

# 城市轨道交通暗挖洞桩法车站拱顶矢跨比 对钢管桩受力和地面沉降的影响分析

王阿龙<sup>1</sup> 李现朋<sup>1</sup> 卢鉴钧<sup>2</sup>

(1. 中国中铁隧道股份有限公司, 450003, 郑州; 2. 广东工业大学土木与交通工程学院, 510006, 广州)

**摘要** [目的] 拱顶矢跨比影响着城市轨道交通暗挖洞桩法车站的建筑高度, 以及车站设计的合理性和施工的安全性, 需对拱顶矢跨比对钢管桩的受力以及地面沉降的影响进行研究。[方法] 构建城市轨道交通车站拱顶结构力学模型, 分析不同拱顶矢跨比下的结构内力。通过数值模拟分析软件建立车站-地层三维数值模型, 结合地面沉降数值模拟值和现场监测值进行对比分析, 论证模型的合理性。同时研究了暗挖洞桩法施工时钢管桩的力学特性, 以及其对地面沉降的影响。[结果及结论] 拱顶矢跨比从 0.20 到 0.40 变化时, 拱顶结构的最大弯矩、最大轴力及最大剪力均呈递减趋势, 钢管桩的最大轴力呈先减少后增大的趋势; 当拱顶矢跨比为 0.30 时, 中桩轴力为最小; 随着拱顶矢跨比的增大, 地面沉降呈先减少后增大的趋势, 地面沉降控制最优的拱顶矢跨比为 0.30, 比拱顶矢跨比为 0.20 时减少了 34%。导洞施工和扣拱施工是地面产生沉降最明显的两个阶段, 合理的拱顶矢跨比会提高导洞施工和扣拱施工阶段地面沉降量的占比, 进而减弱后续车站主体结构土体开挖对土层的扰动。

**关键词** 城市轨道交通; 车站; 暗挖洞桩法; 钢管桩受力; 地面沉降; 拱顶矢跨比

中图分类号 U456.3<sup>+</sup>1:U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.08.024

## Impact Analysis of Arch Vault Rise-span Ratio on Steel Pipe Pile Stress and Land Subsidence in Urban Rail Transit Covered PBA Method Stations

WANG Along<sup>1</sup>, LI Xianpeng<sup>1</sup>, LU Jianjun<sup>2</sup>

(1. China Railway Tunnel Stock Co., Ltd., 450003, Zhengzhou, China; 2. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, 510006, Guangdong, China)

**Abstract** [Objective] The arch vault rise-span ratio not only affects the building height, design rationality, and construction safety of covered PBA (pile-beam-arch) method urban rail transit stations. Therefore, it is necessary to study the impact of arch vault rise-span ratio on the stress of steel pipe pile and

land subsidence. [Method] A mechanical model of urban rail transit station arch vault structure is constructed to analyze the structural internal forces under different arch rise-span ratios. A 3D station-stratum numerical model of the station and surrounding soil is established using numerical simulation analysis software, and the rationality of the model is verified by comparing numerical simulation results of land subsidence and field monitoring data of land subsidence. The study also examines the mechanical properties of steel pipe piles and their impact on land subsidence during covered PBA method construction.

[Result & Conclusion] When the arch rise-span ratio varies from 0.20 to 0.40, the maximum bending moment, maximum axial force, and maximum shear force of the arch vault structure show a decreasing trend. The maximum axial force of the steel pipe piles decreases initially and then increases; the middle pile axial force is the minimum with the arch vault rise-span ratio of 0.30. As the arch vault rise-span ratio increases, land subsidence first decreases and then increases. The optimal ratio for controlling land subsidence is 0.30, resulting in a 34% reduction compared to the arch vault rise-span ratio of 0.20. The stages of pilot tunnel and arch closure construction cause the most significant land subsidence. An appropriate arch rise-span ratio increases the proportion of land subsidence induced during these two stages, thereby reducing the disturbance to the soil layers from the subsequent station main structure excavation.

**Key words** urban rail transit (URT); station; covered PBA method; steel pipe pile stress; land subsidence; arch vault rise-span ratio

暗挖洞桩法是在传统的暗挖分部开挖法基础上结合盖挖法而形成的一种新工法, 该方法的关键步骤是建立完善的拱-梁-柱框架受力体系。在暗挖洞桩法施工中, 主要通过边桩或边柱、中桩支撑拱结构, 继而在拱顶结构的保护下进行大断面开挖<sup>[1]</sup>。暗挖洞桩法施工结构安全性高<sup>[2]</sup>, 适合在交通繁重、周边建筑物密集及地下管道交织复杂的城

市轨道交通车站<sup>[3]</sup>使用。

暗挖洞桩法通常广泛应用于地质稳定的地区,该工法首次应用在珠江三角洲地区围岩较差的区域,因此其复杂的结构力学体系转换形式以及地面沉降控制等问题仍需进一步研究。地面沉降量是暗挖洞桩法的一个重要评价指标,其中小导洞开挖和拱顶结构施工造成的地面沉降量约占总沉降量的 2/3<sup>[4]</sup>。桩间距以及不同的施工顺序也会对地面沉降造成影响,先开挖上层导洞再开挖下层导洞引起的最终地面沉降量最小。文献[5]基于 Peck 曲线提出了城市轨道交通双线隧道地面横向沉降量的计算公式。文献[6]指出受力构件应力变化幅度在扣拱施工阶段达到峰值。文献[7]指出拱顶施工阶段,边桩和中桩的轴力和弯矩较大。钻孔灌注桩位于车站的中部位置,主要承受拱顶传递的覆土压力。拱顶矢跨比是反映拱顶受力特性的一个重要指标,拱顶矢跨比影响钢管桩(中桩)的受力状态和地面沉降。

综上,目前大多研究主要集中于暗挖洞桩法下的地面沉降,针对主要受力体系中拱结构的研究却相对缺乏。将拱结构计算理论应用于地下工程中,分析不同拱顶矢跨比对地面沉降的影响,试图达到控制沉降的目的。通过改变拱顶矢跨比分析中桩的力学行为变化,以此提出合理的拱顶矢跨比,为后续暗挖洞桩法在珠江三角洲地区的广泛应用提供参考。

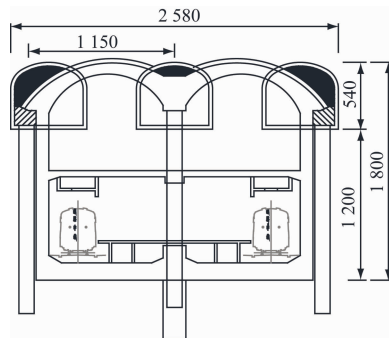
## 1 理论模型

### 1.1 无铰拱力学模型

三导洞双连拱暗挖洞桩法地铁车站为左右对称结构。车站剖面图如图 1 所示。将拱顶结构简化为以钢管桩为对称轴的双拱对称模型,取该模型的一半进行分析,支座为固定端,拱顶结构被视为三次超静定圆弧无铰拱结构。拱顶结构力学分析模型如图 2 所示。本文的结构模型只考虑结构自重、覆土及侧向土压力的静荷载,支座位移、车辆动荷载等不做考虑。为简化计算模型,将拱顶结构视作材质均匀的线弹性材料。在分析拱顶结构受力时,中导洞处于已开挖状态,因此力学分析时不考虑右侧土压力。

### 1.2 拱顶结构作用荷载

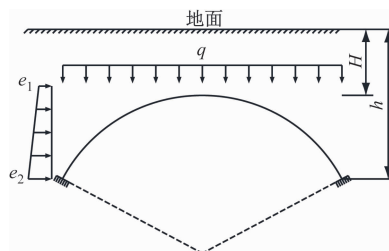
确定围岩荷载是进行荷载-结构法计算的前提。



单位:cm

图 1 车站剖面图

Fig. 1 Diagram of station section



注:  $q$  为垂直均布压力;  $H$  为隧道埋深,即拱顶到地面的距离;  $h$  为拱脚到水平面的距离;  $e_1$ 、 $e_2$  分别为拱脚和拱顶的侧向土压力。

图 2 拱顶结构力学分析模型

Fig. 2 Mechanical analysis model of arch vault structure

根据文献[8],对于浅埋无偏压隧道,作用于拱顶结构上的围岩荷载可表示为:

$$q = \gamma H \left( 1 - \frac{H}{B_t} \lambda \tan \theta \right) \quad (1)$$

$$e_1 = \gamma H \lambda, e_2 = \gamma h \lambda \quad (2)$$

其中:

$$\lambda = (\tan \beta - \tan \varphi_c) / \{ \tan \beta [1 + \tan \beta (\tan \varphi_c - \tan \theta) + \tan \varphi_c \tan \theta] \} \quad (3)$$

$$\tan \beta = \tan \varphi_c + \sqrt{\frac{(\tan^2 \varphi_c + 1) \tan \varphi_c}{\tan \varphi_c - \tan \theta}} \quad (4)$$

式中:

- $\gamma$ ——围岩重度;
- $q$ ——垂直均布压力;
- $\beta$ ——破裂面与水平面的夹角;
- $\lambda$ ——侧向土压力系数;
- $\varphi_c$ ——围岩计算内摩擦角;
- $\theta$ ——土柱两侧的内摩擦角。

## 2 车站数值模型

### 2.1 工程概况

广州地铁 13 号线(以下简称“13 号线”)二期工程某车站呈东西走向,长度约为 300 m,宽度约为

50 m,位于交通繁忙的路段,周边建筑物密集,地下管线众多,因此采用暗挖法与盖挖法相结合的暗挖洞桩法。为保证周围环境的安全性,在隧道上方道路布设地面沉降观测点,见图 3。其中地面沉降监测区段 DC1505—DC1605 为围岩不稳定区域,同时也是本文的研究对象。

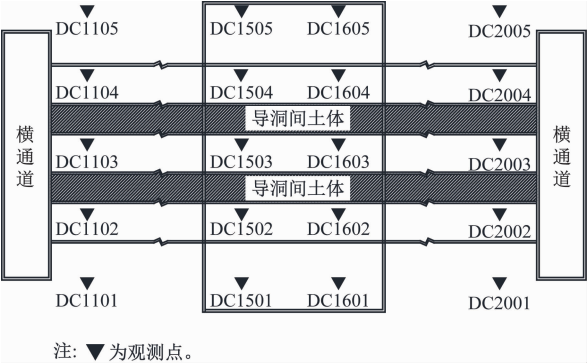


图 3 地面沉降监测点  
Fig. 3 Land subsidence monitoring points

2.2 工程地质

该车站内的土质分布不均匀,自上而下主要是杂填土、可塑残积土、粉砂岩细砂岩及砾岩等,土体性质从西向东起伏变化较大。选取施工现场典型断面 DC1505—DC1605 的地质参数作为本文数值模拟分析参数。地层与车站结构物理力学参数见表 1。

表 1 地层与车站结构物理力学参数表  
Tab. 1 Physical and mechanical parameters of stratum and station structure

地层或结构	厚度/m	泊松比	重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
杂填土	3.0	0.40	19.5	13.0	14
残积土	14.0	0.25	20.0	33.9	25
泥质砂	16.0	0.25	20.5	45.0	28
砾岩	37.0	0.20	27.0	0	36
初期支护	0.3	0.25	23.0		
冠梁		0.25	25.0		
边桩		0.20	24.0		
钢管桩		0.20	22.0		

2.3 数值模型的建立

本文采用数值模拟软件 GTS NX 建立二维平面应变模型,采用荷载-结构法研究拱顶矢跨比变化下钢管桩的力学特性。车站-地层三维数值模型(见图 4)尺寸为 200 m×20 m×70 m。采用地层-结构法分析拱顶矢跨比对地面沉降的影响。

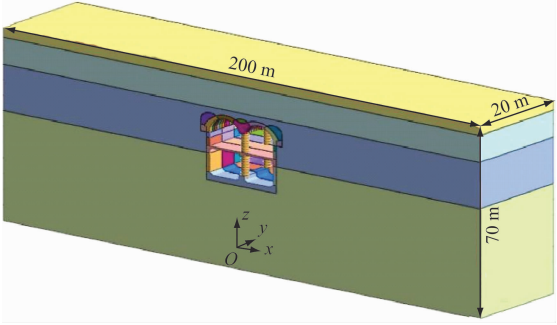


图 4 车站-地层三维数值模型  
Fig. 4 Station-stratum three-dimensional numerical model

数值模型中车站结构的开挖顺序与暗挖洞桩法施工组织方案一致。按照暗挖洞桩法的施工工序,在竖井和横通道施工完成之后,暗挖洞桩法施工主要分为小导洞施工,边桩、中桩施工,扣拱施工,以及剩余主体结构开挖等步骤。

将拱顶矢跨比分别设置为 0.20、0.25、0.30、0.35、0.40,在其他条件不变的情况下,通过建立二维数值模型和三维数值模型,研究各个施工阶段结构的受力特性及地面沉降。

3 数值模拟结果分析

3.1 不同拱顶矢跨比下地面沉降对比

建立 5 种拱顶矢跨比下暗挖洞桩法车站-地层三维模型,计算求解每个施工阶段的地面沉降。各拱顶矢跨比下、不同施工阶段地面沉降槽曲线如图 5 和图 6 所示。

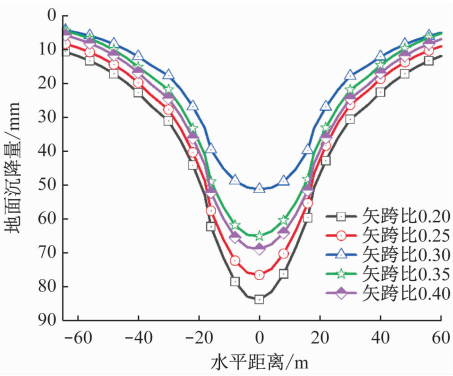


图 5 各拱顶矢跨比下地面沉降槽曲线  
Fig. 5 Curves of land subsidence trough with different rise-span ratios

由图 5 和图 6 可以看出:拱顶矢跨比的改变对暗挖洞桩法施工下的地面沉降有着明显的影响。当拱顶矢跨比为 0.20 时,各施工阶段地面最大沉降量为 85 mm;当拱顶矢跨比为 0.30 时,地面沉降量



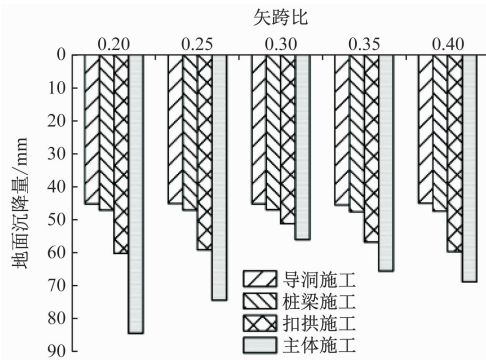


图6 不同拱顶矢跨比下各施工阶段的地面沉降量

Fig. 6 Land subsidence at each construction stage with different rise-span ratios

降至 56 mm, 两者相差达 29 mm。由于应力重分布的作用, 土体在洞内产生位移, 最终引起地面沉降, 暗挖洞桩法施工导致的地面横向沉降曲线和 Peck 提出的沉降槽理论存在一定的吻合性。

从图 5 和图 6 中可以发现: 地面沉降量随着拱顶矢跨比的增大呈先减小后增大的趋势。增大拱顶矢跨比, 导致开挖面积变大, 对拱顶土体的扰动范围增大, 导致更大的地面沉降。大量研究表明, 暗挖洞桩法下的地面沉降与隧道埋深有关。但该案例中, 整个车站结构的地面最大沉降量出现在中导洞正上方, 最大拱顶矢跨比下的拱顶埋深未超过导洞埋深。相对于拱顶埋深, 导洞埋深对整体地面沉降影响更大。

表 2 为各施工阶段地面沉降量占比。由表 2 可以发现: 在小导洞施工阶段不同拱顶矢跨比下的地面沉降量占总沉降量的 48% 以上; 前两个施工阶段不同拱顶矢跨比下的地面沉降量基本相同, 但不同拱顶矢跨比下扣拱施工阶段导致的地面沉降存在显著差别。因此, 改变拱顶矢跨比可有效控制地面沉降, 这有助于保护地下管线等一系列民用设施。小导洞施工导致的地面沉降量约占总沉降量的

表 2 各施工阶段地面沉降量占比

Tab. 2 Proportion of land subsidence at each construction stage

拱顶 矢跨比	各施工阶段地面沉降量占比/%			
	小导洞 施工	桩、梁、 柱施工	扣拱施工	主体结构 土体开挖
0.20	48	5	18	29
0.25	54	5	17	24
0.30	73	7	11	9
0.35	58	6	15	21
0.40	53	5	18	24

48% ~ 73%, 桩、梁、柱施工占比为 5% ~ 7%, 扣拱施工占比为 11% ~ 18%, 主体结构土体开挖占比为 9% ~ 29%。当拱顶矢跨比为 0.30 时, 导洞和扣拱施工导致的地面沉降量之和约占整个施工过程地面总沉降量的 91%, 后续车站主体结构土体开挖导致的地面沉降量仅占 9%。合理的拱顶矢跨比可有效控制地面沉降, 车站主体结构土体开挖期间导致的地面沉降量越小, 越有利于后续车站主体大面积的开挖。

选取图 3 中地面沉降监测点 DC1603 的监测值与模型  $y = 10$  m 处地面沉降的数值模拟值进行对比, 见图 7。从图 7 中可以发现: 拱顶矢跨比为 0.30 时的地面沉降监测值和模拟值相比, 二者变化趋势基本一致。实际工程设计中的拱顶矢跨比为 0.30, 因未考虑地下水变化情况, 地面沉降的模拟值和监测值存在误差。

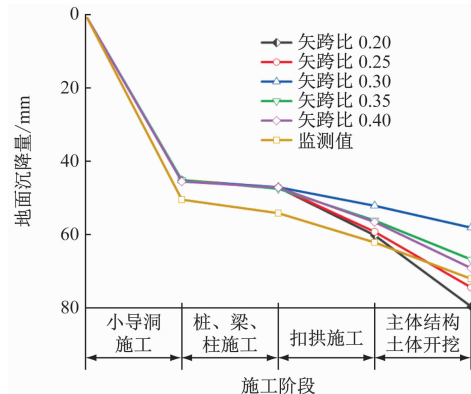


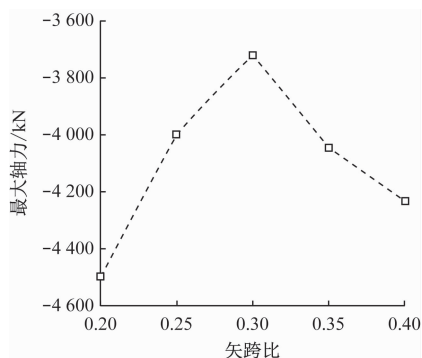
图7 不同拱顶矢跨比下地面沉降值随施工阶段变化曲线

Fig. 7 Curves of land subsidence changing with construction stages with different arch vault rise-span ratios

### 3.2 不同拱顶矢跨比下车站结构的受力特性

本文采用二维平面应变模型分析不同拱顶矢跨比下中桩和拱顶的受力特性, 见图 8—图 10。不同矢跨比下的拱顶最大内力见表 3。

从图 8 中可以看出: 当拱顶矢跨比为 0.20, 中桩最大轴力为 4 506.72 kN; 当拱顶矢跨比为 0.30, 中桩最大轴力为 3 718.63 kN; 当拱顶矢跨比为 0.40, 钢管桩最大轴力为 4 232.34 kN。由此可见, 钢管桩最大轴力随着拱顶矢跨比的增大呈现先减小后增大的趋势。拱顶施工是暗挖洞桩法施工中复杂车站结构内力转换的重要步骤, 两个导洞之间土体被开挖, 导致内部的临空面积增大, 上部静荷载通过拱顶结构传递至钢管桩和边桩, 与顶纵梁和底纵梁形成稳定的框架结构来共同受力。此时, 钢管桩的受力作用开始突显, 轴力急剧增大。



注:轴力以拉力为正值,压力为负值,余类同。

图8 不同拱顶矢跨比下中桩的最大轴力

Fig. 8 Maximum axial force of mid-pile with different arch vault rise-span ratios

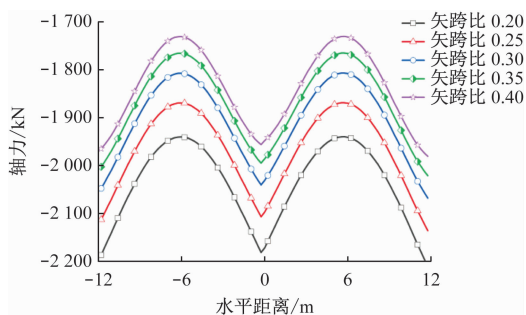
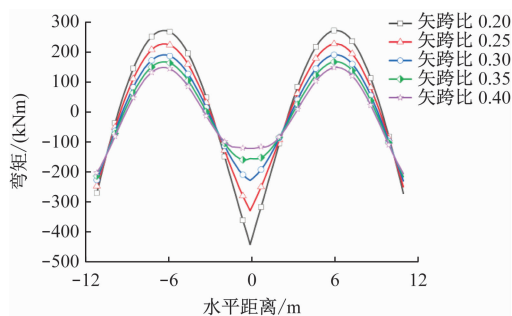


图9 不同矢跨比下拱顶轴力-水平距离关系曲线

Fig. 9 Relation curves of arch vault axial force and horizontal distance with different rise-span ratios



注:弯矩以结构下部受拉为正值,上部受拉为负值。

图10 不同矢跨比下拱顶弯矩-水平距离关系曲线

Fig. 10 Relation curves of arch vault bending moment and horizontal distance with different rise-span ratios

从图9、图10及表3中可以看出:拱顶的最大弯矩、最大轴力及最大剪力均与拱顶矢跨比呈负相关,最大弯矩从442.25 kNm下降至126.58 kNm,最大轴力从2181.30 kN递减至1950.17 kN,最大剪力则从拱顶矢跨比为0.20时的195.42 kN递减至拱顶矢跨比为0.4时的111.65 kN。拱顶的最大轴力和最大剪力呈非线性递减趋势,递减速率明显减弱,直至趋于稳定状态。顶拱的最大轴力和最大弯矩出现在拱脚处。

表3 不同矢跨比下的拱顶最大内力

Tab.3 Arch vault maximum internal forces with different rise-span ratios

拱顶矢跨比	最大弯矩/(kNm)	最大轴力/kN	最大剪力/kN
0.20	442.25	2181.30	195.42
0.25	329.73	2106.42	154.79
0.30	228.67	2040.07	130.76
0.35	155.62	1994.71	118.93
0.40	126.58	1950.17	111.65

由此可见,增大拱顶矢跨比对暗挖洞桩法施工中车站结构内力转换是有利的,但对地面沉降的控制则是负面的。因此,暗挖洞桩法施工中地面沉降的控制以及车站结构内力转换的难易程度需要一个综合的评判标准。

#### 4 结语

1) 暗挖洞桩法施工中,拱顶矢跨比会对车站钢管桩的内力产生影响,钢管桩的最大轴力呈V形分布;拱顶矢跨比为0.30时,钢管桩的轴力最小。

2) 拱顶矢跨比对暗挖洞桩法施工中的地面沉降起到很好的控制效果。当拱顶矢跨比为0.30时,地面沉降量为56 mm,与拱顶矢跨比为0.20相比减少了34%的地面沉降累计量。地面沉降量随拱顶矢跨比的增大先减小后增大,但其增大速率较为缓慢,最终趋于稳定。

3) 从数值模型分析和监测数值中发现,小导洞和扣拱施工是控制地面整体沉降量的关键步骤,两者地面沉降量总和可达到总沉降量的60%~90%。拱顶矢跨比为0.30时,地面沉降量取得最小值。因此,增强车站结构的稳定性,有利于后续车站主体结构的大面积开挖。

4) 增大拱顶矢跨比有利于减少车站结构的应力,但不利于控制地面沉降量。当拱顶矢跨比为0.30时,拱顶弯矩减少了50%,这有利于暗挖洞桩法的车站结构内力转换。

5) 后续可以考虑研究拱顶矢跨比和拱顶结构内力的最优解,使其达到既能控制地面沉降,又能有利于暗挖洞桩法车站结构内力转换的目标。

#### 参考文献

- [1] 孙玉辉,陈昌彦,王金明,等. 单层洞桩法暗挖车站初支扣拱拱顶应力应变规律研究[J]. 工程勘察, 2021, 49(8): 24.  
SUN Yuhui, CHEN Changyan, WANG Jinming, et al. Study on stress and strain law of the arch vault of the primary support arch

- for single-layer tunnel-pile excavated station[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2021, 49(8): 24.
- [2] 陈炳春, 邓刚, 董文广. PBA 工法上导洞施工初期支护变形数值模拟分析[J]. *现代隧道技术*, 2022, 59(增刊2): 63.  
CHEN Bingchun, DENG Gang, DONG Wenguang. A numerical simulation analysis of initial support deformation during the construction of top heading with PBA method[J]. *Modern Tunneling Technology*, 2022, 59(S2): 63.
- [3] LIU X, LIU Y, QU W, et al. Internal force calculation and supporting parameters sensitivity analysis of side piles in the subway station excavated by pile-beam-arch method[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 56:186.
- [4] 杨锋. 西安某地铁车站洞桩法施工的地表变形规律数值模拟分析[J]. *城市轨道交通研究*, 2021, 24(12): 43.  
YANG Feng. Numerical simulation analysis of surface deformation law in certain Xi'an Metro station with PBA construction[J]. *Urban Mass Transit*, 2021, 24(12): 43.
- [5] 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.
- [6] 罗庆斐. 地铁车站洞桩法梁拱柱结构施工力学转换研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2021.  
LUO Qingfei. Study on construction mechanics transformation of main structure of pile-beam-arch method of subway station[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2021.
- [7] 晏启祥, 徐亚军, 刘罡, 等. 洞桩法地铁车站施工力学行为及其修正荷载-结构模型研究[J]. *现代隧道技术*, 2016, 53(6): 165.  
YAN Qixiang, XU Yajun, LIU Gang, et al. Study on the construction mechanical behaviors of a subway station by PBA method and optimization of the load-structure model[J]. *Modern Tunneling Technology*, 2016, 53(6): 165.
- [8] 谢家休. 浅埋隧道的地层压力[J]. *土木工程学报*, 1964(6): 58.  
XIE Jiaxiu. Formation pressure of shallow-buried tunnel[J]. *China Civil Engineering Journal*, 1964(6): 58.
- 收稿日期: 2023-07-04 修回日期: 2023-08-12 出版日期: 2024-08-10  
Received: 2023-07-04 Revised: 2023-08-12 Published: 2024-08-10  
· 第一作者: 王阿龙, 高级工程师, 187339644@qq.com  
通信作者: 李现朋, 工程师, 825961215@qq.com  
· ©《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
- 
- (上接第 136 页)
- [8] 孙长军, 张顶立, 郑昊, 等. 大盾构扩挖车站受力转换及施工关键技术研究[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(增刊1): 293.  
SUN Changjun, ZHANG Dingli, ZHENG Hao, et al. Study of key construction technique and mechanical performance of metro station constructed by enlarging large diameter shield tunnel[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(S1): 293.
- [9] 朱瑶宏, 高一民, 董子博, 等. 盾构法 T 接隧道结构受力足尺试验研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2020, 40(1): 9.  
ZHU Yaohong, GAO Yimin, DONG Zibo, et al. Full-scale experimental study on structural mechanism of T-connected tunnel constructed by shield method[J]. *Tunnel Construction*, 2020, 40(1): 9.
- [10] 朱瑶宏, 高一民, 董子博, 等. 顶管法 T 接隧道结构受力足尺试验研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2019, 39(9): 1392.  
ZHU Yaohong, GAO Yimin, DONG Zibo, et al. Full-scale experimental study on structural mechanism of T-connected tunnel constructed by pipe jacking method[J]. *Tunnel Construction*, 2019, 39(9): 1392.
- [11] 朱瑶宏, 高一民, 董子博, 等. 盾构法 T 接隧道结构受力现场试验研究: 以宁波轨道交通 3 号线联络通道为例[J]. *隧道建设(中英文)*, 2019, 39(11): 1759.  
ZHU Yaohong, GAO Yimin, DONG Zibo, et al. Field test on structural mechanism of T-connected shield tunnel: a case study of connecting passage on Ningbo Metro Line No. 3[J]. *Tunnel Construction*, 2019, 39(11): 1759.
- [12] 柳献, 高一民, 张姣龙, 等. 机械法联络通道施工中主隧道的破洞响应分析[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(5): 951.  
LIU Xian, GAO Yimin, ZHANG Jiaolong, et al. Structural response of main tunnel linings during construction of connecting aisle by means of mechanized drilling[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(5): 951.
- [13] 柳献, 郭振坤, 伍鹏李. 考虑接头非线性的壳-接触盾构隧道衬砌计算模型研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2021, 41(增刊1): 54.  
LIU Xian, GUO Zhenkun, WU Pengli. Shell-contact model with nonlinear joints for shield lining design[J]. *Tunnel Construction*, 2021, 41(S1): 54.
- [14] 柳献, 杨振华, 门燕青. 盾构隧道环间纵向压力时变规律研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(1): 188.  
LIU Xian, YANG Zhenhua, MEN Yanqing. Temporal variation laws of longitudinal stress on cross section of shield tunnels[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(1): 188.
- 收稿日期: 2022-03-30 修回日期: 2022-05-19 出版日期: 2024-08-10  
Received: 2022-03-30 Revised: 2022-05-19 Published: 2024-08-10  
· 通信作者: 张中安, 正高级工程师, meianyan@126.com  
· ©《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