

地铁盾构隧道下穿京津城际高速铁路影响分析

徐干成¹, 李成学¹, 王后裕¹, 赵 月², 胡 萍¹

(1.空军工程设计研究局, 北京 100068; 2.铁道部第三勘察设计院集团有限公司, 天津 300251)

摘 要: 以北京地铁 14 号线马家堡东路站-永定门外大街站盾构区间隧道为背景, 对隧道施工中的特级风险源——区间下穿京津城际铁路段的施工过程进行了三维仿真数值模拟。京津城际列车最大时速可达 350 km/h, 两轨面间的差异沉降不得大于 5 mm, 对地铁下穿段的施工提出了较高要求。数值模拟的计算结果表明, 通过对下穿段一定范围内的土体进行注浆加固可以有效控制盾构隧道施工引起的既有铁路纵向和横向沉降及不均匀沉降, 从而保证既有铁路安全运营不受影响; 同时, 计算获得的管片后注浆参数及盾构机内土舱压力为隧道设计、施工提供了重要的参考依据。

关 键 词: 盾构隧道; 下穿铁路; 沉降控制; 注浆加固

中图分类号: U 45

文献标识码: A

Analysis of influence of metro shield tunneling crossing underneath high speed railway

XU Gan-cheng¹, LI Cheng-xue¹, WANG Hou-yu, ZHAO Yue², HU Ping¹

(1. The Air Force Engineering Design & Research Institute, Beijing 100068, China;

2. The Third Survey & Design Group Co. Ltd., Ministry of Railway, Tianjin 300251, China)

Abstract: A numerical simulation is carried out to study the settlement of ground caused by the construction of a shield tunnel. As a high speed railway is just above the tunnel and the differential settlement of the steel rails is limited in 5 mm; it requires high quality of the tunnel construction. The simulation results indicate that the grouting reinforcement to the stratum between the railway and the tunnel is an effective way to control the settlement of ground; and the values of several parameters gained in the calculation can serve for reference in the construction.

Key words: shield tunnel; cross below the railway; settlement control; grouting reinforcement

1 引 言

北京地铁 14 号线西起丰台河西长辛店大灰厂东路, 穿越永定河后沿京石高速向东北, 下穿京石高速后向东, 经菜户营桥进入北京南站后继续向东延伸至西大望路, 折向北至朝阳公园后, 向东北穿过四环路进入酒仙桥地区, 最后转至来广营地区。

马家堡东路站-永定门外大街站区间作为整个 14 号线工程的首开段, 将以小半径线路曲线下穿京津城际铁路。京津城际铁路是连接北京与天津的全国第 1 条城际间高速铁路, 列车最高时速达 350 km。盾构左右线两次近距离下穿城际铁路, 并要确保城际铁路安然无恙, 属于特级风险源。

盾构穿越施工是一项存在多项不确定因素共同作用的综合工程, 隧道下穿铁路引起的铁路线路变形, 加剧了轨道的不平顺, 不仅加大了轮轨间的冲击力, 加速轨道架构和基床的破坏, 对铁路运营安全也产生严重影响。为了保证既有铁路的安全运营, 目前采取的措施主要有两个, 一方面对地基土进行加固处理, 包括注浆加固等^[1], 另一方面是严格控制盾构推进时的施工参数^[2-3], 减少施工对地层的扰动。本文以北京市轨道交通 14 号线工程马家堡东路站-永定门外大街站区间为背景, 采用数值模拟的方法就盾构隧道下穿越既有铁路时, 注浆加固对控制地表变形的作用进行分析, 可为将来类似工程的设计、施工提供参考。

2 工程概况

该盾构区间自马家堡东路站向东, 穿越中海紫御小区沿规划松林南街向东, 于小区东侧向南穿越京津城际铁路, 于路南与永定门外大街站对接。线路平面有两处曲线 (350 m 和 300 m), 轨面埋深范围为 19.8~19.0~21.7 m。结合永定门外大街站西端设置盾构始发井, 结合马家堡东路站东端设置盾构接收井。

在地铁里程 K20+420~K20+445 处, 区间以 56°角斜向下穿京津城际铁路, 下穿段地铁线路为小半径曲线 (300 m), 且距离盾构始发井仅 46 m。区间线路与城际铁路的平面位置如图 1 所示。

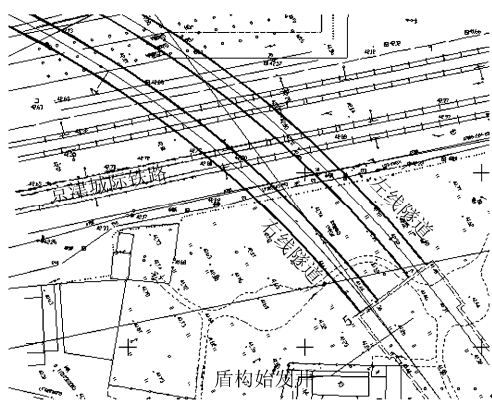


图 1 数值模型
Fig.1 Numerical model

3 水文地质条件

本区间段位于永定河冲洪积扇下部, 地貌类型以第四纪冲洪积平原地貌为主, 第四纪沉积韵律较为明显。地层由黏性土、粉土、砂类土、碎石类土交互沉积而成, 碎石土厚度自西向东逐渐变薄, 基岩埋深大于 50 m。

本区间勘察范围内, 主要为上层滞水、潜水和承压水。上层滞水分布不均匀、水位不连续、高低变化很大的特点, 含水层主要为人工填土层和浅部粉土、砂土层。潜水以侧向径流补给为主, 并接受大气降水、上层滞水的垂直渗透补给, 以侧向径流及向下越流补给承压水的方式排泄。承压水含水层主要为砂类土、圆砾、卵石地层, 其中夹有若干层黏性土隔水层。

4 数值模型的建立

4.1 模拟范围及计算参数

模拟区域沿地铁线路方向取 60 m 长, 深度取区间结构下 20 m 深。根据北京地区及国内盾构相

关地层的施工经验, 盾构施工的沉降槽宽度约为 15~20 m, 因此在隧道结构外两侧取 3 倍洞径宽 18 m。该段地铁轨面标高约为 19.9 m, 区间结构底板埋深约 23.5 m, 隧道正上方的城际铁路路基距模型纵向边缘 22 m。建立的 FLAC^{3D} 数值模型如图 2 所示。

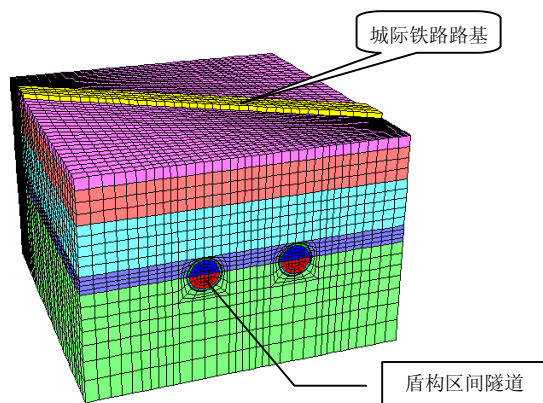


图 2 数值模型
Fig.2 Numerical model

土体本构模型选用 FLAC^{3D} 内置的摩尔-库仑模型, 根据地质勘测报告, 数值模型中的地层划分及土体力学参数取值见表 1 (据《北京地铁 M14 号线工程 02 合同段岩土工程勘察报告 (初步勘察报告)》)。

表 1 土层力学指标
Table 1 Mechanical indices of ground

土层	厚度 /m	重度 /(kN/m ³)	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	摩擦角 /(°)
粉质黏土素填土	2	18.9	5	0.3	6	10
粉质黏土	6	19.7	7	0.3	30	15
粉细砂	9	19.9	25	0.25	0	30
粉质黏土	3.2	19.7	7	0.3	30	15
粉土	4.5	19.8	20	0.3	8	25
卵石	15.5	22.0	45	0.2	0	40

4.2 盾构模拟

为了真实模拟盾构隧道的施工过程, 特别建立了 3 层厚度不同的环形实体单元, 分别用来模拟盾构管片、管片后注浆层以及由于超挖造成的空隙层, 如图 3 所示, 图中管片厚 300 mm, 注浆层厚 150 mm, 空隙层在注浆层顶部、底部的厚 20 mm, 以模拟刀盘外径大于盾构外径造成的超挖, 而在注浆层左右两侧的厚度比上、下的厚度多出 30 mm, 取为 50 mm, 以模拟由于隧道曲线造成的超挖。

为了模拟盾构机在隧道内的推进, 借用开挖面与盾尾之间的注浆层单元来模拟盾构机的盾壳。

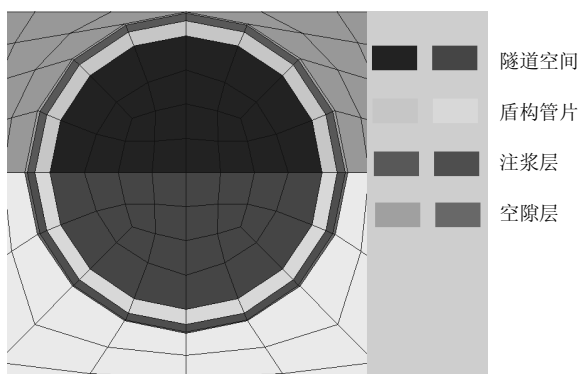


图3 盾构模拟分层

Fig.3 Different layers for simulating the shield

5 盾构隧道施工过程模拟

5.1 盾构隧道施工模拟方法

在模型的侧面及底面施加法向方向的约束，令模型在自重及列车荷载（按静载考虑，取值 30 kPa）作用下平衡并生成初始应力场；清除节点位移后，进行盾构施工过程的模拟。

首先，模拟盾构机的进洞过程。为了适应单元网格在隧道纵向方向的长度设置，盾构机长取为 8.4 m，模拟过程中盾构机每 1 步推进 1 个管片环宽的长度（1.2 m）。具体实现方法为

①开挖一个管片宽长度的隧道土体，包括预先定义的隧道土体、管片环、注浆层、空隙层。

②给空隙层单元赋以远小于周围土体的力学参数，以模拟超挖造成的盾构机四周的空隙。

③给注浆层单元赋以盾壳的力学参数，以模拟盾构机本身对四壁土体的支撑作用。

④给开挖面施加土舱压力，以保持开挖面的稳定平衡。

⑤运行 solve 命令进行计算。

依此过程，实施盾构机的下一步推进，直到整个盾体全部进入隧道。

当盾构机全部进入土体后，每一步的开挖计算除了继续进行上述盾壳的模拟外，还要在盾构机尾部实施管片安装以及管片背后注浆的模拟。为了体现注浆材料的硬化过程，给注浆层设置 2 种属性：

（1）凝固前的低刚度注浆材料，弹性模量等于注浆压力；（2）凝固后的注浆材料。这一阶段施工的具体模拟方法为：①将新开挖的一段注浆层设为盾壳；②将盾壳最后一段单元的材料属性改为凝固前的注浆材料的属性，同时，将紧贴这一段注浆层内部的薄层单元设为盾构管片；③继续步骤①、②，直到设置了 3 个管环宽度的凝固前注浆材料，将第一环的低刚度注浆材料设为凝固后的注浆材料，即假定

注浆材料的硬化过程滞后 3 个管环。

盾构管片、注浆层、空隙层均用弹性材料来模拟，计算参数取为

表2 模型计算参数

Table 2 Calculation parameters

材料	弹性模量/MPa	泊松比
管片	34 500	0.25
凝固后注浆层	150	0.25
空隙层	0.006 7	0.3

5.2 施工过程模拟及计算结果

京津城际列车最大时速可达 350 km/h，两轨面间的差异沉降不得大于 5 mm，属于特级风险源，对地铁下穿段的施工提出了较高要求。拟对下穿段地层进行注浆加固，以保证地铁施工对城际列车的正常运营不造成影响。

地层加固区：宽度在区间隧道结构外两侧取 1 倍洞径范围，深度为隧道结构底板至结构顶板上方 12 m 的范围内。加固地层的土体的弹性模量取为 150 MPa。

左线隧道施工后，地层沉降云图如图 4 所示。图中可见，隧道拱顶的沉降值为 14.29 mm，最大地表沉降值为 5.01 mm，位于隧道正上方。

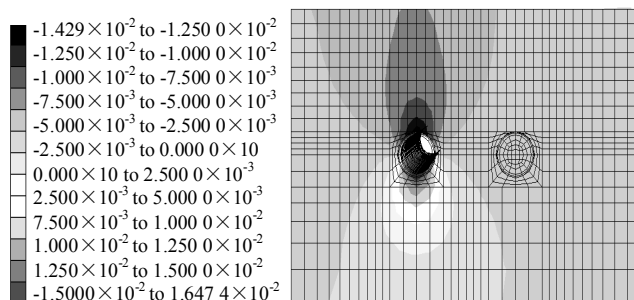


图4 左线贯通后地层沉降云图（单位：mm）

Fig.4 Nephogram of settlement after the left line is cut through(unit: mm)

双线隧道施工后，地层沉降云图如图 5 所示。计算结果表明，左线隧道拱顶沉降值为 17.18 mm，右线隧道拱顶沉降值为 16.73 mm。地表最大沉降发生在 2 条隧道的对称面位置，达到 8.57 mm。隧道正上方的铁路路基因隧道施工产生的沉降基本为均匀沉降，左线隧道正上方路基中点（称之为点 A）随开挖面推进产生的沉降曲线如图 6 所示。曲线表明，左线隧道施工时，A 点的沉降值随着开挖面的临近加速增大，而当开挖面从该点下方穿过继续向前推进时，沉降值趋于稳定；右线隧道施工时，A

点仍产生了一定的附加沉降,因右线隧道施工产生的沉降值是其总沉降量的 34%。

双线地铁施工完毕后,铁路路基的沉降槽曲线如图 7 所示。最大沉降发生在两条隧道的对称面位置,达到 8.57 mm;左线隧道上方铁路路基的沉降为 8.03 mm,右线隧道上方铁路路基的沉降为 7.86 mm。

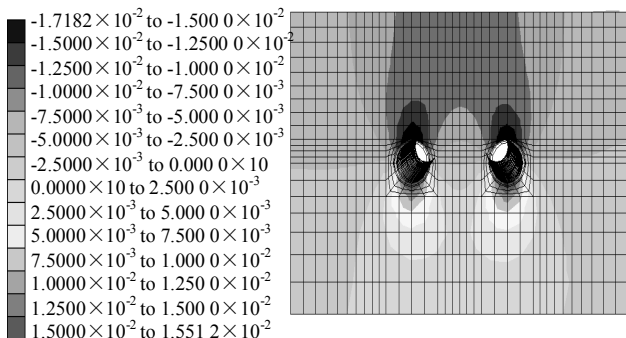


图 5 双线贯通后地层沉降云图 (单位: mm)

Fig.5 Nephogram of settlement after the right line is cut through(unit: mm)

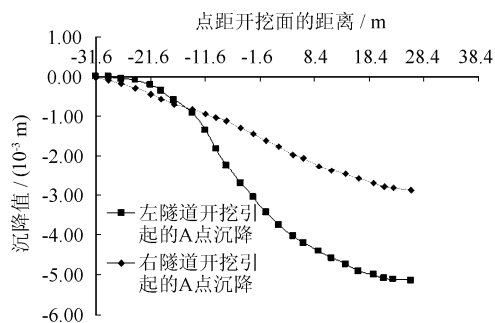


图 6 A 点沉降曲线

Fig.6 Settlement curves of point A

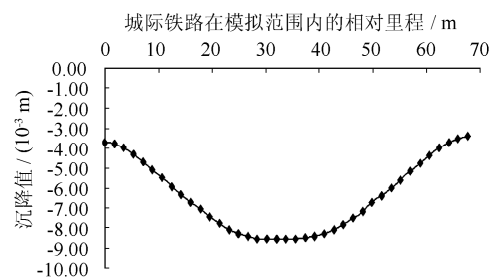


图 7 沉降槽曲线

Fig.7 Settlement trough curves

随后,取原地层参数对隧道施工过程进行了相似的数值模拟(不对地层进行加固)。双线隧道施工后的地层位移云图及城际铁路路基的沉降曲线分别如图 8、9 所示。

盾构施工后,左线隧道上方铁路路基的沉降为 4.69 cm,右线隧道上方铁路路基的沉降为 4.59 cm。与上一节加固条件下的计算结果相比较可以发现,

加固措施对控制沉降的效果是非常明显的。

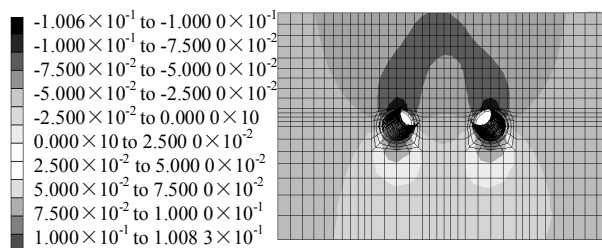


图 8 双线贯通后地层沉降云图 (单位: mm)

Fig.8 Nephogram of settlements after two lines are cut through(unit: mm)

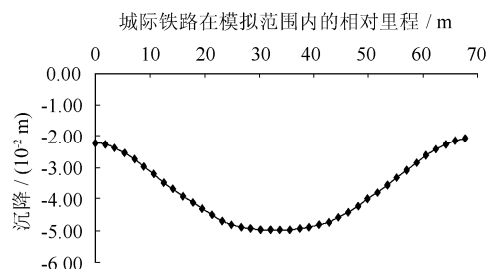


图 9 沉降槽曲线

Fig.9 Settlement trough curve

6 结论及建议

(1) 盾构法施工引起的地层变形具有明显的三维特征,沿隧道轴线方向不同位置的地层的竖向和水平位移变化很大。

(2) 由于线路曲线造成的隧道超挖将引起明显的地表沉降以及隧道周围土体的水平位移。

(3) 在其它影响因素不变时,土舱压力与地层的原始应力接近时,地表沉降值最小;土舱压力小于地层的原始应力时,会导致开挖面前方的地表下沉;土舱压力大于地层的原始应力时,会导致开挖面前方的地表隆起;土舱压力大于或小于地层的原始应力都会导致隧道开挖面后面的地表沉降。

(4) 地表沉降值与注浆压力成反比,注浆压力越大,地表沉降越小。

针对上述问题,在进行盾构隧道施工时,建议采取如下措施:①对隧道上方土体进行注浆加固是控制地表沉降的有效方法,为了保证城际铁路的正常运营,应对施工影响区域内的地层提前进行注浆加固。注浆参数的选取应结合现场试验,满足注浆加固后土体的弹性模量不低于 150 MPa 的条件。②在施工过程中土舱压力应该设置为地层的侧压力大小,这样既不影响掘进速度又能减少地表沉降量;