

北京地铁五号线近接玉蜓桥施工的力学行为研究

宋卫东¹⁾ 王永清¹⁾ 马鹏姣¹⁾ 杜建华¹⁾ 张继清²⁾

1) 北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083 2) 铁道第三勘察设计院, 天津 300142

摘要 以北京地铁五号线近接玉蜓桥施工为工程背景, 运用三维有限元程序 ANSYS 对地铁区间隧道的开挖过程进行模拟, 分析隧道开挖对玉蜓桥桥台及地面环境的影响, 并将计算结果与实测结果进行对比分析. 结果表明, 按照设计要求施工, 地铁五号线近接玉蜓桥施工时, 对地面环境和桥台的影响均可控制在设计允许的范围之内, 无需采取额外的预加固措施.

关键词 地铁五号线; 区间隧道; 近接施工; 力学行为

分类号 TU 435; U 231⁺.3

随着地下空间的广泛利用和城市地铁轨道交通的发展, 必然会有越来越多地近接既有地下结构物进行近接施工的工程. 由于像隧道这样的地下工程或岩土工程对开挖比较敏感, 易受扰动, 当新旧结构物比较接近时, 如果不采取专门措施, 则新建物的施工将会对既有结构产生不利影响, 如结构承载能力下降甚至破坏, 变形过大或不均匀沉降造成周边建(构)筑物破损或不能正常使用等. 这类问题已经引起了地下工程界和岩土工程界的广泛重视. 日本已将近距离条件下地下结构施工定义为“邻接施工影响问题”, 给予高度重视. 随着我国地铁交通事业的飞速发展, 近距离施工问题也大量涌现, 给设计和施工带来了极大难题^[1-3]. 地铁开挖的研究方法主要包括: 现场实测分析^[4]、物理模型实验^[5]和数值模拟计算^[6-10]等.

1 工程概况

北京地铁五号线天坛东门站—蒲黄榆站区间从标段起点(里程 K3+104)以线间距 14.8 m 的两个单洞形式下穿越蒲黄榆路并向北延伸, 在玉蜓桥前线间距逐渐变大分叉(左右线间距为 30.2 m)经玉蜓桥立交桥两侧, 穿过南二环路、京广铁路、南护城河以及南护城河桥后, 线间距逐渐变为 16.8 m, 然后沿天坛东门站进入北京市旧城区. 在左线 K3+951.968 处上部为玉蜓桥桥台, 左线隧道中线距桥台的水平距离仅为 0.1 m, 穿越后桥台的位移变化、相应的地表沉降均是未知的, 从而造成施工时的风险.

收稿日期: 2005-12-26 修回日期: 2006-03-07

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(No. NCET-04-0102)

作者简介: 宋卫东(1966—), 男, 教授, 博士生导师

2 计算模型

有限单元法作为一种强有力的数值分析方法, 已经被广泛应用于许多工程分析和模拟中, 利用三维有限元来模拟的地铁区间, 能比较真实地反映工程实际, 提供结构变化规律, 从而为设计方案和施工方案的选择提供理论参考, 减少施工风险, 保证施工安全顺利地进行.

本文利用大型三维有限元程序 ANSYS, 结合正在建设的北京地铁五号线, 分析了区间近接施工对玉蜓桥桥台及地面环境的影响.

2.1 最不利工况的确定

根据设计施工图资料, 可确定出五号线邻接玉蜓桥桥台施工的最不利工况为左线里程 K3+951.968 处, 两者的平面位置关系如图 1 所示, 桥台 1 离隧道左线中线水平距离仅有 0.1 m.

2.2 模型设计

为了减少计算量并满足实际计算需要, 对整个结构进行了必要的简化: 截取受穿越段施工影响较大的范围作为计算域; 地表作用 30 kPa 的均布荷载(地面静载和车动荷载分别按 10 和 20 kPa 考虑); 每个桥台作用有 200 kPa 的均布荷载(桥面人行荷载、桥面自重、桥柱自重、桥台自重). 计算模型如图 2 和图 3 所示. 对于结构土体选用 SOLID45 单元, 本构关系采用 D-P 准则. 隧道混凝土衬砌及桥台选用 SOLID65 单元, 本构关系采用 CONCRETE 模型.

2.3 计算参数的选取

根据《天坛东门站地质纵断面图》的工程地质描述, 将其综合归并为三层土体, 具体为人工堆积层 Q_4^{ml} (由粉土、素填土、杂填土、炉灰、圆砾土组成)、第

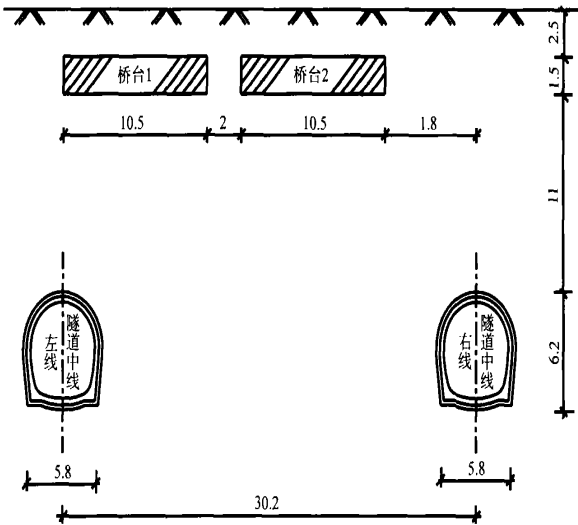


图 1 最不利工况示意图(单位:m)

Fig.1 Sketch of the construct worst-case situation (unit:m)

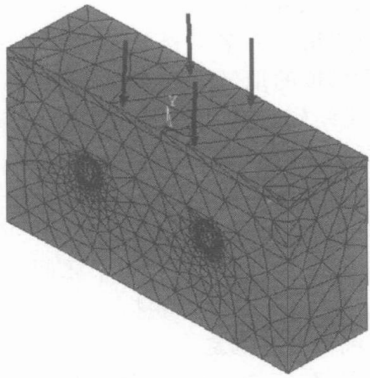


图 2 计算模型

Fig.2 Geometry of the computation model

四纪全新世冲洪积层 Q_4^{al+pl} (由圆砾土、粉土、粉质粘土、粉细砂、中粗砂组成)、第四纪晚更新世冲洪积层 Q_3^{al+pl} (由粉质粘土、粘土、粉土、卵石圆砾、粉细

砂、细中砂组成)。依据其组分按厚度加权平均处理获得土层主要力学性质指标,见表 1。支护参数如表 2所示。值得指出的是,本标段采用注浆长管棚预支护,管棚位置为拱部 107° 范围,每管棚段长度为 20 m。

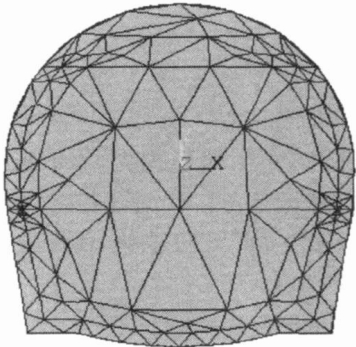


图 3 区间隧道网格划分示意图

Fig.3 Sketch of finite mesh of the tunnel section

表 1 土层力学性质指标

Table 1 Mechanical parameters of soil layers

土层	层厚/m	弹性模量/MPa	泊松比	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	内聚力/kPa	内摩擦角/($^\circ$)
人工堆积层	2.0	3.00	0.38	1800	45.0	20.0
第四纪全新世冲洪积层	12.0	4.89	0.32	1890	76.0	26.2
第四纪晚更新世冲洪积层	25.8	6.72	0.35	1810	83.0	27.5

2.4 隧道开挖顺序的模拟

在拱部超前小导管注浆加固地层完成后,进行隧道开挖施工,采用台阶分部开挖法,由于隧道断面较小,仅为 $5.8\text{m}\times 7.2\text{m}$,模拟时将每一个断面分为三步依次开挖成形,纵向每 2 m 为一个开挖步距。具体施工顺序如图 4 所示。

2.5 计算分析过程

- (1) 模拟形成初始地应力场,并将初始应力写成初应力文件。
- (2) 将初应力文件读入原始模型,对初始应力场位移清零。
- (3) 用单元生死功能模拟隧道开挖过程。

表 2 支护参数表
Table 2 Parameters of supports

支护方式	支护措施	材料及规格	支护参数值
超前支护	小导管	外径 43.2 mm, $\delta=3.25$ mm	38.5 m
	小导管注浆	1:1 水泥玻璃浆	2.89 m^3
初期支护	喷混凝土	喷射 C20 混凝土	5.10 m^3
	钢筋网	$\phi 6$ mm, 150 mm $\times$ 150 mm 网格	0.07 t
	初期支护背后注水泥浆	—	1.10 m^3
二次衬砌	防水混凝土	C30 防水混凝土	5.90 m^3
	钢筋	HPB235	0.09 t
	钢筋	HRB335	0.90 t
	二次衬砌背后注水泥浆	—	0.52 m^3



图 4 隧道模拟开挖顺序
Fig.4 Simulated tunnel excavation sequences

假定隧道开挖形成“毛洞状态”时,洞周围土体荷载释放 40%;二次衬砌形成后,洞周围土体荷载释放 60%. 需要指出的是,ANSYS 激活“死单元”的效果,不是将杀死的单元从模型中删除,而是将其刚度等特性矩阵乘一个很小的因子. 死单元的单元荷载将为零,不对荷载向量生效. 将死单元激活,也是同理,不是在模型上添加新单元,而是将死单元的特性矩阵恢复.

2.6 结果分析

(1) 通过三维有限元分析,左右线同时开挖完成后,地表的最大沉降量表现在左右线隧道中线与地表的交汇处,最大约为 5.2 mm,远远小于环境控制要求(最大允许值 30 mm,警界值 15 mm). 纵向方向,随着开挖步的推进,隧道开挖对地表的影响逐渐减小,地表的沉降值由 5.2 mm 逐渐减小为 1.4 mm,如图 5 所示. 横向上隧道开挖带来的影响以左右线隧道为中心向两侧逐渐递减,由 5.2 mm 递减为 0.9 mm. 图 6 绘出了随着开挖步的进行地表沉降值的变化. 从图中可知开挖的前期,即前 30 步,地表沉降变化较大,而且累计沉降量占最终沉降量的 67%左右.

(2) 桥台 1,2 的沉降变化如图 7 所示. 桥台 1 的最大沉降量为 4.7 mm,表现在近接左侧隧道端;桥台 2 的最大沉降量为 4.2 mm,表现在近接右线隧

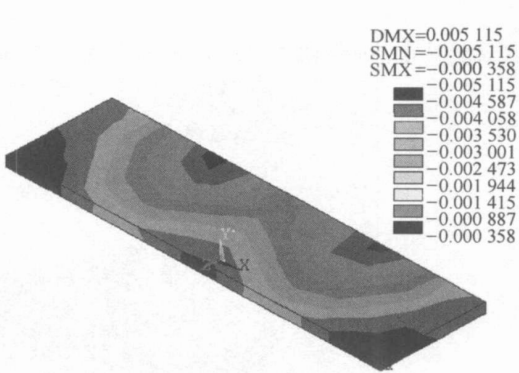


图 5 地表沉降示意图(单位:m)
Fig.5 Sketch of aground surface settlement (unit: m)

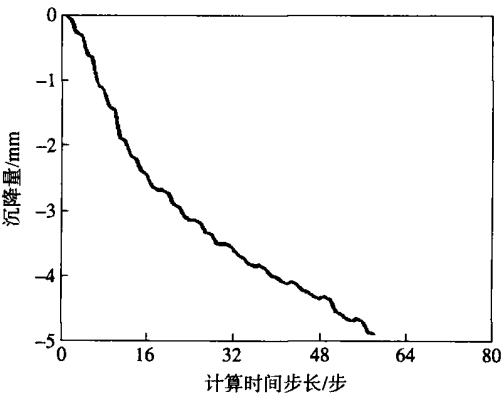


图 6 地表沉降历时曲线
Fig.6 Historical curve of aground surface settlement

道端;两桥台的最终沉降量均小于控制要求(15 mm). 因此,对桥台而言,隧道开挖对桥台的影响很小,是安全的,不需要采取加固措施. 另外,由于左线区间隧道在水平方向上穿越 1 号桥台,而 2 号桥台离右线隧道的最近距离为 1.6 m. 因此,最大沉降量出现在 1 号桥台上. 并且 1 号桥台由左端到右端,随着与左线隧道距离的减小,开挖对其的影

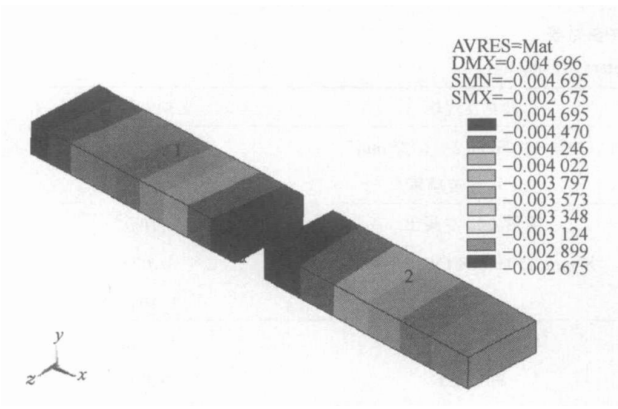


图 7 桥台最终沉降示意图(单位:m)

Fig.7 Sketch of ultimate settlement contour of the platform (unit: m)

响也逐渐减小, 沉降值由 4.7 mm 减小为 2.7 mm.

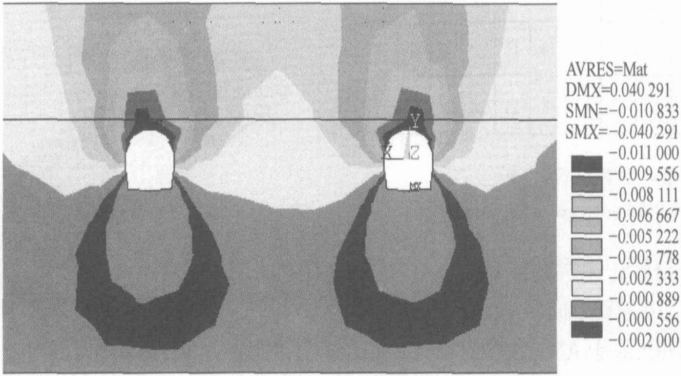


图 8 拱顶沉降示意图(单位:m)

Fig.8 Sketch of Contour of vault settlement (unit: m)

3 计算与实测结果比较

结合本计算所取里程为 K3+951.968, 现场测点标号分别为地表沉降观测点 ZCJ13-2(左线隧道中线与地表交汇处)、YCJ13-2(右线隧道中线与地

2 号桥台反之, 由左端到右端, 与右线隧道的距离逐渐增大, 沉降值也逐渐增大, 由 2.6 mm 增大为 4.2 mm.

(3) 计算结果表明, 隧道拱顶的最大沉降量约为 11 mm, 满足设计要求(<45 mm), 如图 8 所示. 竖向上最大沉降的影响延伸到拱顶以上 2 m 范围内, 横向上仅在超前预支护两侧很小范围内有所影响, 这也证明了进行超前预支护是十分必要的. 拱顶上方, 离拱顶越远的土体, 开挖所引起的沉降越小, 沉降值由 11 mm 逐渐递减为地表处的 5.2 mm. 而且左右线隧道中心间距为 30.2 m, 越接近两隧道中心连线的中点, 土体的沉降量越小, 连线中点区域沉降量约为 2 mm, 这表明左右线隧道开挖相互的影响很小.

表的交汇处), 拱顶量测点 K3+960(左线拱顶)、K3+958(右线拱顶)、玉蜓桥桥台测点 CJ23-4 布设在计算模型中的 1 号到 3 号桥台之间. 表 3 为以上各点的现场监测资料, 图 9 为对应监测点的沉降曲线.

表 3 各测点量测结果
Table 3 Results of different measured points

测点编号	初始高程/m	上次高程/m	本次高程/m	累计沉降/mm	沉降速率/(mm·d ⁻¹)
ZCJ13-2	40.903 56	40.893 60	40.892 57	-6.23	-0.05
YCJ13-2	40.451 35	40.445 29	40.443 95	-5.95	-0.06
K3+960	23.998 40	23.986 10	23.986 00	-12.80	-0.03
K3+958	24.096 10	24.083 30	24.083 40	-12.30	-0.03
CJ23-4	40.910 37	40.902 02	40.901 98	-6.39	-0.02

对比监测结果与计算结果可以看出, 施工完成时监测结果中地表、拱顶及桥台沉降最大值分别为 6.23, 12.8, 6.39 mm, 而计算结果则分别为 5.1, 10.7, 4.7 mm, 即计算结果小于现场监测结果. 其原

因主要有:

(1) 计算中未考虑地下水损失而引起的地表固结沉降, 研究范围虽然只存在少量的地下滞水, 且构筑了结构的自防水体系, 但在实际施工中不可能实

现零漏水。

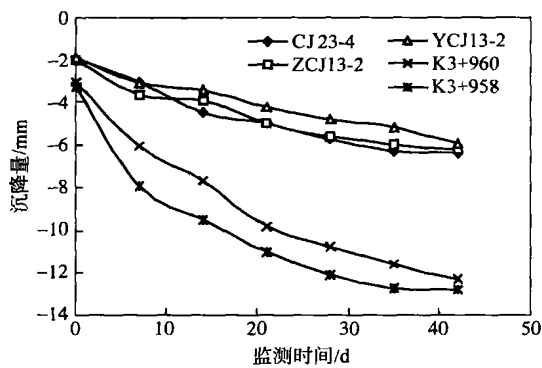


图 9 隧道沉降曲线

Fig.9 Settlement curve of the tunnel

(2) 计算所选取的范围较小,纵向只取了 20 m,而玉蜓桥的实际跨度就为 16.8 m,随着开挖断面远离桥台,虽然对其影响越来越小,但影响依然存在,使得计算沉降值偏小。

4 结论

(1) 施工引起的地面最大沉降量为 5.2 mm,小于环境控制要求值。拱顶的最大沉降量为 11.0 mm,也在设计允许范围之内。

(2) 玉蜓桥桥台的最大沉降量为 4.7 mm,小于设计允许值,表明五号线区间隧道按照设计要求施工时,对玉蜓桥桥台不需要采取额外预加固措施。

(3) 隧道通过玉蜓桥后的持续监测结果显示,地表最大沉降为 12.54 mm,1 号桥台的最大沉降为 5.2 mm,计算结果与之基本相符,表明模拟计算是可靠的。

(4) 应用 ANSYS 模拟岩土开挖的优点是前、后处理比较灵活,建模比较容易;缺点是可选的岩土体模型比较单一;另外,计算占用空间大,8 万个网格的模型计算一个开挖步需要大约 450 MB 的空间。总的来讲,ANSYS 比较适合模拟隧道开挖,能较方便、真实地反映工程实际,为设计施工提供理论依据。

参 考 文 献

[1] 孔祥鹏,留国彬,廖少明. 明珠线二期上海体育馆地铁车站穿越施工对地铁一号线车站的影响. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 821

[2] 张志强,何川. 深圳地铁隧道邻接桩基施工力学行为研究. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 204

[3] 陈先国,高波. 重叠隧道的施工力学研究. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 606

[4] 张顶立,黄俊. 地铁隧道施工拱顶下沉值的分析与预测. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1703

[5] 唐成林,何川,林刚. 地铁盾构隧道管片结构力学行为模型试验研究. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 85

[6] 宋卫东,杜建华,谢政平,等. 大冶铁矿深凹露天开采最终边坡稳定性分析. 北京科技大学学报, 2005, 27(4): 385

[7] 宋卫东,王金安,匡忠祥. 程潮铁矿淹井前后采场溜井稳定性数值分析. 北京科技大学学报, 2000, 22(4): 292

[8] 宋卫东,谢政平,张继清. 天坛站浅埋暗挖施工对地表沉降影响数值模拟分析. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(Supp. 2): 5773

[9] 丁春林,孟祥兵,陈力. 城市地铁喇叭口过渡段隧道施工技术研究及数值模拟分析. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2528

[10] 杨天鸿,梁正召,刘红元,等. 地铁开挖引起地表沉降过程的数值模拟. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11): 1620

Mechanical behavior investigation of the tunnel construction in metro line No. 5 adjacent to Yuting Bridge in Beijing

SONG Weidong¹⁾, WANG Yongqing¹⁾, MA Pengjiao¹⁾, DU Jianhua¹⁾, ZHANG Jiqing²⁾

1) State Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines (University of Science and Technology Beijing), Ministry of Education, Beijing 100083, China

2) The 3rd Railway Survey & Design Institute, Tianjin 300142, China

ABSTRACT The excavation process of the tunnel construction in metro line No. 5 adjacent to Yuting Bridge in Beijing was modeled by 3D-ANSYS numerical code. The influence of the excavation on the bridge's platform and ground environment was analyzed. The computed results were compared with measured data. It is shown that the influence of the excavation on the bridge's platform and ground environment is in the range of the allowable value following the design. Any additional prior consolidating measure is not needed.

KEY WORDS metro line No. 5; regional tunnel; adjacent construction; mechanical behavior