

DOI: 10.7672/sgjs2026020082

# 圆形小断面输水隧道管片衬砌结构设计与施工\*

周晓军

(西南交通大学土木工程学院,四川 成都 610031)

[摘要] 钢筋混凝土预制管片结构的设计是采用盾构法建造拼装式隧道衬砌的前提。国内外对小断面输水隧道管片结构的设计和建造方法开展的研究较少。结合环北部湾广西水资源配置工程中的某山岭隧道,就泥水盾构法建造小断面输水隧道拼装式衬砌管片结构的设计和建造方法进行研究。基于圆形小横断面隧道衬砌的几何特征和参数,提出了输水隧道衬砌分块和管片上纵向螺栓孔以及凹凸榫点位的计算和设计方法,并提出了预制管片的详细结构和管片衬砌以错缝或通缝拼装的建造方法。

[关键词] 隧道;预制管片;拼装;衬砌;设计;施工技术

[中图分类号] U459.6;TU94<sup>+</sup>2

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)02-0082-13

## Design and Construction of Segmental Lining Structure for Water Conveyance Tunnel with Round Small Cross Section

ZHOU Xiaojun

*(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)*

**Abstract:** The structural design of reinforced concrete precast segments serves as a prerequisite for constructing segmental tunnel lining using shield tunneling method. There are few studies on the method for designing and constructing segmental lining for water conveyance tunnel with round small cross section at home and abroad. Taking a mountainous tunnel in Guangxi Water Resources Allocation project around Beibu Gulf as a case study, the method to design and construct segmental lining for water conveyance tunnel with round small cross section to be constructed by using slurry shield driving method is discussed. Based on the geometric characteristics and parameters of constructing tunnel lining with round small cross section, the method to calculate and design the segmentation of tunnel lining and the longitudinal bolt-holes as well as concave-convex-tenon on segments for water conveyance tunnel lining is presented, and the detailed structure of precast segments as well as the construction method of segmental tunnel lining with staggered or straight joints are also proposed.

**Keywords:** tunnels; precast segment; assembly; linings; design; construction

### 0 引言

隧道作为交通线路、长输石油天然气管道和长距离输水工程中穿越山岭或河流等障碍的工程结构,其衬砌按照施工工艺可划分为现浇钢筋混凝土衬砌、预制拼装钢筋混凝土衬砌以及两者的组合3种类型。现浇衬砌多适用于钻爆法建造的隧道,拼装式衬砌多适用于隧道掘进机(tunnel boring machine, TBM)法包括盾构法(shield driving method)建造的隧道,而现浇与拼装相组合的衬砌既可用于

钻爆法建造的隧道也可用于隧道掘进机法建造的隧道,因施工工艺复杂,工程中极少采用。采用钻爆法建造隧道时爆破施工不仅会损伤围岩,而且炸药爆炸时产生的冲击波易使围岩发生振动,因而施工期的安全风险较高。此外,钻爆法中采用的现浇混凝土工艺还存在浇筑混凝土质量不易控制、建设工期长以及隧道衬砌不能立即承载的缺点。与钻爆法相比,盾构法中采用预制钢筋混凝土管片来拼装隧道衬砌的施工工艺具有安全风险低、施工效率高以及工期短等显著优点,尤其是钢筋混凝土管片可实现标准化和工业化生产,因而其混凝土强度和厚度更易于得到保证,同时用预制管片拼装成型的

\* 国家自然科学基金(51378436)

[作者简介] 周晓军,教授,博士生导师, E-mail: 768977446@qq.com

[收稿日期] 2025-08-29

隧道衬砌还能够立即承载,在缩短建设工期和提高工程质量以及保护环境等方面具有显著优势,也是实现隧道智能化建造的有效途径之一<sup>[1]</sup>。因此,为降低长距离输水隧道在建造期因工程地质和水文地质等客观因素所引起的工期、安全和投资等方面的风险,国内外多采用 TMB 法或盾构法来建造输水隧道<sup>[2-4]</sup>。

与采用盾构法建造城市地铁区间隧道、高速铁路和高速公路山岭或越江隧道类似,用盾构法来建造输水隧道的前提是需要结合拟建隧道穿越地层的工程地质和水文地质以及隧道功能来研究和设计用于拼装隧道衬砌的预制管片。国内外对盾构法隧道的预制钢筋混凝土管片设计方法开展了众多研究和工程实践<sup>[2-5]</sup>。从已投入运营的拼装式隧道衬砌的预制管片结构及其设计方法分析,目前的研究侧重于采用盾构法建造的城市地铁区间隧道、高速铁路和高速公路大断面隧道而开展。对于以盾构法建造的国内城市地铁区间隧道而言,其圆形横断面的外径通常为 6.4~13.3m,对于以盾构法建造的高速铁路隧道而言,其圆形横断面的外径为 10.8~12.6m。而对于采用盾构法建造的高速公路隧道而言,其圆形横断面的外径为 13.7~17.5m<sup>[6-8]</sup>。与城市地铁和高速铁路以及高速公路盾构法隧道相比,国内采用盾构法建造圆形横断面输水隧道的外径通常为 4.8~10.0m<sup>[2-4]</sup>,由此可见,国内外采用盾构法建造的隧道以大断面为主,而对采用盾构法建造的圆形小断面输水隧道预制管片结构设计和建造技术的研究较少,尤其是对基于圆形横断面隧道衬砌几何特征的预制管片分块和螺栓孔孔位设计与计算方法的研究则更少。本文结合环北部湾广西水资源配置工程中采用泥水盾构法建造的某山岭隧道,就圆形小横断面输水隧道拼装式衬砌的预制管片结构设计及其拼装方法进行的研究,提出划分管片和管片上纵向螺栓孔计算与设计的方法及管片的详细结构,并提出拼装式输水隧道衬砌的建造方法。

## 1 工程概况

环北部湾广西水资源配置工程位于广西中南部,线路全长 491.1km,其包括 6 条输水干线和 12 条输水支线。该工程从南宁市郁江干流取水,沿线主要为南宁市、北海市、钦州市和玉林市 4 个城市供水,年供水量为 11 亿  $\text{m}^3$ 。该工程中的陆川县支线全长 30.3km,设计输水流量为 2.3 $\text{m}^3/\text{s}$ ,支线中拟建的某山岭隧道全长 6 582m。拟建隧道穿越段地层的地貌为丘陵和低山地貌,地面高程 160.000~

320.000m。山体坡度一般为 20°~25°,局部可达到 35°~40°。拟建隧道隧址区山体坡面植被较发育,植被以松树、桉树和灌木为主。拟建隧道洞身所穿越的地层岩性有第四系冲积层淤泥质土、泥盆纪信都组千枚状粉砂岩、砾岩、莲花山组石英砂岩和泥质粉砂岩以及志留系连滩组的千枚状泥质粉砂岩。隧道埋深介于 26.3~140.5m,隧道围岩级别为 III 级、IV 级和 V 级,其分布长度分别占隧道全长的 10%、55%和 35%。该拟建隧道所穿越地层地质构造较为复杂,洞身还在 V 级围岩中穿越 6 条断层或次生断裂带。地层中地下水有松散岩类孔隙潜水、基岩裂隙水和断层破碎带内的孔隙和裂隙水。地层中松散岩类孔隙水的水位自地表以下 0~2m 处,而基岩裂隙水的水位为地面以下 3.0~5.0m 处。地下水对混凝土具有弱~中等腐蚀性,而对混凝土中的钢筋具有微~弱腐蚀性。

## 2 隧道衬砌横断面设计

### 2.1 隧道衬砌横断面及其几何参数

考虑到拟建输水隧道洞身穿越淤泥质土、千枚状粉砂岩和砾岩,且穿越 6 条断层和次生断裂带,岩层中地下水较丰富,且地下水位较高,为降低输水隧道施工期间发生围岩坍塌和涌水的风险,确保施工安全、建设工期和隧道衬砌质量,经综合分析工期、施工风险、地质条件和工程投资等因素后确定采用泥水平衡盾构法进行施工。根据陆川支线中山岭隧道设计的输水流量,并考虑圆形横断面隧道衬砌在围岩压力和地下水静水压力等荷载作用下具有弯矩小而轴向压力较大的承载特点,将拟建输水隧道的横断面设计为圆形,并且将隧道衬砌设计为以预制钢筋混凝土管片按错缝方式拼装,管片采用高性能耐腐蚀混凝土,强度等级为 C55,管片中受力钢筋为  $\phi 16$  HRB400 级钢筋,预制管片中受力普通钢筋的混凝土保护层厚度为 35mm。

为便于结合圆形横断面隧道衬砌的几何特点来研究预制管片的划分方法,设该拟建输水隧道圆形横断面衬砌的内半径为  $R_1$ ,外半径为  $R_2$ ,径向厚度为  $t$ ,即预制钢筋混凝土管片的厚度,三者的几何尺寸单位均以 mm 计。根据输水量所确定的  $R_1 = 1\ 150\text{mm}$ , $R_2 = 1\ 430\text{mm}$ ,则  $t = R_2 - R_1 = 280\text{mm}$ 。输水隧道圆形横断面衬砌的内径为 2 300mm,外径为 2 860mm。由此可得拟建输水隧道衬砌内净空的横断面面积仅有 4.16 $\text{m}^2$ 。根据国际隧道工程协会 (ITA) 定义的以隧道横断面面积划分大小断面隧道的标准,该隧道属于小断面输水隧道。若采用常规的钻爆法施工,并以现浇混凝土工艺建造输水隧道

时,其衬砌横断面如图 1 所示, $O$  为输水隧道圆形横断面衬砌的圆心。

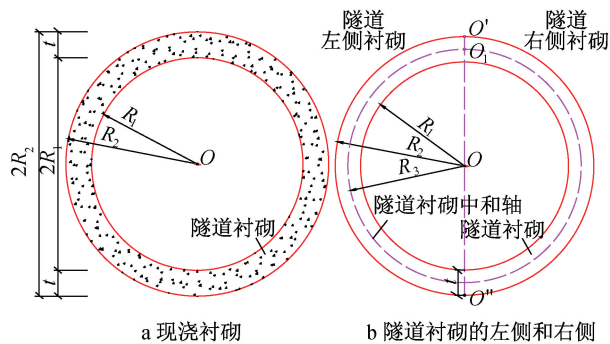


图 1 拟建输水隧道衬砌横断面

Fig. 1 Cross section of the water conveyance tunnel lining to be built

图 1a 所示为现浇钢筋混凝土衬砌横断面,过圆心  $O$  作半径  $R_3 = 1\ 290\text{mm}$  的圆,用该圆的圆周可将由半径  $R_1 = 1\ 150\text{mm}$  的圆周和半径为  $R_2 = 1\ 430\text{mm}$  的圆周所围成的隧道衬砌沿径向上的厚度  $t = 280\text{mm}$  加以平分。则在平分隧道衬砌厚度的半径  $R_3 = 1\ 290\text{mm}$  的圆周上就可以设置用于安装纵向螺栓的点位。安装纵向螺栓的目的是将沿隧道纵向上相邻的 2 块预制管片加以拼接,增强管片之间连接和防水性能。除纵向螺栓外,还需要设置环向螺栓,目的也是要增强环向管片之间的连接和防水性能。过圆心  $O$  作 1 条竖向直线段  $OO_1$ ,使  $OO_1$  与半径为  $R_3 = 1\ 290\text{mm}$  的圆周相交,交点为  $O_1$ 。过圆心  $O$  和点  $O_1$  作半径  $R_2 = 1\ 430\text{mm}$  的圆,直径  $O'O'' = 2\ 860\text{mm}$ ,将该圆形横断面的隧道衬砌划分为左侧和右侧部分,如图 1b 所示。图 1b 中半径  $R_3 = 1\ 290\text{mm}$  的圆的圆周就是圆形衬砌厚度的结构中轴。

## 2.2 隧道衬砌内力和安全性

根据前文所述的拟建输水隧道所穿越地层的工程地质和水文地质,此段隧道的埋深  $46.1 \sim 88.3\text{m}$ ,属于深埋隧道。此外隧道所穿越的断裂带中千枚状泥质粉砂岩富含裂隙水,因此在设计输水隧道衬砌时还需要考虑其承受围压松动压力和地下水静水压力的安全性。结合拟建隧道穿越地层的工程地质和水文地质,以围岩级别较低的 V 级围岩深埋状况来分析拟建圆形横断面输水隧道衬砌的内力和安全性。拟建输水隧道 V 级围岩和 C55 钢筋混凝土衬砌的物理和力学性质如表 1 所示。

拟建输水隧道衬砌在 V 级围岩深埋状况中所承受的围岩竖向压力  $q$  按太沙基 (Terzaghi) 理论计

表 1 围岩和隧道衬砌的物理和力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of surrounding rock and tunnel lining

项目	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^\circ$ )	弹性 模量/ GPa	泊松 比
V 级围岩	18.2	121.5	26.5	1.5	0.4
隧道衬砌	25.0	—	—	35.5	0.2

算,即有:

$$q = \frac{\gamma R_2 \left[ 1 + 2 \tan \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right]}{\lambda \tan \varphi} \quad (1)$$

式中: $\gamma$  为围岩重度 ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $R_2$  为拟建输水隧道的开挖直径 (m);  $\varphi$  为围岩内摩擦角 ( $^\circ$ );  $\lambda$  为隧道拱顶部围岩的侧压力系数,为偏于安全,取  $\lambda = 1.0$ 。

而圆形隧道衬砌所承受的水平侧压力  $e$  则按主动土压力来计算。为偏于安全,侧压力  $e$  为:

$$e = (q + 2\gamma R_2) \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (2)$$

地下水的静水压力  $p$  按地下水位的高度计算,即有:

$$p = \eta \gamma_w h_i \quad (3)$$

式中: $\gamma_w$  为地下水的重度 ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $h_i$  为从岩体中的地下水位至计算点的水头高度 (m);  $\eta$  为考虑衬砌渗透系数的水压折减系数,因拟建输水隧道衬砌不渗透水,故取  $\eta = 1.0$ 。

将拟建隧道在 V 级围岩深埋状况下的物理力学参数和隧道埋深以及地下水的水头高度等代入式 (1) ~ 式 (3),即可计算得到拟建圆形横断面隧道衬砌所承受的围岩压力和静水压力,结果如图 2 所示。考虑到拟建输水隧道的横断面较小,因此作用在隧道衬砌上的静水压力取最大值,并且数值均相等,如此计算所得的隧道衬砌的承载结果偏于安全。根据图 2 所示拟建隧道衬砌及其所承受的荷载,按照平面应变的荷载与结构模型计算得到了圆形横断面隧道衬砌的内力及其分布,结果如图 3 所示。

由图 3 可见,拟建输水隧道厚度为  $280\text{mm}$  的钢筋混凝土衬砌在 V 级围岩深埋状况下承受围岩压力和地下水静水压力时截面的安全系数最小值为 8.3,该数值高于隧道钢筋混凝土衬砌安全系数不小于 2.0 的要求。因此拟建输水隧道厚度为  $280\text{mm}$  的高性能耐腐蚀 C55 钢筋混凝土衬砌在 V 级围岩断层破碎带具有较高的承载安全性,同时也能满足在 III 级和 IV 级围岩深、浅埋地层中的承载安全性要求。

## 3 输水隧道衬砌预制管片分块模式

在计算拟建小断面输水隧道衬砌内力和分析

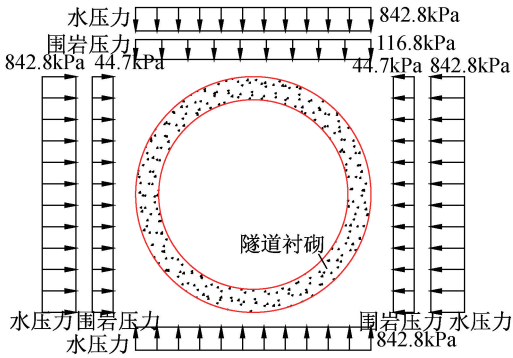


图2 隧道衬砌所承受荷载

Fig. 2 Dead loads applied on tunnel lining

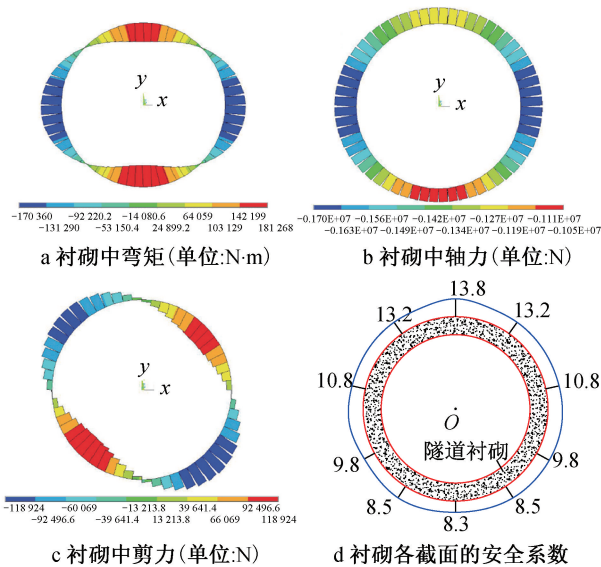


图3 隧道衬砌内力和安全系数

Fig. 3 Internal forces of tunnel lining and its safety factors

其安全性的基础上,就该隧道衬砌划分为预制管片的设计方法进行研究。

### 3.1 预制管片分块设计方法

图 1a 所示隧道衬砌仅为无裂缝、无孔隙和无施工缝的理想衬砌,当采用现浇混凝土工艺时受浇筑工艺或混凝土振捣不密实等因素制约,混凝土衬砌中往往存在不同程度的裂缝、蜂窝甚至强度不足等质量缺陷,而采用标准化和工业化预制的管片来拼装隧道衬砌时则可有效避免现浇衬砌中存在的上述质量缺陷<sup>[1,7,9-10]</sup>。现以图 1 为研究对象,就该拟建输水隧道拼装式预制管片的分块和结构形式进行研究和设计。

国内对采用盾构法或 TBM 法建造输水隧道时,研究多集中于大断面隧道预制管片的结构设计,而针对小断面输水隧道预制管片结构的设计方法研究较少。借鉴国内采用盾构法建造城市地铁区间

隧道和长距离输送石油天然气越江隧道中所采用的拼装式衬砌横断面和预制管片的设计特点<sup>[6-11]</sup>,并结合国内以盾构法或 TBM 法建造并投入使用的输水隧道预制管片结构形式<sup>[2-3,5]</sup>,将拟建输水隧道的拼装式衬砌设计为由 1 块封顶块、2 块邻接块和 3 块标准共 6 块预制管片拼装成型。

拼装式隧道衬砌中预制管片的分块和数量的确定需要考虑预制管片承载能力、管片制作、运输便利性、拼装精度以及管片防水性能和工程造价等因素。国内外在确定拼装式隧道衬砌的预制管片时,着重依据同一横断面的现浇隧道衬砌在围岩压力和地下水静水压力等作用下的内力值,尤其是根据衬砌中的弯矩值及其特征来划分管片,即将拼装式隧道衬砌中预制管片的接缝设置在隧道衬砌的 0 弯矩截面或弯矩较小的截面处<sup>[1,7,9-10]</sup>。但针对盾构法隧道工程的实践和试验研究表明,用根据隧道衬砌 0 弯矩截面或弯矩较小截面划分的管片来拼装隧道衬砌后,隧道衬砌在预制管片接缝位置处的弯矩并非为 0,因而预制管片的分块可以不按照隧道衬砌中 0 弯矩截面进行设计<sup>[1,6-7,9,11]</sup>。为此,输水隧道衬砌预制管片的分块和接缝位置的设置不以衬砌中的 0 弯矩截面为依据。

现根据图 1 中的几何特征来研究拟建输水隧道衬砌管片的划分和设计方法。在图 1b 的直线段  $OO_1$  的左侧过圆心  $O$  作直线段  $OA$ ,使  $OA$  分别与组成圆形横断面隧道衬砌轮廓的外侧和内侧的圆周相交,交点分别为  $A$  和  $A'$ ,如图 4 所示。然后在直线段  $OO_1$  的右侧过圆心  $O$  作直线段  $OB$ ,使  $OB$  与组成圆形横断面隧道衬砌轮廓的外侧和内侧的圆周相交,交点分别为  $B$  和  $B'$ ,并使直线段  $AA'$  和  $BB'$  以过圆心  $O$  的直线段  $OO_1$  呈左右对称。

令直线段  $AA'$  和  $BB'$  之间所夹的锐角为  $\alpha_1$ 。以同样的方法在图 4a 中作出 8 条直线段,分别为  $CC', DD', EE', FF', II', JJ', KK'$  和  $LL'$ 。使直线段  $CC'$  和  $DD', EE'$  和  $FF', II'$  和  $LL'$  以及  $JJ'$  和  $KK'$  均以竖向直线段  $OO_1$  呈左右对称。由此可令直线段  $CC'$  与  $DD'$  之间所夹的锐角为  $\alpha$ ,而使直线段  $EE'$  和  $FF'$  之间所夹的锐角为  $\alpha_2$ ,使  $CC'$  和  $II', DD'$  和  $LL', LL'$  和  $KK', KK'$  和  $JJ'$  之间以及  $II'$  和  $JJ'$  之间所夹的锐角均为  $\beta$ ,如图 4a 所示,各圆心角的单位均以 $^\circ$ 计。

同时,在图 4a 中以竖向直线  $OO_1$  的端点  $O_1$  为起始点,将半径为  $R_3 = 1\ 290\text{mm}$  的圆周划分为  $m$  等份,并且将该圆周上的各等份点分别定义为点  $O_1, O_2, O_3, \dots, O_m$ 。则这些等份点实际上就带代表了各预制管片上沿隧道纵向的前、后端面内需要设置的

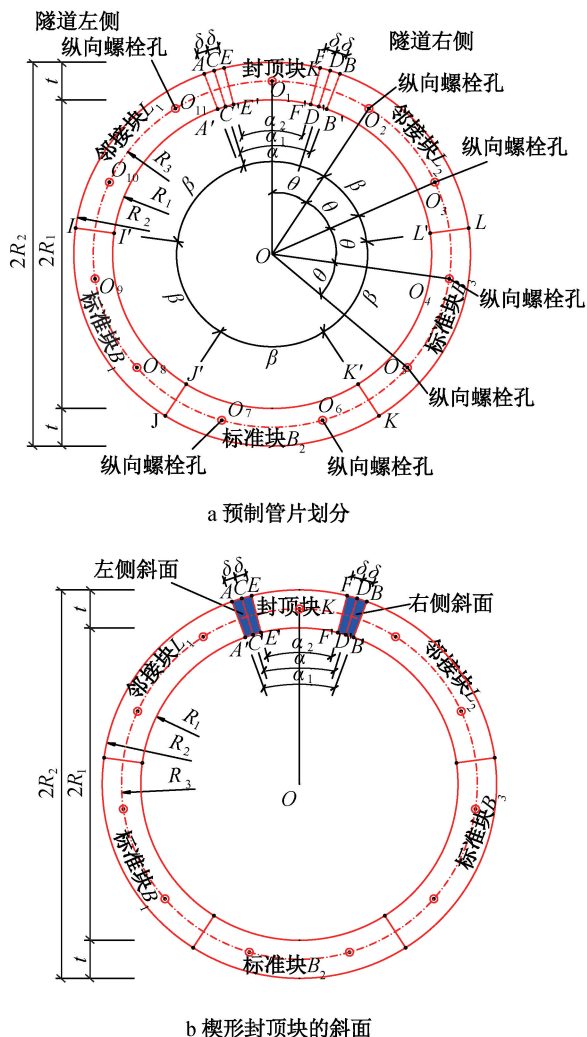


图4 圆形横断面隧道衬砌管片划分

Fig. 4 Segmentation of the tunnel lining with round cross section

螺栓安装孔的点位。当过圆心  $O$  和点  $O_1, O_2, O_3, \dots, O_m$  之间可作直线段  $OO_1, OO_2, OO_3, \dots, OO_m$  等,使直线段  $OO_1$  和  $OO_2$  之间、直线段  $OO_2$  和  $OO_3$  之间以及直线段  $OO_{m-1}$  和  $OO_m$  之间等的夹角则均为  $\theta$ , 该角度也属于圆心角,其单位以 $^\circ$ 计。

根据上述设计方法便可构建出如图4所示圆形横断面隧道衬砌的预制管片分块图。由此得到拼装式输水隧道1圈的衬砌由1块封顶块K,2块邻接块  $L_1, L_2$  以及3块标准块  $B_1, B_2, B_3$  组成,管片分块如图4a所示,若设拟建输水隧道1圈的预制管片数量为  $n$ ,则  $n=6$ 。

为便于分析,在上述角度中,将圆心角  $\alpha$  定义为封顶块K的圆心角,将圆心角  $\beta$  定义为邻接块  $L_1, L_2$  和各标准块  $B_1, B_2, B_3$  的圆心角,其单位均以 $^\circ$ 计。从图4a所示预制管片分块模式及其圆心角的几何特征可得,封顶块仅有1块,而邻接块有2

块,标准块则有3块。封顶块K的圆心角  $\alpha$  应小于邻接块  $L_1, L_2$  和标准块  $B_1, B_2, B_3$  的圆心角  $\beta$ ,且邻接块  $L_1, L_2$  和标准块  $B_1, B_2, B_3$  的圆心角均相等。由于6块预制管片可拼装成1圈隧道衬砌,因此封顶块K的圆心角  $\alpha$  和邻接块  $L_1, L_2$  以及标准块  $B_1, B_2, B_3$  的圆心角  $\beta$  之间应满足下式:

$$\alpha + (n - 1)\beta = 360^\circ \quad (4)$$

式中: $n$ 为圆形横断面隧道衬砌所划分的预制块数量,此处  $n=6$ 。

在图4所示1圈预制管片中,通常将封顶块K设计为楔形块,其目的为:①可以利用楔形块来调整隧道衬砌中管片的位置和角度,使预制管片按照线路中圆曲线和竖曲线半径的要求来拼装成隧道衬砌,以满足线路中设置圆曲线和竖曲线的要求;②使各管片通过楔形块紧密地拼接在一起,形成环向和纵向的榫卯结构,进而及时承担来自周围地层的压力和地下水压力。

在图4所示楔形封顶块K中,由区域  $AA'E'E$  和区域  $BB'F'F$  所围成的面积就代表了楔形块K的左侧、右侧斜面,如图4b所示。其中直线段  $CC'$  和  $DD'$  就是楔形封顶块的两侧斜面上沿隧道纵向上分割其长度的中心线,由区域  $CC'D'D$  所围成的面积就代表了封顶块K沿隧道纵向上分割其长度的中心截面。而由区域  $AA'B'B$  所围成的面积就是封顶块K沿隧道纵向上的后端面,由区域  $EE'F'F$  所围成的面积则代表了封顶块K沿隧道纵向上的前端面,如图4b所示。需要指出的是,由于图4b是沿隧道纵向上的横断面正视图,因此图4b中能够全部显示出封顶块K的前端面,而后端面因前端的遮挡仅可显示出了部分断面。

现根据图4中的几何关系来分析拟建输水隧道1圈衬砌预制管片的设计和计算方法。前文已述及,在图4所示顶块K中,其圆心角为  $\alpha$ 。邻接块  $L_1$  和邻接块  $L_2$  的圆心角以及标准块  $B_1, B_2$  和  $B_3$  的圆心角均为  $\beta$ ,根据式(4)可得:

$$\beta = \frac{360^\circ - \alpha}{n - 1} \quad (5)$$

若令封顶块K沿隧道纵向上组成其后端面  $AA'B'B$  的内、外侧圆弧所对应的圆心角为  $\alpha_1$ ,令封顶块K沿隧道纵向上组成其前端面  $EE'F'F$  的内、外侧圆弧所对应的圆心角为  $\alpha_2$ ,根据图4b中的几何关系可得到直线段  $AA'$  和  $CC'$  之间、 $CC'$  和  $EE'$  之间、 $FF'$  和  $DD'$  之间以及  $DD'$  和  $BB'$  之间所夹的圆心角  $\delta$  均相等,且有:

$$\delta = \frac{1}{4}(\alpha_1 - \alpha_2) \quad (6)$$

式(6)表明,若已知组成封顶块前、后端面的内、外侧圆弧的圆心角  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ ,即可求得封顶块左、右两侧斜面被中心截面分割后所对应的圆心角  $\delta$ ,由此进一步可得到左、右侧斜面所对应的圆心角,即  $2\delta$ 。至此,利用圆心角  $\delta$  就可以在封顶块 K 中心截面所对应的圆心角  $\alpha$  基础上设计其左、右斜面和前、后端面。

设预制管片沿半径  $R_3 = 1\ 290\text{mm}$  的圆周上拟设置的用于安装相邻管片的纵向螺栓孔的点位数量为  $m$ ,根据图 4 所示预制管片中前、后端面上 2 个相邻纵向螺栓孔之间的圆弧所对应的圆心角  $\theta$  均相等,即可得到拼装式隧道衬砌中 1 圈管片上相邻的 2 个螺栓孔之间圆弧所对应的圆心角  $\theta$  为:

$$\theta = \frac{360^\circ}{m} \quad (7)$$

根据式(7)计算得到的圆心角  $\theta$ ,就可以在半径为  $R_3 = 1\ 290\text{mm}$  的圆周上自竖向直线段  $OO_1$  为起始边,沿其左侧按顺时针或沿其右侧按逆时针方向过圆心  $O$  以每间隔  $\theta$  角作直线,使该直线与半径为  $R_3 = 1\ 290\text{mm}$  的圆周相交,这些交点就是预制管片沿隧道纵向上的前、后端面内需要设置纵向螺栓孔的点位。

此外,为控制用预制管片拼装的隧道衬砌在环向和纵向上因管片承受地层压力、地下水静水压力时所引起的错台量,提高隧道衬砌预制管片的拼装质量,充分发挥钢筋混凝土预制管片的受压承载能力,在每块预制管片沿隧道纵向上的前、后端面内还需要分别设置凸榫和凹榫,并同时考虑设置凸榫和凹榫后管片仍能够实现错缝拼装。

与管片上设置纵向螺栓孔的点位相同,由于圆形横断面隧道衬砌的内半径  $R_1 = 1\ 150\text{mm}$ ,因此沿该圆形横断面的圆心  $O$  旋转任意一块预制块至指定位置,其内径均相同。为此,先用 6 块预制管片拼装完成 1 圈衬砌,之后在其前面或后面再拼装与其相邻的另外 1 圈衬砌。拼装时,需要将待拼装的 1 圈管片沿隧道衬砌横断面的圆心  $O$  以顺时针或逆时针方向旋转角度  $\theta$  后再加以拼装,如此拼装的 1 圈预制管片上的纵向螺栓孔便与已拼装的 1 圈预制管片上的纵向螺栓孔孔位完全重合,即可实现前后相邻预制管片上纵向螺栓的定位,同时便于安装纵向螺栓。但前、后拼装管片之间的纵向接缝则会相互交错,从而可实现沿隧道纵向上以错缝方式拼装管片形成封闭的隧道衬砌。

基于以上原理,在封顶块 K 纵向螺栓孔的点位即  $O_1$  点的右侧,过圆心  $O$  作一直线段  $OM_1$ ,使直线

段  $OM_1$  与直线段  $OO_1$  之间所夹的锐角为  $2\delta$ ,该角度即为封顶块左、右侧斜面所对应的圆心角,且使直线段  $OM_1$  与半径  $R_4 = 1\ 260\text{mm}$  的圆周相交,交点即为  $M_1$ ,则点  $M_1$  就可以作为封顶块 K 上沿隧道纵向前、后端面上设置凹凸榫的点位。同理,采用上述的方法可分别得到其余 5 个管片上设置纵向凹凸榫的点位。以上所述是在点位  $O_1$  的右侧设置封顶块前、后端面上凹凸榫的点位,也可采用同样方法在点位  $O_1$  的左侧设置凹凸榫的点位。本文中仅以右侧为例来说明凹凸榫点位设置的方法。

必须指出的是,此处管片上设置凹凸榫点位的圆周半径为  $R_4 = 1\ 260\text{mm}$ ,而在管片上设置纵向螺栓孔点位的半径为  $R_3 = 1\ 290\text{mm}$ ,两者不相等,其原因在于避免设置的凹凸榫对螺栓孔点位产生影响。如果设置的凹凸榫和螺栓孔点位之间互不形成干扰,也可以将管片上的凹凸榫点位设置在半径为  $R_3 = 1\ 290\text{mm}$  的圆周上,此时便有  $R_4 = R_3 = 1\ 290\text{mm}$ 。本文中为便于分析和说明,将预制管片上的纵向凹凸榫的点位设置在半径为  $R_4 = 1\ 260\text{mm}$  的圆周上。

根据图 4 中所划分的预制管片分块图,拟建输水隧道封顶块 K 的前、后端面上仅能够设置 1 个螺栓孔,而在邻接块  $L_1$  和邻接块  $L_2$  以及标准块  $B_1$ 、标准块  $B_2$  和标准块  $B_3$  的前、后端面上则可设置 2 个螺栓孔。若令隧道 1 圈衬砌的预制管片上可设置的纵向螺栓孔的数量为  $m$ ,则按以上各管片上设计的螺栓孔数,即可得到  $m = 1 + 4 + 6 = 11$ 。由此表明拟建输水隧道 1 圈衬砌的管片前、后端面上可设置 11 个纵向螺栓孔。

为便于分析,预制管片前端面或后端面上纵向螺栓孔的点位可分别定义为点  $O_1, O_2, O_3, \dots, O_{11}$ 。根据上述方法可得到在这些螺栓孔点位的右侧或者左侧需要设置凹凸榫的点位。以隧道衬砌的右侧为例,将凹凸榫的点位分别定义为点  $M_1, M_2, M_3, \dots, M_{11}$ 。如此便得到各预制管片的前、后端面上沿隧道纵向上设置凹凸榫的点位,具体如图 5 所示。

当确定好各预制管片沿隧道纵向上前、后端面内的凹凸榫点位后,就可以在该点位结合管片的内侧、外侧圆弧所对应的半径、管片的厚度来设置凹凸榫,其结构可设计为圆台状或者圆柱状等。以下对各预制管片前、后端面上凹凸榫的具体结构进行分析。

### 3.2 预制管片纵向凹凸榫的结构形式及其拼装精度

前文已述及,在预制管片沿隧道纵向上的前、后

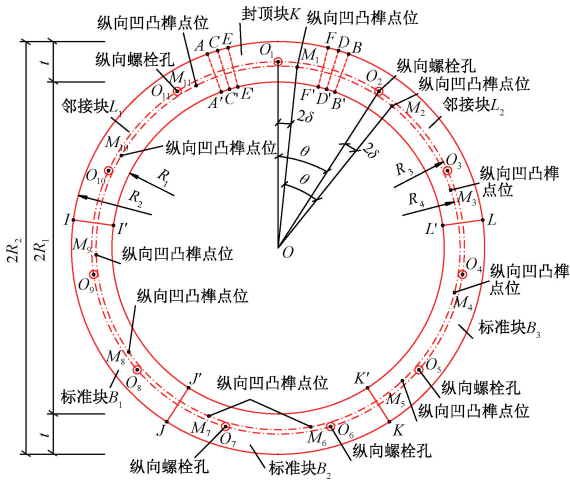


图 5 预制管片上凹凸榫的点位  
Fig. 5 Point location for convex and concave tenons on precast segments

两个端面设置凹凸榫的目的就在于为预制管片沿纵向上拼装时提供定位,并以此来降低和控制预制管片拼装后沿隧道环向和纵向上管片之间所产生的错台量,保持隧道内壁面的平整性,使管片所承受的压力作用于管片的压力中轴线上,进而消除管片所承受的偏载和应力集中现象,充分发挥预制管片的轴向受压承载特性。根据预制管片各分块的形式,分别提出如图 6 所示 2 种凹凸榫结构。

制在 1mm 之内。圆台状和圆柱状凸榫的高度和凹榫的深度均应  $\geq 20\text{mm}$ 。此外,在加工和制作预制管片时凹凸榫的半径和长度以及高度的误差均应为 0,预制管片外侧圆弧半径的误差为  $\pm 1\text{mm}$ ,其内侧圆弧半径的误差为 0,以便制作出高精度的管片来满足高精度拼装的要求。

#### 4 预制管片结构形式和防水设计

##### 4.1 预制管片的详细结构

至此根据输水隧道圆形横断面衬砌的几何特征定义和构建了设计与划分预制管片的参数,即圆心角  $\alpha, \alpha_1, \alpha_2, \beta, \delta$  和  $\theta$ ,预制管片的分块数量  $n$  和 1 圈拼装式衬砌中各预制管片上需要设置的纵向螺栓孔和凹凸榫的数量  $m$ 。需要指出的是,预制管片上纵向螺栓孔的设置数量应和凹凸榫的设置数量相等。

根据前文分析和提出的针对小断面盾构法输水隧道预制管片的分块方式,当已知小断面盾构法输水隧道衬砌的内半径  $R_1$ 、外半径  $R_2$  和预制管片的分块数量  $n$ ,并根据国内外采用盾构法建造城市地铁区间隧道、高速公路以及高速铁路和大断面输水隧道预制管片结构的设计特点<sup>[1-2,6,8-12]</sup>,拟定封顶块 K、邻接块  $L_1, L_2$  和标准块  $B_1, B_2, B_3$  的基本几何参数,就可利用本文提出的式(4)~式(7)分别计算和设计得到拟建输水隧道拼装式衬砌预制管片的分块数量和纵向螺栓孔孔位,并由此提出预制管片的详细结构。

借鉴国内外盾构法隧道中楔形封顶块的设计参数,楔形封顶块 K 的圆心角为锐角  $\alpha$ ,其取值可为  $\alpha = 20.5^\circ \sim 42.5^\circ$ 。考虑到拟建输水隧道为小断面的山岭隧道,其 1 圈衬砌由 6 块预制管片拼装成型,因此预制块的数量  $n=6$ 。此外,封顶块 K 的几何尺寸易适中,其圆心角  $\alpha$  应小于邻接块和标准块的圆心角  $\beta$ ,故可选取  $\alpha = 34^\circ$ 。将  $\alpha = 34^\circ$  和拟建隧道的 1 圈拼装式衬砌的预制块数量  $n=6$  代入式(5)可计算得到除封顶块 K 以外的邻接块和标准块的圆心角为  $\beta = 65.2^\circ$ 。

根据图 4a 中楔形封顶块 K 的后端面内、外侧圆弧所对应的圆心角  $\alpha_1$  和前端面内、外侧圆弧所对应的圆心角  $\alpha_2$  与封顶块的圆心角  $\alpha$  之间的几何关系,可得到三者之间应满足

$$\alpha_2 \leq \alpha \leq \alpha_1 \tag{8}$$

前面已确定封顶块的圆心角  $\alpha = 34^\circ$ ,考虑式(8)的关系式,并借鉴国内外盾构法隧道预制管片的设计参数,可选取  $\alpha_1 = 40^\circ, \alpha_2 = 28^\circ$ ,并将两者代入式(6)可计算得到图 4 和图 5 中直线段 AA'和 CC'

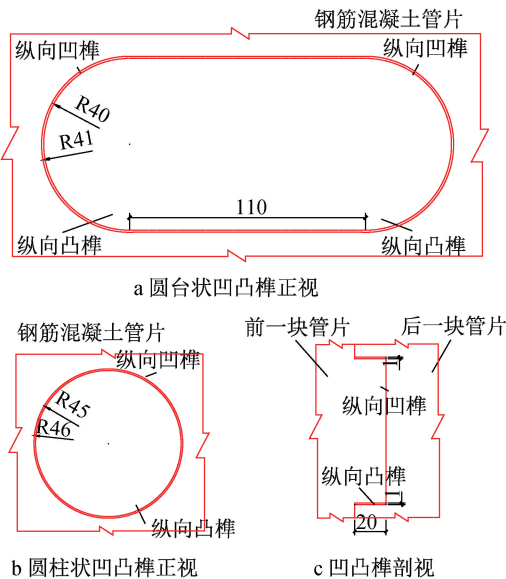


图 6 预制管片上的凹凸榫结构形式  
Fig. 6 Structural form of concave and convex tenon on precast segments

图 6 所示为沿隧道纵向上前、后相邻的 2 圈预制管片拼装后各管片前、后端面上拟设置的圆台状和圆柱状凹凸榫。为使管片凹凸榫高精度对接,凹榫的轮廓应大于凸榫的轮廓,两者之间的间隙应控

之间以及  $DD'$  和  $BB'$  之间所夹的圆心角  $\delta = 3^\circ$  , 由此得到封顶块左、右侧斜面的圆心角为  $2\delta = 6^\circ$ 。

前面已述及, 为加强拼装式隧道衬砌沿纵向上相邻的 2 圈预制管片之间的纵向连接, 需要在管片上设置安装管片的纵向弯螺栓或销钉的螺栓孔。将纵向螺栓孔的数量  $m = 11$  代入式(7)可计算得到 1 圈衬砌中每个管片前、后端面上相邻的 2 个螺栓孔之间圆弧所对应的圆心角  $\theta = 32.73^\circ$  , 并由此可以确定出输水隧道 1 圈衬砌中每个预制管片上螺栓孔的孔位。

结合图 5 所示预制管片上纵向凹凸榫定位点的设计方法, 利用计算得到的圆心角  $\theta = 32.73^\circ$  和封顶块左、右侧斜面的圆心角  $\delta = 3^\circ$  就可设计得到组成拟建隧道 1 圈衬砌的预制管片上共 11 个凹凸榫的点位, 即点  $M_1, M_2, M_3, \dots, M_{11}$ , 其具体位置如图 5 所示。

将上述用于设计拟建圆形横断面输水隧道衬砌的几何参数进行总结, 得到的体现隧道衬砌圆形横断面几何特征的设计参数及其设计值如表 2 所示。根据表 2 中所列出的各参数并结合图 4 ~ 6 所示圆形横断面隧道衬砌预制管片的分块方式, 可设计得到拟建输水隧道圆形横断面衬砌及其预制管片的几何特征如图 7 所示。图 7 所示为由 1 块封顶块、2 块邻接块和 3 块标准块拼装的拟建输水隧道 1 圈衬砌横断面, 包括各预制管片中沿隧道纵向上螺栓孔和纵向凹凸榫及其位置。图 7a 所示预制管片纵向间设置圆台状的凹凸榫, 而图 7b 则显示出在预制管片纵向之间采用圆柱状的凹凸榫。两者相比, 圆台状的凹凸榫具有较高的抗剪切能力<sup>[11]</sup>, 因此推荐在拟建输水隧道管片中采用圆台状的凹凸榫。

根据图 7 中所示预制管片及其几何尺寸, 并结合盾构法建造的地铁区间隧道管片结构设计特点, 可分别提出拟建隧道预制管片的结构详图, 封顶块 K 的结构详图如图 8 所示, 邻接块  $L_1$  的结构详图如图 9 所示, 标准块  $B_1$  的结构详图如图 10 所示。拟建输水隧道 1 圈拼装式衬砌中预制管片的质量和圆心角的参数如表 3 所示。由表 3 可看出, 封顶块 K 的圆心角和质量均小于邻接块和标准块的圆心角和质量。

由于封顶块为楔形块, 因而在图 8a 的正视图和

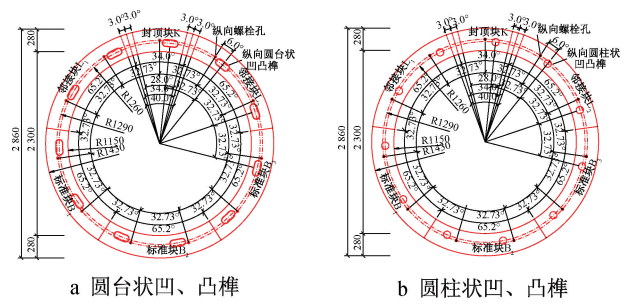


图 7 输水隧道管片衬砌横断面及其几何特征  
Fig. 7 Cross section of segmental lining for water conveyance tunnel and its geometric features

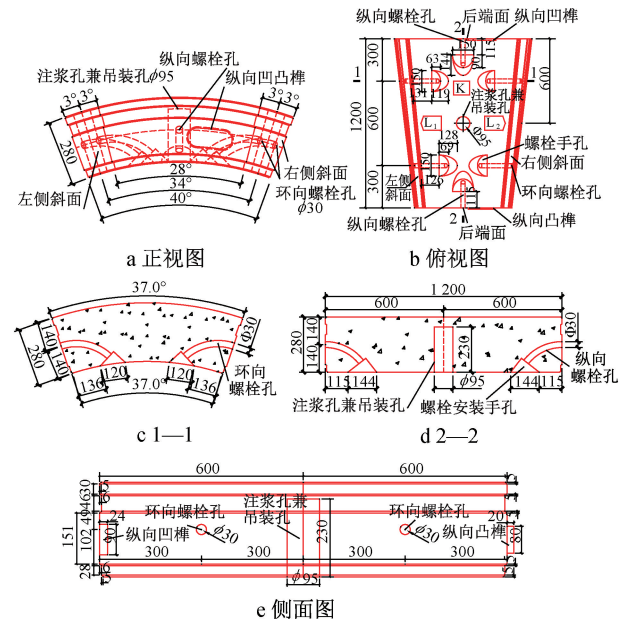


图 8 封顶块结构详图

Fig. 8 Detailed structure of capped segment

表 3 预制管片的圆心角和质量

Table 3 Central angle and mass of precast segments

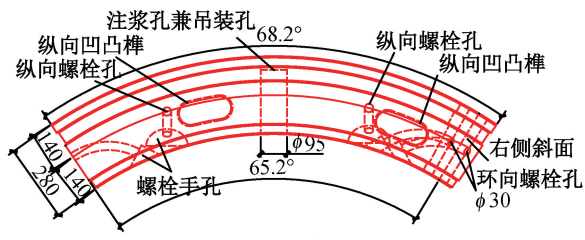
项目	管片名称		
	封顶块	邻接块	标准块
圆心角/(°)	34.0	65.2	65.2
数量/只	1	2	3
幅宽/mm	1 200	1 200	1 200
厚度/mm	280	280	280
质量/kg	643.02	1 232.08	1 233.09
强度等级	C55	C55	C55

图 8b 的俯视图中均示出了其左、右两侧的斜面, 并且在图 8a 中还示出环向螺栓孔和纵向螺栓孔的凹凸榫孔位。图 8b 为封顶块的俯视图, 图 8b 中示出

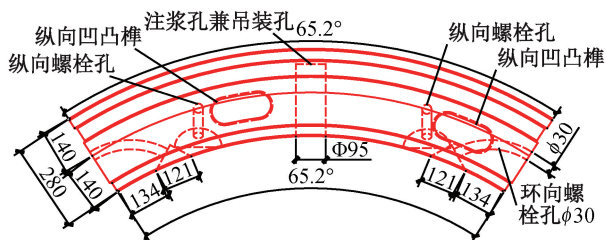
表 2 隧道拼装式衬砌圆形横断面几何设计参数

Table 2 Geometric design parameters for the round cross-section of segmental tunnel lining

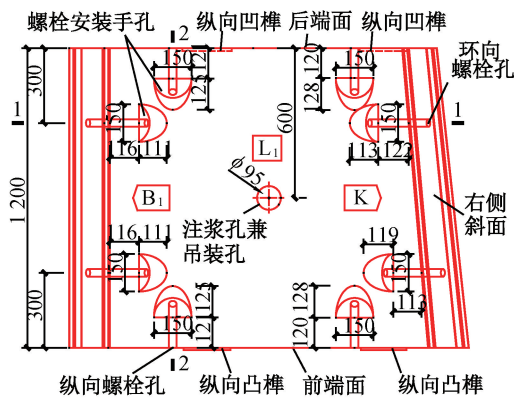
项目	圆心角几何设计值/(°)					半径几何设计值/mm				厚度 t/mm	
	$\alpha$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\beta$	$\delta$	$\theta$	$R_1$	$R_2$	$R_3$		$R_4$
设计值	34	40	28	65.2	3	32.73	1 150	1 430	1 290	1 260	280



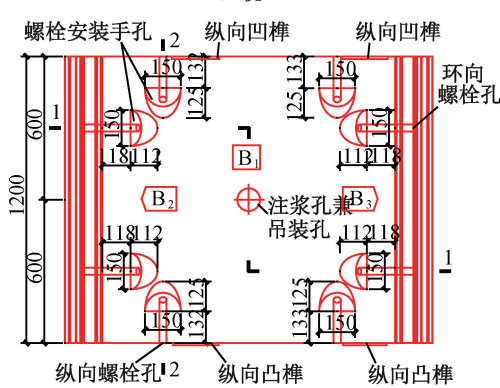
a 正视图



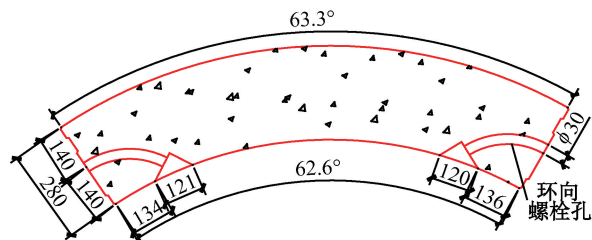
a 正视图



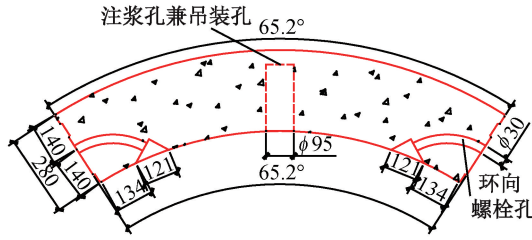
b 俯视图



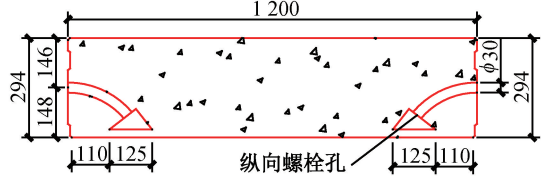
b 俯视图



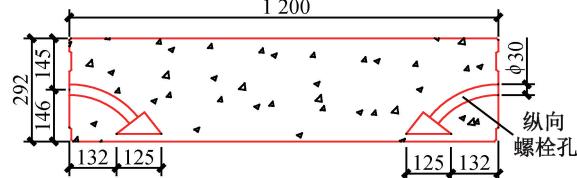
c 1—1



c 1—1



d 2—2



d 2—2

图9 邻接块 L<sub>1</sub> 结构详图

图10 标准块 B<sub>1</sub> 结构详图

Fig. 9 Detailed structure of adjacent segment L<sub>1</sub>

Fig. 10 Detailed structure of standard segment B<sub>1</sub>

了安装纵、环向螺栓的安装手孔和管片的编号与对位标。设置管片编号和对位标的目的在于在施工期防止管片的错误拼装。图8c和图8d则分别示出了封顶块的俯视图中沿1—1和2—2的剖面。1—1和2—2剖面中显示出纵向和环向螺栓孔的位置。图8e为预制管片的侧面图,由图8e可看出预制管片的外部形态和凹凸榫。

邻接块的详细结构如图9所示。由于与封顶块K相接的邻接块L<sub>1</sub>和邻接块L<sub>2</sub>的结构相同,因此仅以邻接块L<sub>1</sub>为例进行说明。拼装时应将邻接块L<sub>1</sub>的右侧斜面与封顶块L的左侧斜面相互对接,因而邻接块L<sub>1</sub>仅有右侧斜面,而其左侧为平直面,如图9a和图9b所示。在邻接块L<sub>1</sub>中的前、后端面上

分别设置有凹凸榫。在其环向共设置了4个螺栓孔。图9c和图9d分别为邻接块L<sub>1</sub>的俯视图中1—1,2—2剖面,可反映出管片中纵向和环向螺栓孔的设置方式。

标准块B<sub>1</sub>的结构详图如图10所示,由于标准块B<sub>1</sub>、标准块B<sub>2</sub>和标准块B<sub>3</sub>的结构均相同,且其左、右两侧面均为平直面,因此仅以标准块B<sub>1</sub>为例示出其详细结构。图10a和图10b分别为标准块的正视图和俯视图,并在图10a和图10b中分别示出了纵向螺栓孔和凹凸榫以及预制管片的编号和对位标。而图10c和图10d则分别为其俯视图中1—1和2—2的剖面图,从剖面图中可清晰地示出了标准块中纵向和环向螺栓孔的设置位置。

因预制管片沿隧道纵向上的宽度均为 1 200mm,且封顶块和邻接块以及标准块的侧面结构图均相同,故在文中未再示出邻接块  $L_2$  和标准块  $B_2, B_3$  的侧面图。此外,将管片中环向螺栓孔的几何参数设计成纵向螺栓孔的几何参数,以降低管片制作和拼装的难度。另外从加工预制管片的模具而言,根据本文提出的管片结构,制作封顶块、邻接块和标准块各需要 1 个模具,因而可减少加工和制作管片的模具数量,有利于降低工程造价。

#### 4.2 隧道管片衬砌接缝防水构造

为防止管片拼装成隧道衬砌后围岩中地下水沿管片之间的接缝渗透至隧道内,可沿预制管片的四周设置“一”形槽,并在其内粘贴三元乙丙橡胶 (EPDM) 和遇水膨胀橡胶。在隧道运营期间,当地下水通过管片接缝处渗入三元乙丙橡胶时,镶嵌在三元乙丙橡胶内的遇水膨胀橡胶会发生膨胀,膨胀的橡胶会封闭其与混凝土管片之间的间隙,进而起到阻止地下水渗透的作用。各预制管片的“一”形槽内三元乙丙橡胶的粘贴方式和衬砌管片之间接缝的防水构造如图 11 所示。

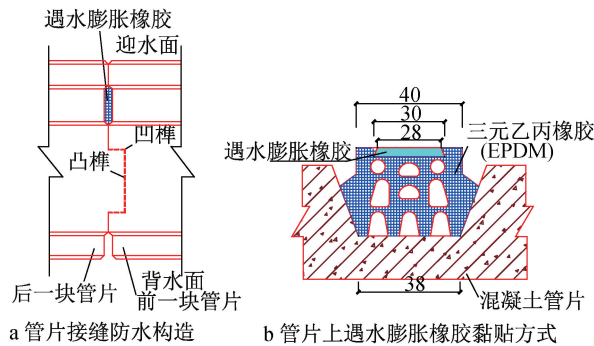


图 11 管片衬砌接缝防水与构造

Fig. 11 Waterproofing and structure of segmental lining joint

图 11a 所示为用预制管片拼装的隧道衬砌沿隧道纵向上前、后相邻的 2 块管片在接缝处的防水构造和凹凸榫的对接方式。在隧道衬砌的迎水面处,当地下水渗入遇水膨胀橡胶时,该处的橡胶会吸水膨胀进而封堵其与管片之间的间隙以起到止水和堵水的作用。图 11b 则示出预制管片上“一”形槽内粘贴遇水膨胀橡胶和三元乙丙橡胶的方式,在三元乙丙橡胶外露的顶面镶嵌有遇水膨胀橡胶。

### 5 输水隧道预制管片衬砌拼装方法

#### 5.1 管片衬砌的错缝拼装

用预制管片拼装成隧道衬砌后,若组成隧道衬砌的管片之间纵向接缝沿隧道纵向上呈一条直线,且相互平行,则以此种方式用管片拼装成的衬砌被

称为通缝式管片衬砌,若管片之间的纵向接缝相互交错不能形成一条直线,则以此种方式用管片拼装成的衬砌就被称为错缝式管片衬砌。将预制的钢筋混凝土管片以错缝方式进行拼装,则成型的隧道衬砌就会形成“榫卯效应”,此种衬砌具有较大的纵向刚度、整体稳定性和良好的抗变形能力,能够有效地分散所承受的地层压力和地下水静水压力等荷载,具有较强的抗震性能,还可减少隧道衬砌的不均匀沉降以及接缝处的应力集中现象。此外,管片衬砌中相互交错的接缝还能够延长渗漏水的路径并降低其连续性,有利于降低管片渗水的可能性,因此将管片以错缝方式拼装的隧道衬砌还具有防水性能和抗震性能<sup>[6-13]</sup>。

考虑到拟建输水隧道的围岩为淤泥质土、千枚状粉砂岩、砾岩和泥质粉砂岩等,且隧道洞身穿越 6 条断层或次生断裂带,围岩中富含地下水,因此推荐管片以错缝方式来拼装进而形成封闭成环的输水隧道衬砌。借鉴国内外采用盾构法建造大断面输水隧道以及城市地铁区间隧道中用于拼接管片所采用的螺栓型号<sup>[6-12]</sup>,拟建输水隧道在环向和纵向上均采用 M24 弯螺栓来拼接拟建隧道中的管片,弯螺栓的强度等级为 8.8 级。拼接 1 圈隧道衬砌共需要 12 只环向弯螺栓和 11 只纵向弯螺栓。

预制管片在施工期间拼装的工序为:随着盾构机的掘进,在其刀盘尾部已开挖出的隧道底板位置先拼装标准块  $B_2$ ,然后在其左、右侧分别拼装与标准块  $B_2$  相接的标准块  $B_1$  和标准块  $B_3$ ,然后在右侧拼装与标准块  $B_1$  邻接的邻接块  $L_1$ ,在左侧拼装与标准块  $B_3$  邻接的邻接块  $L_2$ ,最后再拼装封顶块 K,使预制管片封闭成环状结构。在拼装封顶块 K 时应将其沿隧道的径向上顶入。由封顶块 K 和邻接块  $L_1$ 、邻接块  $L_2$  以及标准块  $B_1$ 、标准块  $B_2$  和标准块  $B_3$  按错缝方式拼装成型的 1 圈隧道衬砌的横断面设计如图 12 所示。图 12 中还显示出管片之间环向弯螺栓的安装方式以及在管片上安装纵向螺栓的孔位。为清楚地反映预制管片的分块、螺栓孔和凹凸榫的位置,图 12 中未显示出纵向螺栓。

在图 12 所示输水隧道预制管片衬砌的横断面中,在每块预制管片的前端面或者后端面上还需要粘贴丁腈橡胶软木衬垫,其目的在于填充管片沿纵向之间的间隙,以缓解管片拼装后沿隧道纵向上相邻管片之间产生的局部应力集中现象,避免预制管片前、后端面混凝土受集中应力的挤压而发生破损。图 12 仅显示出拟建输水隧道拼装式管片衬砌的典型横断面,并未显示预制管片之间的错缝拼装方式。

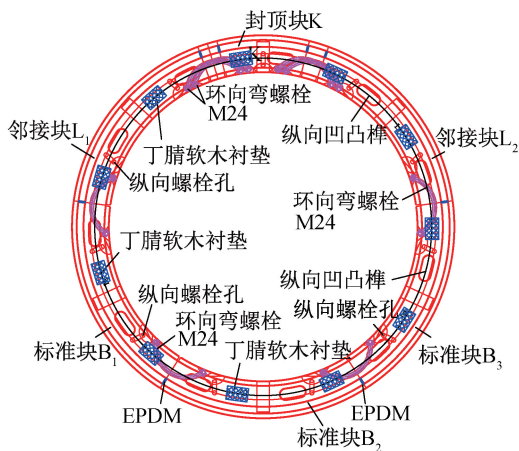


图 12 隧道拼装式衬砌横断面

Fig. 12 Cross section of the tunnel assembled lining

以错缝方式拼装的隧道衬砌就是在拼装完 1 圈预制管片后,在其前面或后面继续拼装另外 1 圈预制管片,具体做法就是将待拼装的标准块、邻接块或封顶块以横断面内的圆心  $O$  为中心点沿顺时针或逆时针旋转圆心角  $\theta = 32.73^\circ$  后依次拼装各管片直至成环。以标准块  $B_2$  为例,当前 1 圈预制管片拼装完成后,使待拼装的下圈管片中的标准块  $B_2$  与已拼装的前一圈标准块  $B_2$  之间交错  $1/2$  的管片宽度,即沿横断面的圆心  $O$  以顺时针或逆时针将待拼装的标准块  $B_2$  旋转  $32.73^\circ$  后依次拼装标准块  $B_1$ 、标准块  $B_3$ 、邻接块  $L_1$ 、邻接块  $L_2$  和封顶块  $K$ ,进而可使后拼装的 1 圈管片之间的接缝和已拼装的 1 圈管片之间的接缝沿隧道纵向上相互交错,并使纵向的凹凸榫精密对接。按如此顺序循环拼装管片便可实现以错缝方式拼装的输水隧道衬砌。根据标准块  $B_2$  在隧道圆形横断面内以其圆心角  $\theta = 32.73^\circ$  沿顺时针或逆时针旋转拼装时可有 10 种错缝拼装的衬砌形式,以封顶块  $K$  在隧道拱顶中部为例,按照错缝方式拼装的隧道管片衬砌沿  $B_1$  和  $B_2$  之间纵向接缝展开的平面如图 13 所示。

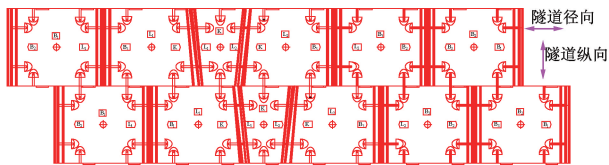


图 13 预制管片错缝拼装衬砌展开平面

Fig. 13 Unfolded plot of segmental lining with staggered joints

上述拼装方法较为复杂,不便于实际应用。因此在隧道工程施工期间,为简化管片错缝拼装工艺,只需要将前后相邻的管片沿隧道纵向错开 1 个螺栓孔即可实现管片的错缝拼装。

图 13 中仅显示出由 12 块预制管片以错缝方式拼装成 2 圈衬砌后的展开平面。从图 13 可以看出,沿隧道纵向上相邻管片之间的接缝相互交错,不能形成连续的直线。但各管片上的纵向螺栓孔和径向螺栓孔均相互精确对位,便于安装弯螺栓。

## 5.2 管片衬砌的通缝拼装

根据盾构法隧道施工的工艺要求,盾构机在工作井内始发时还需要借助负环管片向盾构机尾部的千斤顶提供推进的反力,而当盾构机成功始发并进入正常掘进后需要将始发井内的负环管片拆除。为便于拆除始发井内的负环管片,通常将 6 块管片以通缝方式进行拼装。此外,在盾构机掘进的局部地层中因某种原因如设置通道或其他结构需要拆除管片的场合时也可以将管片以通缝方式进行拼装。以通缝方式拼装的管片衬砌沿标准块  $B_1$  和  $B_2$  之间接缝展开的平面如图 14 所示。

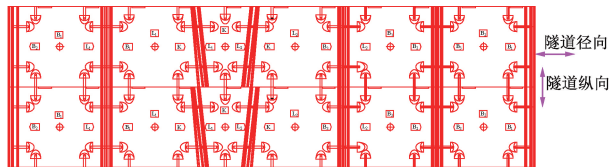


图 14 预制管片通缝拼装衬砌展开平面

Fig. 14 Unfolded plot of segmental lining with straight joints

由图 14 可看出,以通缝方式拼装管片时,沿隧道纵向上相邻的两圈衬砌中各管片的位置均相同,管片不再沿隧道横断面的圆心  $O$  沿顺时针或逆时针发生旋转,仅将其相互对接即可。如此拼装管片后,衬砌中除了封顶块与邻接块接触的纵向接缝外,邻接块和标准块之间的接缝均沿隧道纵向上形成连续的一条直线,并相互平行,如图 14 所示。

对比图 13 和图 14 可得,管片衬砌以错缝和通缝方式拼装的差别在于沿隧道纵向上前后相邻的两圈管片之间要相互交错 1 个圆心角  $\theta$ ,该圆心角  $\theta$  就是前文中所述的同一圈衬砌内管片前、后端面上两个相邻的纵向螺栓孔之间的圆弧所对应的圆心角。对于本文中拟建输水隧道而言,该圆心角  $\theta = 32.73^\circ$ ,其计算见式(7)。

与错缝拼装的管片衬砌相比,将管片以通缝方式拼装成衬砌时,其整体刚度要弱于以错缝拼装的衬砌刚度,且管片接缝处的防水也不易保证,因此不推荐将管片采用通缝方式来拼装成拟建输水隧道的衬砌。在始发井内的负环段或地层特殊地段可将预制管片按通缝方式进行拼装成衬砌。

考虑到拟建小断面山岭隧道作为输水的通道,

在长期使用期间不仅应防止被输送的水渗漏到周围地层中,同时还需要防止隧道围岩内的地下水渗漏到隧道内。因此为保证输水隧道拼装式衬砌的抗渗和防水性能,将预制钢筋混凝土管片抗渗等级设计为P12,其次在管片拼装成型后及时向管片衬砌与围岩之间压注水泥砂浆,压注的水泥砂浆注浆层厚度宜 $\geq 100\text{mm}$ 。此外在隧道洞内壁面上还需要喷涂干膜厚度 $\geq 400\mu\text{m}$ 的无溶剂环氧液体涂料,以作为隧道内的防腐和抗渗涂层。

## 6 结语

国内外对以盾构法建造的大断面隧道预制管片的结构设计和承载性能以及建造方法等开展了较多的研究和工程实践,但针对以泥水盾构法建造的小断面输水山岭隧道预制管片结构设计方法的研究还较少,尤其是尚未结合隧道衬砌的几何特点给出预制管片和螺栓孔以及凹凸榫点位设计的计算方法。本文结合环北部湾广西水资源配置工程中陆川支线中的某山岭隧道,就泥水盾构法建造的小断面输水隧道预制管片的结构设计和建造方法进行了研究。通过对基于圆形小断面输水隧道几何特征的预制管片分块方法和详细的结构研究,提出了划分预制管片、在管片上设置纵向螺栓孔以及凹凸榫点位的计算方法,并给出了预制管片的详细结构和管片衬砌的拼装方法。本文研究所得结论如下。

1) 圆形小断面输水山岭隧道拼装式衬砌中预制管片宜划分为6块,即1块楔形封顶块、2块邻接块和3块标准块,且由管片拼装成型的隧道衬砌具有较高的承载安全性。

2) 在设计圆形小断面盾构法隧道衬砌的预制管片时,需要先确定楔形封顶块的中心截面及其内、外侧圆弧所对应的圆心角 $\alpha$ 。建议封顶块的圆心角 $\alpha$ 的取值范围为 $20.5^\circ \sim 45.5^\circ$ ,并以 $0.5^\circ$ 作为每级的级差。当确定了封顶块中心截面内、外侧圆弧所对应的圆心角 $\alpha$ ,就可以利用本文中的式(5)计算得到其余的2块邻接块和3块标准块中心截面内、外侧圆弧所对应的圆心角 $\beta$ 。

3) 封顶块沿隧道纵向上后端面和前端面内、外侧圆弧所对应的圆心角之差( $\alpha_1 - \alpha_2$ )是其中心截面内、外侧圆弧所对应的圆心角 $\alpha$ 与前端面内、外侧圆弧所对应的圆心角 $\alpha_2$ 或与后端面内、外侧圆弧所对应的圆心角 $\alpha_1$ 之差的2倍,即满足关系式( $\alpha_1 - \alpha_2$ ) =  $2(\alpha_1 - \alpha) = 2(\alpha - \alpha_2) = 4\delta$ 。楔形封顶块左、右2个斜面内、外侧圆弧所对应的圆心角为 $2\delta$ ,建议设计时圆心角 $\delta$ 的取值范围为 $3^\circ \sim 10^\circ$ ,并以 $1^\circ$ 作为每

级的级差。

4) 楔形封顶块上纵向螺栓孔建议设为1个,而在各邻接块和标准块上的前、后端面上的纵向螺栓孔宜设置为2个,由此可得到小断面输水隧道1圈衬砌中所有管片沿隧道纵向上前、后端面的螺栓孔数量 $m$ ,利用式(7)可以计算出各管片上沿隧道纵向上前、后端面中相邻两个螺栓孔之间圆弧所对应的圆心角 $\theta$ 。此圆心角 $\theta$ 也是预制管片前、后端面上设置凹凸榫孔位之间圆弧所对应的圆心角,利用圆心角 $\theta$ 和 $\delta$ 就可以设计出预制管片上设置螺栓孔和凹凸榫的点位。

5) 根据计算得到的6个圆心角和所确定的圆形横断面隧道衬砌的内、外侧圆弧的半径,就可以根据本文提出的方法划分和设计得到圆形小断面输水隧道拼装式衬砌的预制块分块数量,各预制管片上的凹凸榫宜设计为圆台形状。

6) 为便于拼装和降低成型隧道纵、环向上预制管片之间发生的错台,预制管片前、后端面上凹凸榫的拼装间隙应 $< 1\text{mm}$ 。圆台状凹凸榫的拼接深度应 $\geq 20\text{mm}$ 。制作预制管片时凹凸榫的半径、深度和管片的内径以及宽度和厚度的误差均应为0。

7) 鉴于拟建小断面输水隧道穿越富水岩体和6条断层及次生断裂带,其拼装式衬砌应由6块管片以错缝方式拼装成型,拼装管片的顺序为:先拼装标准块 $B_2, B_1, B_3$ ,之后拼装邻接块 $L_1$ 和 $L_2$ ,最后再拼装封顶块 $K$ 。预制管片的环向和纵向上均采用M24弯螺栓加以连接,在始发井中的负环段管片宜按照通缝方式加以拼装。

## 参考文献:

- [1] 周晓军. 考虑横断面几何参数的高速铁路预制拼装式明洞衬砌分块设计与拼装方法[J]. 中国铁道科学, 2025, 46(2): 104-118.  
ZHOU X J. Partition design and assembly method on prefabricated and assembled open cut tunnel lining of high-speed railway considering cross-section geometric parameters[J]. China railway science, 2025, 46(2): 104-118.
- [2] EZAZI M, HOSSAINI M F, SHEIKHMALI R, et al. Assessment of steel-fiber-reinforced segmental lining of Chamshir water conveyance tunnel, Iran; integrating laboratory experiments, field observations, and numerical analysis [J]. Case studies in construction materials, 2024, 20: e03144.
- [3] WANG D Y, ZHU H H, HUANG J W, et al. Fiber optic sensing and performance evaluation of a water conveyance tunnel with composite linings under super-high internal pressures [J]. Journal of rock mechanics and geotechnical engineering, 2023, 15(8): 1997-2012.
- [4] 蓝刚. 环北部湾广西水资源配置工程长隧洞施工方案比选[J]. 广西水利水电, 2024(6): 82-84.

- LAN G. Comparison and selection of long tunnel construction schemes for Guangxi water resources allocation project around Beibu gulf [J]. Guangxi water resources and hydropower engineering, 2024 (6):82-84.
- [ 5 ] 黄怀宁,袁大军. 输水隧洞 PC-Net 预应力混凝土管片衬砌设计方法[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(1):127-134.
- HUANG H N, YUAN D J. Design method of PC-net segmental lining for water conveyance tunnel [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2015, 11(1):127-134.
- [ 6 ] 周晓军,周佳媚. 城市地下铁道与轻轨交通[M]. 2版. 成都:西南交通大学出版社,2016.
- ZHOU X J, ZHOU J M. Urban metro and light rail transit[M]. 2 edition. Chengdu:Southwest Jiaotong University Press, 2016.
- [ 7 ] 周晓军,宁远思,杨昌宇. 矿山法施工双线铁路隧道二次衬砌拱部预制拼装结构的设计与工程应用[J]. 现代隧道技术, 2022,59(4):204-217.
- ZHOU X J, NING Y S, YANG C Y. Design and engineering application of prefabricated structure for secondary lining arch of double-track railway tunnels constructed by the mining method [J]. Modern tunnelling technology, 2022, 59(4):204-217.
- [ 8 ] 周晓军. 油气长输管道越江盾构隧道结构设计及建造技术[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(20):14-22.
- ZHOU X J. Structural design and construction technology for cross-river shield tunnel in long distance oil and gas transmission pipeline project [J]. Construction technology, 2022, 51(20):14-22.
- [ 9 ] 周晓军. 基于横断面几何参数的高速铁路隧道预制拼装二次衬砌分块设计方法[J]. 现代隧道技术, 2024, 61(4):232-243, 254.
- ZHOU X J. On segmenting design method of prefabricated assembled secondary lining for high-speed railway tunnels based on cross-section geometric parameters [J]. Modern tunnelling technology, 2024, 61(4):232-243, 254.
- [ 10 ] 肖明清,邓朝辉,何川. 武汉长江隧道管片结构关键技术研究[J]. 铁道工程学报, 2011, 28(10):84-89.
- XIAO M Q, DENG Z H, HE C. Study on key technologies of shield segment of Wuhan Yangtze River Tunnel [J]. Journal of railway engineering society, 2011, 28(10):84-89.
- [ 11 ] 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.
- YANG X R. Design method and key technology for assembling open-excavated prefabricated tunnel structures [J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(2):2-13.
- [ 12 ] 杨秀仁. 明挖预制装配式隧道结构拼装精度控制标准研究与制定[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(2):14-25.
- YANG X R. Research and formulation of control standard for accurate assembly of open-excavated prefabricated tunnel structures [J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(2):14-25.
- [ 13 ] 赵森森,张冬梅,黄忠凯. 大直径盾构隧道分布式凹凸榫受力特性[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(5):54-62, 79.
- ZHAO S S, ZHANG D M, HUANG Z K. Mechanical characteristics of distributed mortise-and-tenon of largediameter shield tunnels [J]. Modern tunnelling technology, 2022, 59(5):54-62, 79.

(上接第 61 页)

#### 参考文献:

- [ 1 ] 王冠青. 悬索桥空中编缆法主缆架设关键技术研究[D]. 成都:西南交通大学, 2021.
- WANG G Q. Research on the key technology of main cable erection of suspension bridges by air spinning [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [ 2 ] 胡尧,楼朝伟. 龙潭长江大桥主桥方案研究[J]. 中华建设, 2019(10):97-99.
- HU Y, LOU C W. Study on main bridge scheme of Longtan Yangtze River Bridge [J]. China construction, 2019(10):97-99.
- [ 3 ] 薛光雄,金仓,杜洪池,等. 润扬大桥悬索桥牵引系统设计与施工[J]. 桥梁建设, 2004, 34(4):25-28.
- XUE G X, JIN C, DU H C, et al. Design and construction of hauling systems for suspension bridge of Runyang Bridge [J]. Bridge construction, 2004, 34(4):25-28.
- [ 4 ] 李猛,朱小金. 马鞍山长江公路大桥悬索桥先导索过江施工技术[J]. 世界桥梁, 2015, 43(6):16-19.
- LI M, ZHU X J. River-crossing construction for pilot ropes of suspension bridge of Maanshan Changjiang River Highway Bridge [J]. World bridges, 2015, 43(6):16-19.
- [ 5 ] 汪存书,刘颖,薛华. 悬索桥上部结构施工中牵引系统转换技术[J]. 施工技术, 2012, 41(17):21-24, 27.
- WANG C S, LIU Y, XUE H. Transferring technology of hauling system in superstructure construction of suspension bridge [J]. Construction technology, 2012, 41(17):21-24, 27.
- [ 6 ] 田永强. 五峰山长江大桥主缆架设快速施工方法研究[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(6):1-5, 12.
- TIAN Y Q. Rapid construction method of the main cable erection of Wufengshan Yangtze River Bridge [J]. Construction technology, 2023, 52(6):1-5, 12.