

DOI: 10.7672/sgjs2024210078

隧道施工引起的既有地铁线变形控制研究

牛自强

(中铁十二局集团有限公司,山西 太原 030024)

[摘要] 依托某市新建地铁3号线盾构隧道工程,通过数值模拟计算,基于土舱压力和注浆压力,研究新建盾构隧道下穿施工对既有地铁5号线隧道结构变形的影响,并提出变形控制措施。研究表明,当地铁3号线隧道左线盾构机到达既有地铁隧道正下方区域和右线盾构机掘进完成时,随着压力比的增大,既有地铁5号线隧道拱顶竖向位移分别逐渐增大和逐渐减小,而随着注浆压力的增大,既有地铁5号线隧道拱顶竖向位移均基本减小。宜将土舱压力控制为1.0~1.2倍静止土压力,注浆压力控制为0.64~1.00MPa。从施工成本和加固效果角度考虑,宜将二次深孔注浆作为合理的加固方式。

[关键词] 地铁;隧道;盾构;土舱压力;注浆压力;变形控制

[中图分类号] U455

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2024)21-0078-06

Study on Deformation Control of Existing Subway Line Caused by Tunnel Construction

NIU Ziqiang

(China Railway 12th Bureau Group Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: Based on the shield tunnel project of a newly built Subway Line 3 in a certain city, numerical simulation calculations were conducted to study the impact of the construction of the new shield tunnel underpass on the structural deformation of the existing Subway Line 5 tunnel, based on soil chamber pressure and grouting pressure, and deformation control measures were proposed. The research results show that when the left line shield machine of Subway Line 3 tunnel reaches the area directly below the existing subway tunnel and the right line shield machine completes excavation, the vertical displacement of the existing Subway Line 5 tunnel arch gradually increases and decreases with the increase of pressure ratios, however, with the increase of grouting pressure, the vertical displacement of the existing Subway Line 5 tunnel arch is basically reduced. It is advisable to control the soil chamber pressure at 1.0~1.2 times the static soil pressure, and the grouting pressure at 0.64~1.00MPa. From the perspective of construction cost and reinforcement effect, the secondary deep hole grouting reinforcement method should be considered as a reasonable reinforcement method.

Keywords: subways; tunnels; shields; soil chamber pressure; grouting pressure; deformation control

0 引言

随着我国轨道交通的快速发展,地铁线网日益密集,在交通枢纽附近,不可避免地发生单线和多线盾构隧道穿越既有运营隧道的情况。在盾构隧道穿越过程中,对土体的多次扰动会对既有隧道结构造成影响,严重时会导致隧道结构发生变形破坏。为防止此类情况的发生,已有学者对既有隧道变形特征进行了研究,如刘志坚等^[1]依托工程实

例,采用数值模拟方法进行研究,明确指出了在盾构近距离下穿既有线施工过程中,既有线管片整体向新建隧道掘进方向偏移;张利民^[2]采用数值模拟和现场监测方法,研究了既有盾构隧道变形规律;Song等^[3]通过离心机模型试验和数值模拟方法,研究认为盾构隧道引起了铁路路基沉降的不对称性;李旭^[4]采用数值模拟方法,分析了盾构下穿施工过程中地层力学响应和变形特性及对既有线的影响;王明明等^[5]采用三维数值模拟方法,探讨了新建隧道与既有隧道间距、地层倾斜和注浆填充对既有地

铁及周边地层的影响。以上学者通过现场监测和数值模拟等方法,客观分析了盾构下穿土体变形特性和对既有线的影响。

目前,对隧道结构变形控制的分析较少,多数研究成果对盾构隧道下穿既有线的施工风险进行了分析,如朱朋刚^[6]依托新建重庆铁路枢纽回龙湾隧道穿越既有龙洲湾隧道工程,采用数值模拟方法,研究了新建铁路隧道开挖对既有公路隧道变形的影响;吴忠坦^[7]通过构建高斯 Copula 贝叶斯(GCBN)模型的方法,讨论了盾构下穿施工安全风险状态,分析了致险因素对风险结果的影响;陈金刚等^[8]依托北京地铁7号线区间隧道工程,结合现场实际问题采取了富水砂层明挖基坑地下水处理、暗挖拱顶 WSS 地面注浆加固防坍塌等施工风险控制措施,有效解决了工程难题;吕方泉等^[9]依托北京地铁17号线暗挖区间隧道下穿既有地铁14号线隧道工程,采取了全断面深孔注浆加固、上下导洞错段施工等综合防护措施,保证了既有结构变形、变形缝差异沉降等满足控制要求;程国良等^[10]依托武汉地铁某大直径越江隧道工程,通过对穿越地层和水文地质条件进行分析,识别出了施工区间显著存在的开挖面失稳、刀盘磨损及密封失效等适应性风险。以上研究成果分析了盾构下穿既有隧道施工风险及临界安全距离,但对引起既有隧道结构变形因素及变形控制措施研究较少。

基于此,本文通过数值模拟计算,对地铁盾构隧道下穿既有线变形控制进行了研究,分析了土舱压力对施工的影响、注浆压力对既有地铁线隧道结构变形的影响及隧道结构变形控制措施。

1 工程概况

某市新建地铁3号线采用盾构隧道,线路约为西南至东北走向,全长36.5km,为全地下线路,于城南郊区垂直下穿地铁5号线隧道,二者相互位置关系如图1所示。地铁3号线隧道拱顶与地铁5号线隧道拱底之间净距离为9.6m,在2条隧道交叉区域,地铁5号线隧道断面宽度为7.46m,高度为7.84m,管片采用C40钢筋混凝土制成,地铁3号线隧道管片内径为5.4m,外径为6m,厚度为0.35m,宽度为1.6m,采用C50钢筋混凝土制成。在地铁3号线隧道掘进过程中,对地层造成了多次扰动,导致地铁5号线隧道结构发生变形,运营受到了影响。因此,需对地铁5号线隧道结构变形进行控制,并确保地铁3号线隧道施工安全。

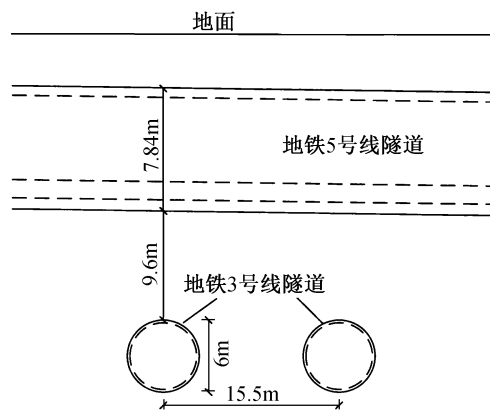


图1 地铁3,5号线隧道相互位置关系

Fig. 1 Mutual position relationship between tunnels of Subway Lines 3, 5

2 数值模拟

2.1 模型建立

为减小模型边界效应的影响,设置模型水平方向(x 向)尺寸为90m,垂直方向(y 向)尺寸为150m,竖直方向(z 向)尺寸为62m,地铁3号线隧道左、右线中心间距为15.5m,建立的模型如图2所示。

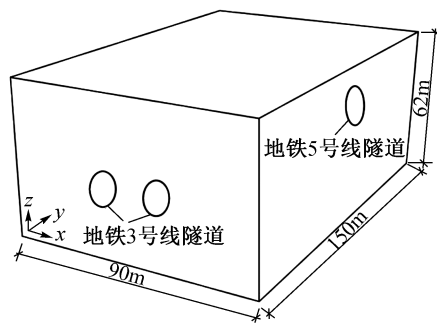


图2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

2.2 参数设置

根据地质资料,地铁3,5号线隧道交叉区域为丘陵地貌,地势平缓。隧址区土层自上而下依次为素填土层、粉质黏土层、强风化泥质砂岩层和中风化泥质砂岩层,各土层物理力学参数如表1所示。其中素填土层为人工填筑的黏土,部分区域为砂土和卵石,厚度为1~10.6m;粉质黏土层由粉砂岩风化而成,质地软,厚度为0.6~8.5m;强风化泥质砂岩层厚度为0.8~38.2m;中风化泥质砂岩层厚度变化大,层顶埋深为1.5~31.6m,饱和抗压强度为1.37~5.26MPa,属软化岩石,本工程地铁盾构隧道位于该层。

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layers

土层名称	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	泊松比	厚度/ m
素填土	19.8	11.6	32.6	14	0.32	4.2
粉质黏土	20.6	31.4	43.6	18	0.30	7.8
强风化 泥质砂岩	22.5	520.0	52.2	32	0.28	8.2
中风化 泥质砂岩	23.7	1360.0	86.7	36	0.26	41.8

在建模过程中,设置围岩、注浆层和盾壳均为均质、各向同性材料,围岩为具有莫尔-库仑准则的弹塑性材料,注浆层和盾壳为弹性材料,隧道管片为横观各向同性材料,各材料物理力学参数如表 2 所示。设置模型左右面水平方向为固定约束,前后面垂直方向为固定约束,底面垂直方向为固定约束,顶面各方向均为自由加载。采用 FLAC 3D 软件按地层线对各材料进行分组,避免出现应力集中现象,通过八结点六面体实体单元对建立的模型进行有限元离散,将该模型分解为 197 326 个单元,204 673 个结点。

表 2 材料物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of materials

材料名称	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	厚度/ m
衬砌	26.4	32 600	0.22	0.65
管片	26.4	27 400	0.21	0.25
轨道板	26.4	32 600	0.26	0.35
盾构壳	79.4	215 000	0.26	0.20
注浆层(硬化前)	19.2	210	0.26	0.20
注浆层(硬化后)	19.2	1 850	0.22	0.20

2.3 盾构机掘进模拟

模拟计算过程中,在盾前和盾尾预设单元,包括开挖土体单元、盾壳单元、注浆层单元和管片单元,不考虑盾构机内部机械,盾构机外部采用盾壳单元模拟,其参数和盾壳单元保持一致。为模拟盾构机逐渐向前掘进状态,采用生死单元法模拟施工工况,管片拼装和盾尾注浆采用更改材料参数进行模拟。

盾构机每前进 1 个施工步长,前方开挖的预设土体单元被杀死,转换为空单元,同时在该施工步长区域内激活盾壳单元,盾壳尾部的施工步长区域变为盾尾空隙单元,该方法实现了盾构机开挖与前移。最后在该施工步长区域内沿盾构机开挖方向激活注浆层单元和管片单元。将以上工序作为基准施工工序,然后根据基准施工工序进行重复操

作,直至完成施工全过程。

3 计算结果与分析

3.1 土舱压力的影响

盾构机开挖掘进过程中,需保持开挖面处于稳定状态,土舱压力为重要的施工控制参数,当土舱压力与开挖面土压力处于平衡状态时,开挖面及地层将保持稳定。当盾构机下穿施工时,在土体和隧道结构自身重力作用下,土体和隧道结构变形主要以竖向不均匀沉降为主,同时引起垂直方向位移,从而导致既有隧道结构发生变形。在实际施工过程中,盾构机土舱压力与实际开挖区域的水土压力不完全平衡,因此,通过设置无量纲变量压力比 Q 反映不同的土舱压力,压力比为设定的盾构机土舱压力与理论计算的静止土压力之比,本研究设置理论计算的静止土压力为 0.25MPa。

当压力比分别为 0.2, 0.6, 1.0, 1.6, 2.4, 3.2 时,地铁 3 号线隧道施工引起的既有地铁 5 号线隧道拱顶竖向位移曲线如图 3 所示。由图 3a 可知,当地铁 3 号线隧道左线盾构机到达既有地铁 5 号线隧道正下方区域时,随着压力比的增大,既有地铁 5 号线隧道拱顶竖向位移均逐渐增大,峰值位移出现在距地铁 3 号线隧道对称面 -10m 区域,分别为 -0.037, 0.026, 0.057, 0.063, 0.074, 0.089mm;不同压力下,既有地铁 5 号线隧道拱顶竖向位移基本呈先减小后增大的趋势。当压力比由 0.2 增至 1.0 时,设定的盾构机土舱压力逐渐增大,逐渐与理论计算的静止土压力相等,既有地铁 5 号线隧道拱顶竖向位移逐渐增大;当压力比由 1.0 增至 1.6 时,既有地铁 5 号线隧道拱顶竖向位移逐渐增大,但增幅较小;当压力比 > 1.6 时,既有地铁 5 号线隧道拱顶竖向位移逐渐增大,增幅略微增大。

由图 3b 可知,当地铁 3 号线右线盾构机掘进完成时,随着压力比的增大,既有地铁 5 号线隧道拱顶竖向位移均逐渐减小,最大沉降均位于地铁 3 号线隧道对称面附近区域,分别为 -1.336, -1.219, -1.191, -1.170, -1.156, -1.125mm。当压力比由 0.2 增至 1.0 时,既有地铁 5 号线隧道拱顶竖向位移快速减小;当压力比由 1.0 增至 1.6 时,既有地铁 5 号线隧道拱顶竖向位移逐渐减小,减幅较小;当压力比 > 1.6 时,既有地铁 5 号线隧道拱顶竖向位移减幅略微增大。

综上所述,当压力比 < 1.0 时,即盾构机土舱压力小于理论计算的静止土压力时,随着压力比的增大,既有地铁 5 号线隧道拱顶沉降减小,地铁 3 号线隧道开挖面及开挖面前方部分土体发生了大幅度

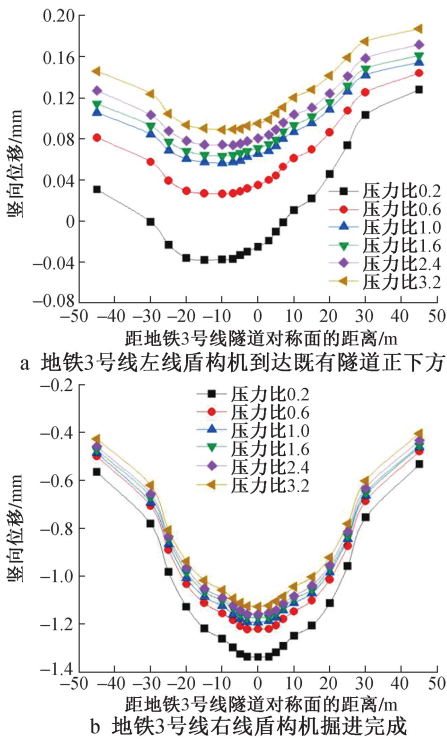


图3 不同压力比下既有地铁5号线隧道拱顶竖向位移变化曲线

Fig. 3 Vertical displacement variation curves of the arch crown of the existing Subway Line 5 tunnel under different pressure ratios

的塑性变形,可能导致开挖面发生坍塌。当压力比为1.0~1.6时,既有地铁5号线隧道拱顶沉降缓慢减小,一部分土舱压力与静止土压力保持平衡,另一部分土舱压力对开挖面区域土体进行挤压,当土舱压力大于开挖面水土压力时,开挖面土体将发生破坏。当压力比 >1.6 时,既有地铁5号线隧道拱顶沉降变化幅度增大,土舱压力与开挖面水土压力之间的平衡破坏,开挖面将会坍塌。因此,宜将土舱压力控制为1.0~1.2倍静止土压力。

当压力比分别为0.2, 0.6, 1.0, 1.6, 2.4, 3.2时,地铁3号线隧道施工引起的既有地铁5号线隧道拱腰垂直方向位移曲线如图4所示,图中垂直方向位移负值表示盾构机掘进反方向位移。由图4a可知,当地铁3号线隧道左线盾构机到达既有地铁5号线隧道正下方区域时,随着压力比的增大,既有地铁5号线隧道拱腰垂直方向位移均逐渐增大,峰值位移基本位于距地铁3号线隧道对称面-10m附近区域,分别为-0.174, -0.131, -0.054, -0.018, 0.038, 0.127mm;不同压力比下,既有地铁5号线隧道拱腰垂直方向位移基本呈先减小后增大再减小的趋势。当压力比由0.2增至1.0时,既有地铁5号线隧道拱腰垂直方向位移快速减小;当压力比由

1.0增至1.6时,既有地铁5号线隧道拱腰垂直方向位移逐渐减小,减幅较小;当压力比 >1.6 时,既有地铁5号线隧道拱腰垂直方向位移增大,变化幅度明显。

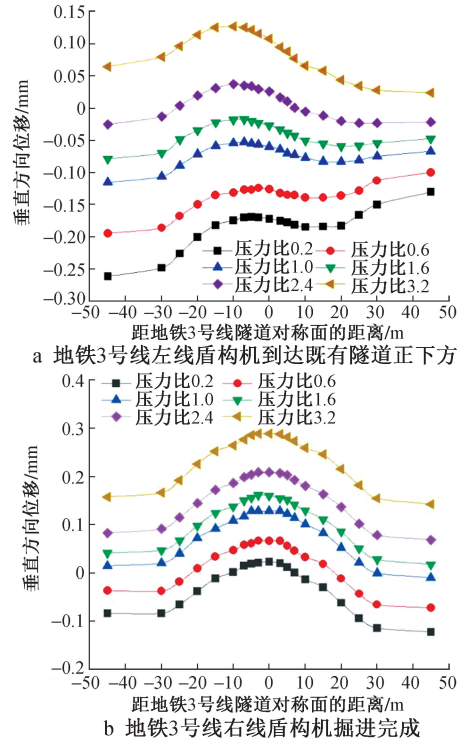


图4 不同压力比下既有地铁5号线隧道拱腰垂直方向位移变化曲线

Fig. 4 Perpendicular displacement variation curves of the arch of the existing Subway Line 5 tunnel under different pressure ratios

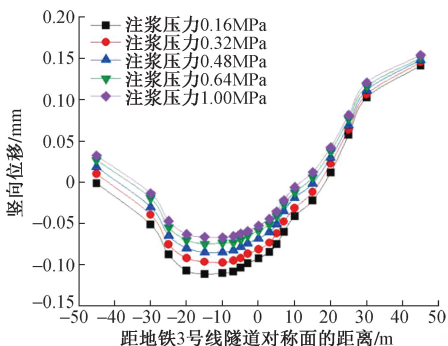
由图4b可知,当地铁3号线右线盾构机掘进完成时,随着压力比的增大,既有地铁5号线隧道拱腰垂直方向位移均先减小后增大,最大位移均位于地铁3号线隧道对称面附近区域,分别为0.024, 0.066, 0.129, 0.160, 0.209, 0.289mm。当压力比由0.2增至1.0时,既有地铁5号线隧道拱腰垂直方向位移快速减小;当压力比由1.0增至1.6时,既有地铁5号线隧道拱腰垂直方向位移增大,增幅较小;当压力比 >1.6 时,既有地铁5号线隧道拱腰垂直方向位移增大,增幅较大。

盾构机下穿阶段土舱压力对既有地铁5号线隧道结构的影响大于掘进完成阶段,因此,盾构机下穿时需严格控制土舱压力,当土舱压力大于土体极限压力时,会导致既有地铁5号线隧道结构破坏。

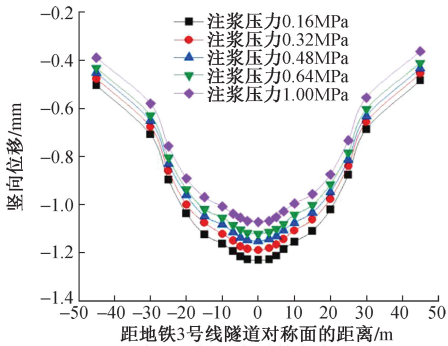
3.2 注浆压力的影响

在盾构机掘进过程中,注浆压力是影响隧道结构沉降的重要因素。当注浆压力分别为0.16, 0.32, 0.48, 0.64, 1.00MPa时,地铁3号线隧道施

工引起的既有地铁5号线隧道拱顶竖向位移曲线如图5所示。由图5a可知,当地铁3号线隧道左线盾构机到达既有地铁5号线隧道正下方区域时,随着注浆压力的增大,既有地铁5号线隧道拱顶竖向位移基本逐渐减小,最大沉降位于距地铁3号线隧道对称面-15m附近区域,分别为-0.111, -0.096, -0.084, -0.075, -0.066mm。当注浆压力由0.16MPa增至0.32MPa时,既有地铁5号线隧道拱顶竖向位移变化幅度较大;当注浆压力由0.32MPa增至1.00MPa时,既有地铁5号线隧道拱顶竖向位移减幅较小。



a 地铁3号线左线盾构机到达既有隧道正下方



b 地铁3号线右线盾构机掘进完成

图5 不同注浆压力下既有地铁5号线隧道拱顶竖向位移变化曲线

Fig. 5 Vertical displacement variation curves of the arch crown of the existing Subway Line 5 tunnel under different grouting pressures

由图5b可知,当地铁3号线右线盾构机掘进完成时,随着注浆压力的增大,既有地铁5号线隧道拱顶竖向位移均逐渐减小,最大沉降均位于地铁3号线隧道对称面附近区域,分别为-1.229, -1.189, -1.151, -1.120, -1.072mm。当注浆压力由0.16MPa增至0.32MPa时,既有地铁5号线隧道拱顶竖向位移变化幅度较大;当注浆压力由0.32MPa增至0.64MPa时,既有地铁5号线隧道拱顶竖向位移减幅较小;当注浆压力由0.64MPa增至1.00MPa时,既有地铁5号线隧道拱顶竖向位移变化幅度增大。

综上所述,随着注浆压力的增大,既有地铁5号线隧道拱顶竖向位移基本逐渐减小,注浆压力为0.16~0.32MPa时,拱顶竖向位移减幅较大,在盾构机施工过程中,同步注浆可减小土体和隧道结构变形。当注浆压力继续增大时,既有地铁5号线隧道拱顶最大竖向位移减幅较小。当注浆压力>1.00MPa时,土体会受到挤压而破坏,合适的注浆压力为0.64~1.00MPa。

4 隧道结构变形控制措施

地铁3号线隧道下穿施工会扰动地层,导致施工区土体和既有地铁5号线隧道结构变形,因此采用注浆加固土体的方式进行地层变形控制,提高土体强度和变形模量,增强土体抗剪强度,从而避免既有地铁5号线隧道结构变形。

盾构隧道施工过程中采用的注浆加固方式通常有3种,分别为超前预注浆、同步注浆和二次深孔注浆。超前预注浆加固指在施工过程中,对盾构机前方土体进行加固,降低地层破坏风险;同步注浆加固指在施工过程中同步对土体进行加固;二次深孔注浆加固指在盾构机通过后,对土体进行补浆加固。本工程地铁3号线隧道施工时,当管片脱出盾构机后,对该管片范围内的土体进行注浆加固,加固前、后既有地铁5号线隧道拱顶竖向位移曲线如图6所示。

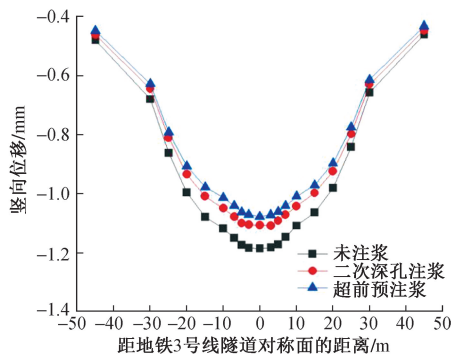


图6 注浆加固时既有地铁5号线隧道拱顶竖向位移变化曲线

Fig. 6 Vertical displacement variation curves of the arch crown of the existing Subway Line 5 tunnel during grouting reinforcement

由图6可知,未注浆时既有地铁5号线隧道拱顶沉降最大,超前预注浆加固时沉降最小;与未注浆时相比,二次深孔注浆和超前预注浆加固后既有地铁5号线隧道拱顶最大沉降分别减小了6.62%, 9.11%。在盾构机掘进过程中,超前预注浆加固可减小土体损失,但地铁3号线下穿施工引起的既有地铁5号线隧道结构沉降主要为长期沉降,因此,二

次深孔注浆和超前预注浆加固效果相差较小,二次深孔注浆加固方式可节省施工成本,为合理的加固方式。

5 结语

本文通过数值模拟计算,对新建地铁盾构隧道下穿既有有线变形控制进行了研究,分析了土舱压力、注浆压力对既有地铁隧道结构变形的影响,给出了既有隧道结构变形控制措施,主要得出以下结论。

1)当地铁3号线隧道左线盾构机到达既有地铁隧道正下方区域和右线盾构机掘进完成时,随着压力比的增大,既有地铁5号线隧道拱顶竖向位移分别逐渐增大和逐渐减小,宜将土舱压力控制为1.0~1.2倍静止土压力。

2)当地铁3号线隧道左线盾构机到达既有地铁隧道正下方区域和右线盾构机掘进完成时,随着注浆压力的增大,既有地铁5号线隧道拱顶竖向位移均基本减小,注浆压力为0.16~0.32MPa时减幅较大,注浆压力为0.32~0.64MPa时减幅较小。当注浆压力>1.0MPa时,土体会受到挤压而破坏,合适的注浆压力为0.64~1.00MPa。

3)未注浆时既有地铁5号线隧道拱顶沉降最大,超前预注浆加固时沉降最小,二次深孔注浆和超前预注浆加固效果相差较小,从施工成本角度考虑,将二次深孔注浆作为合理的加固方式。

参考文献:

- [1] 刘志坚,曹伍富,黄俊鸿,等.盾构隧道超近间距下穿运营盾构隧道管片环变形规律研究[J].铁道标准设计,2023,24(12):1-9.
LIU Z J, CAO W F, HUANG J H, et al. Study on deformation law of shield tunnel segment rings in ultra-close distance underpass operation of shield tunnels [J]. Railway standard design, 2023, 24 (12): 1-9.
- [2] 张利民.S型隧道施工引起的下方盾构隧道变形规律研究[J].内蒙古科技大学学报,2023,42(2):139-144.
ZHANG L M. Research on deformation law of lower shield tunnel caused by S-type tunnel construction [J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2023, 42 (2): 139-144.
- [3] SONG M, LIU J G, WANG X T, et al. Study on railway

subgrade settlement induced by an ultra-large-diameter shield tunnel crossing under railway subgrade [J]. Symmetry, 2023, 15 (1): 15010075.

- [4] 李旭.盾构近距下穿既有有线地层力学响应和变形特性分析[J].建筑技术开发,2023,50(11):72-74.
LI X. Mechanical response and deformation characteristics analysis of shield tunneling through existing railway strata at close range [J]. Building technology development, 2023, 50 (11): 72-74.
- [5] 王明明,王正庆,翟浪宝,等.上软下硬地层盾构下穿既有隧道扰动变形研究[J].水利水电快报,2023,24(12):1-14.
WANG M M, WANG Z Q, ZHAI L B, et al. Study on disturbance deformation of shield tunneling under existing tunnels in soft and hard strata [J]. Express water resources & hydropower information, 2023, 24 (12): 1-14.
- [6] 朱朋刚.新建回龙湾隧道穿越既有公路隧道稳定性影响研究[J].施工技术(中英文),2024,53(13):37-42.
ZHU P G. Study on stability impact of the new Huilongwan Tunnel crossing existing highway tunnels [J]. Construction technology, 2024, 53 (13): 37-42.
- [7] 吴忠坦.基于高斯 Copula 贝叶斯模型的盾构下穿既有隧道施工风险分析[J].工业建筑,2023,53(11):55-64.
WU Z T. Analysis of construction risks of shield tunneling under existing tunnels based on Gaussian Copula Bayesian Network model [J]. Industrial construction, 2023, 53 (11): 55-64.
- [8] 陈金刚,郭强,汪杨洲,等.富水砂层地铁隧道风险控制技术[J].施工技术(中英文),2024,53(13):26-31.
CHEN J G, GUO Q, WANG Y Z, et al. Risk control technology for subway tunnels with rich water sand layers [J]. Construction technology, 2024, 53 (13): 26-31.
- [9] 吕方泉,程险峰,姜艳红.富水砂层暗挖隧道近距离下穿既有车站影响分析和施工风险控制[J].施工技术(中英文),2023,52(13):91-96.
LÜ F Q, CHENG X F, JIANG Y H. Impact analysis and construction risk control of near distance underpass of existing stations in rich water sand layer underground tunnels [J]. Construction technology, 2023, 52 (13): 91-96.
- [10] 程国良,李彦锦,杨俊,等.复合地层越江大直径地铁隧道盾构地层适应性风险及选型分析[J].施工技术(中英文),2023,52(1):48-54.
CHENG G L, LI Y J, YANG J, et al. Analysis of adaptability risks and selection of shield tunnels for large diameter cross river subway tunnels in composite strata [J]. Construction technology, 2023, 52 (1): 48-54.