

文章编号:1005-0523(2016)03-0047-07

砂卵石地层盾构施工对高铁桥梁的影响及控制

李谷阳¹,程盼盼²,徐前卫²

(1.中铁五局电务城通公司,湖南 长沙 410205;2.同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804)

摘要:在北京地铁8号线天桥—永定门外区间隧道的施工过程中,盾构需要从既有京津城际铁路和京山铁路的上跨桥梁下方穿过,穿越段地层以砂卵石为主。盾构在砂卵石地层中施工极易导致地表沉降和塌陷,而高速铁路运营线又对轨道平顺性有着严格的要求;因此隧道施工的风险极高。借助数值分析软件对盾构隧道下穿铁路桥梁的动态施工过程进行模拟,研究盾构施工引起的砂卵石地层扰动变形、孔隙水压力变化及桥梁结构变形等规律,并据此提出确保桥梁运行安全的工程保障措施与监控量测体系。上述研究成果不仅用于指导隧道工程的设计与施工,而且也可为今后类似工程问题提供借鉴和参考。

关键词:砂卵石地层;盾构隧道;近接施工;施工措施

中图分类号:U455.43

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.03.008

自从1818年法国工程师布鲁诺尔发明盾构法以来,经过近两百年的应用和发展,盾构法技术日趋成熟,相对于其它施工方法,其优越性越来越明显,应用范围也越来越广。但由于城市中地下管线与地面建(构)筑物十分密集,盾构施工过程中又不可避免地会对地层产生扰动,包括盾构对土体的挤压和松动、加载和卸载、超孔隙水压力的产生和消散,从而导致土体发生弹性或塑性变形,造成地表隆起或下沉,进而对既有地面建筑和地下管线等市政设施的安全性产生不利的影响。特别是在建(构)筑物基础不同部位之间,由于荷载不同或土层压缩性不同会引起不均匀沉降,沉降差过大会影响建筑物的安全和正常使用。近年来有关盾构施工引起的工程事故时有发生,比如道路的突然垮塌、建筑物的开裂与倾斜、地下管线的断裂等^[1-4]。为了保证建(构)筑物的安全与正常使用,在盾构掘进前必须有效计算和预测建筑物基础可能发生的沉降量和沉降差,并设法将其控制在容许范围内,必要时还需采取相应的工程措施,以确保建筑物的安全和正常使用。目前估计隧道施工引起的地表移动和变形的的方法主要有经验法、解析法和数值法^[5-6]。随着计算机技术的发展,数值模拟在预测分析盾构隧道引起的地层变形中被广泛应用,传统的分析方法无法很好地完成地层变形估计,而数值计算法可以考虑地层结构,适应复杂边界条件,提供更为丰富全面的计算成果,更适合地层变形分析。

北京地铁8号线天桥站—永定门外站区间隧道所处地层以砂卵石为主,且同时具有无水、富水、浅埋、深埋等不同地层赋藏特征。砂卵石地层是一种典型的不稳定地层。卵石块在地层中起骨架作用,卵石块点对点传力。卵石块间空隙大,其间充填各类砂层,结构松散,无粘聚力,若同时地层含水量大,在隧道开挖时,极易发生喷涌现象,从而造成掘进阶段的出土量把握不准,使土仓、刀盘上部的土体失稳而发生坍塌,这一松散、坍塌过程逐渐向上传递,最终导致地表沉降或塌陷^[7]。再加上本线路近接环境复杂:房屋建筑多为民用建筑、有重要的大型立交桥、共穿越4个地下通道、线路下穿南护城河以及在建的14号线永定门外车站等,施工风险比较大。本文以隧道下穿京津城际铁路、京山铁路上跨铁路桥为例,通过数值计算来预测隧道施工对铁路桥的影响,并提出相应的施工控制措施及监测方案。

收稿日期:2015-11-25

作者简介:李谷阳(1976—),男,高级工程师,硕士,研究方向为隧道与地下工程。

1 工程概况

地铁 8 号线天桥站—永定门外站区间右线于右 K34+744.003~+778.022, 左线于左 K34+744.358~+774.121 处下穿京津城际铁路、京沪铁路框架桥。地铁区间从北至南依次穿越既有京沪铁路上下行线及京津城际铁路上下行线。

京津城际铁路、京山线铁路桥宽 4 跨共 81.2 m, 长 33.27 m, 高 7.9 m。与盾构隧道斜交约 80°。结构主要受力部位顶进框架用 C35 钢筋混凝土浇筑。

隧道下穿铁路桥区段埋深约 22.4~24.8 m。区间土层自上而下为: 杂填土①层、粉质粘土③层、粉砂~细砂③3 层、粉质粘土④层、粉砂~细砂④3 层、粉质粘土④层、细砂~中砂⑤2 层、卵石⑤层、粉质粘土⑥层、细砂~中砂⑦2 层、卵石⑦层, 地层参数详见表 1; 洞身所在地层主要为卵石⑤层、粉质粘土⑥层。区间结构以上有潜水和潜水~承压水两层水, 地下水埋深约 17 m。

地铁左右线分别下穿铁路桥西侧的第 2, 1 跨, 线间距为 16.2 m。平面上位于曲线段, 左右线曲线半径均为 350 m。区间隧道结构与铁路框架桥底板净距约为 20.758 m。地铁线路与铁路的空间关系分别如图 1 所示。

表 1 地层物理力学参数表

Tab.1 Physical and mechanical parameters of soils

地层	厚度/m	重度/(kN·m ⁻³)	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	渗透系数/(m·d ⁻¹)	压缩模量/MPa
①	2.1~5.8	16.5	0.00	8.00	—	—
③	0~1.6	19.5	23.25	8.64	0.02	5.48
③3	1.7~2.4	19.8	0.00	30.00	6.00	44.00
④	3.6~4.0	19.1	21.67	11.92	0.02	9.39
④3	1.1~1.4	20.0	0.00	30.00	6.00	25.00
④	1.2~5.6	19.1	21.67	11.92	0.02	9.39
⑤2	0~2.1	20.0	0.00	30.00	6.00	32.50
⑤	11~11.6	20.2	0.00	40.00	120.0	47.50
⑥	3.3~4.0	19.30	22.50	8.80	0.02	11.90
⑦2	0.6~0.8	20.00	0.00	30.00	2.00	32.50
⑦	—	21.5	0.00	45.00	200.0	45.00

2 存在问题

从横断面上隧道开挖的影响范围分析, 隧道上方土层变形范围偏向框架桥的左侧, 这易引起框架桥向左侧的倾斜变形, 进而引起轨道纵向上的高低不平顺, 降低列车运行的舒适性和安全性。

随着隧道的开挖, 隧道掌子面沿隧道纵向的前后方一定范围内都将发生沉降变形。但一般来说, 开挖面前方沉降较小, 而后方沉降逐步发展并最终趋于稳定, 地层的沉降变形值沿着隧道开挖方向逐渐变小, 这种

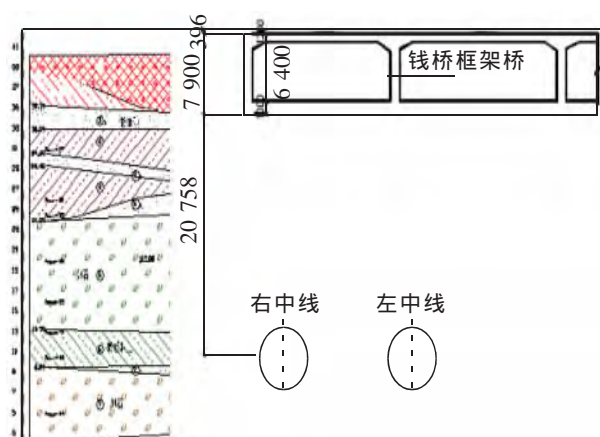


图 1 铁路桥与盾构隧道的空间位置关系 (单位: mm)

Fig.1 Spatial position relationship between the railway bridge and the shield tunnel (unit: mm)

差异沉降将引起框架桥纵向上的倾斜变形,即框架桥发生向隧道掌子面一侧的倾斜变形,这种倾斜变形将导致轨道的水平不平顺,可能造成列车运行不平稳,严重时可导致出轨。有鉴于此,必须针对盾构施工对桥梁结构的安全影响及其施工控制技术开展必要的研究。

3 盾构下穿铁路桥的施工模拟

3.1 计算模型的建立

采用有限差分软件对盾构下穿京津城际、京山铁路框架桥进行数值模拟。

1) 模型尺寸。隧道开挖引起的滑动面与水平面的夹角约为 53°,单个隧道开挖的影响半径约为 22 m,取模型左边界距离左隧道中心线 30 m,右边界距离框架桥 10 m;因此模型总长为 121.2 m。为消除模型边界效应的影响,隧道以下计算深度大于 3 倍洞径,为 20 m,模型总高为 55 m;铁路框架桥宽 33 m,纵向取 60 m 长进行计算,计算模型如图 2 所示。

2) 分析模式。盾构下穿铁路桥段地下水位线距离隧道顶部约为 6.6 m,为考虑地下水渗流与土体因开挖造成的应力状态改变之间的相互影响,采用流固耦合分析模式进行计算。

3) 力学模型及渗流模型。计算时地基土、框架桥、管片及注浆层均用实体单元模拟,地基土采用 Mohr-Coulomb 模型,管片、框架桥及注浆层采用线弹性模型。土层、管片、注浆层采用各向同性渗流模型,框架桥结构采用不透水模型。各土层的计算参数如表 1 所示,其它单元的计算参数如表 2 所示。

4) 边界条件。假定计算边界处不受隧道开挖的影响,即该处为静止的原始应力状态,变形为零,用约束来模拟,本计算边界条件设置为竖向边界约束水平位移,水平底部边界约束竖向位移,顶部是自由面。

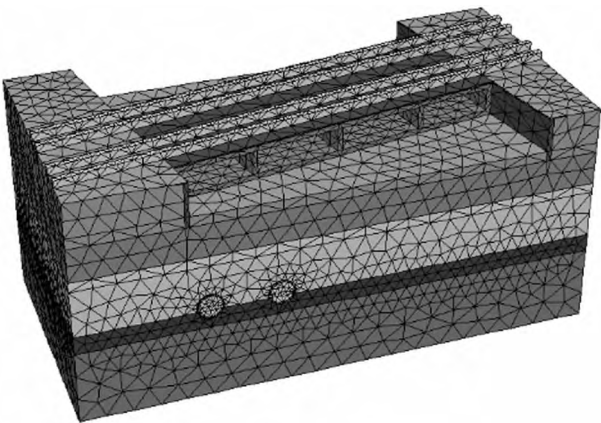


图 2 计算模型示意图
Fig.2 Mesh of calculation model

表 2 框架桥、注浆层、管片的计算参数
Tab.2 Physical and mechanical parameters of frame bridge, grouting layer and segment

结构	材料	体积模量/MPa	剪切模量/MPa	密度/(kg·m ³)
框架桥	C35 混凝土	17 500	13 125	2 500
注浆(初凝)	—	1.3	0.28	1 500
注浆(终凝)	—	333	153.8	1 900
管片	C50 混凝土	19 200	12 500	2 500

3.2 荷载条件

铁路桥上有京津城际铁路与京山铁路运营,我国《高速铁路设计规范》(TB10621-2014)规定:高速铁路列车荷载采用 ZK 标准活载,即 4 个 200 kN 的集中荷载与 64 kN·m⁻¹ 的均布荷载^[8],计算时将荷载折算成用实体单元模拟的土柱加在框架桥上。

桥下为公路,可通行车辆和行人,参照《地铁设计规范》的规定,地面车辆荷载可按 20 kPa 的均布荷载取值。

3.3 施工过程模拟

首先进行弹性计算,使土体达到开挖前的固结状态,并形成初始应力场。在弹性平衡后,给模型赋以塑性参数,使其在开挖过程中可以根据摩尔—库伦准则判断自身是否破坏,是否产生相应的塑性变形。桥梁结构及荷载在形成初始应力场后加入,形成盾构掘进前的地层应力状态,并对已经达到开挖前状态的土体模型进行位移清零。隧道盾构施工的模拟过程如下:

- 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、管片层、注浆层;
- 2) 将新开挖的一段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;
- 3) 给开挖面施加土舱压力,以保持开挖面的稳定平衡;
- 4) 将距离开挖面后方 6 m 处紧贴盾壳单元内部的薄层单元设为盾构管片;
- 5) 将距离开挖面后方 6 m 处的盾壳单元的材料强度改为浆液初凝强度的 1/2,9 m 处改为初凝强度,12 m 处改为终凝强度,即假定注浆材料的硬化过程滞后 4 个管环。

3.4 计算成果及分析

1) 地层变形分析。盾构掘进之后所引起的地层竖向位移如图 3 所示。隧道开挖后引起的最大沉降量约为 13.91 mm,发生在左隧道顶部;最大隆起量约为 8.89 mm,发生在右隧道底部。

2) 孔隙水压力变化分析。图 4 为隧道开挖后土体中孔隙水压力分布图,由图可知,由于扰动引起的地层中的孔隙水压力与原始地层静止状态下的孔压分布明显不同,开挖面周围土体膨胀,开挖面附近将形成负的超孔隙水压力,因而使隧道周围产生局部孔隙水压力集中,后期由于开挖面附近超孔隙水压力的消散会使土体发生固结沉降,进而对上部铁路桥产生影响,这一点在施工中应予以关注。

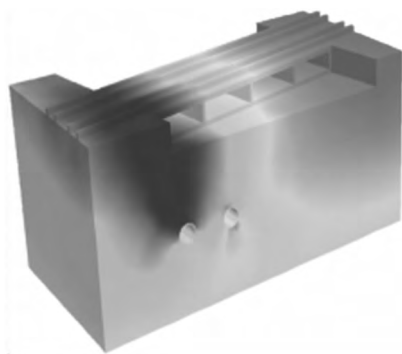


图 3 地层竖向位移图

Fig.3 Figure of vertical displacement

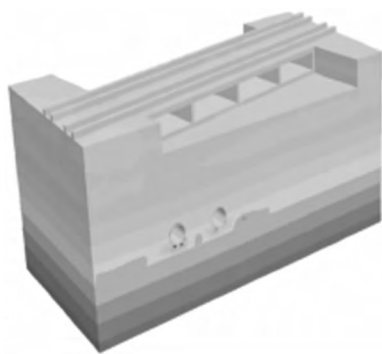


图 4 孔隙水压力分布云图

Fig.4 Figure of pore water pressure distribution

3) 桥梁结构变形分析。图 5 为左右线均开挖完后将框架桥变形放大 1 000 倍的效果图及竖向位移云图。图 6 为盾构掘进过程中框架桥的最大沉降及隆起的变化趋势图。

由图 6 可以看出,右线掘进过程中框架桥的位移变化较快,右线隧道开挖完后,桥梁的最大沉降为 10.34 mm,最大隆起为 5.34 mm;而在开挖左线时桥梁的位移变化相对较缓,左线开挖完后框架桥最大沉降变形为 13.34 mm,发生在框架桥底板西侧,受桥体刚度的影响,东侧发生轻微的隆起变形,框架桥最大隆起变形为 7.27 mm。

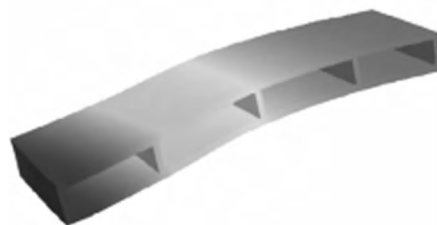


图 5 桥梁结构变形放大图

Fig.5 Figure of amplified deformation of bridge structure

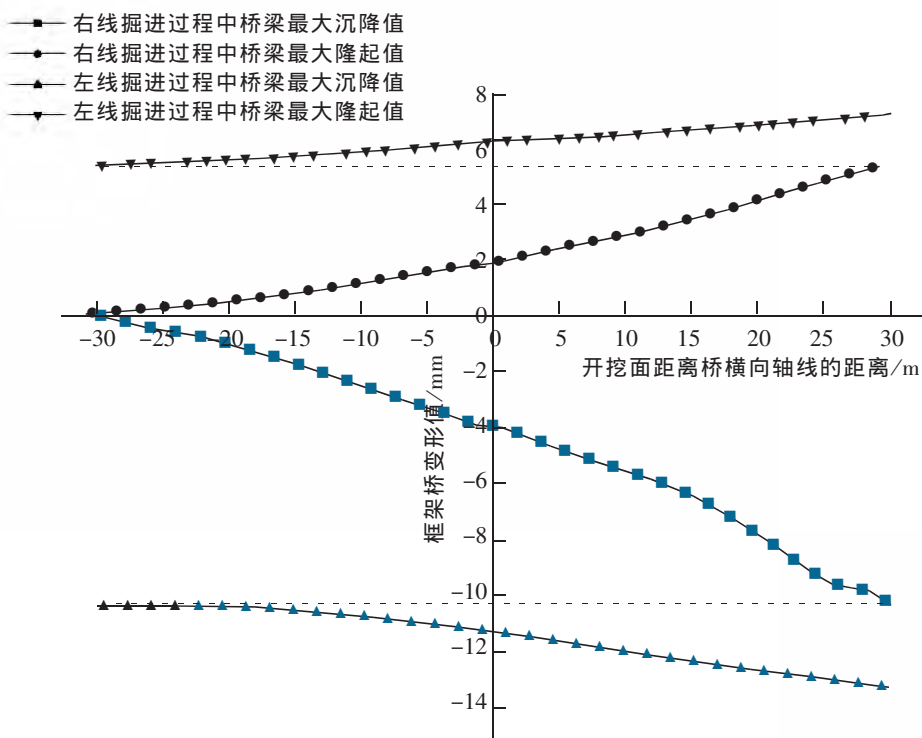


图6 盾构掘进过程中框架桥最大位移变化趋势图

Fig.6 Trend chart of maximum displacement of frame bridge during shield tunneling

此区段京津城际高铁为无砟轨道线路,京沪高铁为有砟轨道线路,《高速铁路工务知识手册》(路桥)规定:高速铁路桥梁基础工后沉降:无砟轨道不大于20 mm,250 km·h⁻¹和350 km·h⁻¹线路有砟轨道分别不大于50 mm和30 mm。虽然计算结果表明桥梁的最终沉降小于控制标准,但变形值相对偏大,并且后期因超孔隙水压消散和土体骨架蠕变还会引起桥梁沉降,为确保铁路运行安全,需要采取相应的措施加以控制。

此外,框架桥的最大差异沉降是随着隧道的开挖逐渐增大的,右线开挖完后最大差异沉降为15.68 mm,到左右线均开挖完后最大差异沉降达到20.61 mm,最大差异沉降主要发生在桥梁东西两侧,将引起轨道的高低不平顺,降低列车运行的舒适性和安全性,对行车安全造成巨大隐患。

4 控制措施及监测方案

4.1 加固措施

多种注浆方式的组合是盾构法穿越砂卵石地层施工控制地表沉降最有效的措施^[9];因此在下穿过程中可采取多种注浆技术来减小盾构掘进对地表的影响。例如提前对盾构隧道上半部分2 m以内部分土体进行注浆加固处理,左线加固里程为K34+739~+779,右线加固里程为K34+738~+783,如图7所示。为验证加固效果,进行了数值计算,计算结果如图8所示。由图8可知,隧道周围土体经过加固处理后,框架桥的最大沉降为11.73 mm,最大隆起为6.17 mm;因此在开挖前对盾构隧道上半部分2 m以内部分土体进行注浆加固处理,可以减小高铁桥梁的变形,但是效果不显著,还需要采取地面深孔注浆、盾尾补浆等其它加固措施。

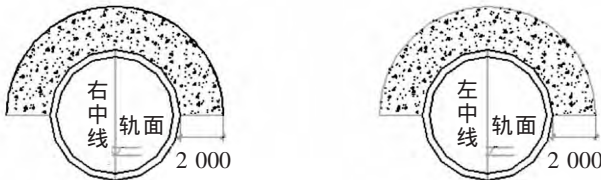


图7 隧道上方土体注浆加固示意图

Fig.7 Schematic diagram of soil grouting reinforcement around tunnel

4.2 施工措施

1) 根据城际列车运营时间, 在施工中选择合适的盾构下穿时间, 比如天窗时间, 尽量减少下穿风险。

2) 选择正确的掘进参数, 严格控制出土量, 尽可能保证土舱压力达到设定值, 并及时进行同步注浆。加强轨面、地表沉降, 地下水位及周围建(构)筑物倾斜观测, 并及时反馈施工。加强过程控制管理, 实施信息化施工, 防止开挖面失稳引起过大的地表沉降。

3) 盾构机本身应增加盾尾刷保护及其严格控制盾尾油脂的压注, 在使用时对盾尾舱进行定期检查, 平均每 8 环全面检查一次, 并且在管片拼装前必须把盾壳内的杂物清理干净, 以防对盾尾刷造成损坏。

4) 加强对盾构掘进中的工况管理, 严防由于泥饼生成和土仓的堵塞, 并导致在铁路框构桥下清洗土仓。

5) 若在掘进施工过程中发现轨面沉降, 应协同铁路相关部门, 采取方法及时调整轨面高程, 以满足铁路道路的标准。

6) 通过框架桥地段穿越卵石地层区域较长, 在穿越前做好刀盘刀具的检修与更换, 做好盾构设备的维保, 以盾构设备最好的状态通过。

4.3 监测方案

1) 根据不同的施工进度, 采取相应的监测方法, 准确测量地面及铁路的变形。

2) 施工监测中, 应对测量结果及时分析与反馈, 参照我国高速铁路轨道不平顺维修管理标准, 京津城际铁路与京沪铁路的轨道静态变形监测控制指标如表 3, 表 4 所示。

表 3 京津城际轨道施工过程静态变形控制标准
Tab.3 Static deformation control standard of Beijing-Tianjin intercity rail construction

项目	高低	轨向	水平	扭曲 (6.25 m)	轨距
幅值/mm	2	2	2	2	±2
弦长/m	10	10	-	-	-

表 4 京沪铁路轨道施工过程静态变形控制标准
Tab.4 Static deformation control standard of Beijing-Shanghai rail construction

项目	高低	轨向	水平	扭曲 (6.25 m)	轨距
幅值/mm	4	4	4	4	-2, +4
弦长/m	10	10	-	-	-

3) 根据监测数据, 调整盾构施工参数, 确保地铁隧道及铁路运营安全。

4) 每一监测断面不少于 9 个检测点, 施工监测应有可靠的基准点, 其设在变形影响范围外, 且不少于 3 个, 基准点系统应定期校核。

5) 警戒值取 80% 的设计容许值。

6) 下穿框构桥通道的沉降及变形按权属部门的规定及相关的规范执行。

5 结语

对北京地铁 8 号线天桥—永定门外站盾构下穿京津城际铁路、京山铁路上跨框架桥进行了定性分析和数值计算, 计算结果表明, 在不采取任何辅助措施的前提下, 双线隧道贯通后框架桥的不均匀沉降差较大, 而高速铁路对沉降控制要求非常严格, 为减小施工对铁路桥的安全风险, 本文提出了施工时可采取的控制措施, 并给出了相应的监测方案, 从而更好地指导后续施工。通过对此案例的分析, 可进一步对砂卵石地层盾构施工对周边环境的影响控制提出以下建议:

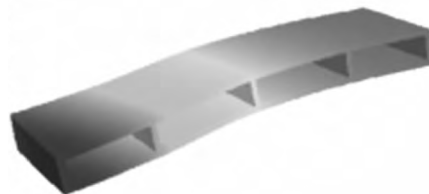


图 8 采取加固措施后铁路桥竖向位移云图

Fig.8 Figure of vertical displacement of railway bridge with soil reinforcement

- 1) 砂卵石地层盾构施工对周边环境变形影响较大,虽然先期沉降可能小于控制标准,但由于砂卵石地层的成拱效应及超孔隙水压力的消散,沉降具有滞后性,所以对于高风险源应当采取相应的措施加以控制;
- 2) 多种注浆方式的组合可以有效控制砂卵石地层地表沉降,如地面深孔注浆、盾尾补浆等;
- 3) 在施工时应注意选择合适的盾构下穿时间、合理的掘进参数,并做好盾构设备的维保;
- 4) 实施信息化施工,提前制定监测方案,施工期间加强地表沉降、地下水位等的观测,并及时反馈施工。

参考文献:

- [1] 周文波. 盾构法隧道施工技术及应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004:1-17.
- [2] 董小卫. 砂卵石地层盾构施工对邻近建筑物影响及控制研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.
- [3] 孙永玉,宋天田,周顺华. 软土地层近距离上穿既有隧道变形的数值模拟[J]. 华东交通大学学报,2007(4):36-38.
- [4] 刘春阳,张鹏,张继清. 地铁盾构隧道下穿既有铁路安全性分析[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2013(S2):69-72.
- [5] 曲兆宇. 砂卵石地层中隧道盾构法施工数值分析[D]. 北京:北京交通大学,2012.
- [6] 卢华喜,王漪璇,周珍伟,等. 盾构隧道下穿铁路股道及火车站站房的影响分析[J]. 华东交通大学学报,2015,32(4):25-32.
- [7] 宋修元,杨宏强. 成都地铁富水砂卵石地层中土压平衡盾构机安全快速施工技术[C]//中国土木工程学会,上海土木工程学会,上海城建隧道股份有限公司. 地下交通工程与工程安全——第五届中国国际隧道工程研讨会文集,中国土木工程学会,上海土木工程学会,上海城建隧道股份有限公司,2011:7.
- [8] 铁路第三勘察设计院集团有限公司,中铁第四勘察设计院集团有限公司,中国铁道科学研究院. TB 10621-2014 高速铁路设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2014.
- [9] 牟亚洲. 砂卵石地层盾构施工地表沉降分析及对策[J]. 铁道建筑技术,2012(4):65-68.

Research on Influence and Control of Shield Tunneling Construction in Sandy Pebble Stratum on High-speed Railway Bridge

Li Guyang¹, Cheng Panpan², Xu Qianwei²

(1. Five Iron Group Electric Service City Link Engineering Co., Ltd., Changsha 410205; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The shield passes through a bridge, on which Beijing-Tianjin intercity railway and Jingshan railway are laid, during tunneling in the section from Tianqiao to Yongdingmenwai of Beijing Metro Line 8 with mainly sandy pebble stratum. It's a high-risk project for it's easy to cause surface subsidence and collapse during shield tunneling in sandy pebble stratum, in addition to the strict requirements of track smoothness for high-speed railway. Based on numerical analysis software, the paper simulated dynamic construction process of shield tunnel overpassing railway bridge, researched the deformation of sandy pebble stratum, distribution of pore pressure and deformation of bridge structure caused by tunnel excavation. It finally put forward engineering countermeasures and monitoring schemes to ensure the safety of bridge. Research results can not only guide the design and construction of tunnel engineering, but also provide reference for similar project issues.

Key words: sandy pebble stratum; shield tunnel; adjacent buildings; construction measures

(责任编辑 刘棉玲)