

# 富水砂卵石地层大直径 泥水盾构施工地表沉降规律

赵宝华<sup>1</sup>, 胡曦波<sup>2</sup>, 张兵<sup>1</sup>, 李文俊<sup>1</sup>

(1. 中铁隧道集团技术中心, 河南洛阳 471009; 2. 中铁隧道集团有限公司, 河南洛阳 471000)

[摘要] 北京地下直径线工程位于富水砂卵石地层中, 穿越诸多建(构)筑物。通过实际监测结果分析, 总结掘进参数与地表沉降之间的规律及隧道周围重要建筑物的变形规律, 经与类似工程比较后发现本工程在变形控制上有很大的成效。

[关键词] 富水砂卵石; 大直径; 泥水盾构; 沉降规律

[中图分类号] U455 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)12-0094-04

## 1 环境控制难点

工程位于北京市内繁华城区, 地理位置显著, 对周边环境影响控制要求很高。沿线如天宁寺桥、正阳门、护城河等重要建筑众多, 对沉降控制非常严格。在北京砂卵石地层, 首次采用大直径泥水盾构施工, 施工难度大<sup>[1]</sup>。

## 2 盾构施工引起沉降的影响因素

盾构推进引起的地层变化的因素有盾构直径、埋深、地质、盾构施工情况等, 其中, 隧道线形、盾构外径、埋深等设计条件和地质强度、地下水位分布等地质条件, 属于客观因素; 而盾构的形式、辅助施工方法、衬砌壁后注浆、施工管理等情况, 则属于主观因素。具体来说, 引起地层变位的有以下 7 个方面的因素(见表 1)<sup>[2]</sup>。

表 1 地层沉降影响因素

Table 1 The influencing factor of stratum subsidence

序号	地层损失因素	单位长度内 最大地层损失	地层损失率/%
1	开挖面的地层损失	$\pi R^2 h$	-1 ~ +1
2	切口边缘的地层损失	$2 \pi R t$	0.1 ~ 0.5

续表

序号	地层损失因素	单位长度内 最大地层损失	地层损失率/%
3	沿盾壳的地层损失	$0.1 \pi R^2$	0.1
4	盾尾后的损失	$2 \pi R(R - R_1)$ $\pi R(R - R_1)$	0 ~ 4 0 ~ 2
5	改变推进方向的损失	$DL \times \pi R/Z$	0.2 ~ 2
6	曲线推进的地层损失	$L^2 \pi R/8(R + R_c)$	0.5 ~ 1
7	正面障碍引起的损失	A	0 ~ 0.5

注:  $R$  为盾构外半径;  $R_1$  为衬砌外半径;  $t$  为超挖刀盘的厚度;  $L$  为盾构长度;  $h$  为盾构推进蛇形曲线半径;  $A$  为盾构正面障碍物体积;  $D$  为盾构直径;  $Z$  为覆土深度

## 3 盾构施工沉降规律分析

### 3.1 不同地层沉降规律分析

为适应直径线砂卵石地层的地质环境, 对盾构刀盘进行了改造。我们将盾构掘进施工段分为刀盘改造前、改造后两个阶段进行比较分析。

隧道轴线地表纵向沉降曲线见图 1。从沉降曲线分析可以得出:

1) 盾构掘进时沉降控制总体较好, 盾构实验段沉降基本控制 -15 mm 以下。盾构刀盘改造后的掘

[收稿日期] 2010-8-10

[作者简介] 赵宝华(1982—), 男, 黑龙江林口县人, 助理工程师, 主要从事隧道及地下工程方面的监测及研究工作;

E-mail: kys\_zbh@126.com

进沉降在 10 mm 以下,小于改造前的主要原因是二次掘进后,掘进参数进行了调整,泥水压力增大,减小了前期沉降,同时在沿线地层采取了跟踪注浆等加固措施,进一步减小了盾构对地层和周边的扰动。

2) 砂卵石、中粗砂等不同地层掘进参数较为合理,沉降值差别不大。

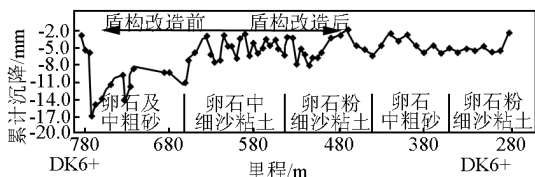


图 1 隧道试验段轴线地表沉降曲线图

Fig. 1 The axis surface settlement curve of tunnel test section

### 3.2 地表的沉降发展过程规律分析

盾构掘进引起的地表沉降分为先行沉降、开挖面前沉降、通过沉降、盾尾空隙沉降、后期沉降 5 个阶段<sup>[3]</sup>。

盾构掘进地表时空曲线图如图 2 所示。

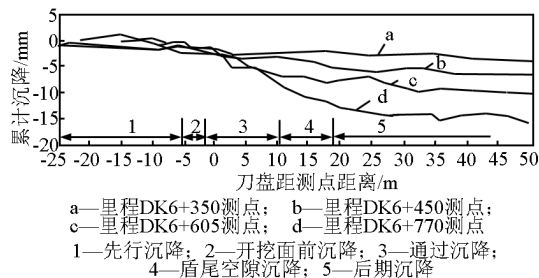


图 2 不同地段测点距刀盘距离沉降曲线图

Fig. 2 Settlement curve of distance between the measuring points and cutter head of differential sections

各阶段沉降量占总沉降量的比例分别为 5% ~ 10%、15% ~ 20%、30% ~ 35%、20% ~ 25%、10% ~ 15%。沉降量和沉降速率较大阶段发生在第二至第四阶段,即盾构施工控制沉降的第二至第四阶段最为关键,第二阶段变形控制要素是泥水压力,第三阶段变形控制因素为掘进速度,第四阶段变形控制要素是盾尾间隙注浆的及时性和充填率。

盾构掘进的纵向影响范围:刀盘改造后为盾构掘进前方 15 ~ 20 m,盾构通过后 25 ~ 30 m 范围。

### 3.3 地面沉降的横向沉降槽和影响范围分析

盾构掘进时地面沉降横向沉降槽和影响范围如图 3 所示。

地表沉降槽曲线表明:

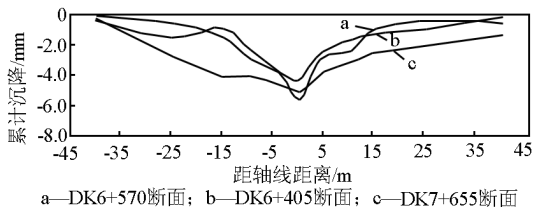


图 3 不同地段地表的横向沉降槽曲线

Fig. 3 Curve of surface lateral settlement groove of different sections

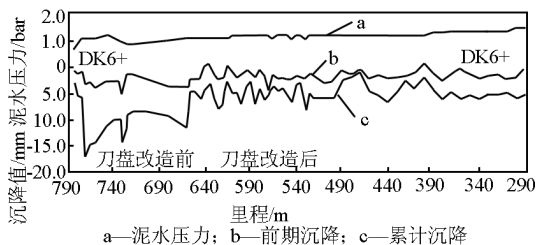
砂卵石地层沉降槽宽度为 35 ~ 45 m,即施工影响范围为 1.5 ~ 2 倍洞径。

地表横向沉降槽曲线基本沿隧道轴线点呈典型的正态分布,轴线处的沉降值最大,在隧道轴线 10 m 范围内是盾构掘进的主要影响区域。应对该区域内的建筑物进行重点保护。距轴线 15 m 为次要沉降区。

### 3.4 盾构掘进参数与沉降关系规律分析

#### 3.4.1 地表沉降与掘进泥水压力的关系

盾构刀盘泥水压力大小是影响盾构开挖面前方土体沉降的主要因素,隧道轴线地表累计沉降、前期沉降(一、二阶段)和盾构刀盘泥水上部压力的关系见图 4。



注: 1 bar = 100 kPa

图 4 隧道轴线地表累计沉降、前期沉降与泥水压力关系

Fig. 4 Relationship between the surface cumulative settlement, previous settlement and slurry pressure of axis tunnel

由图 4 可知,在同等条件下,地层沉降大小基本与泥水压力调整有关,泥水压力设置较大的地段沉降相对较小,反之则相反,特别是前期沉降与泥水压力调整规律基本一致,因此,通过对泥水压力合理的调整,对前期沉降的控制效果显著。

由泥水压力的变化引起的地表沉降为 0.5 ~ 1.5 mm,沉降数值很小,泥水压力的变化对开挖面前方的地层影响不大,泥水压力总体控制较好。

### 3.4.2 地表沉降与同步注浆量关系

盾尾脱出沉降主要与同步注浆有关,如图5所示,盾尾间隙沉降一般为2~3 mm,由盾尾空隙充填不满和不及时引起的地层损失小。在相同地段,随着注浆量的增大,沉降值变小,特别是对盾尾沉降的影响尤为明显。

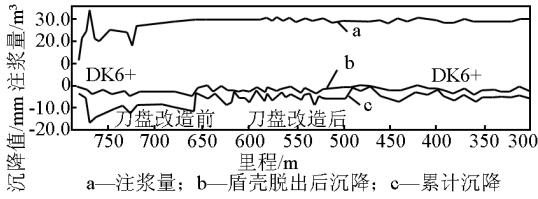


图5 地表沉降与同步注浆量关系图  
Fig. 5 The relationship curve between surface settlement and the amount of simultaneous grout

盾构隧道各地段同步注浆量浆液注入率在180%以上,较好地控制了盾尾间隙沉降。

盾构掘进过程中,应根据地质条件、地表沉降等及时调整、确定与推进速度相匹配的注浆速度,确保充填效果,以达到控制沉降的目的。

### 3.4.3 沉降与同步注浆压力关系

确定同步注浆压力时应避免过大的注浆压力引起地表有害隆起或破坏管片衬砌,并防止注浆损坏盾尾密封,注浆压力正常情况下高于相应的泥水压力0.02~0.05 MPa,隧道轴线地表隆沉和盾构同步注浆压关系见图6。

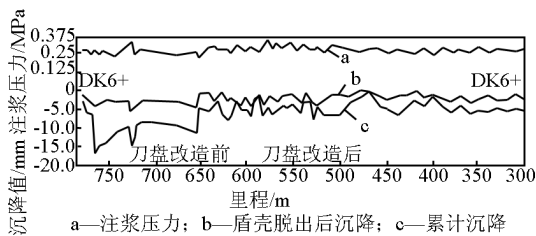


图6 盾构轴线地表沉降与同步注浆压力关系图  
Fig. 6 The relationship curve between the surface settlement and the pressure of simultaneous grout

如图6所示,刀盘改造后盾壳脱出后沉降值较为接近,为-2.0~-1.5 mm。随着注浆压力增大,浆液注入率增大,地表沉降值变小,盾壳脱出后的沉降值更为明显,可以通过调节注浆压力影响注入率、注浆量,进而很好地控制地表沉降。

## 3.5 盾构引起周边重要建(构)筑物沉降规律分析

### 3.5.1 盾构掘进对西便门西里7#楼影响

该段隧道覆土22 m,隧道与西便门西里7#楼的最小水平距离为3.8 m。位于盾构掘进主要影响区域,建筑物为6层砖混预制板结构,差异变形要求:差异沉降<8 mm。

控制措施:a. 优化调整盾构掘进参数,使盾构在掘进过程中达到最优控制掘进状态;b. 对建筑物进行地面补偿注浆等措施预先加固;c. 信息化施工,及时反馈建筑物的变形情况。

盾构掘进施工过程中,西便门西里7#楼累计沉降值为0.3~2.7 mm,差异沉降值为0.6~0.9 mm。典型测点历时沉降曲线见图7。

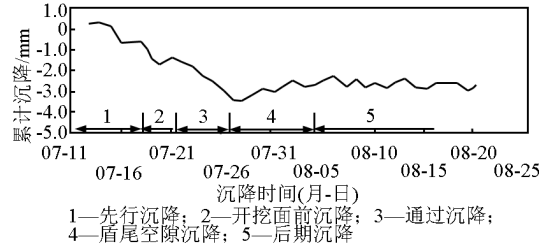


图7 西便门西里7#楼沉降最大测点历时曲线图  
Fig. 7 The duration curve of settlement maximum measuring of number 7 building of Xibian men xi li

盾构掘进通过建筑物时,建筑物沉降小,掘进施工对建筑物影响范围为:盾构到达前10 m,通过后20 m。

### 3.5.2 盾构掘进对地铁2号线长椿街站西喇叭口影响

直径线在该段与地铁2号线长椿街西喇叭口区间斜向并行,本段隧道埋深约为29 m。最小水平距离为2.2 m,竖向距离为16 m。

既有地铁2号线隧道结构处于直径线盾构掘进施工的主要影响区域,由于盾构掘进施工过程各项工作控制较为得当,既有地铁2号线隧道结构和轨道结构变形很小,结构累计沉降值小于2 mm。沉降主要发生在盾构通过阶段和盾尾拖出后续阶段。选择合理的掘进速度、泥水压力等掘进参数,保证刀盘道具的完好率,及时合理进行同步注浆和二次补强注浆等都是控制既有地铁结构变形的关键因素。既有地铁沉降测点典型历时曲线见图8。

## 3.6 深层土体沉降规律分析

盾构掘进过程引起不同深度土体沉降发展历程见图9和表2。

结合施工各项参数,可知:

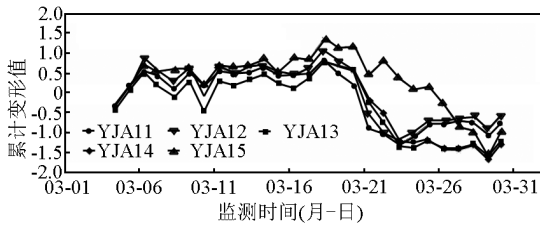


图8 地铁轨道结构 YJA11 ~ YJA15 测点沉降变形历时曲线

Fig. 8 The duration curve of settlement deformation from YJA11 to YJA15 measuring points of subway rail structure

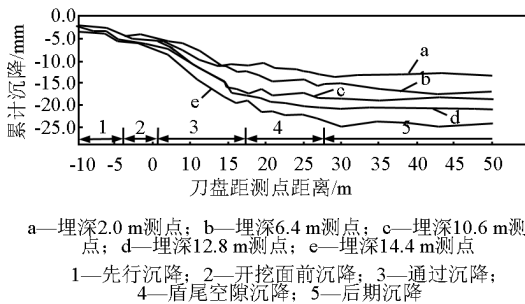


图9 不同地层测点距刀盘距离沉降曲线图

Fig. 9 Settlement curve of distance between the measuring points and cutter head of differential stratum

表2 盾构掘进不同深度土层沉降测点沉降发展历程表  
Table 2 Subsidence settlement form development of shield measuring points at different depths of soil

测点编号	埋深/m	先期沉降/mm	开挖面前沉降/mm	通过沉降/mm	盾尾缝隙沉降/mm	后续沉降/mm	累计沉降/mm
DG9-0	0.0	-1.3	-3.1	-5.3	-3.2	-1.5	-14.4
GFJ2-1	-2.4	-2.0	-1.3	-5.6	-3.4	-1.1	-13.4
GFJ2-2	-4.0	-2.0	-0.8	-6.8	-4.0	-2.2	-15.8
GFJ2-3	-6.4	-2.1	-0.4	-8.1	-3.8	-2.8	-17.2
GFJ2-4	-8.6	-1.6	-0.4	-9.7	-3.7	-2.1	-17.5
GFJ2-5	-10.7	-2.3	-0.7	-11.3	-3.0	-1.1	-18.4
GFJ2-6	-12.8	-1.8	-2.2	-10.8	-2.8	-1.1	-18.7
GFJ2-7	-13.1	-3.1	-1.3	-11.3	-2.5	-2.7	-20.9
GFJ2-8	-14.3	-3.6	-1.0	-12.6	-3.7	-3.5	-24.4
GFJ2-9	-15.0	-4.2	-0.8	-13.4	-2.9	-4.1	-25.4
平均值	—	-2.40	-1.20	-9.49	-3.30	-2.22	-18.61

1)在盾构隧道区间,随着测点埋深的加大,沉降明显随之增大。特别是进入盾构通过阶段和盾尾空隙沉降阶段,埋深较深的测点沉降曲线曲率比埋深浅的测点增大更为明显,这种现象是由于盾构掘进对周边地层形成的地层扰动、缺失,以及地下水流失等影响随与其距离的减少而增大。

2)盾构掘进引起的周边土体沉降主要集中在盾构通过阶段和盾尾空隙沉降两个阶段,分别达到了总沉降值的50%~60%和15%~20%,主要是因为盾构掘进到该处速度较慢,另外,该断面位于护城河岸边,上层土体多为回填土,土质较为疏松,受土体扰动沉降较大。同时也说明不同土层的沉降主要是盾构对其扰动和土体损失造成的。

### 3.7 管片纵向隆沉规律分析

隧道的纵向(即管片)隆沉情况及其与注浆量和注浆压力的关系及管片隆起过程历时曲线如图10所示。

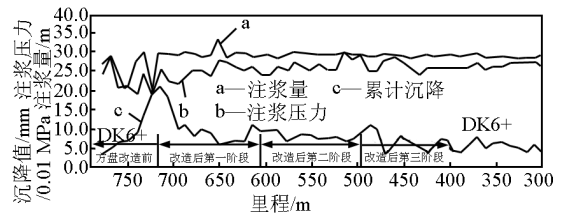


图10 隧道纵向隆沉与同步注浆压力、注浆量关系图  
Fig. 10 The relationship curve between tunnel settlement, the press of simultaneous grout and the amount of simultaneous grout

从图10中可以看出,盾构刀盘改造后同步注浆压力和注浆量变化较小,隧道因注浆压力、注浆量变化引起的隧道纵向隆起变化较小,隆起值普遍小于10mm。

### 3.8 与已施泥水盾构施工沉降值对比分析

通过与已施工程引起的沉降值对比可知,北京地下直径线盾构施工沉降值远小于其他类似工程,说明该工程在沉降控制、确保周边环境安全等方面工作较为突出。

## 4 结语

北京铁路地下直径线工程在繁华城区内采用大直径泥水盾构施工,通过科学化、标准化、信息化施工,顺利通过了护城河、天宁寺桥、西便门桥、西便门东、西便门西里建筑群等风险源。从施工实践的总结可以得出,通过对全线地质和重要建筑物进行预评估、优化盾构掘进参数、加强监控量测、预先加固风险较大的重要建筑物等有效措施可以最大限度地减小施工对周边环境的影响。

(下转 102 页)