

文章编号:1673-2049(2019)06-0112-07

拼装方式对大断面越江电力盾构隧道 结构内力的影响

曹淞宇¹, 袁 骏², 涂新斌², 封 坤¹, 张晓阳², 苏 昂¹

(1. 西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031; 2. 国家电网有限公司, 北京 100031)

摘要:针对大断面电力盾构隧道穿越长江时管片拼装方式对隧道结构内力影响显著的问题,以苏通GIL综合管廊工程盾构隧道衬砌结构为研究对象,利用梁-弹簧模型模拟管片结构,采用荷载-结构模型计算管片结构荷载,对不同拼装方式下衬砌结构力学行为进行研究,分析了拼装方式对输电盾构隧道结构内力的影响效应。结果表明:错缝拼装控制管片结构内力,通缝拼装控制管片变形量;通缝拼装的受力性能要优于错缝拼装,但通缝拼装的变形更大,在施工时要根据使用要求进行选择,同时管片结构力学行为在不同拼装方式下是不同的,与封顶块的位置、错缝角度、目标环的环向和纵向接头的位置有关;拼装方式对管片最大变形量、最大正弯矩、最大负弯矩影响较大,对管片最大轴力影响较小;在错缝拼装时,尽量避免错缝角度为 180° ,最理想的错缝角度在 $32.7^\circ\sim 81.8^\circ$ 之间;所得结论可为输电盾构隧道管片拼装方式的选择提供借鉴和参考。

关键词:电力盾构隧道;拼装方式;衬砌变形;结构内力;梁-弹簧模型

中图分类号:TU311 **文献标志码:**A

Effect of Assembling Mode on Structural Internal Force of Cross-river Electric Power Shield Tunnel with Large Cross-section

CAO Song-yu¹, YUAN Jun², TU Xin-bin², FENG Kun¹, ZHANG Xiao-yang², SU Ang¹

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China; 2. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China)

Abstract: In view of the significant influence of segment assembly mode on the internal force of tunnel structure when the electric power shield tunnel with large cross-section crossed the Yangtze River, the lining structure of shield tunnel in Sutong GIL comprehensive pipe gallery project was taken as the research object, the beam-spring model was used to simulate the segment structure, and the load-structure model was used to calculate the load of segment structure. The mechanical behavior of the lining structure under different assembling modes was studied, and the effect of assembling modes on the internal force of the transmission shield tunnel structure was explored. The results show that the internal force of segment structure is controlled by staggered joint assembling and the deformation of segment is controlled by through joint assembling. The mechanical performance of the through joint assembly is better than that of the staggered joint assembly, but the deformation of the through joint assembly is larger, so it should be selected according to the use requirements during the construction. The mechanical behavior of segment

收稿日期:2019-02-19

基金项目:国家电网重点研究项目(SHJJGC1700023)

作者简介:曹淞宇(1990-),男,河北保定人,工学博士研究生,E-mail:caosongyu111@163.com。

structure is different under different assembling modes, which is related to the position of capping block, staggered joint angle, circular direction of target ring and position of longitudinal joint. The assembling mode has great influence on the maximum shape variable, the maximum positive bending moment and the maximum negative bending moment of the segment, but has little influence on the maximum axial force of the segment. In staggered joint assembly, try to avoid staggered joint angle of 180° and the most ideal staggered joint angle of 32.7° – 81.8° . The conclusion can provide reference for the segment assembly of transmission shield tunnel.

Key words: electric power shield tunnel; assembling mode; lining deformation; structural internal force; beam-spring model

0 引言

传统城市电网架空线路建设现阶段面临诸多困难与挑战,例如极高的城市密度、匮乏的土地资源、愈加严格的城市景观及环境保护要求^[1],而采用地下电缆隧道构建城区电网是有效的解决方法。地下化既可以美化城市环境景观,又可节省土地和环境资源,解决城区电网建设线路规划和施工的困难。从城市建设发展来看,输变电路实施地下化已是势在必行^[2-4]。

目前国外大多采用盾构隧道形式建设大功率电力隧道,由于大直径超高压越江电力隧道特殊的建设与工作条件,工程设计面临一系列技术难题,尤其在管片拼装方式对承受超高水压大断面隧道管片衬砌结构力学性能影响上表现极为突出。拼装方式不同所带来的结构力学性能变化尤为关键^[5-8]。

国内外学者对管片拼装效应进行了大量研究。封坤等^[9]依托南京长江隧道,分析了圆形盾构隧道管片拼装效应的产生机理,着重探讨了纵向相互作用力对管片环向内力的影响。廖少明等^[10]依托钱江隧道,在典型地层深埋段埋设全断面的隧道试验环,现场测量从管片拼装到隧道运营过程中管片结构的受力。高波等^[11]基于对管片拼装阶段的管片受力情况分析,采用有限元软件对不同拼装椭圆度、不同封顶块位置下的纵缝张角变化规律进行了研究。吴勇^[12]利用有限元软件 ANSYS 将管片简化成壳,建立管片的壳-弹簧模型,分析了弹性阶段管片厚度与结构受力、位移的关系。樊济新^[13]依托南京地铁十号线长江隧道工程大直径泥水盾构隧道,对大型管片拼装方法、拼装精度控制、拼装顺序优化等进行了较系统的总结。

现阶段管片拼装效应的研究对象多为交通盾构隧道,关于大断面超高水压电力隧道的拼装效应研究则鲜见报道。同时,电力隧道面临内部结构复杂,

功能分区较多,内部承受荷载较大的特殊工作条件,隧道一旦发生大的变形,可能造成线路停电,影响系统安全稳定运行,对社会带来广泛影响。

基于此,本文以苏通气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)综合管廊工程盾构隧道衬砌结构为研究对象,利用梁-弹簧模型模拟管片结构,采用荷载-结构模型计算管片结构荷载,对不同拼装方式下衬砌结构力学行为进行研究,分析了拼装方式对输电盾构隧道结构内力的影响效应,以期为输电盾构隧道管片拼装方式的选择提供借鉴和参考。

1 工程概况

1.1 工程介绍

苏通 GIL 综合管廊工程起于南岸(苏州)接引站,止于北岸(南通)接引站,是淮南—南京—上海 1 000 kV 交流特高压输变电工程的关键单体工程,是世界首次在重要输电通道中采用特高压 GIL 技术,也是目前世界上电压等级最高、输送容量最大、技术水平最高的超长距离 GIL 创新工程。该工程隧道内径 10.5 m,外径 11.6 m,盾构段总长度约 5 468.5 m,位于长江下游三角洲前缘地带,主要穿越第四纪淤泥质黏土、粉土、砂层等软弱覆盖层,隧道顶板埋深 20.4~47.8 m,含水层较厚,渗透性强,底面最低点标高 -74.83 m,水压力最高达 0.8 MPa,是目前中国埋深最深、水压最高的输电隧道,隧道纵断面见图 1,横断面见图 2。

1.2 工程难点

(1)该工程隧道长距离穿越长江,具有高透水性、高密实度、高石英含量等特点的复杂地层地质条件,以及淤泥质黏土、粉土等软弱层组成的两岸覆盖层,隧道结构的稳定性、安全性将面临挑战。

(2)盾构隧道江中段最大埋深达 47.8 m,江中穿越地层透水性强,水土压力高达 9.0 MPa,是世界上水压最高的盾构隧道,这对隧道管片衬砌结构承

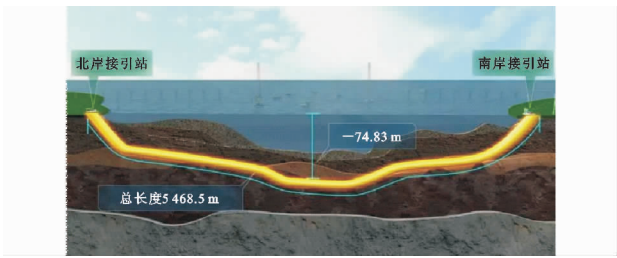


图 1 隧道纵断面

Fig. 1 Tunnel Longitudinal Section

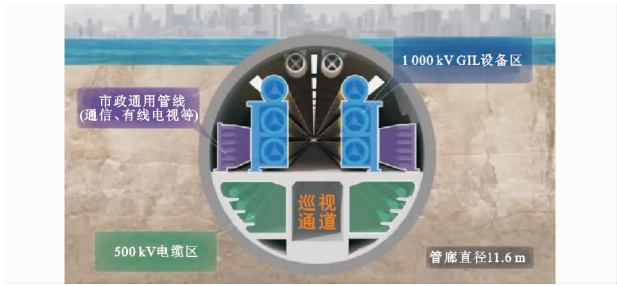


图 2 隧道横断面

Fig. 2 Tunnel Cross Section

载性能提出新的要求。

(3)本工程是 GIL 技术长距离穿越长江的首次运用。GIL 位于输电线路中部,一旦发生故障就会导致线路停电,直接影响通道输电能力和系统运行的安全稳定,对控制大断面盾构隧道变形要求高。

2 管片力学分析模型

2.1 内力计算模型

根据对隧道与地层相互作用的不同假设,隧道结构内力计算方法主要分为荷载-结构法和地层-结构法 2 种类型^[14-16]。目前,国内外盾构隧道内力计算普遍采用荷载-结构法,如图 3 所示,其中, P_0 为上覆荷载, W_1 为衬砌拱顶处垂直水土压力, W_g 为衬砌结构自重, W_2 为地基抗力, q_1 为衬砌拱顶处侧向水土压力, q_2 为衬砌拱底处侧向水土压力, H 为从衬砌外侧顶点计算的覆土厚度, D 为衬砌外径。地层抗力由在隧道衬砌全周设置的径向和切向地层弹簧单元模拟。地层弹簧单元只能承受压力,其刚度由隧道衬砌环周围土体的地基抗力系数决定。根据隧道所处地层性质,采用太沙基理论或全土柱的方法计算土压力,采用水土分算或者水土合算方法计算作用在隧道结构上的水土荷载。

2.2 管片结构模型

模拟盾构隧道管片结构的力学模型有铰接圆环、匀质圆环和梁-弹簧 3 种^[17]。铰接圆环和匀质圆环模型不能模拟管片接头,难以反映管片结构的

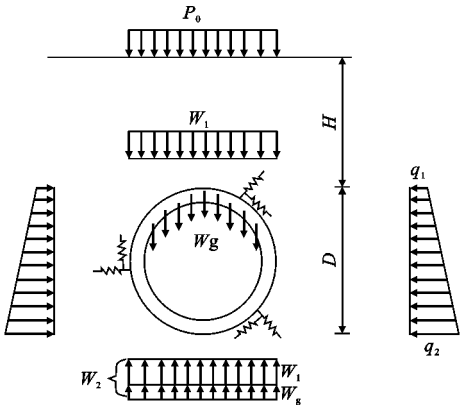


图 3 荷载-结构法计算示意

Fig. 3 Schematic Diagram of Load-structure Method

实际受力状态。例如采用匀质圆环模型不能反映偏转某一角度后管片结构截面内力和变形变化等^[18]。梁-弹簧模型是根据盾构隧道管片结构的实际情况发展起来的一种计算模型,可真实反映管片结构环向和纵向接头的位置和刚度。通用管片在拼装时主要采用错缝拼装来模拟线形,故应采用梁-弹簧模型,如图 4 所示(图 4 中, K 为衬砌结构弯曲刚度, K_0 为旋转弹簧, K_t 为切向剪切弹簧, K_r 为径向剪切弹簧),其计算结果用于设计具备安全可靠和经济的优点。

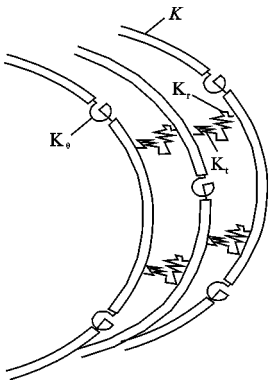


图 4 梁-弹簧模型示意

Fig. 4 Diagram of Beam-spring Model

梁-弹簧模型算法将管片环模拟成梁(直线梁或曲线梁),用旋转弹簧 K_0 、切向剪切弹簧 K_t 和径向剪切弹簧 K_r 分别模拟管片接头和环间接头^[19],从而真实反映接头及拼装方式对管片环整体刚度和内力分布的影响,是目前最有效的管片环承载机理解释方法^[20]。

工程中一般采用 2 环一组的错缝拼装方案,以相邻 3 环管片所组成的空间结构为计算对象,即计算中除考虑研究对象环(中间环)外,还将对其变形和内力产生影响的前后管片环也作为计算对象。

3 管片力学分析

3.1 管片衬砌结构特征

区间盾构隧道采用 C60 钢筋混凝土预制管片,管片环外直径为 11 600 mm,内直径为 10 500 mm,厚度为 550 mm,幅宽为 2 000 mm。管片衬砌结构采用“1+2+5”分块,即 1 个封顶块、2 个邻接块和 5 个标准块。封顶块圆心角为 16.363 7°,邻接块圆心角为 49.090 9°,标准块圆心角为 49.090 9°。管片之间以 24 个 M36 环向螺栓连接,环与环之间以 22 个 M40 纵向螺栓连接,纵向螺栓之间的角度为 16.363 6°,如图 5 所示。

3.2 参数选取

计算断面里程为 CK2+158,为最高水位位置,上覆土层分别为粉质黏土混粉土、粉细砂、细砂。隧道埋深 22 m,最高水位 71 m,最低水位 52.1 m,地

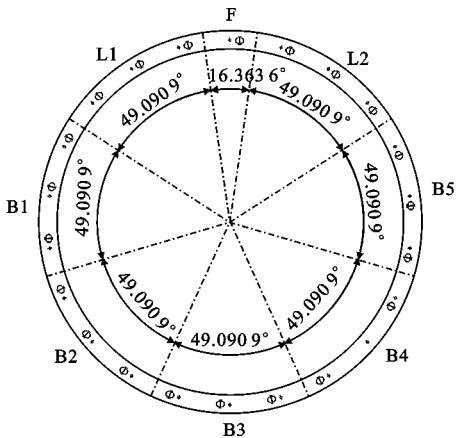


图 5 管片衬砌结构示意图

Fig. 5 Diagram of Segment Lining Structure

层物理力学参数见表 1。
按照太沙基理论,采用水土分算计算水土荷载,管片结构模型采用梁-弹簧模型,计算不同拼装方式

表 1 地层物理力学参数

Tab. 1 Physical and Mechanical Parameters of Stratum

地层	厚度/m	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	密度/ (g·cm ⁻³)	天然 孔隙比	天然含水 率/%	侧压力 系数	基床系数/ (kN·m ⁻³)	水平渗透系数/ (cm·s ⁻¹)	垂直渗透系数/ (cm·s ⁻¹)
粉质黏土 混粉土	10.5	10.5	22.5	1.81	0.996	33.1	0.52	22 000	0.000 013	0.000 006 8
粉细砂	9.5	5.2	33.0	1.96	0.681	22.4	0.40	30 000	0.000 150	0.000 088 0
细砂	2.0	5.1	34.8	1.98	0.652	21.8	0.37	32 000	0.000 520	0.000 490 0

下管片衬砌变形和结构内力。

3.3 计算工况

管片拼装方式包括 2 个部分,第 1 部分为中间目标环封顶块位置,第 2 部分为前后环错缝角度。计算选择中间目标环封顶块分别处于拱顶、拱肩、拱腰、拱脚和拱底位置,两边半环分别逆时针旋转 0°,32.7°,81.8°,130.9°,180°,模拟不同拼装方式下管片结构力学行为,工况见表 2,总计 25 种拼装方式。

4 结果分析

4.1 内力计算结果云图

图 6 为内力计算结果云图。通过有限元分析,得到在不同错缝角度拼装工况下管片环结构的最不利荷载位置,同时管片整环轴力分布基本呈均匀分布,而管片环弯矩则为拱顶、拱底受压,两侧拱腰受拉。在管片设计中,拱顶、拱底主要为混凝土管片内侧受拉,外侧受压。对于两侧拱腰,管片混凝土则为外侧受拉,内侧受压。

4.2 最大变形量

盾构隧道所受荷载主要为竖向荷载,隧道竖向

变形最大,对隧道稳定性和安全性影响最大。图 7 为管片最大变形量随不同拼装方式的变化,整体而言,封顶块位于拱腰时,管片最大变形量较大,当封顶块位于拱肩时,管片最大变形量较小。由于拼装方式的不同,管片结构的最大变形量变化范围为 22.1~29.1 mm。当封顶块位于拱腰位置时,通缝拼装,管片最大变形量达到最大值,为 29.1 mm。当封顶块位于拱肩位置,管片错缝角度为 32.7°时,管片最大变形量达到最小值,为 22.1 mm。

通缝拼装和错缝拼装方式下,管片最大变形量差异性较大,管片通缝拼装的最大变形量均大于错缝拼装。当前后环错缝角度增大时,管片最大变形量同步增大,但错缝拼装最大变形量还是小于通缝拼装。从最大变形量考虑,错缝拼装优于通缝拼装。

4.3 最大正弯矩和最大负弯矩

管片最大正弯矩、最大负弯矩随拼装方式的变化如图 8 所示。不同拼装方式下,管片结构的最大正弯矩变化范围为 434.8~873.1 kN·m,管片结构的最大负弯矩变化范围为-1 630.3~-714.1 kN·m。由于拼装方式的不同,导致 F 块位置的

表 2 管片拼装方式工况

Tab. 2 Working Conditions of Segment Assembling Mode

拼装方式编号	封顶块位置	前后环错缝角度/(°)
TF1-0	拱顶	0.0(通缝)
CF1-1		32.7
CF1-2		81.8
CF1-3		130.9
CF1-4		180.0
TF2-0	拱肩	0.0(通缝)
CF2-1		32.7
CF2-2		81.8
CF2-3		130.9
CF2-4		180.0
TF3-0	拱腰	0.0(通缝)
CF3-1		32.7
CF3-2		81.8
CF3-3		130.9
CF3-4		180.0
TF4-0	拱脚	0.0(通缝)
CF4-1		32.7
CF4-2		81.8
CF4-3		130.9
CF4-4		180.0
TF5-0	拱底	0.0(通缝)
CF5-1		32.7
CF5-2		81.8
CF5-3		130.9
CF5-4		180.0

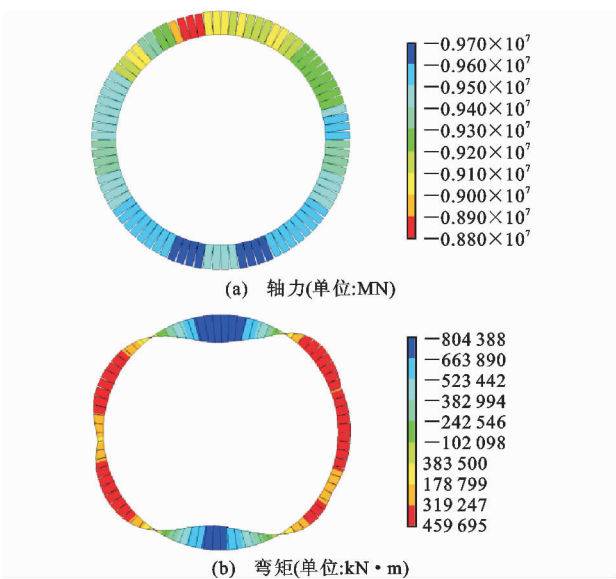


图 6 内力计算结果云图

Fig. 6 Nephograms of Internal Force Calculation Results

同,环向接头的位置也不同,对整环管片的刚度影响大,又因为盾构隧道的荷载主要是竖向的,所以导致

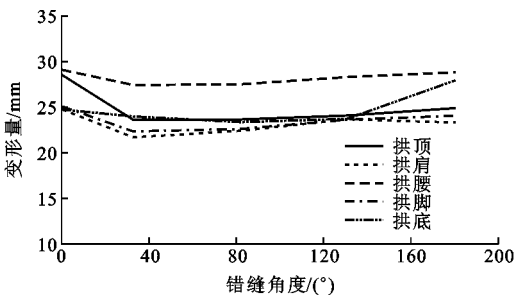


图 7 管片最大变形量随不同拼装方式的变化

Fig. 7 Variation of Maximum Deformation of Segments with Different Assembling Modes

管片内力变化较大。

当封顶块位于拱底位置时,管片采用错缝角度为 180°的拼装方式,管片最大正弯矩出现最大值,为 873.1 kN·m。当封顶块位于拱腰位置时,管片采用通缝拼装方式,管片最大正弯矩出现最小值,为 434.8 kN·m。当封顶块位于拱腰位置时,管片采用错缝角度为 180°的拼装方式,管片最大负弯矩出现最大值,为-1 630.3 kN·m。

比较通缝拼装和错缝拼装可以发现,当封顶块位置相同时,错缝拼装的最大正弯矩和最大负弯矩值明显大于通缝拼装,错缝拼装最大正弯矩、最大负弯矩值的差异较小,错缝拼装控制管片的结构内力。从受力情况考虑,通缝拼装要优于错缝拼装。

结合图 7 可以发现,错缝角度越大,管片所受的弯矩越大,受力性能更差,当错缝角度过大(接近 180°)时,管片的变形量增大幅度较大。因此,在拼装时尽量避免错缝角度达到 180°,错缝角度应控制在 32.7°~81.8°之间。

4.4 最大轴力

管片最大轴力随不同拼装方式的变化如图 9 所示。随着拼装方式的不同,管片结构最大轴力的变化范围为 9 620~9 811 kN。当封顶块位于拱顶位置时,管片采用错缝角度为 81.8°的拼装方式,管片最大轴力出现最大值,为 9 811 kN。当封顶块位于拱肩位置时,管片采用通缝拼装方式,管片最大轴力出现最小值,为 9 620 kN。管片最大轴力的最大值与最小值相差仅 1.98%,最大轴力变化幅度相差不大,拼装方式对管片最大轴力影响较小。

5 结 语

(1)管片结构在不同拼装方式下的力学行为是不相同的,与封顶块的位置、拼装类型(错缝和通缝)、计算目标环的环向和纵向接头的位置有关。

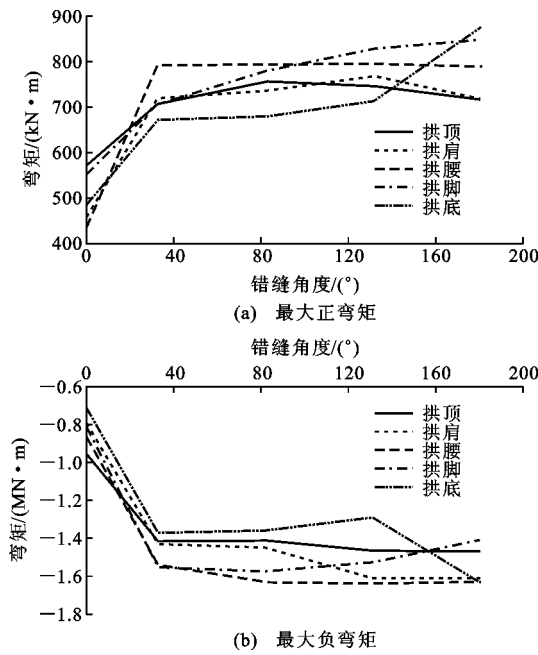


图 8 管片弯矩随不同拼装方式的变化
Fig. 8 Variation of Segment Bending Moment with Different Assembling Modes

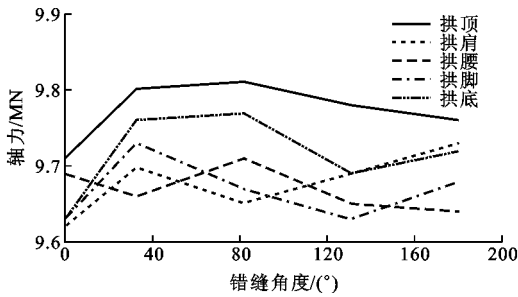


图 9 管片最大轴力随不同拼装方式的变化
Fig. 9 Variation of Maximum Axial Force of Segment with Different Assembling Modes

(2)随着拼装方式的不同,管片结构的最大变形量变化范围为 22.1~29.1 mm,最大正弯矩变化范围为 434.8~873.1 kN·m,最大负弯矩变化范围为-1 630.3~-714.1 kN·m,最大轴力变化范围为 9 620~9 811 kN。拼装方式对管片最大变形量、最大正弯矩、最大负弯矩影响较大,对管片最大轴力影响较小。

(3)错缝拼装控制管片结构内力,通缝拼装控制管片变形量。总体而言,通缝拼装的受力性能要优于错缝拼装,但通缝拼装的变形更大,在施工时要根据使用要求进行选择。

(4)从受力和变形量综合考虑,在错缝拼装时,错缝角度应避免达到 180°,最理想的错缝角度在 32.7°~81.8°之间。

参考文献:

References:

- [1] 葛荣良. 从电缆隧道建设看城市地下空间的利用[J]. 上海电力, 2006(3): 243-245.
GE Rong-liang. Utilization of Urban Underground Space from Cable Tunnel Construction[J]. Shanghai Electric Power, 2006(3): 243-245.
- [2] 周承水. 21 世纪城市建设发展趋势与对策[J]. 长江建设, 1995(1): 24-26.
ZHOU Cheng-shui. Development Trend and Countermeasure of Urban Construction in 21st Century[J]. Yangtze River Construction, 1995(1): 24-26.
- [3] 范文莉. 当代城市地下空间发展趋势——从附属使用到城市地下、地上空间一体化[J]. 国际城市规划, 2007, 22(6): 53-57.
FAN Wen-li. The Trend of Underground Space of Modern City: Integrating Subordinate Underground Space into City Space[J]. Urban Planning International, 2007, 22(6): 53-57.
- [4] 秦中华. 电力隧道管片选型及预制技术[J]. 混凝土与水泥制品, 2011(6): 30-32.
QIN Zhong-hua. Segment Selection and Prefabrication Technology of Power Tunnel[J]. China Concrete and Cement Products, 2011(6): 30-32.
- [5] BLOM C B M, VAN DER HORST E J, JOVANOVIC P S. Three-dimensional Structural Analyses of the Shield-driven “Green Heart” Tunnel of the High-speed Line South[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1999, 14(2): 217-224.
- [6] Working Group No. 2, International Tunneling Association. Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, 15(3): 303-331.
- [7] TEACHAVORASINSKUN S, CHUB-UPPAKARN T. Influence of Segmental Joints on Tunnel Lining[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(4): 490-494.
- [8] 李 围, 何 川. 盾构隧道通用管片结构力学行为与控制拼装方式研究[J]. 铁道学报, 2007, 29(2): 77-82.
LI Wei, HE Chuan. Study on Mechanical Behavior and Controlling Assembling Modes of Universal Segment Lining for Shield Tunnel[J]. Journal of the China Railway Society, 2007, 29(2): 77-82.
- [9] 封 坤, 何 川, 邹育麟. 大断面越江盾构隧道管片拼装方式对结构内力的影响效应研究[J]. 工程力学, 2012, 29(6): 114-124.
FENG Kun, HE Chuan, ZOU Yu-lin. Study on the

- Effect of Assembling Method on the Inner Force of Segmental Lining for Cross-river Shield Tunnel with Large Cross-section [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(6): 114-124.
- [10] 廖少明, 门燕青, 张迪, 等. 钱江隧道管片拼装过程中的力学行为实测分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 156-164.
- LIAO Shao-ming, MEN Yan-qing, ZHANG Di, et al. Field Tests on Mechanical Behaviors During Assembly of Segmental Linings of Qianjiang Tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(1): 156-164.
- [11] 高波, 吴挺, 彭红霞, 等. 盾构隧道管片拼装纵缝变形规律研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(5): 145-149.
- GAO Bo, WU Ting, PENG Hong-xia, et al. On the Deformation Law of Longitudinal Joints of Shield Tunnel Segment Rings[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(5): 145-149.
- [12] 吴勇. 拼装方式对复合式 TBM 管片的受力分析[J]. 公路与汽运, 2014(1): 217-220.
- WU Yong. Force Analysis of Composite TBM Segments by Assembly Method[J]. Highways & Automotive Applications, 2014(1): 217-220.
- [13] 樊济新. 大直径泥水盾构管片拼装技术控制[J]. 山西建筑, 2018, 44(28): 144-145.
- FAN Ji-xin. Large-diameter Cement-water Shielding Segment Assembling Technology Control[J]. Shanxi Architecture, 2018, 44(28): 144-145.
- [14] 赵尚毅, 郑颖人, 宋雅坤, 等. 地下隧道衬砌结构内力计算方法探讨[J]. 后勤工程学院学报, 2007, 23(4): 29-33.
- ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, SONG Ya-kun, et al. An Analysis of the Design Method of Underground Tunnel Linings[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2007, 23(4): 29-33.
- [15] 李围, 孙继东, 李成. 盾构隧道管片衬砌受力分析力学模式探讨[J]. 隧道建设, 2005, 25(增): 17-20.
- LI Wei, SUN Ji-dong, LI Cheng. Discussion on Mechanical Mode of Stress Analysis for Segment Lining of Shield Tunnel[J]. Tunnel Construction, 2005(S): 17-20.
- [16] 孙钧, 侯学渊. 地下结构(上册)[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- SUN Jun, HOU Xue-yuan. Underground Structure (Volume 1)[M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [17] 日本土木学会. 隧道标准规范(盾构篇)及解说[M]. 朱伟, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- JSCE. Tunnel Standard Specification (Shield Section) and Interpretation[M]. Translated by ZHU Wei. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.
- [18] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.
- LIU Jian-hang, HOU Xue-yuan. Shield Tunnel[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1991.
- [19] 朱合华, 陶履彬. 盾构隧道衬砌结构受力分析的梁-弹簧系统模型[J]. 岩土力学, 1998, 19(2): 26-32.
- ZHU He-hua, TAO Lu-bin. Study on Two Beam-spring Models for the Numerical Analysis of Segments in Shield Tunnel[J]. Geotechnical Mechanics, 1998(2): 26-32.
- [20] 曾东洋, 何川. 拼装方式对盾构隧道衬砌结构变形和内力的影响分析[J]. 现代隧道技术, 2005, 42(2): 1-6.
- ZENG Dong-yang, HE Chuan. Analysis of the Influence of Segment Assembling Methods on the Deformation and Internal Forces in the Lining of a Shield Tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2005, 42(2): 1-6.