

文章编号 1000-7598(2011)06-1801-07

盾构隧道施工期衬砌管片受力特性及其影响分析

叶 飞^{1,2}, 何 川², 王士民²

(1. 长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室, 西安 710064; 2. 西南交通大学 地下工程系, 成都 610031)

摘 要: 针对施工期盾构隧道管片衬砌的受力特性及其施工荷载对管片结构造成的影响开展研究。首先, 对施工期管片所受施工荷载进行系统总结, 包括千斤顶推力、注浆压力、上浮力、盾壳作用力、拼装荷载及其他荷载等; 进而将施工阶段管片衬砌的受力特性归纳为典型三维特性、不确定性及不可忽视性等三方面。在此基础上, 对施工荷载对管片结构的影响进行了分析讨论, 包括施工期的管片裂缝、局部破损、止水条损坏、管片渗漏、管片错台等。最后, 从掘进千斤顶控制、注浆压力控制、螺栓二次预紧等角度对施工期盾构隧道的管片破损保护工作提出了建议。分析表明, 对盾构隧道施工期管片受力特性及其影响的研究亟待深入, 管片设计及相关规范亦应更加重视施工荷载的作用及其影响。

关 键 词: 盾构隧道; 施工; 管片; 裂缝; 错台

中图分类号: U 45

文献标识码: A

Analysis of mechanical characteristic of shield tunnel segments lining and its influence during construction

YE Fei^{1,2}, HE Chuan², WANG Shi-min²

(1. Shaanxi Provincial Key Laboratory for Highway Bridge & Tunnel, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Department of Underground Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The mechanical characteristic of shield tunnel segments lining and its influence during construction are analyzed. Firstly, the construction loads are divided into jack thrust force, grouting force, buoyancy, shield shell press, installation load, and other loads, etc. Then, the mechanical characteristic of shield tunnel segments lining is summarized as the typical three-dimensional character, indetermination, and the innegligible character. Afterwards, the influence of the construction loads on segments lining is discussed, including the cracks, partial breakage, sealing strip falling, segments leakage, and segments dislocation. Finally, some advices to protect the shield segments during construction are presented, such as jack controlling, grouting pressure controlling, and the repeated tightening the bolts. The result shows that the analysis of the mechanical characteristic of shield tunnel segments lining and its influence during construction is imperative, and the construction loads should be emphasized in segments designing and the correlative criteria.

Key words: shield tunnel; construction; segments; cracks; dislocation

1 引 言

隧道工程位于地下, 围岩的复杂性决定了隧道工程的设计理论远没有地上工程发展成熟。长期以来, 盾构隧道设计主要以土力学理论、结构理论、连续介质理论为指导^[1]。从考虑隧道衬砌和地层的相互作用出发, 地下结构的理论计算方法有荷载结构法和地层结构法, 或者称之为结构力学方法和连续介质力学方法^[2]。事实上, 荷载结构法仍然是目

前进行隧道结构理论计算用得最多的一种方法, 我国地下铁道及铁路隧道设计规范中均推荐使用此方法^[3]。当前经常在各种文献中所见到的弹性连续框架法、假定抗力法、弹性地基梁法等都属于荷载结构法, 其主要特点是仅对衬砌结构进行计算, 而无法计算围岩的应力和变形^[2]。

荷载-结构法中, 一般将作用于衬砌结构的荷载按表 1 方式分类^[4-5]。对于表 1 中的主荷载, 已有研究和相应成果比较多, 理论也相对较完善, 也有相

收稿日期: 2010-02-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50808020); 中国博士后科学基金资助项目 (No. 20080440183)

第一作者简介: 叶飞, 男, 1977 年生, 博士后, 副教授, 主要从事隧道工程相关理论与技术研究。E-mail: xianyefei@sohu.com

应的规范^[6]予以明确规定。

对于次荷载和特殊荷载，由于受施工工艺和周围环境影响较大，有些荷载还具有一定随机性，确定起来比较复杂，其中，次荷载中的施工荷载，主要包括千斤顶推力、盾尾密封刷压力、壁后注浆压力、上浮力以及管片拼装机的操作荷载等，是施工过程中必须重视的施加在管片衬砌结构上的作用力，而现行规范没有对此类工况在设计阶段做出明文规定，也没有合适的计算理论及计算方法^[7]，然而，盾构隧道施工过程中各种施工荷载经常会造成管片结构的破坏，引起管片错台、破损、渗漏水等问题^[4, 8-9]。

表1 盾构隧道设计荷载的分类
Table 1 Design load types of shield tunnel

主荷载	次荷载	特殊荷载
土压力（垂直及水平土压力）	内部荷载	相邻隧道的影响
水压力	施工荷载	地基沉降的影响
自重	地震的影响	邻接施工的影响
上覆荷载		其他
地基抗力		

事实上，正常使用阶段和施工阶段盾构隧道管片衬砌结构的受力特性有较大不同^[10]。在正常使用阶段，其受力特性常被简化为平面应变问题，对应的研究也较为成熟；而对于施工阶段，由于其复杂的约束条件，衬砌结构的受力为典型的三维问题，况且存在诸多的不确定因素，致使对此问题的研究则相对滞后。本文针对盾构隧道施工期管片衬砌所受的荷载情况、特性以及这些施工荷载可能对管片结构造成的影响和破坏来开展研究，并在此基础上讨论施工期管片结构的保护措施。

2 施工阶段管片受力分析

概括起来，盾构隧道在施工过程中管片衬砌受到的主要荷载有千斤顶推力、注浆压力、上浮力、盾壳作用力、拼装荷载等。

(1) 千斤顶推力

千斤顶推力是盾构隧道掘进的驱动力，它反过来作用在管片上，是施工过程中隧道衬砌在轴线方向最大的外力。在目前国内地铁盾构隧道施工中，淤泥质黏土层中总推力一般为8~12 MN，细沙土地层中总推力为12~15 MN^[11]，全断面砂土地层推力则为15~20 MN，复合地层推力有时候达到20 MN以上，大型跨江海盾构隧道千斤顶推力通常都在30 MN以上。

布置和控制时盾构隧道千斤顶通常都两两一

组，并根据掘进控制的需要予以分区，掘进时因掘进方向控制的需要，各分区的千斤顶行程及推进力并不完全一致，纠偏或者曲线掘进时差别还较大。图1为国内某大型跨江盾构隧道掘进时某时刻的掘进参数。

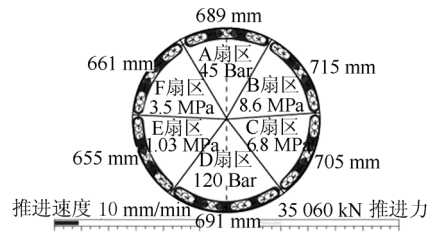


图1 盾构掘进时千斤顶参数
Fig.1 Parameters of shield jacks in excavating stage

(2) 注浆压力

依据盾构工法的特性：拼装好的衬砌脱离盾尾后，由于盾壳原来占据的空间、为衬砌的拼装操作所留空隙、盾构推进时带走的部分粘附于盾壳上的土体所形成的空隙等，在衬砌环背面与实际开挖洞壁间存在环形空隙，使土体暂时处于无支护状态，该空隙即为盾尾间隙（图2）。盾尾间隙的大小是由盾构钢壳的厚度和盾尾操作空间决定的，一般为8~16 cm。盾构工法施工中，对盾尾间隙的处理，即壁后注浆是施工的关键。壁后注浆在填充盾尾间隙、加固土体的同时，对管片也产生了一定压力，该压力达到一定程度时，可能引起管片局部或整体上浮、错台、开裂、压碎或其他形式的破坏。

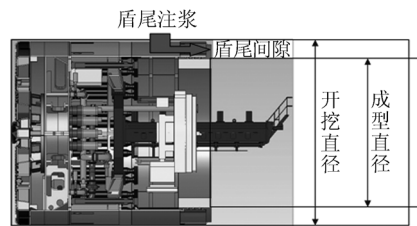


图2 盾尾间隙及注浆加固
Fig.2 Tail gap and grouting reinforcement

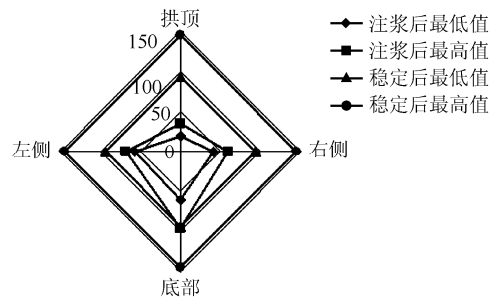


图3 广州地铁施工期管片受力测得结果（单位：kPa）
Fig.3 Stress monitoring result of Guangzhou metro during construction(unit: kPa)

对于注浆压力的计算,笔者在文献[9, 12]中进行过相应理论推导和探讨。另据文献[13]中对广州地铁盾构施工中管片受力的监测结果,管片安装完成并注浆后,管片外侧围岩压力达到最大值,扣除初始应力,围岩压力增量为92.9~143.5 kPa,盾构推进19环,即28.5 m后围岩压力趋于稳定,稳定后拱顶压力为18.8~35.2 kPa,左侧为56.4~68.0 kPa,右侧为41.1~59.3 kPa,底部则为61.0~95.1 kPa,如图3所示,可见注浆对管片所受围岩压力的影响重大。而且,文献[13]的研究还表明注浆压力是管片内力增长的重要因素。

(3) 上浮力

盾构隧道的壁后注入的水泥浆液一般需要5~7 h的初凝时间^[14],而通常情况下这期间盾构一直在向前掘进,如果周围地层满足一定条件,一定范围内的土体未能及时握裹住管片,那么在这几个小时内有一段管片是悬浮在注浆浆液中的(或者是水、泥浆等,见图4),这就产生了管片上浮力(浆液浮力扣除管片自重)。

(4) 盾壳作用力

管片与盾壳之间存在一定摩擦力,盾尾密封刷对管片环也存在一较为均匀的环向压力,一般情况下这些荷载不会对管片结构造成影响。但是,当盾构在曲线段掘进、纠偏,或者因其他原因造成盾构长时间停止掘进(造成盾构机“磕头”发生)时,盾壳对管片造成的荷载尤其是挤压荷载就变得不可忽视,如图5所示。

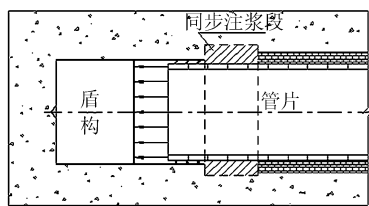


图4 上浮力的形成

Fig.4 Formation of buoyancies

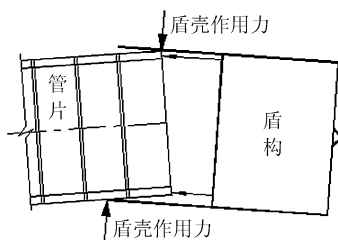


图5 盾壳作用力

Fig.5 Press generated by shield shell

(5) 拼装荷载

拼装荷载主要是管片拼装过程中作用在管片上的装配器荷载。总体上看,随着盾构隧道直径的不断增大,管片的宽度、厚度都有较大程度的增长,地铁管片宽度从1.0、1.2 m到1.5 m,厚度一般为30 cm或35 cm,单块管片最大重量一般在5 t以内,而大直径跨江海盾构隧道管片宽度达2 m,厚60 cm以上,单块管片最大重量超过10 t,上海上中路隧道管片的最大重量达15 t左右,这使得管片拼装器的装备能力大为增长,在一定程度上也增加了拼装荷载。管片拼装器在拼装管片的过程中需要来回调整拼装位置以安装纵横向螺栓,若上一环管片断面不平整,管片位置不精确,会导致下环管片的受力不均匀,在带来螺栓安装困难问题的同时,亦在管片内部产生了不均匀次生应力。

盾构隧道管片在施工期受到的其他施工荷载还有诸如后备套设备自重、管片运输车自重以及真圆保持器千斤顶荷载等。

3 施工阶段管片衬砌的受力特性

3.1 典型三维特性

由前分析可以看出,与运营期管片受力情况不同,施工阶段管片衬砌结构受到的诸如千斤顶推力、注浆压力、盾壳作用力、上浮力、拼装荷载以及其他荷载等,具有典型的三维特性,研究中无法简化为平面模型,也为抽象出数学模型的理论分析造成较大难度,因而,当前对于施工期管片结构受力分析的研究多倾向于数值分析手段^[10, 14],或者模型试验手段,对应的理论研究还滞后于工程实践的发展。

3.2 不确定性

与当前管片结构设计所用的荷载模式(主要是土水压力,包括水土合算和水土分算法)不同,施工期所受荷载的不确定性很大,如千斤顶推力,在正常掘进阶段和纠偏阶段就有很大的不同,相对而言,后者更多的时候为一偏心荷载,并存在一定应力集中效应。而且,因为盾构机械的偏移会带来管片拼装轴线的偏移,也带来了管片间的拼装应力。这些荷载在设计阶段都是难以准确确定的。

3.3 不可忽视性

近年来众多的盾构隧道工程实践表明,施工荷载及其对管片造成的影响和破坏,越来越不可忽视,因为这往往是管片破损、裂缝、错台、渗漏水的原因所在。

对盾构隧道管片施工期所受荷载的研究以及各种施工荷载对管片衬砌结构的影响研究和防治,已

经愈发迫切。

4 施工荷载对管片结构的影响

盾构隧道掘进过程中，因为前述各种施工荷载的组合作用，通常会引起管片各种形式的破坏现象，诸如外弧面破裂、边角损坏、螺栓孔及定位孔处混凝土崩裂、管片局部浅层裂缝、管片整体贯通裂缝，以及管片渗漏水等危害。

4.1 管片裂缝

4.1.1 施工期管片裂缝现象

管片裂缝是盾构隧道施工期受施工荷载影响而经常发生的一类破坏形式，如图6所示。



图6 施工期管片裂缝

Fig.6 Cracks of segments during construction

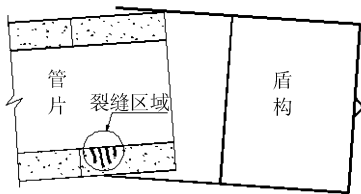


图7 盾构机姿态调整产生裂缝

Fig.7 Cracks generated by shield location adjustment

4.1.2 施工期管片裂缝原因分析

(1) 盾壳集中力作用

本文 1.4 章节中所述“盾壳作用力”的情况，盾构机械在姿态调整过程中会产生应力集中效应，应力积聚到一定程度，即会在管片表面产生裂缝，如图7所示。由图可见，管片在筒体内时会受到盾壳筒体约束，但管片一旦脱离筒体，应力就会立刻释放，所以离开筒体最近的一环管片最有可能破裂。

(2) 千斤顶的不良顶力

盾构掘进过程中最为理想的状态是管片环中线轴线与盾构机中心轴线重合，而实际掘过程中这两轴线的偏差时时存在，从某种程度上讲，盾构掘进的过程也是盾构机的轴线不断调整的过程。因为两

轴线的偏差，经常会造成千斤顶的中心没有作用在管片环的中心上，造成管片偏心受压，产生轴向弯矩，当此弯矩达到一定程度，亦会产生管片裂缝，如图8所示。

通常情况下，为加大千斤顶与管片环端面的作用面积，在千斤顶与管片接触处都设置有撑靴，当撑靴损坏或其他原因致使撑靴倾斜地作用在管片的接头面上时，会对管片结构造成局部较大剪应力，也可能产生管片裂缝，如图9所示。

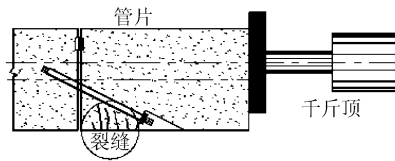
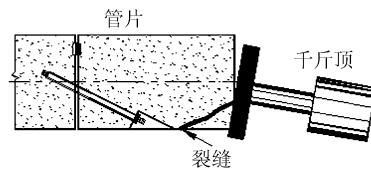
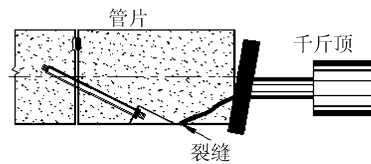


图8 千斤顶偏心荷载致使管片裂缝

Fig.8 Cracks generated by eccentric load of jacks



(a) 千斤顶整体偏移



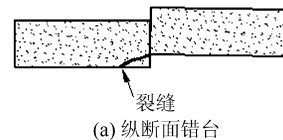
(b) 千斤顶撑靴损坏

图9 千斤顶集中荷载致使管片裂缝

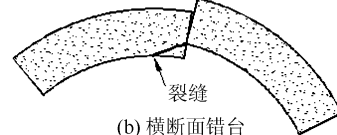
Fig.9 Cracks generated by concentrated load of jacks

(3) 管片错台所致

盾构隧道施工过程中，管片错台是经常发生的现象^[15]，而其反映在结构上则是减小了该处的受力厚度，改变了管片结构的受力状态，造成应力集中，通常也会造成管片裂缝，如图10所示。



(a) 纵断面错台



(b) 横断面错台

图10 接缝错台致使管片裂缝

Fig.10 Cracks generated by dislocation of segments

(4) 拼装间隙所致

盾构隧道管片拼装管片时，一部分千斤顶需要缩回，即产生了局部应力释放，造成已拼装好的管片发生局部位移，产生拼装间隙，使得环向接头面上的不平整，在千斤顶作用下产生应力集中现象，进而产生管片局部裂缝，如图 11 所示。

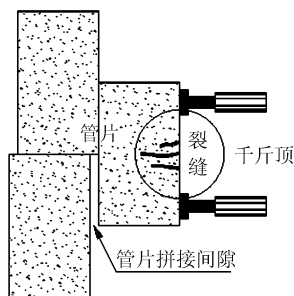


图 11 管片拼装间隙产生裂缝

Fig.11 Cracks generated by gap between segments

4.2 管片局部破损

盾构隧道管片的局部破损多发生于连接螺栓的手孔处、定位孔边缘以及管片周边位置，也是盾构隧道施工期经常遭遇的一类破坏形式。一般是因为在吊装、运输或拼装中遭受了冲撞、磕碰、摩擦、挤压所致，图 12 为某盾构隧道管片在定位孔位置的破损现象。



图 12 管片局部破损

Fig.12 Partial breakage of segments

4.3 止水条损坏，管片渗漏

在盾构隧道施工过程中，本文前面所提到的管片间的错位（错台）会使得相邻管片的止水条不能正常吻合，导致管片渗漏水。各种裂缝，尤其是贯穿性裂缝，也会引起管片渗漏水。连接螺栓未拧紧会使得管片在停止掘进后呈松弛状态，造成接缝的扩张，让止水条无法紧密结合，也是造成管片渗漏水的原因。掘进中千斤顶支撑摆放位置不对，致使止水条损坏，也是管片渗漏的潜在因素。此外，拼装过程中不慎将止水条擦挤错位或脱落，也会造成管片的渗漏水（尤其是在插入封顶快时）。图 13 为管片

拼装过程中止水条脱落的图片，图 14 为拼装好的管片发生较大面积的渗漏水现象的图片。

4.4 管片错台

前已提及，管片错台是盾构隧道施工中常见的一种现象（图 15），错台和本文前面所分析的管片裂缝往往相伴而生，发生大的错台的时候，往往会产生管片裂缝或破损。

对于管片错台的原因，注浆压力、上浮力、拼装荷载、千斤顶荷载、盾构机的姿态调整以及管片的制造误差等，都可能造成管片错台。



图 13 拼装封顶快时止水条脱落

Fig.13 Falling of sealing strip during construction

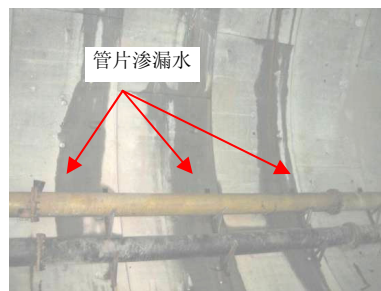


图 14 管片渗漏水

Fig.14 Leakage of segments



图 15 管片错台

Fig.15 Dislocation of segments

5 施工期管片破损保护探讨

5.1 掘进千斤顶控制

5.1.1 盾构掘进姿态的合理纠偏

盾构姿态是指盾构机在掘进过程中盾构机与设计隧道的相对形态，片姿态是指在掘进过程中，所

拼装的管片与设计隧道的相对形态。二者主要表现为左右偏移和上下偏移4种形态,具体表现在盾尾间隙、盾构掘进时油缸行程差、管片错位以及盾构轴线偏移等。纠偏时,纠偏半径一定要大于偏移半径,即 $R_{\text{纠}} > R_{\text{偏}}$,即盾构机的纠偏角必须小于已偏移的角度,如图16所示。

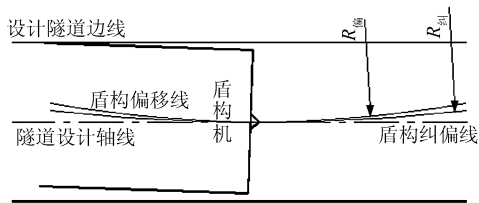


图16 盾构纠偏示意图

Fig.16 Rectifying deviation of shield

盾构机纠偏不能很快地把盾构机调整到正确的姿态上去,一般要通过数环管片的渐进性修正。纠偏时,先将盾构机偏角缓慢变小,但盾构机仍为偏离状态,控制盾尾间隙为微小变化,经过一段距离后,盾构机姿态才纠偏完成。切忌一次性纠偏到位,如果采用一次性纠偏到位,首先管片可能无法拼装,即使能够拼装,一定会造成管片上应力集中,从而使管片推出盾构筒体后产生爆裂;其次,若急剧纠偏,盾构机将立即出现另一个姿态偏移。而且,在盾构掘进过程中,当盾尾间隙和行程器出现偏差时,应先及时测量监控,确定是管片姿态出现问题还是盾构姿态出现问题,然后再考虑纠偏。

盾构纠偏时为防止纠偏过急及产生内裂,应采取如下措施:①在盾构机偏移方向使用较多油缸的同时,在纠偏方向使用适当数量的油缸,用以防止纠偏角度过大,减小应力集中,例如,某跨江盾构隧道的盾构千斤顶共计22组44支千斤顶,分4个区,当盾构机往右下角方向偏移时,纠偏方向应该是左上角,油缸的选用如图17所示,主推B、C组油缸全部选用,另追加A组2支,左上角(A、D区)选择4支或6支助推油缸(图17中填充的千斤顶),其他油缸跟随。②适当调节油压,形成合适的油压差以防止应力过于集中。

5.1.2 逐步应力释放

及时将千斤顶顶进过程中施加给管片的预应力予以释放,通过在应力集中部位发生一定位移,让应力在拼装好的管片中再次调整,重新分布,在一定程度上也会起到一定预防施工期管片破损的作用。比如,把一环管片分3次推进,假如推进一环管片需要两米,当推进到700 mm时,在应力集中

的部位去掉推进油缸,把此处的应力释放后再继续推进,再推进700 mm时,进行第二次应力释放,其过程如图18所示。

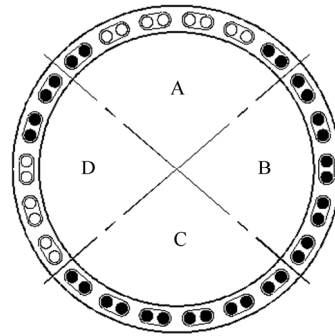


图17 纠偏时千斤顶的控制

Fig.17 Jack selection in rectifying deviation process

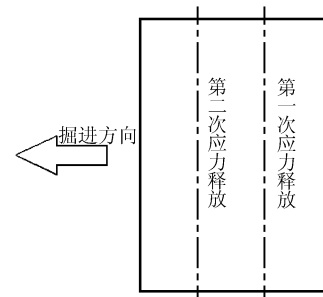


图18 推进过程中逐步应力释放(单位: mm)

Fig.18 Stress release during driving process(unit: mm)

5.1.3 地层对应

不同的地层对油缸的选择反应灵敏程度有所不同。比如,在软地层中掘进时,加上一支顶进油缸盾构姿态就会有很明显的变化,而在围岩情况较好的风化岩层中掘进时,由于盾壳筒体受到较大的径向摩擦,即便是加上几支油缸,盾构机整体反应程度也比较小。所以,盾构机的姿态控制是经验性较强的一门技术,不光需要操作手高度的责任心、较好的业务素养,还需要果断而灵敏的判断和反应能力。

5.2 注浆压力控制

注浆压力是施工过程中管片所受到的一重要施工荷载,若该压力过大,经常会造成管片的变形和错台,严重时甚至会剪断连接螺栓,尤其是封顶块,注浆压力经常会使得封顶块有向隧道内部空间发生位移的趋势。所以,施工过程中对注浆压力的控制显得尤为重要,对于该问题,笔者也曾另文探讨^[16]。

5.3 螺栓二次预紧

管片拼装时,每拼装一块管片都会立即安装上连接螺栓,一环拼装完成时,一般该环能够安装的

螺栓也会安装完成。值得注意的是,随着盾构机不断向前推进,已拼装好的管片由于受千斤顶荷载作用,会发生沿盾构轴线方向向后的位移,该位移的发生会使得已安装的螺栓出现松弛现象,随着盾构机的持续推进,千斤顶推力对后方已拼装好的管片的荷载效应会越来越小,此时,螺栓的松弛效应即显现出来,便会出现管片错台、接缝位置渗漏水等现象。

实践证明,在盾构机掘进过程中,及时对已拼装好的管片的连接螺栓进行二次预紧(甚至多次预紧),对保证拼装精度、防止管片错台、渗漏等问题都有积极作用。

6 结 语

总体上说,目前盾构隧道管片结构的设计理论主要是基于运营期的受力情况来考虑的,这是有一定道理的,因为施工荷载多数情况下只是临时荷载,存在很大的不确定性,而且需要将管片、盾构机械以及周围地层作为一复杂的三维体系来分析研究,这也带来了抽象出合理的计算模型较为困难的问题。然而,众多的工程实践表明,盾构隧道施工期出现的管片裂损、渗漏等问题越来越不可忽视,研究施工期管片结构的受力特性,以及各种施工荷载对管片结构可能造成的破坏和损坏已经迫在眉睫。

盾构隧道施工工艺的发展及施工过程中的关键工序,与管片所受施工荷载以及由此而可能带来的破坏密切相关,所以,制定施工组织及施工过程中,要纳入管片衬砌结构的受力分析,并作为一主要控制条件来制定施工方案和技术细节,以减小因施工荷载对管片衬砌结构的影响和破坏。

参 考 文 献

- [1] 汤漩,黄宏伟.盾构隧道衬砌设计中几个问题的研究[J].地下空间,2003,23(2):210—215.
TANG Xuan, HUANG Hong-wei. A study on several key topics of shield tunnel lining design[J]. **Underground Space**, 2003, 23(2): 210—215.
- [2] 夏永旭,王永东.隧道结构力学计算[M].北京:人民交通出版社,2004:11—15.
- [3] 罗衍俭.铁路隧道结构设计理论与方法存在的问题[J].世界隧道,1997,(5):8—12.
LUO Yan-jian. Structure design method and problems of railway tunnel[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 1997, (5): 8—12.
- [4] Working Group No.2. International tunnelling association guidelines for the design of shield tunnel lining[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2000, 15(3): 303—331.
- [5] 朱伟,陈仁俊.盾构隧道施工技术现状及展望(第二讲)——盾构隧道技术问题和施工管理[J].岩土工程界,2001,(12):14—16.
ZHU Wei, CHEN Ren-jun. Status and expectation of shield tunnel construction technology[J]. **Geotechnical Engineering World**, 2001, (12): 14—16.
- [6] 北京城建设计研究总院. GB50157—2003 地铁设计规范[S].北京:中国计划出版社,2003.
- [7] 杨国祥,林家祥,杨方勤.超大直径盾构法隧道施工期衬砌结构安全性研究[C]//第三届上海国际隧道工程研讨会.上海:[出版社不详],2007.
- [8] 官林星,朱合华,于宁.考虑荷载工况组合的盾构衬砌横向受力分析[J].岩土力学,2004,25(8):1302—1306.
GUAN Lin-xing, ZHU He-hua, YU Ning. Analysis of internal force of shield lining in cross-section considering load combination[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(8): 1302—1306.
- [9] 叶飞.软土盾构隧道施工期上浮机理分析及控制研究[D].上海:同济大学,2007.
- [10] 张海波,殷宗泽,朱俊高,等.盾构法隧道衬砌施工阶段受力特性的三维有限元模拟[J].岩土力学,2005,26(6):990—994.
ZHANG Hai-bo, YIN Zong-ze, ZHU Jun-gao, et al. Three-dimensional FEM simulation of shield-driven tunnel lining during construction stage[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(6): 990—994.
- [11] 张曙辉.盾构施工时管片产生裂缝的原因及对策[J].施工技术,2007(6):73—74.
ZHANG Shu-hui. The cause and countermeasure for tubular disc-produced crack in shield-tunneling construction[J]. **Construction Technology**, 2007, (6): 73—74.
- [12] 叶飞,朱合华,何川.盾构隧道壁后注浆扩散模式及对管片的压力分析[J].岩土力学,2009,30(5):1307—1312.
YE Fei, ZHU He-hua, HE Chuan. Back-filled grouts diffusion model and its pressure to segments of shield tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(5): 1307—1312.
- [13] 唐孟雄,陈如桂,陈伟.广州地铁盾构隧道施工中管片受力监测与分析[J].土木工程学报,2009,42(3):118—124.

- forecast displacement slope based on RBF neural network[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 26 (Supp.1): 2282–2287.
- [8] 周创兵, 陈益峰. 基于相空间重构的边坡位移预测[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 205–208.
ZHOU Chuang-bing, CHEN Yi-feng. Application of phase space reconstruction in slope displacement forecasting[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2000, 21(3): 205–208.
- [9] 刘开云, 乔春生, 滕文彦. 边坡位移非线性时间序列采用支持向量机算法的智能建模与预测研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 57–61.
LIU Kai-yun, QIAO Chun-sheng, TENG Wen-yan. Research on nonlinear time sequence intelligent model construction and prediction of slope displacement by using support vector machine algorithm[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(1): 57–61.
- [10] 董辉, 傅鹤林, 冷伍明. 滑坡位移时序预测的核函数构造[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1087–1092.
DONG Hui, FU He-lin, LENG Wu-ming. Kernel design for displacement time series of landslide[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(4): 1087–1092.
- [11] 王建锋. 两类经典滑坡发生时间预报模型的理论分析[J]. 地质力学学报, 2004, 10(1): 40–50.
WANG Jian-feng. Theoretical analysis of two classical landslide predication models: Saito's model and Voight's model[J]. **Journal of Geomechanics**, 2004, 10(1): 40–50.
- [12] 郝小员, 郝小红, 熊红梅, 等. 滑坡时间预报的非平稳时间序列方法研究[J]. 工程地质学报. 1999, 7(3): 279–283.
HAO Xiao-yuan, HAO Xiao-hong, XIONG Hong-mei, et al. Research on landslide time forecast by the unstable time series method[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1999, 7(3): 279–283.
- [13] 付义祥, 刘志强. 边坡位移的混沌时间序列分析方法及应用研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2003, 27(3): 473–477.
FU Yi-xiang, LIU Zhi-qiang. Analytic method and application about chaotic slope deformation destruction time series[J]. **Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)**, 2003, 27(3): 473–477.
- [14] 高玮, 冯夏庭. 灰色-进化神经网络的滑坡变形预测研究[J]. 岩土力学, 2004, 25 (4): 514–517.
GAO Wei, FENG Xia-ting. Study on displacement predication of landslide based on grey system and evolutionary neural network[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(4): 514–517.
- [15] 吴益平, 滕伟福, 李亚伟. 灰色-神经网络模型在滑坡变形预测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 632–636.
WU Yi-ping, TENG Wei-fu, LI Ya-wei. Application of grey-neural network model to landslide deformation prediction[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(3): 632–636.
- [16] JEROME H, WERNER S. Projection pursuit regression[J]. **Journal of the American Statistical Association**, 1981, 78: 817–827.
- [17] 冯夏庭. 智能岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
29(3): 619–623, 628.
- [15] 李云丽. 盾构隧道施工过程管片结构受力特征研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [16] 叶飞, 朱合华, 丁文其. 基于螺栓接头受力性能的盾尾注浆压力控制研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(3): 312–316.
YE Fei, ZHU He-hua, DING Wen-qi. Pressure control analysis based on mechanical properties of bolts during grouting at the shield tail[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2009, 37(3): 312–316.

上接第 1807 页

TANG Meng-xiong, CHEN Ru-gui, CHEN Wei. Stress monitoring and internal force analysis of Guangzhou metro shield tunnel segment during construction[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2009, 42(3): 118–124.

- [14] 宋克志, 袁大军, 王梦恕. 盾构法隧道施工阶段管片的力学分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 619–623, 628.
SONG Ke-zhi, YUAN Da-jun, WANG Meng-shu. Segmental mechanical analysis of shield tunnel during construction stage[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008,