

DOI: 10.11779/CJGE20240345

侧部注浆点布设对盾构隧道受荷变形影响分析

黄大维^{1,2}, 陈后宏^{1,2}, 赵梽錡^{1,3}, 徐长节^{*1}, 耿大新¹, 江强波¹

(1. 华东交通大学山区土木工程安全与韧性全国重点实验室,江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学综合立体交通信息感知与融合江西省重点实验室,
江西 南昌 330013; 湘西土家族苗族自治州公路建设养护中心,湖南 吉首 416007)

摘要: 盾构隧道纠偏注浆作为一种非开挖隧道变形整治技术得到了工程应用,但纠偏注浆点的布设暂无依据,也缺乏相关分析。为了分析不同纠偏注浆点对隧道变形纠偏效果的影响,在室内模型试验的基础上建立侧部注浆仿真模型,开展了纠偏注浆点的布设方式对盾构隧道的影响分析。在已建模型的基础上对侧部单点和多点注浆模式的多种工况进行模拟,读取不同工况下隧道所受单位水平轴力、附加土压力、直径变化以及挠曲变形数据,分析表明:盾构隧道在水平注浆压力作用下会发生竖椭圆变形,且盾构隧道向注浆对侧发生水平挠曲变形;注浆点与隧道的净距离越小,注浆对隧道侧部产生的最大水平土压力越大,但注浆附加土压力的影响范围越小,当纠偏范围较小时,建议采用单点注浆;相同注浆量下,多注浆点均匀注浆既有利于盾构隧道附加土压力的均匀分布,当纠偏范围较大时,建议采用多点同时注浆的模式。

关键词: 隧道工程; 注浆模式; 数值模拟; 盾构隧道; 注浆纠偏; 模型试验

中图分类号: U451 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)08-1595-12

作者简介: 黄大维(1984—),男,湖南郴州人,博士,教授,博士生导师,主要从事地下铁道与岩土工程相关的研究工作。E-mail: gddthdw@126.com。

Influence of lateral grouting points on deformation of shield tunnels under loads

HUANG Dawei^{1,2}, CHEN Houhong^{1,2}, ZHAO Zhiqi^{1,3}, XU Changjie¹, GENG Dixin¹, JIANG Qiangbo¹

(1. State Key Laboratory of Safety and Resilience of Civil Engineering in Mountain Area, East China Jiaotong University, Nanchang

330013, China; 2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Comprehensive Stereoscopic Traffic Information Perception and Fusion, East

China Jiaotong University, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. Trunk Highway Department, Xiangxi Tujia and

Miao Autonomous Prefecture Highway Construction and Maintenance Center, Jishou 416007, China)

Abstract: As a deformation treatment technology for on-excavated tunnels, the rectification grouting of shield tunnel has been applied in engineering, but there is no basis for the layout of rectification grouting points, and there is no relevant analysis. In order to analyze the influences of different rectification grouting points on deformation rectification effect of tunnels, a model for lateral grouting is established on the basis of indoor model tests, and the influences of rectification grouting points on a shield tunnel are analyzed. Based on the established model, several working conditions of single-point grouting mode and multi-point grouting mode at the side are simulated, and the unit horizontal axial force, additional earth pressure, diameter change and deflection deformation data of the tunnel under different working conditions are read and analyzed. The smaller the net distance between the grouting point and the tunnel, the greater the maximum horizontal earth pressure generated by grouting at the tunnel side, but the smaller the influence range of the additional earth pressure of grouting. When the rectification range is small, it is recommended to adopt single-point grouting. Under the same grouting quantity, uniform grouting at multiple grouting points is beneficial to the uniform distribution of the additional earth pressure of the shield tunnel. When the rectification range is large, it is recommended to adopt multi-point simultaneous grouting mode.

Key words: tunnel engineering; grouting mode; numerical simulation; shield tunnel; rectification grouting; model test

基金项目:国家自然科学基金项目(52378398);江西省主要学科学术和技术带头人领军人才项目(20232BCJ22009);江西省自然科学基金项目(20242BAB26077)
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.52378398), the Jiangxi Province Major Discipline Academic and Technical Leader Leading Talent Project (Grant No.20232BCJ22009), and the Jiangxi Provincial Natural Science Foundation (Grant No.20242BAB26077).

收稿日期(Received): 2024-04-12 修回日期(Revised): 2024-10-26 接受日期(Accepted): 2024-11-15 网络出版日期(Online): 2024-11-16

*通信作者 (E-mail: xucj@zju.edu.cn)

0 引言

地铁建成后不可避免地将面临众多紧邻工程活动的影响,如地表堆载^[1]、基坑开挖^[2-4]、桩基施工^[5]、新建盾构隧道下穿^[6-8]等。紧邻工程易引发已建盾构隧道出现横断面变形与纵向挠曲变形超限现象,进而诱发管片接头渗漏水、漏泥漏砂、管片棱角破损等,严重影响隧道列车运营安全^[9]。针对整治隧道变形超限问题,传统方法通常采用隧道内加钢环或内贴加强纤维进行整治,然而内加钢环费用高(加固一环在30万元以上),内贴加强纤维主要用于防止隧道内侧因拉应力过大导致的开裂,且上述两种加固方法均需在隧道进一步发生不利变形后才能使加固发挥作用,因此无法改善隧道结构的受力,更无法使隧道结构的内力得到改善。

工程上常采用注浆法整治盾构隧道变形超限,已在上海、南京、天津等地进行了实践^[10]。对于已建隧道注浆变形恢复的研究,目前学者大多集中在实际工程案例与有限元数值模拟的结合分析,董敏忠^[11]对隧道水平注浆纠偏许多参数进行数值模拟,并通过注浆时土层中有无隧道两种情况来对比定义出了注浆有效范围和注浆效率两个新的概念;张冬梅等^[12]通过PLAX3D对注浆范围内土体虚加一个内应力来模拟注浆过程,探究了注浆量和注浆范围对既有隧道的影响;孙九春等^[13]结合PLAXIS有限元软件分析注浆对周围土体位移的影响,探究了不同注浆量、注浆深度、注浆长度等对周边土体变形的情况;邬泽^[14]通过制定“小卸载+注浆纠偏+大卸载”的技术方案来对软弱地层地铁盾构隧道进行注浆纠偏,达到了较好的注浆纠偏效果。郑刚等^[15]通过实际的工程案例的注浆纠偏以及与工程相匹配建模并控制相关参数,来表明注浆距离对土体侧向变形的影响和隧道水平位移、水平收敛随时间的变化规律,阐述了主动注浆来进行隧道变形恢复的优势,提出了“近距离、多孔位、小方量、由远及近”的注浆方案;程雪松等^[16]基于天津地区的一个注浆控制土体水平位移的试验,利用有限元计算软件PLAXIS开展了注浆控制土体水平位移的系统模拟,注浆过程采用应变法进行模拟,参数设置主要包括膨胀范围及膨胀量,研究了注浆距离对土体水平位移注浆控制效果的影响规律;郦亮等^[17]通过临近基坑开挖对宁波轨道交通3号线某区间隧道影响分析来设置注浆方案,设计了3个距隧道不同距离的注浆工况和一个对照组,并利用工隧道现场实测结果反算来确定模拟中面荷载大小来建立数值模型,说明了不同注

浆距离对注浆效果的影响。高翔等^[18]依托深圳地铁1号线鲤鱼门—前海湾区间的注浆纠偏工程,通过有限元软件ABAQUS,从注浆管打设角度、注浆压力和注浆范围3个方面进行竖向纠偏的规律进行研究。朱曼等^[19]根据设计的室内纠偏试验的参数,利用有限元软件ABAQUS建立三维有限元模型,来研究不同注浆压力和注浆位置下隧道变形的发展规律。

综上所述,针对变形恢复注浆对隧道影响的研究,大部分研究侧重于单个注浆点的各种参数对隧道变形影响,而对于隧道多点注浆的研究较少。另外,由于注浆施工工艺复杂,注浆效果受多种因素影响,注浆纠偏难以得到预期隧道变形恢复效果。此外,在注浆过程中极易诱发次生病害。因此,有必要开展不同注浆模式下隧道受荷变形研究。本文通过设计几何相似比1:10的室内单点注浆缩尺模型试验,得到了模型隧道受力以及变形数据。利用室内试验数据来完成有限元模型的验证,在验证后的有限元模型上分析不同注浆点位布设方式下的隧道位移、所受单位水平轴力以及周围土压力变化,来探明注浆点与隧道净距,隧道侧部单点注浆、多点注浆以及不同多点注浆模式对隧道的受荷变形影响,并根据分析结果提出了“多点分布”的注浆模式。该论文成果为盾构隧道侧部纠偏注浆方案的选择提供了参考。

1 室内模型试验

1.1 模型试验简介

室内模型试验所设计的模型盾构隧道是由32环管片通过螺栓和弹簧拼接而成,全长384 cm,其相似设计依据在参考文献[20]中进行了说明。相邻两个管片环之间通过螺栓和弹簧进行纵向连接,如图1(a)所示。隧道整体图如图1(c)所示,根据参考文献[21],得到隧道刚度为17.1 kN·m²。

本次试验所用土箱的长、宽、高分别为4,3,3 m,采用方钢加工,四周镶嵌木板与有机玻璃板。本次试验所使用的填土有两种,分别为砂土与橡胶粒,两种填土的级配曲线如图2所示,主要物理力学参数如表1所示。从图2可以看出,约90%的橡胶粒粒径均分布在2~5 mm范围,即为典型的均匀颗粒材料,经测定,橡胶粒的孔隙率为37.1%,压缩模量约为0.35 MPa,在隧道埋深范围内模拟软土地层。

在试验中,土壤分阶段进行填筑,每层填筑厚度约20 cm,采用人工夯实。在填筑过程中,未向模型箱添加水,因此处于无地下水注浆环境。在长宽高分

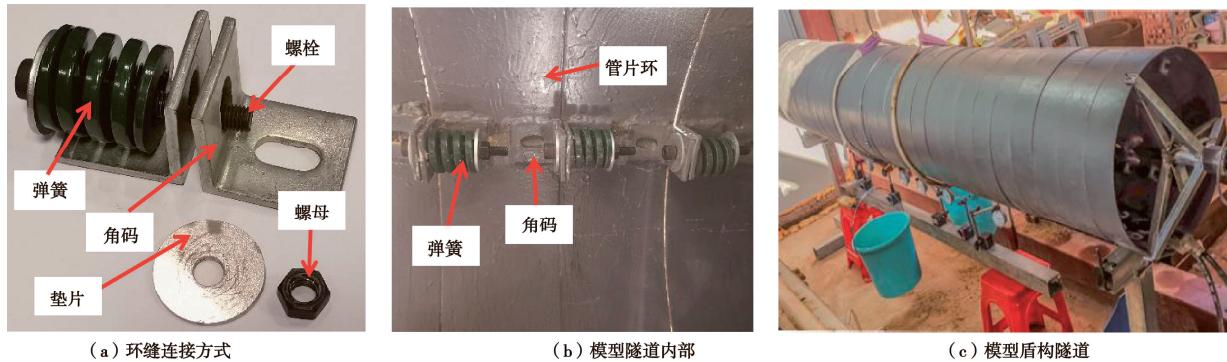


图 1 隧道设计

Fig. 1 Tunnel design

表 1 砂土和橡胶粒参数

Table 1 Parameters of sand and rubber particles

土样分类	填筑密度/ (g·cm ⁻³)	压缩系数	抗剪强度/ kPa	压缩模量/ MPa	泊松比	重度/ (kN·cm ⁻³)	黏聚力	摩擦角/ (°)
砂土	1.093	0.617	35.989	4.509	0.400	15.680	0	20
橡胶粒	0.617	1.612	120.596	0.351	0.450	9.800	22	12

别为 4, 3, 3 m 的试验土箱底部填筑 40 cm 砂土后, 将模型盾构隧道吊装进模型槽内。固定好模型盾构隧道后, 在隧道周围填筑橡胶颗粒, 橡胶粒层共填筑 58 cm, 填完后在隧道内安装位移监测计, 安装完毕后继续填筑砂土直至砂土层顶部距模型槽底部 210 cm, 如图 3 所示。静置 7 d 使填土稳定, 而后在隧道侧部打入注浆管。



图 3 试验填土过程

Fig. 3 Filling process for tests

在隧道内部共布置 11 组位移监测计, 分别布设于距隧道前端 20, 60, 90, 130, 160, 200, 240, 270, 310, 350, 390 cm 处, 用于测量模型隧道的直径变形与位移(如图 4 所示)。在隧道 4 个正方向上的表面布置土压力盒, 共布置 7 个断面, 分别距隧道前端 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350 cm, 用于测量隧道所受土压力, 图 5 为测量装置布设情况。

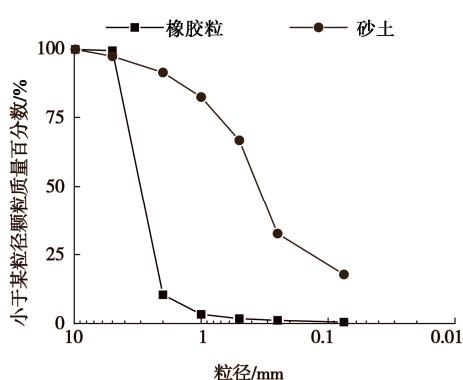


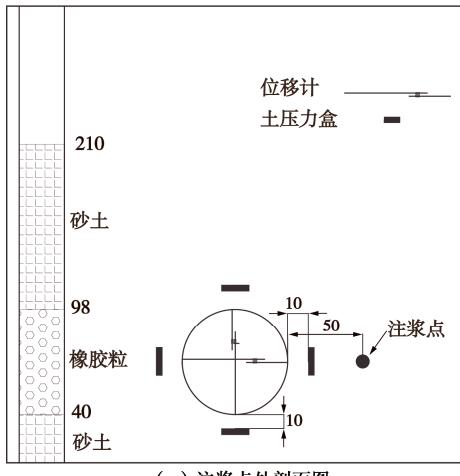
图 2 填土的级配曲线表

Fig. 2 Grain-size distribution curves of fills



图 4 位移计布置

Fig. 4 Arrangement of displacement meters



(a) 注浆点处剖面图

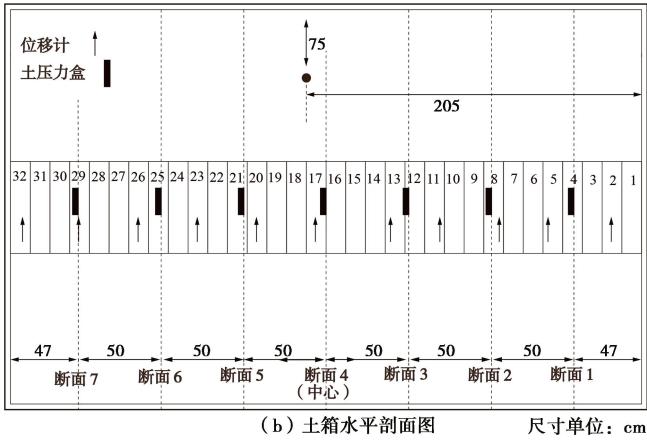


图 5 室内模型试验布置

Fig. 5 Layout of indoor model tests

1.2 侧部单点注浆试验及结果分析

将注浆点布置在距隧道前端 205 cm(由于导入注浆管时存在偏差, 故并未将注浆点位准确布置在沿隧道长度的正中间), 距隧道最近一侧 50 cm, 且与隧道中线平齐。浆液的组成成分为 20 kg 水泥、10 kg 膨润土和 18 kg 水, 总质量共计 48 kg, 水灰比为 0.6, 浆液的密度约为 $1.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。浆液在注浆前完成配制, 用注浆机(如图 6 所示)将浆液注入土层, 注浆时通过注浆机底部的电子秤, 实时监测浆液剩余质量。注浆结束后浆液剩余 24 kg, 即试验共计注浆质量为 24 kg, 故所注浆液的总体积约为 0.016 m^3 , 待隧道稳定后记录隧道受力及变形数据。

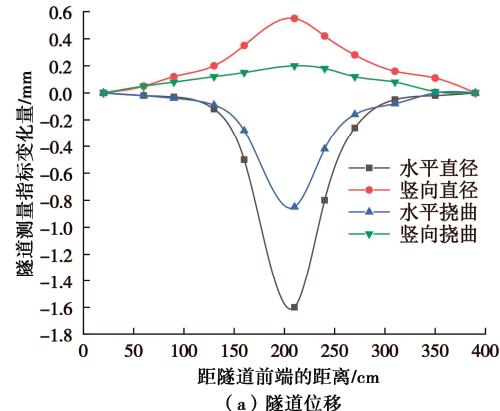
规定隧道直径以增大为正, 水平挠曲变形以隧道向注浆点一侧移动的方向为正方向, 隧道竖向挠曲变形以隧道向上拱起为正。图 7(a)为注浆后隧道的水平、竖向直径变化以及隧道水平和竖向挠曲变形曲线图。从图中数据可知, 在侧部单点注浆时隧道水平直径减小、竖向直径增大, 水平直径最大减小量为 1.65 mm, 竖向直径最大增大量为 0.5 mm。根据挠曲变形曲线可知, 水平方向上隧道向注浆对侧弯曲, 竖直方

向隧道向上抬升。图 7(b)为隧道注浆侧所受的附加土压力, 注浆侧隧道在注浆点周围所受的附加土压力最大, 为 32 kPa。注浆点两侧附加土压力逐渐减小, 而后逐渐保持在固定区间。

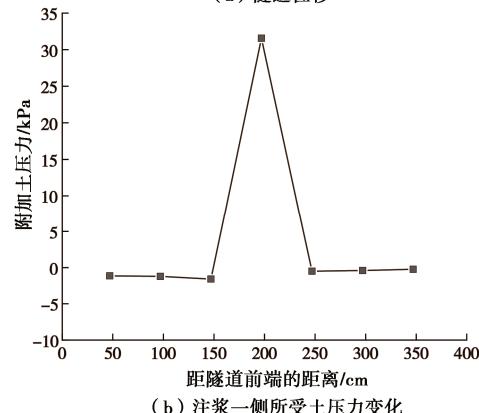


图 6 注浆机

Fig. 6 Grouting machine



(a) 隧道位移



(b) 注浆一侧所受土压力变化

图 7 室内模型试验测量数据

Fig. 7 Measured data of indoor model tests

2 有限元仿真模型简介

2.1 有限元模型参数简介

土体长和宽按照模型箱长宽设置, 土体总高按照填土高度设置, 土体参数按照表 1 设置, 隧道管片参数与注浆体参数按照表 2 设置, 由于室内模型试验取出的部分高浓度浆块的主体形状与长方体相似(如图 8 所示), 其长宽高尺寸约为 $0.25 \text{ m} \times 0.13 \text{ m} \times 0.20 \text{ m}$,

所以注浆体尺寸长宽高以 4:2:3 的比例进行设定, 即为 0.24 m×0.12 m×0.18 m, 注浆点的中心设置在距模型隧道注浆一侧 0.50 m。

表 2 管片和注浆体参数

Table 2 Parameters of segment and grout

材料分类	弹性模量/GPa	泊松比	重度/(kN·m ⁻³)
管片	206	0.25	73.5
注浆体	10	0.30	22.5



图 8 试验形成的注浆体

Fig. 8 Grout formed by tests

在进行网格划分时, 设定砂土、橡胶粒和隧道管片的播种数为 0.1, 即每隔 0.10 m 设置一个节点; 注浆体的播种数为 0.01, 即每隔 0.01 m 设置一个节点。赋予砂土、橡胶粒、管片、注浆体相应的材料属性, 其中砂土、橡胶粒和注浆体设定为 3D 单元, 采用莫尔-库仑模型模拟土体和浆液的弹塑性; 管片设定为 2D 板单元, 其厚度设置为 7 mm。

有限元模型各向除顶部均采用固定约束, 用以模拟模型槽对土体的约束作用, 并对模型施加自重。然后改变注浆体所在土体的材料属性为浆液属性, 对注浆体施加一个固定体应变来模拟注浆过程浆液的膨胀过程, 即压密注浆的过程, 该固定体应变设置为注浆体体积的 200%, 即均匀膨胀到注浆体体积的 3 倍, 膨胀后浆液总体积约为 0.016 m³。建立的有限元模型如图 9 所示。

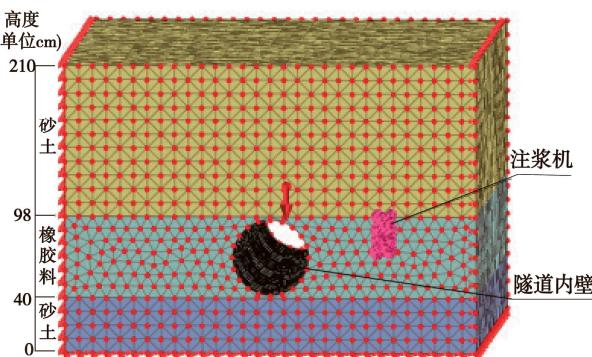


图 9 有限元模型

Fig. 9 Finite element model

2.2 有限元仿真结果分析

有限元模型建立后, 利用软件进行线性静力分析计算。分别提取注浆对侧和注浆侧的隧道水平位移、上部和底部竖向位移以及所受单位水平轴力数据, 并计算出隧道水平和竖向直径变化以及水平和竖向挠曲变形, 并与实测数据进行比对, 如图 10 所示。在数值上规定隧道直径以增大为正, 隧道所受土压力以增加为正, 在方向上以靠近注浆点的方向为水平挠曲变形的正方向, 以隧道向上拱起为竖向挠曲变形的正方向。

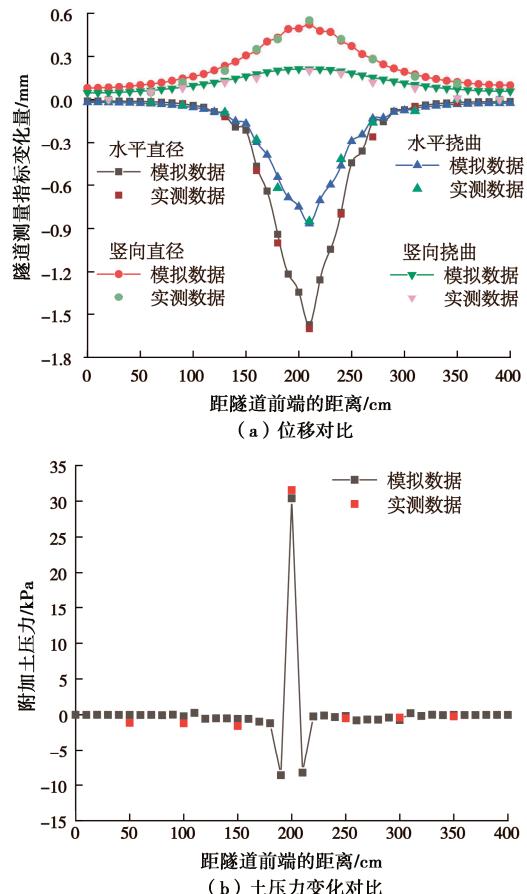


图 10 模拟与实测数据对比

Fig. 10 Comparison between simulated and measured data

从图 10 可以看出, 实测数据的最大值较模拟数据的最大值略大, 这是因为实测时有些浆液渗透到离隧道更近的地方进行挤密扩散; 在图 10 (b) 中模拟数据出现土压力减小的情况, 而实测数据没有, 是因为实测测点较少, 没有监测到减小的位置。但总体来看实测数据点与仿真模拟所得曲线拟合度高, 部分实测点与仿真模拟所得点重合, 且变化趋势也相似。基于数据点与变化趋势综合分析可知, 本次数值仿真模型所模拟的盾构隧道侧部注浆过程与结果均可靠, 可以选用该有限元模型作进一步影响参数分析。

3 注浆点位布设方式对隧道的影响

侧部经验证 MIDAS GTS NX 软件用于仿真分析

侧部注浆对盾构隧道受荷变形影响是可行的,故在上述有限元模型的基础上进一步模拟多种工况,对单点和多点注浆分别进行仿真分析。通过改变注浆点与隧道侧部的水平距离,分析单点注浆模式下不同注浆净距对隧道的影响;在对多点注浆模式进行仿真模拟时,探究固定注浆点数下不同注浆点位间距以及不同注浆点几何分布模式对盾构隧道受荷变形的影响规律。数值计算结果规定隧道以受压方向为轴力的正方向,隧道受到的土压力增大为正,隧道以直径增大为正值,隧道水平挠曲变形以向注浆点方向位移为正方向。

3.1 单点注浆模式下不同注浆净距对隧道的影响

将注浆点与隧道侧部的水平注浆净距记为 S ,如图 11 所示,其中注浆体长×宽×高的尺寸为 $0.24\text{ m} \times 0.12\text{ m} \times 0.18\text{ m}$ 。为了探究不同注浆净距对隧道的影响,一共设置 4 种工况,如表 3 所示。

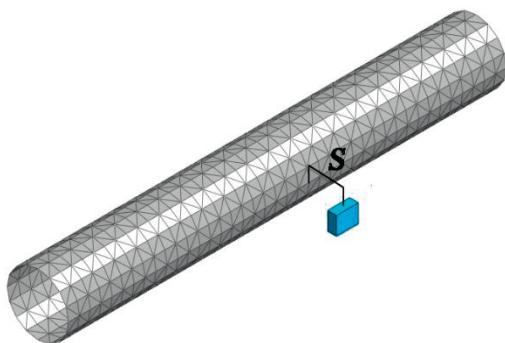


图 11 试验设计

Fig. 11 Trial design

表 3 不同注浆模式的注浆参数

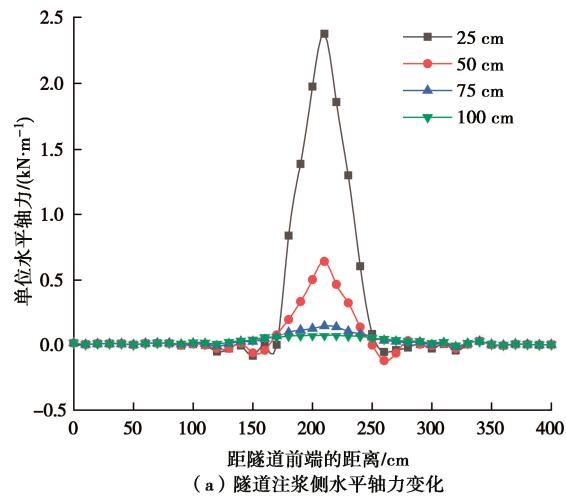
Table 3 Grouting parameters of different grouting modes

水平注浆 净距 (S/m)	注浆点 个数	每个注浆点膨 胀量 (以注浆点 体积为基准) /%	总膨胀量(以注 浆点体积为基 准) /%
0.25	1	200	200
0.50	1	200	200
0.75	1	200	200
1.00	1	200	200

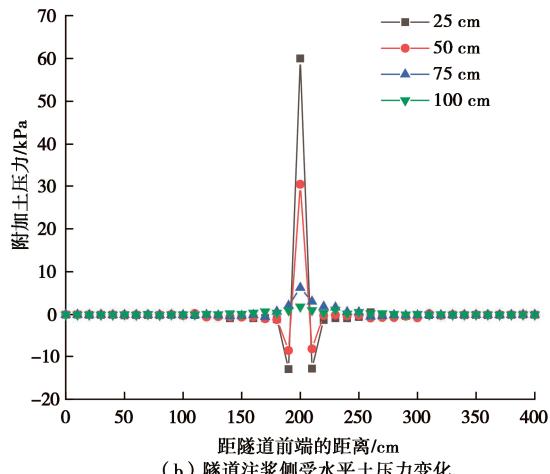
提取隧道板单元注浆一侧 x 方向上的单位长度水平轴力,如图 12 (a) 所示。图 12 (b) 为隧道注浆一侧受到的水平土压力。由图 12 (a), (b) 可知,随着注浆点与隧道的注浆净距逐渐增大,注浆形成的附加土压力经扩散后传导至隧道侧部表面的量逐渐减小,使得附加轴力减小。同时,由于注浆附加土压力扩散范围增大,使得隧道侧部受影响范围也增大。

图 12 (c) 为不同注浆净距下隧道直径变化曲线;图 12 (d) 为隧道挠曲变形曲线(以隧道的中心位移计算得到),隧道竖向挠曲变形以位移方向向上为正方

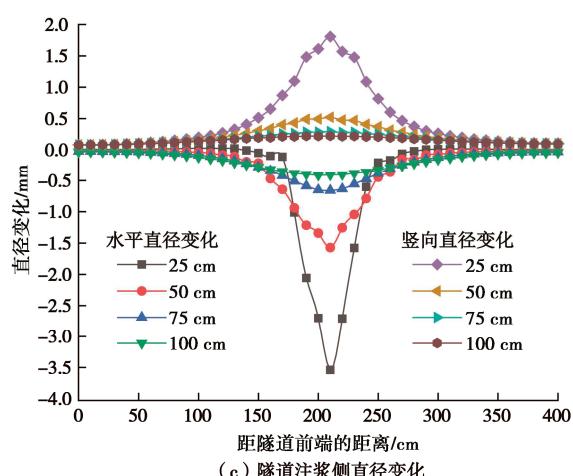
向。从图 12 (c) 可知,随着注浆点与隧道的水平注浆净距增大,注浆导致隧道水平和竖向直径的最大变化量减小,且净距越大,最大直径变化量的缩减量越大,隧道直径发生变化的区间也越大。图 12 (d) 中隧道的挠曲变形与图 12 (c) 中隧道直径变化趋势基本一致,说明在隧道侧部注浆时,隧道受到水平向注浆附加荷载,导致隧道发生竖椭圆变形,且变形量与注浆净距密切相关。位移云图如图 13 所示。



(a) 隧道注浆侧水平轴力变化



(b) 隧道注浆侧受水平土压力变化



(c) 隧道注浆侧直径变化

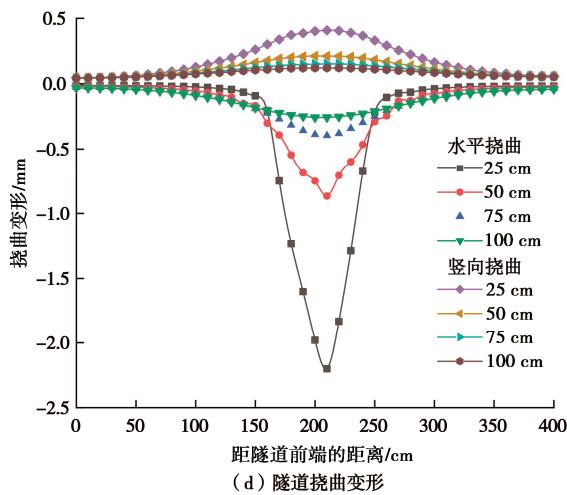


图 12 注浆点与隧道之间不同净距时对隧道的影响

Fig. 12 Influences of different clear distance between grouting point and tunnel on tunnel
位移云图

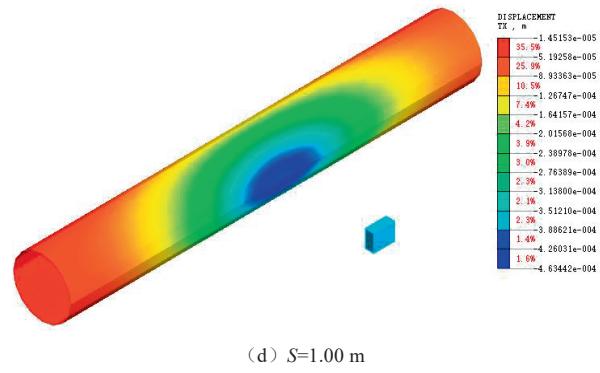
(d) $S=1.00\text{ m}$

图 13 位移云图

Fig. 13 Nephograms of displacement

3.2 多点注浆模式下不同点位间距对隧道的影响

为研究多点注浆点位间距 d 变化对隧道受荷变形的影响, 设计仿真模型时设置 3 个相同的注浆点, 沿隧道中线水平分布 (如图 14 所示), 与隧道注浆一侧的净距均为 50 cm, 3 个注浆体长 \times 宽 \times 高的尺寸均为 $0.24\text{ m} \times 0.12\text{ m} \times 0.18\text{ m}$ 。固定图 14 中 #2 点位位置, 同时移动其他点位, 改变相邻点位的间距, 并保持相邻点位间距相等, 具体工况设置如表 4 所示。

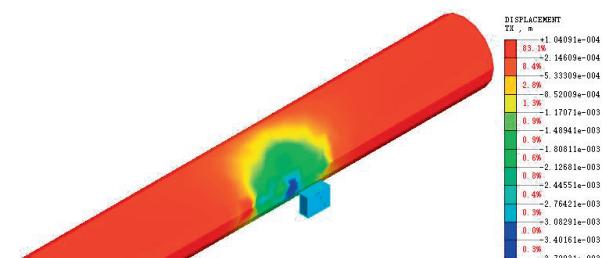
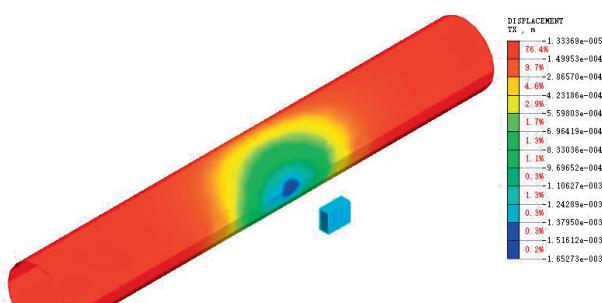
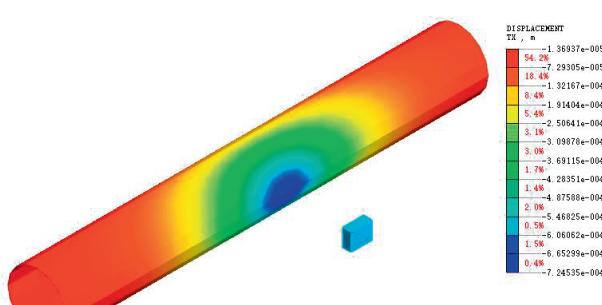
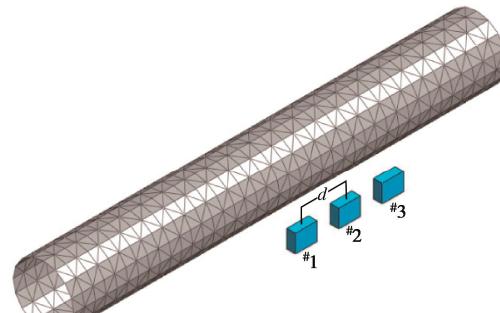
(a) $S=0.25\text{ m}$ (b) $S=0.50\text{ m}$ (c) $S=0.75\text{ m}$ 

图 14 多点注浆点位布设

Fig. 14 Layout of multi-point grouting points

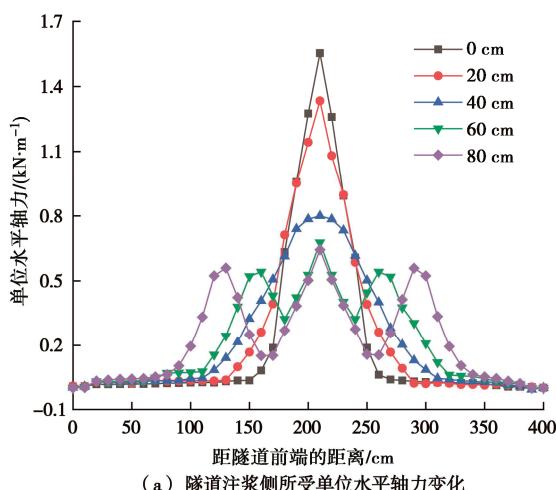
表 4 不同注浆模式的注浆参数

Table 4 Grouting parameters of different grouting modes

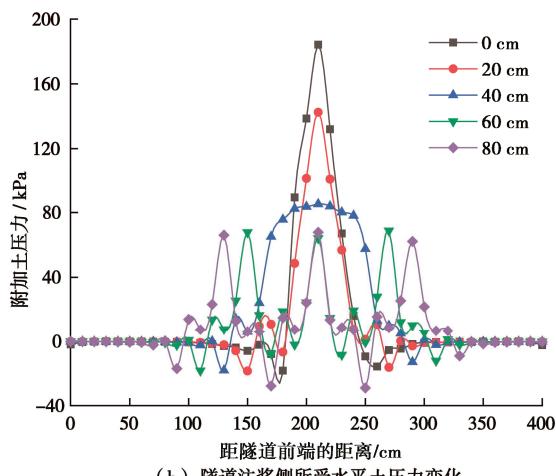
相邻注浆点位间距 d/m	注浆点个数	每个注浆点膨胀量 (以注浆点体积为基准) /%	总膨胀量 (以注浆点体积为基准) /%
0	1	600	600
20	3	200	600
40	3	200	600
60	3	200	600
80	3	200	600

图 15 (a) 为隧道注浆侧所受单位水平轴力, 图 15 (b) 为隧道注浆侧受到的附加土压力, 随着相邻点位间距的增加, 隧道侧部受到的最大水平轴力和附加土压力逐渐减小。单点注浆所产生的最大附加土压力大于多点注浆所产生的最大附加土压力, 但单点注浆

的附加土压力分布范围较小。图 15(c), (d) 分别为不同点位间距下隧道直径及挠曲变形的变化曲线, 当点位间距为 0 m (即单点注浆) 时隧道的水平直径变化量峰值为 3.85 mm, 均大于其他多点注浆工况下所产生的水平直径移峰值, 由于注浆附加荷载从注浆区向隧道两侧逐渐扩散且数值逐渐减小, 因此采用多点注浆所产生的隧道直径变形与挠曲变形量较单点注浆更为平缓。同时, 随着相邻点位间距的增大, 隧道水平直径变化量逐渐减小, 且均小于相同注浆量下单点注浆所产生的峰值。当点位间距为 20, 40 cm 时, 因注浆点之间的隧道区间表面所受附加荷载存在“叠加”效果, 故曲线变化连续平稳, 曲线峰值出现在与中间注浆点对应的位置。当点位间距为 60, 80 cm 时, 隧道直径和挠曲变形的曲线中存在多个峰值, 说明在这两种间距下浆液无法完全覆盖注浆区的隧道侧部表面, 使得注浆点之间的隧道变形及挠曲变形量先减小后增大。故在该仿真模型条件下, 随着注浆点之间的距离逐渐增大, 注浆点之间的隧道受荷变形“叠加”效果逐渐减弱。位移云图如图 16 所示。



(a) 隧道注浆侧所受单位水平轴力变化



(b) 隧道注浆侧所受水平土压力变化

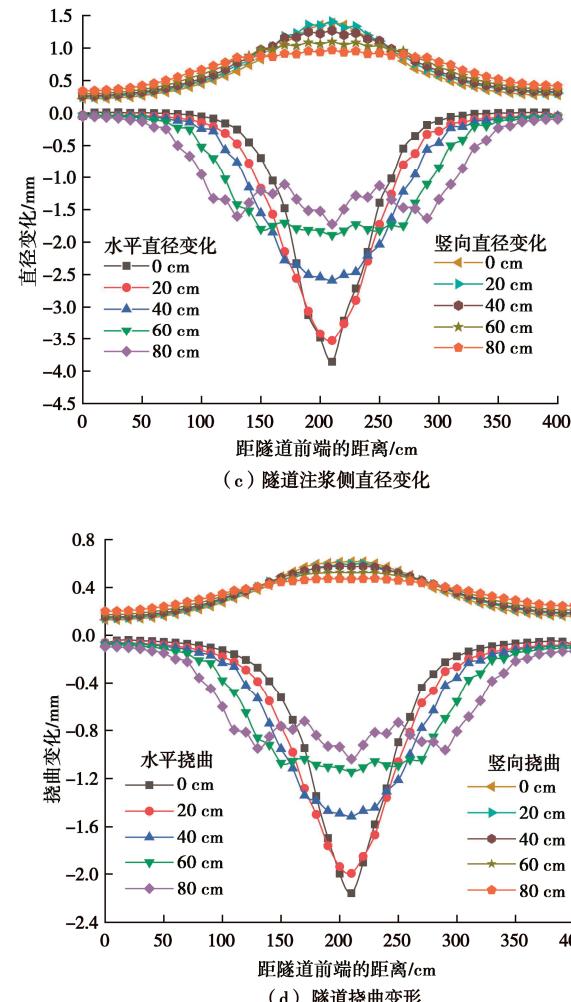
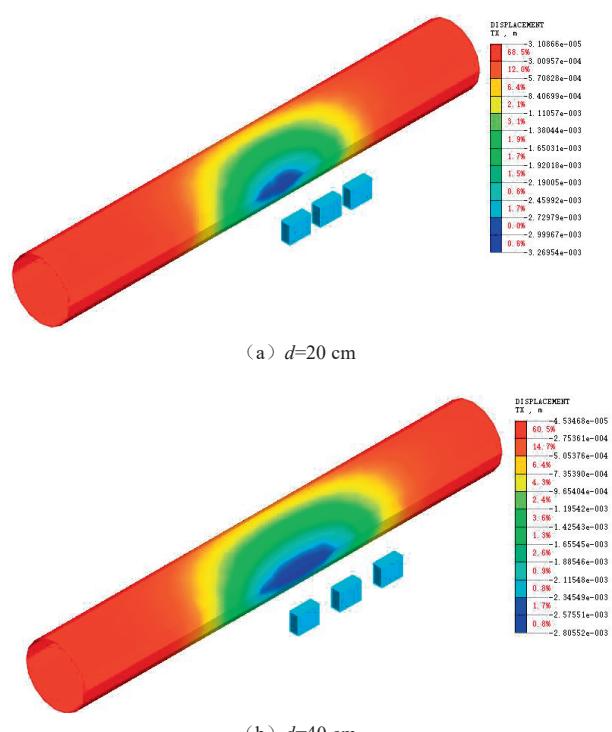


图 15 多点注浆点位间距对隧道的影响

Fig. 15 Influences of multi-point grouting point distance on tunnel

(b) $d=40 \text{ cm}$

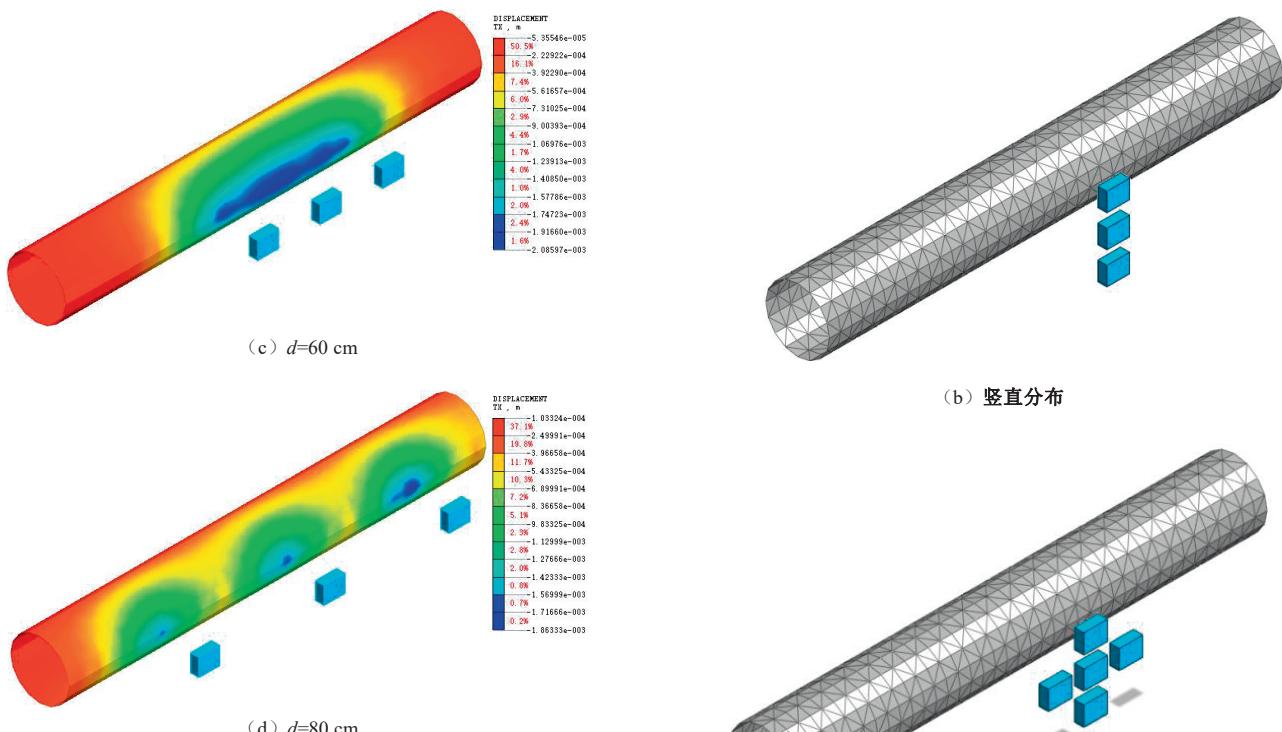
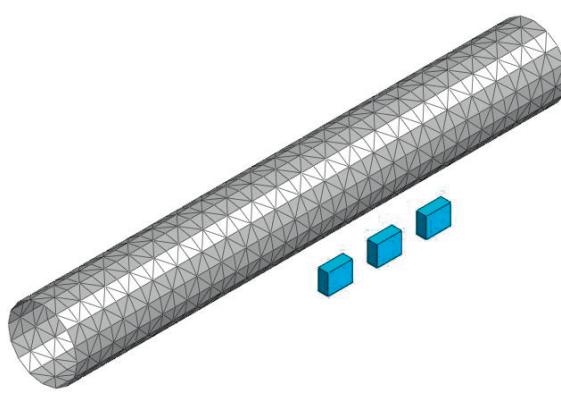


图 16 位移云图

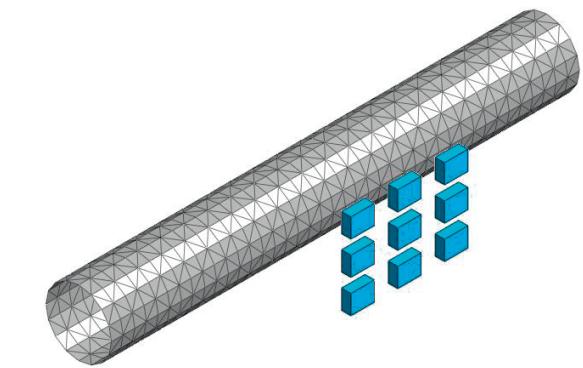
Fig. 16 Nephograms of displacement

3.3 不同多点注浆模式对隧道的影响

当隧道侧部的注浆点数量及几何排布方式发生变化时, 注浆附加荷载及位移变形分布也将发生变化。设计仿真模型时共模拟四种注浆点排布方式, 分别为横向分布(如图 17(a))、竖向分布(如图 17(b))、十字分布(如图 17(c))和矩形分布(如图 17(d))。其中横向分布与竖向分布均设置 3 个注浆点, 十字分布设置 5 个注浆点, 矩形分布设置 9 个注浆点, 所有注浆体长×宽×高的尺寸为 0.24 m×0.12 m×0.18 m。四种注浆点几何分布方式代表了 4 种工况, 每种工况的总固定体应变均设为定值, 根据注浆点数将注浆总固定体应变平均分配至各注浆体模拟注浆过程, 如表 5 所示。



(a) 横向分布



(d) 矩形分布

图 17 多点注浆不同模式

Fig. 17 Different modes of multi-point grouting

表 5 不同注浆模式的注浆参数

Table 5 Grouting parameters of different grouting modes

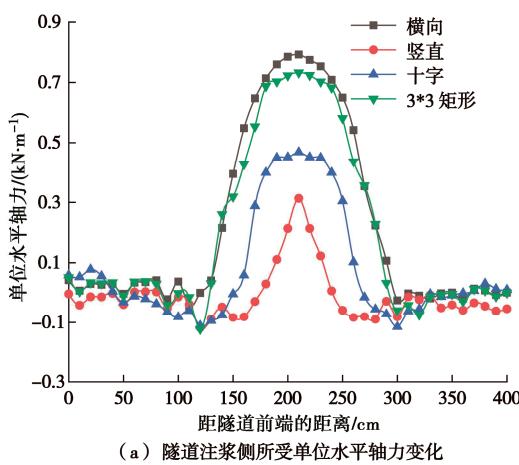
注浆点排布方式	注浆点数	每个注浆点膨胀量 (以注浆点体积为基准) /%	总膨胀量(以注浆点体积为基准) /%
横向分布	3	200	600
竖向分布	3	200	600
十字分布	5	120	600
矩形分布	9	66.70	600

图 18(a) 为隧道注浆侧的单位水平轴力曲线图, 当注浆点位横向分布时, 中心注浆点处的单位水平轴力最大, 约为 0.8 kN; 当注浆点位矩形分布时, 单位水平轴力最大值约为 0.75 kN。这两种分布模式下进行注浆, 所得到单位水平轴力在隧道侧部的分布趋势较

为接近, 十字分布模式与竖向分布模式所形成的轴力值较小。图 18 (b) 为隧道注浆侧的水平附加土压力分布曲线, 由曲线变化可知不同注浆模式均使隧道侧部产生附加土压力, 且横向分布与矩形分布的附加土压力值变化量较大。由此可知, 当注浆量一定时, 不同注浆点几何分布模式下隧道侧部受荷区间较为接近, 但轴力与附加土压力的变化值存在差异, 以横向和矩形分布模式对隧道水平向受力影响更为显著。

图 18 (c) 为隧道直径变化曲线图, 不同的注浆点布设模式均会导致隧道水平直径的增大, 从而产生竖椭圆形变。在这些模式中, 矩形分布下的水平直径变化量最大, 竖直分布下的水平直径变化量最小, 而十字分布下的水平直径变化量则大于横向分布。图 18 (d) 展示了隧道挠曲变形曲线图, 从图中可以得知, 四种注浆模式所产生的水平挠曲量与图 18 (c) 中的水平直径变化量一致, 且变化趋势相近。横向分布与矩形分布的竖向挠曲量变化接近, 且均大于十字分布, 而竖直分布模式下隧道竖向挠曲量最小, 且数值趋近于 0。

对比图 18 (a), (b) 与图 18 (c) 发现, 注浆点位矩形分布时在隧道注浆一侧所产生的单位水平轴力以及隧道所受的土压力全小于横向分布。然而, 当采用矩形分布时, 隧道的水平直径以及隧道水平挠曲均大于横向分布, 十字分布与横向分布也出现相同的现象。这一现象的原因在于隧道存在纵向刚度。假设矩形分布与十字分布除中间 3 个点位的两侧点位先行注浆, 此时 3 种注浆模式下隧道的纵向刚度均不相同, 且隧道纵向刚度大小关系为: 横向分布大于十字分布大于矩形分布。随后, 3 种模式的中间横向的 3 个点位再进行注浆。即使横向分布在注浆一侧所产生的附加荷载最大, 但由于在上述假设中其隧道的刚度最大, 其产生的变形也有可能是最小的。位移云图如图 19 所示。



(a) 隧道注浆侧所受单位水平轴力变化

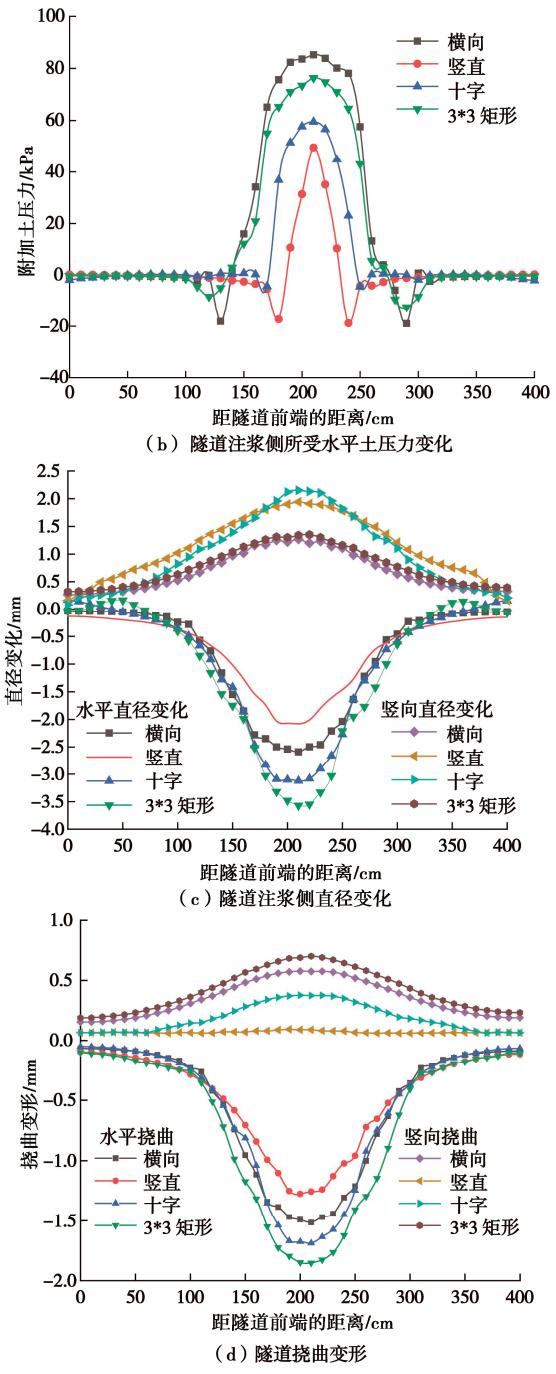
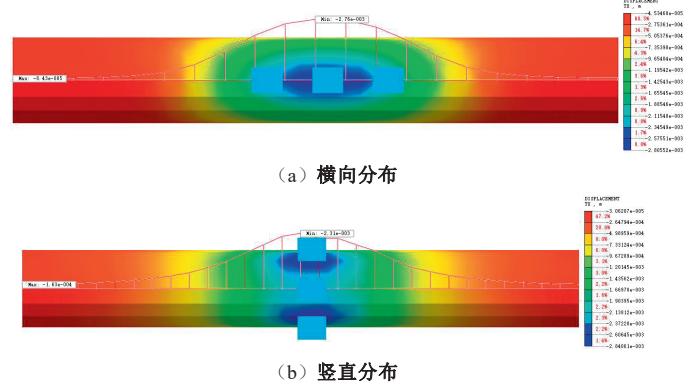


图 18 多点注浆模式中 4 种不同注浆点几何布设方式对隧道的影响

Fig. 18 Influences of four different grouting point geometrical layout modes on tunnel in multi-point grouting mode



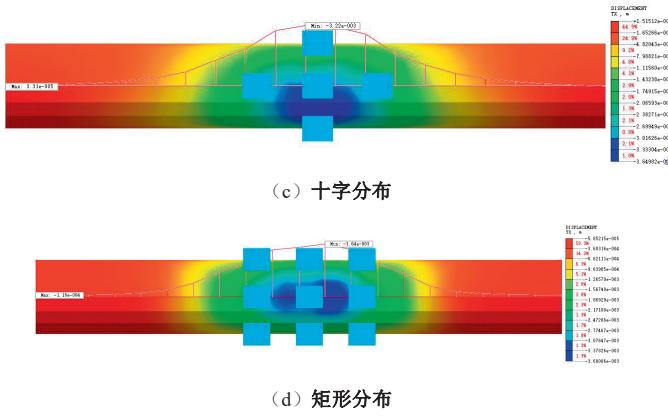


图19 位移云图

Fig. 19 Nephograms of displacement

4 结 论

(1) 模型试验分析表明, 在侧部注浆的附加水平荷载的挤压作用下, 模型盾构隧道发生了竖椭圆变形, 并向注浆对侧发生了较为明显的水平挠曲变形; 作为圆管状的盾构隧道, 在外部荷载作用下其横断面变形与纵向挠曲变形同时发生。

(2) 参照模型试验建立了数值仿真计算模型, 开展了注浆布设方案对盾构隧道的影响分析。注浆点与隧道的净距离对隧道影响分析表明, 净距越小, 注浆对隧道侧部产生的最大水平土压力越大, 而注浆附加土压力的影响范围越小, 当隧道纠偏区域较小时, 建议采用单点注浆。

(3) 注浆点布设模式分析表明, 相同注浆量时, 注浆点分布范围的均匀性对盾构隧道的附加土压力及隧道纠偏变形影响明显。当隧道纠偏区域较大时, 采用多注浆点均匀注浆有利于附加土压力的均匀分布, 也更有利于隧道水平纠偏效果。

(4) 为了使侧部注浆隧道产生良好的水平纠偏效果, 实际注浆过程中建议采用多点同时注浆, 即“多点均布”的注浆模式, 从而使盾构隧道产生更为均匀的附加土压力, 防止隧道发生错台、开裂等问题。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 黄大维、徐长节和耿大新参与试验设计; 陈后宏和赵桂琪完成试验操作与数值仿真分析; 黄大维、陈后宏、赵桂琪和江强波参与论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。The study was designed by HUANG Dawei, XU Changjie and GENG Daxin. The experimental operation and numerical simulation were completed by CHEN Houhong and ZHAO Zhiqi. The manuscript was drafted and revised by HUANG Dawei, CHEN Houhong, ZHAO Zhiqi and JIANG Qiangbo. All the authors have read the last version of

paper and consented for submission.

参考文献:

- [1] 梁发云, 袁强, 李家平, 等. 堆载作用下土体分层特性对地铁隧道纵向变形的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(1): 63-71. (LIANG Fayun, YUAN Qiang, LI Jiaping, et al. Influences of soil characteristics on longitudinal deformation of shield tunnels induced by surface surcharge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(1): 63-71. (in Chinese))
- [2] LI M G, CHEN J J, WANG J H, et al. Comparative study of construction methods for deep excavations above shield tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71: 329-339.
- [3] 魏纲, 洪文强, 魏新江, 等. 基坑开挖引起邻近盾构隧道转动与错台变形计算[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(7): 1251-1259. (WEI Gang, HONG Wenqiang, WEI Xinjiang, et al. Calculation of rigid body rotation and shearing dislocation deformation of adjacent shield tunnels due to excavation of foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(7): 1251-1259. (in Chinese))
- [4] LIANG R Z, WU W B, YU F, et al. Simplified method for evaluating shield tunnel deformation due to adjacent excavation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71: 94-105.
- [5] 可文海, 管凌霄, 刘东海, 等. 盾构隧道下穿管道施工引起的管-土相互作用研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(1): 221-228, 234. (KE Wenhai, GUAN Lingxiao, LIU Donghai, et al. Research on upper pipeline-soil interaction induced by shield tunnelling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(1): 221-228, 234. (in Chinese))
- [6] 魏纲, 齐永洁, 吴华君, 等. 盾构下穿既有地铁隧道环向围压及受力变化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(12): 3515-3527. (WEI Gang, QI Yongjie, WU Huajun, et al. Changes in circumferential pressure and stresses in existing tunnels caused by tunnel crossing[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(12): 3515-3527. (in Chinese))
- [7] JIN D L, YUAN D J, LI X G, et al. An in-tunnel grouting protection method for excavating twin tunnels beneath an existing tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71: 27-35.
- [8] LIN X T, CHEN R P, WU H N, et al. Deformation behaviors of existing tunnels caused by shield tunneling undercrossing with oblique angle[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71: 27-35.

- Technology, 2019, **89**: 78-90.
- [9] 孙 钧. 国内外城市地下空间资源开发利用的发展和问题[J]. 隧道建设(中英文), 2019, **39**(5): 699-709. (SUN Jun. Development and some issues on exploitation and utilization of urban underground space in China and abroad[J]. Tunnel Construction, 2019, **39**(5): 699-709. (in Chinese))
- [10] 郑思思, 蒋 军. 基于 SPH 方法注浆纠偏既有盾构隧道研究[J]. 低温建筑技术, 2022, **44**(7): 149-154. (ZHENG Sisi, JIANG Jun. Research of existing shield tunnels based on SPH method for grouting and correcting deviation[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2022, **44**(7): 149-154. (in Chinese))
- [11] 董敏忠. 注浆纠偏隧道水平位移的数值模拟[J]. 建筑科学与工程学报, 2021, **38**(6): 138-146. (DONG Minzhong. Numerical simulation on horizontal deformation control of tunnel by grouting[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, **38**(6): 138-146. (in Chinese))
- [12] 张冬梅, 邹伟彪, 闫静雅. 软土盾构隧道横向大变形侧向注浆控制机理研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(12): 2203-2212. (ZHANG Dongmei, ZOU Weibiao, YAN Jingya. Effective control of large transverse deformation of shield tunnels using grouting in soft deposits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(12): 2203-2212. (in Chinese))
- [13] 孙九春, 许四法, 王旭峰, 等. 注浆对邻近土体水平位移影响的数值模拟[J]. 地基处理, 2021, **3**(5): 397-401. (SUN Jiuchun, XU Sifa, WANG Xufeng, et al. Numerical simulation of grouting effects on horizontal displacement of adjacent soil[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, **3**(5): 397-401. (in Chinese))
- [14] 邬 泽. 填海区软弱地层地铁盾构隧道注浆纠偏技术研究[J]. 工程技术研究, 2022, **7**(1): 9-12. (WU Ze. Study on grouting deviation correction technology of subway shield tunnel in soft stratum in reclamation area[J]. Engineering and Technological Research, 2022, **7**(1): 9-12. (in Chinese))
- [15] 郑 刚, 潘 军, 程雪松, 等. 基坑开挖引起隧道水平变形的被动与注浆主动控制研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(7): 1181-1190. (ZHENG Gang, PAN Jun, CHENG Xuesong, et al. Passive control and active grouting control of horizontal deformation of tunnels induced neighboring excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(7): 1181-1190. (in Chinese))
- [16] 程雪松, 高 洁, 潘 军, 等. 注浆水平纠偏的作用规律与影响因素[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, **44**(5): 136-147. (CHENG Xuesong, GAO Jie, PAN Jun, et al. Effect and influencing factors of the grouting on the horizontal deformation control[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, **44**(5): 136-147. (in Chinese))
- [17] 邝 亮, 刘干斌, 陆 幸, 等. 邻近基坑开挖地铁隧道的注浆保护试验与数值模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2021, **17**(增刊 1): 387-396. (LI Liang, LIU Ganbin, LU Xing, et al. Grouting protection test and simulation of underground tunnel near foundation pit excavation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, **17**(S1): 387-396. (in Chinese))
- [18] 高 翔, 龚晓南, 朱 昂, 等. 盾构隧道注浆纠偏数值模拟研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, **17**(6): 1480-1490. (GAO Xiang, GONG Xiaonan, ZHU Min, et al. Numerical simulation of grouting remediation in shield tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, **17**(6): 1480-1490. (in Chinese))
- [19] 朱 昂, 龚晓南, 高 翔, 等. 盾构隧道注浆纠偏模型试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, **17**(3): 660-667. (ZHU Min, GONG Xiaonan, GAO Xiang, et al. Model tests of correction of displaced shield tunnel using grouting technique[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, **17**(3): 660-667. (in Chinese))
- [20] 黄大维, 徐长节, 罗文俊, 等. 考虑横向与纵向刚度相似的模型盾构隧道设计方法[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(11): 2299-2307. (HUANG Dawei, XU Changjie, LUO Wenjun, et al. Design method for shield tunnel model considering similarities of transverse and longitudinal rigidities[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(11): 2299-2307. (in Chinese))
- [21] 黄大维, 陈后宏, 罗文俊, 等. 纵向残余顶推力对盾构隧道纵向刚度影响试验研究[J]. 中国铁道科学, 2023, **44**(1): 142-152. (HUANG Dawei, CHEN Houhong, LUO Wenjun, et al. Experimental study on the influence of shield tunnel longitudinal rigidity induced by longitudinal residual jacking force[J]. China Railway Science, 2023, **44**(1): 142-152. (in Chinese))