

DOI: 10.11779/CJGE20241058

盾构下穿既有隧道诱发沉降后注浆抬升试验研究

黄大维^{1,2}, 胡新平^{1,2}, 耿大新^{1,2}, 樊潇宇^{1,2}, 杨威^{1,2}

(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)

摘要: 为探明囊袋注浆法整治盾构下穿既有隧道诱发沉降的效果, 在完成的盾构下穿模型试验基础之上, 自主设计出囊袋注浆法的注浆工艺, 进行了盾构下穿既有隧道诱发沉降注浆抬升试验研究, 对盾构下穿既有隧道诱发沉降注浆试验过程中既有隧道的挠曲变形、隧道沉降、附加土压力变化进行研究。试验结果表明: 在距离隧道北端部 120~250 cm 处, 既有隧道发生了明显的横椭圆变形; 同样在此位置处既有隧道抬升高度明显, 抬升最大值在隧道中部约为 15 mm。并且附加土压力变化显著, 且均为上升趋势, 在隧道中部时, 附加土压力增长值最大; 在注浆过程中, 囊袋注浆法对于浆液有着良好的束缚作用, 浆液压力主要集中在囊袋注浆口附近, 使周围土体产生了土拱效应; 在实际工程当中, 建议采用多点位同时注浆, 让隧道整体抬升, 使整治后的隧道结构内力以及结构形态恢复至下穿前的状态。同时加强在注浆过程中对隧道抬升的监测, 以防隧道抬升超出。

关键词: 盾构隧道; 模型试验; 囊袋注浆; 盾构下穿; 注浆抬升

中图分类号: U45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)11-2255-09

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工作。E-mail: gddthdw@126.com。

Experimental study on grouting uplift after settlement induced by shield tunneling under existing tunnels

HUANG Dawei^{1,2}, HU Xinping^{1,2}, GENG Daxin^{1,2}, FAN Xiaoyu^{1,2}, YANG Wei^{1,2}

(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, Nanchang 330013, China)

Abstract: To investigate the efficacy of the bag grouting technique in mitigating settlement induced by shield tunneling, a distinct grouting process is formulated subsequent to the completion of a model test simulating the said scenario. Subsequently, an uplift test is conducted to evaluate the technique's impact on the tunnel's flexural deformation, settlement, and changes in additional earth pressure exerted on the superstructure during the grouting-induced settlement test of an existing tunnel beneath a shield tunnel. The experimental findings reveal transverse elliptical deformations occurring within a zone of 120 cm to 250 cm from the northern terminus of the tunnel. Notably, a significant uplift in the superstructure is observed at this location, with the peak uplift reaching approximately 15 mm at the tunnel's midpoint. The greatest increment in additional earth pressure is recorded at the tunnel's midpoint as well. During the grouting operation, the bag grouting method exerts a robust binding effect on the grouting slurry and concentrates the slurry pressure predominantly around the injection point, thereby inducing a soil arching effect in the adjacent soil mass. In practical engineering, it is recommended to employ concurrent multi-point grouting to elevate the tunnel as a integral unit, thereby restoring the tunnel's internal forces and structural configuration to their pre-underpass conditions. Moreover, enhanced monitoring of the tunnel's uplift should be implemented throughout the grouting phase to avert excessive uplift.

Key words: shield tunnel; model test; bag grouting; shield through; grouting uplift

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 National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52378398), Jiangxi Province Major Discipline Academic and Technical Leader Leading Talent Project (Grant No.20232BCJ22009), and Jiangxi Provincial Natural Science Foundation (Grant No.20242BAB26077).

收稿日期(Received): 2024-10-23 修回日期(Revised): 2025-02-26 接受日期(Accepted): 2025-02-27 网络出版日期(Online): 2025-02-28

0 引言

盾构下穿既有隧道为当前隧道建设中常见的情形。在盾构下穿既有隧道时,既有隧道下方土体会受到扰动,由此诱发既有隧道的沉降,进而引发隧道病害,如管片错台、管片接头破坏以及隧道渗水等影响,将会严重影响地铁或者列车的正常运营^[1-5]。因此如何有效解决下穿既有隧道诱发沉降的问题至关重要。通过在隧道底部注浆是整治隧道沉降的重要手段之一,并且与其他整治隧道沉降方法相比,底部注浆可以更加有效的改变隧道的结构内力,且具有效率高、成本低的优势^[6]。

国内外学者对盾构隧道注浆试验,一般采用模型试验和数值模拟两种方法研究分析。在数值模拟方面,冯非凡等^[7]采用隧道围压三阶段重平衡理论,确定了注浆前后的具体参数,进而设计出水平注浆的精细化模型,验证了水平注浆对既有隧道的纠偏作用。郑思思^[8]基于 SPH 法对既有隧道注浆,提出施加“反力墩”和未加“反力墩”两种工况对既有隧道的抬升影响。于洪彪等^[9]采用 FLAC^{3D} 数值模拟软件,建立踩空区内注浆数值模拟模型,模拟出了踩空区内注浆对地表沉降的影响,验证了注浆保压工法可以减少隧道拱顶沉降。张继鹏等^[10]把宁波地铁隧道的实际工程得到的数据,与建立数值模拟模型得到的数据作为对比,得到在不同位置注浆对隧道的的影响程度不一。付艳斌等^[11]建立了隧道注浆抬升力学模型,验证了注浆整治隧道与隧道底部土体的弹性模量有关。高翔等^[12]根据注浆纠偏在隧道工程的实际应用规律,建立了考虑注入的浆液为二维流耦合模型的注浆模型,找到在注浆角度、注浆压力以及注浆范围 3 个方面对隧道竖向变形纠偏的规律。

在模型试验当中,孟凡衍等^[13]结合圆孔扩散理论以及隧道—地层相互作用,设计出在软黏土层内的盾构隧道底部注浆时抬升—沉降的计算公式。朱旻等^[14]根据在注浆过程中隧道纵面和断面的变形规律,发现在隧道下方注浆,浆液的水平力和纵向弯矩在注浆的中心区域最大,在两侧是逐渐减小的。黄大维等^[15]通过测出在注浆过程中隧道周围的土压力以及隧道变形,发现在注浆后,浆液发生了紧密扩散,浆液压力转化为了附加土压力。周俊宏等^[16]结合 PIV 技术,模拟盾构隧道抬升的模型试验,得出隧道在注浆抬升过程中轮廓面内土体之间也存在剪切滑移作用面。现有研究主要集中于注浆技术在地层作用下隧道变形与沉降纠偏中的应用,而针对盾构下穿既有隧道诱发沉降的注浆整治研究尚属空白。因此本次试验是在完成盾

构下穿试验的基础之上,进行了盾构下穿既有隧道诱发沉降注浆抬升试验。该抬升试验采用了囊袋注浆法,囊袋注浆法可以有效的控制注浆量,并且在注浆时不会漏浆。

为探明囊袋注浆法整治盾构下穿既有隧道诱发沉降的效果,本文设计了几何相似比为 1:10 的模型试验。模拟了囊袋注浆法整治下穿盾构隧道沉降的过程,分析既有隧道的挠曲变形、隧道沉降、附加土压力变化。

1 底部注浆抬升模型试验简介

1.1 盾构下穿模型试验简介

模型试验土箱长×宽×高分别为 4 m×3 m×3 m,模型土箱主框架结构由钢材组成,通过螺栓进行连接,接缝处使用焊条焊接进行了加固,在四周分别镶嵌钢化玻璃片以及木板作为墙体。采用砂土作为填充材料,填筑方式采用分层填筑,每层填筑高度为 20 cm,每次填筑完成后,在砂土上放置相同的重物,对土体进行压实,确保土体的密度一致。对每层取得的土样进行密度计算,取每层土样的密度的平均值作为土箱砂土的密度约为 1.80 g/cm³。填筑完成静置两周后,开展盾构下穿试验,为了更好的模拟出实际盾构下穿情况,该试验使用了自主研发比例为 1:10 的模型盾构机,如图 1 所示。

根据实际盾构机外壳直径综合考虑,模型盾构机外壳直径确定为 0.7 m,模型盾构机长度为 1.2 m。盾构机与始发架连接,始发架后端安装有反力架,在反力架两侧均放置液压千斤顶,将液压千斤顶与始发架连接。通过液压千斤顶顶推始发架,从而达到盾构机向前掘进的效果,挖掘完成后,既有隧道沉降如图 2 所示。

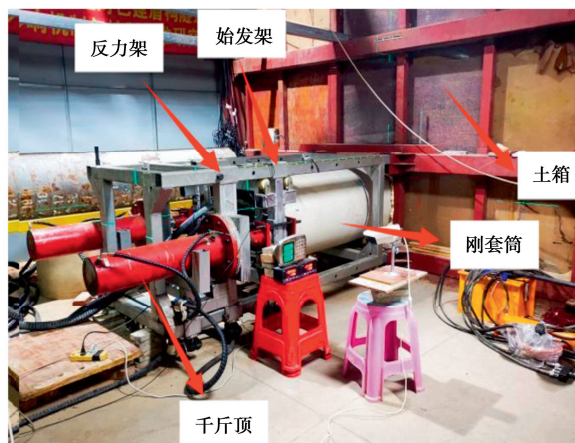


图 1 模型盾构装置

Fig. 1 Model shield tunneling device

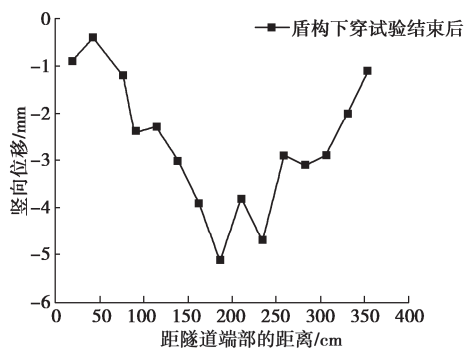


图 2 既有隧道沉降

Fig. 2 Settlement of existing tunnel

1.2 抬升模型试验简介

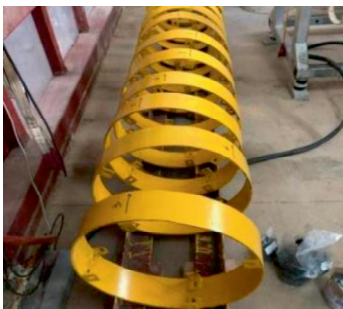
既有隧道模型是参照上海盾构隧道为原型设计而得,原型管片环和模型管片环的参数对比如表 1 所示。

表 1 原型管片环与模型管片环的参数对比

Table 1 Parameter comparison between prototype segment ring and model segment ring

对比参数	幅宽/ mm	弹性模 量/GPa	厚度/ mm	横向刚度/ (kN·m ⁻²)
原型管片环	1200	35.5	350	70623.7
模型隧道管片	120	206	6.998	0.705975

既有隧道模型由 31 环均质圆环通过弹簧和螺栓连接而成,管片的具体连接方式如图 3 所示。该模型管片环幅宽为 120 mm,厚度为 7 mm,外径 620 mm,内径为 606 mm。连接管片所用的螺栓长度为 90 mm,弹簧的直径和长度 40 mm,角码的边长为 40 mm,厚度为 5 mm,角码的开口长度分别为 25, 13 mm。该模拟模型的详细设计方式参考文献[17]。



(a) 模型盾构隧道管片



(b) 角码构件



(c) 隧道管片连接

图 3 模型隧道管片环缝连接

Fig. 3 Model shield tunnel segment joint connection

试验浆液是以水泥、水、膨润土比例为 1 : 1.88 : 0.15 配置而成,配置的浆液含水率为 60%。在注浆前,将囊袋一端初步固定在注浆管上,用铁丝缠绕囊袋口直至完全密封。为了保证注浆管与囊袋在注浆时的中心位置一致,囊袋的另一端口同样使用铁丝固定,以铁管为中心使注浆管和囊袋中心位置保持一致。在土箱的侧面木板打孔,由于土箱结构原因,打孔位置与土箱木板形成约为 45° 斜向孔位,以确保囊袋进入后到达指定注浆点位。当囊袋位于注浆位置后,将铁管抽出,采用砂土将注浆管与注浆孔之间的空隙填充充实。注浆开始时,浆液在注浆机的作用下,通过注浆管,注入囊袋内。

1.3 土压力和隧道变形监测简介

注浆点位设置在上下隧道的交叉区域,采用双点位注浆,注浆方式为左右两侧点位依次注浆,两侧点位的注浆距离为 60 cm。试验所用的隧道变形测量装置如图 4 (a) 所示,模型隧道内分别布设 15 个测量长尺与 15 个测量短尺,通过读取相对位移与十字激光对准测量长尺上的刻度来测量隧道的相对变形(内部直径变化)和绝对变形(内部挠曲变化)[18]。

模型试验的既有隧道长度 3.72 m,土箱长度为 4 m,在隧道端部以及隧道连接处,喷上玻璃胶防止砂土掉入隧道内部。为了监测注浆时隧道四周的土压力变化情况,在隧道四周均布设了土压力盒。土箱内土压力盒布设如图 4 (b), (c) 所示。土箱内埋设的土压力盒直径为 114 mm、厚度为 30 mm、量程为 300 kPa,土箱内既有隧道四周土压力布置平面图,如图 5 所示。土压力盒布置均距隧道管片外表面 10 cm,每个土压力盒布置相差 20 cm。土压力盒布设在相对应的位置后,将数据测试线按照统一方向沿着隧道走向方向排列。



(a) 测量元件布设



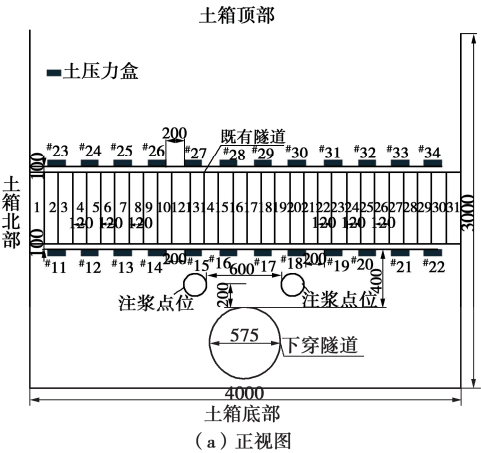
(b) 隧道两侧土压力盒布设



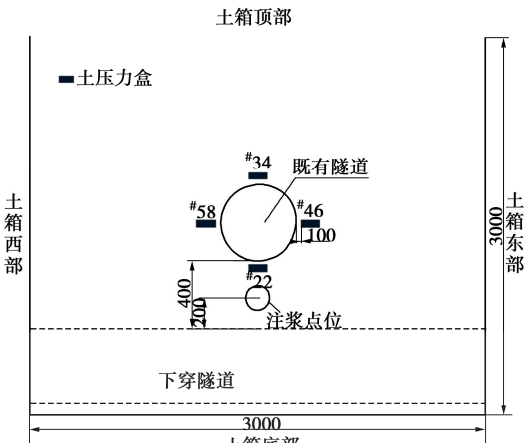
(c) 隧道底部土压力盒布设

图 4 测量元件布设

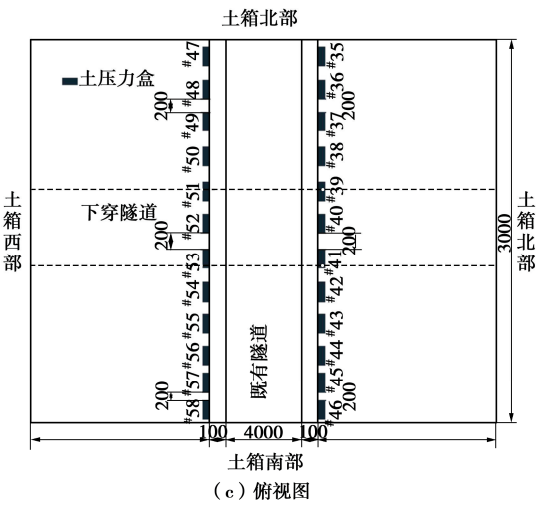
Fig. 4 Layout of measuring elements



(a) 正视图



(b) 侧视图



(c) 俯视图

图 5 土压力盒布置平面图

Fig. 5 Plan view of earth pressure cell layout

1.4 注浆抬升试验过程简介

囊袋实际构造图如图 6 (a) 所示, 使用铁丝将囊袋两端密封, 保证囊袋的密封性。如图 6 (b) 所示, 试验采用的注浆机, 最大注浆压力为 1 MPa, 将注浆机放在垫有木板的电子秤上, 通过注浆后的电子秤读数减少的数值来确定每次的注浆量, 依此可以确保每次注浆量的相同。压力表连接至注浆机上, 向压力表管内注水, 保证管内空气排空后, 关闭压力表阀门, 后将注浆管与注浆机连接。如图 6 (c) 所示、将囊袋注浆管斜插入 45° 伸入预先设计长度, 使得囊袋可以到达上下隧道交叉区域的注浆点位。试验是双点位注浆, 采用的是左右两点交替注浆的方式, 首次注浆左右两侧各注入 5 kg 的浆液, 后每次注浆 3 kg, 总共注浆量为 37 kg。左侧囊袋注浆 7 次, 右侧囊袋注浆 6 次, 从注浆开始直至注浆结束, 注浆孔四周均未有漏浆的现象。

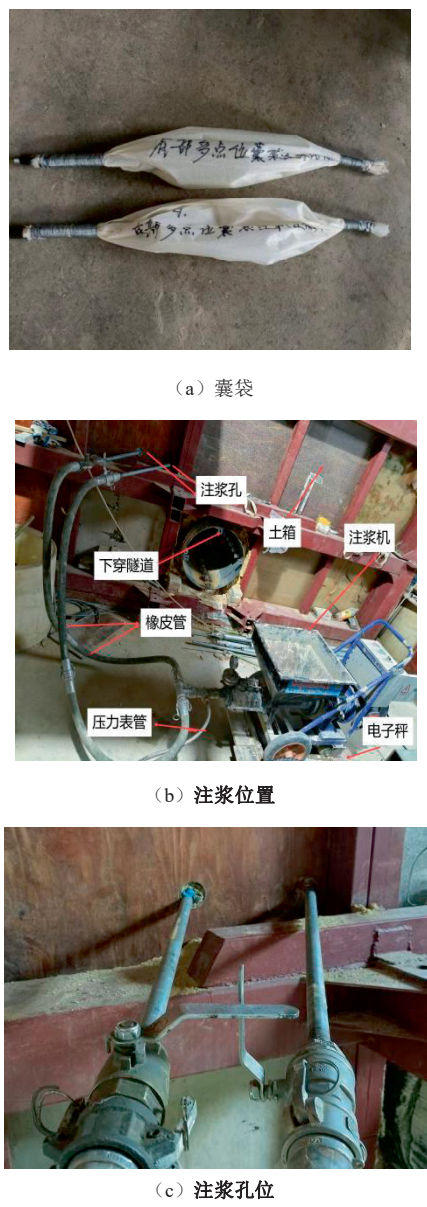


图 6 注浆试验模拟装置

Fig. 6 Simulation device for grouting test

2 注浆抬升试验结果分析

2.1 注浆周围附加土压力分析

注浆后既有盾构隧道周围的附加土压力变化如图 7 所示, 盾构下穿既有隧道注浆抬升试验, 采用双点位注浆方式, 总共注浆量为 37 kg, 注浆完成后, 对布置在既有隧道四周的土压力盒进行读数。

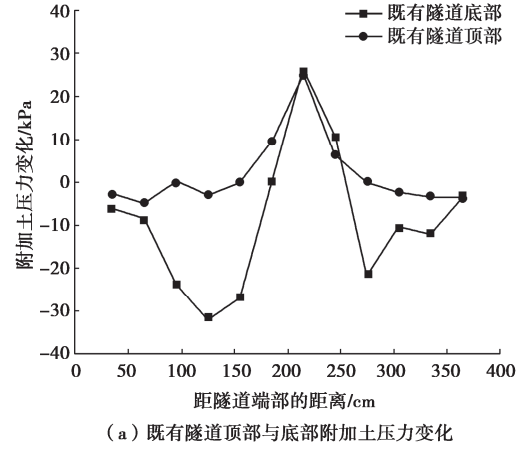
由图 7 可知, 既有隧道四周的附加土压力变化趋势相同, 均在注浆区域内附加土压力变化值增长显著, 在注浆区域范围之外, 附加土压力变化值无明显变化。这说明在注浆过程中, 囊袋对周围土体的挤压效果明显, 可对周围土体产生较大的压力, 但对周围土体的影响有限, 因而当土体在距离注浆范围之外时, 土压力所受到的压力迅速降低, 直至无影响。这使得囊袋

注浆法在整治盾构下穿既有隧道诱发沉降的过程中, 可以减少在注浆过程中对既有隧道四周土体的二次扰动。

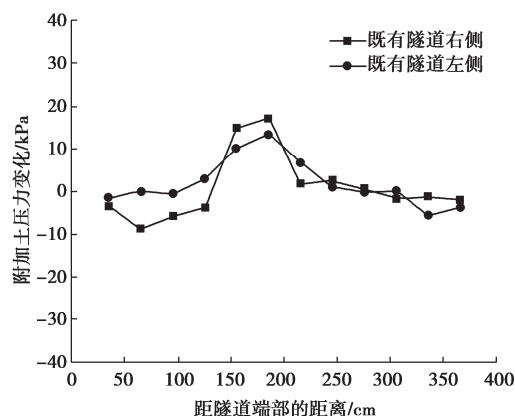
如图 7 (a) 所示, 隧道顶部附加土压力变化值在越接近注浆点处, 隧道顶部附加土压力的增长值越大。隧道顶部土压力增长最大值在距离隧道端部约 180 cm 的位置, 附加土压力在注浆后增长了约 25 kPa。越远离注浆点, 隧道受到浆液的影响越小, 隧道顶部附加土压力增长值逐渐减小, 直至接近隧道另一端部, 附加土压力基本无影响。这是由于在囊袋注浆法中, 囊袋内浆液不易扩散, 浆液集中在囊袋内, 使得囊袋被充满后挤压隧道周围土体, 因此在注浆范围内隧道附加土压力变化值越大, 越远离隧道则越小直至无影响。

同图 7 (a), 隧道底部附加土压力变化值在越接近注浆点处, 隧道底部附加土压力的增长值越大。在距隧道端部约 180 cm 处, 隧道底部附加土压力的最大增大值约为 26 kPa。与隧道顶部附加土压力变化趋势不同, 底部附加土压力在注浆区域之外, 附加土压力有明显的减小。这是由于隧道在被抬升时带动了周围的土体, 隧道周围土体发生了土拱效应^[19], 导致在注浆范围之外的底部附加土压力变化不同于顶部附加土压力变化。

如图 7 (b) 所示, 随着隧道越接近注浆范围, 囊袋被浆液充满后对隧道两侧土体的挤压就越大, 土体受到的压力就越大, 因此隧道的附加土压力变化值在越接近注浆点位处的值就越大。即隧道右侧附加土压力变化值最大约为 17 kPa, 隧道左侧附加土压力变化值最大约为 13 kPa, 隧道左右两侧的附加土压力变化值相差不大。产生这种现象是由于囊袋放置的位置处于既有隧道的正下方, 在囊袋被填充密实后对隧道两侧土体的挤压程度相同, 因此对于隧道的左侧与右侧的影响程度相同, 附加土压力变化曲线基本一致。除注浆口范围之外, 变化值基本上接近于 0, 在注浆范围内附加土压力增长明显。



(a) 既有隧道顶部与底部附加土压力变化



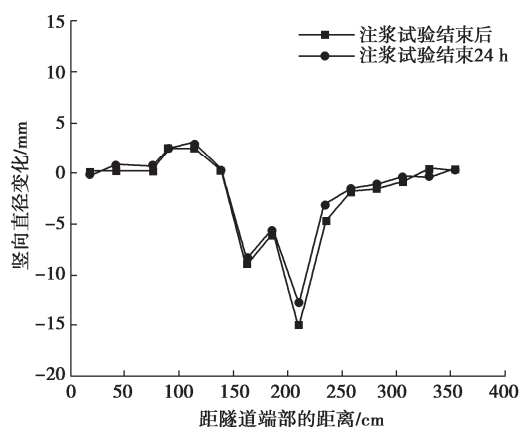
(b) 既有隧道左侧与右侧附加土压力变化

图 7 既有隧道周围地层附加土压力变化

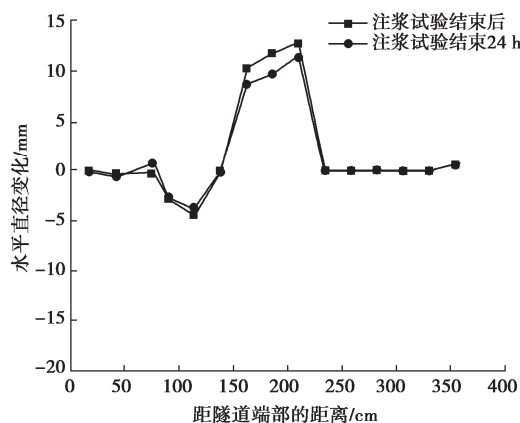
Fig. 7 Change of additional earth pressure in stratum around existing tunnel

2.2 注浆后既有隧道变形分析

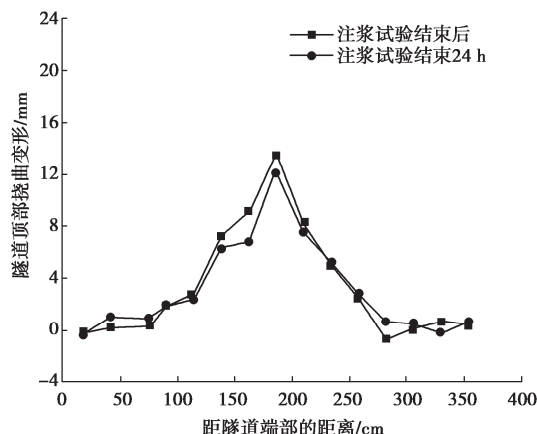
注浆后既有隧道的变形由图 8 可知,隧道发生了明显的横椭圆变形,隧道水平直径在增大,隧道竖向直径在减小,挠曲变形为正则隧道抬升,挠曲变形为负则隧道下沉。由于注浆口在既有隧道的正下方,隧道底部受到的浆液推力会更大。所以隧道顶部与底部皆处于抬升状态当中,但底部抬升的距离大于顶部的抬升距离。注浆结束后 24 h,再次监测隧道的变形,试验结束后相对于试验结束 24 h 后,隧道变形基本无影响,二者曲线基本重合。



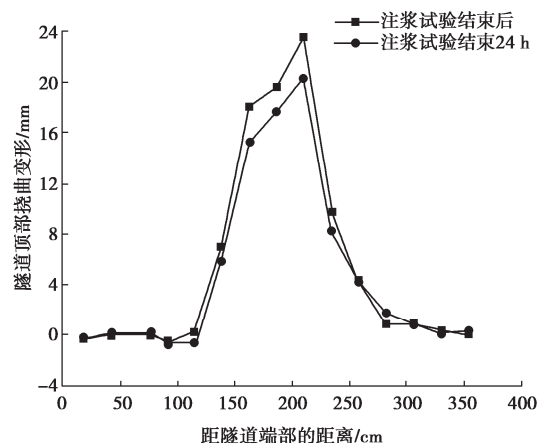
(a) 既有隧道竖向直径变化



(b) 既有隧道水平直径变化



(c) 既有隧道顶部挠曲变形



(d) 既有隧道底部挠曲变形

图 8 既有隧道变形

Fig. 8 Deformation of existing tunnel

由图 8 (a), (b) 所示,隧道越接近注浆点的位置,竖向直径越小,而水平直径越大,隧道竖向直径最大减小值约为 16 mm,水平直径变化最大增长值约为 11 mm。越远离注浆点位,竖向直径减小量越小,直至接近隧道另一端部,其竖向直径基本不变,试验结束 24 h 后水平直径与竖向直径曲线基本保持一致。

如图 8 (c) 所示,隧道顶部挠曲变形在隧道上的位置越接近注浆点,顶部挠曲变形越大,隧道顶部挠曲变形最大值约 14 mm。越远离注浆点位,顶部挠曲变形越小,直至接近隧道另一端部,其顶部挠曲变形基本不变,试验结束 24 h 后隧道的顶部挠曲变形曲线与试验结束后基本吻合。

如图 8 (d) 所示隧道底部挠曲变形在隧道上的位置越接近注浆点,底部挠曲变形越大,底部挠曲变形达到最大值约 23 mm。然后越远离注浆点位,顶部挠曲变形越小,直至接近隧道另一端部,底部挠曲变形基本不变,试验结束 24 h 后隧道的底部挠曲变形曲线与试验结束后基本吻合。

综合上述变形曲线趋势,可知囊袋注浆法具有良好的密封性,使浆液集中在囊袋当中,使得隧道在注

浆孔四周的附加土压力增长幅度较大。由于附加土压力的显著增大, 既有隧道在注浆点位附近抬升效果明显, 而在注浆点位之外既有隧道附加土压力变化尚不明显。

3 囊袋注浆法整治盾构下穿隧道诱发沉降结果分析

在注浆整治隧道沉降的过程中, 普通的注浆方法, 会使得浆液扩散至土体内部, 甚至在注浆过程中会出现跑浆、漏浆等情况。受此影响土体内部的附加土压力及土体内应力发生较大的变化, 进而使得整治隧道沉降的效果总体偏差^[20]。

囊袋注浆法, 就是在注浆管口处加设一个囊袋, 以便防止浆液在注浆过程中, 渗入隧道四周土体内, 影响隧道四周土体附加应力。囊袋会限制浆液扩散, 使得浆液均集中在囊袋中, 导致囊袋鼓起。即在注浆口附近, 鼓起的囊袋给既有隧道较大的抬升力, 使得隧道被抬升。

如图 9 所示, 盾构下穿时, 既有隧道中部所受到的影响最大, 沉降也最为明显。考虑沉降最大位置, 囊袋注浆法采用了上下部隧道交叉区域位置注浆, 可以更加有效整治盾构下穿诱发隧道沉降。因此在注浆范围内隧道抬升程度尤为突出, 对应盾构下穿在相同区域内沉降最为明显。在距离隧道北端部 120~250 cm 的范围内, 既有隧道的整体抬升最大值约为 15 mm, 且在此内盾构下穿所引起的隧道沉降最大值约为 5 mm。

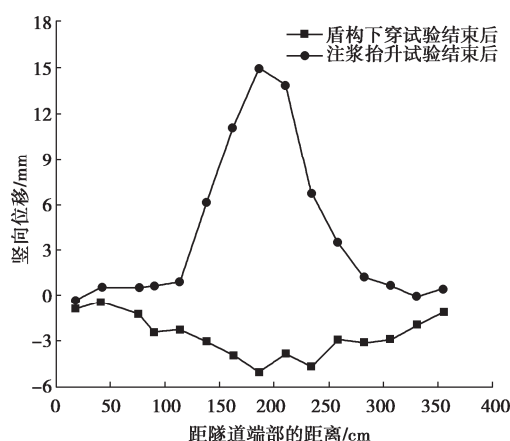


图 9 隧道沉降对比

Fig. 9 Comparison of tunnel settlements

由以上数据可以得出囊袋注浆法对于既有隧道的影响较为显著, 既有隧道整体均被抬升。囊袋对浆液的限制作用使得浆液并未扩散至土体内部, 囊袋内浆液压力未损失, 可以更加有效的抬升隧道。

由图 9 可知, 既有隧道抬升曲线并未很好的贴合沉降曲线, 在注浆范围内抬升大于沉降, 在注浆范围之外对于隧道的影响较小。因此建议在囊袋法注浆过程, 加强对于隧道抬升距离的监测, 确保注浆整治效果以及防止隧道抬升超出沉降。并且采用多点位同时注浆, 整治由于盾构下穿引起的隧道整体沉降, 将盾构下穿的影响降到最低。

4 结 论

(1) 注浆试验过程中, 在距离隧道北端部 120~250 cm 处, 隧道四周附加土压力发生较大变化, 且附加土压力最大值都位于隧道中部, 而在逐渐远离隧道中部时, 附加土压力逐渐减小, 直至无影响。

(2) 在距隧道北段部 120~250 cm 的隧道部分, 发生了较为明显的横椭圆变形, 最大竖向直径变化约为 16 mm, 最大水平直径变化约为 11 mm; 除此部分外, 其他隧道区间隧道变形无明显变化。

(3) 囊袋注浆法整治盾构下穿既有隧道诱发沉降的效果明显。既有隧道在注浆后, 在距离隧道北端部 120~250 cm 的隧道部分发生了明显的抬升, 最大抬升高度为 15 mm, 高于由下穿盾构隧道诱发的沉降距离。

(4) 囊袋注浆法对于浆液有着良好的束缚作用, 浆液压力主要集中在囊袋注浆口附近, 对注浆范围内的上部土体有着显著的抬升作用, 使得隧道周围土体发生了不均匀移动, 产生了土拱效应。

(5) 在实际工程当中, 建议采用多点位同时注浆, 让隧道整体抬升, 使整治后的隧道结构内力以及结构形态恢复至下穿前的状态。同时加强在注浆过程中对隧道抬升的监测, 以防隧道抬升超出。

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

作者贡献/Authors' Contributions: 黄大维、耿大新和樊潇宇参与试验设计; 胡新平和樊潇宇完成试验操作; 黄大维、胡新平、樊潇宇和杨威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。HUANG Dawei, GENG Daxin, and FAN Xiaoyu were involved in the experimental design. HU Xinping and FAN Xiaoyu performed the experimental operations. HUANG Dawei, HU Xinping, FAN Xiaoyu, and YANG Wei participated in the writing and revision of the paper. All the authors have read the last version of manuscript and consented for submission.

参考文献:

- [1] 石钰锋, 胡梦豪, 周宇航, 等. 不同因素导致的差异沉降对盾构隧道受力特性影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, **21**(4): 1521-1532. (SHI Yufeng, HU Menghao, ZHOU Yuhang, et al. Study of the effect of differential settlement due to different factors on the force characteristics of shield tunnels[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, **21**(4): 1521-1532. (in Chinese))
- [2] 阚绍德, 黄旭民, 梁禹. 考虑土层侧向力和变异性的隧道下穿引起既有隧道纵向沉降分析与控制[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, **22**(4): 1723-1734. (KAN Shaode, HUANG Xumin, LIANG Yu. Analysis and control of longitudinal settlement of existing tunnels induced by tunnel underpass considering the lateral earth pressure and spatial soil variability[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, **22**(4): 1723-1734. (in Chinese))
- [3] 钟小春, 余明学, 竺维彬, 等. 盾尾密封失效诱发砂土地基盾构管片环失稳坍塌研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, **21**(1): 264-274. (ZHONG Xiaochun, YU Mingxue, ZHU Weibin, et al. Instability and collapse of shield segment ring in sand foundation induced by shield tail sealing failure[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, **21**(1): 264-274. (in Chinese))
- [4] 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))
- [5] 张治国, 沃巍, 朱正国, 等. 考虑衬砌截面协调变形约束的既有隧道受盾构下穿施工影响的 Fourier 能量变分解[J]. 岩土力学, 2024, **45**(5): 1397-1411, 1422. (ZHANG Zhiguo, WO Wei, ZHU Zhengguo, et al. Fourier energy variational solution of effects on existing tunnels induced by shield tunneling considering coordinated deformation of lining cross-section[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, **45**(5): 1397-1411, 1422. (in Chinese))
- [6] 江杰, 龙逸航, 欧孝夺, 等. 新建曲线地铁盾构隧道下穿施工引起的既有隧道沉降分析[J]. 工程科学与技术, 2023, **55**(1): 313-324. (JIANG Jie, LONG Yihang, OU Xiaoduo, et al. Analysis of existing tunnel settlement caused by undercrossing construction of curved metro shield tunnel[J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, **55**(1): 313-324. (in Chinese))
- [7] 冯非凡, 魏纲, 王哲, 等. 水平注浆对既有盾构隧道横向变形与内力的纠偏控制效果研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, **20**(8): 2987-2999. (FENG Feifan, WEI Gang, WANG Zhe, et al. Horizontal grouting on the control effect of lateral deformation and internal force of shield tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, **20**(8): 2987-2999. (in Chinese))
- [8] 郑思思. 基于 SPH 法的既有盾构隧道注浆抬升和纠偏模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022. (ZHENG Sisi. Simulation Research on Grouting Lifting and Deviation Correction of Existing Shield Tunnel Based on SPH Method[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022. (in Chinese))
- [9] 于洪彪, 陈熙, 曹伟杨, 等. 地铁盾构隧道穿越采空区地面注浆保压技术对地表沉降影响研究[J]. 现代城市轨道交通, 2024(9): 82-87. (YU Hongbiao, CHEN Xi, CAO Weiyang, et al. Research on the impact of grouting and pressure maintenance technology on surface settlement of metro shield tunnels passing through the gob area[J]. Modern Urban Transit, 2024(9): 82-87. (in Chinese))
- [10] 张继鹏, 陈鼎基, 董子博. 盾构隧道注浆抬升对隧道结构内力的影响分析[J]. 城市轨道交通研究, 2016, **19**(9): 93-98. (ZHANG Jipeng, CHEN Naiji, DONG Zibo. Impact of grouting lifting on the structural inner stress of shield tunnel[J]. Urban Mass Transit, 2016, **19**(9): 93-98. (in Chinese))
- [11] 付艳斌, 陈湘生, 吴沛霖. 既有地铁隧道纵向注浆抬升机理分析[J]. 现代隧道技术, 2020, **57**(5): 184-192. (FU Yanbin, CHEN Xiangsheng, WU Peilin. Analysis on mechanism of longitudinal grouting uplift of existing metro tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, **57**(5): 184-192. (in Chinese))
- [12] 高翔, 龚晓南, 朱旻, 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))
- [13] 孟凡衍, 贾琪, 陈仁朋, 等. 软黏土地层盾构隧道底部注浆抬升量计算方法[J]. 岩土工程学报, 2024, **46**(11): 2401-2409. (MENG Fanyan, JIA Qi, CHEN Renpeng, et al. Method for calculating uplift of shield tunnels subjected to underlying grouting in soft clayey ground[J]. Chinese Journal

- of Geotechnical Engineering, 2024, **46**(11): 2401-2409. (in Chinese))
- [14] 朱 旻, 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))
- [15] 黄大维, 罗仲睿, 罗文俊, 等. 地层注浆附加土压力形成及影响因素单元体试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, **43**(增刊 1): 3520-3529. (HUANG Dawei, LUO Zhongrui, LUO Wenjun, et al. Unit test study on formation and influence factors of additional earth pressure during formation grouting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, **43**(S1): 3520-3529. (in Chinese))
- [16] 周俊宏, 宫全美, 周顺华, 等. 盾构隧道抬升作用下极限上覆土压力计算方法[J]. 岩土力学, 2016, **37**(7): 1969-1976. (ZHOU Junhong, GONG Quanmei, ZHOU Shunhua, et al. Calculation method of limit overlying earth pressure on shield tunnel during lifting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(7): 1969-1976. (in Chinese))
- [17] 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))
- [18] 黄大维, 赵栢錡, 徐长节, 等. 侧部注浆对已建盾构隧道受荷变形影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, **46**(3): 510-518. (HUANG Dawei, ZHAO Zhiqi, XU Changjie, et al. Experimental study on influences of side grouting on deformation of shield tunnels under loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, **46**(3): 510-518. (in Chinese))
- [19] 黄大维, 周顺华, 冯青松, 等. 地表超载对软、硬地层中既有盾构隧道影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(5): 942-949. (HUANG Dawei, ZHOU Shunhua, FENG Qingsong, et al. Experimental study on influences of surface surcharge on existing shield tunnels buried in soft and hard soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(5): 942-949. (in Chinese))
- [20] 黄大维, 刘家璇, 徐长节, 等. 浆液扩散模式对地层附加土压力影响试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2024, **52**(10): 20-26. (HUANG Dawei, LIU Jiaxuan, XU Changjie, et al. Experimental study on influence of slurry diffusion mode on additional earth pressure of formation[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, **52**(10): 20-26. (in Chinese))