

# 大断面矩形换乘通道密贴下穿对既有地铁车站的力学响应分析\*

吴俊<sup>1,2,3</sup> 张加兵<sup>4</sup> 孙厚强<sup>2,3</sup> 杜禹<sup>2,3</sup> 滕立荣<sup>2,3</sup>

(1. 中国建筑集团有限公司, 100089, 北京; 2. 中建三局基础设施建设投资有限公司, 430073, 武汉;

3. 中国建筑第三工程局有限公司, 430064, 武汉; 4. 广西大学土木建筑工程学院, 530004, 南宁)

**摘要** [目的] 新建车站大断面矩形换乘通道密贴下穿既有城市轨道交通车站(以下简称“既有车站”)施工造成的扰动非常大,此类研究的文献较少,需要深入研究新建车站密贴下穿时对既有车站的变形及扰动情况。[方法] 在阐述传统随机介质理论及算法的基础上,提出了改进算法。以成都轨道交通金府换乘站为例,选取了相关工程计算参数,建立了该换乘站的三维数值仿真模型。分析了成都轨道交通 27 号线新建金府站换乘通道密贴下穿既有成都轨道交通 6 号线车站的力学响应。对实测值及仿真值进行对比,以验证改进算法及仿真模型的准确性,并进行了参数的敏感性分析。[结果及结论] 通过对比实测值和仿真值,验证了所提改进算法及仿真模型的可行性。受支护桩的约束,既有车站的结构底板出现了弯矩“凹槽”现象。随着新建换乘通道与既有车站间净距的增加,结构底板最不利部位会向隧道中心线外侧偏移。随着地基反力系数的增大,土体和既有车站相互作用增强,既有车站结构底板的变形、弯矩和剪力均显著增大。

**关键词** 城市轨道交通; 车站邻近施工; 大断面矩形通道; 力学响应

中图分类号 U455.43;U231.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.20245730

## Mechanical Response Analysis of Existing Metro Stations Caused by Large-section Rectangular Interchange Passage Closely Underpassing

WU Jun<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Jiabing<sup>4</sup>, SUN Houqiang<sup>2,3</sup>, DU Yu<sup>2,3</sup>, TENG Lirong<sup>2,3</sup>

(1. China State Construction Engineering Co., Ltd, 100089, Beijing, China; 2. Infrastructure Construction Investment Co., Ltd., China Construction Third Engineering Bureau Co., Ltd., 430073, Wuhan, China; 3. China Construction Third Engineering Bureau Co., Ltd., 430064, Wuhan, China; 4. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, 530004, Nanning, China)

\* 国家自然科学基金项目(52108367)

**Abstract** [Objective] The construction disturbance caused by newly built stations with large-section rectangular interchange passage closely under-passing existing urban rail transit stations (hereinafter referred to as 'existing stations') is significant, and there is a lack of relevant research on this topic. It is necessary to investigate the deformation and disturbance situation on the existing station caused by the newly built station closely under-passing. [Method] Based on the theory of conventional random media and its algorithm, an improved algorithm is proposed. Taking Jinfu Interchange Station of Chengdu Rail Transit as an example, relevant engineering calculation parameters are selected, and a three-dimensional numerical simulation model for the interchange station is established. The mechanical response of Chengdu Rail Transit Line 27 newly built Jinfu Station interchange passage closely under-passing existing Line 6 station is analyzed. The precision of improved algorithm and simulation model is verified through measured and simulated value comparison, and a sensitivity analysis of parameters is carried out. [Result & Conclusion] Through comparing measured and simulated values, the feasibility of the improved algorithm and simulation model mentioned above is verified. Constrained by the supporting piles, a bending moment or 'groove' phenomenon appears on the structural base plate at the existing station. Additionally, with the increase of net spacing between the new interchange passage and the existing station, the most unfavorable part on the structural base plate shifts outward from the tunnel centerline. As the foundation reaction coefficient increases, the interaction between soil and the existing station intensifies, resulting in significant deformation, bending moment, and shear force on the structural base plate of existing station.

**Key words** urban rail transit; station adjacent construction; large-section rectangular passage; mechanical response

密贴下穿区段施工相较于其他施工方式更易导致既有结构的沉降和倾斜,甚至可能发生结构倾覆,存在极大的安全隐患。因此,保证新建城市轨道交通车站(以下简称“新建车站”)密贴下穿过程中既有结构的稳定性和安全性,是城市轨道交通项目施工过程中必须解决的关键问题。

目前,已有较多学者通过理论计算、现场监测、数值模拟等方法,对新建隧道下穿施工引起既有地下结构的影响开展了大量研究<sup>[1-8]</sup>。上述研究主要针对新建城市轨道交通隧道下穿既有结构的情况,而新建车站大断面矩形换乘通道密贴下穿既有城市轨道交通车站(以下简称“既有车站”)施工造成的扰动远大于上述工程施工造成的扰动,因此,明确新建车站密贴下穿时对既有车站的变形及扰动情况非常重要。基于此,本文依托成都轨道交通27号线(以下简称“27号线”)的施工实践,基于两阶段法,对新建车站换乘通道密贴下穿施工诱发既有车站的结构变形进行理论计算,并采用三维数值计算方法对既有车站结构的变形特征进行分析,以期揭示新建车站换乘通道密贴下穿既有车站的结构变形特征。

## 1 理论计算

### 1.1 既有车站顶板土层沉降计算

#### 1.1.1 随机介质理论

随机介质理论是将隧道开挖引起的地层变形视为无数个小块体开挖引起地层变形的总和。设隧道水平方向为 $x$ 向,垂直隧道的方向为 $y$ 向,竖向下方向为 $z$ 向。以开挖单元中心为坐标原点,设某个无限小的单元体的长、宽、高分别为 $dx$ 、 $dy$ 、 $dz$ ,该单元体开挖引起地层中任意一点 $(x, y, z)$ 的沉降为 $W_e(x, y, z)$ 。 $W_e(x, y, z)$ 的计算式为:

$$W_e(x, y, z) = \frac{1}{r(z)} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{r^2(z)}(x^2 + y^2)\right] dx dy dz \quad (1)$$

$$r(z) = \frac{z_0}{\tan \beta} \quad (2)$$

$$\tan \beta = \frac{20^\circ}{50^\circ - \varphi} \quad (3)$$

式中:

$r(z)$ ——开挖时 $z$ 向的影响半径;

$z_0$ ——该单元体的轴线埋深;

$\beta$ ——地层影响角;

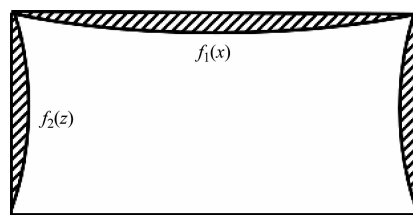
$\varphi$ ——内摩擦角。

在隧道开挖过程中,沿隧道中心线方向的应变为0,因此可视为平面应变问题。设 $\xi$ 为非均布荷载的 $x$ 向坐标; $\eta$ 为垂直方向的影响参数; $\tau$ 为隧道轴线上的开挖距离; $\Omega$ 为积分区域,即土层沉降的空间范围。将式(1)沿 $y$ 向无穷区间积分,可得:

$$W_e(\tau, \xi) = \iint_{\Omega} \frac{\tan \beta}{\eta} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{\eta^2}(\xi - \tau)^2\right] d\tau d\eta \quad (4)$$

#### 1.1.2 矩形隧道断面积分界限的确定

进行地层位移计算时,假定隧道底部的变形为0,并基于此假定建立矩形断面收敛模型,如图1所示。



注: $f_1(x)$ —隧道断面变形后 $x$ 向的积分上限; $f_2(z)$ —隧道断面变形后 $z$ 向的积分上限。

图1 本文推导收敛模型

Fig. 1 Convergence model derived in this study

为了对比仿真模型中矩形隧道开挖后断面变形特征与实际施工变形的差异,采用数值模拟分析法来验证开挖后矩形断面的收敛变形情况,其结果如图2所示。由图2可知:模拟得到的收敛结果与文献[9]分析得到的不均匀收敛结果有所不同,本次模拟得到的矩形断面边界为曲线而非平直线,显然曲线的断面边界更为合理。

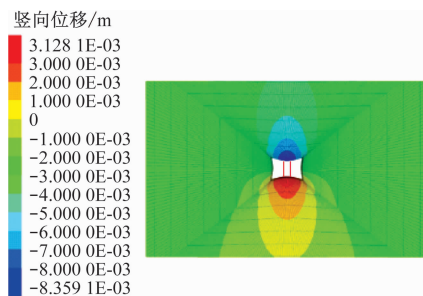


图2 数值模拟矩形隧道断面的收敛情况

Fig. 2 Convergence situation of rectangular tunnel section by numerical simulation

以开挖隧道未收敛断面上部中点作为坐标原点,对断面收敛曲线进行 Gauss 拟合,可得 $f_1(x)$ 、 $f_2(z)$ ,因此,任意地层处沉降 $W_e(x, z)$ 的计算式为:

$$W_e(x, z) = \int_a^b \int_c^j \frac{\tan \beta}{\eta - z} \exp \left[ -\frac{\pi \tan^2 \beta}{(\eta - z)^2} (x - \xi)^2 \right] d\xi d\eta - \int_e^f \int_g^h \frac{\tan \beta}{\eta - z} \exp \left[ -\frac{\pi \tan^2 \beta}{(\eta - z)^2} (x - \xi)^2 \right] d\xi d\eta \quad (5)$$

式中:

$a$ 、 $b$ ——隧道断面收敛前  $z$  向的积分下限、上限;

$c$ 、 $j$ ——隧道断面收敛前  $x$  向的积分下限、上限;

$e$ 、 $f$ ——隧道断面收敛后  $z$  向的积分下限、上限;

$g$ 、 $h$ ——隧道断面收敛后  $x$  向的积分下限、上限。

因式(5)中被积函数都不存在原函数,本研究借鉴文献[10]针对圆形隧道对随机介质理论进行改进。由于隧道断面收敛值相对隧道开挖面的宽度和高度很小,因此收敛值之间的乘积可忽略不计,本文将随机介质理论的解进行简化,可得:

$$W_e(x, z) = AD_{kwm} \frac{\tan \beta}{H - z} \exp \left[ -\frac{\pi \tan^2 \beta}{(H - z)^2} x^2 \right] - (D_{kwm} - 2u_2)(A - u_1) \frac{\tan \beta}{H - z} \exp \left[ -\frac{\pi \tan^2 \beta}{(H - z)^2} x^2 \right] \quad (6)$$

式中:

$A$ ——开挖面的高度,单位 m;

$D_{kwm}$ ——开挖面的宽度,单位 m;

$H$ ——隧道中心点的埋深,单位 m;

$$w(x, \xi) = \begin{cases} \frac{q(\xi) D_{jym}}{2K_{EI} \lambda_1 \lambda_2 (\lambda_2^2 - \lambda_1^2)} (\lambda_2 e^{-\lambda_1 |x - \xi|} - \lambda_1 e^{-\lambda_2 |x - \xi|}), \Delta > 0 \\ \frac{q(\xi) D_{jym}}{4K_{EI} \lambda_1^3} (1 + \lambda_1 |x - \xi|) e^{-\lambda_1 |x - \xi|}, \Delta = 0 \\ \frac{q(\xi) D_{jym}}{4K_{EI} \lambda_1 \lambda_2 (\lambda_2^2 + \lambda_1^2)} e^{-\lambda_1 |x - \xi|} (\lambda_2 \cos \lambda_2 |x - \xi| + \lambda_1 \sin \lambda_2 |x - \xi|), \Delta < 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \lambda_1 = \sqrt{\frac{GD_{jym} + \sqrt{\Delta}}{2K_{EI}}}, \lambda_2 = \sqrt{\frac{GD_{jym} - \sqrt{\Delta}}{2K_{EI}}}, \Delta > 0 \\ \lambda_1 = \sqrt{\frac{GD_{jym}}{2K_{EI}}}, \Delta = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \lambda_1 = \sqrt{\sqrt{\frac{kD_{jym}}{4K_{EI}}} + \frac{GD_{jym}}{4K_{EI}}}, \lambda_2 = \sqrt{\sqrt{\frac{kD_{jym}}{4K_{EI}}} - \frac{GD_{jym}}{4K_{EI}}}, \Delta < 0 \\ \Delta = (GD_{jym})^2 - 4DK_{EI} \end{cases} \quad (10)$$

式中:

$w(x, \xi)$ ——既有结构  $x$  向受力侧的挠度;

$q(\xi)$ ——非均布荷载,单位  $\text{kN/m}^2$ ;

$u_1$ 、 $u_2$ ——断面在垂直方向、水平方向的收敛。

## 1.2 既有车站力学响应计算

本文采用 Pasternak 地基模型对既有结构沉降进行计算,计算假定如下:① 新建隧道和既有隧道均为连续线弹性体材料;② 既有隧道与周围土体密切接触;③ 新建隧道和既有隧道的支护结构均可视为线弹性体。

基于 Pasternak 地基模型,对梁的微元段列平衡方程,可得:

$$K_{EI} \frac{d^4 w(x)}{dx^4} - GD_{jym} \frac{d^2 w(x)}{dx^2} + kD_{jym} W(x) = kD_{jym} u(x) \quad (7)$$

式中:

$K_{EI}$ ——既有结构等效抗弯刚度,单位  $\text{Nm}^2$ ;

$G$ ——既有结构下部的地层剪切模量,单位  $\text{N/m}^2$ ;

$k$ ——等效基床系数;

$D_{jym}$ ——既有结构断面的宽度;

$W(x)$ ——既有结构在位置  $x$  处的沉降,单位 mm;

$u(x)$ ——土体在位置  $x$  处的沉降,单位 mm。

为求式(7),令  $kD_{jym} u(x) = 0$ ,求齐次方程通解,再结合边界条件和参数的物理意义求得既有结构挠度曲线。

基于式(7)齐次方程的边界条件,推导出非均布荷载下既有结构位移,可得如下解:

上述式(4)和式(5)积分可通过 Matlab 软件来

进行求解。对于无限长的梁,可通过对式(8)在 $(-\infty, +\infty)$ 积分,即可求得任意均布荷载下弹性梁挠度 $W(x)$ 的方程为:

$$W(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} w(x, \xi) d\xi \quad (11)$$

对挠度进行求导,可进一步得到该弹性梁在 $x$ 向的弯矩 $M(x)$ 及剪力 $Q(x)$ :

$$M(x) = -K_{EI} w''(x) \quad (12)$$

$$Q(x) = -K_{EI} w'''(x) \quad (13)$$

## 2 工程实例

### 2.1 工程概况

金府站为新建27号线与既有成都轨道交通6号线(以下简称“6号线”)的换乘车站,新建的换乘通道密贴下穿既有6号线车站,如图3所示。图3中:实线为既有车站结构,虚线为新建结构。

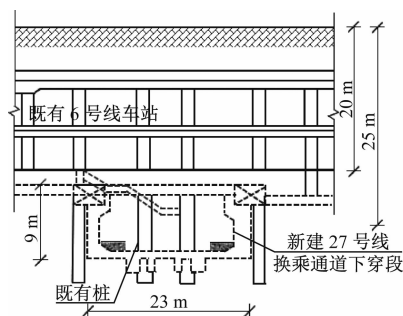


图3 金府站的工程纵断面图

Fig. 3 Profile of Jinfu Station engineering longitudinal section

该站的换乘通道为平顶直墙大断面矩形隧道,隧道截面的宽度为23 m,高度为9 m,隧道埋深为25 m。既有6号线金府站为岛式车站,采用单柱双跨地下二层现浇框架结构,车站总长度为311.3 m,标准段宽度为20.0 m,车站主体基坑深度为20.26~21.90 m,车站覆土厚度约为5.3 m。根据资料,金府换乘站场地内主要为杂填土、黏土和砂卵石地层,各地层的主要技术参数如表1所示。地下水类型主要为孔隙型潜水,地表水与地下水之间的水力联系较弱,地下水位埋深为5.50~7.30 m。

### 2.2 既有车站结构沉降理论计算

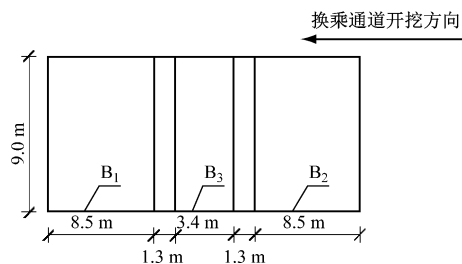
金府换乘站换乘通道纵断面如图4所示。图4中,既有车站的结构断面为矩形,既有桩(视为不开

挖)直径为1.30 m,  $B_1$ 、 $B_2$  的开挖宽度均为8.50 m,  $B_3$  的开挖宽度为3.4 m。采用台阶法开挖,地层损失率为0.46%。与开挖尺寸相比,箱梁可视为无限长,其断面高度为14.86 m,宽度为20.00 m,结构底板埋深为20.00 m,中轴线埋深为12.20 m,顶板处埋深为5.14 m。据地质勘察报告,  $k = 3 \times 10^7$  Pa/m,各土层内摩擦角加权平均值为 $31^\circ$ ,由式(3)可得 $\tan \beta = 1.05$ 。侧压力系数取0.45,根据既有结构的混凝土强度和截面尺寸,等效刚度 $K_{EI}$ 取 $8.3 \times 10^{13}$  Nm<sup>2</sup>。

表1 金府换乘站各地层的主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of each stratum at Jinfu Interchange Station

土层	厚度/ m	重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	压缩模量/ MPa	黏聚力/ (kN/m <sup>2</sup> )	内摩擦 角/(°)	泊松比
杂填土	1.3	18.0	11.25	7	10	0.40
粉质黏土	2.6	18.5	15.30	20	15	0.35
松散卵石	5.6	20.0	28.00	0	25	0.32
稍密卵石	9.1	21.0	31.00	0	30	0.31
中密卵石	6.8	22.0	33.00	0	35	0.30
密实卵石	34.6	23.0	35.00	0	40	0.29
各层的加 权平均值	60.0	21.0	33.70	0	31	0.30



注:  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ —换乘通道开挖的3个部分。

图4 金府换乘站换乘通道纵断面

Fig. 4 Longitudinal section of Jinfu Interchange Station interchange passage

开挖 $B_1$ 、 $B_2$ 时,只考虑一侧产生的 $u_2$ ,支护桩不产生收敛。开挖 $B_3$ 时,不考虑两侧产生收敛,只考虑上部的 $u_1$ 。根据式(6)以及案例工程的相关参数,可得到既有车站结构中轴线埋深处地层沉降的计算式为:

$$\begin{aligned}
 u(x) &= W_1(x-a, H_0) + W_2(x+a, H_0) + W_3(x, H_0) \\
 &= (D_{B1}u_{11} + Au_{21}) \frac{\tan \beta}{H-H_0} + \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{(H-H_0)^2}(x-C_0)^2\right] + (D_{B2}u_{12} + Au_{22}) \frac{\tan \beta}{H-H_0} + \\
 &\quad \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{(H-H_0)^2}(x+C_0)^2\right] + D_{B3}u_{13} \frac{\tan \beta}{H-H_0} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{(H-H_0)^2}x^2\right] \quad (14)
 \end{aligned}$$



注:

$a$ —— $B_1$ 、 $B_2$  中心线与既有车站中心线的水平距离,  $a = 7.25$  m;

$H_0$ ——既有车站结构底板埋深,  $H_0 = 20$  m;

$C_0$ ——支护桩与土体相互作用引起的隧道偏移量,  $C_0 = 7.40$  m;

$W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ ——开挖  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  引起的既有车站中心线的沉降, 单位 mm;

$u_{11}$ 、 $u_{12}$ 、 $u_{13}$ —— $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  上部收敛, 单位 mm;

$u_{21}$ —— $B_1$  左侧收敛, 单位 mm;

$u_{22}$ —— $B_2$  右侧收敛, 单位 mm;

$D_{B1}$ 、 $D_{B2}$ 、 $D_{B3}$ —— $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  开挖宽度, 单位 m。

根据工程参数, 可知  $\Delta < 0$ , 结合式 (8) 和式 (10), 可得到既有车站结构沉降的计算式为:

$$w(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} w(x, \xi) d\xi = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ \frac{q(\xi)D}{4K_{El}\lambda_1\lambda_2(\lambda_2^2 + \lambda_1^2)} \cdot e^{-\lambda_1|x-\xi|} (\lambda_2 \cos(\lambda_2|x-\xi|) + \lambda_1 \sin(\lambda_2|x-\xi|)) \right] d\xi \quad (15)$$

根据工程参数可知  $\lambda_1 = 0.0367$ ,  $\lambda_2 = 0.0366$ 。同理, 根据式 (14) 和式 (15) 可求得换乘通道中心线处的弯矩和剪力。

### 2.3 既有车站结构数值模拟计算

采用有限差分软件建立金府换乘站的三维数值仿真模型, 如图 5 所示。计算时假定围岩为连续介质, 土体、既有车站均采用实体单元模拟, 结构桩采用桩单元模拟。围岩开挖过程中考虑了塑性变形, 有限元接触模型采用摩尔-库伦模型; 车站结构、衬砌结构仅考虑弹性变形, 采用线弹性本构模型。根据地质勘察报告及工程经验, 参照表 1 对土层参数进行综合取值。为对比理论计算结果与数值模拟结果, 根据土层厚度并结合砂卵石地层特点, 土体的计算参数均采用加权平均值。车站结构采用 C35 钢筋混凝土, 结构桩采用 C30 钢筋混凝土。基于文献 [11], 仿真模型选取的材料参数如表 2 所示。

### 2.4 仿真结果分析与对比

基于传统算法及本文的改进算法, 得到既有车站结构底板沉降实测值与仿真值的对比情况, 如图 6 所示。由图 6 可知: 既有车站结构底板沉降的影响范围为换乘通道中心线左右 100 m, 该范围约为开挖宽度的 5 倍。与传统算法相比, 本文的改进算法更为简便和精确, 更加贴近实测值, 实测值与仿

真值间的最大误差仅为 0.20 mm。由此可认为, 基于本文改进算法的计算结果能较好地反映既有车站的结构沉降特征。

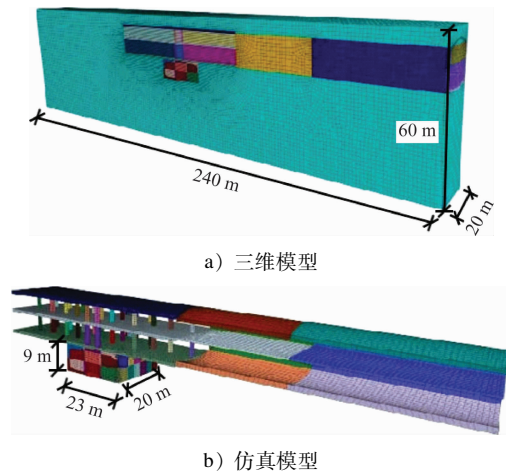


图 5 金府换乘站的三维数值仿真模型

Fig. 5 3D numerical simulation model of Jinfu Interchange Station

表 2 仿真模型选取的材料参数

Tab. 2 Material parameters selected for simulation model

结构部位	重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量/ MPa	厚度/m	泊松比
柱	27	$3.15 \times 10^4$		0.15
结构底板	25	$3.15 \times 10^4$	1.2	0.15
中、上层板	25	$3.00 \times 10^4$	1.0	0.15
梁	25	$3.15 \times 10^4$		0.15

注: 各结构部位的本构模型均为弹性; 梁材料的横截面积为  $1.0 \text{ m}^2$ , 惯性矩为  $0.0833 \text{ m}^4$ 。

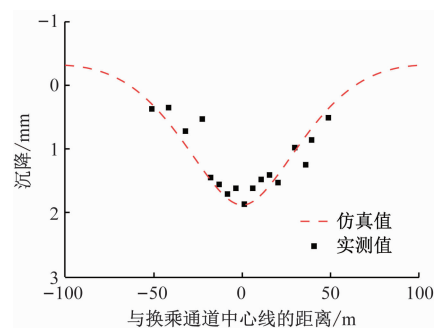


图 6 既有车站结构底板沉降实测值与仿真值的对比

Fig. 6 Comparison of measured and simulated values of existing station structural base slab settlement

图 7 为基于本文改进算法得到的既有车站结构底板纵向弯矩。由图 7 可知: 既有车站结构底板纵向弯矩呈“中间凸、两边凹”的变化趋势, 结构底板最不利位置位于距换乘通道中心线左右各 7.25 m

处及左右各 45.00 m 处。这是由于既有车站底部支护桩的存在,改变了既有车站结构底板的受力特性,使得结构底板最大纵向弯矩从中心线向两侧偏移,进而出现弯矩“凹槽”现象。

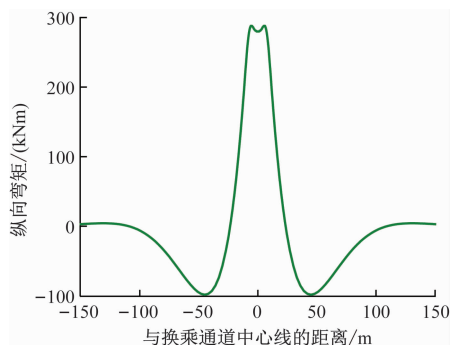


图7 既有车站结构底板纵向弯矩仿真值

Fig. 7 Longitudinal moment simulation values of existing station structural base slab

图8为基于本文改进算法得到的既有车站结构底板纵向剪力。由图8可知:既有车站结构底板的纵向最大剪力发生在距换乘通道中心线左、右各 11.50 m 位置处。既有车站结构底板在这 2 个位置处容易发生错台剪切等破坏,在设计和施工时应采取相应的保护措施。

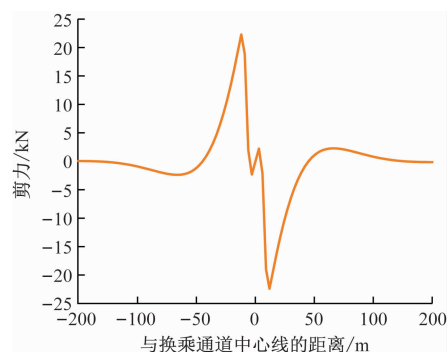


图8 既有车站结构底板纵向剪力仿真值

Fig. 8 Longitudinal shear force simulation values of existing station structural base slab

综上所述,本文提出的改进算法及建立的仿真模型,对分析既有车站的力学响应而言是可行的,可进一步开展既有车站力学响应特征研究。

### 3 参数敏感性分析

新建换乘通道与既有车站间的净距  $L$  决定施加在既有车站上位移荷载的大小。设  $h_{td}$  为换乘通道的高度。此外,地基反力系数  $\varepsilon$  也是反映既有车站与土体相互作用的关键参数。因此,对  $h_{td}$  和  $\varepsilon$  进行进一步分析。

图9为  $L$  不同倍数下既有车站结构底板的沉降曲线仿真值。由图9可知:随着  $L$  增加,既有结构底板沉降变小;当  $L$  较小(即  $L \leq 2h_{td}$ )时,由于夹层土厚度较小,无法有效形成土拱结构,同时由于埋深增大,换乘通道上方土体自重增加,换乘通道开挖面收敛面积增大,地层损失率增加;当  $L$  较大(即  $L > 2h_{td}$ )时,换乘通道和既有车站夹层土厚度增大,形成土拱结构,进而增加了既有车站的稳定性,此时既有车站沉降迅速减小。

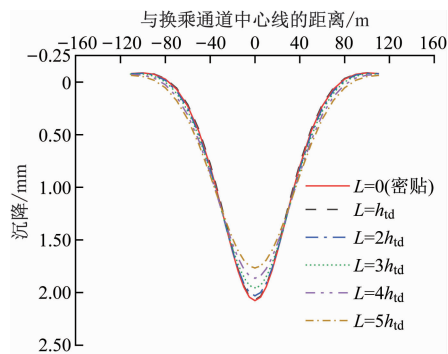


图9  $L$  不同倍数下既有车站结构底板沉降曲线仿真值

Fig. 9 Simulated values of existing station structural base slab settlement curves at different multiples of  $L$

图10为  $\varepsilon$  不同倍数下既有车站结构底板的沉降曲线仿真值。由图10可知:随着  $\varepsilon$  的增加,既有车站结构底板与地基之间的相互作用逐渐增强,车站结构底板位移的影响范围逐渐减小,沉降逐渐增大,沉降的最大值为 3.4 mm;随着  $\varepsilon$  的增加,结构底板沉降曲线形态从“浅而宽”向“深而窄”转变。

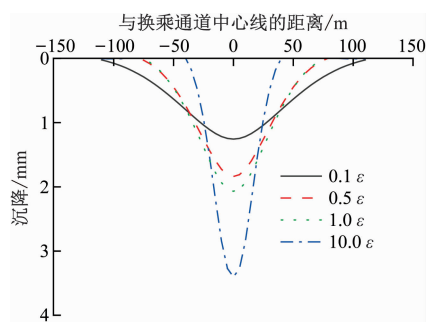


图10  $\varepsilon$  不同倍数下既有车站结构底板沉降曲线仿真值

Fig. 10 Simulated values of existing station structural base slab settlement curves at different multiples of  $\varepsilon$

### 4 结语

1) 矩形隧道断面开挖后会产生不均匀收敛,其边界为非线性曲线。对此,本文提出的改进算法较传统算法更贴合实际情况。通过对比实测值和仿

真值,验证了本文所提改进算法的可行性。

2) 既有车站结构底板纵向弯矩呈“中间凸、两边凹”的变化趋势,支护桩的约束使得开挖中心结构底板出现弯矩“凹槽”现象。最不利剪切面出现在距离隧道中心线左右各 11.5 m 处。

3) 随着  $L$  的增加,结构底板最不利部位会向隧道中心线两侧偏移。当  $L > 2h_{td}$  时,有利于形成土拱效应,减小上部既有车站的变形;随着  $\varepsilon$  的增大,土体和既有车站相互作用增强,既有车站结构底板的变形、弯矩和剪力均显著增大。

## 参考文献

- [1] LIU X, FANG Q, ZHANG D, et al. Behaviour of existing tunnel due to new tunnel construction below [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 110: 71.
- [2] 王秀英, 雷可, 王滕, 等. 洞桩法车站下穿既有管线工程的沉降预测[J]. 土木工程学报, 2021, 54(增刊1): 65. WANG Xiuying, LEI Ke, WANG Teng, et al. Settlement prediction of tunnel pile method station under existing pipeline project [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(S1): 65.
- [3] 可文海, 管凌霄, 刘东海, 等. 盾构隧道下穿管道施工引起的管-土相互作用研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(1): 221. KE Wenhai, GUAN Lingxiao, LIU Donghai, et al. Research on upper pipeline-soil interaction induced by shield tunnelling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(1): 221.
- [4] 刘波, 杨伟红, 张功, 等. 基于隧道不均匀变形的地表沉降随机介质理论预测模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(8): 1943. LIU Bo, YANG Weihong, ZHANG Gong, et al. A prediction model based on stochastic medium theory for ground surface settlement induced by non-uniform tunnel deformation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(8): 1943.
- [5] 杨三资. 暗挖隧道下穿既有地下结构的力学响应及过程控制 [D]. 北京: 北京交通大学, 2016. YANG Sanzi. Mechanical response and process control of underground tunnel under existing underground structure [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [6] 李晔. 富水砂层中地铁盾构隧道下穿既有铁路病害桥施工的风险分析及控制措施[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(11): 122. LI Ye. Risk analysis and control measures for shield tunneling of metro crossing under existing railway diseased bridges in rich water sand strata [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(11): 122.
- [7] 刘士海, 贺美德, 刘继尧. 新建隧道斜交下穿既有盾构隧道的变形分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(1): 263. LIU Shihai, HE Meide, LIU Jiyao. Deformation analysis on the existing shield tunnel obliquely crossed by new tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(1): 263.
- [8] 徐强, 朱永全, 雷升祥, 等. 隧道下穿施工引起既有隧道及地层变形预测的改进随机介质理论模型[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(2): 301. XU Qiang, ZHU Yongquan, LEI Shengxiang, et al. Improved stochastic medium theoretical model for predicting deformation of existing tunnels and strata caused by excavation of new under-crossing tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(2): 301.
- [9] 韩焯, 李宁. 隧道开挖不均匀收敛引起地层位移的预测模型[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 347. HAN Xuan, LI Ning. A predicting model for ground movement induced by non-uniform convergence of tunnel [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(3): 347.
- [10] 张丙强, 刘海, 罗才松. 新建隧道下穿施工引起既有铁路轨道变形的理论计算模型[J]. 铁道学报, 2023, 45(10): 105. ZHANG Bingqiang, LIU Hai, LUO Caisong. Analytical model for rail deflection of ballasted railway caused by tunnelling underneath [J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(10): 105.
- [11] 班勇婷, 周俊宏, 郦亮, 等. 类矩形盾构隧道无立柱衬砌结构力学性能模型研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(12): 56. BAN Yongting, ZHOU Junhong, LI Liang, et al. Analysis and research on mechanical performance model of pillarless lining structure for quasi-rectangular shield tunnel [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(12): 56.
- [12] 郦亮, 吴奕环, 周俊宏, 等. 类矩形盾构隧道无立柱衬砌结构受力性能足尺试验[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(12): 62. LI Liang, WU Yihuan, ZHOU Junhong, et al. Full-scale test on structural mechanical performance of pillarless lining for quasi-rectangular shield tunnel [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(12): 62.
- [13] 张中安, 潘野, 郭振坤, 等. 基于既有盾构隧道区间暗挖施工的城市轨道交通车站结构力学行为研究[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(8): 129. ZHANG Zhongan, PAN Ye, GUO Zhenkun, et al. Mechanical behavior of urban rail transit station structure based on existing shield tunnel interval underground excavation construction [J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(8): 129.
- [14] 程敏杰. 成都膨胀土地层大型地铁车站施工方法及力学特征研究[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(8): 155. CHENG Minjie. Construction methods and mechanical characteristics of large metro stations in expansive soil layers in Chengdu [J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(8): 155.

· 收稿日期:2024-09-28 修回日期:2024-11-23 出版日期:2025-07-10  
Received:2024-09-28 Revised:2024-11-23 Published:2025-07-10  
· 第一作者:吴俊,高级工程师, wujun\_bjtu@163.com  
通信作者:张加兵,副教授, zhang.j.b@gxu.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