

# 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

张中安<sup>1</sup> 潘 野<sup>2</sup> 郭振坤<sup>3</sup> 张姣龙<sup>3</sup> 高一民<sup>3</sup> 柳 献<sup>3</sup>

(1. 深圳地铁建设集团有限公司, 518026, 深圳; 2. 中国铁路设计集团有限公司, 300142, 天津;

3. 同济大学土木工程学院, 200092, 上海)

**摘 要** [目的] 深圳轨道交通 14 号线肿瘤医院站采用大直径(8.5 m)盾构隧道扩挖的“先隧后站”方案,在暗挖车站主体结构及附属出入口连接时,需对隧道衬砌实施局部大尺寸开口施工。为保证隧道开口施工过程中的结构安全性,需对基于既有盾构隧道区间暗挖的城市轨道交通车站结构力学行为进行研究。[方法] 采用考虑衬砌结构环、纵缝影响的多环壳-刚性梁-接触衬砌计算模型,对车站暗挖过程进行分工况模拟,设置全开口衬砌环控制工况为开口工况,半开口衬砌环控制工况为拆撑工况;探究封顶块位置、内部支撑形式及隧道纵向开口尺寸等关键设计参数对车站结构的影响。[结果及结论] 根据环梁受力特征,建议上、下部环梁在设计时选用钢材或内置钢构件。根据管片受力特性,确定开口区域内通缝拼装管片的排版形式;肿瘤医院站隧道开口区段通缝拼装管片封顶块建议设计在隧道顶部。开口衬砌环管片在施工全程中的弯矩分布与内部支撑有效约束点密切相关,而内部支撑形成有效约束的前提是拥有完整的轴向传力路径。隧道局部开口时开口衬砌环结构的整体性依赖于环缝侧部约束。

**关键词** 城市轨道交通;车站结构;力学行为;既有盾构隧道区间;暗挖施工

**中图分类号** U455.43;U231.4

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2024.08.023

## Mechanical Behavior of Urban Rail Transit Station Structure Based on Existing Shield Tunnel Interval Underground Excavation Construction

ZHANG Zhongan<sup>1</sup>, PAN Ye<sup>2</sup>, GUO Zhenkun<sup>3</sup>, ZHANG Jiaolong<sup>3</sup>, GAO Yimin<sup>3</sup>, LIU Xian<sup>3</sup>

(1. Shenzhen Metro Construction Group Co., Ltd., 518026, Shenzhen, China; 2. China Railway Design Corporation, 300142, Tianjin, China; 3. College of Civil Engineering, Tongji University, 200092, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] Cancer Hospital Station on Shenzhen Rail Transit Line 14 adopts a scheme of large-diameter (8.5

m) shield tunnel expansion featuring tunnel-first and station-later. During the connection of the main station structure and auxiliary entrances in underground excavation, the construction of large local openings in tunnel lining is required. To ensure the structural safety during tunnel opening construction, it is necessary to study the mechanical behavior of urban rail transit station structure based on existing shield tunnel interval underground excavation. [Method] To simulate the station underground excavation process under various working conditions, a multi-ring shell-rigid beam-contact lining calculation model considering the effects of lining structure circumferential and longitudinal joints is adopted. The scenarios include full-opening lining ring control condition (opening condition) and half-opening lining ring control condition (support removal condition). Key design parameters, such as the position of capping block, the forms of internal support, and the dimension of tunnel longitudinal opening, are analyzed for their impact on station structure. [Result & Conclusion] Based on the stress characteristics of ring beams, it is recommended to use steel or embedded steel components for the upper and lower ring beams in the design. It is recommended that the arrangement of through-joint assembled segments in the opening area should be adopted according to segment stress characteristics, and the capping block of tunnel opening section through-joint assembled segments be designed at the tunnel top for Cancer Hospital Station. The bending moment distribution of opening lining ring segments throughout construction process is closely related to the effective constraint points of internal supports, and the premise of internal supports forming effective constraint is a complete axial force transmission path. The integrity of opening lining ring structure is contingent upon the lateral constraints of circumferential joints during the local tunnel opening construction.

**Key words** urban rail transit; station structure; mechanical behavior; existing shield tunnel interval; underground excavation construction

目前,国内外建造城市轨道交通车站的施工工法以明挖法为首选工法。明挖法具有施工工艺成熟、施工质量易于控制及结构体系简单等优势。但在城市中心城区,由于人员密集、交通繁忙及环境复杂等社会问题,传统明挖法可能涉及多次道路翻交和管线搬迁、盾构机多次吊装、施工筹划复杂、工程周期长及投资成本高等问题。因此,工程领域在传统车站暗挖方案,如浅埋暗挖、CRD(中隔壁)法和PBA(洞桩)法等的基础上,不断探索繁忙中心城区城市轨道交通车站的暗挖新工艺<sup>[1-3]</sup>。深圳轨道交通14号线(以下简称“14号线”)肿瘤医院站采用了基于既有盾构隧道区间暗挖的施工方案,作为我国首例结合既有盾构隧道区间暗挖的城市轨道交通车站,该车站的设计和和实践可为我国车站暗挖工艺的研究拓展新领域。

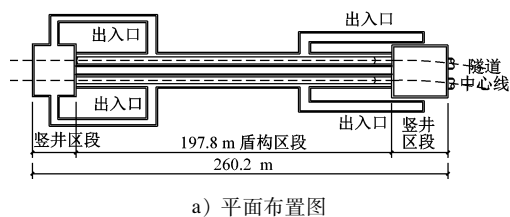
针对基于既有盾构隧道区间暗挖城市轨道交通车站的问题,文献[4-12]开展了很多极具价值的数值模拟研究、现场试验研究及足尺试验研究。由管片拼装而成的盾构隧道区间局部开口后其结构体系受力较为复杂,为体现隧道结构的空

间效应,研究多采用基于壳体或实体单元的有限元数值模型或现场和室内试验。分析表明,盾构管片开口研究需充分考虑环纵缝非线性力学行为。此外,既有盾构隧道局部开口研究的分析要素尚显单一,如隧道局部开口方位、纵向开口尺寸及内部支撑形式等。本文以肿瘤医院站为研究背景,采用精细有限元模型针对盾构隧道腰部开口形式对其结构的影响展开研究,确定结构设计安全性和关键结构受力特征等,并针对内部支撑形式和隧道纵向开口尺寸等关键要素对盾构隧道结构的影响规律做进一步探讨。

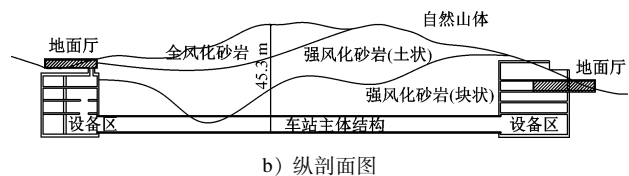
## 1 工程概况

### 1.1 工程背景

肿瘤医院站位于排背山半山腰下方,主要穿越块状强风化砂岩和土状强风化砂岩,围岩等级为V级。肿瘤医院站示意图如图1所示。车站总长260.2 m,包括长197.8 m的盾构区段和两端部竖井区段,其中:盾构区段与竖井区段通过横通道连接,盾构隧道开口区域(暗挖出入口)所在断面埋深分别为29 m和40 m。



a) 平面布置图



b) 纵剖面图

图1 肿瘤医院站示意图

Fig. 1 Diagram of Cancer Hospital Station

本车站工程“先隧后站”方案的设计思路为:为保证施工进度,原盾构区间采用小直径隧道先行贯通,而后通过大直径盾构切削既有盾构管片,实现大直径隧道“过站”。

### 1.2 隧道开口结构设计

肿瘤医院站盾构区段隧道外径为8.5 m,管片厚度为0.4 m,环宽为1.5 m,采用C50混凝土;管片采用“1块封顶块+2块邻接块+4块标准块”的七分块结构,不同分块对应的圆心角分别为19.2°、56.8°及56.8°,环纵缝均采用M30、机械性能等级为8.8级的斜螺栓连接。隧道全线采用错缝拼装形式,隧道开口范围采用通缝拼装。

1) 隧道纵向开口尺寸。接口处隧道开口高度为3.8 m,净高为2.6 m;接口处隧道开口纵向宽度为7.4 m,净宽为6.0 m。洞口环梁尺寸小于其顶部

和底部后浇结构,在洞口环梁处将预留的管片钢筋锚入环梁。为保证结构安全,上、下部环梁计算尺寸均取600 mm×400 mm,侧部环梁尺寸取700 mm×800 mm。暗挖出入口结构连接示意图如图2所示。

2) 内部支撑体系。内部支撑体系采用传统的组合拱架体系,沿纵向等间距架设在衬砌环内,每组拱架均包含横梁、竖梁、纵梁及弧形梁。

## 2 隧道开口结构力学行为分析

### 2.1 模型建立

#### 2.1.1 衬砌管片

隧道局部开口属于空间问题,为体现结构的空

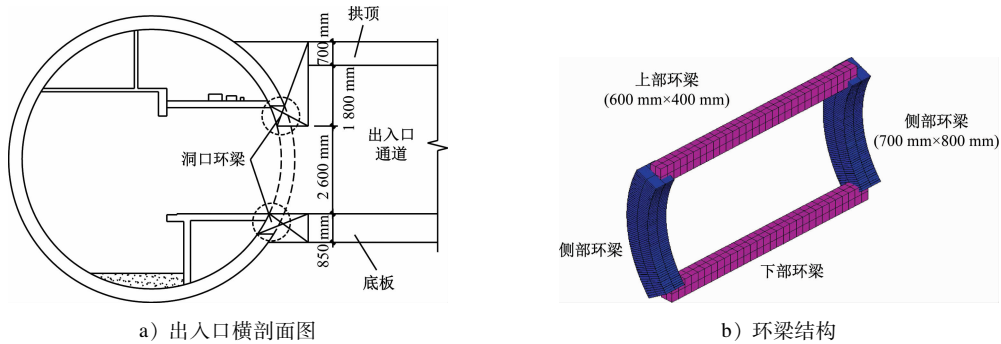


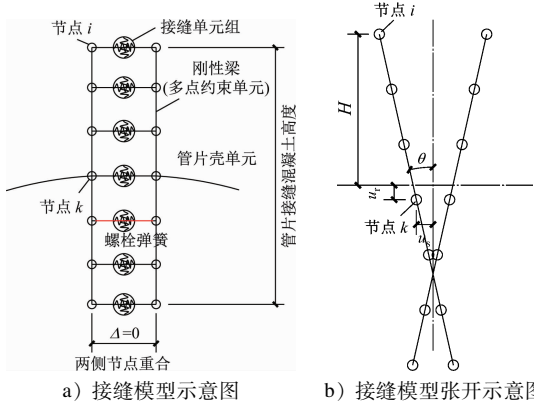
图 2 暗挖出入口结构连接示意图  
Fig. 2 Diagram of structural connection of underground excavation entrance and exit

部支撑等工况进行计算。考虑到环纵缝对管片整体刚度的折减作用,衬砌结构模型采用“多环壳-刚性梁-接触衬砌计算模型”<sup>[13]</sup>。衬砌管片接缝模型示意图如图 3 所示。该模型在纵缝处采用刚性梁以强制位移条件模拟管片厚度,不同节点之间以多点约束连接实现联动。

为应对衬砌接缝处轴向压力与剪切强度相关的压剪耦合特性,接缝处选用具有压缩、剪切刚度的接触单元,以及考虑将螺栓弹塑性本构的弹簧单元构成接缝单元组。管片接缝模型计算参数详见表 1。

2.1.2 内部支撑体系及连接

钢组合拱架支撑体系采用梁单元模拟,各类梁单元端部节点采用刚接连接。支撑模型以刚度相同的原则进行等效:横梁、竖梁及纵梁采用轴向刚度等效,而弧形梁采用抗弯刚度等效。为模拟内部支撑体系与衬砌结构的接触状态,弧形梁与隧道衬



注: $\Delta$ 为刚性梁的间距; $H$ 为刚性梁到接缝截面中心的距离; $\theta$ 为接缝张开角度; $\mu_r$ 、 $\mu_s$ 分别为接缝张开后接触单元距截面中心点的距离。

图 3 衬砌管片接缝模型及其张开示意图  
Fig. 3 Diagram of lining segment joint model and its opening  
砌壳单元之间设置一系列仅可传递压力的界面弹簧。内部支撑结构模型图和参数表分别见图 4 和表 2。

表 1 管片接缝模型计算参数

Tab.1 Calculation parameters of segment joint model

参数	环缝抗压刚度/ (kN/m <sup>2</sup> )	环缝抗剪刚度/ (kN/m <sup>2</sup> )	纵缝抗压刚度/ (kN/m)	纵缝抗剪刚度/ (kN/m <sup>2</sup> )	衬砌管片间的 接触摩擦因数	环、纵向螺栓 刚度/(kN/m)
取值	$1.5 \times 10^8$	$2.5 \times 10^5$	$3.12 \times 10^8$	$2.3 \times 10^5$	0.5	$1.94 \times 10^5$

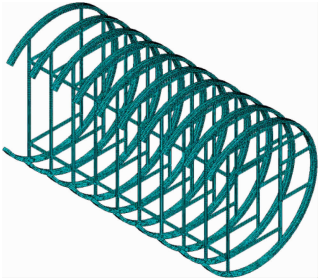


图 4 内部支撑结构模型图  
Fig. 4 Diagram of internal support structure model

2.1.3 模型环纵向约束条件

通过上述环纵缝接头单元组建立 12 环普通衬砌环及 60 m 边界衬砌环的整体计算模型。为实现计算精度与计算工作量的平衡,采用渐变式边界条件,开口衬砌环和普通衬砌环采用精细化网格,边界衬砌环采用粗网格。衬砌网格划分标准及渐变式边界条件见图 5。

该整体计算模型参考运营隧道纵向力计算理论<sup>[14]</sup>,在纵向施加 30% 盾构机掘进阶段千斤顶总

表 2 内部支撑结构模型参数

Tab. 2 Parameters of internal support structure model

构件名称	型号	惯性矩/mm <sup>4</sup>	横断面面积/mm <sup>2</sup>	弹性模量/MPa	等效宽度/mm
横梁	2I28b	$7.48 \times 10^7$	6 097	200 000	78.1
竖梁	2I36b	$1.66 \times 10^8$	8 364	200 000	91.4
纵梁	2I45b	$3.38 \times 10^8$	11 140	200 000	105.5
弧形梁		$1.11 \times 10^8$	16 000	200 000	160.8

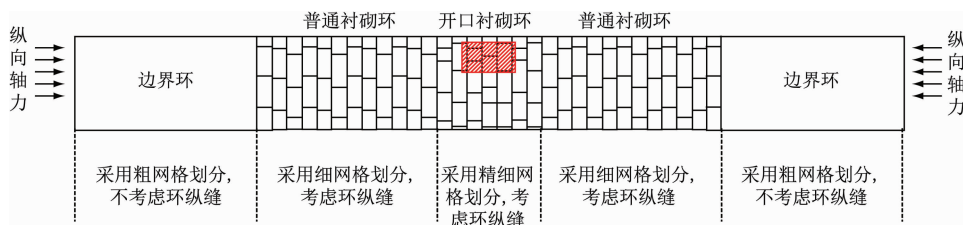


图 5 衬砌网格划分标准及渐变式边界条件

Fig. 5 Lining mesh division standards and gradient boundary conditions

推力作为荷载边界。在隧道衬砌周围布设弹簧以模拟土体-结构的相互作用,地层水平压缩刚度取 350 MPa/m,竖向压缩刚度取 280 MPa/m;盾构隧道埋深取出入口埋深较大值 40 m,水位取至隧道顶部上方 13 m。根据太沙基公式,考虑卸载拱作用,竖向计算荷载取 340 kPa,水平向地层荷载采用水土分算,侧向土压力系数取 0.33。

#### 2.1.4 计算工况

结合暗挖车站的施工工艺特点,将整体计算模型分为三个关键计算工况:

1) 在大直径(8.5 m)盾构隧道贯通的过程中,施加外部水土荷载。

2) 激活模型内部支撑体系,拆除出入口设计范围内的局部衬砌管片,取消被拆除管片对应的水土荷载,保证隧道结构在临时支撑保护作用下稳定。

3) 激活(浇筑)隧道开口区段周边环梁,拆除隧道开口区段内部支撑,将结构转换为永久受力体系。

### 2.2 隧道开口结构力学特征

根据工法特点,本文重点研究隧道开口设计的两个关键工况:第一,在内部支撑约束作用下拆除隧道局部管片后其结构体系发生显著变化,称为开口工况;第二,在隧道开口四周浇筑环梁后拆除内部支撑,称为拆撑工况。在隧道局部开口和内部支撑托换的过程中,由于结构体系的不同,隧道开口衬砌环管片、内部支撑(竖梁和横梁)及洞口环梁的受力特征,同危险工况下的受力特征存在明显差异。

#### 2.2.1 开口衬砌环管片

由于地层约束作用较强,盾构隧道贯通时,管

片弯矩呈现顶部和底部正弯矩、肩趾部负弯矩的分布特征,管片最大弯矩为 65 kNm,最大轴向压力为 1 300 kN。全开口衬砌环呈竖向强化的 C 型结构,半开口衬砌环管片为竖向强化的局部截面削弱构件,因此,两类衬砌管片变形及内力分布特征存在显著差异。拆除开口范围管片后,在开口侧竖梁的约束作用下,开口衬砌环(半开口衬砌环和全开口衬砌环)管片在其约束截面处均出现负弯矩极值点,全开口衬砌环在开口附近出现悬臂段,其负弯矩达到最大值 492 kNm;半开口衬砌环在腰部出现大范围的负弯矩区域,最大负弯矩约为 60 kNm。洞口环梁施作完成,拆除内部支撑体系,开口附近衬砌管片负弯矩消散,而半开口衬砌环剩余管片负弯矩进一步增加至 100 kNm,最大正弯矩出现在半开口衬砌环开口区域下部,局部最大正弯矩为 112 kNm。不同类型的开口衬砌环管片内力图见图 6。

由图 6 c) 和 6 d) 可知:开口工况下全开口衬砌环在开口周边轴力急剧降低,开口边缘上下 10° 范围内轴力减小到 50 ~ 400 kN,局部甚至出现拉力;半开口衬砌环剩余管片轴力增加至 2 000 ~ 3 000 kN,轴力较为集中。拆撑工况下,开口衬砌环管片轴力均有增加,尤其是全开口衬砌环开口附近的最大轴力增加至 1 000 kN,半开口衬砌环最大轴力最终增加至 3 200 kN。

#### 2.2.2 环向螺栓

局部拆除衬砌管片后,隧道衬砌管片结构开口上下区域轴力骤降。管片纵缝作为隧道结构的薄弱位置需给予重点关注。封顶块设计在隧道顶部,故隧道开口附近 12° 和 180° 位置存在两处纵缝。螺



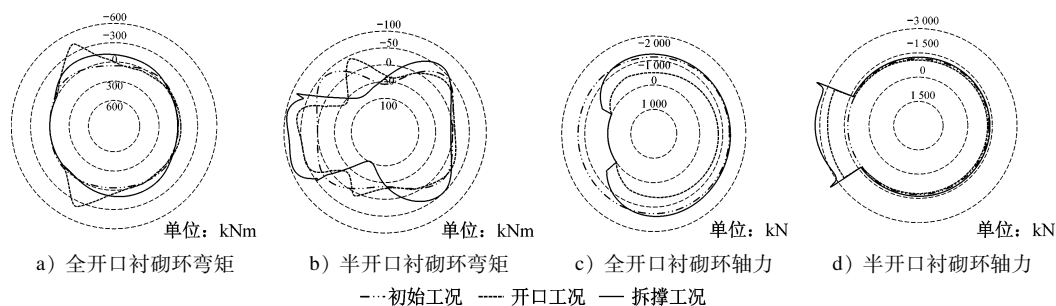


图 6 不同类型的开口衬砌环内力图

Fig. 6 Internal force diagram of different types of lining ring opening

栓拉力在拆除衬砌管片时达到最大值(167.1 kN),位于全开口衬砌环 12°纵缝处;待洞口环梁浇筑完成且拆除内部支撑后,开口衬砌环管片环向螺栓拉力均降至 30 kN 以内。

### 2.2.3 支撑结构

当采用全开口衬砌环时,盾构隧道拆除管片后,竖梁的最大轴向压力为 1 219 kN,且位于该衬砌管片的开口侧,达到设计承载力的 36%。当采用半开口衬砌环时,竖梁的最大轴向压力为 220 kN,远离开口侧,而非开口侧竖梁的轴向压力均在 200 kN 以内。与开口侧衬砌管片无直接连接的横梁对隧道结构的实际约束作用很小,最大轴向压力仅为 28 kN。

弧形梁以弯曲变形为主,其弯矩分布在全开口衬砌环开口附近的悬臂段,最大负弯矩是对应管片截面弯矩的 1/7。开口侧竖梁约束截面处弯矩取最大值 103 kNm,其余衬砌环内弧形梁弯矩在 10 kNm 内,钢板的最大拉应力为 111 MPa。

### 2.2.4 洞口环梁

拆除内部支撑体系后,支撑能量得到释放,其效应由洞口环梁和开口附近衬砌管片共同承担。其中:上、下部环梁主要承受来自横通道竖向和纵向的弯矩以及隧道的纵向拉力,且其跨中弯矩和纵向拉力均达到最大值,纵向拉应力达 14.5 MPa;侧部环梁以压弯为主,主挠曲方向为横通道纵向,其最大轴向压力为 1 410 kN,最大弯矩为 240 kNm。因此,洞口环梁设计时应重点关注上、下部环梁的纵向设计,对环梁纵向构造加强设计,如洞口环梁采用钢结构或内部设置钢构件等。

## 3 关键设计参数

在隧道腰部局部开口形式既定的基础上,根据其结构特点,车站结构设计时应重点关注环缝特殊设计、开口连接结构形式、开口区域纵缝分布、内部

支撑体系形式及隧道纵向开口尺寸等方面。其中前两者采用结构及材料设计的方式对车站结构受力行为进行优化,且已有学者进行了相关研究工作,本文主要针对后三者对车站结构力学行为的影响进行探讨。

### 3.1 封顶块位置

按照设计要求,开口衬砌环均采用通缝拼装,封顶块初步设计在隧道顶部(0°,以顶部为 0°沿开口位置逆时针规定角度,余类同)或腰部(270°)。两种方案对应的纵缝位置不同,尤其是开口区域纵缝相对位置出现显著变化时。如当封顶块设计在顶部(0°)时,距离开口区域最近的纵缝距开口区域的距离对应的圆心角为 20°~30°;当封顶块设计在腰部(270°)时,距离开口区域最近的纵缝距开口区域距离对应的圆心角为 40°~50°。因此,需进一步探讨封顶块在隧道顶部或腰部时隧道结构的响应差异,从而进行方案比选及优化。

开口工况下隧道衬砌管片弯矩图如图 7 所示。拆除衬砌管片后,由于开口区域附近纵缝距边缘较近,衬砌管片整体刚度降低;全开口衬砌环开口区域边缘最大径向向内变形增加至 27 mm,较封顶块在顶部时增加 42%,管片最大负弯矩降低 36%;弧形梁最大弯矩增加 113%,钢板最大拉应力达 247 MPa。开口区域上部和下部的第 1 条纵缝(该纵缝距该区域的距离对应的圆心角分别为 34°和 146°)最大螺栓拉力增加至 483 kN,超出螺栓承载设计值;洞口环梁纵向拉力和跨中弯矩均降低 10%~20%。

封顶块调整至开口背侧腰部时,影响全开口衬砌环悬臂段结构刚度,进而影响施工过程中衬砌管片、环向螺栓及内部支撑的受力。这虽可以降低施工全过程中衬砌管片弯矩以及洞口环梁内力,但环向螺栓和弧形梁的应力均超出相应设计应力值。因此,开口衬砌环在拼装时封顶块设计在隧道顶部更加安全,但需加强开口区域附近全开口衬砌环的

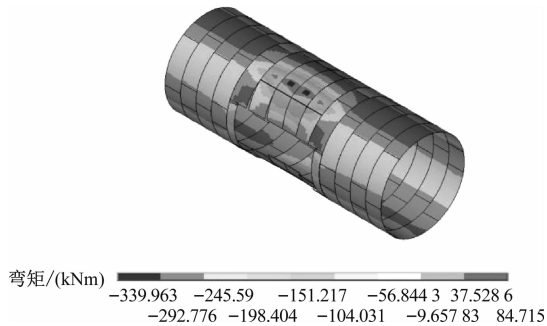


图7 开口工况下隧道衬砌管片弯矩图

Fig. 7 Bending moment diagram of tunnel lining segment under opening working condition

设计,可考虑采用钢管片或复合衬砌管片。

### 3.2 内部支撑形式

隧道拆除局部管片后,全开口衬砌环弯矩分布特征与内部支撑对 C 型衬砌结构约束点的关联性很强,且内部支撑整体刚度影响竖梁的承载效率,因此,调整内部支撑形式可同时改变开口工况中衬砌结构受力和竖梁轴力的分布特征。实际隧道施工过程中常见的支撑体系还有整体性更强的月牙板支撑(见图 8)。

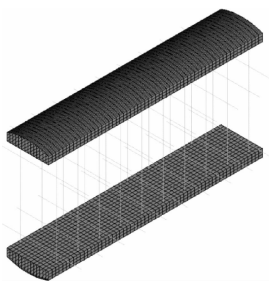


图8 月牙板支撑图

Fig. 8 Diagram of crescent plate support

全开口衬砌环弯矩分布形式与内部支撑有效

约束位置联系紧密,横、纵向支撑构成有效约束的前提是可形成完整的轴力传递路径。因此,钢组合拱架支撑负弯矩极值点仅出现在开口侧竖梁位置。月牙板支撑形式下的全开口衬砌环弯矩图见图 9。由图 9 可知:月牙板和横向支撑约束点对应截面处均产生负弯矩极值点,与之对应的横梁轴力可增加至 400 ~ 600 kN。

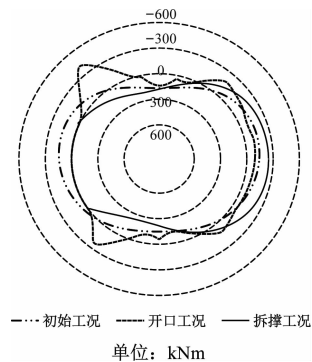


图9 月牙板支撑形式下的全开口衬砌环弯矩图

Fig. 9 Bending moment diagram of full-opening lining ring supported by crescent plate

不同支撑形式下的竖梁轴力见表 3。由表 3 可见:同侧竖梁轴向压力值自中部全开口衬砌环向未开口衬砌环递减。钢组合拱架支撑形式的全开口衬砌环内,开口背侧竖梁轴向压力为开口侧的 15% 左右,开口背侧月牙板支撑轴向压力约为开口侧的 37%。钢组合拱架支撑形式的半开口衬砌环内,开口背侧竖梁轴向压力为开口侧的 17% 左右,开口背侧月牙板支撑轴向压力约为开口侧的 42%。由此可见,与钢组合拱架支撑相对独立的弧形梁相比,月牙板的纵向和横向刚度均显著提升,竖梁轴力沿横、纵向分布较为均匀,由此可见竖梁等截面设计更具合理性。

表 3 不同支撑形式下的竖梁轴力

Tab. 3 Vertical beam axial forces under different support forms

项目	钢组合拱架支撑下的 竖梁轴力/kN		钢组合拱架支撑下的 竖梁轴力占比/%	月牙板支撑下的 竖梁轴力/kN		月牙板支撑下的 竖梁轴力占比/%
	开口侧	开口背侧		开口侧	开口背侧	
全开口衬砌环①	994	169	17.00	792	307	38.76
全开口衬砌环②	1 219	150	12.31	982	362	36.86
全开口衬砌环③	1 218	159	13.05	981	362	36.90
全开口衬砌环④	996	169	16.97	792	307	38.76
半开口环	220	39	17.73	340	140	41.18
未开口环	4	2	50.00	80	40	50.00

注:不同支撑下的竖梁轴力占比 = 开口背侧竖梁轴力 ÷ 开口侧竖梁轴力 × 100%。

### 3.3 隧道纵向开口尺寸

盾构隧道结构开口时,由于管片拆除导致结构体系改变,通过环缝实现的衬砌环间传递是力学响应的主要方式。其中,环缝摩擦对开口衬砌环的侧部约束有限,导致环缝剪力主要集中在半开口或全开口衬砌环环缝的开口附近区域。依据特定的隧道开口功能要求,实际工程中纵向开口尺寸各异。本文通过增设 2~6 环全开口衬砌环的方式增加纵向开口尺寸,进而研究纵向开口尺寸对隧道结构响应的影响规律。隧道纵向开口尺寸工况见表 4。

表 4 隧道纵向开口尺寸工况

Tab. 4 Working conditions of tunnel longitudinal opening dimensions

工况	纵向开口尺寸/m	全开口衬砌环数目
一	4.4	2
二	5.9	3
三	7.4	4
四	8.9	5
五	10.4	6

根据隧道结构开口时的力学特征,确定可表征开口衬砌环响应的力学特征物理量:全开口衬砌环开口区域的径向变形、全开口衬砌环的内力、内部支撑体系中竖梁的最大轴力及环梁的轴力和弯矩等。以此物理量研究纵向开口尺寸对开口衬砌环结构的影响规律。全开口衬砌环最大径向变形、最大弯矩及最大轴力变化曲线见图 10—图 12。由图 10—图 12 可见:随着纵向开口尺寸增加,全开口衬砌环受到的侧部约束,以及环缝向半开口衬砌环传递的荷载增量逐渐减弱,此时全开口衬砌环结构在内部支撑的作用下逐渐保持稳定。

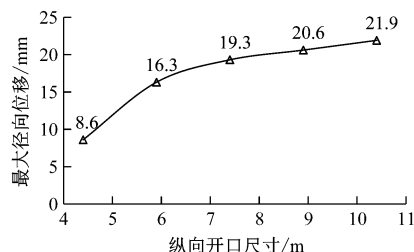


图 10 全开口衬砌环最大径向变形曲线

Fig. 10 Curve of full-opening lining ring maximum radial deformation

在增加隧道纵向开口尺寸的同时,增加洞口上部环梁跨度以及传递至侧部环梁的荷载。上部环

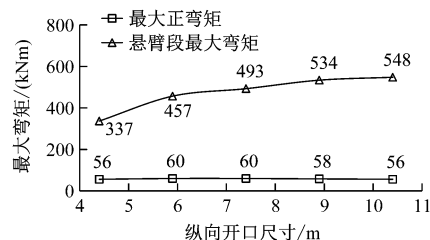


图 11 全开口衬砌环最大弯矩变化曲线

Fig. 11 Curves of full-opening lining ring maximum bending moment variation

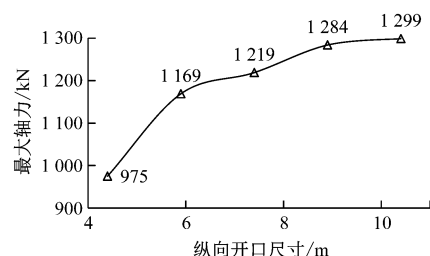


图 12 竖梁最大轴力变化曲线

Fig. 12 Curve of vertical beam maximum axial force variation

梁和侧部环梁弯矩变化曲线见图 13。由图 13 可知:侧部环梁的最大弯矩同纵向开口尺寸呈正相关,上部环梁最大弯矩同纵向开口尺寸呈线性相关;由于环缝处荷载的传递能力有限,侧部环梁最大弯矩增幅逐渐减小。上部环梁纵向拉力-纵向开口尺寸关系曲线见图 14。由图 14 可知:上部环梁的纵向拉力同纵向开口尺寸呈正相关;当隧道沿纵向开口达到 10.4 m,即 6 环全开口衬砌环在拆除内部支撑后,上部环梁最大纵向拉力可增加至 1 554 kN。

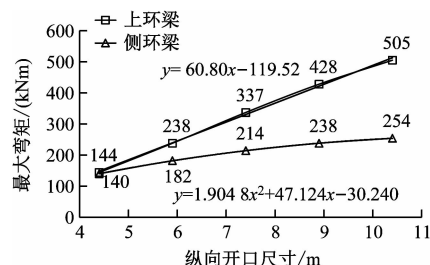


图 13 上部环梁和侧部环梁最大弯矩变化曲线

Fig. 13 Curves of upper ring beam and side ring beam maximum bending moment variation

根据隧道纵向开口尺寸变化时各类构件的响应特征,在开口高度一定的条件下,可将 7.4 m(约为 1 倍隧道直径)作为临界纵向开口尺寸。纵向开口尺寸不超过 7.4 m 时,开口衬砌环管片内力响应

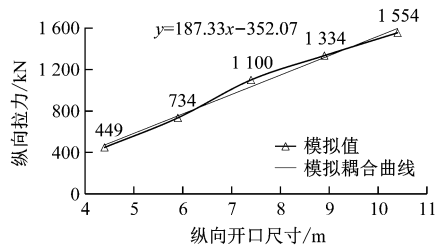


图 14 上部环梁纵向拉力-纵向开口尺寸关系曲线

Fig. 14 Relation curves of upper ring beam longitudinal tensile force and longitudinal opening dimension

增幅显著,此时以加强开口区域内衬砌管片为设计重点;纵向开口尺寸超过 7.4 m 后,其尺寸的增加对管片内力影响水平显著降低,故应加强环梁安全性设计;纵向开口临界尺寸的出现主要源于开口区域多环衬砌的整体性,可考虑加强开口衬砌环环缝刚度,以降低同等纵向开口尺寸下的管片内力水平。

#### 4 结语

1) 开口工况下开口衬砌环开口区域附近管片轴力骤降,竖梁约束截面出现最大负弯矩,形成悬臂区段;拆撑工况下开口衬砌环开口区域内管片为轴向压力和负弯矩集中区域;内部支撑的主要受力构件仅为开口侧竖梁,洞口上部环梁的拉应力达 14 MPa,建议上、下部环梁在设计时选用钢材或内置钢构件。

2) 应从环向螺栓、环梁及弧形梁等重要构件的安全性,以及全开口衬砌环悬臂段衬砌管片设计等方面综合考虑,确定开口区域通缝拼装管片的排版形式;肿瘤医院站隧道开口区域通缝拼装管片的封顶块建议设计在隧道顶部。

3) 开口衬砌环管片在施工全程中的弯矩分布与内部支撑有效约束点密切相关,而支撑形成有效约束的前提是拥有完整的轴向传力路径,钢组合拱架支撑体系中的横梁在满足内部支撑稳定性的前提下可降低工字梁截面刚度;钢组合拱架支撑体系中每榀钢架纵向具有独立性,采用横、纵向刚度较大的钢组合月牙板支撑体系可使开口衬砌环竖梁压力分布相对均匀。

4) 隧道局部开口时开口衬砌环结构的整体性依赖于环缝侧部约束,随着纵向开口尺寸增加,半开口或全开口衬砌环环缝摩擦向极限承载值逼近,该衬砌环结构及其内部支撑体系响应逐渐趋于稳定。洞口上部环梁跨度和侧部环梁荷载随纵向开口尺寸增加而增加,且其弯矩和纵向拉力也随之不

断增大。

5) 隧道结构开口时,地层局部卸载会对地层压力产生影响,而本文研究基于荷载-结构模式,未考虑地层荷载变化。因此,后续研究可关注隧道局部开口施工过程中地层荷载变化规律,并进一步判断地层条件变化对计算结果的影响程度。

#### 参考文献

- [1] 朱雁飞,郭彦,潘伟强,等.自由断面管幕法在饱和软土地区桂桥路站地铁工程的应用[J].隧道建设(中英文),2020,40(4):552.  
ZHU Yanfei, GUO Yan, PAN Weiqiang, et al. Application of pipe-roofing method with various section types in metro construction of Guiqiao Road Station at saturated soft soil area[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(4): 552.
- [2] 张中杰,黄爱军,王春凯.软土地区地铁车站矩形顶管法施工方案研究[J].城市轨道交通研究,2020,23(7):163.  
ZHANG Zhongjie, HUANG Aijun, WANG Chunkai. Construction scheme of rectangular pipe jacking method for metro station in soft soil area[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(7): 163.
- [3] 张中杰,王卓瑛,黄爱军,等.上海地区非开挖地铁车站方案研究[J].现代隧道技术,2018,55(增刊2):392.  
ZHANG Zhongjie, WANG Zhuoying, HUANG Aijun, et al. Study on construction option of mined metro station in Shanghai [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(S2): 392.
- [4] 王占奎.盾构扩挖法修建地铁车站的管片结构稳定性研究[D].北京:北京交通大学,2009.  
WANG Zhankui. Research on the stability of shield segment for metro station constructed by enlarging shield tunnel [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [5] 丁德云,鲁卫东,杨秀仁,等.大直径盾构隧道扩挖地铁车站的力学性能研究[J].岩土力学,2010,31(增刊2):281.  
DING Deyun, LU Weidong, YANG Xiuren, et al. Study of mechanical performance of metro station constructed by enlarging large diameter shield tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S2): 281.
- [6] 李习伟,郑昊,王全贤.基于大直径盾构隧道扩挖地铁车站结构安全分析[J].土木工程学报,2016,49(9):96.  
LI Xiwei, ZHENG Hao, WANG Quanxian. Safety analysis for metro station constructed by enlarging large diameter shield tunnel with mining method [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(9): 96.
- [7] 管攀峰,郭振坤,伍鹏李,等.基于壳-接触模型的盾构隧道开口力学分析[J].现代隧道技术,2020,57(5):143.  
GUAN Panfeng, GUO Zhenkun, WU Pengli, et al. Analysis of mechanical behavior of shield tunnel openings based on shell-contact model [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(5): 143.

(下转第 142 页)



- 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