

北京地下直径线大直径盾构隧道技术研究

索晓明, 张继清, 杨毅秋

(铁道第三勘察设计院, 天津 300252)

[摘要] 以北京地下直径线双线大直径($\phi 11.6\text{ m}$)盾构隧道的设计技术研究为背景,重点介绍了该盾构隧道的盾构选型、盾构管片结构计算、管片结构设计、管片防水设计等技术,并对该盾构隧道施工的设计要求做了简单叙述,对今后类似工程具有一定参考价值。

[关键词] 铁路隧道;大直径盾构;管片设计

[中图分类号] U455 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)12-0011-07

1 前言

1.1 盾构隧道概况

北京地下直径线前三门隧道为单洞双线隧道,全长 7 230 m,其中盾构段隧道长 5 175 m。

盾构隧道平、纵断面受沿途地面建筑、市政工程、道路、地下管线、既有地铁附属结构、在建的地铁线、护城河等的影响与限制,导致隧道埋深较深,平曲线较多。隧道共设 7 处平曲线,隧道埋深为 22.15~42.14 m(覆土厚度为 10.55~30.54 m),盾构段隧道最大纵坡为 1%,最小纵坡为 0.3%,竖曲线半径为 10 000 m。

1.2 盾构机介绍

盾构机采用复合式泥水加压平衡盾构,盾构刀盘外径为 $\phi 12.04\text{ m}$,盾体长 10.315 m,含刀盘约 11 m,总长约 57 m。

1.3 地质条件

盾构隧道洞身穿越地层西段以卵石层为主,向东粉粒逐渐变细,东端以粉砂、粉粘土为主。其中粉砂、中砂、砾砂结构松散,易软化、变形,产生坍塌。

东段主要为层间潜水,水位高程为 20.96~28.12 m(水位埋深为 16.41~23.40 m);含水层的渗透系数 $K=150\text{ m/d}$,涌水量 $Q=14\,900\text{ m}^3/\text{d}$ 。西

段地下水为层间潜水,水位高程为 21.39~24.92 m(水位埋深为 23.10~25.60 m);渗透系数 $K=150\text{ m/d}$,涌水量 $Q=37\,200\text{ m}^3/\text{d}$ 。

2 盾构选型

2.1 选型原则

- 1) 选用与地质条件匹配的盾构机型。
 - 2) 选择对周围环境影响小的机型。
 - 3) 盾构机的性能应能满足工程掘进的施工长度和线形的要求。
 - 4) 选择盾构机的掘进能力可与后续设备、始发场地等施工设备匹配的机型。
 - 5) 选择可以辅以合理的辅助工法的盾构机型。
- 以上原则中以能绝对保证掘削面稳定、确保施工安全的机型为主。

2.2 北京地下直径线盾构隧道的主要技术特点

- 1) 盾构隧道洞身大部分处于卵石层中,隧道埋深较深,洞身基本上处于潜水-承压水中。
- 2) 隧道断面为圆形,内径为 $\phi 10.5\text{ m}$ 。
- 3) 环境复杂(地面周边环境:隧道南侧的板式高层、老火车站均距隧道较近;地下环境:地下管线较多,隧道与正在运营的环线地铁车站及区间的附属结构距离均很近,隧道距离文物较近)。

[收稿日期] 2010-8-10

[作者简介] 索晓明(1962—),男,黑龙江延寿县人,教授级高级工程师,主要从事隧道及地下工程方面的施工及研究工作;

E-mail: suoxiaoming@tsdig.com

泥水盾构的主要特点:

1) 在易发生流砂的地层中能稳定开挖面,能确保施工安全。

2) 泥水压力传递速度快而均匀,控制精度高,对开挖面周边土体的干扰小,地面沉降控制精度高。

3) 盾构出土由泥水管道输送,速度快而连续。

4) 刀具、刀盘磨损小,易于长距离盾构施工。

5) 刀盘所受扭矩小,更适合大直径隧道的施工。

6) 需要大规模的泥水处理设备及较大施工场地。

综合地质条件、地下水位、环境保护控制要求、施工安全分析、工期要求、施工场地等各种因素分析对比。特别是泥水盾构对掌子面平衡压力控制较精确,对地面沉降控制较优。综合比较,选择泥水加压平衡盾构。

3 盾构管片结构计算

盾构管片结构计算是大直径盾构设计技术的难点部分,结合本工程的具体条件,分别按施工阶段和使用阶段的隧道结构分开计算。

3.1 使用阶段计算

3.1.1 计算模型研究

国际隧道协会 2000 年发表的《盾构隧道衬砌指南》上对计算模型进行了总结和分类:基础框架模型法;有限元法;弹性公式法;Schultze 和 Duddeck 模型;Muir Wood 模型^[1]。

各种方法在适用条件和应用成熟度上各不相同,为使管片结构计算安全可靠,分别采用了匀质圆环法、梁-弹簧模型法、Muir Wood 算法及有限元法进行验算比较。

匀质圆环法是一种应用较为成熟的方法,可以计算不同土层条件下的衬砌内力,但不能直接考虑管片间与环之间的接缝效应。在考虑管片接缝时引入了两个假设:管片间接头存在使得整体刚度降低的折减系数 η ;考虑错缝拼装条件下相邻管片环的弯矩传递作用,引入弯矩增加系数 ζ 。计算模型如图 1 所示。

梁-弹簧模型法在匀质圆环法的基础上,将接缝处用具有轴向刚度、转动刚度、剪切刚度的弹簧来模拟,可以有效考虑管片之间与环间作用力,但国内对弹簧刚度的取值尚不成熟。计算模型如图 2 所示。

Muir Wood 法在欧洲得到广泛应用,计算中采用了 Muir Wood 在《弹性地层中的圆形隧道》中推荐并由 J Curtis 修正的模型,对隧道的中埋及深埋

段进行分析计算(见图 3)。

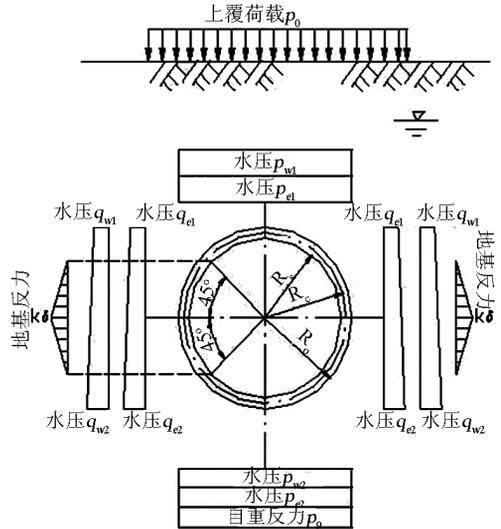


图 1 匀质圆环法计算模型

Fig. 1 Uniform annular model

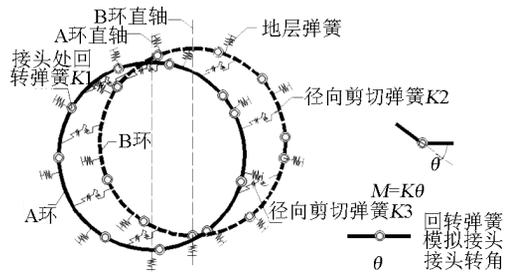


图 2 梁-弹簧模型

Fig. 2 Beam-spring model

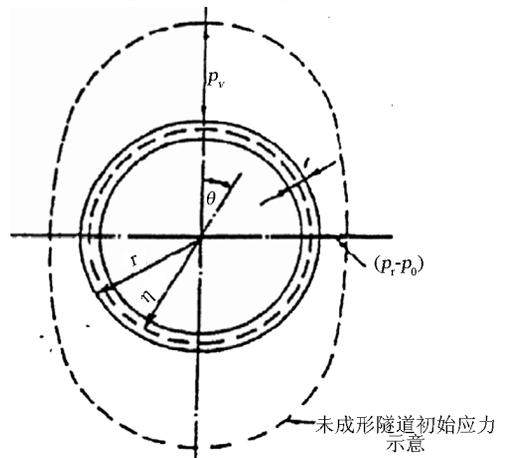


图 3 Muir Wood 计算模型图

Fig. 3 Muir Wood model

最大允许形变导致的荷载由有限元计算,它是基于连续体理论,该方法计算结果偏于经济(见图 4)。

3.1.2 计算荷载的选取

计算荷载按永久荷载、可变荷载、偶然荷载分

类,对覆盖厚度 $1D$ 、 $1.5D$ 、 $2D$ 、 $2.5D$ (D 为盾构直径) 的断面进行设计计算。

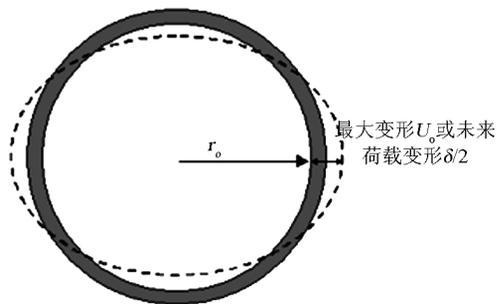


图4 最大允许变形导致的荷载

Fig.4 Loads induced by maximum desirable deflection

覆土厚度小于 $2D$ 的土层压力采用土柱理论计算; 超过 $2D$ 的断面土层压力采用 Terzaghi 压力拱理论确定。

3.1.3 由最大允许变形导致的荷载

设计采用摩根法(1961), 假定最大允许变形为内径的 0.2% , 规划相邻建筑物对直径线产生的附加变形为 10 mm , 推导出由于变形及最小推力导致的弯矩。

3.1.4 计算结果的对比分析

计算结果见表1, 从计算结果来看, 除超浅埋地段外, Muir Wood 法计算得到的弯矩、轴力值为最不利组合, 其中浅埋 ($1.5D$) 工况为设计控制工况。在超浅埋 ($1D$) 工况下, 匀质圆环法计算结果为最不利组合。由于计算模型不同, 各种计算方法所得的内力值也略有差异(有的差异较大), 根据北京地区的地质条件以及从北京地区地铁盾构的实践经验看, 弹性匀质圆环模型得出的计算结果比较符合实际情况。

表1 使用阶段计算结果汇总
Table 1 The summarize of the result

采用计算的方法 and 软件	工况	超浅埋 ($1D$)		浅埋 ($1.5D$)		中埋 ($2D$)		深埋 ($2.5 \sim 3D$)		
		$M(\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m})$	$N(\text{kN}/\text{m})$	$M(\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m})$	$N(\text{kN}/\text{m})$	$M(\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m})$	$N(\text{kN}/\text{m})$	$M(\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m})$	$N(\text{kN}/\text{m})$	
匀质圆环法	基本组合	内弧侧	570.3	1 368.3	611.11	2 108.61	610.00	2 109.90	612.89	2 560.06
		外弧侧	365.6	1 934.6	412.94	2 890.90	426.57	2 885.46	433.31	3 340.67
梁-弹簧模型法	基本组合	内弧侧	337.2	1 394	403.28	2 172.50	397.67	2 179.83	402.56	2 483.22
		外弧侧	220	1 981	311.17	2 938.02	307.28	2 993.67	307.67	3 206.44
Curtis/Muir Wood	基本组合	内弧侧			771.3	1 556.1	720.2	1 658.6	791.1	2 214.8
		外弧侧			771.3	3 336.4	720.2	3 470.7	791.1	3 983.8
SAP2000	基本组合	内弧侧	798.8	1 086.6	693	599.8	721	7 181	773	9 517
		外弧侧	772.6	1 896.9						
Plaxis	基本组合	内弧侧	745.875	999	726.3	3 431.7	776.25	4 356.45	830.25	7 146.9
		外弧侧	714.015	2 070.495	980.1	4 176.9	1 051.65	5 300.1	1 127.25	8 796.6
最大变形极限状态	0.2% D 形变		560.8	999	560.8	1 590.6	560.8	1 658.6	560.8	2 214.8
	0.2% D + 附加形变 10 mm		814.55	999	814.55	1 590.6	814.55	1 658.6	814.55	2 214.8

3.2 施工阶段验算

施工过程中的荷载是从拼装管片时起到注入尾隙的壁后注浆材料硬化为止作用于管片环上的荷载, 包括千斤顶推力、壁后注浆压力以及起吊、堆放等荷载。

3.2.1 管片拼装允许误差(椭圆度)验算

针对拼装允许误差验算在最小轴力作用下纵向接缝张开量, 以及环向接头错台引起的内力进行验算(见图5~9)。

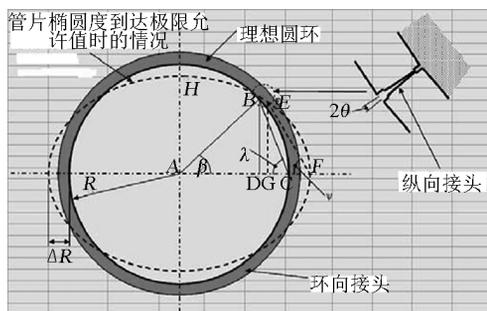


图5 真圆度不佳的工况

Fig.5 Effects of poor ring build

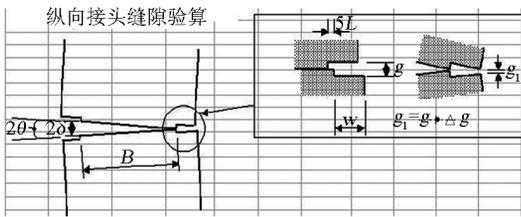


图6 纵向接头缝隙验算

Fig. 6 Check on longitudinal joint gap sufficiency

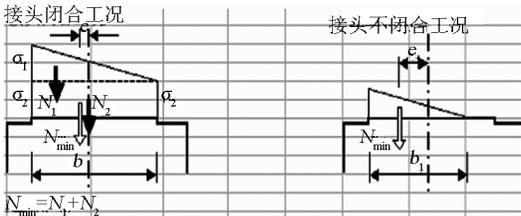


图7 纵向接头最小闭合轴力作用下内力

Fig. 7 Internal force induced in axial loading at minimum longitudinal joint closure

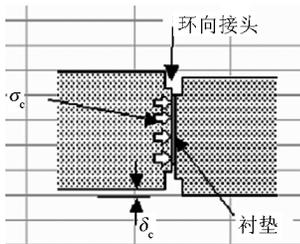


图8 错台引起的内力

Fig. 8 Bursting due to axial thrust taking into stepping of circumferential joint

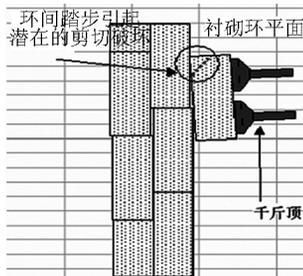


图9 管片位置不准而引起的剪力

Fig. 9 Shear stress due to misalignment of segments on circumferential joint

3.2.2 千斤顶推算验算

由于制作和拼装误差,管片圆环的环缝面往往参差不齐。当盾构千斤顶的顶力存在偏心的情况下,极易使管片开裂或顶碎。

根据千斤顶的最大推力、传力衬垫的尺寸和作

用在管片上的偏心矩分别验算在正常推进状态下以及急转弯和纠偏状态下所需的千斤顶推力是否会对管片造成局部受压破坏。同时根据 Guyon 法 (1972) 计算由偏心产生的管片内部拉应力是否超过混凝土抗拉强度允许值(见图 10、图 11)。

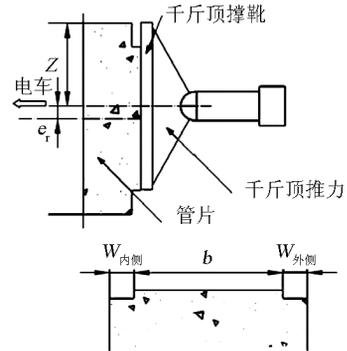


图10 千斤顶推力偏心的影响

Fig. 10 Analysis of effects of eccentric thrust loads

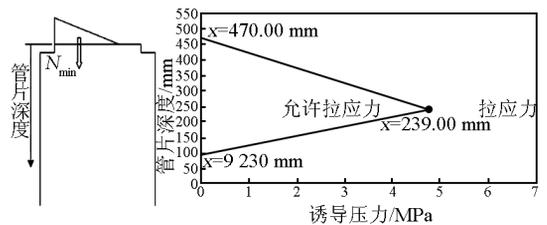


图11 Guyon 法(1972)计算顶推力偏心造成的拉应力

Fig. 11 TBM propulsion jacking loads: assessed by Guyon (1972)

3.2.3 注浆压力验算

壁后注浆压力是对盾尾间隙实施壁后注浆时产生的压力。根据盾构穿越的土层条件确定环背初次和二次注浆产生的 σ_{grout} ; 采用 Muir Wood 和匀质圆环法验算注浆压力(见图 12 ~ 14)。

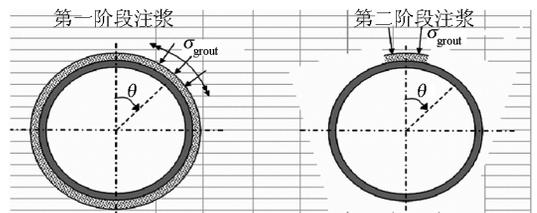


图12 注浆压力计算模型

Fig. 12 Grouting loads (annulus and secondary grouting)

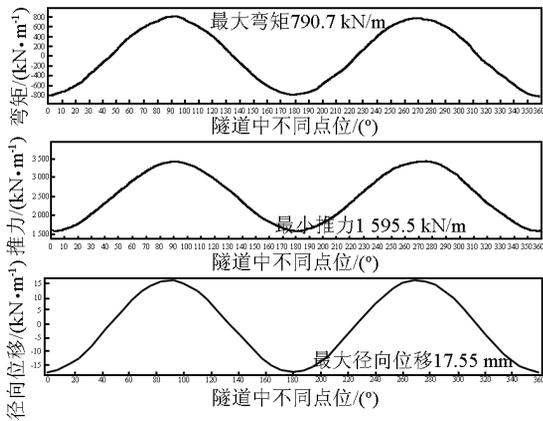


图 13 Muir Wood 法计算的二次注浆压力下管片内力

Fig. 13 The internal loads due to the secondary grouting loads calculated by Muir Wood method

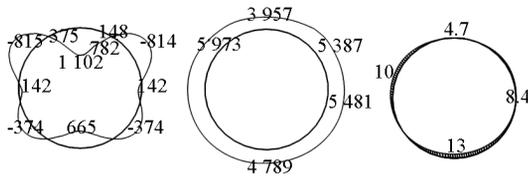


图 14 匀质圆环法计算的二次注浆压力下管片内力

Fig. 14 The internal loads due to the secondary grouting loads calculated by uniform annular method

3.2.4 管片堆放及吊装验算

管片堆放过程中及管片存放的方式对管片的内力分布会产生一定的影响,特别是存放过程中的动态效应,可能对堆放在最底层管片产生较大弯矩,需要进行验算(见图 15、图 16)。

根据管片分块形式,考虑管片安装过程中动态提升产生的附加弯矩效应。

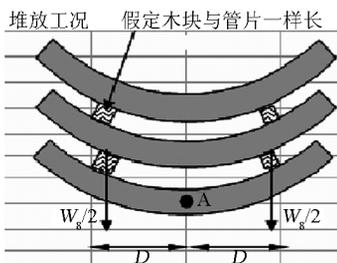


图 15 管片吊装荷载计算模型

Fig. 15 Computation model of the handling loads of the lining

3.3 管片配筋计算

管片结构配筋强度计算采用施工阶段计算内力值控制值和使用阶段匀质圆环法计算结果、最大变形极限状态计算结果分别进行计算,采用最不利值。

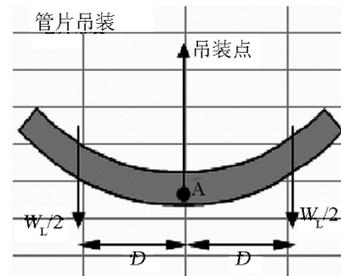


图 16 管片堆放荷载计算模型

Fig. 16 Computation model of the stacking loads of the lining

管片结构配筋裂缝控制计算采用使用阶段匀质圆环法计算结果、最大变形极限状态计算结果分别进行计算,采用最不利值。受力主筋截面配筋率为 1.45 %。

4 管片结构设计

4.1 管片的分块研究

衬砌圆环的分块主要由管片制作、运输、安装等方面的实践经验确定,但也应符合满意的受力性能、防水的要求。

衬砌分块从制作、防水、拼装速度方面看,分块数越少,越有利;从运输及拼装方便而言,分块数越多,越有利。该设计从通用楔形环管片的特点出发,充分考虑盾构千斤顶的布置,按错缝拼装的原则,共考虑了以下几种分块方式。

6 + 1 模式:分块形式为 4A (56.84°) + 2B(56.84°) + K(18.96°),一环内纵向采用 19 个等圆心角布置;分块形式为 4A (57.6°) + 2B (57.6°) + K(14.4°),一环内纵向采用 25 个等圆心角布置。

等分 7 块:分块形式为 4A (51.43°) + 2B (51.43°) + K(51.42°),一环内纵向采用 28 个等圆心角布置。

7 + 1 模式:分块形式为 5A (49.09°) + 2B (49.09°) + K(16.37°),一环内纵向采用 22 个等圆心角布置。

8 + 1 模式:分块形式为 6A (43.2°) + 2B (43.2°) + K(14.4°),一环内纵向采用 25 个等圆心角布置;分块形式为 6A (42.352 9°) + 2B (42.352 9°) + K (21.176 5°),一环内纵向采用 34 个等圆心角布置。

等分 9 块:分块形式为 6A(40°) + 2B(40°) + K(40°),一环内纵向采用 36 个等圆心角布置。

从隧道所需推力分析,千斤顶数量不宜小于 34 个,对于 6+1 模式:一环内纵向采用 19 个等圆心角布置,千斤顶需布置 19 对共 38 个;一环内纵向采用 25 个等圆心角布置,千斤顶需布置 25 对共 50 个,这两种分块均能满足千斤顶布置和错缝拼装的设计要求;对于等分 7 块:一环内纵向采用 28 个等圆心角布置,千斤顶需布置 28 个则太少,可行的方案为布置 42 个,但需三个一组(否则千斤顶需压缝),此种分块能满足千斤顶布置和错缝拼装的设计要求;对于 7+1 模式:一环内纵向采用 22 个等圆心角布置,千斤顶需布置 22 对共 44 个,该种分块也能满足千斤顶布置和错缝拼装的设计要求;对于 8+1 模式:一环内纵向采用 25 个等圆心角布置,千斤顶需布置 25 对共 50 个,该种分块也能满足千斤顶布置和错缝拼装的设计要求;一环内纵向采用 34 个等圆心角布置,千斤顶需布置 34 个单独千斤顶,能满足千斤顶布置和错缝拼装的设计要求。

根据工程的具体设计条件,从运输能力、制作拼装、结构受力等方面考虑,衬砌环全环分为 8+1 模式(分块形式为 6A(43.2°)+2B(43.2°)+K(14.4°)),即由 K 形顶、两块邻接块 B 和 6 块标准块 A 构成。

4.2 管片的拼装及通用管片的设计

1) 管片的拼装。经综合比较后,设计中采用 1 800 mm 的环宽。错缝拼装,施工采用先搭接 2/3 环宽径向推上,再行纵向插入的拼装方法。

2) 通用管片的设计。结合本隧道的技术条件,为了便于施工,管片形式采用了通用管片,其楔形量系经计算并综合考虑后确定,取 44 mm。衬砌排版时,对不同的缓和曲线、圆曲线段均以经计算优选的最佳衬砌布置方案拟合(一般拟合误差 <10 mm,局部 15 mm),以满足线路设计的要求。

3) 衬砌制作、拼装、施工精度要求。a. 单块管片制作的允许误差:宽度 ± 0.5 mm;弧、弦长 ± 1.0 mm;外半径 ± 20 mm;内半径 ± 1 mm;环向螺栓孔孔径及孔位 ± 1.0 mm;b. 整环拼装的允许误差:相邻环的环面间隙 ≤ 1.0 mm;纵缝相邻块块间间隙为 ± 2 mm(其中 2 mm 为传力衬垫),衬砌对应的环向螺栓孔不同轴度小于 1 mm;c. 推进时轴线误差 ≤ 80 mm;d. 衬砌拼装成环的水平、竖向直径偏差 $\leq 0.2\% D$ 。

5 管片防水设计

5.1 防水设计原则

防水设计遵循“以防为主,以堵为辅,多道防线,综合治理”的原则。以管片结构自防水为根本,

接缝防水为重点,确保隧道整体防水。

5.2 防水设计

1) 防水等级标准和设防要求。防水等级:区间隧道的防水等级为一级,不允许渗水,结构表面无湿渍。设防要求:采用高精度钢模制作高精度管片;接缝防水:在衬砌管片外弧侧设置一道密封垫防水,作为管片接缝防水的第一道防线;在衬砌管片内弧侧设置一道密封垫防水,作为管片接缝防水的第二道防线;在螺孔设置密封圈,作为管片接缝防水的第三道防线;在衬砌管片内弧侧设置嵌缝防水,作为管片接缝防水的第四道防线。

2) 防水混凝土的抗渗等级和技术要求:混凝土管片抗渗等级 $\geq S12$;管片裂缝宽度应不大于 0.2 mm;迎水面受力主钢筋保护层厚度不应小于 55 mm。

3) 隧道衬砌接缝防水材料的设计。接缝设计水压按 1.3 MPa 考虑,作为接缝防水首道防线的弹性橡胶密封垫采用 EPDM(三元乙丙)为主,辅以遇水膨胀橡胶的复合密封垫,中间与下部开有多个孔槽。密封垫应用具有合理构造形式、良好回弹性、遇水膨胀性、耐久性、耐水性的材料。接缝弹性橡胶密封垫在环缝张开 6 mm、纵缝张开 6 mm(其中包括密封垫沟槽制作误差、拼装误差、后期接缝变化)时,要求能长期抗 1.3 MPa 的水压。

施工阶段:在盾构管片安装机侧向挤压力为 110 kN/m;张开量为 3.0 mm,错开量为 10 mm 的情况下,止水压力为 0.8 MPa。

使用阶段:使用寿命 100 年;设计要求按 6 个工况来考虑,即错开量为 0 mm,张开量为 0 mm 或 6.0 mm;错开量为 10 mm,张开量为 0 mm 或 6.0 mm;错开量为 15 mm,张开量为 0 mm 或 6.0 mm,止水压力为 1.3 MPa。

特殊阶段:在地震工况下,设计要求张开量反复在 6.3~7.9 mm、错开量反复在 16.2~17.3 mm,止水压力为 0.6 MPa。

4) 嵌缝设计。管片接缝防水的第四道防线:嵌缝防水,在始发竖井段 57.6 m(32 环)的衬砌环段进行整环嵌缝,在与规划 8 号和 12 号线、下穿特殊构筑物段、下穿地铁 4 号线宣武门车站段进行整环嵌缝,其余则在拱顶 110°范围和拱底 135°范围内嵌填。衬砌环纵缝内的嵌缝在推进 120 环以后进行。

6 盾构隧道施工技术

6.1 同步注浆及二次注浆

同步注浆应兼顾两方面的作用,即地面沉降及

隧道稳定性。要求按设计的双液浆施工,及时的调整注浆量和注浆压力,并随时检查浆液初凝时间。二次注浆应在管片出盾尾后,根据施工参数的反馈情况,结合周边环境,及时的施作。

6.2 特殊地段施工

盾构隧道段环境极其复杂,在地面环境上与周边建筑物(含文物)、地面道路环境(含桥梁)的关系非常密切;在地下环境又与地下管线、地下建(构)筑物环境(含地铁工程)的关系非常密切。

盾构隧道在特殊地段的保护设计主要分为地面(洞外)和地下(洞内)两项设计,地面设计措施主要是在地面实施对地下建(构)筑物隔离桩保护或注浆加固地层,地下设计措施主要是采取同步注浆、二次注浆以及控制施工工艺等措施。

隧道施工的设计要求:对特殊地段的保护主要通过工程辅助措施和借助于盾构施工本身工艺措施的控制两种手段同时进行。工程措施主要是:地面通过设置隔离桩、注浆加固基础及固结地层保护或注浆加固地层。

工艺措施主要有:a.在地下盾构掘进过程中,通过控制掌子面泥水压力,泥水压力与地层压力相差 ± 50 kPa。b.选用合适性能指标泥浆,根据沉降控制及地层颗粒渗透性,选择粘度、比重合适的泥浆,确保泥膜成形速度及质量。c.加强同步注浆、二次注浆以有效填充建筑空隙,减少地层的变位值。d.控制盾构推进参数,控制盾构姿态。e.控制盾构推进时地层损失率在0.5%~1%。

另外,隧道施工引起的变形要满足环境安全的设计控制标准。盾构隧道与地铁相邻段要在运营

地铁内采用远程数据自动化采集监控系统对地铁进行监测。

7 结语

1)泥水加压平衡盾构适合于周边环境对变形要求特别高的城市大直径盾构隧道,但盾构的刀盘设计、刀具的选型需与地层有很好的适应性。

2)管片结构在制作、运输、拼装等施工阶段的验算非常重要,尤其是要关注千斤顶推力、二次注浆压力的验算,并根据验算结果配置相应的构造钢筋;管片结构在使用阶段的计算,要因地制宜地选择适合当地情况的合理设计方法,并要关注规划的建(构)筑物上穿或下钻本工程时引起的附加变形荷载,计算并配置相应的受力钢筋;构造钢筋与受力主筋的配置重量比宜控制在45:55左右。

3)管片结构设计主要关注管片环分块、管片选型、环宽及细部构造设计,对于大直径盾构来说,环宽不宜小于1.8 m。

4)管片结构防水设计中,橡胶密封垫在施工阶段、使用阶段(含特殊工况)中张开量、错开量组合情况下的止水设计要求明确,非常重要。

5)目前国内对复杂周边环境下大断面盾构的施工工艺经验、施工技术要求经验略为不足,尚须继续研究。

参考文献

- [1] 朱中华,廖少明.中外盾构隧道技术的差距[J].同济大学地下建筑与工程学报,2008,18(22):18-20.

Large diameter shield tunnel technology of Beijing underground diameter wire

Suo Xiaoming, Zhang Jiqing, Yang Yiqiu

(The Third Railway Survey and Design Institute, Tianjin 300252, China)

[Abstract] Based on the designing technology of double-line large diameter($\phi 11.6$ m) shield tunnel of Beijing underground diameter wire, this article emphasized on the selection of shield tunnel machine, the structural calculation of the lining, the segment lining design and the water resistant technology, also demonstrated the designing requirements of the shield tunnel construction. These would be valuable reference for the future similar projects.

[Key words] railway tunnel; shield of large diameter; segment design