

平顶直墙隧道施工风险时空效应分析

郑知斌

(北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082)

摘要:基于 FLAC3D 三维数值模拟计算分析,得出浅埋暗挖平顶直墙隧道邻近多种既有建(构)筑物施工时所产生的风险时空效应及其影响规律,继而为制定专项风险控制措施提供理论依据。

关键词:平顶直墙隧道;浅埋暗挖;时空效应;风险控制

中图分类号: U 455.4

文献标志码: B

文章编号: 1009-7767(2018)03-0144-07

Space Time Effect Analysis of Tunneling Construction Risk with Flat Top and Straight Wall

Zheng Zhibin

在软弱土层中开挖隧道时,隧道围岩的变形不是瞬间完成的,即使在初衬施作完毕后,围岩与支护间的变形压力及其变形也是随时间的推移而不断发展并逐步趋于稳定的。空间效应的产生机理是隧道开挖后土层应力重新分布,施工过程中随着工作面向前推进,不可避免地导致前方土体的损失,在工作面前后一定范围的地层产生位移,最终在地表产生沉降槽。时间效应的产生机理是由于土层具有流变性,包括应力松弛和蠕变,土层材料的黏性与塑性屈服使得地层应力及变形随时间变化。

暗挖隧道穿越既有建(构)筑物时,不可避免地会使周边土体产生应力释放,继而使既有结构产生附加差异变形,造成结构内力相应增加。国内外关于浅埋暗挖隧道开挖时周边环境的风险影响研究^[1-6],大部分都是针对单个风险源或风险因素进行预测分析,较少涉及隧道开挖引起多个风险源或风险因素的影响分析,以及各个风险源、风险因素之间的影响关系。笔者采用三维有限元软件模拟多个风险源的影响分析,进一步得出风险时空效应及其规律,为制定专项风险控制措施提供依据。

1 隧道开挖对地铁、桥梁及地层的时空效应预测分析

北京市金融街地下交通系统部分采用浅埋暗挖法(CRD 法)施工,其断面形式为平顶直墙。暗挖隧道需上穿北京地铁 2 号线阜成门站—复兴门站区间隧道,下穿西二环高架桥、众多地下管线、西二环主辅路

等周边环境风险工程,且隧道拱顶基本位于杂填土、粉细砂层中,施工环境风险较大。根据《城市轨道交通土建工程设计安全风险预估规范》^[7],对矿山法结构采用平顶直墙工法的工程,其风险等级可上调一级。故在环境风险与施工风险均较大的情况下,有必要在设计阶段对开挖风险时空效应进行计算分析,以采取合理、经济的措施规避风险。

浅埋暗挖法的施工过程非常复杂,开挖步序较多、应力转换频繁。单纯依靠经验公式和试验研究难以全面准确地反映隧道施工的真实状态。数值模拟是研究浅埋暗挖隧道施工引起地表沉降和结构变形的重要手段。笔者采用三维有限差分软件 FLAC3D 对该工程施工过程进行数值模拟。FLAC3D 可对连续介质进行大变形分析,能计算非线性本构关系,可模拟多种不同力学特性的材料^[8]。

1.1 数值模拟方法

1) 计算区域的确定

根据暗挖隧道的设计条件,计算范围确定为:上至地表,下至隧道底部以下 18 m,左右各取隧道开挖边界向外延伸 36 m,考虑边界条件的影响隧道开挖方向取既有地铁 2 号线区间结构各向外延伸 45 m,即新建隧道开挖方向总长为 100.3 m。三维模型共有实体单元 88 352 个,节点 95 310 个;结构单元 9 120 个,节点 4 842 个。建立的三维计算模型如图 1 所示。

2) 开挖模拟方法及地层参数

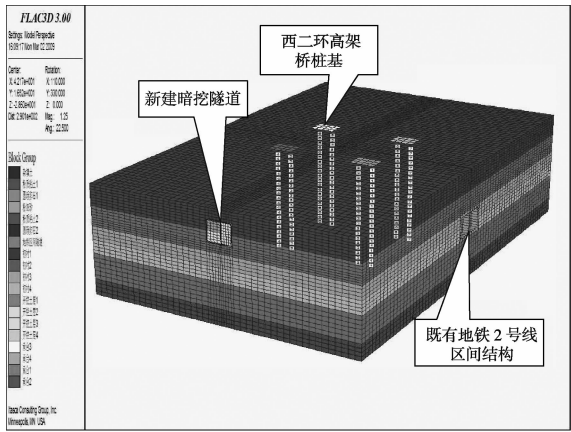


图1 三维计算模型

暗挖隧道采用CRD法施工,台阶长度3 m,左右导洞错距15 m,开挖步距0.5 m,开挖速度1.5 m/d。为了节省计算时间,模拟计算时开挖步距取3 m。

既有地铁区间隧道结构和新建暗挖隧道初衬采用壳体单元模拟,土体和西二环高架桥承台采用实体单元模拟,桥梁桩基采用桩单元模拟。简化的土层及结构单元参数见表1。

表1 土层及结构单元参数

材料名称	厚度/ m	密度/ (kg/m ³)	弹性模量/ MPa	泊松 比	黏聚力/ kPa	摩擦角/ (°)
素填土	5.0	1 783	10.6	0.30	11.0	12.5
粉质黏土	4.6	1 930	12.34	0.30	25.31	20
圆卵砾石	3.15	2 070	53.3	0.25	0	35
粉细砂	3.15	1 850	45.5	0.26	0	40
粉质黏土	6.0	1 930	10	0.30	25.31	20
圆卵砾石	3.7	2 070	76.3	0.24	0	35
地铁区间 隧道结构		2 500	30 000	0.20		
桥梁桩基		2 500	25 000	0.20		
初衬		2 300	17 500	0.20		

1.2 隧道开挖对既有地铁区间隧道结构产生的时空效应影响分析

1) 隧道开挖对既有地铁区间隧道结构纵向变形影响分析

隧道开挖后既有地铁区间隧道结构出现了隆起现象(见图2),隧道完全贯通后最终隆起量达到了约5.4 mm。

由图2可知,暗挖隧道上穿既有地铁区间过程中,地铁区间隧道结构随工作面掘进的纵向变形规律(时

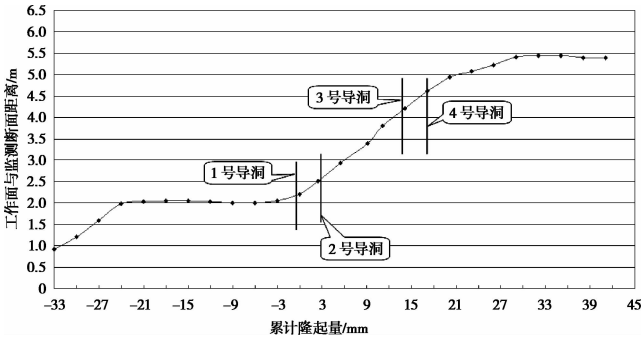


图2 既有地铁区间隧道结构纵向隆起曲线

空效应)主要分为3个阶段:

第1阶段:隧道开挖至1号导洞(到达监测断面)。这一阶段沉降变形缓慢,隆起量达到2.06 mm,占总量的37.87%。

第2阶段:从1号导洞开挖至4号导洞(位于监测断面后约12 m)。这一阶段内的隆起量约占总量的62.13%,说明隧道开挖对既有地铁区间隧道结构的影响不是立即形成的,而是要滞后一段时间,这是由于土体的变形黏滞现象导致的。

第3阶段:4号导洞通过监测断面12 m以后。这一阶段沉降基本稳定,沉降曲线平缓,隆起量稳定在5.4 mm左右。

新建暗挖隧道的覆土厚度 $H=2.4$ m,隧道结构高度 $h=5.2$ m, $H+h=7.6$ m。故暗挖隧道上穿开挖过程中对既有地铁区间隧道结构的纵向影响范围为监测断面后约 $4.5(H+h)$,监测断面前约 $4(H+h)$ 。既有地铁区间隧道结构隆起历时曲线如图3所示。

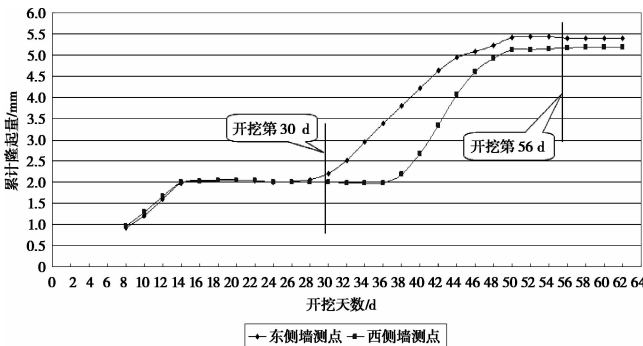


图3 既有地铁区间隧道结构隆起历时曲线

由图3可知,开挖第30~56天时(即从1号导洞掘进到东墙,至4号导洞通过西墙后约10.5 m),地铁区间隧道结构出现差异沉降,整体呈现东高西低的现

象。在开挖第38天,东西侧墙的差异沉降达到最大,为1.61 mm。处于这个时间段之外,地铁区间隧道结构差异沉降几乎为0。故暗挖隧道掘进对既有地铁区间隧道结构差异沉降存在敏感开挖区域,其开挖长度为20.8m,如图4所示。敏感开挖区域的确定,可为下文风险控制措施的制定提供依据。

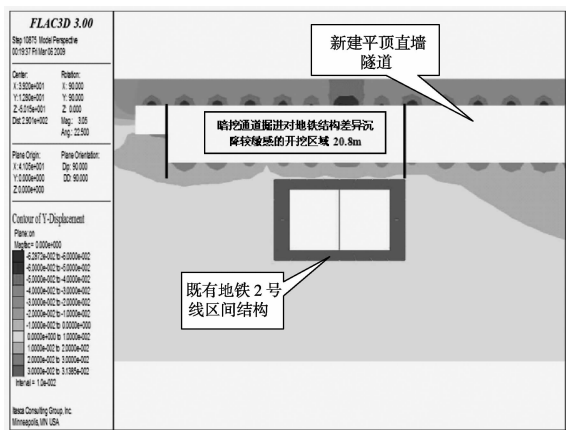


图4 既有地铁区间隧道结构差异变形敏感区域

2) 隧道开挖对既有地铁区间隧道结构横向变形影响分析

如图5所示,在3号导洞开挖到达监测断面之前地铁隆起的最大点位于左边大导洞的中线附近($x=38.78\text{ m}$);而在3号导洞通过监测断面之后,地铁隆起的最大点从左边大导洞向右边小导洞方向偏移($x=39.7\text{ m}$)。地铁区间隧道横向上受到暗挖隧道开挖的影响范围约为62.4 m,约为 $8(H+h)$ 。

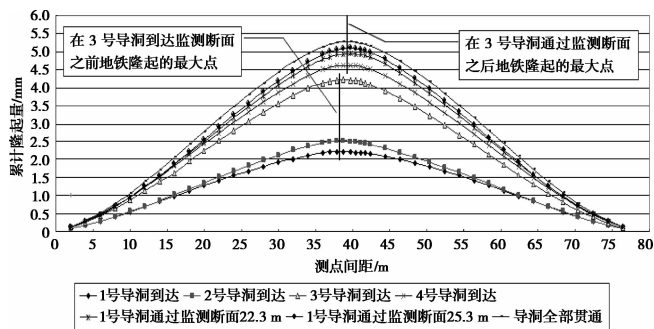


图5 既有地铁区间隧道结构典型横断面隆起曲线

1.3 隧道开挖对西二环高架桥桩基产生的时空效应影响分析

隧道下穿西二环高架桥过程中,桩基的位移趋势如图6、7所示。

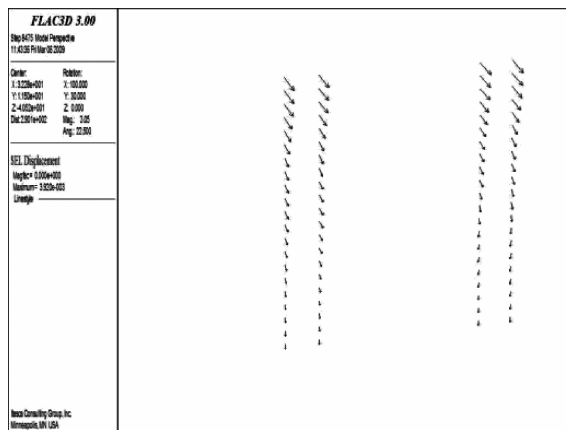


图6 桩基位移趋势图(1号导洞工作面位于桥桩前3.75 m)

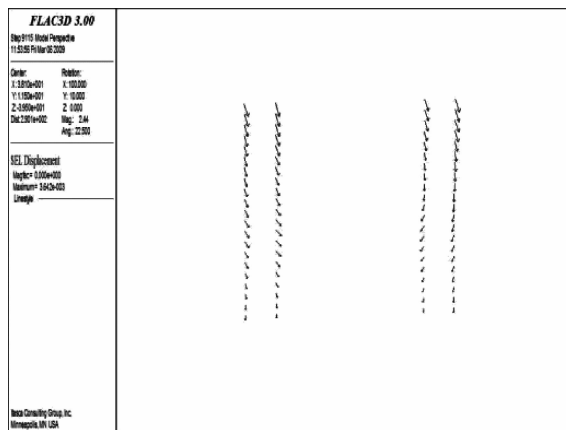


图7 桩基位移趋势图(1号导洞通过东侧桥8.70 m后)

由图6、7可知,当工作面还未到达桥梁桩基时,桩基基本上只有沿隧道纵向且向工作面倾斜的位移(z 方向)和桩基沉降(y 方向),此时沿隧道径向的水平位移(x 方向)几乎为0;当工作面通过桥梁桩基时,桩基的位移包括沿隧道纵向的水平位移、沿隧道径向的水平位移、桩基沉降。

桩基 x 、 z 方向上的水平位移曲线如图8、9所示。

由图8可知,桩基 x 方向上的水平位移在开挖第12~30天内增长缓慢(都小于1 mm);在开挖第30~60天内逐渐增大到最大值1.90 mm,最大点位于桩基顶点,而后基本稳定。

由图9可知,桩基 z 方向上的水平位移在开挖第30天左右达到最大值3.54 mm,最大点在桩基顶点;而后在开挖第30~60天内有所减小,逐渐稳定在2.7 mm左右。

综上所述,隧道开挖对高架桥桩基产生影响的风险时间范围取开挖第12~60天,风险影响范围为东侧一排桥桩前约 $3.5(H+h)$,桥桩后约 $6(H+h)$ 。

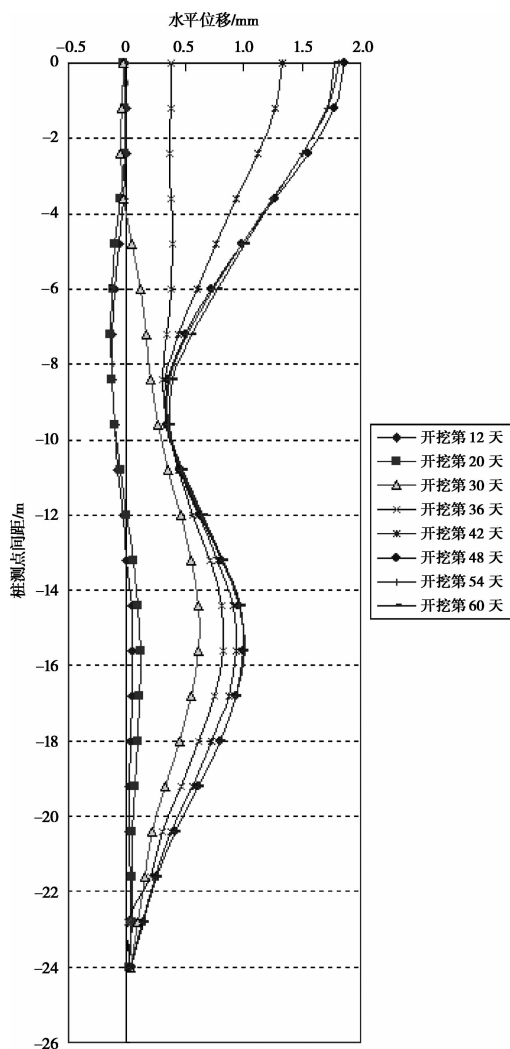


图8 桩基 x 方向上的水平位移

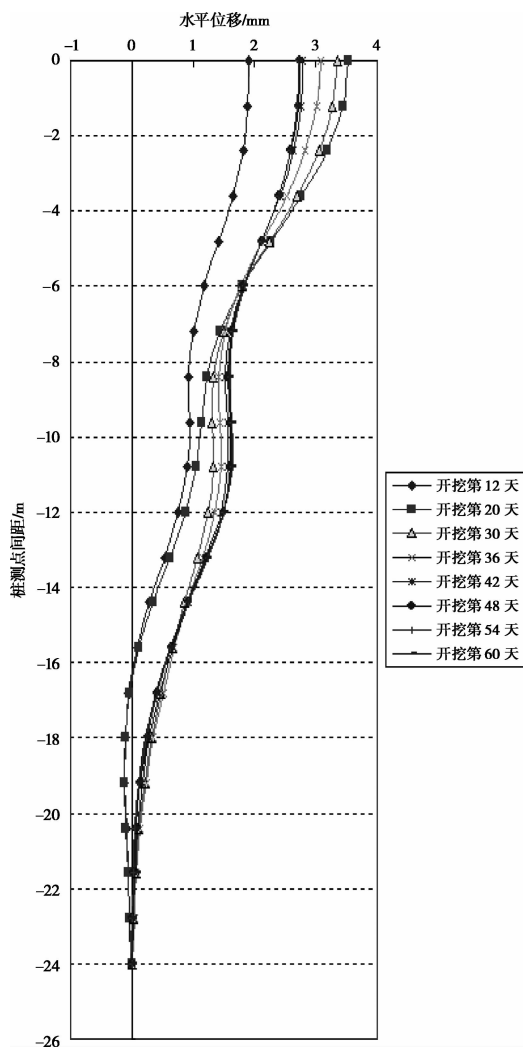


图9 桩基 z 方向上的水平位移

1.4 隧道开挖对地层产生的时空效应影响分析

隧道开挖过程中拱顶与地表沉降纵向变形曲线如图10所示。

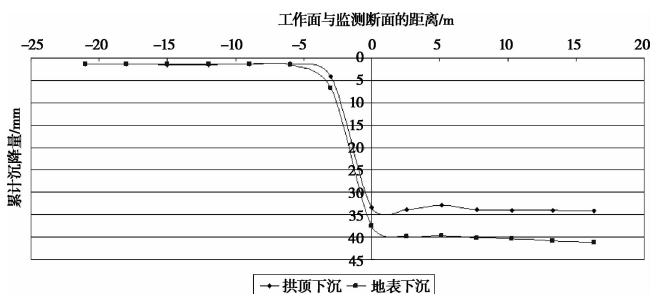


图10 拱顶与地表沉降纵向变形曲线

由图10可知,拱顶最大沉降量约为34 mm,地表最大沉降量约为41 mm,说明开挖过程中地表受到的

影响较大。拱顶与地表沉降主要发生在工作面位于监测断面前后约 $1(H+h)$ 处。隧道从距离监测断面6 m(开挖第26天)到1号导洞工作面到达监测断面(开挖第30天)过程中,4 d之内拱顶沉降量从1.35 mm急剧增大到33.3 mm,沉降速率约为8 mm/d;地表沉降量从1.43 mm急剧增大到37.5 mm,沉降速率约为9 mm/d。这有可能是因为暗挖隧道处于杂填土层,松散性较大,一旦土体开挖卸载,变形就迅速发展。在松散的杂填土层中开挖隧道时,土层变形较大而且也较易坍塌,因此施工中要注意采取超前注浆加固、及时支护等措施,控制地层的较大变形。

地表沉降槽曲线如图11所示。

由图11可知,在3号导洞未到达监测断面时,地表沉降槽都是由左边大导洞的开挖引起的,沉降槽的宽度约为10.4 m,这一阶段地表沉降最大点发生在左

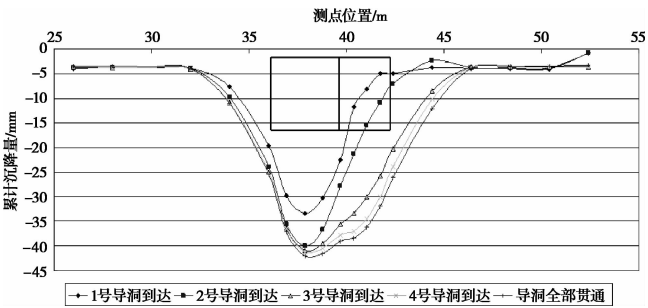


图 11 地表沉降槽曲线

边大导洞的中线处,2 号导洞到达监测断面时地表最

大沉降量为 39.89 mm,占最终沉降量的 95 %;在 3 号导洞通过监测断面后,地表沉降槽进一步发展,这时右边小导洞的开挖只引起 5 %的最终沉降量,它的主要影响是引起沉降槽的进一步增大,这一阶段沉降槽宽度约为 14.4 m,为 $2(H+h)$ 。

2 隧道施工风险时空效应分析

笔者通过数值模拟分析确定了该工程隧道施工期间对周边环境工程产生的风险区域,见表 2。在进行风险管理时应重点关注风险区域内的风险因素或风险源受到的影响,根据风险控制措施^[9]降低或规避可能的风险。

表 2 风险时空效应

风险工程	风险区域	
	纵向	横向
既有地铁区间隧道结构隆起	工作面前 $4(H+h)$,后 $4.5(H+h)$	地铁区间隧道结构受到的影响范围为 $8(H+h)$ 地表沉降槽宽度为 $2(H+h)$
既有地铁区间隧道结构东西边墙差异变形	差异变形敏感区域(20.8 m)	
西二环高架桥桩基水平变形	东侧一排桥桩前约 $3.5(H+h)$,桥桩后约 $6(H+h)$	
地层变形	工作面前后 $1(H+h)$	

3 风险控制效果预测与监测结果

3.1 风险控制措施

根据项目风险管理流程,风险监控是风险管理的最后一步。风险监控就是通过对风险规划、识别、估计、评价、应对全过程的监视和控制,从而保证风险管理

能达到预期的目标。风险控制措施的效果预测与监测分析能够说明风险控制措施是否能达到目标和效果。风险控制措施分为新建隧道洞内措施和新建隧道洞外措施 2 类,见表 3。

表 3 风险控制措施

风险控制措施	具体措施	
	地铁	桥梁
新建隧道洞内措施	1)初支左右导洞之间的开挖错距在 15 m 以上,下穿地铁时在一侧导洞通过后才能进行另一侧导洞的施工	
	2)采用小导管全断面注浆加固地层,注浆压力控制在 0.3 MPa;同时密排钢格栅,掘进速度不得大于 2 m/d	
	3)每开挖初支完成 5 m 后,及时封闭工作面进行周边洞壁的背后回填注浆,增加结构和土体之间的密实性	
	4)在边墙联接板位置各设 2 m 长的 $\varnothing 42$ mm 注浆锁脚锚管,端头和格栅焊接牢固	
	5)地下通道底板加厚	
新建隧道洞外措施	对既有地铁区间隧道结构进行动态实时监测,及时预警	设置隔离桩(人工挖孔桩)

3.2 风险控制效果分析

1)既有地铁区间隧道结构风险控制效果分析
既有地铁区间隧道结构底板隆起曲线如图 12 所示。
由图 12 可知,地铁区间隧道结构隆起的理论计算值与监测值能较好地吻合;采取风险控制措施后,地铁区间隧道结构隆起的最大值由未采取控制措施时的

约 5.4 mm 降为 1.5 mm,小于预警值 2.8 mm,说明新建隧道洞内风险控制措施的采用对保障既有地铁结构的安全起到了很好的效果。
2)高架桥风险控制效果分析
新建隧道内采取风险控制措施后,西二环高架桥桥桩 x 和 z 方向水平位移曲线如图 13 所示。

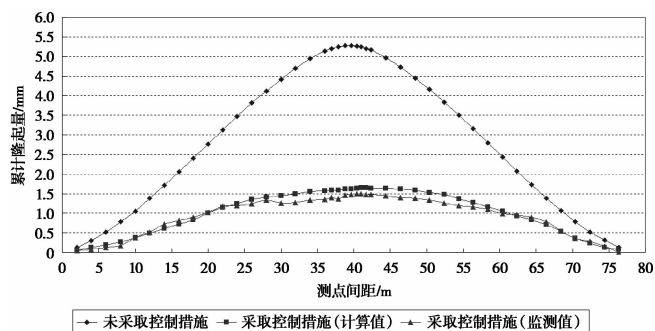


图 12 既有地铁区间隧道结构底板隆起曲线

由图 13 可知,未采取风险控制措施时高架桥桩基 x 方向上的水平位移最大值是 1.90 mm, z 方向上的水平位移最大值是 3.54 mm,已经超过了控制值(3 mm),说明隧道开挖对桩基的水平位移存在较大风险;采取风险控制措施后高架桥桩基 x 方向上的水平位移最大值是 0.25 mm, z 方向上的水平位移最大值是 2.5 mm,使风险得到了不同程度的降低,最终结果均小于控制标准。

新建隧道内采取风险控制措施后,西二环高架桥桩基沉降时程曲线如图 14 所示。

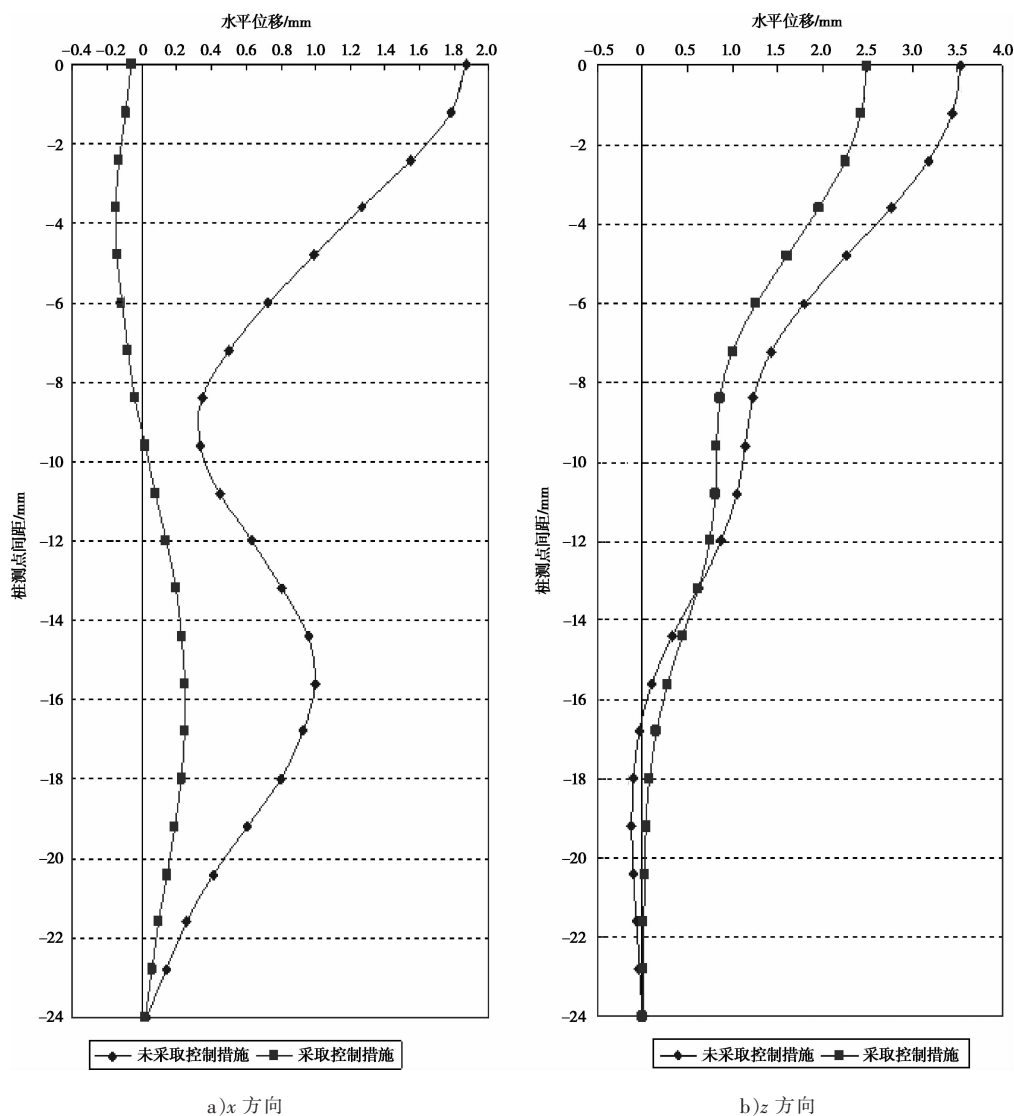


图 13 桥桩 x 和 z 方向水平位移曲线(洞内采取措施)

由图 14 可知,采取风险控制措施后西二环高架桥纵向相邻承台竖向沉降差最大值为 2.21 mm,发生在图中箭头所示的 2 个承台处,远小于纵向相邻承台竖向沉

降差的预警值(10.5 mm);西二环高架桥横桥向同一盖梁下 2 个承台基础不均匀沉降位移差为 1.46 mm,也小于其预警值(2.1 mm),说明采取风险控制措施后,新

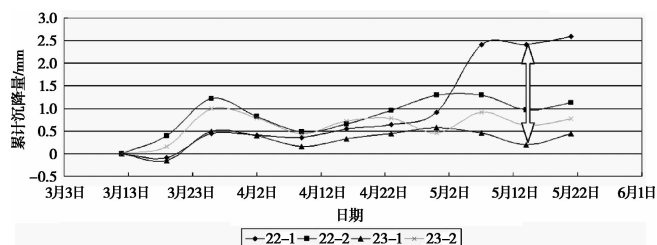


图 14 高架桥桩基沉降时程曲线

建隧道施工期间西二环高架桥是安全的。

4 结论

1) 开挖地层的风险区域为开挖工作面前后 $1(H+h)$, 这是由于工作面处于地铁肥槽, 肥槽为杂填土, 地质情况较松散, 一旦土体开挖卸载, 地层变形就迅速发展。所以在松散杂填土层中进行暗挖, 土层变形较大而且容易坍塌, 因此施工中要注意采用超前注浆加固、及时支护等措施, 控制地层的较大变形。

2) 高架桥桩基的风险区域为桥桩前 $3.5(H+h)$, 桥桩后 $6(H+h)$, 在暗挖隧道开挖工作面到达前桥桩只有沿隧道纵向的水平位移, 在暗挖隧道开挖工作面到达后桥桩有沿隧道径向和纵向的水平位移, 故在确定隔离桩保护措施时, 应考虑桥桩 2 个方向的水平位移的影响。

3) 在暗挖隧道上穿既有地铁过程中, 虽然不会导致既有地铁区间隧道结构的较大上浮(上浮对地铁行车的影响较小), 但为防止由于时空效应造成的左右侧墙差异沉降的不良影响, 可采用格栅密排、超前注

浆加固等措施。MET

参考文献:

- [1] 李强, 王明年, 李德才, 等. 地铁车站暗挖隧道施工对既有桩基的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 184-190.
- [2] 张印涛, 陶连金, 张飞劲, 等. 矿山法开挖近距离下穿越既有隧道的三维数值模拟[J]. 北京工业大学学报, 2007(12): 1273-1277.
- [3] 柳厚祥, 方风华, 李宁, 等. 地铁隧道施工诱发桩基变形的数值仿真分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2007, 38(4): 772-777.
- [4] 陶连金, 唐四海, 金亮. 隧道上穿既有车站结构的变形预测及安全评估[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(3): 442-447.
- [5] 宋建, 樊赞赞, 霍延鹏. 复杂条件下浅埋暗挖地铁车站施工地表沉降规律分析[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(6): 88-92.
- [6] 张自光, 仇文革. 地铁区间隧道近接建筑施工工程影响分区研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(1): 75-82.
- [7] 北京城建设计研究总院有限责任公司. 城市轨道交通土建工程设计安全风险评估规范: DB11/1067-2014[S]. 北京: 北京市规划委员会, 北京市质量技术监督局, 2014.
- [8] 刘波, 韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 58-81.
- [9] 赵志江. 超浅埋暗挖隧道施工技术[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(3): 136-139.

收稿日期: 2017-12-06

作者简介: 郑知斌, 男, 工程师、一级注册结构工程师, 主要从事地铁及地下工程设计工作。

(上接第 143 页)

浇筑时, 采用插入式振捣棒从窗口伸入振捣。拱部有 3 个预留注浆孔, 采用 $\varnothing 32$ mm 钢管, 插入拱部靠近防水板, 拱部混凝土浇筑时, 注浆管漏浆说明拱部混凝土基本浇筑密实, 如有拱部不密实的部位, 可利用注浆管进行二次注浆填充。拱部混凝土采用橡皮锤敲打模板的方式进行振捣。

待混凝土强度达到设计值 75 % 之后, 即可脱模^[5]。堵头模板可提前拆除, 一般在浇筑完成 12 h 之后拆除。

拱墙模板脱模时, 首先松开侧墙模板丝杠, 使侧墙模板离开混凝土面, 再松动竖向支撑和横向支撑, 最后拆除模板, 清洗模板表面, 涂刷脱模剂准备下个循环施工。

4 结语

北京地铁 8 号线六营门站二衬扣拱采用跳仓法施工, 打破了以往的施工工艺束缚, 有效地控制了破

除长度, 降低了因破除而产生的风险, 同时多套拱架跳仓施工, 增加施工作业面, 减少了施工人员窝工, 加快了施工进度, 有效缩短了工期。MET

参考文献:

- [1] 吴小晶. 浅议地铁车站防水混凝土细部构造施工质量控制[J]. 城市建筑, 2015(15): 144.
- [2] 冯万慧, 何凤奎. 自密实混凝土在地铁顶纵梁上的应用及质量控制[J]. 北方交通, 2011(1): 62-64.
- [3] 孟祥军, 聂玉峰. PBA 暗挖大跨度地铁车站二衬扣拱方案优化与工程实践[J]. 市政技术, 2017(2): 61-66.
- [4] 桑桂芳. 大面积、大体积混凝土跳仓法施工[J]. 福建建筑, 2011(5): 53-55.
- [5] 陈克济. 地铁工程施工技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2014: 135.

收稿日期: 2018-01-30

作者简介: 王利涛, 男, 工程师, 学士, 主要从事地铁施工管理工作。