

# 装配式市政隧道结构轻量化、标准化设计研究

詹素虹<sup>1</sup>, 郭太军<sup>2</sup>, 刘国强<sup>2</sup>

(1.中国恩菲工程技术有限公司广州设计院,广东 广州 510000; 2.中恩工程技术有限公司,广东 广州 510700)

**摘要:**装配式建筑所受的期望越来越高,装配式轨道交通车站和综合管廊已经取得较大发展,但装配式市政隧道的设计及施工发展却严重滞后,主要原因是装配式隧道预制件吊装重量大、远程运输净高受限、非标构件多、模板成本高等。因此,如何实现结构的轻量化、标准化犹为突出及紧迫。现以开创大道与萝岗新城外环路交叉口立交工程为例,分析了装配式隧道结构形式的选择、结构的模板分解方式、地下结构预应力的设计及应用及隧道平纵曲线段的调节方式和预制模板的统一,并应用了新材料、新产品和新工艺。案例工程采用肋板式结构及湿拼法的拼接方式使得预制构件尽可能轻量化、标准化,成功实现隧道全预制拼装市政隧道与现浇隧道工程造价相当,为装配式市政隧道设计提供一定的参考价值。

**关键词:**装配式建筑;装配式市政隧道;预制装配;地下结构预应力;轻量化;标准化;隧道防水

中图分类号: TU378

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)05-0273-06

## 0 引言

装配式建筑建造速度快、节能环保、构件质量高,在工民建、桥梁等领域应用较多、发展较好,尤其是装配式小箱梁,在桥梁领域有广泛的应用,其与现浇箱梁相比施工工期短、施工便利、工程成本低,拥有多方面优势。但装配式结构在地下工程中的应用相对滞后,尤其是在明挖浅埋市政隧道领域<sup>[1]</sup>。

地下装配工程实施较多的案例为装配式地铁车站和地下综合管廊。截至目前,国内已有长春、北京、济南、上海、广州、哈尔滨、青岛、深圳和无锡等9个城市从不同的角度开展了装配式车站建造技术的研究和应用工作,已实施的车站数量四十多座。其中全预制装配式车站31座,叠合装配式车站9座,混合型装配式车站1座。

国内综合管廊的应用则更多,据不完全统计,目前全国已有多个城市共计几十公里综合管廊采用预制装配式技术,且长度越来越长,断面尺寸也呈越来越大的趋势,如广州天河智慧城综合管廊工程已有三仓预制综合管廊的案例,断面尺寸已比较接近单孔明挖市政隧道。

明挖浅埋市政隧道通常采用双向4车道或双向6车道,断面宽度可达到32 m左右,较综合管廊及

地铁车站断面大很多,建设难度也更大。目前全国仅有3座城市共计3个明挖浅埋市政隧道项目的暗埋段进行了装配式技术的试验段尝试,分别为:疏港路下穿仙岳路通道工程<sup>[2]</sup>(厦门,2013年7月完成,试验段总长539 m)、一环路磨子桥隧道工程<sup>[3]</sup>(成都,2019年4月完成,试验段长130.6 m)、武宁路快速化改建工程(上海,正在施工,试验段长45 m)。

地下装配工程已经取得了一定经验,但是同一套设计及施工技术基本没有在第二个工程中复制再现,可知这些工程的某些核心技术还需较大调整,一时难以实现。已实施的项目均存在节段自重大、不利于运输吊装、延缓工期的问题,且预制精度要求高、成本居高不下。

因此,如何在保证结构安全可靠且造价合理的前提条件下,开发出一种自重轻、易运输吊装、工期短的装配式明挖浅埋隧道结构,达到轻量化、标准化的目标,使其可推广使用、并且工程成本上具有与现浇隧道竞争优势的装配方案,成为本领域技术人员亟待解决的问题。

## 1 案例工程简介

某案例工程位于广州市黄埔区开创大道与萝岗新城外环路T形交叉口处,设西往东单孔3车道隧道一座,隧道长度组成为:216.81 m(敞开段)+234.87 m(暗埋段)+175.35 m(敞开段)=627.03 m,道路等级为城市主干道,设计车速60 km/h,通行净高5 m。暗埋

收稿日期: 2023-06-29

作者简介: 詹素虹(1994—),女,本科,工程师,从事桥梁、隧道工程设计工作。

段及敞开段全隧道均采用装配式技术施工,上下预制块及预制节段之间采用湿拼法拼接。

## 2 装配式隧道结构轻量化设计

### 2.1 装配式隧道结构形式选择

市政明挖隧道断面通常较大,为便于装配化施工,需对传统现浇隧道的结构形式、构造、配筋等进行改造、优化,使隧道尽可能标准化、轻量化,从而降低运输、吊装难度,节约运输、吊装成本。

通过国内外已有工程案例、研究成果的梳理分析,装配式隧道的几种主要结构形式如图1所示。

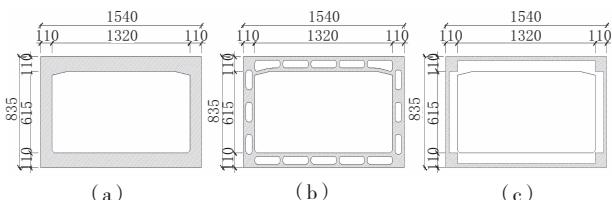


图1 平板式(左)、空心式(中)、肋板式(右)暗埋段横断面图  
(单位:cm)

#### (1) 平板式结构方案:

受传统现浇隧道的影响,目前多数装配式隧道仍采用平板式结构方案,如厦门疏港路下穿仙岳路通道装配式试验段、成都一环磨子桥隧道装配式试验段。

平板式结构的优点是结构形式与现浇隧道相同,设计、施工方便;结构受力好,整体性好;表面平整,便于防水层施工,外观较好。缺点是自重大,运输、吊装难度较大、成本较高;材料用量大,造价高;为减轻吊装重量,纵向节段分块一般为1.5~2 m,节段数量多,增大了运输、吊装作业工作量;环向拼缝数量增多,对防水不利。

#### (2) 空心式结构方案

通过轻质混凝土内模形成“空心”,可以一定程度地减轻自重,设计、施工相对复杂。空心式结构结构自重较小,运输、吊装成本较低;材料用量较小,造价适中;纵向节段分块可做到2m左右,节段数量适中。深圳首批装配式地铁车站就采用了空心式结构。

#### (3) 肋板式结构方案

采用肋板式结构方案可以大幅减轻结构自重,减小混凝土用量。上海武宁路通道装配式试验段顶板(未张拉预应力)及日本某装配式隧道采用了肋板式结构。

肋板式结构由于挖空较多,需张拉预应力才能满足受力需要;外观相对较差。但由于其结构自重小,运输、吊装成本低;材料用量省,造价低;纵向节

段分块可做到3 m左右,减少预节段数量,减少运输、吊装作业;环向拼缝数量少,对防水有利。

#### (4) 结构形式对比

为便于对比,以上3种形式的结构纵向节段长度均取2.7 m,由表1、表2可见,采用肋板式结构可以大幅减轻结构自重、减少混凝土用量,从而减少节段数量,便于运输、吊装,节省造价,并且便于制造,符合装配式施工标准化、轻量化的理念,由于工厂预制混凝土质量好,结构自防水可得到保证,外观也可通过后期装饰改善,故经综合对比,该工程主体结构采用肋板式。

表1 暗埋段工程量对比表

结构形式	2.7 m 节段混凝土量 /m <sup>3</sup>	2.7 m 节段总重 /t
平板式	129.3	336.2
空心式	86.9	256.2
肋板式	71.4	185.6

表2 暗埋段方案对比表

结构形式	重量	设计制作	运输吊装	造价	拼缝数量	防水施工	结构自防水性能	外观
平板式	大	容易	难度较大	高	较多	容易	优	优
空心式	较大	一般	难度较大	高	较多	容易	一般	优
肋板式	小	一般	容易	低	较少	一般	一般	较差

隧道横断面如图2所示,暗埋段及侧墙高度较大的敞开段采用肋板式,肋间距3 m,肋宽0.8 m,肋高0.7~1.1 m,翼缘厚0.3 m,翼缘板与肋间设0.2 m×0.2 m倒角,隧道断面角点设纵梁加强纵向联系。侧墙高度较小的敞开段,由于受力较小,结构厚度较小,不便于继续采用肋板式,拟采用平板式即可,板厚0.5 m。

## 2.2 预应力设计

由于装配式工艺轻量化设计的需要,该工程采用了肋板式结构形式,因此对受力较大的部位根据计算需要配置预应力。MIDAS Civil计算模型如图3所示(2.7 m节段)。

### 2.2.1 暗埋段预应力设计

图4为暗埋段在基本组合作用下的弯矩图,侧墙及底板受力相对较小,配置普通钢筋后均可满足结构安全;顶板受力较大,最大位置为跨中肋部,仅配置普通钢筋较难满足结构安全要求。

暗埋段覆土厚度为0.5~2.9 m,根据覆土厚度分为0.5~1.5 m、1.5~2.5 m、2.5~3.0 m分别配置预

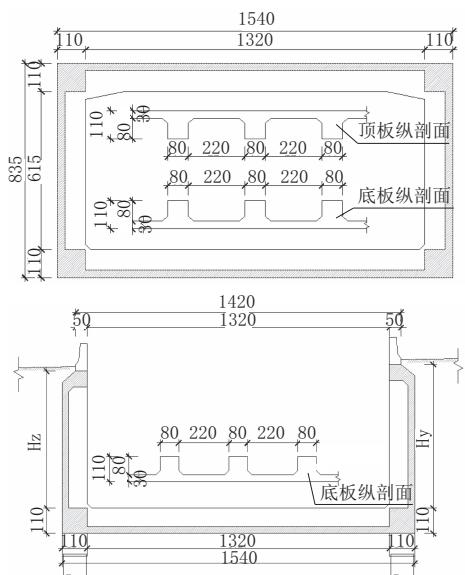


图2 肋板式暗埋段(上)、敞开段(下)横断面图(单位:cm)

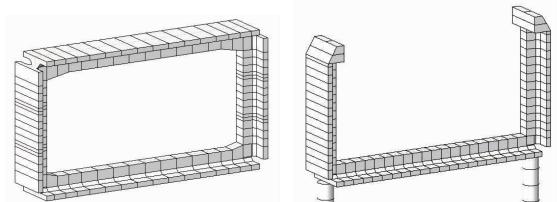


图3 暗埋段(左)及敞开段(右)计算模型

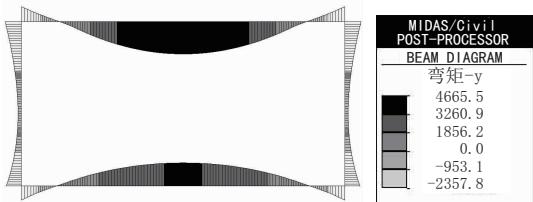


图4 暗埋段弯矩图(单位:kN·m)

应力,各段预应力配置钢束线型相同,仅钢束规格不同,方便预制构件制造加工。由于暗埋段预应力不穿过拼接缝,故均可在工厂张拉、封锚。图5为暗埋段预应力配置方案,图6为顶板张拉预应力后的使用阶段正截面压应力,最大压应力  $8.4 \text{ N/mm}^2 \leq 0.5 \times f_{ck} = 16.2 \text{ N/mm}^2$ ,满足要求。

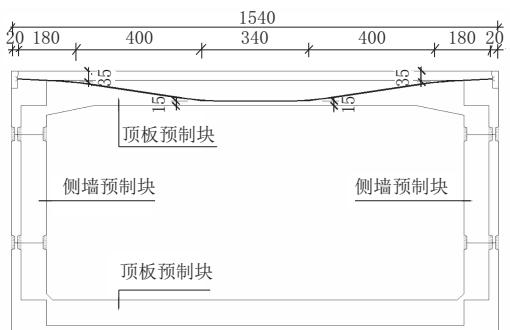
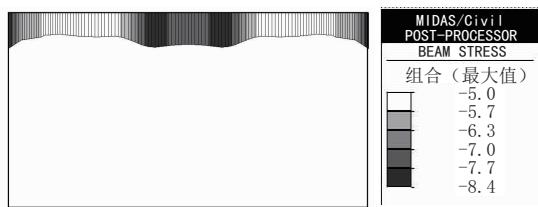


图5 暗埋段预应力钢束断面图(单位:cm)

## 2.2.2 敞开段预应力设计

该隧道敞开段侧墙高约为  $0.7 \sim 7.5 \text{ m}$ ,除起终点

图6 暗埋段顶板梁单元应力图(单位:N/mm<sup>2</sup>)

侧墙高度较小,其节段采用平板式外,其余节段敞开段均采用肋板式。侧墙为悬臂构件,受覆土深度影响较大,由于板厚  $0.5 \text{ m}$  平板式节段及肋高  $0.7 \text{ m}$  肋板式节段侧墙高度较小,受力较小,不需要配置预应力,肋高  $0.9 \text{ m}$ 、 $1.1 \text{ m}$  肋板式节段侧墙高度较高,侧墙受力较大,需配置预应力。图7为敞开段(肋高  $1.1 \text{ m}$ )在基本组合作用下的弯矩图。

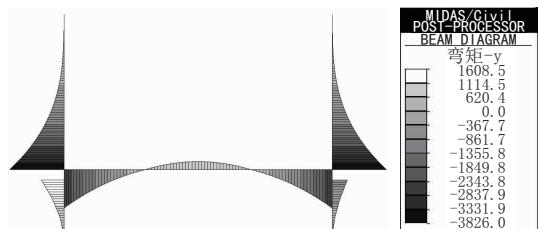
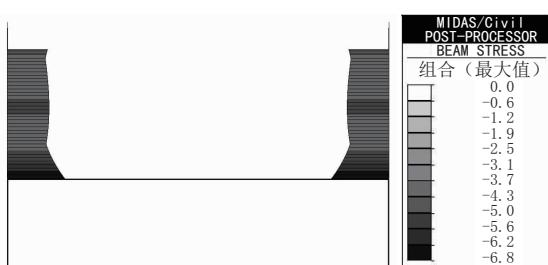


图7 敞开段(肋高 1.1 m)弯矩图(单位:kN·m)

敞开段侧墙预应力根据结构肋高及侧墙高度、地下水位深度进行包络计算,分段配置,图8为敞开段预应力配置方案,图9为侧墙张拉预应力后的使用阶段正截面压应力,最大压应力  $6.8 \text{ N/mm}^2 \leq 0.5 \times f_{ck} = 16.2 \text{ N/mm}^2$ ,满足要求。



图8 敞开段(肋高 1.1 m)预应力钢束断面图(单位:cm)

图9 敞开段(肋高 1.1 m)侧墙梁单元应力图(单位:N/mm<sup>2</sup>)

由于敞开段侧墙预应力需穿过水平拼接缝,故需要在现场张拉、封锚。考虑到张拉预应力时,预制构件均已吊装就位,为便于施工,侧墙底部采用新型自锁式锚具,出厂前由钢绞线、锚固套、导向头组成的索体已组装为一个整体,现场只需将索体自侧墙

顶张拉端往下穿束即可,索体通过底部自锁式锚具后,会自动锁住锚头,其后灌浆、封锚即可,操作简便,图 10 为自锁式锚具示意图。

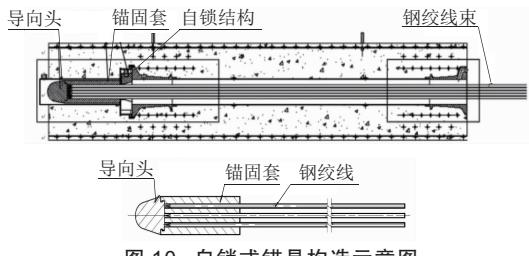


图 10 自锁式锚具构造示意图

### 3 装配式隧道结构标准化设计

#### 3.1 装配式隧道主体结构模块分解

结构分块主要考虑因素为:(1)预制构件运输过程中限高、限宽的要求;(2)预制构件吊装、运输过程中重量的限制;(3)分缝尽量设置在结构受力较小处,拼接缝受力需满足规范要求。

##### 3.1.1 纵向分块

纵向分块主要考虑重量及宽度限制,由于该隧道采用了肋板式结构,较国内已有工程案例大幅减少了结构自重(见表 3),因此纵向分块间距可适当加大,有利于减少纵向分块及环向拼接缝数量。大型车最小车道宽为 3.5 m,为保证行驶安全且减免改造、加固及护送措施,该隧道纵向分块间距为 3 m,与肋梁间距一致,其中 0.3 m 为 UHPC 环形后浇带(预留钢筋),故预制部分纵向尺寸为 2.7 m。全隧道采用相同分块间距,方便设计及预制,纵向分块如图 11 所示。

表 3 暗埋段纵向分块对表

项目名称	车道数	最大构件尺寸 长×高×宽 /m	每延米 重/t	分块间 距/m
疏港路下穿仙岳 路通道工程	单孔两车道 双孔四车道	10.35×3.6×3 19.9×3.6×2	29.8 52.5	3 2
一环路磨子桥 隧道工程	双孔五车道	22.3×4.2×1.5	81.7	1.5
武宁路快速化 改建工程	双孔四车道	20.2×3.748×2	70	2
案例工程 (肋板式)	单孔三车道	15.4×2.925×2.7	27.7	3
将来采用案例 工程结构形式的 工程(肋板式)	双孔四车道 双孔六车道	22.4×2.925×2.7 29.4×2.925×2.7	39.6 48.6	3 3

##### 3.1.2 上下分块

构件若采用现场预制,可不考虑道路限高问题,横断面可竖向拆分为上下两部分,如成都市磨子桥装配式隧道的分块拼装<sup>[4]</sup>;现场预制的场地租赁费用较高,且会加长施工围蔽时间,预制构件的质量也相

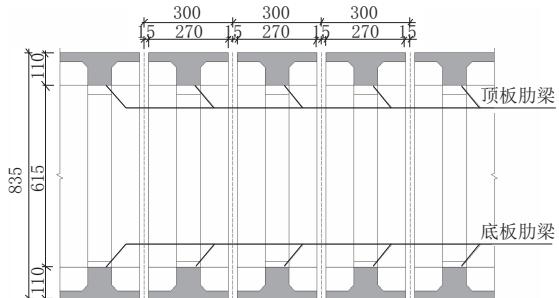


图 11 隧道纵向分块示意图(单位:cm)

对没那么高,故按在预制厂预制考虑。一般道路限高 5 m,运输平板车的底板高度一般为 1.2~1.5 m 高,加上构件固定装置高度,总高按 1.5 m 高考虑,则构件限高约为 5 m-1.5 m=3.5 m。

暗埋段采用上、下两段分块方案运输时构件高度为 4.175 m,超过限高要求,运输路线受到限制,且上预制块运输时重心较高,安全风险较大;采用上、中、下三段分块方案运输时,考虑拼缝位置设置在侧墙受力较小处的同时,下预制块应保证高度不超过,上预制块则尽量降低侧墙高度,既保证安全又能便于运输,暗埋段最终分块方案见图 12 右所示。

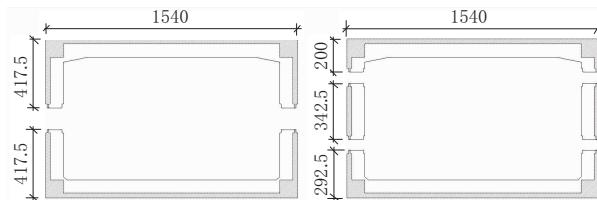


图 12 暗埋段 2 种分块方案示意图(单位:cm)

敞开段根据侧墙高度不同对受力需要的不同,肋板式敞开段肋梁高分为 0.7 m、0.9 m、1.1 m 三种,平板式敞开段板厚为 0.5 m。

肋梁高 1.1 m 节段分上下 2 段,水平拼接缝位置与暗埋段下部拼接缝一致;肋梁高 0.9 m、0.7 m 节段分上下 2 段,水平拼接缝位置均位于底板肋梁顶面以上 0.5 m 高处;板厚 0.5 m 节段由于侧墙高已较小,故不再上下分块。敞开段分块示意如图 13 所示。



图 13 敞开段结构分块示意图(单位:cm)

上下预制块之间的水平拼接缝均采用预留核心混凝土和后浇槽的方式连接,后浇槽的主筋交错预埋于上、下预制块中,后浇槽采用 UHPC 浇筑<sup>[5]</sup>。

### 3.2 隧道结构平、竖曲线调节

#### 3.2.1 平曲线调节

该隧道平面线型自西向东由直线、缓和曲线、圆曲线组成,当隧道位于曲线地段时,拟合曲线的方式主要有两类,一类是“楔形构件+等宽缝”方式,另一类是“等宽构件+楔形缝”方式<sup>[6]</sup>,在缓和曲线段采取“楔形构件+等宽缝”的方式时预制构件必有多种类型,故该隧道采用“等宽构件+楔形缝”方式,可使构件实现标准化预制,且由于该隧道采用湿接法拼接,与预制小箱梁的后浇湿接缝类似,平曲线可通过内、外弧的后浇带宽度进行调整,如图 14 所示。

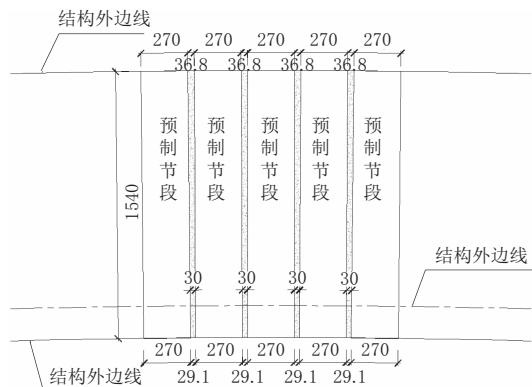


图 14 隧道结构拟合平曲线示意图(单位:cm)

#### 3.2.2 竖曲线调节

该隧道竖曲线采用构件纵坡方式实现(上下拼缝水平)有如下优点:构件竖直无斜率,施工中稳定性好;吊装状态与就位状态一致,方便吊装;拼接缝水平,方便拼装。由于竖曲线处纵坡为渐变值,为避免每个构件均不相同,全隧道对纵坡相近的节段进行一定的归并处理,通过后浇带调整误差。暗埋段的顶板及底板归并后有0%、2%、4%三种纵坡,敞开段的底板归并后有2%、4%两种纵坡。构件纵坡如图 15 所示。

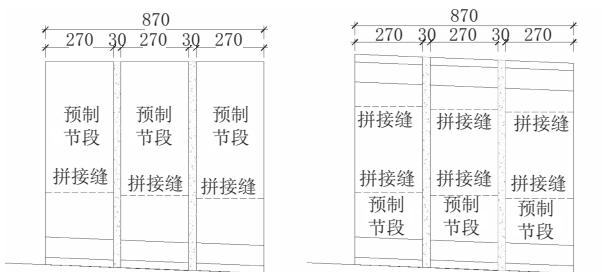


图 15 敞开段(左)、暗埋段(右)构件纵坡示意图(单位:cm)

#### 3.3 隧道结构模板标准化设计

该工程隧道纵向及竖向均采用湿拼法拼接,可大大降低对预制构件精度的要求,故对模板的精度要求也相对降低,采用可调节模板,可减少模板套数、降低模板费用。顶、底板的纵坡和肋板的厚度均

有几种类型,可通过可调节模板组件实现;敞开段的侧墙高度为变化值,通过调节高度调节组件即可调节模板整体高度。该隧道共 211 环预制构件(共 611 个预制块),最终可达到仅采用 4 套模板(顶板块、底板块、暗埋段侧墙块及敞开段侧墙块各一套模板)即可满足所有预制构件的需求。

经咨询预制件厂家,该工程隧道预制件模板成本总价约为 85 万元(不计材料回收),摊销至所有预制构件约合 85.6 元 /m<sup>3</sup>,仅占预制件成本 1.8%,此优势随着此类隧道做法的普及还可进一步得到体现。

### 4 装配式隧道防水设计

根据规范<sup>[7]</sup>,该隧道工程防水等级为一级。防水遵循“以防为主、刚柔相济、多道防线、因地制宜、综合治理”的原则,主体结构自防水采用抗渗等级为 P10 的 C50 抗渗混凝土。结构外表面全部包裹防水卷材及涂刷水泥基渗透结晶型防水涂料。

拼接后浇带采用高强混凝土 UHPC 浇筑。该种材料高强、密实,防水效果良好。环形拼接后浇带中设置镀锌钢板止水带。变形缝防水采用新型三组份高分子柔性密封材料<sup>[8]</sup>。经试验验证该防水方案满足工程需要。

### 5 案例工程运用效果

暗埋段的新型装配式框架结构与平板框架结构相比,每个横向框架预制节段可减少混凝土用量 57.9 m<sup>3</sup>,减少比例约为 45%。敞开段的新型装配式 U 形槽结构与平板 U 形槽结构相比,每个横向 U 形槽预制节段可减少混凝土用量 35.1 m<sup>3</sup>,减少比例约为 39%(以肋板厚度 1.1 m、侧墙高度 7.5 m 为例)。可见采用此类新型结构能够使预制件达到最大限度的轻量化。

采用传统的现浇法施工一个大节段,在理想情况下用时约为 20 d;而采用新型装配式施工方案顶、底板预制块的吊装时间为 2 h/ 件,侧墙预制块为 1 h/ 件,吊装一个 30 m 长的大节段总时间约为 2.5 d。考虑后浇带 UHPC 混凝土的龄期及绑钢筋的工作时长,7 d 就可完成一个大节段,每个大节段可节约 65% 工期,若增加龙门吊还可再加快吊装速度,工期优势非常明显。

在关键技术问题上,案例工程在保证受力、防水等前提下,大量减轻了结构自重,便于预制件的运输、吊装,降低了技术难度及成本;对隧道结构形式

尽量做到统一,且便于预制件制作;对结构模块进行了分解,分解后能满足运输、吊装的要求,组装后又能满足结构受力要求;采用湿拼做法,降低了对构件制作的精度要求,增强了模板的通用性。

在建造成本问题上,案例工程利用工厂优异的生产环境,优化改造结构形式,在保证各种隧道功能及质量的前提下,节省材料,降低材料成本;通过结构形式选择、模块划分等,降低了预制件运输、吊装成本;将来通过大规模的应用,还可摊销研发、机械设备费用。

## 6 结语

案例工程采用新型装配式隧道施工技术,通过对隧道结构单元的模块化、标准化设计,实现工厂一体化生产,现场高效拼装,是一种绿色、环保、节能、高效的施工方式。案例工程成功实现市政隧道全装配技术,与传统的现浇隧道相比,工期减少45~50%,现场工人减少70~80%,造价也基本与其持

平,能够有效缓解施工期交通拥堵、环境污染问题。这种做法可复制、可推广,通用性强,为装配式市政隧道设计提供一定参考价值。

### 参考文献:

- [1] 姚怡文,蒋理华,范益群.地下空间结构预制拼装技术综述[J].城市道桥与防洪,2012(9):286~292.
- [2] 傅重龙.城市地下道路明挖预制拼装工艺研究与实践[J].工程建设及设计,2019(12):130~132.
- [3] 刘斌彬,李旭升,胡苏.成都市一环磨子桥隧道工程工业化预制拼装设计[J].城市道桥与防洪,2019(2):212~215.
- [4] 奚成.成都市磨子桥装配式隧道分块拼装技术研究[J].隧道/地下工程,2019(12):81~85.
- [5] 郭太军,刘国强,詹素虹,等.一种钢筋混凝土预制构件拼接结构:CN202221297325.7[P].2022-10-28.
- [6] 杨秀仁.明挖预制装配式隧道结构拼装设计方法及关键技术[J].都市快轨交通,2023,36(2):2~13.
- [7] GB 55030—2022,建筑与市政工程防水通用规范[S].
- [8] 豫建科协评字[2022]第007号,三组份改性高分子密封材料防水技术研究[Z].

(上接第267页)

- 应用研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(7):1396~1404.  
[4] 矣涛,杨伟,鲍宇文,等.成都市凯德商用天府项目基坑开挖对桥梁桩基的影响研究[J].路基工程,2012(3):84~87,92.  
[5] 万鹏.宁波软土地区深基坑开挖对既有高架桥桩基的影响研究[D].广州:广州大学,2019.  
[6] 王翠,闫澍旺,张启斌.深基坑开挖对邻近桥桩的影响机制及控制措施研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增刊1):2994~3000.  
[7] 杜志涛,李少友.紧邻既有桥梁深基坑支护方案研究[J].市政技术,2020,38(4):254~257.  
[8] 王恒,陈福全,林海.基坑开挖对邻近桥梁桩基的影响与加固分析

- [J].地下空间与工程学报,2015,11(5):1257~1265.  
[9] 何晟亚,刘一,李恒一,等.地铁车站基坑下穿对既有桥梁变形的影响及其控制措施研究[J].城市轨道交通研究,2022,25(6):105~111.  
[10] 刘顺青,王旭畅,王文博,等.顶管施工对既有桥梁影响的三维数值分析[J].科学技术与工程,2022,22(26):11559~11566.  
[11] 徐涛,王凯.顶管工程施工对邻近轨道交通高架结构的变形影响分析[J].现代隧道技术,2021,58(增刊2):66~72.  
[12] 湖北省电力勘测设计院有限公司.一流城市电网建设——江汉区电力通道一期岩土工程勘察报告(详细勘察阶段)[R].武汉:湖北省电力勘测设计院有限公司,2022.