

DOI: 10.11779/CJGE20220314

北京地铁新机场线超近接上跨既有隧道三维影响分区及应用研究

崔光耀¹, 宋博涵^{*2}, 肖毅³, 何继华³

(1. 北方工业大学土木工程学院, 北京 100144; 2. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124;
3. 中铁二十三局集团第六工程有限公司, 重庆 400012)

摘要: 为科学、合理地制定城市地下工程超近接施工加固方案, 依托北京地铁新机场线超近接上跨既有 10 号线工程, 采用数值仿真及现场监测对三维影响分区及其应用进行了研究。研究结果表明: 推导了依托工程横向、纵向影响分区表达式, 确定了以既有隧道隆起值为判别准则的三维影响分区, 并提出了各影响分区应对对策; 考虑到现场施工施作空间及经济指标, 对依托工程基于三维影响分区而制定的加固措施进行了优化, 经数值仿真对比分析可知, 挡土墙优化加固措施满足施工安全要求; 依托工程采用推荐的挡土墙优化加固措施进行施工, 现场监测数据表明既有隧道拱顶位移变化施工影响规律与数值仿真分析一致, 位移值均小于控制标准, 这说明所提出的三维影响分区及加固措施可保障依托工程的施工安全性。研究成果可为类似工程施工安全控制提供参考。

关键词: 地铁隧道; 三维影响分区; 施工对策; 现场监测

中图分类号: U455 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)09-1841-09

作者简介: 崔光耀(1983—), 男, 山东莒南人, 博士, 教授, 主要从事隧道与地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: cyao456@163.com。

3D impact zoning of super-close and over-crossing existing tunnels of New Airport Line of Beijing Metro and its application

CUI Guangyao¹, SONG Bohan², XIAO Yi³, HE Jihua³

(1. School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China; 2. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 3. China Railway 23rd Bureau Group 6th Engineering Co., Ltd., Chongqing 400012, China)

Abstract: In order to scientifically and reasonably formulate the super-close construction and reinforcement scheme of urban underground engineering, the three-dimensional impact zoning and its application are investigated by using the numerical simulation and field monitoring based on the New Airport Line of Beijing Metro super-close to and overcrossing the existing Line 10. The expressions for horizontal and vertical impact zoning relying on the project are deduced, the 3D impact zoning based on the uplift value of the existing tunnel is determined, and the countermeasures for each impact zoning are put forward. Considering the construction space and economic indice, the reinforcement measures based on 3D impact zoning of the supporting project are optimized. Through the comparative analysis of numerical simulations, it can be seen that the optimized reinforcement measures of retaining wall meet the construction safety requirements. The recommended optimal reinforcement measures of retaining wall are adopted for the construction of the supporting project. The on-site monitoring data show that the construction influence laws of the displacement change of the arch crown of the existing tunnel are consistent with the numerical simulation analysis, and the displacement values are less than the control standard, indicating that the proposed 3D impact zoning and reinforcement measures can ensure the construction safety of the supporting project. The research results may provide reference for the construction safety control of similar projects.

Key words: subway tunnel; 3D impact zoning; construction countermeasure; field monitoring

0 引言

截至 2021 年 6 月, 中国轨道交通运营线路已达到

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178378); 中铁二十三局科技创新计划项目(2017KY-028)
收稿日期: 2022-03-22

*通信作者(E-mail: sbh19970110@163.com)

7957 条, 地铁作为城市轨道交通系统的主力军已如网般交织在城市中, 为人们提供着方便、快捷的通行服务。然而地铁隧道在修建过程中, 由于受到地质条件、复杂环境的影响, 不断出现上跨、下穿以及各种形式的近接既有隧道的情况。为保证既有隧道的安全运营以及人们的安全出行, 降低新建隧道对既有地铁的扰动影响是亟待解决的关键技术问题之一。

隧道开挖会通过土体作为传播介质对既有隧道产生扰动影响, 其本质原因在于隧道开挖造成了围岩应力的重分布, 对近接隧道产生了新的荷载作用^[1]。当土体的附加应力或扰动程度过大时, 邻近隧道的衬砌会因为第一、第三主应力过大而发生破坏或错断, 同时隧道内道床结构也会因为土体的不规律沉降而发生变形^[2]。关于隧道工程近接施工产生的扰动影响问题, 日本在早期相继发布了《既有铁路隧道近接施工指南》、《公路隧道近接施工指南》等系列指导丛书, 率先提出了隧道近接施工影响分区和近接影响度的概念。随后, 仇文革^[1]在此基础上作出深入的细化, 对近接施工引起的力学行为进行了分类, 并通过强影响区、弱影响区、无影响区的影响范围提出了影响分区的统一表达式和施工影响对策。郑余朝^[3]在前人的基础上, 定义了新建隧道与既有隧道之间存在的几何近接度和近接影响度的概念, 完善了近接影响判别准则的表达式, 推导出影响分区表达式并对此提出控制措施和施工影响对策^[4-6]。

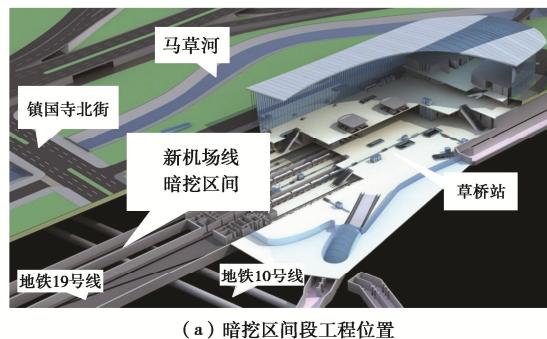
除此之外, 部分专家学者基于莫尔-库仑屈服准则通过隧道开挖前后的围岩应力变化状态对新建隧道的影响分区进行划分^[7-9], 当加载面函数 $F \geq 0$ 时, 表示围岩发生屈服, 为强影响区; 当 $0 > F > F_a$ 时, 为弱影响区; 当 $F_a \geq F$ 时, 为无影响区。影响分区的研究成果无论对城市隧道还是山岭隧道, 都意义重大。确定影响分区后, 可以合理的确定施工对策以及控制措施的加固范围^[10]。

目前, 对于新建隧道近接影响分区的研究方法已相对成熟, 但大多以隧道的横向影响分区为主, 而对于浅埋暗挖隧道的三维影响分区研究却鲜有报道。本文依托奥运工程——北京地铁新机场线上跨既有地铁 10 号线暗挖区间工程, 对浅埋暗挖 PBA 工法下隧道近接三维影响分区及应用进行研究, 研究成果可为类似工程提供参考。

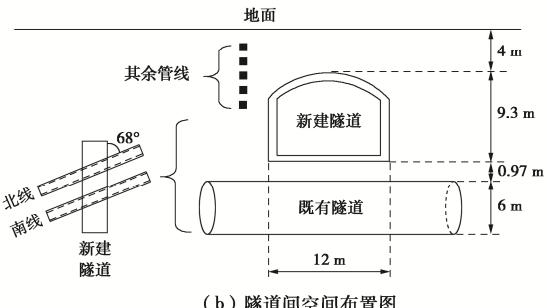
1 工程概况

新机场线暗挖区间位于马草河东侧, 草桥站南侧, 地铁 19 号线西侧, 呈 68° 斜交上跨既有地铁 10 号线。

暗挖区间隧道下穿镇国寺北街, 垂直距离 4 m, 属于浅埋深, 为一级环境风险; 暗挖区间段长约 62.7 m, 新建隧道底板至既有盾构管片间距仅 0.97 m, 属于超近接施工, 为特级环境风险。该机场线暗挖区间工程概况如图 1 所示。



(a) 暗挖区间段工程位置



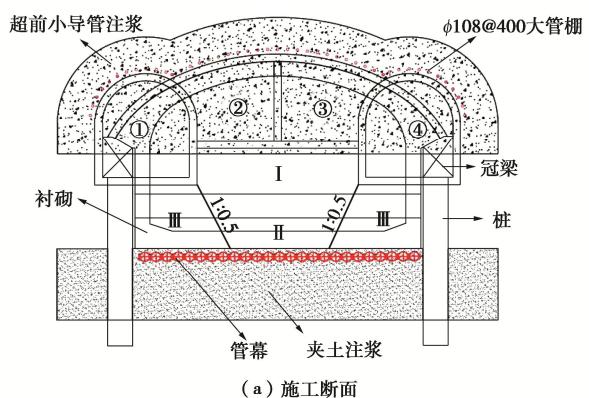
(b) 隧道间空间布置图

图 1 机场线暗挖区间工程概况

Fig. 1 Concealed excavation section project of airport line

为减小施工时对周围环境的影响, 工法采用洞桩法 (PBA) 进行施工。相比其他工法, 洞桩法的特点是以小导洞、桩、冠梁等结构率先形成了受力、传力的小框架临时支护体系, 再进行后续施工时, 不会对周围土体产生较大的扰动, 直至整体结构施工完成^[11-13]。

本文洞桩法施工断面及施工流程如图 2 所示。上层小导洞、下层土体均采用对向台阶法施工, 单位进尺为 3 m, 下台阶开挖滞后上台阶 3 m 进行。



(a) 施工断面

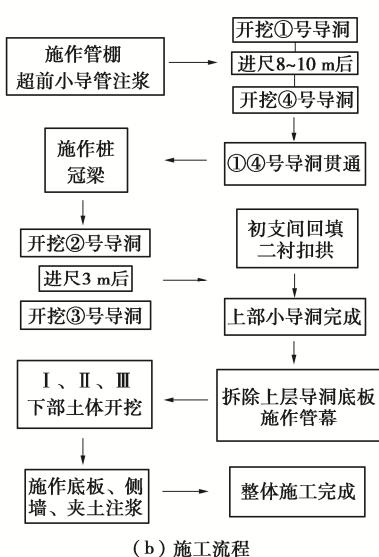


图 2 洞桩法施工

Fig. 2 Construction of PBA

2 三维影响分区理论研究

影响分区为新建隧道开挖对邻近构筑物扰动影响程度的区域, 一般基于某个判别准则通过近接影响度进行划分。其中判别准则可以为施工导致的地表沉降量、既有构筑物的变形值等。

目前, 研究大多以横向影响分区为主, 对于空间性的扰动影响程度分区没有绝对的定义。本文在前人的研究基础上提出三维影响分区, 包括横向、纵向影响分区, 认为三维影响分区实质上是以新建隧道为基准, 以横向影响分区为影响面的纵向扰动影响深度。根据扰动程度的不同, 划分为强影响区、次影响区、弱影响区和无影响区。影响分区的划分应首先确定近接影响判别表达式, 随后与近接影响度建立函数关系, 通过近接影响度值域推导出影响分区表达式, 确定三维影响分区。

2.1 近接影响判别表达式的确定

在前人的研究基础上^[1,3]确定符合本文工程的横向、纵向近接施工影响因素:

(1) K 为横向影响系数, 实质为既有隧道 $S=1D$, $H=2D$ 时为基准条件下某判别准则的值。

(2) α_0 为几何近接度 (A) 的影响系数, 一般选定 $S=1D$ (D 一般指新建隧道洞径) 的扰动影响为基准情况, 此时有 $\alpha_0=1$ 。

(3) α_1 为相互位置关系 (θ) 的影响系数; 本文新机场线与既有隧道斜交角度为 68° , 对此为基准, 此时有 $\alpha_1=1$ 。

(4) α_2 为施工方法 (T) 的影响系数; 本文采用洞桩法施工, 对此为基准, 此时有 $\alpha_2=1$ 。

(5) α_3 为地质条件 (G) 的影响系数为以本文地层为基准, 此时有 $\alpha_3=1$ 。

(6) α_4 为埋深近接度 (E) 的影响系数; 埋深近接度 (E) 为两隧道间的竖向近接程度。一般选定 $H=2D$ (D 一般指新建隧道洞径) 的扰动影响为基准情况, 此时有 $\alpha_4=1$ 。

(7) α_5 为既有隧道的劣化度 (Q) 的影响系数; 本文既有隧道正常养护, 劣化度为 1, 对此为基准, 则有 $\alpha_5=1$ 。

(8) α_6 为施工对策 (M) 的影响系数; 本文采用常规的支护方式和控制措施进行施工, 对此为基准, 则有 $\alpha_6=1$ 。

(9) α_7 为掌子面进尺 (J) 的影响系数; 当研究纵向影响分区时, 随着掌子面的不断推进, 角度、空间位置都会逼近既有隧道, 扰动影响也必定发生变化。当掌子面进尺至某一位置时, 既有隧道扰动影响最为逼近控制标准, 则规定该位置的扰动影响情况为基准, 此时有 $\alpha_7=1$ 。

(10) α_8 为单位进尺长度 (N) 的影响系数; 本文以循环进尺 3 m 为标准, 此时有 $\alpha_8=1$ 。

(11) L 为纵向影响系数; 本文取基准情况下(因素 9 中基准情况)某判别准则的值。

以上影响因素逻辑上相互独立, 可认为影响因素的修正系数对近接影响判别准则具有相乘的效应, 其中 (1) ~ (8) 影响因素适用于横向影响研究, (3) ~

(11) 影响因素适用于纵向影响研究。在三维影响判别表达式的推导过程中应注意每种影响因素的适用条件, 以此提出基于本文的近接影响判别表达式:

$$\left. \begin{aligned} C_{xij} &= K_{ij} \alpha_{0ij} \alpha_{x1ij} \alpha_{x2ij} \alpha_{x3ij} \alpha_{x4ij} \alpha_{x5ij} \alpha_{x6ij}, \\ C_{zij} &= L_{ij} \alpha_{z1ij} \alpha_{z2ij} \alpha_{z3ij} \alpha_{z4ij} \alpha_{z5ij} \alpha_{z6ij} \alpha_{z7ij} \alpha_{z8ij} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: i 为近接施工类型种类, $i=1, 2, 3, \dots$; j 为近接施工影响判别准则类型, $j=1, 2, 3, \dots$; x 为横向影响分区条件下各影响因素; z 为纵向影响分区条件下各影响因素; C 为某近接影响判别准则的值。

横向、纵向近接影响判别表达式的确立可以与近接影响度构建相关函数, 由式 (2) 表示。近接影响度在 0~5 变化从而量化施工危险程度等级^[4]。

$$I_{ij} = \begin{cases} \Psi(C_{xij}) \\ Y(C_{zij}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: I_{ij} 为第 i 种近接施工类型下, 关于第 j 个判别准则的近接影响度; Ψ 为横向近接影响判别表达式与近接影响度 I 的函数关系; Y 为纵向近接影响判别表达式与近接影响度 I 的函数关系。

2.2 近接影响度值域的确定

确定本文工程的近接类型为上跨, 判别准则为既

有隧道隆起值，应当地“微扰动”施工要求，既有线主体结构上浮控制标准为：控制值 2 mm，警戒值 1.6 mm，预警值 1.4 mm。因此可建立近接影响度、既有隧道拱顶隆起值、影响分区的关系，依据近接影响度的值域范围划分三维影响分区，见表 1 所示。

表 1 近接影响分区阈值

Table 1 Thresholds of close impact zoning

近接影响度 /(°)	既有隧道拱顶隆起值 /mm	分区别类
[3,5]	[2, +∞)	强影响区
[2,3)	[1.6,2)	次影响区
[1,2)	[1.4,1.6)	弱影响区
[0,1)	[0,1.4)	无影响区

通过 Matlab 计算软件对近接影响度与拱顶隆起值存在的函数关系进行拟合，为提高拟合精度，采用分段函数的形式来表示，如下所示：

$$\begin{cases} I = 0.71U & I \in [0,1) \quad U \in [0,1.4] \\ I = 1.44 \ln(10U - 12) & I \in [1,3) \quad U \in [1.4,2) \\ I = -2.02U^{-1.3} + 3.79 & I \in [3,5) \quad U \in [2,+\infty) \end{cases} \quad (3)$$

式中： U 为既有隧道拱顶隆起值。

3 依托工程三维影响分区

3.1 横向影响分区

划分横向影响分区，需确定横向近接影响判别表达式中的各项影响系数。其中， α_{x1} ， α_{x2} ， α_{x3} ， α_{x5} 为基准情况下的影响系数，此时都为 1。故还需对式（4）中的其他参数进行确定。

$$U_x = K\alpha_0\alpha_{x4} \quad (4)$$

结合数值模拟的方法确定 K ， α_0 ， α_{x4} 的值。建立二维模型，通过改变既有隧道的位置，设立基准情况下的 11 种计算工况，如表 2 所示。

表 2 计算工况

Table 2 Working conditions

模拟工况	埋深 H	净距 S	工况	埋深 H	净距 S
1	2D	0D	7	0.1D	1D
2	2D	1D	8	0.5D	1D
3	2D	1.5D	9	1D	1D
4	2D	2.5D	10	2D	1D
5	2D	2.5D	11	3D	1D
6	2D	3D			

利用 FLAC^{3D}有限差分软件对上述 11 种工况进行数值模拟计算。模型宽 90 m，高 68.4 m，纵深 6 m，盾构管片直径 6 m。以工况 8 ($S=1D$, $H=0.5D$) 为例，如图 3 所示。整体材料为弹塑性本构模型，采用 Mohr-Coulomb 准则作为塑性屈服破坏准则。模型计算时，约束四周围界及下边界，上边界为自由面。地质及各建筑材料计算参数选取了地勘报告与文献[14]中地层反分析法的结果。

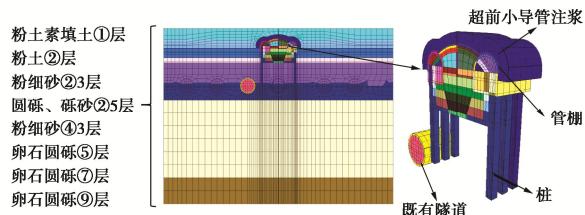


图 3 计算模型

Fig. 3 Calculation model

施工工序按 1.2 小节中洞桩法施作流程进行模拟开挖，但不施作超前管幕和夹层注浆加固措施。模拟两个进尺的施工过程对既有隧道拱顶的扰动影响，统计 11 组既有隧道的拱顶隆起值汇于表 3 所示。

表 3 既有隧道拱顶隆起值

Table 3 Crown uplift values of existing tunnel

模拟工况	1	2	3	4	5	6
拱顶隆起值 η / mm	2.48	1.90	1.61	1.20	0.91	0.48
工况	7	8	9	10	11	
拱顶隆起值 η / mm	3.40	3.20	2.90	1.90	1.10	

由计算结果可知：

(1) 根据计算结果，取基准情况 $H=2D$, $S=1D$ 时既有隧道拱顶隆起值， $K=1.90 \text{ mm}$ 。

(2) 根据计算结果，图 4 为 $H=2D$ 时净距与拱顶隆起值的回归曲线，据此确定影响系数 α_0 。

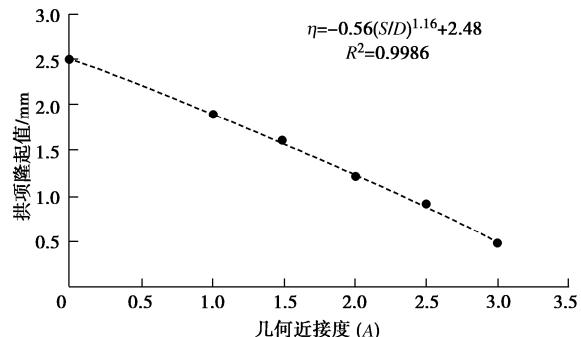


图 4 拱顶隆起值随几何近接度的拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of arch crown uplift value with geometric proximity

由图 4 可知，以 $H=2D$ 为基准，拱顶隆起变化与几何近接度的关系为

$$\eta = -0.56 \left(\frac{S}{D} \right)^{1.16} + 2.48 \quad (5)$$

η 函数除以拱顶隆起值 K ($K=1.90 \text{ mm}$)，所得函数即为几何近接度影响系数 α_0 的表达式：

$$\alpha_0 = -0.29 \left(\frac{S}{D} \right)^{1.16} + 1.31 \quad (6)$$

当 $D=12 \text{ m}$, $A=S/D=1$, 有 $\alpha_0=1$, 公式调整为

$$\alpha_{x_4} = -0.31 \left(\frac{S}{D} \right)^{1.16} + 1.31 \quad . \quad (7)$$

(3) 根据计算结果, 图 5 为 $S=1D$ 时埋深与拱顶隆起值的回归曲线, 据此确定影响系数 α_{x_4} 。

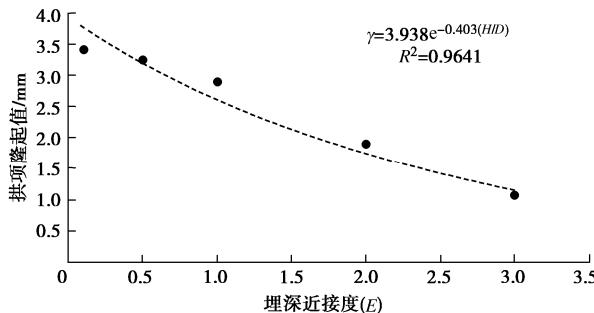


图 5 拱顶隆起值随埋深近接度的拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of arch crown uplift value with buried depth ratio

同式 (5), (6) 的推导方法可得埋深近接度影响系数 α_{x_4} 的表达式:

$$\alpha_{x_4} = 2.07 e^{-0.403(H/D)} \quad . \quad (8)$$

当 $D=12$ m, $E=H/D=2$, 有 $\alpha_{x_4}=1$, 公式调整为

$$\alpha_{x_4} = 2.24 e^{-0.403(H/D)} \quad . \quad (9)$$

将影响系数代入横向近接影响判别表达式, 可推导出关于拱顶隆起值 (U_x) 与几何近接度 (S/D)、埋深比 (H/D) 的关系, 如下所示:

$$U_x = \left[-1.31 \left(\frac{S}{D} \right)^{1.16} + 5.57 \right] e^{-0.403(H/D)} \quad . \quad (10)$$

将式 U_x 代入式 (1), 通过分区影响度值域可将公式整理为近接影响度 (I)、几何近接度 (S/D)、埋深比 (H/D) 三者之间的关系, 得到影响分区表达式, 并通过近接影响度阈值 $I=1, 2, 3$ 划分横向影响分区, 如图 6 所示。

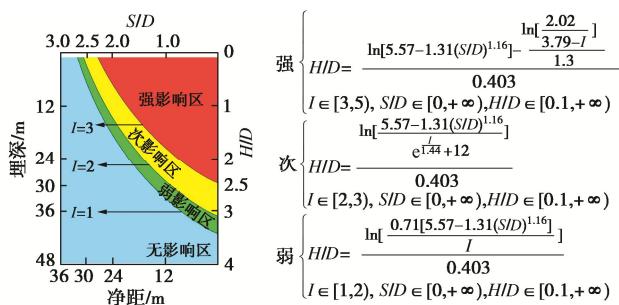


图 6 横向影响分区

Fig. 6 Lateral impact zoning

3.2 纵向影响分区

纵向近接影响表达式中, $\alpha_{z_1}, \alpha_{z_2}, \alpha_{z_3}, \alpha_{z_5}, \alpha_{z_6}, \alpha_8$ 为基准下的影响系数, 此时都为 1, 代入纵向近接影响判别表达式后还需对式 (11) 中的其他参数通过数值模拟的方法进行确定。

$$U_z = L \alpha_{z_4} \alpha_7 \quad . \quad (11)$$

建立三维模型, 宽 90 m, 纵深 80 m, 高 68.4 m。新建隧道埋深 4 m, 既有盾构管片直径 6 m, 既有隧道与新建隧道底板间距 0.97 m, 水平交角 68°。洞桩直径 1 m, 间距 1.8 m, 桩长为 13.3 m。本构模型参数及边界条件同 3.1 小节, 三维模型如图 7 所示。

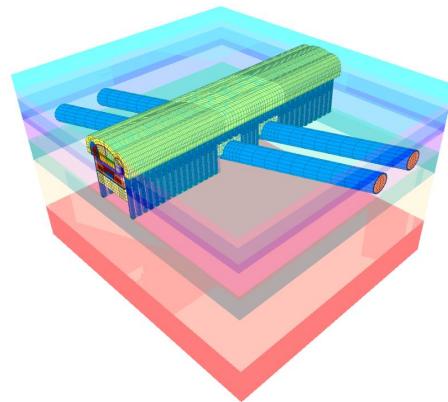


图 7 三维计算模型

Fig. 7 3D model

施工工序见 1.2 节, 记录掌子面 (这里以最迟开挖的掌子面为基准) 进尺与既有隧道拱顶隆起的变化关系, 见表 4 所示。当掌子面推进至 24 m 时, 既有隧道拱顶隆起值已超过 2 mm, 表明此时已经进入强影响区, 故不再推进计算。

表 4 既有隧道拱顶隆起值

Table 4 Crown uplift values of existing tunnel

掌子面进尺/m	拱顶隆起值/mm	掌子面进尺/m	拱顶隆起值/mm
3	0.20	15	0.94
6	0.32	18	1.35
9	0.47	21	1.99
12	0.67	24	2.83

由表 4 可知: 当掌子面开挖至 21 m 时, 以此位置为基准的既有隧道拱顶隆起值, $L=1.99$ mm; 以本文既有隧道埋深为基准, 此时有 $\alpha_{z_4}=1$; 根据计算结果, 图 8 为 $S=1D$ 时掌子面进尺与拱顶隆起值的回归曲线, 据此确定影响系数 α_7 。

同式 (5), (6) 推导方法可得掌子面进尺影响系数 α_7 的表达式:

$$\alpha_7 = 0.073 e^{0.1238J} \quad . \quad (12)$$

当 $J=21$ m 时, 有 $\alpha_7=1$, 此时可将公式调整为

$$\alpha_7 = 0.074 e^{0.124J} \quad . \quad (13)$$

将影响系数代入纵向近接影响判别表达式, 可得到拱顶隆起值 (U_z) 与掌子面进尺 (J) 的关系, 如下所示:

$$U_z = 0.148 e^{0.124J} \quad . \quad (14)$$

同横向分区推导过程, 将曲线 U_z 代入式 (11),

得到纵向影响分区表达式, 通过近接影响阈值划分纵向影响分区, 如图 9 所示。

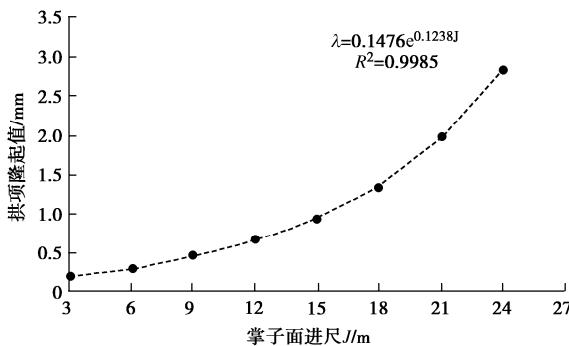


图 8 拱顶隆起值随掌子面进尺的拟合曲线

Fig. 8 Fitting curve of vault uplift value with advance of face

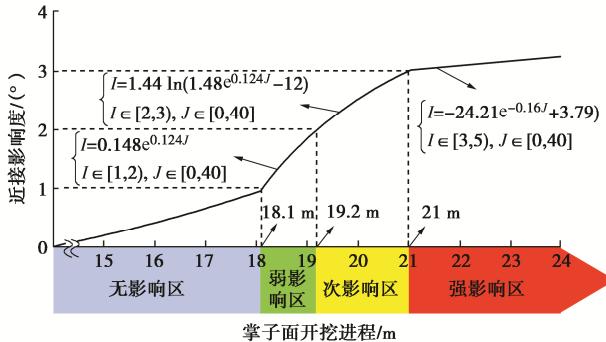


图 9 纵向影响分区

Fig. 9 Longitudinal impact zoning

3.3 三维影响分区及应对对策

通过横向、纵向影响分区, 可描绘基于既有隧道拱顶位移变化的三维影响分区, 如图 10 所示。

由图 10 可知, 三维影响分区以新建隧道为中心对称分布, 扰动影响范围近似椭圆体^[7-8], 扰动影响深度大于跨度。由三维影响分区可提出合理的对策、加固

措施。具体的分区应对对策及材料参数, 如表 5 所示。

(1) 强影响区需采取加固措施。强影响区范围内施作超前管幕^[15], 对既有隧道起到主动控制作用。底板浇筑完成后, 在管幕下方 3 m 范围内低压注浆, 稳固围岩。施工前后需提高监测频率、强化监测措施, 遇突发状况及时响应。

(2) 次影响区扰动影响较弱于强影响区, 故不再施作管幕措施, 仅对底板下方 3 m 范围内进行低压注浆, 稳固围岩。监测要求与强影响区相同。

(3) 弱影响区内理论上扰动影响较小, 故不再施作加固措施。但不表明在施工过程中无安全隐患, 同样需要加强监测。

(4) 无影响区内扰动影响微弱, 理论上认为不会对既有隧道造成影响, 可降低监测等级。

4 加固措施及其效果分析

通过数值仿真分析对提出的加固措施进行验证。设置两种工况, 工况 1 为无加固措施, 工况 2 为在强影响区内施作管幕及夹土低压注浆。考虑现场施工空间及经济成本, 对工况 2 进行优化。增设工况 3, 具体方案为在距离洞桩外 3 m 处, 施作高 6 m, 厚 0.6 m 的挡土墙, 挡土墙底部与既有隧道中心在同一水平, 挡土墙外部不再施作加固措施。3 种工况如图 11 所示。

本工程管幕加固措施与夹土注浆措施均施作于上部导洞施工完成后, 故可看作为 3 种工况措施下, 开挖下部土体对既有隧道的影响。以既有隧道南线为例, 提取拱顶位移变化与总体施工结束后不同工况措施下的施工影响控制效果, 见表 6 所示。

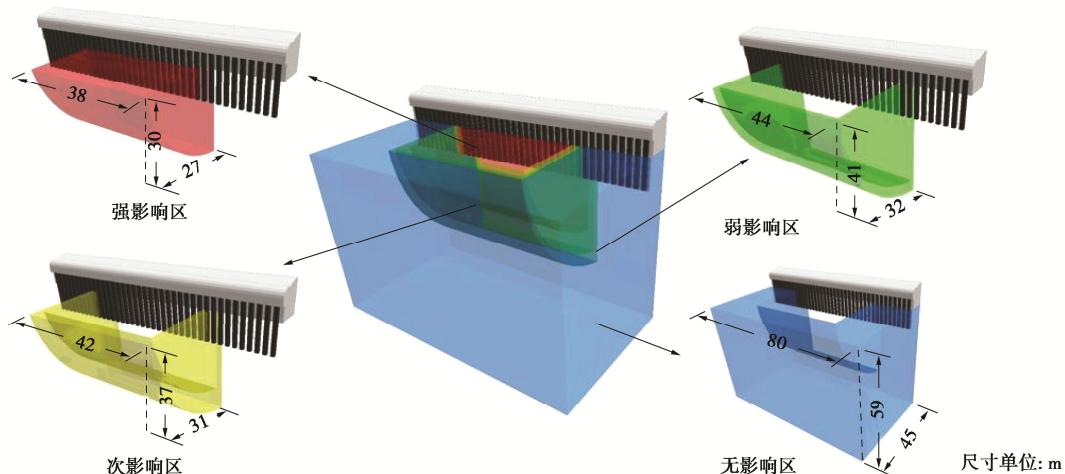


图 10 三维影响分区

Fig. 10 3D impact zoning

表 5 影响分区应对对策及加固材料参数
Table 5 Countermeasures and parameters of reinforcement materials affecting zoning

控制对策	影响分区类别				材料参数		
	强影响区	次影响区	弱影响区	无影响区	重度/(kN·m ⁻³)	变形模量/MPa	泊松比
管幕	√	—	—	—	78	175000	0.27
夹土注浆	√	√	—	—	21	100	0.30
加强监测	√	√	√	—	—	—	—
监测	√	√	√	√	—	—	—

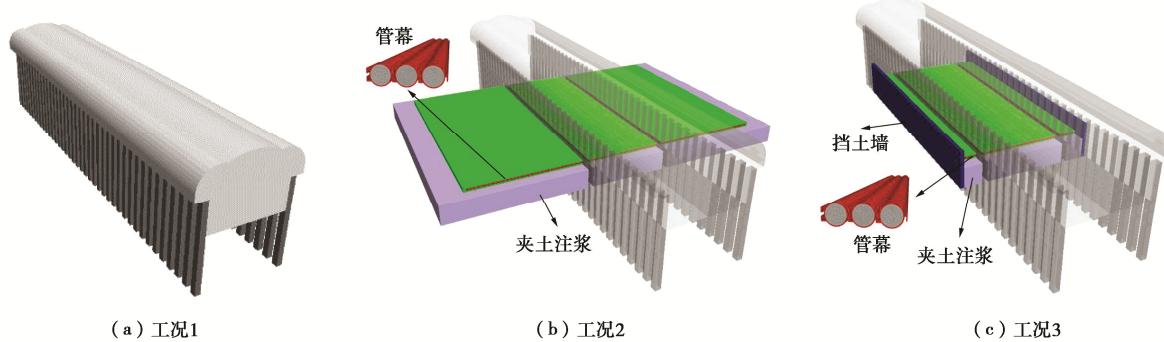


图 11 计算工况

Fig. 11 Working conditions

表 6 不同工况下的拱顶位移变化

Table 6 Variation of vault displacement under different working conditions

项目	单位: mm		
	工况 1	工况 2	工况 3
土体 I	3.88	1.23	1.32
土体 II	4.63	1.53	1.64
土体 III	5.98	1.83	1.91
控制效果	—	70%	68%

由表 6 可知:

(1) 在施作了加固措施后, 工况 2 与工况 3 均能有效地控制土体变形, 可观地降低了施工影响, 既有隧道拱顶变化均满足施工位移控制标准。

(2) 工况 2 虽然控制效果最好, 但考虑到现场施作空间与经济指标, 建议选取工况 3 (挡土墙优化加固措施) 作为现场加固施工方案。

5 现场应用及监测数据分析

5.1 现场加固措施

本工程包含多个不同等级风险源, 施工要求高, 施工工序复杂, 需提出关键加固措施以保证施工安全性。关键施工加固措施主要有: 超前管棚、超前管幕及夹土注浆等, 如图 12 所示。

(1) 暗挖区间在施工前于隧道拱部对向打设Φ108@400 大管棚并注浆, 开挖过程中于拱部 180° 范围打设 DN32@400 超前注浆小导管, 以控制施工对地层的扰动。

(2) 管幕加固措施于上部小导洞开挖完成后进行施工。管幕采用 D402, $t=16$ mm, 长 38.5 m 的无缝钢管, 管内填充水泥砂浆。管幕加固措施可起到阻隔施工对既有隧道扰动影响的作用。

(3) 底板浇筑完成后, 利用底板预留注浆管向既有隧道与新建隧道夹土范围内 (厚为 3 m) 进行低压 (0.2 MPa) 注浆, 提高夹土土层刚度。



图 12 现场关键施工加固措施

Fig. 12 Key construction reinforcement measures on site

5.2 现场监测布置

采用几何水准测量的方法, 使用 Trimble DINI03 电子水准仪 (精度为每公里往返测中误差为 0.3 mm) 对既有隧道拱顶位移变化进行观测。东侧邻近 19 号线暗挖区间段, 故东侧监测点设置较密与西侧, 具体的监测断面布置方式如图 13 所示。

5.3 监测数据分析

根据现场监测内容提取 S5 断面处的 SJC-05-01 监测点拱顶位移变化和工况 3 数值模拟的计算结果, 如图 14 所示。

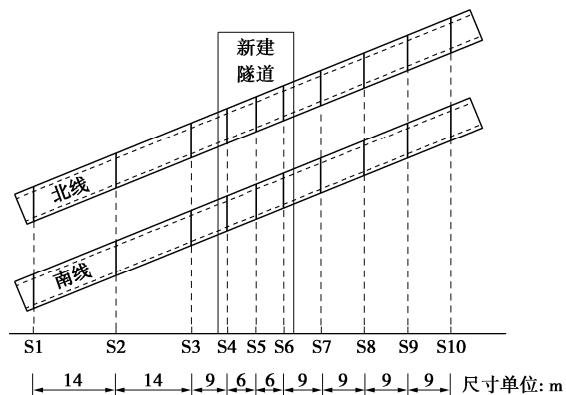


图 13 监测点设置

Fig. 13 Layout of monitoring points

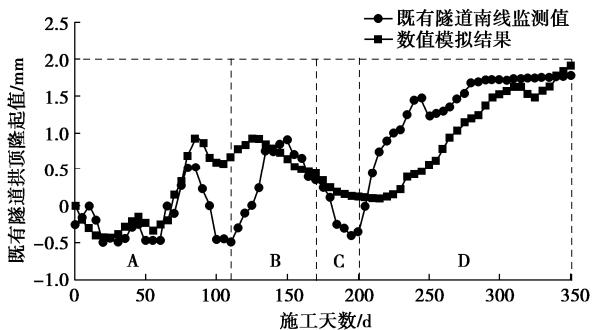


图 14 拱顶位移变化时程曲线

Fig. 14 Time-history curves of vault displacement

由图 14 可知：

(1) 数值模拟的计算结果与现场施工的扰动影响规律一致，最终的扰动影响在标准 2 mm 内，现场监测的结果验证了工况 3 的施工安全性。

(2) 施工内容划分 4 个施工阶段，A 阶段为上部导洞开挖过程中既有隧道拱顶的位移变化。由于超前措施的施作，数值模拟与现场结果在前段会有不同程度的沉降；开挖①④号导洞，施作柱和冠梁，开挖②③号导洞，初支间回填等施工步序期间既有隧道拱顶按序发生变形。

(3) B 阶段主要包含拆除小导洞初支、二衬扣拱，分别导致既有隧道拱顶的隆起和沉降。C 阶段为施作管幕阶段，既有隧道拱顶发生沉降。D 阶段为下部土体开挖施工阶段，直至施工结束，既有隧道拱顶隆起值大致以上升的趋势在变化，但未超过 2 mm，满足现场施工安全要求。

6 结 论

(1) 提出了横向、纵向近接影响判别表达式，并基于北京地铁新机场线超近接上跨既有 10 号线工程，对相关近接影响因素进行了确定。

(2) 依据近接影响度值域，推导了北京地铁新机场线超近接上跨既有 10 号线工程横向、纵向影响分区

表达式，确定了以既有隧道隆起值为判别准则的三维影响分区，提出了合适的分区对策。

(3) 考虑到现场施工施作空间及经济指标，对基于三维影响分区而制定的加固措施（工况 2）进行了优化（工况 3，挡土墙优化加固措施）。通过数值仿真对比分析可知，工况 2, 3 均满足施工安全要求，推荐选取工况 3 作为现场加固施工方案。

(4) 依托工程采用推荐的加固方案进行施工，现场监测与数值仿真对比分析可知，各施工阶段既有隧道拱顶位移变化施工影响规律一致，位移值均小于控制标准。这说明本文所提出的三维影响分区及加固措施可保障依托工程的施工安全性。

参 考 文 献：

- [1] 仇文革. 地下工程近接施工力学原理与对策的研究[D]. 成都：西南交通大学，2003. (QIU Wenge. Study on Mechanical Principles and Countermeasures of Proximity Construction of Underground Engineering[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003. (in Chinese))
- [2] 李凯梁. 新建隧道上穿工程对既有地铁隧道纵向隆起变形影响研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2017. (LI Kailiang. Study on the Influence of New Tunnel Crossing Project on the Longitudinal Uplift Deformation of Existing Metro Tunnel[D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2017. (in Chinese))
- [3] 郑余朝. 三孔并行盾构隧道近接施工的影响度研究[D]. 成都：西南交通大学，2007. (ZHENG Yuchao. Study on Influence Degree of Proximity Construction of Three Hole Parallel Shield Tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007. (in Chinese))
- [4] 王志杰, 李金宜, 蒋新政, 等. 浅埋偏压双侧近接隧道影响分区及对策研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(4): 1-11. (WANG Zhijie, LI Jinyi, JIANG Xinzheng, et al. Research on the impact zoning and construction countermeasures for bilateral adjacent tunnels with shallow depth and unsymmetrical load[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(4): 1-11. (in Chinese))
- [5] 易立. 城市新建隧道下穿既有道路影响分区研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(5): 1490-1497. (YI Li. Study on the influence zoning of the new urban tunnel under the existing road[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(5): 1490-1497. (in Chinese))
- [6] 袁竹, 陈勇, 王柱. 山区单线铁路隧道下穿高速公路隧道影响分区研究[J]. 隧道建设, 2016, 36(2): 164-169. (YUAN Zhu, CHEN Yong, WANG Zhu. Study on influence

- zoning of single-track railway tunnel under-passing expressway tunnel at mountainous areas[J]. Tunnel Construction, 2016, **36**(2): 164-169. (in Chinese))
- [7] 丁智, 吴云双, 张霄, 等. 软土盾构隧道近距离穿越既有地铁影响数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, **49**(3): 663-671. (DING Zhi, WU Yunshuang, ZHANG Xiao, et al. Numerical analysis of influence of shield tunnel in soft soil passing over existing nearby subway[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, **49**(3): 663-671. (in Chinese))
- [8] 王明年, 张晓军, 苟明中, 等. 盾构隧道掘进全过程三维模拟方法及重叠段近接分区研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(1): 273-279. (WANG Mingnian, ZHANG Xiaojun, GOU Mingzhong, et al. Method of three-dimensional simulation for shield tunneling process and study of adjacent partition of overlapped segment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(1): 273-279. (in Chinese))
- [9] 章慧健, 郭蕾, 郑余朝, 等. 城市隧道近接建筑物施工的影响与对策分析[J]. 铁道工程学报, 2016, **33**(4): 95-100. (ZHANG Huijian, GUO Lei, ZHENG Yuchao, et al. Influence and countermeasure analysis on urban tunneling near buildings[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, **33**(4): 95-100. (in Chinese))
- [10] 魏新江, 张默爆, 丁智, 等. 盾构穿越对既有地铁隧道影响研究现状与展望[J]. 岩土力学, 2020(增刊 2): 1-20. (WEI Xinjiang, ZHANG Moyao, DING Zhi, et al. Research status and Prospect of Shield Crossing impact on existing metro tunnels[J]. Geotechnical Mechanics, 2020(S2): 1-20. (in Chinese))
- [11] 付春青, 刘波. PBA 法非对称不均匀变形引起地表沉降规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, **17**(3): 927-942. (FU Chunqing, LIU Bo. Study on the law of surface subsidence caused by asymmetric and uneven deformation of PBA method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, **17**(3): 927-942. (in Chinese))
- [12] 杨子璇, 姚爱军, 张东, 等. 隧道密贴下穿既有地铁车站沉降控制研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, **16**(增刊 1): 442-449, 464. (YANG Zixuan, YAO Ajun, ZHANG Dong, et al. Study on settlement control of existing subway stations under closely pasted tunnels[J]. Journal of underground space and engineering, 2020, **16**(S1): 442-449, 464. (in Chinese))
- [13] 黄生根, 付卓, 吴军林. 洞桩法施工引起土体变形的规律研究[J]. 铁道工程学报, 2018, **35**(1): 11-16. (HUANG Shenggen, FU Zhuo, WU Junlin. Study of soil deformation caused by construction with PBA method[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, **35**(1): 11-16. (in Chinese))
- [14] 许永泰. 紧贴上跨地铁盾构隧道大断面暗挖减载及变形控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020. (XU Yongtai. Study on Load Reduction and Deformation Control of Large Section Concealed Excavation of Metro Shield Tunnel Close to the Upper Span[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese))
- [15] 孙文昊, 范东方, 胡威东, 等. 新建地下通道时下方地铁隧道保护方案研究[J]. 铁道工程学报, 2019, **36**(12): 86-91. (SUN Wenhao, FAN Dongfang, HU Weidong, et al. Research on the protection measures of the metro tunnels under the new underpass[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, **36**(12): 86-91. (in Chinese))