

深圳地铁区间浅埋暗挖隧道穿越建筑物施工技术

张二海, 吴文涛, 洪 健, 柴敬尧

(铁道科学院 <北京> 工程咨询有限公司, 广东 深圳 518034)

摘 要: 深圳地铁 2 号线蛇海区间矿山法 II 段属浅埋暗挖隧道, 该区间地质条件复杂多变, 地下水丰富, 且隧道左线需穿越地面建筑, 施工难度极大。以隧道左线太子宾馆段的开挖为例, 介绍了穿越房屋过程中所采用的爆破控制技术以及袖阀管注浆、洞内深孔注浆、大管棚超前支护等施工措施, 并运用数值模拟对加固效果和地表沉降控制进行了验证。

关键词: 浅埋暗挖隧道; 建筑物; 施工技术; 数值模拟; 地表沉降

中图分类号: TU64⁺1, U455

文献标识码: A

文章编号: 1672-7428 (2009) S1-0346-08

Construction techniques of crossing building on shallow buried tunnel of Shenzhen metro running

ZHANG Er-hai¹, HONG Jian¹, WU Wen-tao¹, CHAI Jing-yao²

(Beijing Engineering Consulting Ltd., China Academy of Railway Sciences, Shenzhen Guangdong 518034, China)

Abstract: She-Hai metro running of Shenzhen metro line 2 is a double-line shallow buried tunnel which is excavated by mine method. Stratum of this section is not only varied but also water-rich, and left line need to cross a building called Taizi hotel on the ground. Construction techniques including sleeve valve pipe, deep-hole grouting, pipe-shed advance support and blasting control measures are introduced in detail to illustrate how to ensure the security of excavation. Reinforcement effects and ground settlement control are verified by numerical simulation.

Key words: shallow buried tunnel; building; construction techniques; numerical simulation; ground settlement

1 工程概况

1.1 设计概况

深圳地铁 2 号线蛇口客运港至海上世界站区间 (以下简称蛇海区间) 为左右分修的两条圆形单线隧道, 其中矿山法 II 段线路里程为 Z (Y) DK3 + 235.35 ~ Z (Y) DK3 + 390.00, 左、右线长度均为 154.65 m, 线路设计位于太子路下方。隧道埋深 9 ~ 11 m, 左、右线平均线间距 10 ~ 14 m, 属典型的浅埋暗挖隧道, 图 1 为矿山法 II 段平面设计图。

1.2 工程地质和水文地质情况

根据地质详勘报告, 隧道所处场地的原始地貌为滨海沙堤, 现已堆填平整, 地面高程 2.60 ~ 3.23 m。隧道顶部地层依次为素填土 (填石)、填

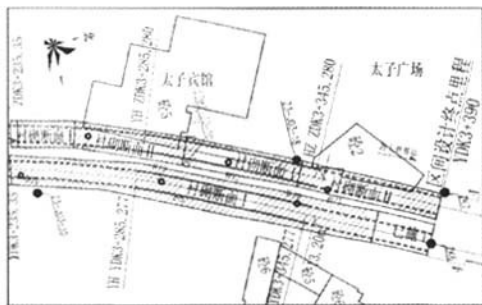


图 1 矿山法 II 段平面设计图

砂、圆砾、砾砂或砾质粘性土以及全、强、中、微风化岩层, 侧墙为全、强、中、微风化岩层, 基底

收稿日期: 2009-08-30

作者简介: 张二海 (1972-), 男, 博士, 从事监理工作。

为中、微风化岩层,拱顶基本位于土层和岩层的分界处。开挖的掌子面显示,隧道拱顶地质为砾质粘性土和全风化岩。由于本文着重介绍左线穿越地面建筑的情况,所以此处仅给出左线地质纵断面图,如图2所示。

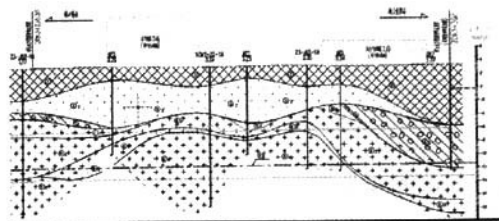


图2 隧道左线地质纵断面图

场地内地下水主要有两种类型:一是松散土层孔隙潜水,二是基岩裂隙水。孔隙潜水主要赋存在第四系全新统冲洪积砾砂层中,此外在残积砾(砂)质粘土、全风化岩也有赋存。上述砂层(中等~强透水性)上无连续的隔水层。基岩裂隙水主要赋存在基岩强风化层~中等风化岩的裂隙中,其上覆残积土和全风化岩,但二者渗透性相近。因此上述两种类型的地下水一般不具承压性。勘察表明地下水位埋深1.50~3.20 m,水位高程-0.28~1.56 m。地下水主要补给来源为大气降水,地下水的排泄以径流为主,场地原始地貌为海冲积潮间带,距离现状海岸线较近。水质分析结果表明地下水Cl⁻离子含量偏高,说明地下水与海水存在水力联系。

1.3 地面建筑、地下管线和交通情况

该段隧道不仅下穿太子路,并且左线隧道下穿太子广场二期商铺(2层)、太子宾馆(5层)等天然浅基建筑物。其中的太子宾馆建于上世纪80年代,基础为扩大条形筏板结构,埋深约1.8~2.5 m,宾馆一层临太子路一侧为商铺。隧道上部道路下管线密布,包括燃气、电力、电信、给水、污水、浆砌片石排水渠(钢筋砼盖板)等众多管线。太子路交通繁忙,车流量大,尤其是重载车辆形成的动荷载,极有可能在初支完成前引起道路下沉,甚至导致坍塌,造成管线破坏、交通中断。

2 施工难点和技术措施

从图1可以清楚的看出,隧道左线太子宾馆段(长约33 m)斜穿宾馆临街商铺,加之该段道路下

铺设燃气管和污水管,施工风险相当大。如果采取的措施不当,极易造成基础不均匀沉降,进而引起建筑物开裂破坏。道路沉降过大则可能影响行车或导致管线破坏,情况严重甚至有可能造成地表塌陷、交通中断,所以动工之前太子宾馆段的开挖即被列为施工的重点和难点。

综上所述,太子宾馆段隧道开挖的施工难点可以概括为:在拱顶及部分上半断面为软岩的富水地层中进行暗挖施工,同时需严格控制沉降,以确保地面建筑物、管线及道路的安全。据此制定的技术措施是:①先行开挖右线隧道,使右线掌子面始终超前左线掌子面30 m左右,通过增大两隧道掌子面的相对距离减小其相互作用的叠加;②通过超前地质物探技术对前方地质情况作出判断,动态指导施工;③采用袖阀管注浆对太子宾馆临街一侧的地基进行预加固;④开挖时采用大管棚+超前注浆小导管进行超前预支护;⑤运用控制爆破施工技术尽量减小对地面建筑物的扰动;⑥采用洞内超前深孔注浆预加固施工技术减小地层失水,防止地面因失水压密固结而产生沉降;⑦严密监测地面建筑物、管线和道路的沉降变化,并根据监测情况随时调整施工进度和加固措施。

3 施工技术措施

3.1 袖阀管注浆预加固

对太子宾馆的地基进行袖阀管注浆,目的是使水泥浆液在一定的泵压作用下渗入浅部土体的孔隙及裂隙中,将其中的水和空气排挤出去,浆液凝固后把土体颗粒粘结在一起,提高土体的抗压强度,从而控制地基的沉降^[1-4]。

3.1.1 注浆孔的布设

根据设备类型、现场条件以及与隧道的空间位置关系,经过计算和分析,最终确定沿太子宾馆临街商铺一侧和另外两侧5 m范围内布设双排注浆孔,两排孔交错布置,孔距和排距均为1 m,钻孔深度定为9 m,倾角75°。图3、图4分别为注浆孔平面布置图和剖面示意图。

3.1.2 注浆参数的选择

注浆施工参数见表1。

3.1.3 质量控制措施

(1) 钻孔要保持垂直,以防钻孔偏斜使同一断面处的套壳厚薄不一,导致开环不均匀。

(2) 严格按配合比配制套壳料,并根据地层情况进行调整。

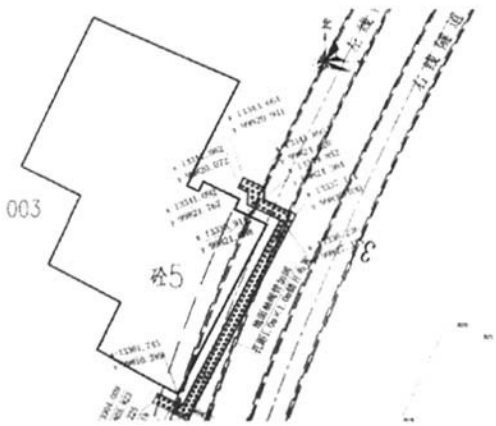


图3 袖阀管注浆孔平面布置图

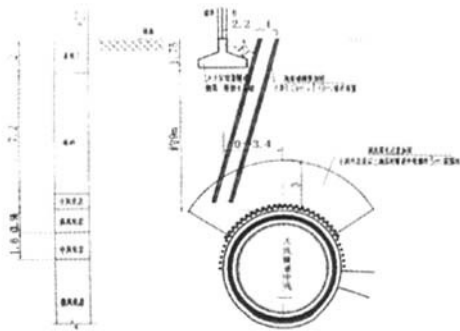


图4 袖阀管剖面示意图

表1 袖阀管注浆参数

项 目	参 数	备 注
钻孔直径	Φ91mm	
袖阀管直径	Φ50mm	
注浆压力	0.3~1.5MPa	
水灰比	2:1	
注浆材料	32.5R 普通硅酸盐水泥	
注浆速度	30~70L/min	
注浆扩散半径	0.5m	根据袖阀管理论模型 计算及现场试验得出
套壳料配方	水泥:粘土:水=1: 1.5:1.9 (重量比)	
提管间隔高度	50cm	

(3) 袖阀管埋设过程中, 接管抹胶水时要等上30s, 才能放下一节管, 以防袖阀管接头处松动、开裂、倾斜, 导致止浆塞上下移动困难, 甚至不能

拔出。

(4) 严格控制注浆压力, 使压力的变化在允许的范围内。

(5) 严格控制浆液水灰比及其搅拌时间, 使浆液具有较好的流动性。

3.2 大管棚+超前注浆小导管支护

3.2.1 施工方案设计

为了确保开挖该段隧道时太子宾馆的安全, 最终决定采用大管棚超前支护注浆, 再辅以超前小导管和格栅网喷混凝土的支护措施。管棚设置在隧道拱部120°范围内, 每侧15根, 共30根。管棚采用Φ80mm×6mm无缝钢管, 节长3m, 环向间距40cm, 打设角度10°~15°(见图5)。为了使大管棚在太子宾馆段下方预先形成一个完整的保护环, 令其充分发挥“承载拱”的作用, 施工时采用40m棚管一次打设完成的工艺^[5-7]。

3.2.2 注浆工艺流程

注浆是大管棚施工中一个非常重要的环节, 注浆效果的好坏决定了浆液是否能够充分注入到棚管周围松散、软弱的地层中, 形成复合稳定的固结体, 使周围地层的力学性质得到改善, 从而防止土层坍塌和地表下沉。施工中采用后退式分段压注水泥~水玻璃双液浆的注浆工艺, 具体工艺流程如图6所示。

3.3 洞内深孔注浆施工

太子宾馆段隧道开挖过程中发现, 部分地段的拱顶或断面存在砾质粘土或砾砂。砾砂层属中等透水~强透水的松散、饱和砾砂质土层, 表现形式为承压水。该砾砂层稳定性极差, 遇扰动极易软化变成流砂状态, 开挖时容易出现严重浸水和土层失稳现象, 使浸水软化的洞身围岩丧失自稳能力。针对砾砂层侵入隧道断面的情况, 采用洞内深孔注浆加固方式对拱顶部位周围砾砂层进行固结止水施工, 目的是通过外界压力将加固浆液压入到砾砂层及相应周边土体中, 经固结、充填及挤密作用, 提高松散砂粒间胶结性, 堵塞流水通道, 并将砂粒间的间隙压缩、挤密, 从而提高砾砂层粘结力和整体强度、降低透水率、改善松散状态, 确保路面行人车辆、地下管线及地面建筑物的安全。

3.3.1 注浆孔的布置

洞内深孔注浆布孔按两排布置, 孔间距及排间距均为1.0m, 具体如图6所示。根据现场实际施工位置确定孔位的仰、倾角角度和钻孔长度, 加固范围内以孔位平均发散间距1.0m为原则, 充分做

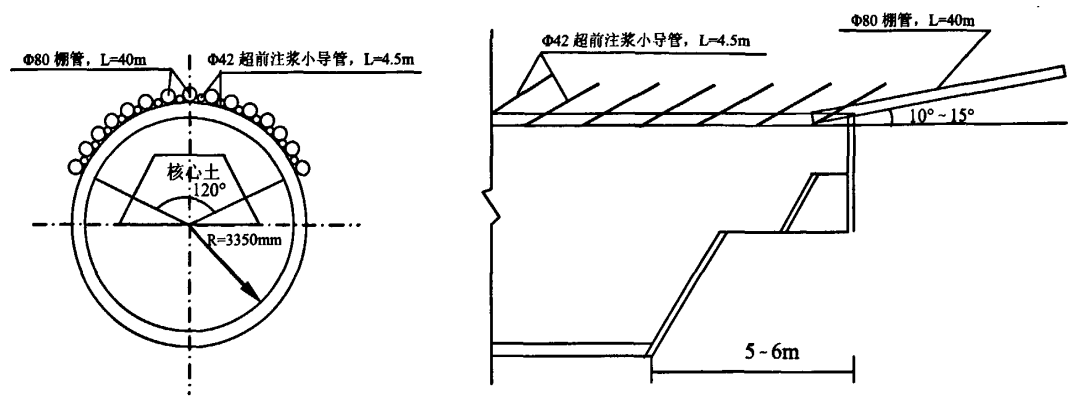


图5 大管棚+超前注浆小导管支护示意图

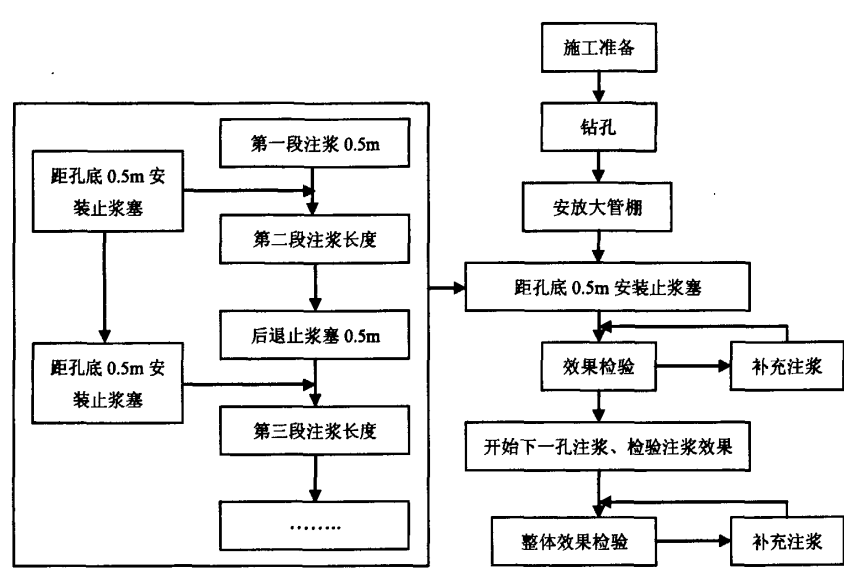


图6 大管棚注浆工艺流程图

到注浆液互相挤密和交叉搭接。

3.3.2 注浆参数的控制

(1) 注入率计算

采用经验公式：

$$\lambda = na(1 + \beta)$$

式中： λ ——注入率； n ——孔隙率，按类似土层的孔隙率取30~40%； a ——充填率，按50%计算； β ——损失系数，按20%设定。

根据上式可求得本工程的注入率： $\lambda = na(1 + \beta) = 0.4 \times 0.5(1 + 0.2) = 0.24 \approx 25\%$

(2) 注入量计算：

$$Q = V \times \lambda$$

式中： Q ——注入量； V ——每孔每延米的加固土

体体积，设定浆液扩散半径为0.75 m； λ ——注入率。

求得 $Q = V \times \lambda = 0.75 \times 0.75 \times 3.14 \times 25\% = 0.44 \text{ m}^3/\text{m}$

即每延米注入量应控制在0.40~0.44 m³之间。

因注浆加固范围较大，施工时注浆参数根据实际情况进行了相应调整：①注浆速度，按10~20L/m左右控制；②注浆时间，按回抽（0.5 m）5~8分钟左右控制；③注浆压力，考虑承压水及流动水，将注浆压力适当加大，控制范围在0.5~1.5MPa之间。如遇局部注浆压力突降现象，需进行充填处理，稳压1.0MPa在5min以上，方可进

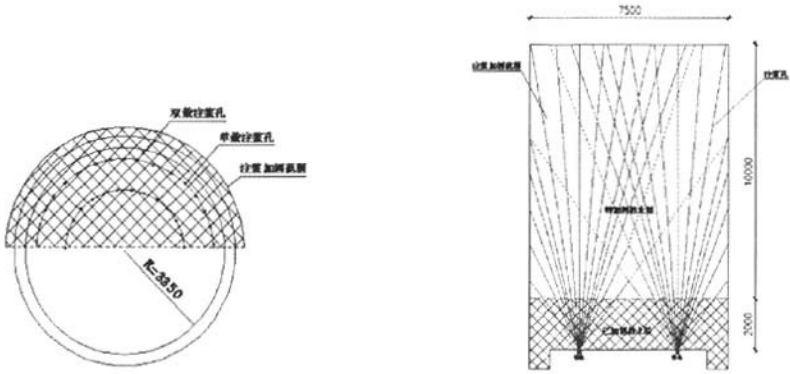


图 7 洞内加固注浆布孔示意图

行下一工序施工。

3.4 爆破控制技术

3.4.1 爆破施工方案

为最大限度降低爆破对太子宾馆段各商铺的扰动，施工时采用分部爆破开挖，即分掏槽眼和周边眼两次爆破，炮眼布置见图 8。根据该段围岩类别及开挖部位不同，采取微差松动爆破技术或光面爆破技术，循环进尺控制在 0.5 m，开挖时保持左右线纵向错开距离不小于 30 m。采用人工风钻打眼，非电毫秒雷管起爆，将爆破震速控制在 1.0 cm/s。

详见图 8。

(1) 炮眼深度

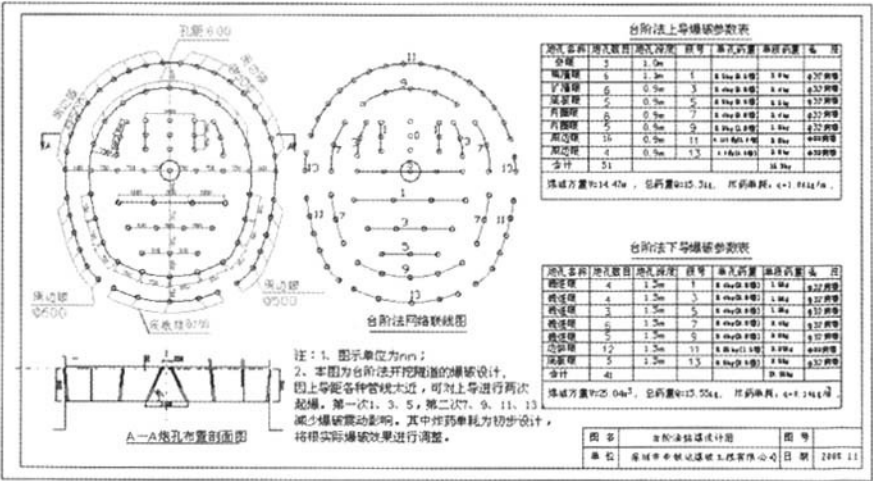
根据隧道穿越的地质条件、支护结构及一次爆破的总用药量，确定采用正台阶法开挖，循环进尺为 0.5m，掘进眼深度 1.3m，掏槽眼深度 0.9m ~ 1.1m。

(2) 每循环爆破总装药量

装药量由下式计算：

$$Q = K \cdot S \cdot L$$

式中：Q——每循环爆破装药量；K——隧道爆破



计算得： $Q_{\pm} = 15.3\text{kg}$ ， $Q_{\mp} = 13.55\text{kg}$

(3) 单眼装药量

在控制爆破中，炮眼所在部位不同，所起作用就不同，对周围岩层及结构物的扰动也就不同，因此各部位炮眼的装药量就不同。

掘进眼辅助眼掏槽眼的装药量根据下式确定：

$$q = k \cdot a \cdot w \cdot l \cdot \lambda$$

式中： q ——单眼装药量， kg ； l ——炮眼深度， m ； k ——单位耗药量， kg/m^3 ； a ——炮眼间距， m ； w ——炮眼爆破方向最小抵抗线； λ ——炮眼所在部位的系数。

计算得： $q_{\pm} = 1.06\text{kg}/\text{m}$ ， $q_{\mp} = 0.54\text{kg}/\text{m}$

4 加固效果及地表沉降控制研究

针对太子宾馆段隧道开挖采取的上述施工措施，目的就是要有效地控制地表沉降，最大限度保护地下管线、房屋基础及道路交通安全，将地铁隧道施工对周边环境的影响降至最低。因此，准确把握和判断加固效果及其对地表沉降的控制对动态指导施工和安全都是至关重要的。为了定量分析上述各施工措施对太子宾馆段开挖和地表沉降控制的综合效果，本文采用专业岩土数值分析软件 FLAC3D 对该段隧道的开挖和支护进行了三维数值模拟。

4.1 计算模型及边界条件

虽然本文的研究重点是隧道左线太子宾馆段的开挖与支护，但该区间按设计分为左右两条线，在线间距较小的情况下，左线的开挖和加固必然会对右线产生一定的影响。为了真实直观地反映施工实际和该区间的整体加固效果，将两条线均纳入模型体系，模型尺寸设计为沿隧道纵向 60 m，横向 40 m，高 37 m（其中隧道埋深 10 m）的三维网格。计算模型的网格划分如图 9 所示，共 27660 个单元，29097 个节点。

模型采用位移边界条件，底部竖向固定约束，前后两端纵向固定约束，左右横向固定约束，顶部为地面，无约束^[9]。

4.2 模型计算说明

(1) 模型计算采用摩尔-库伦准则，并设置为大应变变形；

(2) 假定隧道上覆地层为均质水平分布；

(3) 按实际施工采用的上下台阶法分部开挖，开挖步长为 1m，上台阶超前下台阶 5m；

(4) 对袖阀管注浆效果的模拟方法是，按照浆

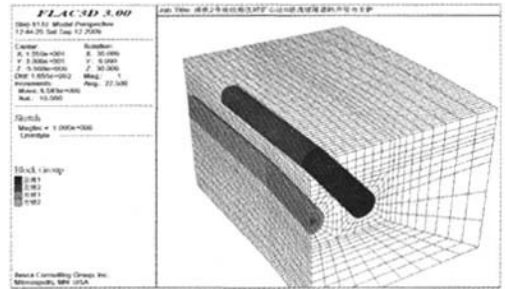


图 9 模型网格剖分图

液扩散半径和混凝土抽芯强度适当提高加固范围内单元的属性参数；对初支的钢格栅混凝土衬砌采用壳单元模拟，大管棚则采用梁单元进行模拟；

(5) 太子宾馆对地面形成的荷载采用在模型顶部其影响范围内施加一固定位移速率的方法进行模拟；

(6) 不考虑爆破动载荷和地下水在隧道开挖过程中的影响。

4.3 加固效果分析^[10]

(1) 各项加固措施对提高土体的稳定性效果显著，隧道上部至地表的塑性区范围大大减小（如图 10、图 11 所示）；

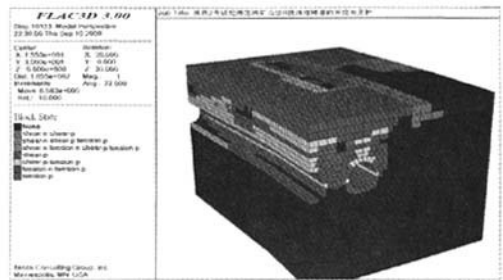


图 10 未采取加固措施的塑性区示意图



图 11 采取加固措施后的塑性区示意图

(2) 各项加固措施对控制地表沉降的作用非常明显, 与不采取加固措施相比, 地表的沉降值减小了 31% 左右(如图 12、图 13 所示)。

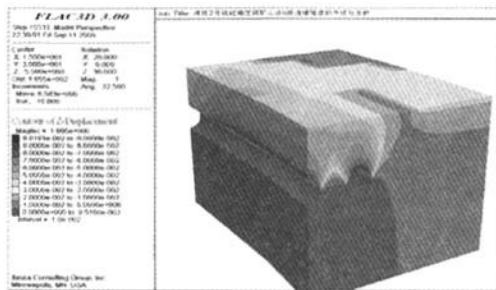


图 12 未采取加固措施的垂直位移云图

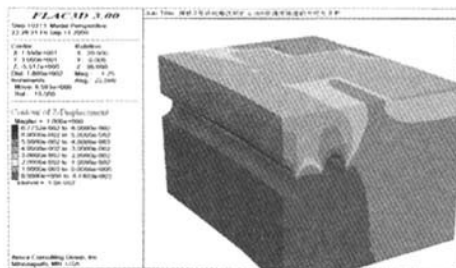


图 13 采取加固措施后的垂直位移云图

4.4 地表沉降控制分析

太子宾馆段隧道开挖从 6 月初动工, 至 8 月初结束, 历时 2 个月, 监测结果显示: 至 9 月初, 各测点沉降值基本趋于稳定。本文选取其中具有代表性的 3 个测点(点号分别为 D49、D50 和 D51)进行分析。图 14 为地表沉降实测曲线, 从图中可以看出: ①沉降最大的为 D50 点, 最大沉降值为 36.67 mm, 其余依次为 D49 和 D51 点; ②开挖初期的沉降较为平稳, 沉降值不大, 但随着掌子面的不断推进, 地层失水逐渐增多, 致使沉降量迅速增加, 所以沉降主要出现在 7 月份。

图 15 为地表沉降计算曲线, 数值计算结果表明: ①沉降最大的亦为 D50 点, 最大沉降值约 31.5 mm, 略小于实测值, 这主要是模拟时未考虑地下水和爆破动载的影响所致; ②三个测点沉降大小的顺序与实测结果相吻合, 但最大值均略小于实测值; ③计算曲线未反映出类似于实测曲线的平稳沉降期, 这也是由于未考虑地下水影响的原因。

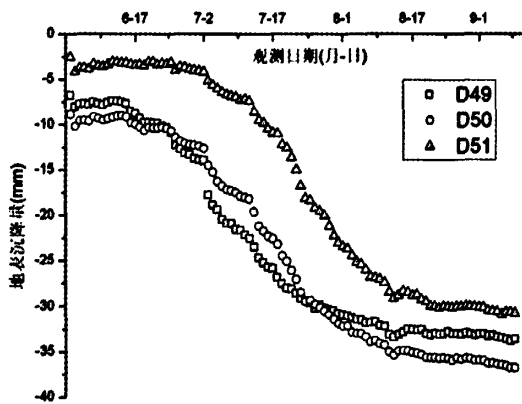


图 14 地表沉降实测曲线

5 结语

蛇海区间矿山法 II 段隧道工程现已顺利完工, 施工期间隧道结构及周围环境没有出现安全隐患, 太子宾馆的沉降值亦控制在限制范围内。这说明隧道穿越建筑物的施工过程中, 只要采取的技术措施得当, 加固方法选择的合理, 完全可以有效的控制地表沉降, 确保施工安全。通过太子宾馆段隧道施工, 本文总结出以下几点心得。

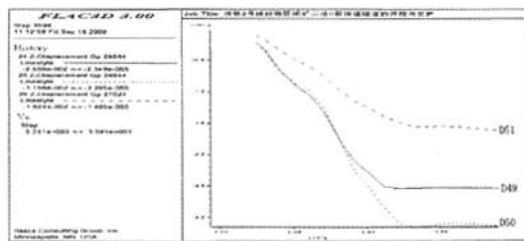


图 15 地表沉降计算曲线

(1) 结合隧道的周边环境和工程特点, 总结、制定出了“先预报、试验先、勤量测、速反馈、短进尺、强支护、早封闭、控沉陷”的施工组织原则。实践证明, 该原则在施工过程中发挥了重要的指导作用, 须严格遵循并灵活运用。

(2) 当两隧道的中心线间距小于 $3D$ (D 为隧道洞径) 时, 两隧道的开挖会有叠加影响, 为减小这种影响, 应适当拉开隧道的开挖距离。在围岩条件较差且富水的情况下, 建议将两隧道开挖掌子面的距离控制在 30m 以上^[11]。

(3) 城市地铁施工一般都对地表沉降有着较为严格的要求, 为有效控制沉降并保证掌子面的稳

定,需根据地层特性选择适当的工法。开挖类似于本文所述的软岩富水隧道时,宜采用台阶法并预留成型的核心土,台阶长度一般应不超过 5m。此外,施工时须严格控制开挖进尺,减小超前支护承载跨度,加快喷砼的封闭速度,尽可能减少掌子面暴露时间,开挖进尺建议取 0.1 倍的洞径。

(4) 开挖时须做到“随开挖,随支护,早成环,紧注浆”,即初期支护与临时支护应尽早成环、整体受力,尽量缩短土体开挖后的暴露时间,有效利用土体有限的自稳能力,并及时进行初支背后注浆堵水,这是减少地层失水、控制沉降的有力措施。

(5) 实施光面微差爆破前应进行试爆,通过对爆破振速的监测、地面建筑物(构筑物)变形监测和断面爆破开挖的效果,来确定爆破药量、孔位、孔数、爆破段数、爆破次数及开挖方法,以确保护施工安全。

(6) 对建筑物基础采取袖阀管注浆预加固既可以加固土体,也可以改善土体性质,起到稳固基础、减小沉降的作用,这在隧道开挖和监测过程中都得到了很好的证明。

(7) 超前注浆小导管、深孔注浆和大管棚超前支护等措施可以有效的对软弱富水地层进行预加固和止水,从而提高围岩的自身承载力,达到控制围岩变形,减小地表沉降的目的。

(8) 施工时须对围岩、支护结构和周边环境的变化进行全程监测,即根据地面道路及建筑物沉降、隧道拱顶沉降、隧道收敛等监测结果动态调整支护参数和开挖进尺。随时掌握结构受力状况及地

表下沉情况,及时采取措施控制地层的变形,使施工始终处于稳定、可控状态。

参考文献:

- [1] 陈杰东,韩建庄.既有建(构)筑物地基袖阀管注浆加固技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,(2):22-24.
- [2] 刘大鹏,朱铁增,李旭丹.浅谈袖阀管劈裂注浆法在地基加固处理中的应用[J].黑龙江交通科技,2006,150(8):24-25.
- [3] 龚红旗.浅析袖阀管注浆法进行地基处理[J].岩土工程界(地基基础工程),2004,7(10):46-47.
- [4] 王涛.袖阀管注浆加固地基方案设计及应用[J].西部探矿工程,2007,(2):43-45.
- [5] 张德华.北京地铁光华路站超长管棚施工技术[J].施工技术,2005,增刊:261-262.
- [6] 季常煦,王凯,王信刚,蔡茂涛.长管棚超前支护技术在软弱围岩隧道施工中的应用研究[J].国外建材科技,2006,27(4):47-48.
- [7] 林希鹤,卢清国,马艳春.超前管棚支护在隧道工程中的应用[J].铁道建筑,2006,(8):58-60.
- [8] 宋占波.深圳地铁浅埋暗挖施工技术[D].天津:天津大学硕士学位论文,2004,6:19-28.
- [9] 黄俊,张顶立.地铁重叠隧道上覆地层变形的数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2005,24(12):2176-2181.
- [10] 吴波,刘维宁,高波,索晓明,史玉新.深圳地铁区间隧道富水地层非降水施工技术研究[J].土木工程学报,2004,37(4):93-98.
- [11] 吴应明.深圳地铁区间浅埋暗挖隧道施工与沉降控制[J].隧道/地下工程,2005,(2):26-29.