

doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2025.20230244

## 近距离穿越既有车站不等强度注浆变形的控制

王述红, 任明珠, 李世宇, 董福瑞

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 由于隧道开挖对近距离既有车站结构变形产生不利影响,以沈阳砾砂层近距离穿越地铁车站为例,采用有限差分法对近距离下穿既有车站结构变形的影响机理和控制技术进行研究,对超前注浆小导管支护参数和不等强度注浆加固方法进行了优化.通过模拟等强度、横向不等强度和空间不等强度3种注浆方案,对既有结构的竖向位移、水平位移和应力进行分析.研究表明:空间不等强度注浆更为合理,既有结构的竖向位移、水平位移和应力降幅分别达到44.7%、53.7%和15.6%.此外,对空间不等强度注浆方法的影响因素进行讨论和分析,可为邻近既有车站的隧道开挖施工提供参考.

**关键词:** 近距离穿越;既有车站;不等强度注浆;注浆加固;数值模拟

中图分类号: TU 457 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)02-0126-10

## Control of Unequal Strength Grouting Deformation During Close Distance Crossing of an Existing Station

WANG Shu-hong, REN Ming-zhu, LI Shi-yu, DONG Fu-rui

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: REN Ming-zhu, E-mail: neurenmingzhu@126.com)

**Abstract:** Tunnel excavation has a detrimental impact on the deformation of existing station structures. Taking the close-proximity crossing an existing metro station in Shenyang's gravel layer as an example, the finite difference method was used to investigate the deformation mechanisms and control techniques for such excavations. The support parameters for advanced grouting with small conduits and the method of unequal strength grouting reinforcement were optimized. Through simulations of three grouting schemes (uniform strength, lateral unequal strength, and spatial unequal strength), the vertical displacement, horizontal displacement, and stress of the existing structure were analyzed. The results indicate that spatial unequal strength grouting is the most reasonable approach, with reductions in vertical displacement, horizontal displacement, and stress of 44.7%, 53.7%, and 15.6%, respectively. Additionally, the influencing factors of the spatial unequal strength grouting method were discussed and analyzed, which can provide a reference for tunnel excavation near existing stations.

**Key words:** close distance crossing; existing station; unequal strength grouting; grouting reinforcement; numerical simulation

近年来,地铁建设在中国蓬勃发展,具有节约土地、交通量大、效率高等优点.随着城市轨道交通网络的日益增多,新建地铁线路在既有线下穿越的问题也随之增加.隧道开挖作为扰动会引起岩石与土壤的应力和位移变化.特别是,超浅隧道的开挖可能会导致地面和附近建筑物的巨大位

移<sup>[1]</sup>.学者们对此进行了大量研究,Yin等<sup>[2]</sup>以郑州市新建并联式立交站开挖为例,研究开挖坑与相邻建站之间的相互作用,分析监测数据并建立有限元数值模型,开展围护效应的概念和数学物理体系研究,提出逆围护效应来表示基坑开挖对建站的影响.Wang等<sup>[3]</sup>在福州滨海新城基坑有限

收稿日期: 2023-08-27

基金项目: 中国-中东欧国家高校联合教育项目(2021111);国家自然科学基金资助项目(52374157);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2301005, N2301006).

作者简介: 王述红(1969—),男,江苏泰州人,东北大学教授,博士生导师.

元模拟的基础上,研究穿越式深基坑开挖的变形特征、扰动效应及活动范围.Li等<sup>[4]</sup>以南堰四环路输电改造为例,对地铁下穿隧道引起的沉降进行分析,将随机介质非均匀收敛理论计算的结果与监测数据进行比较,验证施工过程中的横向变形和纵向沉降.

为了减少隧道对邻近建筑物的影响,学者们通过研究发现,注浆加固技术可以有效控制地层和既有建筑物的沉降,具有效率高、易于控制、经济的优点.作为一种建筑物的预加固手段,它在地下工程建设中得到了广泛的应用.赵文等<sup>[5]</sup>采用模拟假设、模型建立与数值计算等手段研究邻近隧道断面的不同布置形式以及注浆材料参数等因素对地表沉降变化的影响规律.Li等<sup>[6]</sup>通过离心模型试验,对既有大直径隧道下盾构隧道的施工进行研究,发现由于下穿施工,既有隧道沉降和纵向应力增加,灌浆可以降低既有隧道沉降和纵向应力.Zhang等<sup>[7]</sup>通过现场实测和数值模拟分析灌浆处理对降低隧道变形的效果,从多排注浆顺序、隧道与注浆孔之间的注浆距离等方面对注浆参数进行了敏感性研究.Wei等<sup>[8]</sup>以甘肃某富水黄土隧道为例,介绍了采用地下室灌浆和帷幕灌浆综合防治渗水涌泥灾害的方法,这是防止地表裂缝、涌水、涌泥等灾害的有效措施.

在上述研究基础上,许多学者又发现注浆加超前小导管的加固方式对变形控制更为有效.王东元等<sup>[9]</sup>通过采用多种加固设计方案和施工步骤,对邻近双隧道进行模拟,在注浆小导管支护的作用下,有效地减少了变形,确保暗挖工程的稳定性.张耀升等<sup>[10]</sup>在总结前人现场试验成果的基础上,假定锚杆弹性截面在锚固深度处剪应力呈1/4椭圆弧分布,由此给出注浆型锚杆临界锚固长度计算公式.李术才等<sup>[11]</sup>和王辉等<sup>[12]</sup>针对小导管注浆超前支护隧道施工中存在的问题,研究隧道中小导管注浆的土壤加固特性、支护结构的承载力学效应和隧道稳定性,验证优化小导管的投影长度、注浆半径和径向加固范围可以有效降低最大地表沉降.Shi等<sup>[13]</sup>通过现场工程实践和数值计算,在隧道拱顶前进行超前注浆,可以阻断隧洞工作面前方孔隙水渗流路径,从而达到封堵孔隙水渗流的目的,提高隧道拱顶施工时围岩的稳定性.

以往关于近距离下穿既有线施工实例的研究主要侧重于新建隧道的施工方案分析和优化,对于采用注浆超前预加固来实现隧道下穿既有

线的方法报道较少.此外,国内关于在隧道下穿既有车站中应用不等强度注浆技术的研究也较少.因此本文结合沈阳地铁项目,采用有限差分软件FLAC3D对超前小导管注浆加固方法的隧道进行模拟,分析不同小导管外插角、管径和长度对既有车站的变形控制效果,在确定最优加固参数后,进一步研究等强度、横向不等强度和空间不等强度3种方案对既有车站变形的控制效果.

## 1 工程背景

沈阳地铁沙岗子变电所由沙岗子变电所、电缆通道区间组成,全部为地下线,变电所采用明挖法施工,电缆通道采用明挖法+暗挖法施工,其中与变电所连接位置以及与既有榆树台地铁站连接位置采用设立竖井并结合暗挖法进行施工.该电力隧道位于榆树台站北侧,从榆树台站车站底板预留接口向北敷设,接至沙岗子变电所,本电力隧道内净空为2.0 m×2.2 m.电缆通道总长度约为320.49 m,其中明挖段长度274.79 m,暗挖部分长度45.70 m,且既有地铁车站在隧道上方5.0 m,隧道与地铁车站平面位置关系如图1所示.



图1 隧道与既有车站平面位置关系图

Fig. 1 Plan position relationship between tunnel and existing station

本区间结构处于砾砂层和圆砾层中,稳定水位埋深为9.56~11.20 m,区间隧道位于现状潜水位以下,地下水丰富.

当隧道下穿既有车站时,区间隧道开挖采用台阶式施工,超前小导管支护采用全断面深孔注

浆,具体工序步骤如下:

1)确定开挖范围和隧道轴线位置:根据设计要求和现场实际情况,确定隧道的开挖范围和轴线位置.同时,要做好与既有车站的关联,保证施工不会对车站的正常运营造成影响.

2)挖掘顶部土层:使用挖掘机等设备,挖掘顶部土层,将其清理出来.

3)安装超前小导管:在顶部土层被清理干净后,安装超前小导管.超前小导管的作用是引导掘进机沿着预定轨迹前进,避免对既有车站产生影响.

4)开始挖掘:当超前小导管安装完毕后,掘进机开始挖掘隧道.挖掘过程中,要根据实际情况随时调整导向和姿态,保证隧道的开挖轨迹符合设计要求.

5)安装支护结构:在掘进机开挖过的地方,安装支护结构,以保证隧道的稳定性和安全性.

## 2 近距离下穿既有结构数值模拟分析

### 2.1 数值模拟的必要性

使用FLAC3D模拟近距离下穿既有车站的过程具有以下几个方面的必要性:

1)风险评估:通过数值模拟分析,可以评估隧道开挖对车站周围地质环境和建筑物的影响,预测可能出现的地质灾害和结构破坏等风险.

2)设计优化:在数值的模拟分析中,可以对不同的隧道开挖方案进行比较和优化,以选择最优方案并确定合理的支护措施.

3)施工指导:数值模拟分析结果可以为施工提供指导,确定施工中需要采取的措施和步骤,确保施工过程的安全性和有效性.

4)优化成本:通过数值模拟分析可以优化隧道开挖和支护方案,减少不必要的支护措施和材料的使用,降低施工成本,提高工程效益.

综上所述,在使用数值模拟近距离下穿既有车站时,可以全面评估隧道开挖和支护方案,提高工程质量和安全性,同时降低成本,具有非常重要的必要性.

### 2.2 超前注浆小导管机理

超前注浆小导管技术是指在隧道开挖前,砼周按一定外插角度向围岩内打入带孔的小导管,水泥浆液和其他加固材料经小导管灌注到围岩内,浆液向围岩裂隙内浸润和扩散;为了提高围

岩的力学性能并增强掌子面前围岩的自稳能力,可以采取围岩胶结的方法,该方法通过形成一定厚度的加固圈来控制围岩的变形,并提高掌子面的稳定性.超前注浆小导管技术的加固机理如下:

1)小导管管体的加固原理是基于小导管锚杆的工作机理.当小导管被插入围岩中时,它与围岩内的失稳岩块和岩层相互连接,形成了一种悬挂作用,有效限制了围岩的塌落和滑移;同时,围岩内的层状结构相互结合,形成了一种组合梁的效应,进一步增强了围岩的稳定性;采用小导管注浆的方法使混凝土周边一定范围围岩挤黏形成承载体.

2)小导管发挥了承重桁架的作用.当小导管打入围岩后,其端部得到钢拱架的支撑,而首端则依靠掌子面前围岩的支撑.在隧道开挖过程中,小导管受到围岩压力的作用,发挥了类似纵向梁的功能,从而减小掌子面上部围岩的压力<sup>[14]</sup>.

3)小导管在加固技术中主要作为浆液的输送通道.通过小导管注浆孔将浆液注入掌子面前的围岩中,利用浆液材料的渗透、挤压和劈裂作用,将围岩孔隙和裂隙中的空气和水分排除.通过化学反应,浆液与围岩发生作用,形成新的物质,使围岩胶结并改善其性能,增强围岩的稳定性.

### 2.3 超前注浆小导管数值模拟

#### 2.3.1 数值模型的建立

采用有限差分软件FLAC3D对隧道进行数值模拟,应用超前注浆小导管加固技术.基于隧道尺寸及不同计算参数,创建了三维数值模型.土层采用摩尔-库仑(Morh-Coulomb)模型模拟,隧道采用线弹性本构模型模拟.本数值模拟采用如下假设:①围岩材料是连续介质,具有各向同性的特性;②对隧道的受力和变形进行了计算,其结果整体上是安全的;③对初始应力场进行模拟时没有考虑结构应力而仅考虑自重应力作用;④计算时忽略结构的应力并假定初始应力场为自重应力场.同时,隧道被视为弹性连续体,施工过程中产生的变形是连续的.

模型的计算边界如下:取横向X方向100 m,纵向Y方向80 m,竖向Z方向50 m.在模型的前侧和后侧施加Y方向的位移约束,在底部施加Z方向的位移约束,在左侧和右侧施加X方向的位移约束,顶端自由不受约束,模型如图2所示.小导管采用结构单元模拟,注浆加固区采用实体单元

来模拟,小导管超前注浆后形成的加固区为均匀、单一介质同厚度的加固圈,小导管加固模型如图 3 和图 4 所示.

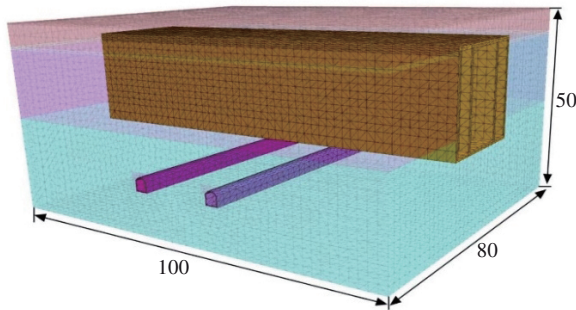


图 2 既有车站与区间隧道的位置关系 (单位: m)

Fig. 2 Position relationship between an existing station and section tunnels (unit: m)

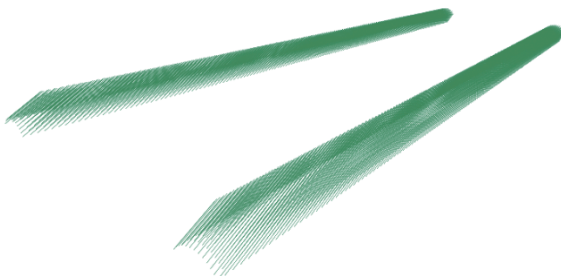


图 3 小导管单元模拟

Fig. 3 Small conduit unit simulation

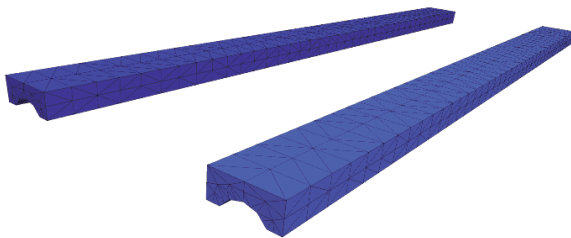


图 4 小导管注浆区模拟

Fig. 4 Simulation of small conduit grouting area

为确保各工况下所取相关围岩参数与对应围岩级别相符合,综合参考《铁路隧道设计规范》,根据各工况需要确定土体相关参数,具体取值如表 1 所示.

2. 3. 2 模型验证

为验证数值模拟方法的可靠性,选取下穿工程中小导管支护下既有车站的最大水平位移和最大竖向位移为指标,进行对比分析.

由图 5 可知,既有车站的最大水平位移和竖向位移的模拟值稍大于监测值,尽管这 2 个值不完全匹配,但误差在可接受的范围内,并且具有相同的变化趋势,由此说明了模拟计算的准确性和可实施性,验证了模型的可靠性.

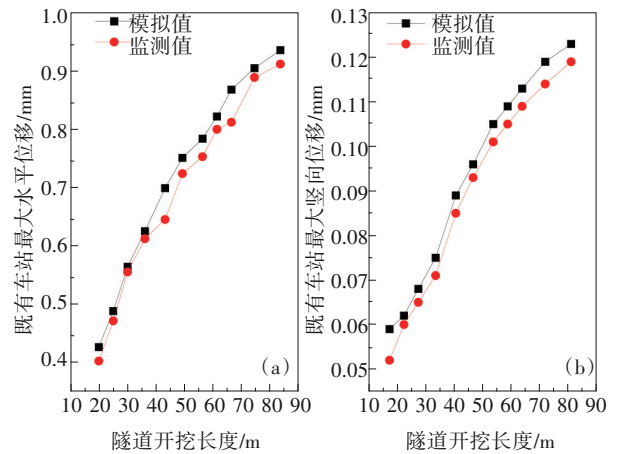


图 5 不同开挖长度下车站位移

Fig. 5 Station displacements under different excavation lengths

(a)—水平位移;(b)—竖向位移.

2. 3. 3 不同小导管外插角度下车站位移分析

为了探讨不同外插角下小导管的作用效果,分别对采用 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45° 外插角的小导管进行数值模拟,结果如图 6 所示.

由图 6 可知,当外插角从 15° 增加到 30° 时,车

表 1 地层及模型的材料力学参数

Table 1 Parameters of materials mechanics for stratum and model

材料	弹性模量	泊松比	容重	黏聚力	摩擦角
	MPa		$\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	kPa	(°)
杂填土	4.3	0.31	17.0	10	25
粉质黏土	27.3	0.34	20.0	30	24
淤泥质粉质黏土	5.8	0.33	19.2	17	33
圆砾土	100.0	0.30	20.5	1	40
粗砂	36.7	0.33	20.0	0	30
小导管	200 000.0	0.21	78.0	—	—
既有车站	32 500.0	0.20	25.0	—	—
注浆加固区	45.0	0.25	24.5	25	41

站水平位移和竖向位移逐渐减小.这是因为夹角越大,小导管与隧道壁体的接触面积就越大,可以更好地分担土压力和荷载,从而减小结构的位移.当外插角从 $15^\circ$ 到 $30^\circ$ 时,车站水平位移和竖向位移的下降幅度明显增大;而当外插角从 $30^\circ$ 增加到 $45^\circ$ 时,车站水平位移和竖向位移的下降幅度减小,且随着外插角的增大施工难度增大,经济成本也会增加.因此,针对本项目,外插角选择 $30^\circ$ 最为合适.

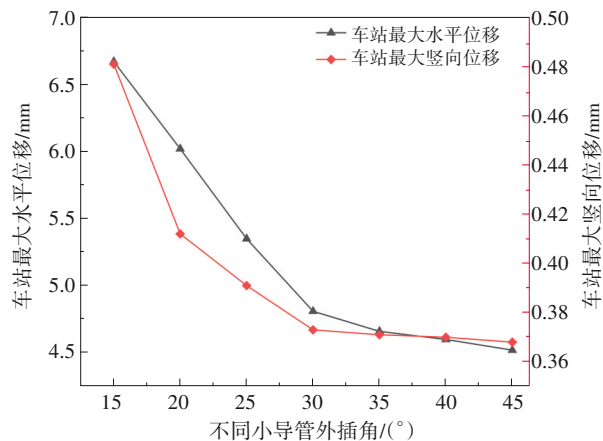


图6 不同小导管外插角下车站位移

Fig. 6 Station displacements under different small conduit insertion angles

#### 2.3.4 不同小导管管径下车站位移分析

为了探讨不同管径下小导管的作用效果,分别对采用30,35,40,45,50,55,60 mm管径的小导管进行数值模拟,外插角均采用 $30^\circ$ ,结果如图7所示.

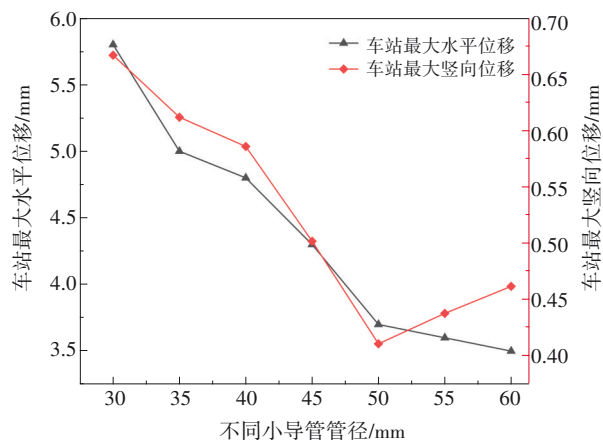


图7 不同小导管管径下车站位移

Fig. 7 Station displacements under different small conduit diameters

从图7可以看出,小导管管径从30 mm增加到50 mm时,车站最大水平位移和竖向位移呈下降趋势,这是由于小导管管径越大,其刚度越大,

可以更好地保持形状稳定性,减少变形,对既有车站的影响也越小.当小导管管径从50 mm增加到60 mm时,车站最大竖向位移呈上升趋势,水平位移虽减小,但减小的幅度明显变小.因此,理论上管径越大,超前小导管的加固效果越好,但在考虑经济性的情况下,当管径取50 mm时,小导管对车站位移的控制效果较好.

#### 2.3.5 不同小导管长度下车站位移分析

为了探讨不同长度下小导管的作用效果,分别采用1,2,3,4,5,6,7 m长度的小导管进行数值模拟,且外插角均采用 $30^\circ$ ,管径均采用50 mm.结果如图8所示.

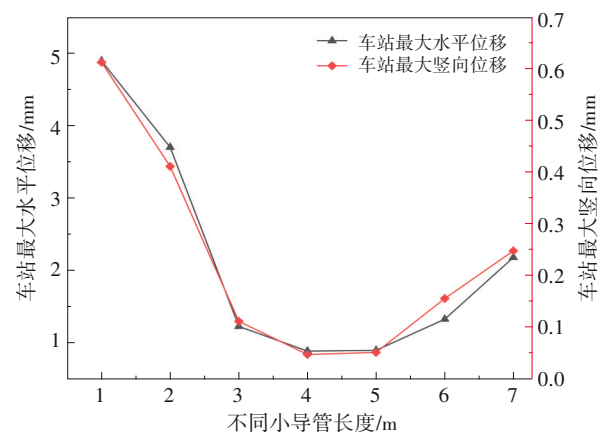


图8 不同小导管长度下车站位移

Fig. 8 Station displacements under different small conduits lengths

由图8可知,当小导管长度从1 m增加到3 m时,车站最大水平位移和竖向位移逐渐减小,其原因是当小导管长度越大时,可以承受更多的荷载,从而减小结构受力的程度,减少位移和变形.但当小导管长度从3 m增加到4 m时,车站最大水平位移和竖向位移下降幅度变小,而从4 m增加到7 m时,车站最大水平位移和竖向位移均增大,主要是因为小导管长度过长时抗弯刚度较小,无法有效抵抗围岩变形,表明小导管长度大于3 m后,对车站变形控制不明显,因此,本项目可以选择长度为3 m的小导管进行加固.

## 3 不等强度注浆加固对结构变形控制的有效性分析

### 3.1 注浆加固法加固有效性分析

#### 3.1.1 注浆加固区宽度对车站变形沉降的影响

为了探究注浆加固区对车站变形的控制效果,开展了对注浆加固区宽度的研究.由于两线

隧道之间距离为 20 m,因此分别分析在 3,6,9,12,15,18 m 宽度情况下车站的变形情况,结果如图 9 所示.

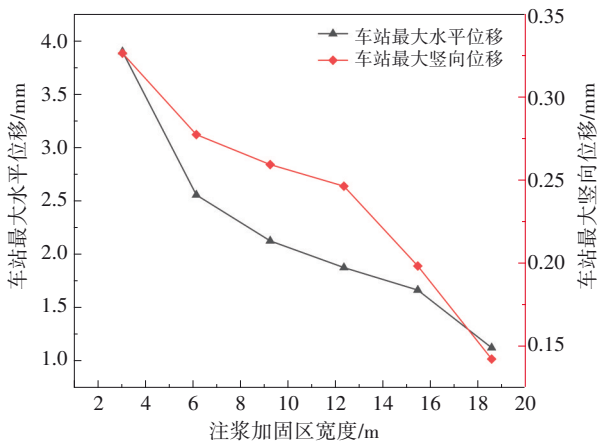


图 9 不同注浆加固区宽度下车站位移

Fig. 9 Station displacements under different grouting reinforcement zone widths

由图 9 可知,随着注浆加固区宽度的增加,车站最大水平位移和竖向位移呈下降趋势,当宽度从 3 m 增加到 12 m 时,车站最大水平位移和竖向位移均减小,从 12 m 增加到 18 m 时,车站最大竖向位移减小幅度加大.因此,考虑到安全性和经济性,本项目选取注浆加固区宽度 18 m,效果最佳.

### 3.1.2 注浆加固区厚度对车站变形沉降的影响

为了探究注浆加固区厚度对车站变形的控制效果,由于既有车站位于隧道上方 5 m 处,因此分别分析在 2.0,2.5,3.0,3.5,4.0,4.5 m 厚度情况下,车站的变形情况,此时宽度取自 3.1.1 节的最优宽度 18 m,结果如图 10 所示.

由图 10 可知,随着注浆加固区厚度的增加,车站最大水平位移和竖向位移逐渐减小,但是当注浆加固区厚度从 4.0 m 增加到 4.5 m 时,车站最

大水平位移和竖向位移有所增加,这说明注浆加固区厚度越大,对车站变形的控制效果越好,但是增加到一定程度后,将出现反弹情况.因为注浆加固区厚度过大时,注浆材料体积增加,引起地层过度压缩,导致既有车站发生位移变化.针对本项目,采取厚度为 4.0 m,效果最好.

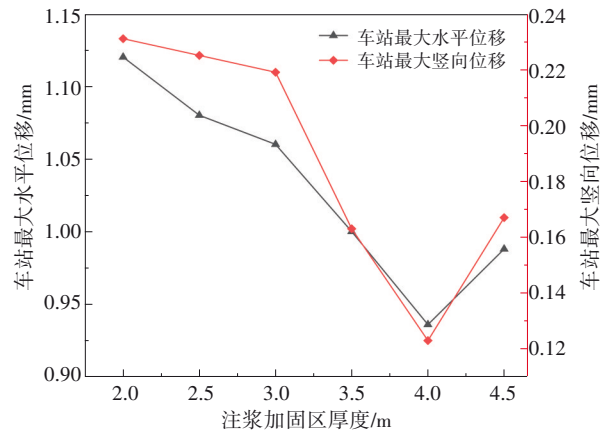


图 10 不同注浆加固区厚度下车站位移

Fig. 10 Station displacements under different grouting reinforcement zone thicknesses

通过数值模拟得到注浆加固区最优宽度和厚度后,分析 3 种注浆方案下,隧道开挖对上方既有车站的变形影响.

## 3.2 不等强度注浆加固有效性分析

### 3.2.1 计算参数

按照所制定的隧道下穿方案要求,隧道施工前应先进行深孔注浆预加固处理,在模型中,采用实体单元来模拟注浆加固区域,并通过增加注浆加固区域的物理力学参数来模拟注浆加固过程.注浆加固区域由 3 种强度的单液水泥浆组成,分别为高强度、中强度和低强度,以实现不同类型的加固效果.3 种类型注浆的物理力学参数见表 2.

表 2 注浆加固区物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of grouting reinforcement area

材料	弹性模量	泊松比	容重	黏聚力	摩擦角
	MPa		$\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	kPa	( $^{\circ}$ )
高强度注浆	75	0.25	24.5	60	43
中强度注浆	60	0.25	24.5	45	41
低强度注浆	45	0.25	24.5	20	38

根据本文所研究的不等强度注浆控制技术,设计出 3 种注浆加固方案,即等强度注浆、横向不

等强度注浆和空间不等强度注浆,其示意图如图 11 所示.

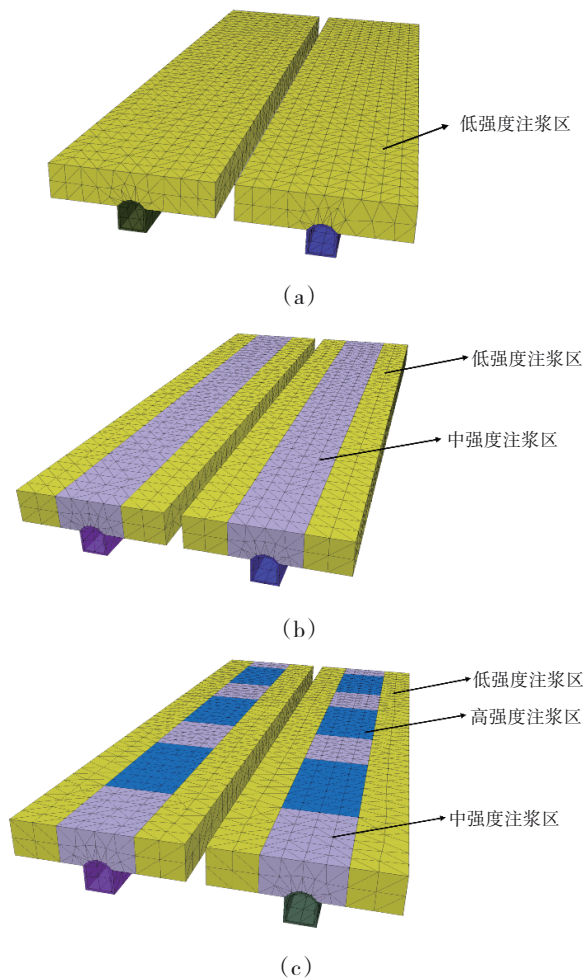


图 11 3种注浆方案示意图

Fig. 11 Schematic diagram of three grouting schemes

(a)一等强度注浆;(b)一横向不等强度注浆;(c)一空间不等强度注浆。

### 3.2.2 轨道交通结构变形控制指标

根据以往工程经验,地铁既有结构变形控制指标的确定应综合考虑与工程相关的多方面因素,比如隧道所处的线路位置、地质情况、区间结构形式、建设或使用年限等,并结合拟建工程与邻近既有线的相对空间位置关系,以及现状工程情况、限界空间测量结果、隧道使用指标要求等。综合上述各方面因素,依据相关规范和类似工程经验,既有结构水平位移控制值一般 $\leq 5$  mm,竖向位移控制值一般 $\leq 3$  mm,主拉应力控制值一般 $\leq 10$  MPa。

### 3.2.3 等强度注浆下既有线的结构的变形规律

在等强度注浆方案情况下,注浆加固区均采用低强度注浆加固区的参数,车站变形规律如图12~14所示。

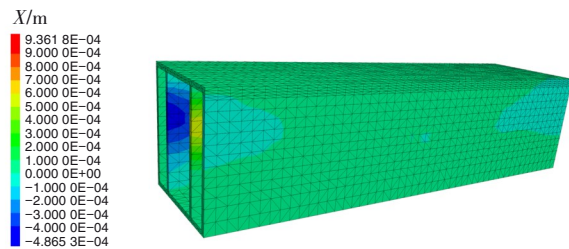


图 12 等强度注浆下车站水平位移

Fig. 12 Horizontal displacement of station under equal strength grouting

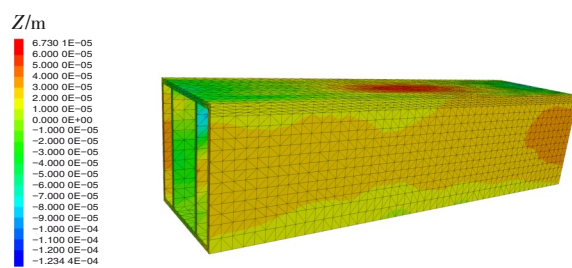


图 13 等强度注浆下车站竖向位移

Fig. 13 Vertical displacement of station under equal strength grouting

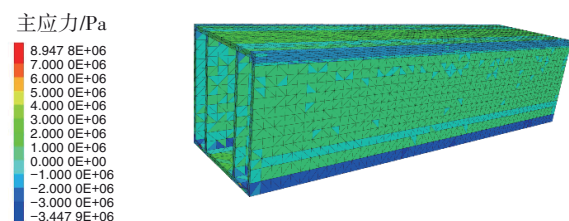


图 14 等强度注浆下车站主应力

Fig. 14 Principal stress of station under equal strength grouting

由图12和图13可知,在等强度注浆时,车站最大水平位移为0.936 mm,出现在既有车站下部,最大竖向位移为0.123 mm,出现在既有车站上部。由图14可以看出,最大主拉应力为8.95 MPa,出现在边墙转角下方处。

### 3.2.4 横向不等强度注浆下既有线的结构的变形规律

在横向不等强度注浆方案下,注浆加固区采用低强度和中强度注浆加固区的参数,车站变形规律如图15~17所示。

由图15和图16可以看出,在横向不等强度注浆时,车站的最大水平位移为0.527 mm,位于既有车站的中部,最大竖向位移为0.078 mm,位于既有车站上部。由图17可以看出,最大主拉应力为8 MPa,位于边墙转角下方。

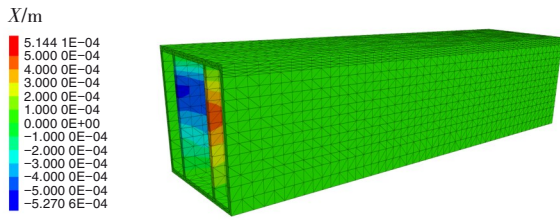


图 15 横向不等强度注浆下车站水平位移

Fig. 15 Horizontal displacement of station under lateral unequal strength grouting

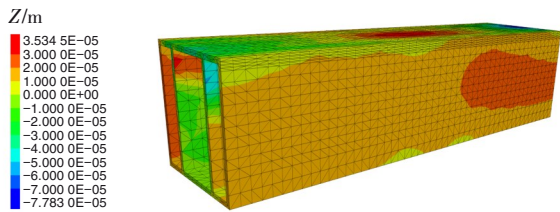


图 16 横向不等强度注浆下车站竖向位移

Fig. 16 Vertical displacement of station under lateral unequal strength grouting

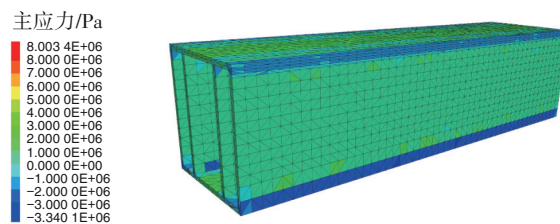


图 17 横向不等强度注浆下车站主应力

Fig. 17 Principal stress of station under lateral unequal strength grouting

### 3. 2. 5 空间不等强度注浆下既有结构结构的变形规律

在考虑空间不等强度注浆方案时,注浆加固区采用了低强度、中强度和高强度注浆的参数设置,车站变形规律如图 18~20 所示.

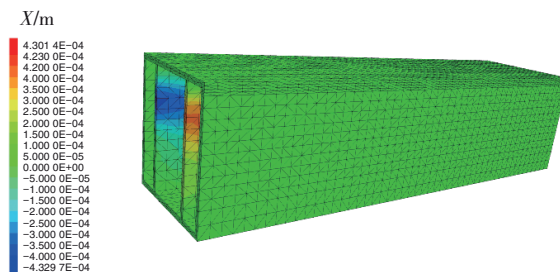


图 18 空间不等强度注浆下车站水平位移

Fig. 18 Horizontal displacement of stations under spatial unequal strength grouting

由图 18 和图 19 可以看出,在空间不等强度注浆时,车站的最大水平位移为 0.433 mm,在既有车站中部出现,最大竖向位移为 0.068 mm,在

既有车站两侧出现.由图 20 可以看出,最大主拉应力为 7.56 MPa,在边墙转角下方出现.

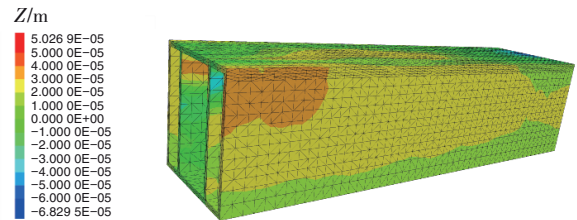


图 19 空间不等强度注浆下车站竖向位移

Fig. 19 Vertical displacement of station under spatial unequal strength grouting

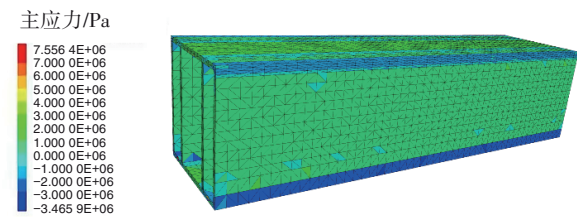


图 20 空间不等强度注浆下车站主应力

Fig. 20 Principal stress of station under spatial unequal strength grouting

### 3. 2. 6 3种注浆方案既有结构变形规律对比分析

在 3 种注浆方案情况下,车站的最大水平位移、竖向位移和最大主拉应力如图 21~23 所示.

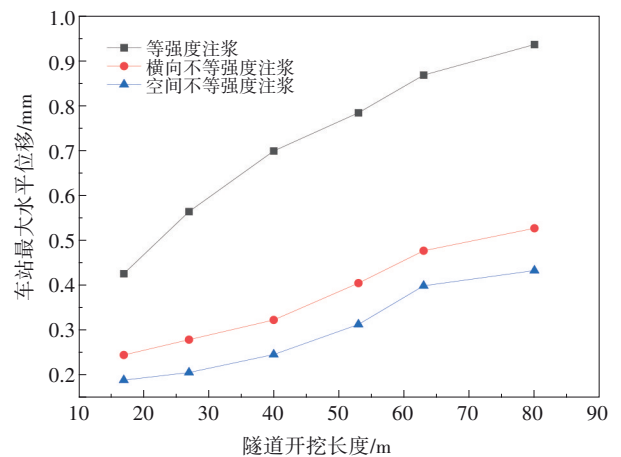


图 21 不同注浆方案下车站最大水平位移

Fig. 21 Maximum horizontal displacement of stations under different grouting schemes

由图 21 和图 22 可以看出,在等强度、横向不等强度、空间不等强度 3 种注浆方案情况下,车站的最大水平位移和竖向位移依次减小,水平位移降低幅度为 43.7% 和 17.8%,竖向位移降低幅度为 36.6% 和 12.8%.由图 23 可以看出,在 3 种注浆方案下,车站的最大主拉应力逐渐减小,降低幅度为 10.6% 和 5.6%.空间不等强度注浆更为合理,既有结构的竖向位移、水平位移和应力降幅

分别为 44.7%, 53.7% 和 15.6%。总体来看,近距离下穿既有地铁车站时,3 种方案下的既有车站的最大位移和主拉应力都在容许范围内,而空间不等强度注浆方案效果最好。

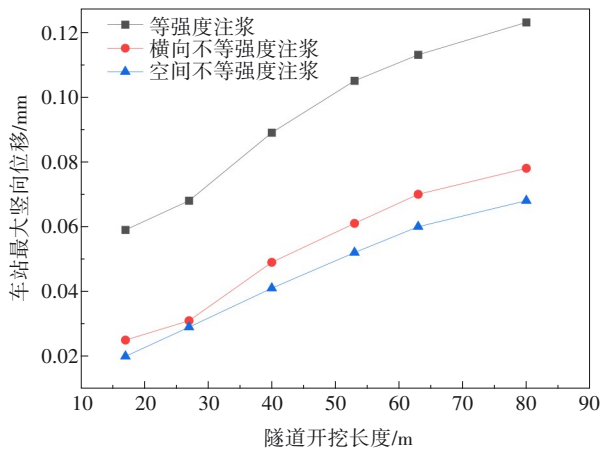


图 22 不同注浆方案下车站最大竖向位移

Fig. 22 Maximum vertical displacement of station under different grouting schemes

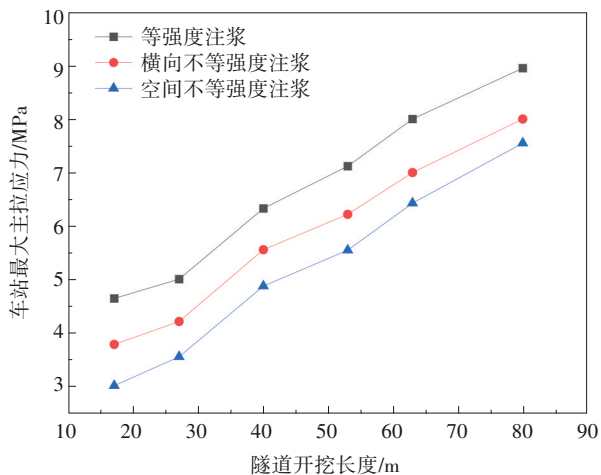


图 23 不同注浆方案下车站最大主应力

Fig. 23 Maximum principal stress of station under different grouting schemes

### 4 空间不等强度注浆的影响因素

在前文基础上,研究了不同注浆强度和低强度、中强度、高强度分布尺寸对空间不等强度注浆的影响,如图 24~25 所示,从而选出最优注浆加固参数。

从图 24 可以看出,当低强度、中强度和高强度注浆区强度增大时,车站最大水平和竖向位移先增大后减小再增大。初期,随着注浆强度的增大,侧向土压力的增加会限制土体的侧向变形,从而减小水平位移;然而,当注浆强度继续增大时,侧向土压力会达到一定程度,导致土体发生

破坏或松动,从而使得车站位移再次增大。

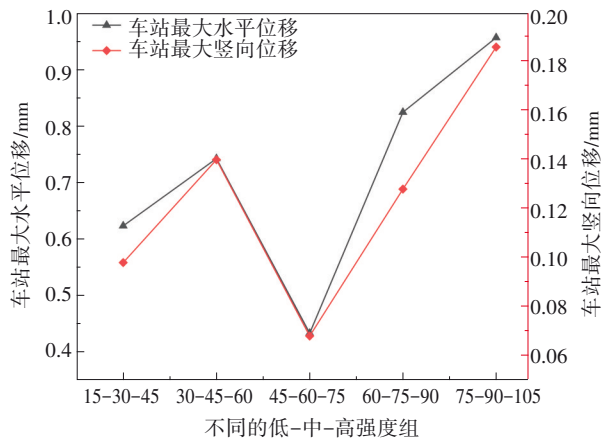


图 24 不同低-中-高强度组下车站位移

Fig. 24 Station displacement under different low-moderate-high strength groups

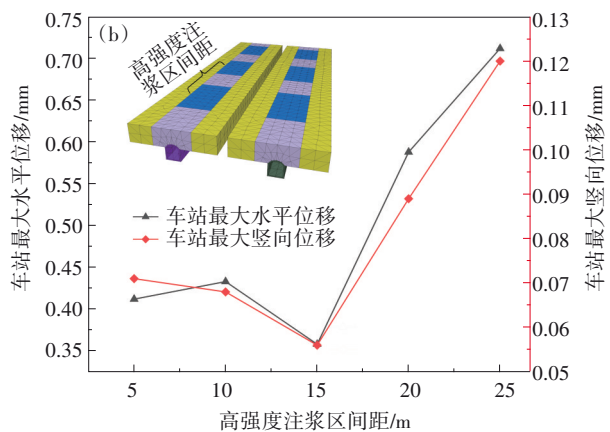
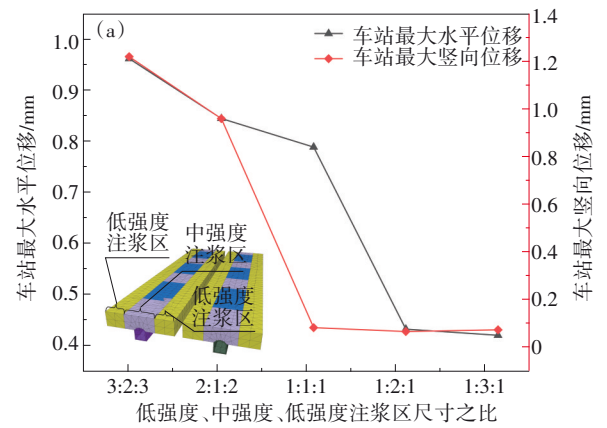


图 25 不同注浆分布尺寸下车站位移

Fig. 25 Station displacements under different grouting distribution sizes

(a)一不同低强度、中强度、低强度注浆加固区尺寸下车站位移;(b)一不同高强度注浆区间距下车站位移。

由图 25a 可知,随着中强度注浆区尺寸的增加,既有车站的水平位移和竖向位移随之减小,当低强度注浆区、中强度注浆区、低强度注浆区尺寸为 1:3:1 时,车站的最大水平位移和竖向位

移与1:2:1时变化不大。

通过图25b可以发现,当高强度注浆区间距增大时,既有车站的最大水平位移和竖向位移先减小后增大。在初期,高强度注浆会使得土体在注浆区域形成较强的注浆体,提高土体的支撑能力,从而减小位移;然而,随着注浆区间距的增大,注浆效应在未注浆区域的传递减弱,注浆的支撑效果下降,从而导致位移再次增大。

综上所述,考虑安全性和经济性,本工程可以选择采用弹性模量为45,60,75 MPa的浆液进行注浆加固,低强度注浆区、中强度注浆区、低强度注浆区尺寸为1:2:1,高强度注浆区间距为15 m。

## 5 结 论

1) 小导管参数对车站变形影响差异显著。增大小导管外插角、管径和长度均可减小车站的最大水平和竖向位移,但当管径和长度超过一定值时,变形反而增大。因此,设计时需综合考虑外插角、管径和长度,以优化控制效果。

2) 在小导管参数固定的情况下,增加注浆加固区的宽度和厚度能有效减小车站变形,但过大厚度则可能导致变形增大。因此,设计注浆加固区时应合理选择宽度和厚度,以确保最佳加固效果,并在实际工程中适当调整。

3) 对3种注浆方案下既有车站变形规律进行比较分析,结果表明既有车站变形规律基本一致,且3种注浆方案产生的最大变形量随注浆强度增加而依次递减。因此,实际工程中优先考虑空间不等强度方案。

4) 在空间不等强度方法下,随着注浆强度的增加,车站最大水平和竖向位移先增大后减小再增大。此外,当3种加固区尺寸不同时,车站的位移也有所变化。因此,本文选择弹性模量为45,60,75 MPa进行注浆加固,低强度注浆区、中强度注浆区、低强度注浆区尺寸为1:2:1,高强度注浆区间距为15 m。

### 参考文献:

[1] Zhao C Y, Lavasan A A, Hölter R, et al. Mechanized tunneling induced building settlements and design of optimal monitoring strategies based on sensitivity field[J]. *Computers and Geotechnics*, 2018, 97: 246-260.

[2] Yin H, Wang S H, Wang D S, et al. Sheltering effect induced by established station to the new station excavation in Zhengzhou [J]. *Archives of Civil and Mechanical*

*Engineering*, 2023, 23(3): 175.

- [3] Wang S H, Yang B, Dong F R, et al. Determination of the influence of the disturbance caused by traversing cross-type deep foundation pit excavations [J]. *Sustainability*, 2023, 15(2): 1130.
- [4] Li Y, Zhou G Y, Tang C A, et al. Influence of undercrossing tunnel excavation on the settlement of a metro station in Dalian[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(6): 4673-4687.
- [5] 赵文, 纪新博, 李慎刚, 等. 平行隧道施工引起地表沉降的数值试验研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2013, 34(3):439-443.  
(Zhao Wen, Ji Xin-bo, Li Shen-gang, et al. Numerical experiment studies on ground settlement during the parallel tunnels construction[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2013, 34(3): 439-443.)
- [6] Li P, Du S J, Ma X F, et al. Centrifuge investigation into the effect of new shield tunnelling on an existing underlying large-diameter tunnel [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 42: 59-66.
- [7] Zhang D M, Liu Z S, Wang R L, et al. Influence of grouting on rehabilitation of an over-deformed operating shield tunnel lining in soft clay [J]. *Acta Geotechnica*, 2019, 14(4): 1227-1247.
- [8] Wei Z D, Zhu Y P. Seepage in water-rich loess tunnel excavating process and grouting control effect [J]. *Geofluids*, 2021, 2021(1): 5597845.
- [9] 王东元, 曲慧红, 李文波. 既有线下邻近大断面地铁双隧道暗挖施工对地表形变的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(sup2):4075-4085.  
(Wang Dong-yuan, Qu Hui-hong, Li Wen-bo. Influence of underground excavation construction of double tunnels adjacent to large-section subway under existing lines on surface deformation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(sup2): 4075-4085.)
- [10] 张耀升, 王连广, 黄小斌, 等. 注浆锚杆界面应力分析及临界锚固长度计算[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(11):1618-1624.  
(Zhang Yao-sheng, Wang Lian-guang, Huang Xiao-bin, et al. Analysis of interface stress of grouting rockbolt and calculation of critical anchorage length [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2021, 42(11): 1618-1624.)
- [11] 李术才, 陈红宾, 张晓, 等. 粉质黏土隧道超前支护效应试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(4): 946-956.  
(Li Shu-cai, Chen Hong-bin, Zhang Xiao, et al. Experimental study on advanced support effect in silty clay tunnel[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019, 50(4): 946-956.)
- [12] 王辉, 王鹏, 梁明纯. 地铁隧道开挖超前小导管预注浆参数对地表沉降的影响[J]. *铁道建筑*, 2019, 59(3): 47-51.  
(Wang Hui, Wang Peng, Liang Ming-chun. Influence of parameters for pre-grouting with advanced small duct on ground surface settlement during metro tunnel excavation [J]. *Railway Engineering*, 2019, 59(3): 47-51.)
- [13] Shi Z, Xu J F, Xie X Y, et al. Failure mechanism analysis for tunnel construction crossing the water-rich dense fracture zones: a case study [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, 149: 107242.
- [14] 许明. 黏土隧道小导管注浆离心机模型试验[J]. *西南交通大学学报*, 2013, 48(3): 423-427, 434.  
(Xu Ming. Centrifuge model test of clay tunnel with embedded small duct grouting [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2013, 48(3): 423-427, 434.)