

# 大直径盾构侧穿地铁站的变形预测与实测结果分析

张继清, 索晓明

(铁道第三勘察设计院, 天津 300252)

[摘要] 通过数值计算方法对北京地下直径线侧穿地铁2号线某车站的结构变形进行预测,并将预测值与实测值进行对比和差异性原因分析,以期对类似工程预测变形、指定控制指标有一定指导作用。

[关键词] 大直径盾构;地铁站;变形预测;监测;数值分析

[中图分类号] U455 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)12-0018-05

## 1 工程概况

地下直径线隧道在 DK5 + 419 ~ DK5 + 566 段(共 147 m)侧下穿地铁 2 号线某车站(见图 1),该段隧道覆土为 26.81 ~ 28.04 m,隧道顶与该车站结构底板之间的竖向距离为 15.41 ~ 16.31 m,隧道与车站结构外缘距离为 1.3 ~ 4.1 m。该车站(环线地铁)采用双柱三跨矩形钢筋混凝土框架结构。

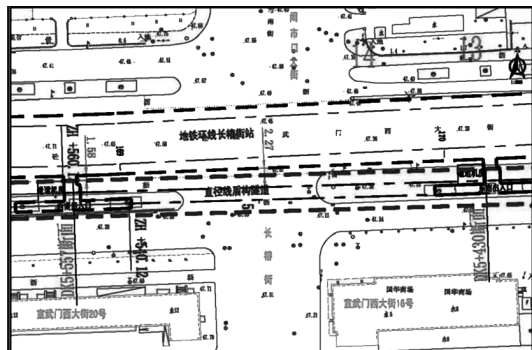


图 1 穿越既有车站风险点平面图  
Fig.1 Plane graph of risk point through existing stations

该段隧道穿越地层以圆砾、卵石为主,夹粉质粘土、细砂、中砂、粗砂。盾构隧道处于层间潜水中,水位埋深为 23.10 ~ 25.60 m,含水层主要为卵石

层、圆砾层和砂层。含水层的渗透系数  $K = 150 \text{ m/d}$ ,涌水量为  $37\,200 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

盾构通过该车站时主要通过调整工艺参数来实现对沉降变形的控制,措施主要有:

1) 控制掌子面泥水压力(泥水压力与地层压力相差  $\pm 20 \text{ kPa}$ )参数设置,尤其是掘进过程的切口泥水压力波动值。

2) 掘进过程选用高质量泥浆,确保泥膜形成速度和质量,以维护掌子面的稳定。

3) 加强壁后注浆的管理,尤其是二次注浆的实施,确保壁后建筑空隙的有效填充。

4) 控制盾构推进参数,尤其是刀盘转速及纠偏控制,避免大的超挖和地层损失。

## 2 盾构侧穿地铁车站的变形预测

### 2.1 计算模型及参数

采用 ABAQUS 商业软件进行模拟计算,计算采用弹性本构模型。计算模型范围根据隧道施工的影响范围、既有地铁结构的实际工作影响范围来确定,水平方向取 85 m,深度方向取 75 m,沿纵向取 148 m。地层力学参数为实测值,注浆加固土体的力学参数适当提高。各土层及材料的物理力学参数见表 1。计算模型见图 2、图 3。

[收稿日期] 2010-08-10

[作者简介] 张继清(1963—),男,山西临县人,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: zhangjiqing@tsdig.com

表 1 材料主要物理力学特性表

Table 1 The main physical and mechanical properties of materials

岩土名称	天然重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)	泊松比(μ)	弹性模量 E/MPa	备注
第一层	20	30	20	0.31	21	以中砂、粉质粘土为主
第二层	20	20	30	0.28	55	以圆砾、粉土为主
第三层	20	0	40	0.24	93	以卵石、粉质粘土为主
第四层	20	0	35	0.23	140	以卵石、细砂为主
既有车站	25	—	—	0.20	30 000	—
隧道衬砌	25	—	—	0.20	34 500	—

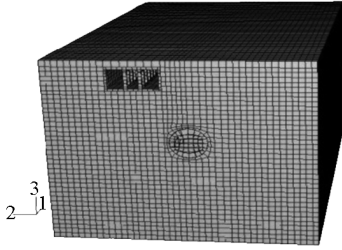


图 2 盾构侧下穿既有车站三维模拟计算模型图

Fig. 2 3D simulation model of shield through existing station

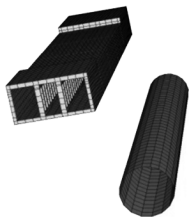


图 3 直径线与既有车站位置关系图

Fig. 3 Position graph between diameter line and existing station

应的构件。

5) 盾构开挖:用单元生死的方法实现盾构土体的开挖模拟。

6) 掌子面泥水压力模拟:采用在掌子面加面荷载的方式施加泥水压力,荷载的大小按掌子面处水平向应力的大小减去 20 kPa 施加,水平向应力取静止土压力。

7) 建筑空隙内同步注浆体采用等代层模拟,隧道开挖后管片支撑土体前土体变形即盾构钢壳对地层变形、同步注浆填充盾尾建筑间隙的变形模拟,用等代层的应力释放率来模拟,本模拟考虑到时间效应、空间掌子面效应和设计要求的地层损失率(最不利为 1%),得出计算模拟过程中等代层的应力释放率为 15%。

8) 土体与管片结构(壳)之间按等代层的应力释放率(85%)来模拟。

### 2.2.2 过程模拟

1) 初始地应力。初始地应力由有限元法计算,即将自重荷载转化为等效节点荷载,计算初始地应力场。

2) 分步施工模拟。计算中采用分步来模拟施工过程,每一个分步是指一个相对完整的施工阶段。对各施工阶段的状态,有限元分析的表达式为:

$$[K]_i \{\Delta\delta\}_i = \{\Delta F_r\}_i + \{\Delta F_g\}_i + \{\Delta F_p\}_i$$

(i 为施工步数)

### 2.3 计算结果及分析

计算结果:竖向位移见图 4,平行段盾构掘进开挖 45 m、90 m、135 m 以及开挖结束后既有地铁竖向位移如图 5 至图 8 所示。

通过有限元计算分析可以看出<sup>[1]</sup>:

1) 2 号线地铁车站结构的最大沉降位于结构离盾构隧道最近处,结构沉降最大值为 15.4 mm。车站横向最大差异沉降为 13.5 mm,倾斜为 0.076%。

## 2.2 计算模拟假定及过程模拟

### 2.2.1 计算模拟假定

1) 假定计算边界处不受隧道开挖的影响,即该处为静止的原始应力状态,变形为零,用约束来模拟。

2) 计算宽度取从隧道边墙处往外不小于 3 倍的隧道宽度。

3) 土体材料与既有结构和盾构管片的接触采用共节点方式,假设面与面之间没有相对位移。土体和既有结构用三维实体单元模拟,盾构管片用三维壳单元模拟。

4) 主体结构中立柱、楼板按等刚度法换算成相

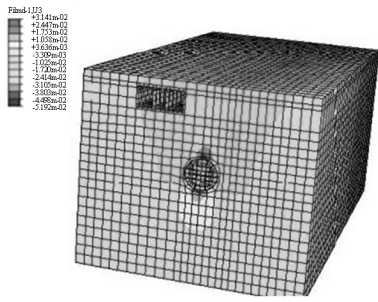


图 4 竖向位移云图

Fig. 4 The vertical displacement map

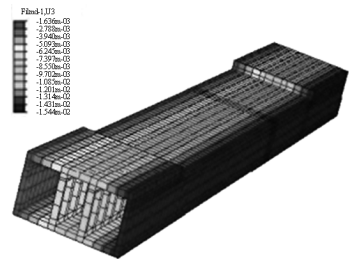


图 8 平行段盾构掘进开挖结束后既有地铁竖向位移云图

Fig. 8 The vertical displacement map after parallel section shield heading

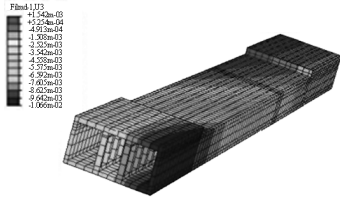


图 5 平行段盾构掘进开挖 45 m 后既有地铁竖向位移云图

Fig. 5 The vertical displacement map of existing subway after parallel section shield heading 45 m

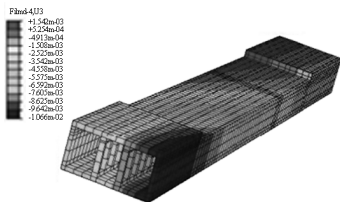


图 6 平行段盾构掘进开挖 90 m 后既有地铁竖向位移云图

Fig. 6 The vertical displacement map of existing subway after parallel section shield heading 90 m

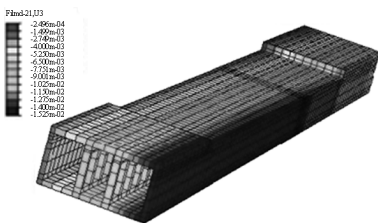


图 7 平行段盾构掘进开挖 135 m 后既有地铁竖向位移云图

Fig. 7 The vertical displacement map of existing subway after parallel section shield heading 135 m

2) 2 号线地铁车站结构的最大水平位移位于结构顶板处, 结构水平位移最大值为 9.7 mm。

3) 地表沉降最大值位于盾构隧道顶点上方, 地表最大沉降为 14.1 mm。

4) 分析结果中 2 号线地铁车站变形缝两侧结构的沉降差不明显。

### 3 变形监测结果分析

地铁车站结构及轨道结构监测方案见表 2, 施工关键期: 每 20 min 记录一次, 每天每隔 4 h 提交一次监测报表; 平时状态: 2h 记录一次数据。人工巡视频率与人工监测频率相同; 当盾构施工出现异常情况时, 加密自动化监测频率至 5 ~ 10 min 采集一次数据, 并加强对对应部位洞体结构人工巡查工作。

地表监测为沿纵向每 15 环 (27 m) 设一断面, 设计要求的绝对沉降控制指标为 15 mm 或隆起 10 mm。监测结果如图 9 所示。

监测结果分析如下:

1) 轨道结构竖向变形及差异变形。根据自动化监测数据<sup>[2,3]</sup>, 累计变形最大点变形量为 -2.05 mm, 变形速率为 -0.01 mm/d; 变形缝两侧差异沉降累计变形最大点变形量为 -0.46 mm, 变形速率为 -0.01 mm/d。

2) 隧道结构竖向变形及差异变形。根据人工监测数据, 所监测的 16 个隧道结构竖向变形监测点, 累计变形最大点变形量为 -2.0 mm; 变形缝两侧差异沉降累计变形最大点变形量为 +0.5 mm, 变形速率为 -0.10 mm/d。

3) 轨道几何形位。所监测的 24 个轨道几何形位监测点, 累计变形最大值为 -2.0 mm。

表 2 地铁车站结构及轨道结构监测方案一览表

Table 2 Monitoring scheme of subway station structure and rail structure

序号	监测项目	监测手段	监测精度/mm	监测频率	监测周期	评估后的变形监控指标/mm		
						预警值	报警值	控制值
1	人工巡视	观察	—	1次/d	盾构掘进前 6D	—	—	—
2	车站结构竖向变形	人工静态测量	0.3	开挖面距离监测断面 $\leq 5D$ ( $D$ 为盾构直径); 每晚列车停运	测得可靠的初始数据之后开	2.1	2.4	3
	变形缝两侧差异变形	人工静态测量	0.3		始监测, 直到掘	—	—	—
3	车站附属结构	人工静态测量	0.3	够观测一次, 开挖面距离监测	进后 10D, 监测	4.2	4.8	6
4	轨道几何形位检测	人工静态测量	1.0	断面 $\geq 5D$ , 每周观测一次	数据稳定后	—	—	4
5	轨道结构竖向变形	自动化监测	0.1	1次/d	停止	2.1	2.4	3
6	轨道变形缝两侧差异变形	自动化监测	0.1	1次/4 h		—	—	—

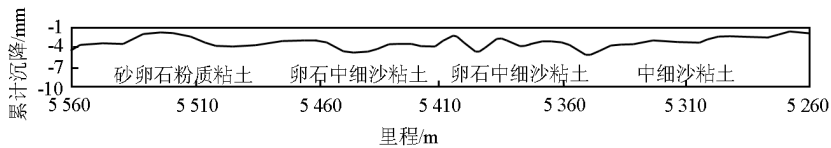


图 9 地表沉降

Fig. 9 Ground settlement

#### 4 变形预测与实测差异的原因分析

数值模拟计算中, 主要对开挖面土体的移动、土体挤入盾尾空隙、土体与衬砌的相互作用等因施工产生的变形进行了模拟。

对盾构施工工艺和施工管理技术等因素造成的变形没有模拟, 原因是该因素无法采用量化数值模拟; 对受扰动土体的再固结没有模拟, 因为该因素在本盾构隧道施工中引起的变形很小。

1) 模拟预测的地面沉降比实测数据大一倍, 原因主要是模拟假定的综合指标——盾构施工引起的地层损失率按最不利值 1% 考虑, 实测数据反推地层损失率大概为 0.5% 左右, 说明施工单位的掘进参数等工艺措施选择得非常好。

2) 地铁车站结构及轨道结构沉降的预测数据是实测数据的 7.6 倍, 说明预测模拟假定偏差太大, 土体材料与既有结构的接触采用共节点, 并假设面与面之间没有相对位移的假定与实际土体和结构的工作受力状态不符, 实际上土体和结构可能已经分离, 结构高程处对应的土体沉降与土体分层沉降数据结果基本相符。

#### 5 结语

1) 采用等代层模拟盾构施工期间建筑空隙内同步注浆体、应力释放率, 来模拟盾构掘进过程的三维数值仿真施工模拟技术是可行的。

2) 根据时间效应、空间掌子面效应以及设计要求的盾构施工综合指标地层损失率来推算等代层的应力释放率是合理的, 用其计算得出的地层变形指标可以作为指导设计、施工的依据。

3) 土体材料与既有结构的接触采用共节点单元, 并假设面与面之间没有相对位移的仿真施工模拟与实际土体和结构的工作受力状态不符, 应该研究用其他有效的单元来模拟。

4) 对既有地铁的监测可以在人工监测技术与实时在线自动化监测技术中选择一种即可满足要求, 没有必要全部选择; 轨道结构与车站结构监测可以只选择轨道结构即可, 通过轨道变形判断车站结构变形。

5) 盾构隧道施工引起的地表变形的大小取决于地层、隧道直径、埋深和施工条件等, 对于大直径泥水盾构, 当  $H/D$  大于 2 后, 地表变形基本为  $-20 \sim +5$  mm。

6)大直径泥水盾构在采取合理的有针对性的掘进工艺措施后,可以很好地控制地层沉降,可以满足复杂周边环境对盾构施工引起的变形控制要求。

#### 参考文献

[1] 铁道第三勘测设计院集团有限公司.北京站至北京西站地下

直径线工程对既有地铁安全风险评估之变形预测计算报告[R].天津:铁道第三勘测设计院,2006.

[2] 北京城建勘测设计研究院有限责任公司.北京站至北京西站地下直径线工程平行既有地铁2号线监测报表[R].北京:北京城建勘测设计研究院,2010.

[3] 中铁隧道集团北京铁路地下直径线项目经理部.北京站至北京西站地下直径线工程盾构平行既有地铁2号线地铁段施工总结[R].北京:中铁隧道集团,2010.

## The deformation forecast of large diameter shield through the subway station and the analysis of the test result

Zhang Jiqing, Suo Xiaoming

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

[ **Abstract** ] Deformation forecast is proceeded for the structure of Beijing underground diameter side penetrating one station of metro line 2 by numerical value analysis. The comparative analysis and reasons of difference analysis is proceeded too between predicted value and measured value. Deformation prediction results have certain guiding role for engineering construction alike.

[ **Key words** ] large diameter shield; subway station; deformation forecast; monitoring; numerical value analysis