

类矩形盾构隧道无立柱衬砌结构力学性能模型研究^{*}

班勇婷¹ 周俊宏¹ 郦亮¹ 夏汉庸¹ 刘震² 柳献² 管攀峰³

(1. 宁波市轨道交通集团有限公司, 315101, 宁波; 2. 同济大学土木工程学院, 200092, 上海;

3. 上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 200235, 上海//第一作者, 高级工程师)

摘要 目的: 类矩形无立柱盾构隧道结构能适用于隧道渡线段, 但缺乏该新型结构的针对性力学性能分析模型, 故有必要对此开展研究。方法: 基于无立柱盾构隧道原型结构试验结果, 初步分析了钢结构管片在设计运营工况下的整体变形及位移特征。进一步采用等效刚度均质环模型和梁-弹簧模型对结构的受荷响应进行了模拟, 其中梁-弹簧模型的计算参数通过接头足尺试验来标定。将 2 种模型的计算结果与足尺试验结果进行对比, 分析了不同模型的优劣, 给出了不同模型的适用范围。最后, 结合力法原理和 2 种计算分析模型对类矩形无立柱衬砌结构的变形机理进行了分析, 探究钢结构管片不同部分的变形贡献。结果及结论: 等效刚度均质环模型及梁-弹簧模型均可用于类矩形盾构隧道无立柱衬砌结构的计算分析, 其中梁-弹簧模型对于钢结构管片力学性能的模拟更加精确, 尤其是在变形方面; 等效刚度均质环模型对于钢结构管片响应的模拟精度稍差, 但是用于结构设计仍然能保证足够的安全储备。针对结构变形机理的分析表明, 类矩形无立柱盾构隧道结构的收敛变形主要来源于管片本体及接头两部分, 其中接头变形约其占 2/3。

关键词 类矩形盾构隧道; 无立柱结构; 等效刚度均质环法; 梁-弹簧法; 变形机理分析

中图分类号 U451⁺.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.12.010

Analysis and Research on Mechanical Performance Model of Pillarless Lining Structure for Quasi-rectangular Shield Tunnel

BAN Yongting, ZHOU Junhong, LI Liang, XIA Hanyong, LIU Zhen, LIU Xian, GUAN Panfeng

Abstract Objective: Pillarless lining structure for shield tunnels is suitable for tunnel crossover sections, but there is a lack of targeted mechanical performance analysis model for this new type of structure, making research in this regard necessary. Method: Based on the prototype structure test results of pil-

larless shield tunnels, the overall deformation and displacement characteristics of the SSS (steel structural segments) under design operating conditions are preliminarily analyzed. Further, simulation of the load response of the structure is carried out using both the ESHM (equivalent stiffness homogeneous ring model) and the beam-spring model, with the calculation parameters of the latter calibrated through full-scale joint tests. The calculation results of the two models are compared with full-scale test results to analyze their advantages and disadvantages, providing insights into the applicable range of different models. Finally, combining the force method principle and the two calculation analysis models, the deformation mechanism of the quasi-rectangular pillarless lining structure is analyzed, and the contribution of different SSS parts are explored. Result and Conclusion: The research results indicate that both the ESHM and the beam-spring model can be used for the calculation and analysis of pillarless lining structure for quasi-rectangular shield tunnels. The beam-spring model provides a more accurate simulation of the SSS mechanical performance, especially in terms of deformation. The ESHM has a slightly lower accuracy in simulating the response of SSS but still ensures an adequate safety margin for the structural design. The analysis of the SSS deformation mechanism suggests that the convergence deformation of the pillarless lining structure for quasi-rectangular shield tunnels primarily originates from the body and joints of the segment, with joint deformation accounting for approximately two-thirds of the total deformation.

Key words quasi-rectangular shield tunnel; pillarless structure; equivalent stiffness homogeneous ring model method; beam-spring model method; deformation mechanism analysis

Author's address Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., 315101, Ningbo, China

^{*} 国家自然科学基金(52078376)

类矩形盾构隧道采用新型“类矩形”隧道断面形式,断面由4段圆弧光滑连接而成。该隧道具有节省地下空间,对周边环境及既有构筑物影响小特点,在城市核心地区具有优良的适用性^[1]。为拓展类矩形盾构隧道在渡线段的应用需求,满足区间车辆转辙(换轨)要求,本研究开发了类矩形盾构隧道无立柱衬砌结构:相比于典型断面(有立柱)结构,无立柱衬砌结构外径尺寸和管片厚度保持不变,取消了中立柱构件;相比于原钢筋混凝土管片,管片采用钢结构管片。该结构在国内尚无研究及应用经验,故而需要针对衬砌结构的计算分析方法开展研究。

盾构隧道设计分析时,常采用修正惯用法、多铰圆环法、弹性支撑法以及梁-弹簧法等计算分析方法^[2],其中修正惯用法是目前隧道设计较常采用的设计方法。计算分析方面的国内外现有研究中,文献[3]对日本的圆形盾构隧道计算方法进行了研究,提出了不同管片接头、不同拼装方式的结构刚度折减系数,为圆形盾构隧道的计算分析和设计提供了指导建议。

而针对诸多新型断面的异形盾构隧道,国内外大多采用等效刚度均质环法(对应修正惯用法)和梁-弹簧法进行结构分析计算。如文献[4]采用修正惯用法、梁-弹簧法对双圆盾构隧道衬砌结构进行了计算机设计分析。文献[5]则以上海某大断面矩形通道工程为背景开展了现场试验研究,采用梁-弹簧模型建立了基于施工全过程的矩形盾构隧道结构受力分析方法,对矩形盾构隧道结构在不同阶段的力学性能进行了分析研究。而针对有立柱类矩形盾构隧道典型断面衬砌结构,文献[6-7]同样采用修正惯用法和梁-弹簧法,并以宁波轨道交通出入段线为工程背景,基于整环足尺试验结果对模型进行了验证及对比分析。

基于调研结果可知,既有结构力学性能分析研究主要针对圆形隧道,对异形盾构隧道的研究也以圆形隧道为基础进行,且不同异形盾构隧道往往针对性地进行了模型的建立及参数调整。隧道衬砌计算对于隧道衬砌的设计、施工、运维等都至关重要,能否合理地计算隧道衬砌的受荷响应将直接关系到隧道衬砌结构在隧道服役期的安全性及隧道建设的经济性与合理性。本研究以类矩形无立柱衬砌结构足尺整环试验结果为基础,采用等效刚度均值环模型(以下简称“均质环模型”)和梁-弹簧模

型对结构的力学性能进行模拟分析,同时开展结构变形机理分析研究,为类矩形盾构隧道无立柱衬砌结构的设计、施工及应用提供依据。

1 足尺试验

1.1 结构管片尺寸参数

类矩形盾构隧道无立柱衬砌结构的外形尺寸为11 500 mm(宽)×6 937 mm(高),钢结构管片厚为450 mm,环宽为1 200 mm。结构全环由2块T块(T1、T2)、3块C块(C1、C2、C3)、3块B块(B1、B2、B3)、1块L块和1块F块等10块管片组成。块与块间的接头形式为钢板、螺栓接头连接形式,钢材型号为Q345,接头采用10.9级M48型螺栓和10.9级M30型螺栓连接,其整环结构断面示意图如图1所示。

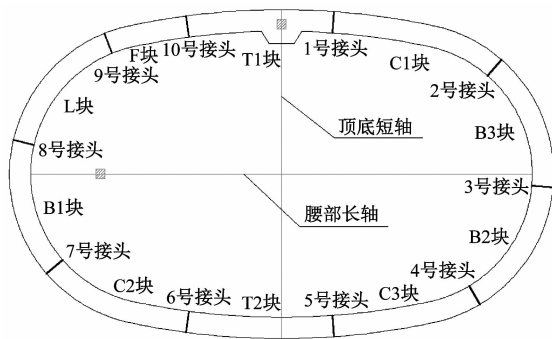


图1 类矩形隧道无立柱结构断面尺寸图

Fig. 1 Profile dimension diagram of quast-rectangubr tunnel pillarless structure

1.2 加载方案

为验证类矩形无立柱衬砌结构在设计工况下的适用性,并作为后续力学性能分析模型研究和变形机理分析研究的基础,开展了足尺整环试验。根据结构在运营工况所受设计荷载,基于结构内力及外荷载等效原则,将运营工况的设计荷载转化为试验荷载。试验荷载点布置如图2所示,30个荷载点分为3组,其中 P_1 组为顶底荷载, P_2 组为腰部荷载, P_3 组为角部过渡荷载。

1.3 结构响应

试验加载至设计工况后,结构整体位移监测结果如表1所示,对应测点布置及结构变形情况(整体位移图)见图3。根据试验结果,随着试验荷载的施加,结构的变形逐渐增长。在设计试验荷载下,结构顶部的最大位移为63.82 mm(向内),结构底部的最大位移为51.03 mm(向内),结构右侧腰部

的最大位移为 -22.48 mm(向外),结构左侧腰部的最大位移为 -22.55 mm(向外)。

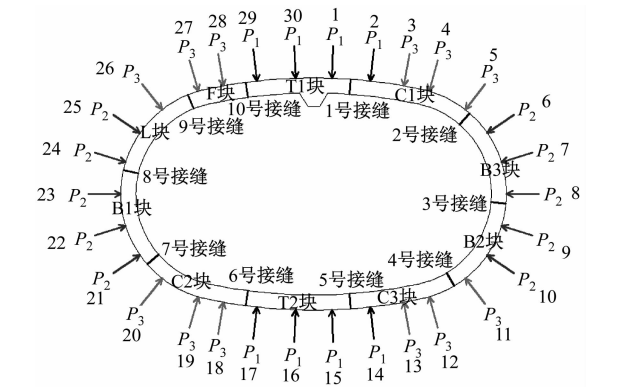


图2 类矩形无立柱结构试验加载图

Fig. 2 Experimental loading diagram of quasi-rectangular pillarless structure

表1 钢结构管片整体位移

Tab. 1 Displacement of steel structural segments	
测点	位移值/mm
ZWT1-1	56.88
ZWT1-2	63.82
ZWC1-1	39.55
ZWB3-1	-2.85
ZWB3-2	-21.55
ZWB2-1	-22.48
ZWC3-1	7.64
ZWC3-2	37.06
ZWT2-1	51.03
ZWC2-1	38.36
ZWC2-2	10.82
ZWB1-1	-14.00
ZWB1-2	-22.55
ZWL-1	-7.36
ZWF-1	33.36

注:位移值为正,代表结构向内侧位移;反之,则代表结构向外侧位移。

结构变形整体呈现出左右对称的趋势,相较而言,结构右半部分的变形略大于左半部分。结构表现出顶、底位置向内变形,腰部位置向外变形的特点,顶底位置向内收敛变形量大于腰部向外扩张变形量。结构向内变形范围较广,结构顶部 F 块、T1 块和 C1 块,结构底部 C2 块、T2 块和 C3 块均有向内变形的趋势。而腰部管片向外变形范围相对较

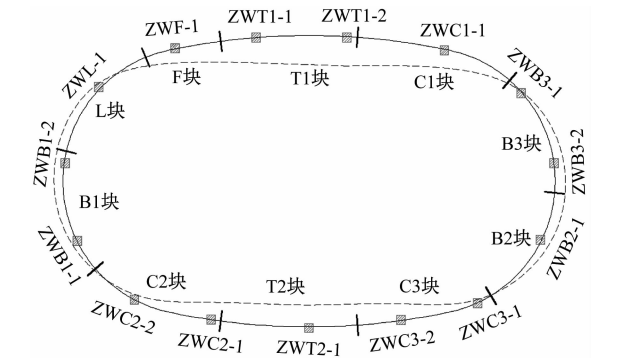


图3 钢结构管片整体位移图

Fig. 3 Overall displacement diagram steel structure segments

窄,主要集中于 B3、B2、B1 和 L 块。变形零点位置分布在结构 4 个角部,即 B3 块靠 2 号接头位置(C1 块和 B3 块接头)、4 号接头位置(C3 块和 B2 块接头)、C2 块靠 7 号接头位置(C2 块和 B1 块接头)和 L 块靠 9 号接头位置(L 块和 F 块接头)。

2 钢结构管片分析模型

为探究适用于类矩形盾构法隧道无立柱衬砌结构的计算分析模型,本节采用等效刚度均质环模型和梁-弹簧模型分别对无立柱类矩形盾构隧道钢结构衬砌进行计算分析。等效刚度均质环模型将管片视为刚度均匀的梁,采用刚度折减系数来模拟纵向接头对管片受力性能产生的影响;而梁-弹簧模型则将纵向接头等效为旋转及剪切弹簧,用以模拟纵向接头在隧道衬砌结构中起到的抗弯和抗剪作用。

2.1 管片及接头模型参数

钢结构管片采用大型 ANSYS 有限元软件进行模拟分析。其中衬砌环管片采用 BEAM54 梁单元进行模拟,根据实际衬砌管片的横截面积、梁单元绕中性轴的截面惯性矩、中性轴距梁上表面和下表面的距离、管片钢材的弹性模量、钢材的泊松比、钢材的密度等定义梁单元的计算实常数。

使用等效刚度均值环法分析时,引入刚度折减系数考虑纵缝接头对衬砌结构力学性能的影响。使用梁-弹簧法进行分析时,对于单环试验结构管片块与块之间的纵缝接头,采用抗弯和抗剪弹簧进行模拟,弹簧采用 MATRIX27 单元进行模拟,设置单元长度为零。刚度方面在接头局部坐标系下应定义其 3 个方向的弹簧刚度,包括沿 X 轴向的刚度模拟接头抗压刚度、沿 Y 轴向的刚度模拟接头抗剪刚度和绕 Z 轴的转动刚度模拟接头的抗弯刚度。在定义单元

实常数时,将上述弹簧刚度取值输入到刚度矩阵(12×12)的相应位置,以模拟纵向接头在实际受力中的转动和径向变形。其中,纵缝弹簧单元的抗弯刚度等参数选取以纵缝接头足尺试验的试验结果为基础。纵缝接头足尺试验实拍图如图 4 所示。

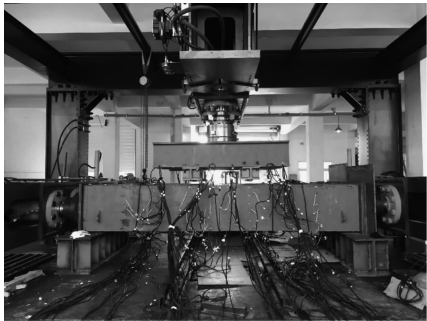
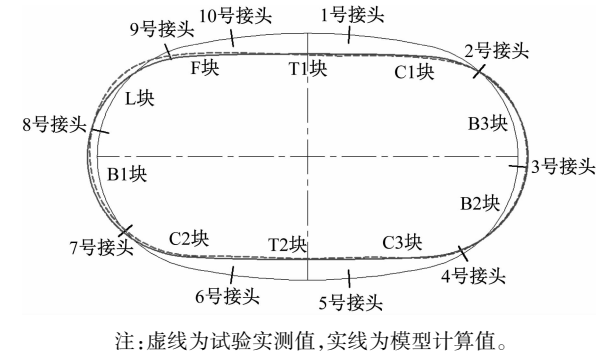


图 4 纵缝接头足尺试验实景图

Fig. 4 Photo of longitudinal gap joint full-scale test

2.2 等效刚度均质环模型模拟分析结果

根据类矩形盾构隧道衬砌结构受力性能预分析结果,对衬砌结构进行模拟分析,计算得到衬砌结构在试验荷载作用下的变形和试验实测的变形对比如图 5 所示。



注:虚线为试验实测值,实线为模型计算值。

图 5 试验荷载作用下等效刚度均质环模型计算、试验变形对比

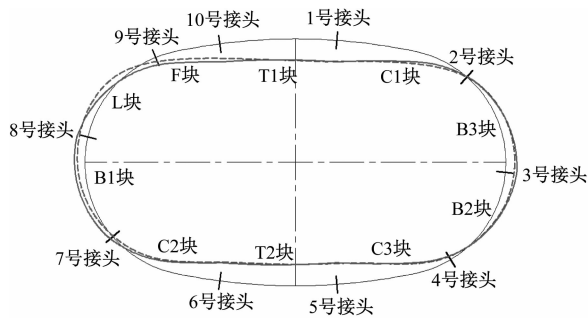
Fig. 5 Comparison of ESHR model calculation and test results

由图 5 可知:等效刚度均质环模型计算得到的结构收敛变形和试验实测结果具有一定相似性,但由于均质环模型仅考虑了纵缝接头存在对结构整体刚度的影响,未考虑接头布置位置对结构局部变形产生的影响,故结构顶、底位置管片左右不对称及腰部上下不对称的实际变形模式,在衬砌结构采用等效刚度均质环模型进行计算时是无法模拟的。

2.3 梁-弹簧模型模拟分析结果

根据已有参数采用梁-弹簧模型对结构进行计算分析,得到结构在试验荷载作用下的变形和试验

实测的变形对比图如图 6 所示。



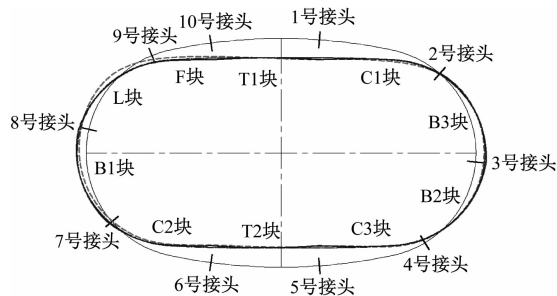
注:虚线为试验实测值;实线为模型计算值。

图 6 试验荷载作用下梁-弹簧环模型计算、试验实测变形对比
Fig. 6 Comparison of beam spring ring model calculation and experimental deformation under experimental conditions

梁-弹簧模型计算得到的结构收敛变形结果和试验实测结果具有一定相似性,且对于衬砌结构右半环顶、底位置较大变形量的拟合效果较好,对腰部的上下不对称变形同样有较好的拟合度,尤其针对右侧腰部的变形,数值模拟及试验测试结果的匹配程度较高。

2.4 两种模型对比分析

将等效刚度均质环模型及梁-弹簧模型的计算结果及衬砌结构足尺试验测试结果绘制于同一张图中,如图 7 所示。



注:虚线为试验实测值;点划线为等效刚度均质环模型计算值;实线为梁-弹簧模型的计算值。

图 7 试验荷载作用下 2 种模型、试验实测变形对比图
Fig. 7 Comparison of deformation between two models and test results under experimental conditions

由图 7 可知:从结构整体角度来看,等效刚度均质环模型和梁-弹簧模型计算得到的结构整体变形都能一定程度上反映结构的整体变形情况。后续将结构分为顶部、右上角部、右侧腰部、右下角部、底部、左下角部、左侧腰部、左上角部总共 8 部分,分别分析模型计算的变形结果和试验实测得到的变

形结果。

从顶部变形来看,靠右半环位置变形量较靠左半环位置要大。基于顶部靠右半环变形计算结果,梁-弹簧模型在计算过程中充分考虑了1号接头位置的影响,拟合出了试验管片在该接头位置附近的变形,其计算结果对试验实测结果的拟合度较优。而顶部靠左半环的实测变形与等效刚度均质环模型计算结果更为接近,分析原因为梁-弹簧模型计算结果中9号和10号接头附近出现了较大的局部变形,而试验结果并未反映出这一点,表明梁-弹簧模型高估了9号、10号接头的受荷响应。

从底部变形来看,试验实测结果表明5号、6号接头附近均有局部变形,该现象在梁-弹簧模型中得到了较好的体现,而在等效刚度均质环模型中难以体现。

从腰部变形来看,2种模型对试验结构的模拟尚存不足。通过对比分析可知,梁-弹簧模型低估了腰部负弯矩接头及其周边管片的刚度;但梁-弹簧模型充分考虑了腰部3号、8号接头的影响,计算结果呈现出右半环腰部变形最大值向衬砌结构下半环偏移,而左半环腰部变形最大值向衬砌结构上半环偏移的特点,其与实际结构变形情况一致,也体现出梁-弹簧模型的优势。

根据上述对比分析结果可知,两种模型都能一定程度上反映结构的力学性能。而提升数值模型准确度及工程适用性的关键在于在计算分析时参数选取是否与实际工程结构相互匹配。整体而言,等效刚度均质环法一定程度上能对结构进行力学性能模拟,可作为设计模型基础。而梁-弹簧模型对于衬砌结构的力学性能模拟效果更好,对于结构力学性能响应的模拟更为精确,可以作为后续深入研究的基础。

3 变形机理分析

3.1 分析原理

现结合等效刚度均质环模型和梁-弹簧模型,通过数值和解析相结合的方式对类矩形无立柱衬砌结构的收敛变形机理进行分析。

根据结构收敛变形计算基本知识,采用不同计算分析模型,计算结构在顶、底受单位力作用(顶、底的短轴)和腰部受单位力作用(腰部的长轴)条件下产生的内力响应,以用于进行结构短轴、长轴收敛变形机理分析。结构受单位力作用示意图如图8

所示(考虑到试验及模拟反映出结构腰部变形向外,故而单位力正方向设为朝外)。

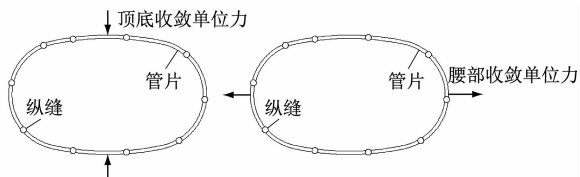


图8 结构受单位力作用示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the unit force acting on the structure

$$\Delta = \oint \frac{M(\varphi)M_1(\varphi)}{E_l} R(\varphi) d\varphi + \sum_{i=1}^{10} \frac{M(\varphi_i)M_1(\varphi_i)}{k_i} \quad (1)$$

式中:

φ ——积分变量;

$R(\varphi)$ ——管片曲率半径;

E ——弹性模量;

I ——管片的惯性矩;

E_l ——管片抗弯刚度;

$M(\varphi_i)$ ——实际试验结构在外荷载作用下所受的接头弯矩;

$M_1(\varphi_i)$ ——结构在单位力作用下的接头弯矩;

k_i ——接头的抗弯刚度。

根据式(1)对结构短轴、长轴收敛变形进行计算。收敛变形主要由两部分组成,分别为管片本体产生的变形量(等号右端第一项)及接头产生的变形量。根据结构力学基本原理计算结构在试验荷载及单位力作用下的管片本体及接头位置内力,管片本体内力延全环积分计算管片本体变形值,10个接头内力分别累积计算接头变形值,由于接头抗剪变形不显著,故仅考虑其抗弯变形。假定结构处于弹性受力状态,接头也处于弹性受力状态,那么实际结构接头弯矩除以实际结构接头抗弯刚度即为接头实际转角 θ_i 。故而可将式(1)变形为式(2)。

$$\Delta = \oint \frac{M(\varphi)M_1(\varphi)}{E_l} R(\varphi) d\varphi + \sum_{i=1}^{10} \theta_i M_1(\varphi_i) \quad (2)$$

3.2 分析结果

基于上述变形机理分析原理,对结构的短轴、长轴收敛变形进行计算,并与试验结果对比,汇总如表2所示。整体而言基于等效刚度均质环模型和梁-弹簧模型的解析变形计算都能够反映试验荷载作用下结构的短轴收敛变形,而长轴变形的拟合效果偏差在10%~13%左右。基于2种模型的变形

机理分析均说明了结构变形的来源主要是管片本体和接头,类矩形盾构隧道无立柱衬砌结构管片本体变形量占 30% ~ 35%,接头变形量占 65% ~ 70%。

表 2 试验实测收敛变形与变形机理分析结果对比
Tab.2 Comparison of test field-measured convergence deformation and deformation mechanism analysis results

计算来源	短轴变形/mm	短轴变形率/%	长轴变形/mm	长轴变形率/%
足尺试验	108.64		49.03	
等效刚度均质环模型	111.17	2.33	54.35	10.85
梁-弹簧模型	111.31	2.46	55.18	12.55

4 结语

本研究以类矩形无立柱衬砌结构为研究对象,基于整环足尺试验结果,采用等效刚度均质环模型和梁-弹簧模型对结构变形进行了计算分析,并与试验结果进行了对比,同时进行了结构收敛变形机理分析,得到如下结论:

- 1) 开展了类矩形盾构隧道无立柱衬砌结构计算分析模型研究,采用等效刚度均质环模型和梁-弹簧模型对钢结构管片在试验荷载下的受荷响应进行了模拟分析。2 种模型都能一定程度上反应类矩形无立柱衬砌结构在试验荷载下的力学响应。
- 2) 梁-弹簧模型对于类矩形无立柱结构的整体及局部变形的拟合效果更好,可作为后续力学性能深化研究的基础。在计算参数合适的情况下等效刚度均质环模型可作为类矩形无立柱衬砌结构的设计分析模型。
- 3) 钢结构管片受荷变形时,管片本体产生的变形约占 30% ~ 35%,接头产生的变形约占 65% ~ 70%。以等效刚度均质环模型和梁-弹簧模型为基础进行结构变形分析均能够一定程度上计算得到

钢结构管片的顶、底变形。
等效刚度均质环模型和梁-弹簧模型仍然具有一定局限性,在后续深化研究过程中也应对其进行修正,以更好开展对类矩形无立柱结构的力学性能的模拟分析。

参考文献

[1] LIU X, LIU Z, YUAN Y, et al. Quasi-rectangular shield tunneling technology in the Ningbo rail transit project[J] // SN Social Sciences, 2018: 2765.

[2] HEFNY A M, CHUA H C. An investigation into the behaviour of jointed tunnel lining [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21(3/4): 428.

[3] KOYAMA Y. Present status and technology of shield tunneling method in Japan[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18(2/3): 145.

[4] 袁金荣,周裕倩,刘学增,等. 双圆盾构隧道衬砌结构设计及参数研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6): 638.

YUAN Jinrong, ZHOU Yuqian, LIU Xuezheng, et al. Structural design of lining and parameter analysis for DOT shield tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(6): 638.

[5] 梁霄,官林星,温竹茵,等. 基于施工全过程的矩形盾构隧道结构受力分析方法及应用[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(7): 1172.

LIANG Xiao, GUAN Linxing, WEN Zhuyin, et al. A method for force analysis of rectangular shield tunnel lining structure considering whole construction process: principle and application [J]. Tunnel Construction, 2018, 38(7): 1172.

[6] 朱雁飞,刘震,叶宇航,等. 类矩形盾构隧道结构计算方法研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(增刊1): 128.

ZHU Yanfei, LIU Zhen, YE Yuhang, et al. Structural calculation of quasi-rectangular shield tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(S1): 128.

[7] 叶宇航,柳献,刘震,等. 类矩形盾构隧道衬砌结构设计模型研究[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(6): 1187.

YE Yuhang, LIU Xian, LIU Zhen, et al. Study on design model of quasi-rectangular shield tunnel linings[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(6): 1187.

(收稿日期:2021-06-18)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》
服务热线 021—56830728 转 821