

考虑施工因素的盾构下穿对既有隧道沉降影响^{*}薛子钎¹ 夏洪春^{1,2} 朱训国^{1,2} 严滑钧¹

(1. 大连大学建筑工程学院, 116622, 大连; 2. 辽宁省复杂结构系统灾害预测与防治重点实验室, 116622, 大连)

摘要 [目的] 新建盾构隧道下穿施工会诱发既有隧道发生沉降变形, 因此, 有必要研究施工因素在盾构下穿过程中对既有隧道的沉降影响。[方法] 以广州地铁 22 号线下穿 3 号线工程为例, 基于 Midas/GTS NX 软件建立多组数值模型, 分析土仓压力和注浆压力两个施工因素影响下, 双线盾构下穿对既有隧道沉降的影响规律; 根据不同土仓压力和注浆压力对应的隧道最大沉降值进行曲线拟合; 基于考虑隧道埋深影响的既有隧道沉降修正公式, 提出了适用于广州地区的、考虑施工因素的双线盾构下穿引起既有隧道沉降的预测公式。[结果及结论] 合理范围内, 既有隧道的沉降值与土仓压力、注浆压力呈负相关; 不同土仓压力和注浆压力的沉降拟合曲线函数, 能够预测多种施工因素水平变化下的既有隧道沉降; 下穿段土仓压力下限值为 0.236 MPa, 注浆压力下限值为 0.267 MPa; 盾构近接穿越施工应加强施工监管和防护, 合适的注浆压力和土仓压力能够减小对既有隧道的扰动影响。

关键词 地铁; 盾构下穿; 既有隧道沉降; 施工因素

中图分类号 U455.43

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2025.05.025

Impact of Shield Under-Passing on Existing Tunnel Settlement Considering Construction Factors

XUE Ziqian¹, XIA Hongchun^{1,2}, ZHU Xunguo^{1,2}, YAN Huajun¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Dalian University, 116622, Dalian, China; 2. Liaoning Provincial Key Laboratory of Complex Structure Disaster Prediction and Prevention, Dalian University, 116622, Dalian, China)

Abstract [Objective] The construction of a new shield-tunneling tunnel under-passing the existing tunnel can induce the latter's settlement and deformation. Therefore, it is necessary to study the impact of construction factors on the settlement of the existing tunnel during the shield under-passing process. [Method] Taking the project of Guangzhou Metro Line 22 under-passing Line 3 as an example, multiple groups of numerical model are established based on Midas/GTS NX software. The

influence rules of double-line shield tunneling under-passing on the existing tunnel settlement under the influence of two construction factors, soil chamber pressure and grouting pressure, are analyzed. Curve fitting is carried out according to the maximum settlement values of the tunnel corresponding to different soil chamber pressures and grouting pressures. Based on the settlement correction formula of the existing tunnel considering the influence of tunnel burial depth, a prediction formula for the settlement of the existing tunnel caused by double-line shield tunneling under-passing is proposed, which is applicable to Guangzhou area and considering construction factors. [Result & Conclusion] Within a reasonable range, the settlement value of the existing tunnel is negatively correlated with the soil chamber pressure and the grouting pressure. The settlement fitting curve functions of different soil chamber pressures and grouting pressures are capable to predict the settlement of the existing tunnel under the change of multiple construction factor levels. The lower limit of the soil chamber pressure in the under-passing section is 0.236 MPa, and that of the grouting pressure is 0.267 MPa. During the shield tunneling closely under-passing, construction supervision and protection should be strengthened. Appropriate grouting pressure and soil chamber pressure can reduce the disturbance impact on the existing tunnel.

Key words metro; shield tunneling under-passing; existing tunnel settlement; construction factors

近年来我国大力推进地铁项目的建设, 采用盾构法施工的新建地铁隧道下穿既有地铁隧道的工程越来越多。为了保证既有线路的运营安全, 盾构下穿工程对既有地铁隧道的控制要求较高, 因此对既有隧道的沉降变形研究具有较大的现实意义。

已有较多文献进行了相关研究。文献[1]考虑施工开挖顺序, 基于叠加原理提出了双线开挖引起既有隧道沉降的计算公式。为了提高经验公式的适用性, 文献[2-3]对经验公式中的参数修正进行

^{*} 国家自然科学基金项目(52279116); 辽宁省复杂结构灾害预测与防治重点实验室平台重点项目(202101ZD02)

了广泛研究。文献[4-5]基于大量实际监测数据,采用线性回归分析法引入两个修正系数,对 Peck 公式进行改进,研究结果表明,修正 Peck 公式的预测精度有显著提升。

已有文献对经验公式中的几何因素参数修正分析较多,较少考虑到施工因素在盾构下穿过程中对既有隧道的沉降影响。鉴于此,本文以广州地铁 22 号线(以下简称“22 号线”)下穿广州地铁 3 号线(以下简称“3 号线”)工程为例,研究土仓压力和注浆压力两个代表性施工因素对既有隧道的沉降影响。结合不同施工影响因素的最大沉降值拟合曲线函数,提出考虑施工因素的盾构下穿既有隧道沉降预测公式。本文研究可为类似盾构穿越工程提供参考与借鉴。

1 工程概况

22 号线番禺广场站—市广路区间沿东环路东西走向布设,于东环路与光明北路路口正交下穿通过 3 号线。22 号线拱顶距 3 号线拱底最小距离约为 4.8 m。22 号线隧道内径为 8.4 m,3 号线隧道内径为 6.0 m,管片厚度均为 0.3 m,环宽为 1.5 m,衬砌均采用 C50 钢筋混凝土结构。根据地勘资料可知,22 号线盾构掘进面上部为砂质黏性土及全风化地层,下部为中风化混合花岗岩层,属于上软下硬地层。下穿段隧道及地质情况剖面示意图如图 1 所示。

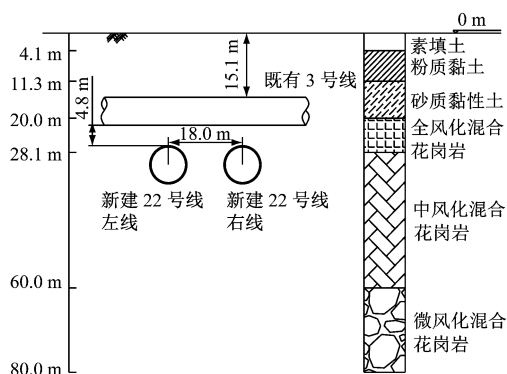


图 1 下穿段隧道及地质情况剖面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the under-passing tunnel and geological conditions profile

2 数值模拟分析

2.1 数值计算模型

采用 Midas/GTS NX 软件,建立尺寸为 90 m

(长)×60 m(宽)×80 m(高)的数值模型。既有隧道、新建隧道、土层各选用长为 1.0 m、1.5 m、3.0 m 的网格,计算模型共计 85 469 个节点和 147 069 个单元。数值计算模型网格示意图如图 2 所示。

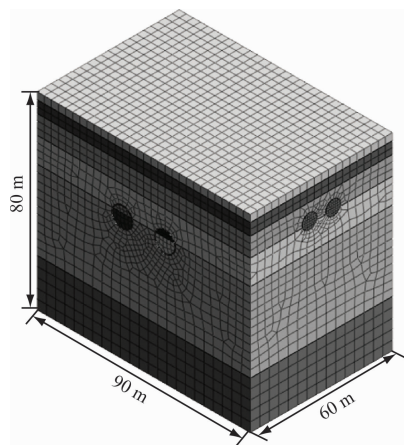
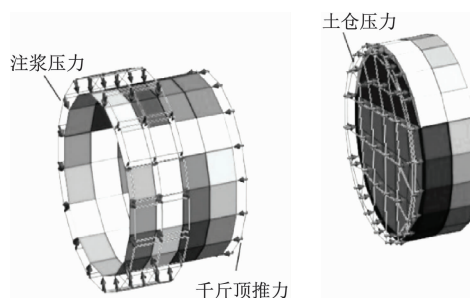


图 2 数值计算模型网格示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the numerical calculation model grid

地层采用修正的摩尔-库伦本构模型进行模拟,考虑土的剪切硬化和压缩硬化作用。忽略管片间的螺栓连接,将管片弹性模量折减 0.85 倍。注浆层近似考虑为加固后的中风化混合花岗岩地层,弹性模量与黏聚力增强 30%,内摩擦角提高 2°。地层及材料参数如表 1 所示。

盾构掘进荷载分布示意图如图 3 所示。土仓压力作用在开挖面上,结合表 1 中数值和朗肯理论计算结果,本文取为 0.20 MPa。注浆压力作用在管片四周,注浆压力方向朝向管片内,根据广州地质情况取为 0.25 MPa。顶推力作用在管片板单元线上,换算成线荷载后取为 180 kN/m。



a) 注浆压力及千斤顶推力荷载 b) 土仓压力荷载

图 3 盾构掘进荷载分布示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the load distribution during shield tunneling

以 2 环管片作为 1 个施工阶段,左线隧道先施工,共 24 个施工阶段,双线隧道共 48 个施工阶段。初始阶段选择激活土体、既有隧道结构、边界条件,同时进行位移清零,以模拟开挖前的工况。施工步骤示意图如图 4 所示。

表 1 地层及材料参数
Tab. 1 Formation and material parameters

名称	重度/ (kN/m ³)	割线模量/ MPa	切线模量/ MPa	卸荷模量/ MPa	弹性模量/ MPa	黏聚力/ MPa	摩擦角/ (°)	泊松比	厚度/ m
素填土	18.0	4.0	4.0	12.0		8.0	10.0	0.44	4.10
粉质黏土	19.0	23.5	23.5	70.5		22.3	16.5	0.35	7.20
砂质黏性土	18.7	31.5	31.5	94.5		29.1	31.3	0.31	8.70
全风化混合花岗岩	19.2	105.0	105.0	315.0		41.2	28.9	0.32	8.10
中风化混合花岗岩	25.4	153.0	153.0	459.0		180.0	30.0	0.26	31.90
微风化混合花岗岩	26.5	207.0	207.0	621.0		540.0	35.0	0.22	20.00
盾壳	78.5				208 000			0.25	0.06
管片	24.0				29 300			0.25	0.30
注浆层	25.8				200			0.30	0.15

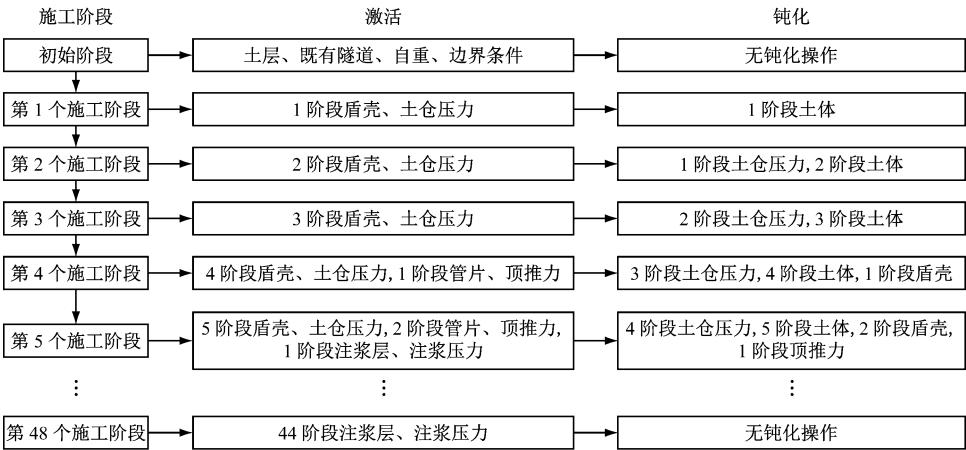


图 4 施工步骤示意图
Fig. 4 Schematic diagram of construction steps

2.2 计算结果分析

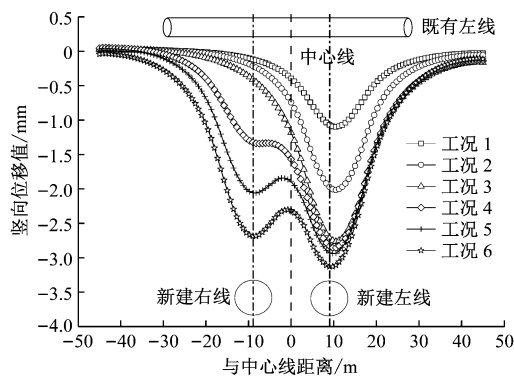
由于既有右线隧道和左线隧道的沉降规律大致相近,仅有数值上的区别,因篇幅限制,本文仅取既有左线隧道进行分析,但所得沉降规律也适用于右线隧道。将本工程分为 6 个工况:①新建左线隧道开挖至既有左线隧道下方(工况 1);②新建左线隧道开挖至既有右线隧道下方(工况 2);③新建左线隧道贯通(工况 3);④新建右线隧道开挖至既有左线隧道下方(工况 4);⑤新建右线隧道开挖至既有右线隧道下方(工况 5);⑥新建右线隧道贯通(工况 6)。

6 种工况下,既有左线隧道拱底竖向位移曲线如图 5 所示。由图 5 可知:新建左线隧道先行施工,

既有隧道拱底产生沉降,最大沉降值为 2.76 mm,位于新建左线隧道轴线处,曲线形状呈 V 形;随着盾构隧道右线开始施工,拱底沉降峰值向新建右线隧道方向偏移,于新建右线隧道轴线处出现一个较小的峰值;由于新建左线隧道受到两次开挖施工的影响,沉降影响有所叠加,故其最大沉降值为 3.13 mm,仍处于先行施工的新建左线隧道处,且沉降曲线宽度有所增加,沉降槽曲线轮廓从 V 形变为非对称 W 形。

3 修正理论计算分析

参考文献[6-7]中的修正计算方法,计算既有左线隧道拱底竖向沉降值。记录既有左线隧道



注:与中心线距离以中心线指向新建左线侧为正,以中心线指向新建右线侧为负;余类同。

图 5 6 种工况下既有左线隧道拱底竖向位移曲线

Fig. 5 Arch bottom vertical displacement curves of the existing left line tunnel under six working conditions

ZDM07-01—ZDM07-15 断面沉降监测点数据,各测点的水平间距为 6 m。结合实测数据反演计算可得既有隧道拱底竖向位移方程 $S(x)$, 并进行修正, 则有:

$$S(x) = k_1 S_{\max} \exp \left[-\frac{(x - 0.5k_2L)^2}{2(k_3i)^2} \right] + k_1 S_{\max} \exp \left[-\frac{(x + 0.5k_2L)^2}{2(k_3i)^2} \right] \quad (1)$$

式中:

- x ——与隧道中心线距离,单位 m;
- k_1 ——隧道最大沉降修正系数;
- k_2 ——双线隧道轴心水平距离修正系数;
- k_3 ——沉降槽宽度修正系数;
- S_{\max} ——既有土体最大沉降值,单位 mm;
- L ——新建双孔隧道中心间距,单位 m;
- i ——沉降槽宽度系数。

采用拟合工具计算得 k_1 、 k_2 、 k_3 的取值分别为 1.28、1.09、0.82。修正后,隧道拱底竖向位移方程 $S_i(x)$ 可以表示为:

$$S_i(x) = 0.00292 \exp[-0.00853(x - 9.8)^2] + 0.00248 \exp[-0.0102(x + 9.8)^2] \quad (2)$$

将既有左线隧道拱底的理论计算沉降值、现场监测沉降值、修正计算沉降值与数值模拟沉降值进行对比,结果如图 6 所示。

由图 6 可知:现场监测数据与数值模拟结果曲线大致相同,且其较理论计算曲线更接近实际结果,证明了本文所提数值模型的准确性;数值模拟计算所得最大沉降值为 3.13 mm,理论计算所得最

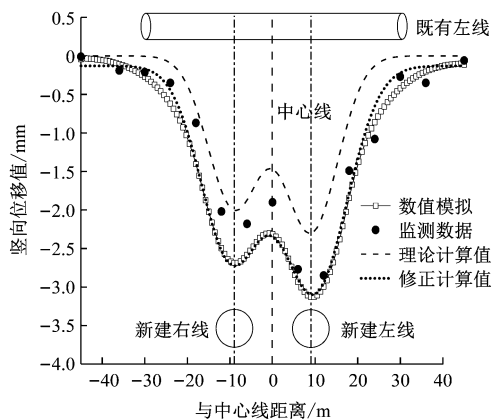


图 6 不同方法下的既有隧道拱底竖向位移对比

Fig. 6 Comparison of the arch bottom vertical displacements of the existing tunnel under different methods

大沉降值为 2.30 mm,误差为 26.5%;通过修正曲线计算所得最大沉降值为 3.11 mm,误差仅为 0.02%;通过修正公式计算得到的拱底沉降槽宽度与数值模拟曲线的沉降槽宽度基本相同。由此可知,修正计算公式在广州地区的适用性较好。

4 施工因素对既有隧道沉降影响分析

在盾构隧道施工过程中,各压力参数的设定尤为重要。根据相关文献研究的沉降影响因素重要度排序可知,土仓压力、刀盘扭矩、注浆压力是关联度最高的 3 个因素。为了便于建模,选取土仓压力、注浆压力两个代表性的施工因素对既有隧道的沉降影响进行分析。

4.1 土仓压力

为防止超挖,考虑增加 10 ~ 40 kPa 作为预留压力,下穿段的土仓压力取为 0.166 ~ 0.253 MPa,选取 0.18 MPa、0.20 MPa、0.22 MPa、0.24 MPa 这 4 个土仓压力水平进行分析。

不同土仓压力下,既有左线隧道拱底竖向位移曲线如图 7 所示。土仓压力从小到大依次对应的最大沉降值为 3.38 mm、3.13 mm、3.02 mm、3.00 mm,说明一定范围内,土仓压力的增大能够减小既有隧道的沉降。由图 7 的局部放大图可知:当土仓压力高于 0.22 MPa 时,继续增大土仓压力对减小既有隧道拱底沉降的作用已不明显。从经济角度看,设置低于 0.22 MPa 的土仓压力可有效控制既有隧道的沉降,保证既有隧道的运营安全。

采用多种函数对图 7 中各曲线的最大值进行拟合,选取相关系数最接近于 1 的拟合曲线,最终得到

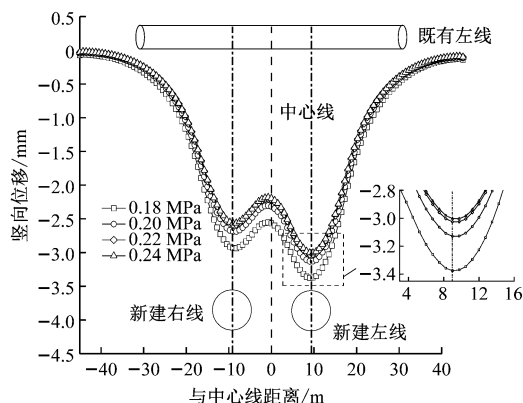


图7 不同土仓压力下既有左线隧道拱底竖向位移曲线

Fig.7 Arch bottom vertical displacement curves of the existing left line tunnel under different soil chamber pressures

的拟合曲线方程相关系数 $R^2 = 0.98$, 可用指数函数描述。4种土仓压力下, 既有左线隧道拱底最大沉降值拟合曲线如图8所示。

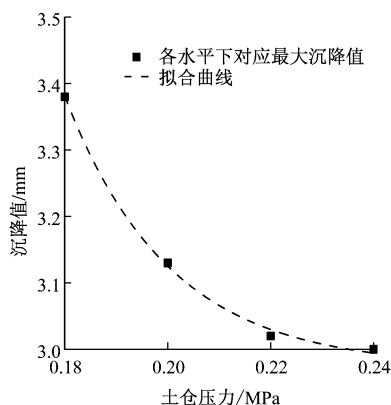


图8 4种土仓压力下的既有左线隧道拱底最大沉降值拟合曲线

Fig.8 Fitting curve of the maximum settlement values of the existing left line tunnel arch bottom under four soil chamber pressures

拟合曲线方程可以表示为:

$$y = Ae^{-\frac{F}{B}} + C \quad (3)$$

式中:

F ——土仓压力;

A 、 B 、 C ——拟合参数, 本文中, $A = 2\,966.067$, $B = 0.020$, $C = 2.973$ 。

该盾构下穿段内, 不同土仓压力变化下的既有隧道沉降值 $S_w(x)$ 预测公式可以表示为:

$$S_w(x) = yS_t(x) = (Ae^{-\frac{F}{B}} + C)S_t(x) \quad (4)$$

由城市轨道交通结构安全保护技术规范可知,

既有隧道结构位移控制标准值应小于 3 mm。将式(3)代入式(2), 反推出 $F = 0.236$ MPa, 即可获得本工程中盾构下穿段土仓压力的安全下限值。

4.2 注浆压力

根据广州地区的地铁施工经验可知, 同步注浆压力宜取为 0.20 ~ 0.50 MPa, 选取 0.20 MPa、0.25 MPa、0.30 MPa、0.35 MPa 这 4 个注浆压力进行分析。

不同注浆压力下, 既有左线隧道拱底竖向位移曲线如图9所示。由图9可知: 与土仓压力的变化规律相似, 既有左线隧道拱底沉降值随注浆压力的增大而减小; 注浆压力从小到大依次对应的最大沉降值为 3.67 mm、3.13 mm、2.81 mm、2.70 mm。由此可知, 在一定范围内增大注浆压力可有效降低既有隧道的沉降, 且沉降减少量随注浆压力的增大呈减小趋势。当注浆压力大于 0.30 MPa 时, 继续增大注浆压力对减小沉降影响的效果明显减弱, 与注浆压力为 0.35 MPa 的曲线峰值相比, 其仅减少了 0.11 mm。同步注浆压力过小会导致浆液在管片壁厚填充不充分, 增大上方土体的沉降值; 同步注浆压力过大会使周围地层受浆液扰动, 产生跑浆现象及后期地层沉降影响, 甚至对管片造成损坏。为降低施工成本, 本工程注浆压力宜设置为小于 0.30 MPa, 可保障新建隧道施工安全和既有隧道的稳定性。

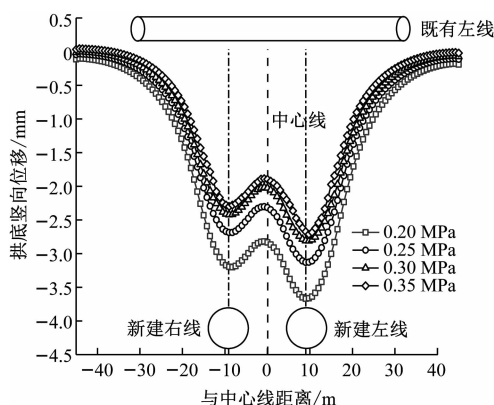


图9 不同注浆压力下既有左线隧道拱底沉降曲线

Fig.9 Arch bottom settlement curves of the existing left line tunnel under different grouting pressures

采用多种函数对图9中各曲线的最大值进行拟合, 选取相关系数最接近于 1 的拟合曲线, 最终得到的拟合曲线方程相关系数为 0.98, 可用指数函数描述。4种注浆压力下, 既有左线隧道拱底最大沉降

值拟合曲线如图 10 所示。

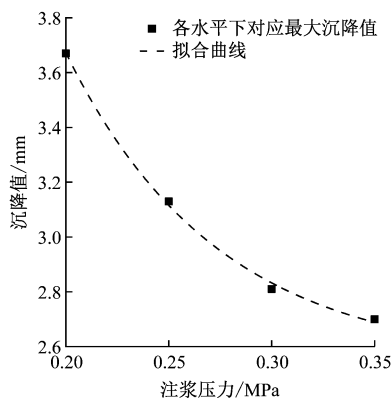


图 10 4 种注浆压力下既有左线隧道拱底最大沉降值拟合曲线

Fig. 10 Fitting curves of the maximum settlement values of the existing left line tunnel arch bottom under four grouting pressures

拟合曲线方程可以表示为:

$$y = A_1 e^{-\frac{p}{B_1}} + C_1 \quad (5)$$

式中:

p ——注浆压力;

A_1, B_1, C_1 ——拟合参数,本文中, $A_1 = 16.998$, $B_1 = 0.074$, $C_1 = 2.540$ 。

不同注浆压力变化下,既有隧道沉降值 $S_g(x)$ 预测公式可以表示为:

$$S_g(x) = y S_t(x) = (A_1 e^{-\frac{p}{B_1}} + C_1) S_t(x) \quad (6)$$

将式(4)代入式(5),反推出 $p = 0.267$ MPa,即可获得本工程下穿段注浆压力安全下限值。

5 结语

本文以 22 号线下穿 3 号线工程为例,建立数值模型并分析计算结果,主要获得以下结论:

1) 参考已有数值结果,对适用于广州地区的双线隧道下穿沉降公式进行参数修正,理论计算结果与数值模拟结果较为贴近。

2) 既有隧道沉降与土仓压力、注浆压力呈负相关。对不同施工影响因素对应的既有隧道最大沉降值进行拟合,并基于修正公式,提出了土仓压力、注浆压力施工因素的既有隧道沉降预测公式。

3) 将规范要求控制值代入各拟合函数中,反推出下穿段土仓压力安全下限值为 0.236 MPa、注浆

压力安全下限值为 0.267 MPa。

参考文献

- [1] 魏纲. 双线盾构隧道施工环境效应评价与控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
WEI Gang. Evaluation and control of construction environmental effects of double-line shield tunnels [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [2] 卢健, 姚爱军, 郑轩, 等. 地铁双线隧道开挖地表沉降规律及计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊2): 3735.
LU Jian, YAO Aijun, ZHENG Xuan, et al. Study on the law and computational method of ground surface settlement induced by double-line tunnel excavation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S2): 3735.
- [3] DENG H, FU H, SHI Y, et al. Analysis of asymmetrical deformation of surface and oblique pipeline caused by shield tunneling along curved section [J]. Symmetry, 2021, 13(12): 2396.
- [4] 贾宝新, 高宗贤, 惠鹏飞. 上软下硬地层隧道盾构施工引起的地表沉降研究[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(3): 1083.
JIA Baoxin, GAO Zongxian, HUI Pengfei. A proper approach to the surface settlement induced by the shield tunneling through the upper-soft and lower-hard ground [J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(3): 1083.
- [5] 刘俊杰, 刘俊伟, 任晓敏, 等. 土岩复合地层隧道盾构开挖地表沉降 Peck 公式修正 [J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2022, 41(2): 171.
LIU Junjie, LIU Junwei, REN Xiaomin, et al. Modification of Peck formula for ground settlement caused by shield tunneling in soil-rock composite stratum [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2022, 41(2): 171.
- [6] ZHANG Q, WU K, CUI S, et al. Surface settlement induced by subway tunnel construction based on modified peck formula [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37(4): 2823.
- [7] 吴华君, 魏纲. 近距离双线平行盾构施工引起的土体沉降计算 [J]. 现代隧道技术, 2014, 51(2): 63.
WU Huajun, WEI Gang. The calculation of soil settlement induced by construction of twin parallel shield tunnels with a small interval [J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(2): 63.

· 收稿日期:2023-03-11 修回日期:2023-04-24 出版日期:2025-05-10

Received:2023-03-11 Revised:2023-04-24 Published:2025-05-10

· 第一作者:薛子轩,硕士研究生,1016559234@qq.com

通信作者:朱训国,副教授, zhuxunguo@dlu.edu.cn

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license