2.0$  MPa 时的  $P_0$ - $l_1$  曲线Fig. 8  $P_0$ - $l_1$  curve at  $P_0 = 2.0$  MPa

现场监测数据表明,预注浆施工未造成地表抬升和海水污染,目标加固区域内围岩完整性得到显著提高,注浆加固效果可满足安全开挖要求。可见,采用靶向注浆技术对地层进行预加固的方案既节约了注浆材料的用量,又保证了注浆加固的效果。

## 5 结语

靶向注浆将压密注浆技术和渗透注浆技术相结合,压密注浆部分形成止浆岩盘,渗透注浆部分为有效注浆。

C-S 双液浆为黏度时变性的宾汉姆流体。基于双液浆的流变方程,并结合均匀毛管组理论,推导得到了双液浆柱形渗透注浆时  $l_1$  和  $P$  的理论计算公式。

将所得的理论公式应用于某地铁车站的超前注浆施工中,取得了较好的效果。现场监测数据表明:模袋构造的止浆岩盘成功实现了对浆液扩散的控制,使目标加固区域内岩体完整性得到显著提高;采用靶向注浆技术对地层进行预加固的方案既节约了注浆材料的用量,又保证了注浆加固的效果。

## 参考文献

- [1] HOU F, SUN K, WU Q, et al. Grout diffusion model in porous media considering the variation in viscosity with time [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019, 11 (1): 168781401881989.
- [2] 张庆松,李鹏,张霄,等. 隧道断层泥注浆加固机制模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(5): 924.  
ZHANG Qingsong, LI Peng, ZHANG Xiao, et al. Model test of grouting strengthening mechanism for fault gouge of tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (5): 924.
- [3] 王凯. 全风化花岗岩富水地层注浆加固机理及应用[D]. 济南: 山东大学, 2017.  
WANG Kai. Mechanism of grouting reinforcement for completely weathered granite with rich water and its application [D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [4] 杨志全,侯克鹏,程涌,等. 幂律型流体的柱-半球形渗透注浆机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊2): 3840.  
YANG Zhiqian, HOU Kepeng, CHENG Yong, et al. Study of column-hemispherical penetration grouting mechanism based on power-law fluid [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (S2): 3840.
- [5] 张柯. 基于模袋袖阀管注浆技术在软土地基处理中的应用研究[D]. 抚州: 东华理工大学, 2016.  
ZHANG Ke. Research on form bag sleeve valve pipe grouting technology in soft soil foundation treatment [D]. Fuzhou: East China Institute of Technology, 2016.
- [6] 孙国庆,彭峰,邹明波. 刚性袖阀管束注浆新技术的研究与应用[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(3): 186.  
SUN Guoqing, PENG Feng, ZOU Mingbo. Research and application of new grouting technology with rigid sleeve valve pipe strand [J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(3): 186.
- [7] 蒋功化,向洲辰. 黏土压密注浆补偿效率评估方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(4): 942.

(下转第 173 页)

结构改造设计研究,探索了既有高架车站结构改造设计的原则和方法,对设计过程中遇到的问题提出了可实施的解决方法,并对施工期间造成的运营影响和分阶段实施方案进行了分析,确保地铁不间断运营。

由宝山路站改造工程的结构设计研究的经验总结,本文对运营车站的改造项目提出如下建议:

1) 结构专业应在车站改造的方案阶段就深度介入,并相对其他专业要提前一个阶段进行深化设计,这样才能做到方案切实可行。

2) 大型改造项目可参考本文所提设计原则,确定改造方法和自适性结构设计方案,开展结构改造加固,加强竣工图研读和现场踏勘,做到因地制宜。

3) 运营车站改造项目须评估改造施工对车站运营的影响。设计方应会同运营方、维保方及施工方共同确定分区施工方案,以确保施工期间车站的正常运营。

部分上海轨道交通既有线已服役 30 余年,其运力和技术上都到了亟需提升的阶段。类似提质增效的改造项目会越来越多,本文可为类似项目提供借鉴。

## 参考文献

- [1] 上海市住房和城乡建设管理委员会. 现有建筑抗震鉴定与加固标准: DGJ 08 - 81—2021 [S]. 上海: 同济大学出版社, 2021.
- Shanghai Housing and Urban-Rural Construction Management Committee. Standard for seismic appraisal and strengthening of existing building: DGJ 08 - 81—2021 [S]. Shanghai: Tongji U-

niversity Press, 2021.

- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for concrete structures of tall building: JGJ 3—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [4] 吕西林. 超限高层建筑工程抗震设计指南 [M]. 2 版. 上海: 同济大学出版社, 2009.
- LYU Xilin. Seismic design guidelines for tall buildings beyond the scope of design codes [M]. 2nd ed. Shanghai: Tongji University Press, 2009.
- [5] 上海市住房和城乡建设管理委员会. 基坑工程技术标准: DG/TJ 08 - 61—2018 [S]. 上海: 同济大学出版社, 2018.
- Shanghai Housing and Urban-Rural Construction Management Committee. Technical code for excavation engineering: DG/TJ 08 - 61—2018 [S]. Shanghai: Tongji University Press, 2018.

- 收稿日期:2023-03-06 修回日期:2023-05-28 出版日期:2024-01-10  
Received:2023-03-06 Revised:2023-05-28 Published:2024-01-10
- 作者:孙天荣,高级工程师,suntianrong@sty.sh.cn
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

## (上接第 166 页)

- JIANG Gonghua, XIANG Zhouchen. Research on the estimation method of compensation efficiency of clay compaction grouting [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(4): 942.
- [8] 周佳媚, 刘欢, 张迁, 等. 考虑浆液稠度变化的盾构壁后注浆扩散模型 [J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(3): 710.
- ZHOU Jiamei, LIU Huan, ZHANG Qian, et al. Backfilled grouting diffusion model of shield tunnel considering variation of slurry consistency [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(3): 710.
- [9] 孔祥言. 高等渗流力学 [M]. 2 版. 合肥: 中国科学技术大学

出版社, 2010.

KONG Xiangyan. Advanced seepage mechanics [M]. 2nd ed. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2010.

- 收稿日期:2021-09-10 修回日期:2023-12-20 出版日期:2024-01-10  
Received:2021-09-10 Revised:2023-12-20 Published:2024-01-10
- 通信作者:查丽娟,讲师,chalijuan450001@163.com
- ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license