

北京地铁 14 号线侧穿京津城际铁路 桥桩地基预加固技术分析

周文涛 张 鹏 吴薪柳

(中国铁路设计集团有限公司, 300251, 天津//第一作者, 工程师)

摘 要 盾构法施工引起的临近构筑物变形是盾构隧道设计和施工中备受关注的课题。以北京地铁 14 号线方庄站至十里河站区间隧道侧穿京津城际铁路桥桩施工工程为例, 运用有限元专业分析软件 Midas/GTS 建立了三维空间实体模型, 对地铁盾构隧道侧穿京津城际铁路高架桥桥墩的施工过程进行模拟。结合工程现状, 提出了预处理措施; 通过计算对比和分析, 给出了合理的加固措施和加固范围。

关键词 地铁; 盾构隧道; 城际铁路; 侧穿; 桥桩加固

中图分类号 TU472.99:U455

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.04.021

Bridge Pile Foundation Pre-reinforcement Technology for Beijing Metro Line 14 Side- crossing Beijing-Tianjin Intercity Railway

ZHOU Wentao, ZHANG Peng, WU Xinliu

Abstract The deformation of adjacent structure caused by shield construction is an issue of great concern in the design and construction of shield tunnel. Based on a bridge pile construction project on Beijing Metro Line 14 that crosses sideways of Beijing-Tianjin Intercity Railway in the tunnel between Fangzhuang Station and Shilihe Station, a three-dimensional space model is established by using the professional finite element analysis software Midas/GTS, in order to simulate the construction process of the shield tunnel side-crossing the bridge pile project on Beijing-Tianjin Intercity Railway. Combined with the construction situation, pre-treatment measures are proposed, and through calculation, comparison and analysis, reasonable reinforcement measures and reinforcement scope are provided.

Key words metro; shield tunnel; intercity railway; side-crossing; bridge pile reinforcement

Author's address China Railway Design Corporation, 300251, Tianjin, China

1 工程概况

北京地铁 14 号线方庄站至十里河站盾构隧道

左、右线均穿越京津城际铁路桥, 盾构隧道左线距离京津城际 65 号桥墩桩基最小净间距为 11.3 m, 盾构隧道右线距离京津城际 66 号桥墩桩基最小净间距为 8.8 m。在相交里程处, 地铁盾构隧道左线覆土厚度为 9.413 m, 右线覆土厚度为 9.349 m。

京津城际铁路 65 号桥墩沿小里程方向一侧为 28 m 简支梁, 沿大里程方向为三跨双线连续梁 (60 m + 100 m + 60 m)。65 号、66 号桥墩之间为连续梁边跨, 跨度 60 m, 桥面宽 12.8 m, 线间距 5 m。65 号桥墩承台沿线路方向宽度为 11.0 m, 垂直线路方向长度为 15.2 m; 承台下共有 12 根钻孔灌注桩, 桩直径 1.5 m, 桩长 50 m。66 号桥墩承台沿线路方向宽度为 14.6 m, 垂直线路方向长度为 18.6 m; 承台下共 20 根钻孔灌注桩, 桩直径 1.5 m, 桩长 68 m。被穿越段京津城际铁路采用无砟轨道整体道床。

京津城际铁路桥 65、66 号桥墩与地铁盾构隧道的平、立面关系如图 1 所示。

2 工程地质与水文地质

北京地铁 14 号线方庄站至十里河站区间位于永定河冲洪积扇中下部, 地貌类型为第四纪冲洪积平原, 第四纪沉积韵律较为明显。地层由人工堆积层和第四纪沉积的黏性土、粉土、砂土、碎石土构成, 基岩埋深大于 50 m。盾构隧道下穿京津城际铁路桥处土体类型为细砂、粉质黏土。

根据勘察资料, 盾构隧道轨面的标高约为 28.80 ~ 18.30 m, 主要地下水为上层滞水(一)、潜水(二)和层间水 ~ 承压水(三)。上层滞水(一)的稳定水位深度为 2.00 ~ 11.40 m, 标高为 27.28 ~ 35.19 m。潜水(二)含水层主要为粉土④2 层、粉细砂④3 层, 其稳定水位深度为 13.80 ~ 17.80 m, 标高为 20.29 ~ 24.49 m。层间水 ~ 承压水(三)含水层主要为卵石⑦层、中粗砂⑦1 层及粉土⑥2 层, 其稳定水位深

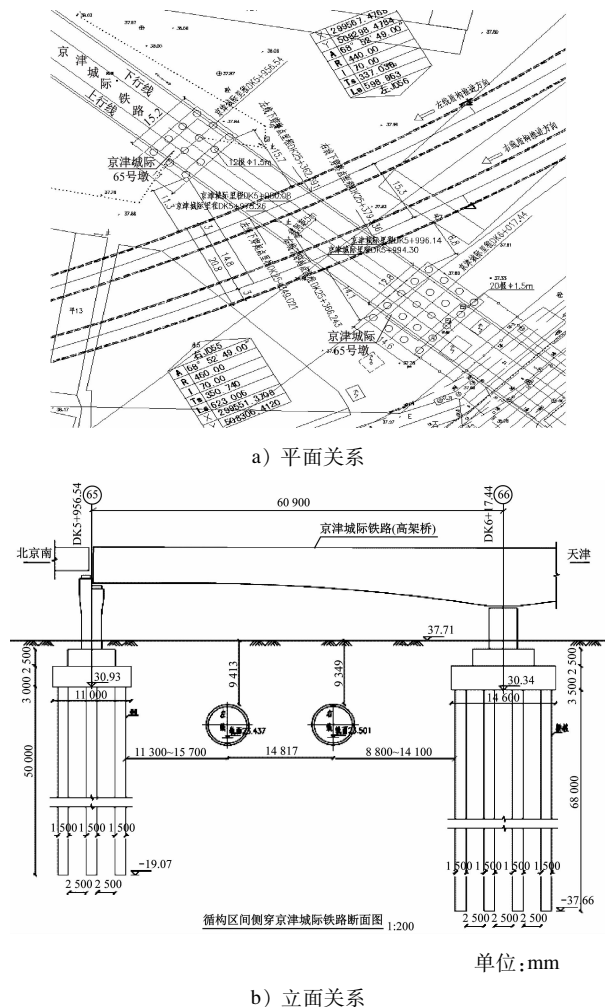


图1 盾构隧道侧穿京津城际铁路桥位置关系图

度为18.20~22.50 m,标高为16.07~20.19 m。

3 控制指标

根据TB 10621—2014《高速铁路设计规范》规定,无砟轨道桥梁墩台基础的工后沉降量限值为:墩台均匀沉降不应超过20 mm;相邻墩台沉降差不应超过5 mm。京津城际铁路桥65、66号桥墩基础原设计工后总沉降分别为14.7 mm与16.8 mm,满足规范要求。

结合以上规范要求和研究结论,结合本工程的实际特点,考虑施工等综合原因,同时依据现有常规测量仪器的检测精度和列车行走对轨道、地面的随机影响,综合运营安全要求及变形预测结果,确定顺桥向变形、横桥向变形、竖向变形的控制值为1.2 mm,并将该控制值的70%作为预警值,该控制值的80%作为报警值。

4 盾构隧道施工对京津城际铁路桥安全性影响计算

4.1 计算模型

三维模型沿京津城际方向涵盖京津城际铁路桥65和66号桥墩及其桩基,沿地铁线路方向涵盖盾构隧道左、右线分别取90 m(京津城际铁路高架桥两侧分别45 m)。根据有限元计算原理及计算能力,兼顾考虑边界条件的影响,合理确定三维整体有限元模型,如图2所示。65及66号桥墩与地铁盾构隧道的位置关系如图3所示。

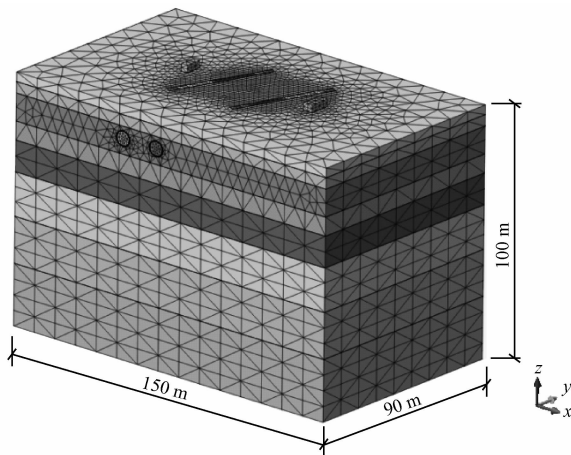


图2 三维整体有限元模型

4.2 单元及本构关系选取

4.2.1 单元选取

1. 实体单元:

- 各土层厚度见表1。
- 14号线隧道注浆层厚1.5 m。
- 复合锚杆桩,沿地铁盾构隧道左、右线距京津城际铁路桥梁桩基一侧隧道外设置2排,梅花型布置;隔离桩桩径0.15 m,桩端位于隧道底以下3.0 m位置,与隧道间间距1.5 m。

• 京津城际铁路桥65号桥墩承台沿线路方向宽度为11.0 m,垂直线路方向长度为15.2 m;承台下共12根钻孔灌注桩,桩直径1.5 m,桩长50 m。

• 京津城际铁路桥66号桥墩承台沿线路方向宽度为14.6 m,垂直线路方向长度为18.6 m;承台下共20根钻孔灌注桩,桩直径1.5 m,桩长68 m。

2. 板单元:

- 14号线管片厚350 mm。

3. 梁单元:

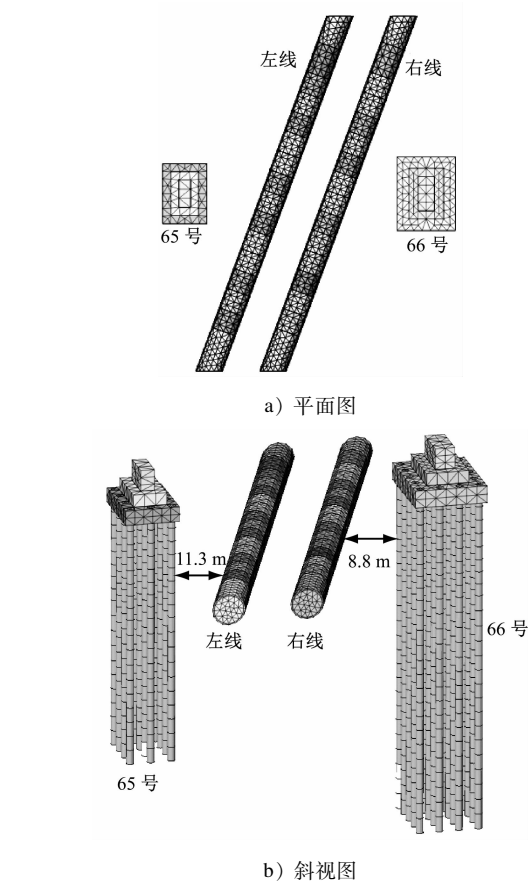


图3 桥墩与地铁盾构区间位置关系图

· 桩基。

4.2.2 结构本构关系

线弹性模型遵从虎克定律,即应力应变在加卸载时呈线性关系,卸载后材料无残余应变。当钢筋混凝土材料的应力水平较低时,按该模型计算应力应变关系基本符合实际情况。

4.2.3 土体本构关系

数值模拟中,材料的本构关系选取对计算结果有很大的影响。Drucker-Prager(简为 D-P) 模型屈服准则适用于岩土介质材料的塑性力学起源很早,在岩土工程分析的数值分析方法中一直得到比较广泛的应用,本次数值模拟采用 D-P 模型模拟土体的本构关系。

4.3 模型中各材料参数的选取

根据 14 号线方庄站至十里河站区间的工程地质资料及相关设计资料,将模型 100 m 深度范围内的土体近似分为 6 层,土层参数如表 1 所示。

对于复合锚杆桩加固体,采用实体单元进行模拟,将其等效成相同厚度(2 m)与深度(地面至盾构下端 3 m)的墙体,等效原则是按照抗弯刚度等效。

结构参数如表 2 所示。表 2 中“14 号线注浆层硬化”的相关参数是模拟 14 号线盾构施工过程中注浆层凝固状态的特性。

表 1 土层参数表						
土层名称	重度/ (kN/m ³)	弹性模 量/MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	摩擦角/ (°)	层厚/ m
①杂填土	18.0	10	0.35	8	10	3.8
②粉土 + 粉黏	18.8	14	0.34	26	15	4.5
③粉细砂	20.0	60	0.30	1	30	11.0
④中粗砂	21.0	70	0.30	1	38	7.4
⑤粉土	20.5	40	0.32	12	26	12.5
⑥中粗砂	21.0	70	0.30	1	38	60.8

表 2 结构参数表			
结构名称	弹性模量/ MPa	泊松比	重度/ (kN/m ³)
桥墩及承台结构(C30)	30 000	0.20	25.0
桩基(C25)	28 000	0.20	25.0
复合锚杆桩加固体	1 339	0.22	23.5
14 号线盾构管片(C50)	34 500 × 0.75	0.20	26.0
14 号线注浆层硬化	400	0.22	21.0

注:0.75 为盾构管片考虑环缝及纵缝影响下的刚度折减系数

4.4 施工过程模拟

为了较真实地模拟 14 号线的盾构隧道施工过程,采用等代层模拟盾尾的空隙,厚度取 30 cm。施工步如图 4 所示:先开挖盾构及盾尾空隙处的土体,然后再施加管片并进行盾尾空隙注浆。隧道施工过程中,通过控制应力释放因子来考虑土层的应力释放。

在 14 号线盾构隧道与京津城际铁路相交处,盾构隧道从十里河方向的大里程往方庄站方向的小里程方向施工,先右线后左线。实际施工中,盾构隧道左、右线施工存在一定的间距,在模型范围内按先右线施工完毕再左线施工的顺序。

4.5 计算结果分析

新建地铁 14 号线方庄站至十里河站盾构隧道侧穿京津城际铁路桥的施工过程,会对既有京津城际铁路高架桥结构产生一定程度的附加变形,为有效了解这种附加变形,需分析各工序下京津城际铁路桥(承台及桩基)的顺桥向变形、横桥向变形和竖向变形。

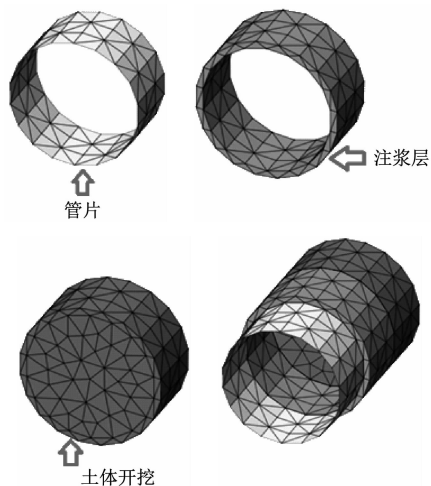


图4 14号线盾构施工步模拟结果

(1) 顺桥向位移:66号桥墩最大顺桥向位移为 -5.25 mm ,65号桥墩的为 5.46 mm ,2个桥墩的最大顺桥向位移均出现在承台顶部位置。

(2) 横桥向位移:65号桥墩最大横桥向位移为 1.81 mm ,出现在左线盾构隧道施工完成时,与盾构机掘进方向相同;66号桥墩最大横桥向位移为 2.20 mm ,出现在右线盾构隧道在铁路高架桥正下方通过时,方向与盾构机掘进方向相反。

(3) 竖向位移:65号桥墩最大竖向沉降为 1.22 mm ,出现在左线盾构隧道施工完成时,最大沉降点出现在离左线盾构区间最近的承台处;66号桥墩最大竖向沉降为 1.38 mm ,出现在右线盾构隧道施工完成时,最大沉降点出现在离右线盾构区间最近的承台处。

如果未采取辅助加固措施,经模拟分析发现,顺桥向位移、横桥向位移、竖向位移的变形值均超出控制值 1.2 mm 。

4.6 盾构掘进影响范围

从计算分析结果可知,14号线盾构隧道侧穿京津城际铁路桥65及66号桥墩过程中,桥墩的顺桥向位移比横桥向及竖向位移要大。根据顺桥向变形的大小,结合桥墩的变形情况,14号线盾构隧道侧穿过程中的主次影响区分析如下:

京津城际桥墩的变形以 1.2 mm 为控制标准,如果盾构隧道施工到对桥墩变形影响超过 1.2 mm 即认为进入主影响区域,主影响区以盾构掘进对桥墩影响的变形增量很小(小于 0.2 mm)为结束段。将盾构隧道施工对桥墩开始有影响到刚进入主影响区以及主影响区结束段到盾构隧道施工对桥墩

变形不再有影响的范围为次影响区。根据以上分析,主影响区为下穿京津城际铁路桥梁两侧各 13 m 的盾构掘进范围。

5 预加固后盾构隧道施工对京津城际铁路安全性影响计算

5.1 预加固方案

14号线盾构隧道施工对京津城际铁路桥65及66号桥墩的变形影响较大,因此拟对桥墩采取加固保护措施。预加固方案为:在距桥桩 10 m 距离范围内采用 $150@800\text{ mm}$ 梅花型布置复合锚杆桩注浆加固,距桥桩 10 m 距离范围外采用 $150@1000\text{ mm}$ 梅花型布置复合锚杆桩注浆加固。将复合锚杆桩注浆加固区域按抗弯刚度等效成墙体,采用实体单元模拟,加固深度至14号线盾构底部以下 3 m 。复合锚杆桩加固范围如图5所示。

为了确定合理的加固范围,结合上文的主次影响区分析,对主影响区采取必加固,适当延伸加固范围(沿地铁线路方向向主影响区外扩展 4 m 或 8 m)的原则,通过计算对比选取合理的加固范围,加固深度至14号线盾构底部以下 3 m 。

如图5所示,预加固方案一的加固区域为1+2;预加固方案二的加固区域为1+2+3+4;预加固方案三的加固区域为1+2+3+4+5+6。加固有限元模型如图6所示。

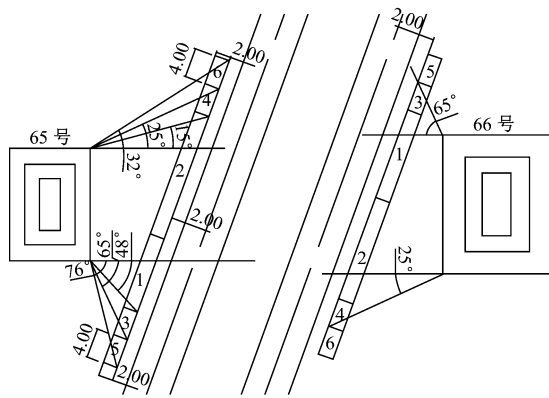


图5 复合锚杆桩加固范围

5.2 预加固数值模拟计算结果

分别计算以上3种预加固方案下桥墩结构的横桥向、顺桥向及竖向位移值。不加固及3种预加固方案下,京津城际铁路桥65及66号桥墩的承台、桩基各向最大位移结果如表3所示。

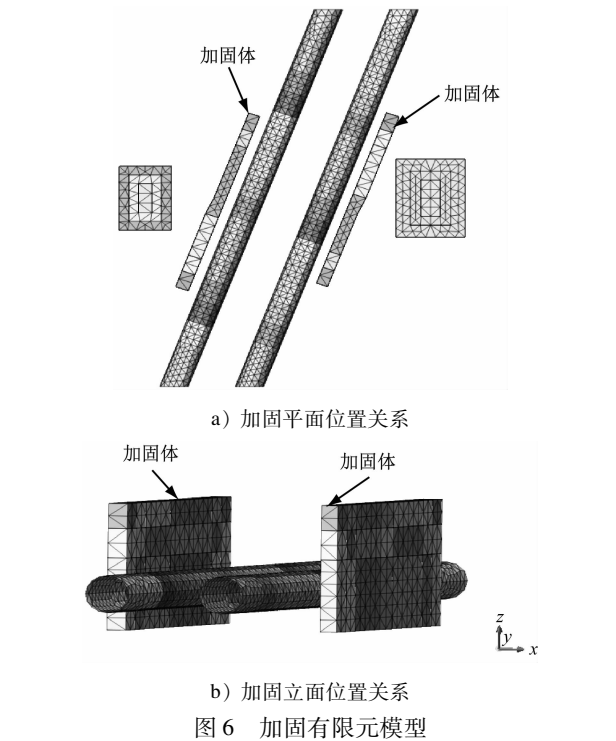


表 3 不同预加固方案下桥墩结构不同方向上的最大位移 mm

方向	不加固方案		预加固方案一		预加固方案二		预加固方案三	
	65 号桥墩	66 号桥墩	65 号桥墩	66 号桥墩	65 号桥墩	66 号桥墩	65 号桥墩	66 号桥墩
顺桥向	5.46	-5.25	1.53	-1.50	1.17	-1.15	0.87	-0.86
横桥向	-1.81	2.20	-0.89	1.16	-0.71	0.89	-0.57	0.73
竖向	1.22	1.38	0.98	1.04	0.94	0.99	0.89	0.94

6 结论

根据 3 种预加固方案的计算结果和控制指标,结合投资经济性考虑,采用复合锚杆桩预加固方案二作为施工保护措施。该方案引起的京津城际铁路桥桥墩附加差异沉降为 0.05 mm。目前,北京地铁 14 号线已贯通运营,京津城际铁路桥的各项检测结果均满足相关要求,采用复合锚杆桩加固处理措施取得了理想效果。

本文以北京地铁 14 号线方庄站至十里河站盾构隧道侧穿京津城际铁路桥施工为工程依托,通过数值模拟对盾构法施工引起的桥梁桩基变形规律进行了较深入的研究,建立的盾构隧道施工模拟有限元程序能较好地反映施作复合锚杆桩注浆预加固对盾构隧道施工影响临近桥桩的力学形态,可为今后类似工程提供参考。

参考文献

[1] 国家铁路局. 高速铁路设计规范:TB 10621—2014 [S]. 北京:中国铁道出版社,2014:72.
[2] 张志强,何川. 地铁盾构隧道近接桩基的施工力学行为研究[J]. 铁道学报,2003,25(1):92.
[3] 余龙. 地铁盾构侧穿既有铁路桥梁技术措施研究[J]. 岩土工程技术,2016(3):158.

(收稿日期:2019-01-20)

(上接第 80 页)

[2] 杨图南. 城市轨道交通突发事件公交应急联动策略[J]. 工程技术(全文版), 2017(1): 154.
[3] 韩泉叶, 王小明, 党建武. 城市轨道交通线网突发应急事件分类分级模型研究[J]. 城市轨道交通研究, 2011(10): 37.
[4] 贺国旗, 张或锋, 韩泉叶. 基于本体的城市轨道交通线网应急预案形式化描述与匹配[J]. 城市轨道交通研究, 2015(8): 62.
[5] 董皓, 付义龙, 黄启翔, 等. 基于本体的城市轨道交通应急预案表示方法[J]. 都市快轨交通, 2015, 28(2): 70.
[6] NASH A, HUERLIMANN D. Railroad simulation using OpenTrack[J]. Publication of Wit Press, 2004(1): 45.
[7] MIDDELKOOP D, BOUWMAN M. Simone; Large scale train network simulations[C]// Simulation Conference, 2001. Pro-

ceedings of the Winter. New York: IEEE, 2001(2):1042.
[8] KOUTSOPOULOS H N, WANG Z. Simulation of Urban Rail Operations; Models and Applications[C]// World Conference on Transport Research. Berkele:WTCRS, 2007.
[9] WAHLBORG M. Banverket capacity consumption, congested infrastructure and traffic simulation with Railsys[C]// The 11th International Conference on Computer System Design and Operation in the Railway and Other Transit Systems. Toledo, Spain: COMPRAIL, 2008: 85.
[10] SCHADER M, KORTHAUS D W I A. The Unified Modeling Language[J]. Performance Computing/unix Review, 2002, 14(13): 41.

(收稿日期:2018-08-02)