

DOI: 10.7672/sgjs2026010049

盾构穿越及地铁运营对桩基托换桥梁的影响分析*

樊嘉栋

(中铁一局集团城市轨道交通工程有限公司,江苏 无锡 214000)

[摘要] 为探究盾构隧道下穿桩基托换加固后桥梁的安全稳定问题,以盾构穿越顺序和盾尾注浆压力为关键参数,采用Plaxis3D软件建立数值模型,探究二者对桥梁沉降的影响,并模拟了地铁运营期内列车振动荷载对桥梁及下方土体沉降的作用。结果显示:双线同穿沉降最大,单线穿越更利于控制沉降,且先穿左线效果最优;注浆压力与沉降呈负相关,先穿左线+300kPa注浆压力时桥梁最大沉降仅0.86mm;地铁运营期内列车振动单次沉降峰值为 3.85×10^{-3} mm,30年运营期承台下土体最大沉降为 39.86×10^{-3} mm,影响可控。

[关键词] 隧道;盾构;桩基础;注浆压力;沉降;数值模拟

[中图分类号] U459

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)01-0049-07

Influence Analysis of Shield Tunneling and Subway Operation on Pile Foundation Bridge Replacement

FAN Jiadong

(Urban Rail Transit Engineering Co., Ltd. of China Railway First Group Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214000, China)

Abstract: To investigate the safety and stability of the bridge after the shield tunnel underpasses through the pile foundation underpinning reinforcement, taking the shield crossing sequence and the shield tail grouting pressure as the key parameters, the numerical model is established by Plaxis3D software to explore the influence of the two on the settlement of the bridge. The effect of train vibration load on the settlement of the bridge and the soil under the bridge during the subway operation period was simulated. The results indicate that the settlement of double-line crossing is the largest, and the single-line crossing is more conducive to controlling the settlement, and the effect of crossing the left line first is the best. The grouting pressure is negatively correlated with the settlement. The maximum settlement of the bridge is only 0.86mm when the left line is first crossed with a grouting pressure of 300kPa. During the operation period of the subway, the single settlement peak of the train vibration is 3.85×10^{-3} mm, and the maximum settlement of the soil under the pile cap during the 30 years operation period is 39.86×10^{-3} mm, and the influence is controllable.

Keywords: tunnels; shields; piles; grouting pressure; settlement; simulation

0 引言

盾构技术具有高自动化运行、施工速度快和开挖时可控制地面沉降等特点,被广泛应用于城市地铁隧道施工。但早期城市建设对于地下空间的利用缺乏科学合理的规划,导致盾构隧道下穿既有建(构)筑物的现象十分常见^[1-2],而盾构隧道开挖时周围土层会发生变形,当地层移动和地表变形超过一定限度时会造成地面沉降或隆起、隧道结构破

坏、地面建筑物破损与倾斜、地下管线破坏等事故^[3-4]。

盾构掘进过程中,盾尾注浆是保护盾构安全进行的关键步骤,喷射出的混凝土浆液主要用于填充新拼装管片与地层之间的空隙,减少盾构掘进对上部土体及结构的影响。因此,注浆压力的控制尤为重要,若注浆压力过小,则会使空隙无法完全填充,造成土体和上部结构沉降乃至坍塌;而注浆压力过大,则会将压力施加在已有衬砌管片上,导致已有衬砌管片损坏乃至破坏。所以选择合适的注浆压力能够使盾构掘进更加安全,确保施工顺利进行。

* 国家自然科学基金(52478346)

[作者简介] 樊嘉栋,高级工程师,E-mail:bullz@qq.com

[收稿日期] 2025-06-19

盾构隧道施工会导致地面沉降,众多国内外学者对于盾构隧道施工过程中地层沉降规律进行了研究。现有研究通常采用单线隧道开挖作为工程背景,然而大多数盾构区间隧道通常采用双线盾构隧道的形式^[5],而双线盾构隧道开挖对于上部建(构)筑物的影响与单线盾构隧道开挖有所不同。本文所研究的工程案例中,双线盾构隧道穿越桥梁的布局并非沿桥梁中线对称布置,探究双线盾构隧道对建(构)筑物的影响产生的叠加效果对指导工程施工具有重要意义。同时,分析了地铁运营期间列车产生的长期振动荷载对盾构隧道结构安全和周围地层沉降的影响。

目前,从控制盾构施工参数控制地层沉降方面,张志强等^[6]以南京地铁区间盾构隧道下穿玄武湖公路隧道为工程依托,进行了三维有限元数值模拟,研究了隧道超近接施工力学行为,提出了在“卸荷”型地下建筑物下方修筑盾构隧道时不宜采用“加大推动力-快速通过”的盾构施工模式,而应采用“降低推动力-放慢掘进速度”的观点。王立玲^[7]依据盾构下穿多层浅基础民宅施工过程中影响地层变形的因素,提出了软土地层注浆加固、盾构掘进参数优化等沉降控制措施,取得了良好的地层及民宅变形控制效果。桥梁及地层加固方面,艾国平等^[8]以长沙地铁 6 号线下穿杨家山立交桥为工程背景,使用有限元软件建立盾构穿越桥桩及排水渠的数值模型,研究了未采取措施、设置临时支墩和采用克泥效工法 3 种工况下,桥桩与排水渠的变形和受力影响规律,提出设置临时支墩、采用克泥效工法、盾构掘进控制以及施工监测 4 种施工对策,可以有效控制地层沉降,确保在盾构近距离下穿桥桩时桥梁和排水渠的正常使用。周海军等^[9]以南京地铁 5 号线山西路站一虹桥站区间盾构隧道穿越中山北路金川河桥桩基工程为例,提出采用锚杆静压钢管桩的门架式桩基托换思路及狭窄空间下拉拔桩基主筋的施工工艺,监测结果表明,该施工工艺可以有效控制地层沉降。

本文依托地铁线路盾构隧道下穿桥梁桩基托换工程,围绕地铁盾构隧道穿越城市桥梁桩基托换的关键问题进行深入探索。

1 工程概况

待托换桥建于 2006 年,桥梁上部桥面板采用长 13m、宽 1m 的预应力混凝土空心板。桥梁下部结构使用桩柱式承台结构,桥梁为整体单幅,总长 17.04m,总宽 26.6m。采用 12 根直径为 1.2m 的钻

孔灌注桩基础,桩长 16m。桥台支座采用 GYZF4 ϕ 200 \times 37 圆板橡胶支座。

盾构区间与桥梁桩基存在相交冲突,为确保盾构隧道安全施工,原计划采用拆除复建的方式,但考虑到施工造价较高与施工期间影响交通通行,故采用锚杆静压桩进行桩基加固,确保桥梁稳定使用及盾构隧道施工安全。盾构隧道区间与桥梁位置关系如图 1 所示,盾构位置如图 2 所示。

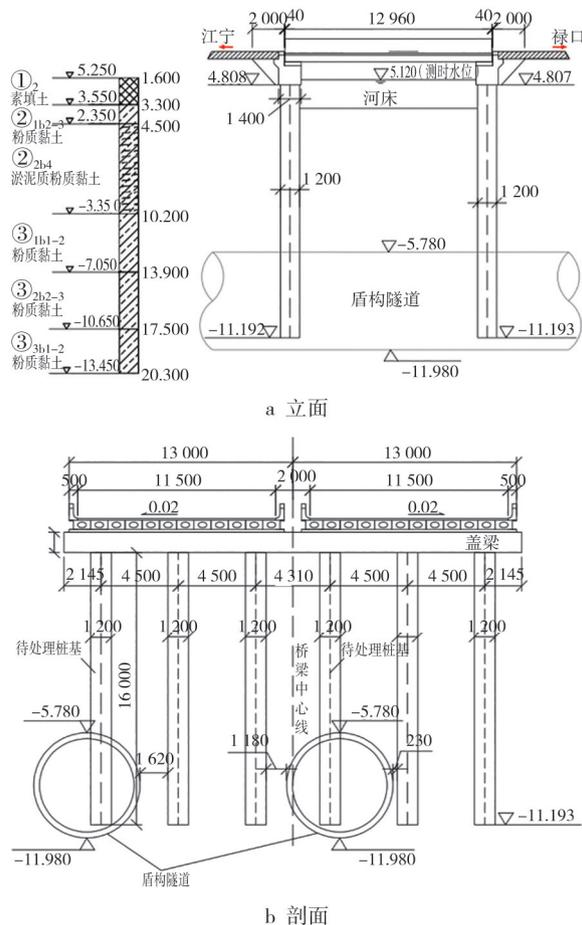


图 1 盾构隧道区间与桥梁位置关系

Fig. 1 The relationship between shield tunnel interval and bridge position

2 矩形承台拔桩主动托换方案

1) 采用桥台下注浆支护,注浆支护范围沿地铁盾构穿越桥梁桩基外侧宽 5m、深 5m、长 32m,灌浆管直径 48mm,设计灌浆压力 2.0~3.0MPa,灌浆液为普通硅酸盐水泥,水灰比为 1:1。同时,加入 3% 水玻璃(模数 2.4~3.0,浓度 30~45°Be)改善水泥浆性能。在注浆后沿桥梁承台与路基边缘缝隙中插入钢板桩进行临时支护。

2) 桥下基坑开挖完成后施作承台。拟建承台将中间所有的桩包围在内(单侧 6 根桩),共 12 根桩。承台长 30m、宽 4m、高 1.5m,底面钢筋保护层厚

表1 土体参数

Table 1 Soil parameters

层号	岩土层名称和性状	泊松比 ν	割线模量 E_{50}/MPa	卸载再加载模量 E_{ur}/MPa
① ₂	杂填土	0.15	2.0	6.0
② _{1b2-3}	粉质黏土	0.35	4.7	9.4
② _{2b4}	淤泥质粉质黏土	0.38	3.4	10.2
③ _{1b1-2}	粉质黏土	0.30	7.2	21.6
③ _{2b2-3}	粉质黏土	0.32	6.8	20.4
③ _{3b1-2}	粉质黏土	0.30	8.4	16.8
③ _{4d1}	中细砂	0.23	8.1	16.2

原桩及钢管桩模型采用 embedded 桩结构单元,其桩侧摩阻力及桩端阻力由相关土层参数确定。盾构壳采用板单元模拟;桥面板、桥台、托换承台和盾构管片采用实体单元模拟。结构材料均采用线弹性材料,具体参数如表2所示。embedded 桩结构单元与托换承台单元为刚性连接。

表2 结构单元参数

Table 2 Parameters of structure unit

材料	重度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量/GPa	泊松比
钢管桩	78.5	200	0.20
承台	26.0	30	0.13
桥面板、桥台	26.0	30	0.13
原桩(钻孔灌注桩)	26.0	30	0.13
盾壳	78.0	250	0.20
盾构管片	25.0	38	0.20

土体、桥面板、桥台、承台和盾构管片等实体单元采用三维10节点四面体单元划分,钢管桩和原桩等 embedded 桩单元采用3节点线单元划分,盾壳采用6节点板单元划分。为平衡计算精度和计算资源的矛盾,地基远处采用较大的网格,结构及与土体接触局部范围将网格适度加密,共划分了120 672个节点和187 141个单元。

3.2 模拟工况

盾构隧道穿越建(构)筑物有3种可选择的方式,分别为先穿左线后穿右线、双线同穿以及先穿右线后穿左线,对这3种穿越模式进行数值模拟。施工过程中,为保障注浆效果和管片的正常工作,盾构注浆压力范围通常在150~350kPa,本节选用100,200,300kPa共3种注浆压力进行试验,探究注浆压力对桥梁的影响。

3.3 盾构双线掘进顺序对桥梁沉降影响

不同盾构隧道穿越顺序对桥梁沉降的影响如图7所示,不同注浆压力条件下桥梁沉降规律一致。在双线同穿情况下,桥梁的沉降量随着盾构隧道的推进整体呈现s形曲线,沉降量先逐渐增大后趋于

平衡,在盾构隧道尾部离开桥梁范围后沉降量减小。

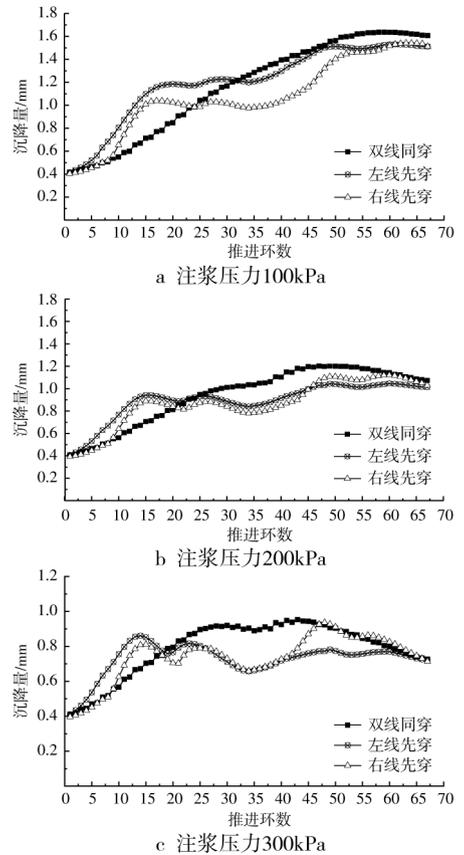


图7 盾构隧道穿越顺序对桥梁沉降的影响
Fig. 7 Influence of shield tunnel crossing sequence on bridge settlement

先穿左线后穿右线与先穿右线后穿左线情况下,桥梁的沉降量呈现两级阶梯状,其沉降量上升阶段均为盾构隧道进入桥梁下方后10个推进环数间,即15m范围内;之后的掘进过程中桥梁沉降量逐渐趋于平缓或有所下降,直至另一条盾构隧道进入桥梁下方。

对比3种不同穿越顺序模拟所得桥梁沉降量,双线同穿工况下的最大沉降量明显大于另外两种工况,主要是由于双线同时掘进对土体的扰动范围及程度远大于单线隧道掘进,其土体变形产生了叠加效应,对桥梁的影响也相应增大。根据先穿左线后穿右线与先穿右线后穿左线两种工况的桥梁沉降曲线两级阶梯的高度,同样也可以得到左线盾构隧道穿越桥梁所引起的沉降量大于右线盾构隧道穿越桥梁所引起的沉降量,主要原因在于左线盾构隧道穿越位置在桥梁边线,且因隧道穿越切除了桥梁原桩,此处虽有新建钢管桩支撑,但是依旧比两侧具有原桩的右线盾构隧道处薄弱。

因此,建议盾构隧道施工过程中,采用先穿左

线后穿右线与先穿右线后穿左线两种穿越方式。在左线盾构隧道穿越桥梁时,对桥梁采用加固措施防止产生过大沉降。

3.4 注浆压力对桥梁沉降影响

3种工况下注浆压力对桥梁沉降影响的模拟结果如图8所示。由图8可知,整体趋势为随着注浆压力的增大,桥梁沉降量减小。在双线同穿情况下,桥梁沉降量所呈现的s形曲线,其峰值会随注浆压力增大而向左移动,即可以在施工过程中更早达到最大沉降量,所以在实际施工过程中可以根据注浆压力的大小预测桥梁最大沉降量。先穿左线后穿右线与先穿右线后穿左线情况下,桥梁的沉降量呈现两级阶梯状曲线,随着注浆压力的增大,其两级阶梯的高度随之减小,使整个施工过程的沉降曲线更加平稳。尤其是先穿左线的情况下,沉降曲线在第2级阶梯处上升平缓,在300kPa注浆压力下几乎不再增加。

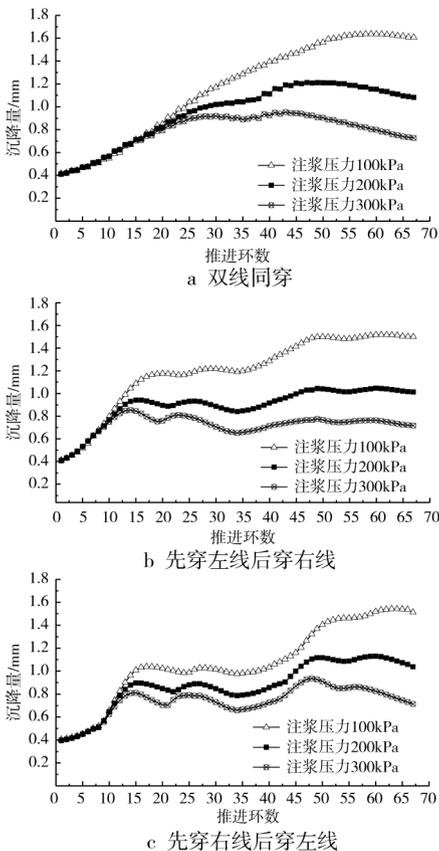


图8 注浆压力对桥梁沉降影响

Fig. 8 Influence of grouting pressure on bridge settlement

对比3种注浆压力,采用300kPa注浆压力更有助于减小桥梁沉降量,建议盾构隧道施工过程中注浆压力采用300kPa。

3.5 对比分析

不同工况下桥梁最大沉降量变化如图9所示。由图9可知,桥梁最大沉降量随注浆压力的增加而减小,并且采用先穿左线的盾构隧道施工顺序能够更好地控制桥梁沉降。

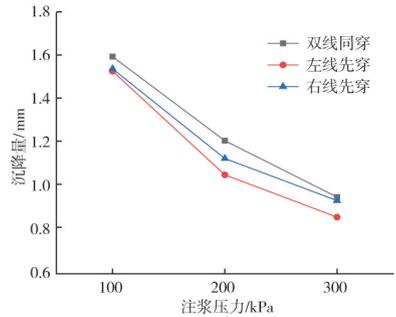


图9 不同穿越顺序下,注浆压力对桥梁沉降的影响

Fig. 9 Influence of grouting pressure on bridge settlement under different crossing sequence

因此,建议盾构隧道施工在穿越桥梁区间采用先穿越左线的施工顺序以及300kPa的同步注浆压力,桥梁最大沉降量为0.86mm。此外,通过上述分析可知,在盾构隧道即将进入桥梁下方后的15m掘进范围内,将会发生一段较大的沉降,可在盾构隧道即将进入桥梁下方时,对桥梁采取一定的支护和加固措施,保障桥梁安全运行。

4 运营期间地铁荷载对桥梁的影响

地铁运营期间列车产生的长期振动荷载是影响盾构隧道结构安全和周围地层沉降的重要因素。因此,对地铁运营期内列车振动荷载进行数值模拟,获得运营周期对桥梁的影响情况。

4.1 地铁列车振动荷载

目前已有研究开展了地铁振动荷载对隧道及地层长期沉降的影响^[10-11],但针对托换后桥梁受力体系在列车荷载作用下的沉降研究较少。

列车运行所产生的竖向振动荷载可采用1个激励力函数进行模拟,其表达式如下:

$$F(t) = P_0 + P_1 \sin \omega_1 t + P_2 \sin \omega_2 t + P_3 \sin \omega_3 t \quad (1)$$

式中: P_0 为列车单边静轮重; P_1, P_2, P_3 分别为按行车平顺性、按作用到线路上的动力附加荷载和波形磨损3种控制条件下的振动荷载幅值。

假设列车的簧下质量为 M_0 ,振动荷载幅值 P_1, P_2, P_3 的计算表达式如下:

$$P_i = M_0 \alpha_i \omega_i^2 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2)$$

式中: α_i 为典型正矢; ω_i 为车速所导致的不平顺振动的波长圆频率,与表3中3种情况对应。

表 3 英国轨道几何不平顺管理值

Table 3 UK track geometry irregularity management value

控制条件	波长/m	正矢/mm
①按行车平顺性	50.00	16.000
	20.00	9.000
	10.00	5.000
②按作用到线路上的动力附加荷载	5.00	2.500
	2.00	0.600
	1.00	0.300
③波形磨耗	0.50	0.100
	0.05	0.005

波长圆频率 ω_i 的计算表达式为:

$$\omega_i = 2\pi v/L_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3)$$

式中: v 为列车的运行速度; L_i 为典型波长, 可从表 3 中①, ②, ③中对应选取。

4.2 振动荷载参数

该南京地铁采用 6A 编组, 即每班列车为 6 辆 A 型车, 其中 4 辆为动力车辆, 2 辆为拖动车辆, 车辆最大运行速度 $v = 100\text{km/h}$ 。由南京地区列车轴重荷载可选取单边静轮重 $P_0 = 80\text{kN}$, 列车簧下质量 $M_0 = 650\text{kg}$ 。

计算选取轨道几何不平顺管理值为: ①行车平顺性, 波长 $L_1 = 10\text{m}$, 正矢 $\alpha_1 = 5\text{mm}$; ②作用到线路上的动力附加荷载, 波长 $L_2 = 2\text{m}$, 正矢 $\alpha_2 = 0.6\text{mm}$; ③波形磨耗, 波长 $L_3 = 0.5\text{m}$, 正矢 $\alpha_3 = 0.1\text{mm}$ 。

根据激振力函数表达式计算可得具体参数如表 4 所示, 列车振动荷载表达式为:

$$F(t) = 80 + 12.83\sin 62.83t + 38.49\sin 314.16t + 102.64\sin 1256.64t \quad (4)$$

表 4 振动荷载参数

Table 4 Vibration load parameter

控制条件	波长/m	正矢/mm	波长圆频率 ω_i	振动荷载幅值 P_i/kPa
按行车平顺性	10.0	5.0	62.83	12.83
按作用到线路上的动力附加荷载	2.0	0.6	314.16	38.49
波形磨耗	0.5	0.1	1256.64	102.64

4.3 结果分析

将列车振动荷载作用到盾构隧道轨道上模拟地铁运营对桥梁的影响。在动力荷载计算前清除位移数据, 仅保留动力计算阶段的桥梁变形数据, 并取 3 个监测点进行观察, 分别为桥面板左边缘中点、桥面板中心点与桥面板右边缘中点, 如图 10 所示。

桥梁在列车运行所产生的竖向动力荷载下的沉降量变化如图 11 所示, 沉降量在 1s 之后逐渐趋于平稳并维持在一定范围内波动。桥面板左边缘

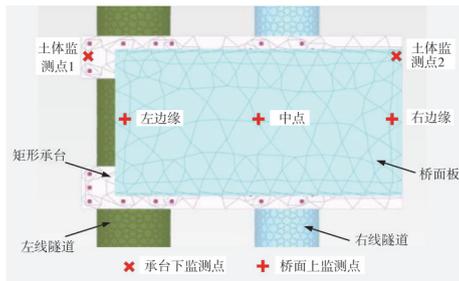


图 10 监测点布置

Fig. 10 Layout of monitoring points

中点沉降量最大, 平衡阶段沉降量峰值为 $3.85 \times 10^{-3}\text{mm}$; 桥面板中心点沉降量略小于桥面板左边缘中点, 为 $2.96 \times 10^{-3}\text{mm}$; 桥面板右边缘中点沉降量为 $1.74 \times 10^{-3}\text{mm}$ 。3 个监测点的最大沉降量显示单次的振动荷载对桥梁的影响是可控的。

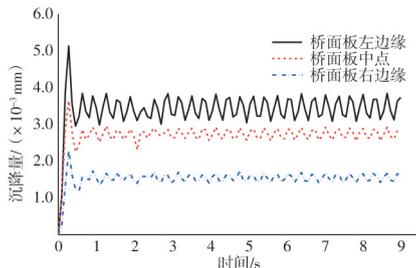


图 11 列车动力荷载对桥梁沉降的影响

Fig. 11 Influence of train dynamic load on bridge settlement

承台下方土体在列车振动荷载下的沉降曲线如图 12 所示, 趋势与桥梁沉降变化曲线相同, 土体监测点 1 位置土体最终沉降量为 $3.28 \times 10^{-3}\text{mm}$, 土体监测点 2 位置土体最终沉降量为 $1.82 \times 10^{-3}\text{mm}$, 与桥梁沉降相似。由 Monismith 等^[12]所提出的土体永久应变随应力加载次数变化的计算模型如下:

$$\epsilon^p = AN^b \quad (5)$$

式中: ϵ^p 为土体的永久应变; N 为应力加载次数, 根据列车运营时间及发车时间间隔, 取 80 000 次/年; A 为土体在第 1 次列车动力荷载加载获得的土体永久应变; b 为常数, 取 $0.17^{[10]}$ 。

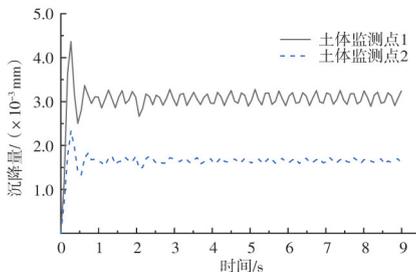


图 12 承台下土体沉降曲线

Fig. 12 Soil settlement curve under the platform

根据承台下土体第1次加载列车动力荷载获得的土体永久应变及预测计算模型,可得承台下土体总沉降量与列车运营时间的关系曲线如图13所示。由图13可知,地铁30年的运营期承台下土体监测点1处的最大沉降量为 $39.86 \times 10^{-3} \text{mm}$,土体监测点2处的最大沉降量为 $22.12 \times 10^{-3} \text{mm}$ 。由此可知,在盾构运营期内地铁列车产生的动力荷载对桥梁不会产生过大影响,满足地铁施工要求。

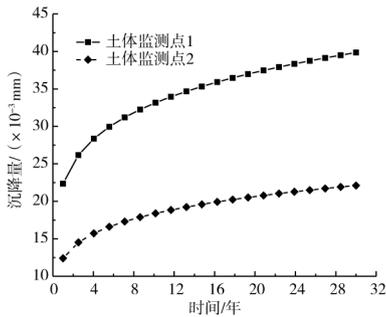


图13 承台下土体总沉降量与时间的关系曲线
Fig. 13 The relationship curve between total soil settlement and time

5 结语

1) 双线同穿情况下,桥梁的沉降量随着盾构隧道的推进整体呈现s形;先穿左线与先穿右线情况下,桥梁的沉降量呈现两级阶梯状,其沉降量上升阶段均为盾构隧道进入桥梁下方后10个推进环数间,即15m范围内;左线盾构隧道穿越桥梁所引起的沉降量大于右线盾构隧道。此外,双线同穿情况下的最大沉降量明显大于另外两种情况。在左线盾构隧道穿越桥梁时,对桥梁采用加固措施防止产生过大沉降。

2) 桥梁沉降随着注浆压力的增大而减小。双线同穿情况下,桥梁沉降量峰值会随注浆压力增大而向左移动,即可以在施工过程中更早达到最大沉降量。先穿左线与先穿右线情况下,随着注浆压力的增大,桥梁的沉降量两级阶梯差异减小,尤其是先穿左线工况,沉降曲线在300kPa注浆压力下几乎不再增加。对比3种注浆压力,采用300kPa注浆压力更有助于减小桥梁沉降量。建议盾构隧道施工过程中采用先穿左线的方式,注浆压力为300kPa,此条件下桥梁最大沉降量为0.86mm,满足工程需求。

3) 列车振动荷载作用下,桥面沉降量平稳维持在一定范围内。桥面板左边缘沉降量最大,平衡阶段峰值为 $3.85 \times 10^{-3} \text{mm}$,桥面板中心点沉降

量为 $2.96 \times 10^{-3} \text{mm}$,略小于桥面板左边缘,而桥面板右边缘沉降量仅为 $1.74 \times 10^{-3} \text{mm}$ 。3个监测点最大沉降量显示单次振动荷载对桥梁的影响是可控的。根据承台下土体第1次加载列车动力荷载获得的土体永久应变及预测计算模型,地铁30年运营期内承台下土体监测点的最大沉降量为 $39.86 \times 10^{-3} \text{mm}$ 。由此可知,在盾构运营期内地铁列车产生的动力荷载对桥梁不会产生过大影响,满足地铁运营要求。

参考文献:

- [1] 鄧建国,夏正茂,陈兵. 不同防护措施下盾构下穿施工对既有桥梁结构物的影响研究[J]. 交通节能与环保, 2019, 15(6): 110-114.
ZHI J G, XIA Z M, CHEN B. Study on the influence on the existing bridge structure from the underpass construction of shield tunneling under different protective measures [J]. Transport energy conservation & environmental protection, 2019, 15(6): 110-114.
- [2] 龙际权. 盾构施工下穿建筑物时诱发沉降数值分析及预测[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(7): 19-24.
LONG J Q. Numerical analysis and prediction of settlement induced during shield construction underneath buildings [J]. Construction technology, 2025, 54(7): 19-24.
- [3] GAO M Z, ZHANG Z L, QIU Z Q, et al. The mechanism of hysteretic ground settlement caused by shield tunneling in mixed-face conditions[J]. Geomechanics and geophysics for geo-energy and geo-resources, 2018, 4(1): 51-61.
- [4] 牛自强. 隧道施工引起的既有地铁线变形控制研究[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(21): 78-83.
NIU Z Q. Study on deformation control of existing subway line caused by tunnel construction[J]. Construction technology, 2024, 53(21): 78-83.
- [5] 甘晓露,俞建森,龚晓南,等. 新建双线隧道下穿对既有盾构隧道影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(S2): 3586-3594.
GAN X L, YU J L, GONG X N, et al. Study on influence of new double-track tunnel undercrossing on existing shield tunnel[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2020, 39(S2): 3586-3594.
- [6] 张志强,何川. 南京地铁区间盾构隧道“下穿”玄武湖公路隧道施工的关键技术研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1711-1716.
ZHANG Z Q, HE C. Research on key technique of shield tunnel construction beneath adjacent existing highway tunnel[J]. Rock and soil mechanics, 2005, 26(11): 1711-1716.
- [7] 王立玲. 软土地层盾构法下穿多层浅基民宅施工变形控制[J]. 安徽建筑, 2021, 28(4): 102-103.
WANG L L. Deformation control of multi-storey shallow foundation residential building under shield method in soft soil stratum[J]. Anhui architecture, 2021, 28(4): 102-103.

大达到 7.5cm,比新意法高出约 17%。

3)对于开挖面后方土体的轴向变形而言,当新意法加固点数为 35 个时,其加固效果不如中棚管法。但当新意法中的 Peila 法设置了 55 个加固点时,对开挖面后方地层的稳定效果最优,比中管棚法挤出量减少约 57%。

参考文献:

- [1] 刘俭.山岭隧道围岩稳定性分析及管棚支护优化研究[J].施工技术(中英文),2025,54(4):67-73.
LIU J. Study on stability analysis of surrounding rock and optimization of pipe roof support in mountain tunnel [J]. Construction technology, 2025, 54(4): 67-73.
- [2] 闫向君,陈泽盟.浅埋偏压小净距隧道超前支护施工技术研究[J].低温建筑技术,2024,46(11):109-113.
YAN X J, CHEN Z M. Research on advance support construction technology for shallow buried biased pressure and small clear distance tunnels [J]. Low temperature architecture technology, 2024, 46(11): 109-113.
- [3] LUNARDI P. La stabilité du front de taille dans les ouvrages souterrains en terrain meuble: études et expériences sur le renforcement du noyau d' avancement [J]. International reinforcement des sols: expérimentations en vraie grandeur des années, 1993, 80: 93-131.
- [4] FETHI K. 3D numerical study of tunnel advance core reinforcement: application on tunnel T4 from the Algerian east-west highway [J]. Jordan journal of civil engineering, 2015, 9(2): 139-149.
- [5] 胡瑞奇,张海娜,杜可,等.管棚支护下软岩隧道掌子面稳定性研究[J].华东交通大学学报,2025,42(3):31-39.
HU R Q, ZHANG H N, DU K, et al. Study on the stability of tunnel face of soft rock tunnel under the pipe shed support [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(3): 31-39.
- [6] 姚志雄,何嘉玮,郑国文,等.超前管棚承载机理及力学特性分析和工程应用探讨 [J]. 现代隧道技术, 2025, 62(2): 60-70.
YAO Z X, HE J W, ZHENG G W, et al. Analysis of the load bearing mechanism and mechanical properties of the advanced pipe roof and discussion on its engineering application [J]. Modern tunnelling technology, 2025, 62(2): 60-70.
- [7] 武超毅,孙家军.基于新意法理念的隧道施工方法研究[J].科学技术创新,2024(1):147-150.
WU C Y, SUN J J. Research on tunnel construction methods based on the ADECO-RS method [J]. Scientific and technological innovation, 2024(1): 147-150.
- [8] 唐勇三,林剑飞,叶飞,等.基于新意法原理的隧道全断面预加固效果研究[J].公路,2017,62(11):296-301.
TANG Y S, LIN J F, YE F, et al. Research on the effect of full face pre-reinforcement in tunnel based on ADECO-RS [J]. Highway, 2017, 62(11): 296-301.
- [9] HEJAZI Y, DIAS D, KASTNER R. Impact of constitutive models on the numerical analysis of underground constructions [J]. Acta geotechnica, 2008, 3(4): 251-258.

- [10] 肖广智,魏祥龙.意大利岩土控制变形(ADECO-RS)工法简介[J].现代隧道技术,2007,44(3):11-15.
XIAO G Z, WEI X L. Introduction to ADECO-RS tunneling method of Italy [J]. Modern tunnelling technology, 2007, 44(3): 11-15.
- [11] PEILA D. A theoretical study of reinforcement influence on the stability of a tunnel face [J]. Geotechnical & geological engineering, 1994, 12(3): 145-168.
- [12] GRASSO P, MAHTAB MA, RABAJOLI G, et al. Consideration for design of shallow tunnels [J]. Infrastructures souterraines de transports, 1993(1): 19-28.
- [13] WANG H T, JIA J Q, KANG H G. Analytical approach and field monitoring for mechanical behaviors of pipe roof reinforcement [J]. Journal of Central South University of Technology, 2009, 16(5): 827-834.
- [14] JUNEJA A, HEGDE A, LEE F H, et al. Centrifuge modelling of tunnel face reinforcement using forepoling [J]. Tunnelling and underground space technology, 2010, 25(4): 377-381.
- [15] DIAS D, KASTNER R. Modélisation numérique de l'apport du renforcement par boulonnage du front de taille des tunnels [J]. Canadian geotechnical journal, 2005, 42(6): 1656-1674.

(上接第 55 页)

- [8] 艾国平,陈刚,刘维正,等.地铁盾构隧道穿越既有桥桩及排水渠的施工影响与对策[J].现代交通技术,2021,18(2):68-74.
AI G P, CHEN G, LIU W Z, et al. Construction influence and countermeasures of subway shield tunnel through existing bridge piles and drainage channels [J]. Modern transportation technology, 2021, 18(2): 68-74.
- [9] 周海军,陈炜昀,王志华,等.南京地铁 5 号线盾构隧道穿越桥梁桩基托换设计与施工 [J]. 施工技术, 2019, 48(22): 85-89.
ZHOU H J, CHEN W Y, WANG Z H, et al. Design and construction of pile foundation underpinning for shield tunnel of Nanjing metro line 5 crossing bridge [J]. Construction technology, 2019, 48(22): 85-89.
- [10] 张冬梅,李钰.地铁荷载引起的盾构隧道及土层长期沉降研究[J].防灾减灾工程学报,2015,35(5):563-567.
ZHANG D M, LI Y. Long-term settlement of shield tunnel in soft clay due to vehicle vibration [J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2015, 35(5): 563-567.
- [11] 李亮,张丙强,杨小礼.高速列车振动荷载下大断面隧道结构动力响应分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4259-4265.
LI L, ZHANG B Q, YANG X L. Analysis of dynamic response of large cross-section tunnel under vibrating load induced by high speed train [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2005, 24(23): 4259-4265.
- [12] MONISMITH C L, OGAWA N, FREEME C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading [J]. Transport research record, 1975, 537: 1-17.