

文章编号:1006-2467(2019)03-0297-08

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.03.006

大直径盾构浅覆土下穿铁路桥涵的影响分析及施工控制

杨俊龙^{1,2}, 门燕青^{1,3}, 廖少明¹, 高东奇¹, 苏逢彬³

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 上海城建置业发展有限公司, 上海 200030;
3. 济南轨道交通集团有限公司, 济南 250101)

摘要:为揭示大直径盾构浅覆土下穿施工对铁路桥涵的影响,结合杭州环北地下快速路大直径泥水平衡盾构隧道工程实践,采用数值分析的方法对盾构穿越引起的运营铁路桥涵力学行为进行预测,并结合工程实测分析了盾构施工参数的变化规律、控制方法和桥涵变形的实施效果.数值分析结果表明:未进行桥涵区域的土体加固时,若直接穿越铁路桥涵施工,桥涵的最大沉降可以达到21.6 mm,且在桥涵中隔墙的顶部和底部出现应力集中,最大拉应力可达1.60 MPa;进行土体加固后,穿越铁路桥涵施工时桥涵的最大沉降为9.3 mm,部分区域的最大拉应力为1.46 MPa.工程实践中,常规情况下切口压力较静止土压力大15 kPa,为确保盾构穿越铁路桥涵结构的安全,切口压力调大至25 kPa,考虑上覆土土荷载降低约13%,盾构总推力降低约10%,转矩降低约10%,盾尾注浆量处于150%~200%之间可确保穿越铁路桥涵盾构施工安全.现场实测表明:当盾构机将要穿越桥涵时,桥涵结构产生3~4 mm的预隆起;待盾构穿越后,又产生约4 mm的沉降;盾构机通过3 d后,差异沉降降低并较快趋于稳定,最终稳定在0.01%左右.

关键词:盾构隧道;大直径盾构;浅覆土;穿越施工

中图分类号: U 451

文献标志码: A

The Effect and Construction Control of Large Diameter Shield Tunneling Under Railway Culvert

YANG Junlong^{1,2}, MEN Yanqing^{1,3}, LIAO Shaoming¹, GAO Dongqi¹, SU Fengbin³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Shanghai Urban Construction Development Co., Ltd., Shanghai 200030, China;
3. Jinan Rail Transit Group Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: In order to reveal the effect of large diameter shield tunneling under railway culvert, the mechanical behavior of the operating railway bridge and culvert caused by shield crossing were predicted by numerical method, based on the practice of large diameter slurry balance shield for boring North Huancheng Road underground expressway tunnel in Hangzhou. Then the implementation effects such as shield construction parameters, controlling technology and bridge deformation were verified by field testing. The numerical analysis shows that the maximum settlement will reach 21.6 mm at the bottom of

收稿日期:2018-09-17

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(2015CB057806), 2017年度上海市“科技创新行动计划”(17DZ1203804), 山东省自然科学基金项目(ZR2016EEQ13)

作者简介:杨俊龙(1968-),男,江西省南昌市人,高级工程师,博士生,研究方向为地下工程施工技术管理.

通信作者:门燕青,男,博士,电话(Tel.): 0531-66690529;E-mail: menyanqing@126.com.

the bridge and culvert, while the maximum tensile stress will reach 1.60 MPa at the top and bottom of the middle wall of the bridge during the shield tunneling machine passing without the underneath soil strengthened. On the contrary, the maximum settlement and tensile stress will reduce to 9.3 mm and 1.46 MPa respectively when the underneath soil is reinforced. In the actual practice, the pressure at the cutting face is 15 kPa larger than the static earth pressure. However, to ensure the operating bridge and culvert structure in the state of security during shield machine passing, the cutting face pressure increases to 25 kPa larger than the static earth pressure, the total thrust and torque reduces by 10% approximately respectively considering the upper load decrease 13%. Furthermore, the tail grouting volume is parameterized between 150% and 200%. The field testing shows that the deformation of bridge and culvert will upheaval 3–4 mm before the shield crossing, then translate into settlement about 4 mm after the shield crossing. After 3 days since crossing completed, the differential settlement will decrease and tend to be stable gradually, and the final stability value is about 0.01%.

Key words: shield tunneling; large diameter shield tunneling; shallow covering; crossing construction

“穿越”问题在地下空间开发过程中不可避免,穿越施工将对周围土体产生扰动,造成周围地层损失,引起隧道周围空间应力场和位移场的变化^[1].然而,下穿运营铁路时引起的地表沉降控制标准往往是根据施工经验或工程类比而来,具有一定的盲目性^[2].因此,大直径、浅覆土盾构下穿铁路工程与一般的穿越工程相比,不确定性更大,施工风险更高.

国内外学者针对盾构穿越工程,采用理论分析、现场监测等方法开展了许多卓有成效的研究.廖少明等^[3-5]推导了盾构近距离穿越地铁隧道时地层土压力的相关理论公式,预测了盾构超近距离穿越地下构筑物施工过程中的地层变形特性.胡群芳等^[6]分析对比了盾构两次近距离下穿越施工的过程和特点,讨论了周围地层土体的沉降变形和规律.廖少明等^[7]对盾构穿越运营地铁隧道、危旧敏感建筑物等地下空间的盾构选型、微扰动控制等相关参数进行了分析.宋克志等^[8]分析了盾构隧道地表沉降的构成及其机理,推导了地表最大沉降的平均值及标准差.蒋洪胜^[9]研究了盾构法隧道穿越地下污水管道时盾构推进与地层移动的相关性.孔祥鹏等^[10]采用三维有限元方法从理论上对既有车站的结构变形进行了分析.Liu等^[11]分析了在已建隧道上方新建明挖回填式隧道的过程对已建隧道的影响.郭瑞等^[12]采用数值模拟的方法分析了隧道的开挖过程中位移逐渐释放和应力逐渐释放的相关关系.

本文结合杭州环北地下快速路隧道工程实践,采用数值分析的方法研究了有、无土层加固的情况下盾构施工对地层、桥涵的位移场和应力场的影响.在此基础上,分析了盾构穿越铁路桥涵的施工参数的变化规律,提出了盾构施工的控制方法,并对大直

径泥水盾构穿越铁路桥涵过程中的桥涵沉降进行了现场监测分析,以期为大直径盾构浅覆土下穿铁路桥涵设计和施工控制提供借鉴和指导.

1 工程概况

环北地下快速路是杭州市“三纵五横”快速路的中间一横.环北地下快速路隧道工程采用大直径泥水平衡式盾构法进行施工,分南、北两线,北线隧道盾构段 1 275 m,南线隧道盾构段 1 410 m.盾构隧道采用预制管片单层衬砌,管片环采用 9 等份分块,外径 D 为 11.3 m,内径 d 为 10.3 m,管片厚度 0.5 m,环宽 2.0 m.管片之间及管片环之间均采用斜螺栓连接,管片衬砌环采用 C50 钢筋混凝土,抗渗等级为 P12.隧道结构如图 1 所示.

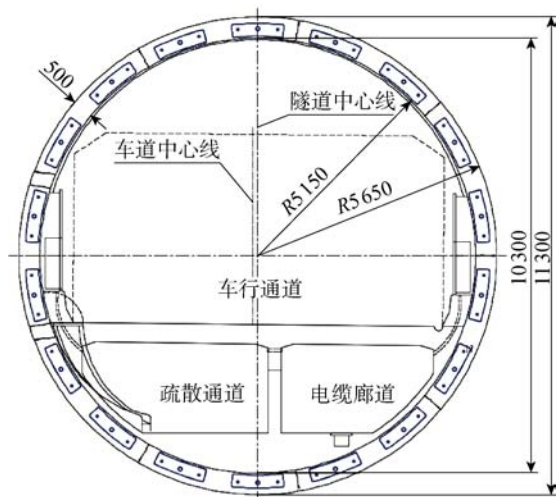


图 1 环北地下快速路盾构隧道断面图(mm)

Fig.1 Shield tunnel section of Huanbei underground expressway (mm)

盾构始发后,将近距离斜交下穿建成于 1977 年的沪杭铁路桥涵,铁路线路中心线与盾构隧道中心线的斜交角度为 $69^{\circ}9'43''$ 。穿越铁路桥涵的宽度为 12.84 m,为箱型框架结构,桥涵混凝土等级为 C30,桥涵上部铁路轨道为有砟轨道。穿越部位南、北线隧道上覆土厚度分别为 8.63 和 8.84 m,如图 2 所示。桥涵底板与引道底板间设置有防止差异沉降的榫槽。

根据地勘报告,隧道穿越铁路桥涵区域上部地

层以粉土、粉砂为主,厚度约 15 m 以内为冲海相砂质粉土夹粉砂及粉砂夹淤泥质粉质黏土(即后文数值分析所述的第 1 层土);中部为厚约 18~22 m 的高压缩性流塑状淤泥质粉质黏土以及厚约 20~28 m 的软塑-可塑状粉质黏土、粉细砂(即后文数值分析所述的第 2 层土);下部为性能较好的圆砾(即后文数值分析所述的第 3 层土)。盾构穿越桥涵段土层的物理力学指标参数如图 3 所示。

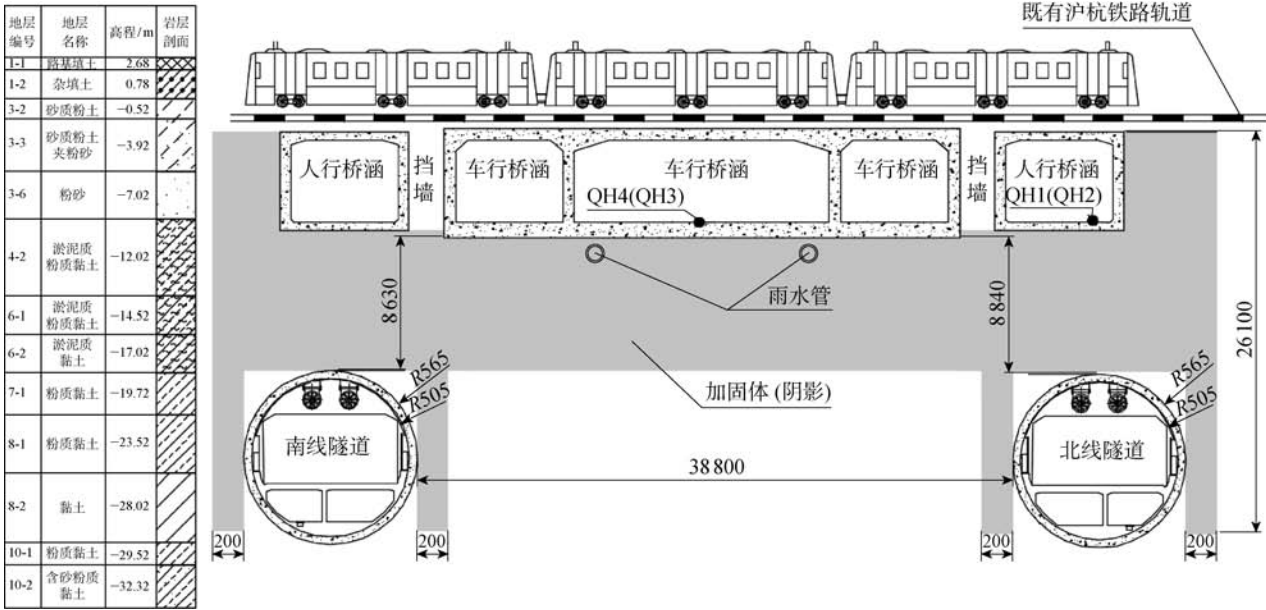


图 2 环北地下快速路隧道与铁路桥涵横剖面关系图(mm)

Fig. 2 Cross section of tunnel and railway bridge of Huanbei underground expressway (mm)

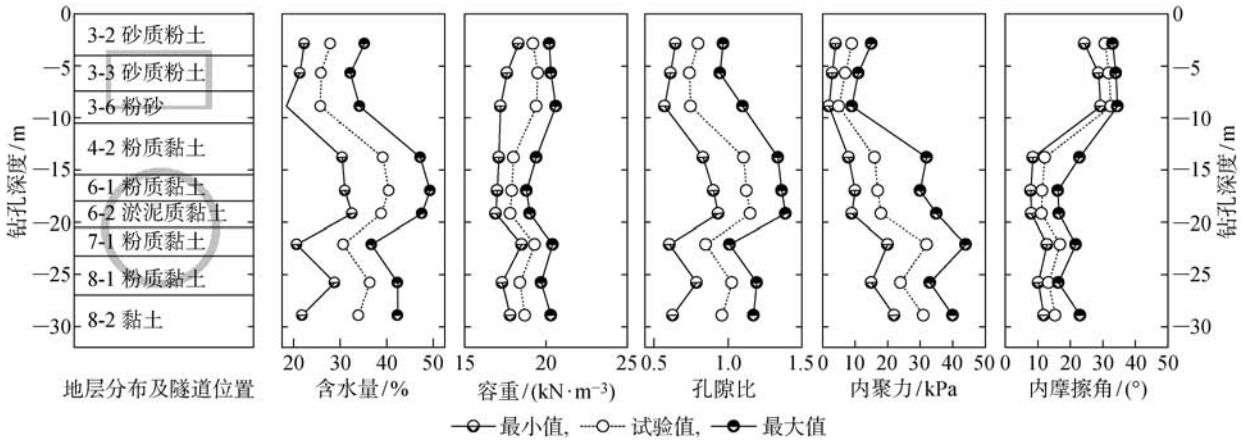


图 3 土体分层及岩土参数变化曲线

Fig. 3 Variation curves of soil stratification and parameters

2 穿越影响预测

土层加固是减小盾构穿越过程中地表沉降的有效方法^[13],通过加固可以有效提高地基土的承载力,减少地表不均匀沉降和铁路桥涵的变形。为确保运营铁路桥涵安全,有效减少盾构穿越施工对运营

铁路桥涵的影响,在进行与不进行高压旋喷法土体加固的情况下,分别建立了不同的数值模型以对盾构穿越影响进行计算分析。

2.1 数值模型的建立

采用 ANSYS 软件进行数值模拟,建立的有限元模型长 126.6 m、宽 92 m、高 41 m,隧道外径 11.3

m、内径 10.3 m,左右边界与隧道边缘相距 34.3 m,底部边界与隧道边缘相距 34.35 m.根据设计资料,地层加固范围设置为桥涵底板下 24 m 区域,同时加固范围桥涵向前后各延伸 8 m,向左右各延伸 8 m.有限元模型如图 4 所示.

为了反映盾构掘进参数的影响,在掘剖面上施加了 0.3 MPa 的面荷载以模拟盾构开挖面的顶进压力;在盾构机与土体间的环形间隙中向土体施加了 0.15 MPa 的面荷载以模拟注浆压力.此外,计算分析中,采用 Solid45 模型单元进行模拟,通过改变 Solid45 单元的弹性模量、密度等参数模拟开挖土体、周围土层、加固土体、盾构隧道管片和桥涵等不同结构.结合区域内地质条件和隧道工程概况,根据图 2 和 3 所示的地层参数指标,对地层参数指标通过加权平均法进行合理的归并,计算分析过程中各单元计算参数如表 1 所示.表 1 中: t 为厚度; E 为弹性模量; μ 为泊松比; γ 为重度; c 为内聚力; φ 为内摩擦角.

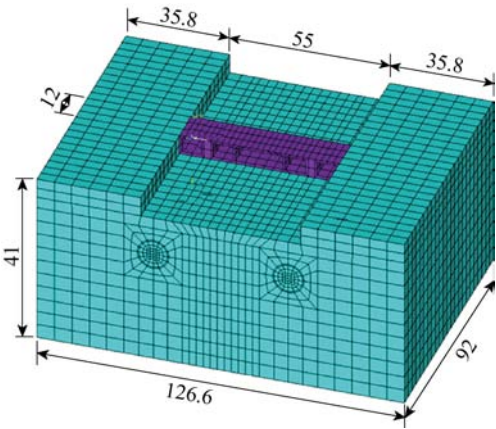


图 4 数值分析模型(m)

Fig. 4 Numerical simulation model (m)

表 1 各单元物理力学指标

Tab. 1 Physical-mechanical parameters of different elements

土层	t/m	E/MPa	μ	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
第 1 层土	11	6	0.22	18	13	24
第 2 层土	20	11.2	0.32	18	12	29.2
第 3 层土	10	16	0.36	18	15	26
等代层	1	2.5	0.4	18	10	30
加固土	24	700	0.4	18	30	30
隧道管片	0.5	34 000	0.167	2 500	—	—
盾构机机壳	0.5	210 000	0.4	7 850	—	—
桥涵	—	30 000	0.167	2 500	—	—

2.2 盾构穿越影响的评价

2.2.1 直接穿越 图 5 所示为南北线隧道直接穿越后的桥涵结构沉降曲线.由图可见,盾构隧道掘进将引起铁路桥涵的沉降,南线隧道刚刚到达桥涵时,桥涵最大沉降为 3.71 mm;南线隧道刚刚盾构穿越后,桥涵最大沉降为 10.89 mm;南线隧道完全盾构穿越后,桥涵最大沉降为 16.40 mm.北线隧道盾构通过引起了铁路桥涵的二次沉降,待北线隧道完全盾构穿越后,桥涵沉降最大值由南线隧道穿过后的 16.40 mm 增至 21.61 mm.

图 6 所示为地层未加固时北线隧道完全通过后桥涵的第 3 主应力分布.由图可见,在盾构推进过程

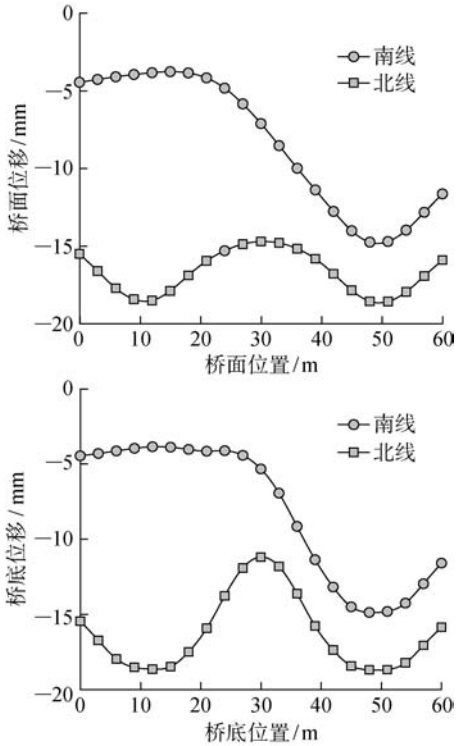


图 5 南北线隧道直接穿越后桥涵结构沉降曲线

Fig. 5 Settlement curves of railway culvert caused by north and south shield tunneling without reinforced soils

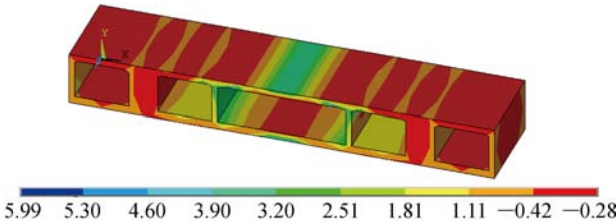


图 6 地层未加固时北线隧道完全通过后桥涵的第 3 主应力(MPa)

Fig. 6 The 3rd principal stress of the bridge without reinforced soils (MPa)

中,虽然桥涵绝大多数区域的拉应力在 1.43 MPa 以下,但在桥涵中隔墙的顶端和底端产生了应力集中,在桥涵中隔墙的顶端、底端以及底板中部的部分区域拉应力超出了 1.43 MPa. 因此,桥涵的受拉能力不完全满足要求,将产生结构开裂.

综上所述,隧道掘进对桥涵的沉降影响显著. 在桥涵沉降方面,南线隧道盾构穿越后,桥涵最大沉降为 16.40 mm,北线隧道盾构穿越后,桥涵沉降最大值增至 21.61 mm,超过了铁路运营安全控制标准(10 mm). 在桥涵应力方面,隧道掘进对桥涵结构的应力影响较大,桥涵底板的中间部分、中隔墙的顶端和底端易发生开裂,这些区域应予以重点关注以免发生危险.

2.2.2 地层加固后穿越 本文通过旋喷桩及注浆的方式对地层进行预加固. 纵向加固范围为桥涵及其前后 5 m 区域,加固深度为 28 m(从桥涵顶部算起),加固后土体的 28 d 无侧限抗压强度不小于 0.5 MPa. 图 7 所示为进行地层加固后南北线隧道穿越导致的桥涵结构沉降曲线. 由图可见,对桥涵下地层进行加固后,南线隧道通过时,隧道中心线上方桥涵区域最大沉降为 4.2 mm;南线隧道盾构通过桥涵后,桥涵不均匀沉降达 9.2 mm 左右,倾斜率约为 0.018 2%;北线盾构施工至铁路桥涵时地层的最大沉降为 8.525 mm;北线隧道完全盾构穿越后地层的

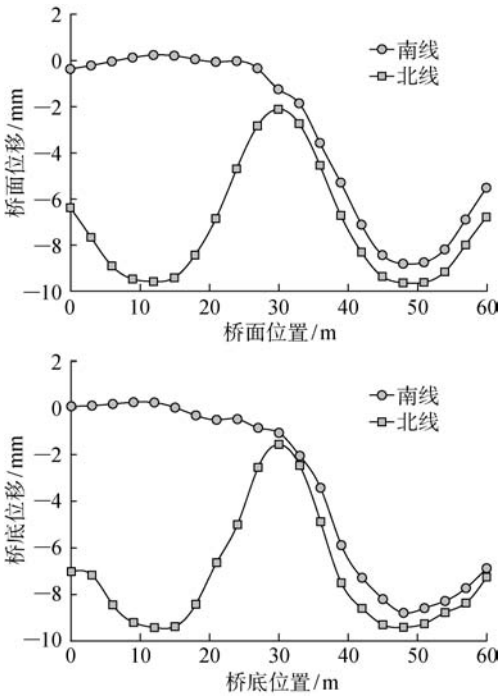


图 7 南北线隧道地层加固后桥涵结构沉降曲线

Fig. 7 Settlement curves of railway culvert caused by north and south shield tunneling with reinforced soils

最大沉降 9.323 mm,桥涵不均匀沉降达 7.5 mm 左右,倾斜率约为 0.014 8%. 上述沉降均满足铁路桥涵最大允许沉降值(10 mm). 此外,虽然桥面上各处沉降不均匀,但桥面和桥底的沉降趋势基本相同.

图 8 所示为地层加固后北线隧道完全盾构穿越时桥涵的第 3 主应力分布. 可以看出,地层加固后,大部分区域的拉应力有所降低,仅在桥涵中隔墙的顶端、底端以及桥涵底板中间部分区域的拉应力超过 1.43 MPa,但超出量极小,不影响隧道结构的安全.

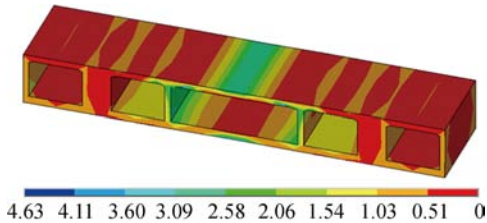


图 8 地层加固后北线隧道完全通过时桥涵的第 3 主应力(MPa)

Fig. 8 The 3rd principal stress of the bridge with reinforced soils (MPa)

总体而言,地层加固后盾构隧道下穿引起的桥涵附加应力、变形发展与地层未加固时盾构下穿相比,均有明显的减小. 实际工程中,应在中隔墙的顶端和底端采取诸如设置加筋肋的加固措施,从而有效地增强这些区域的抗拉能力,减弱应力集中现象.

3 盾构施工控制效果实测

3.1 施工参数设定

在盾构穿越的一般区间,设定切口压力保持在比静止土压力计算值大 15 kPa 左右的水平. 在盾构下穿高铁桥涵区段,考虑到加固土体密实度、强度的增大以及桥涵上列车的超载作用,切口压力适当调高,保持在比静止土压力计算值大 25 kPa 左右的水平. 实际切口水土压力的设定如图 9 所示.

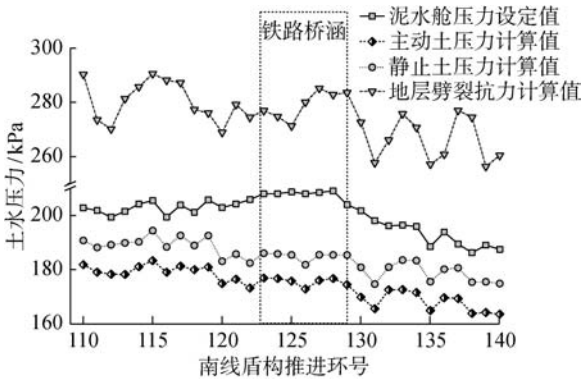


图 9 切口水土压力设置值

Fig. 9 Pressure setting values of cutting ring

南、北线隧道穿越铁路桥涵前后盾构机刀盘转矩和盾构推力的设定情况如图 10 所示。隧道穿越桥涵过程中,由于桥涵的上覆土压力减小,隧道中心荷载的理论计算值降低了21kPa,比穿越桥涵前减小

了约 13%,因此盾构施工参数在穿越过程中作了相应调整,总推力降低了约 10%,转矩降低了约 10%。此外,盾尾注浆量大多处于 150%~200%之间。

3.2 施工控制效果实测分析

为验证盾构施工控制效果,在车行桥涵底板的中部和人行桥涵的底板对应隧道拱顶的正上方位置(见图 2),沿纵向间距 8 m,分别布置了 QH1~QH4 共计 4 个沉降监测点,如图 11 所示。盾构穿越桥涵前、后的 7 d 内均进行了沉降监测,监测频率 1 次/d,QH1~QH4 测点随盾构推进的位移变化如图 12 所示,桥涵纵向差异沉降变化曲线如图 13 所示。由图可见,盾构机到达桥涵前,桥涵沉降很小,介于 -1~1 mm 之间。当盾构机即将穿越桥涵时,4 个测

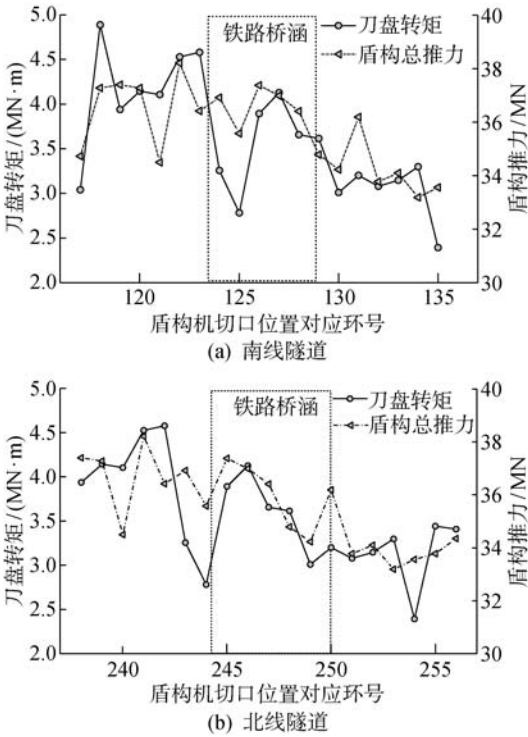


图 10 刀盘转矩及盾构推力变化曲线
Fig. 10 Variation of shield torque and thrust

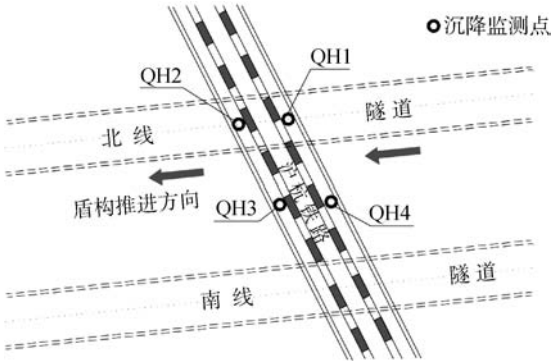


图 11 测点布置位置
Fig. 11 Monitoring points arrangement

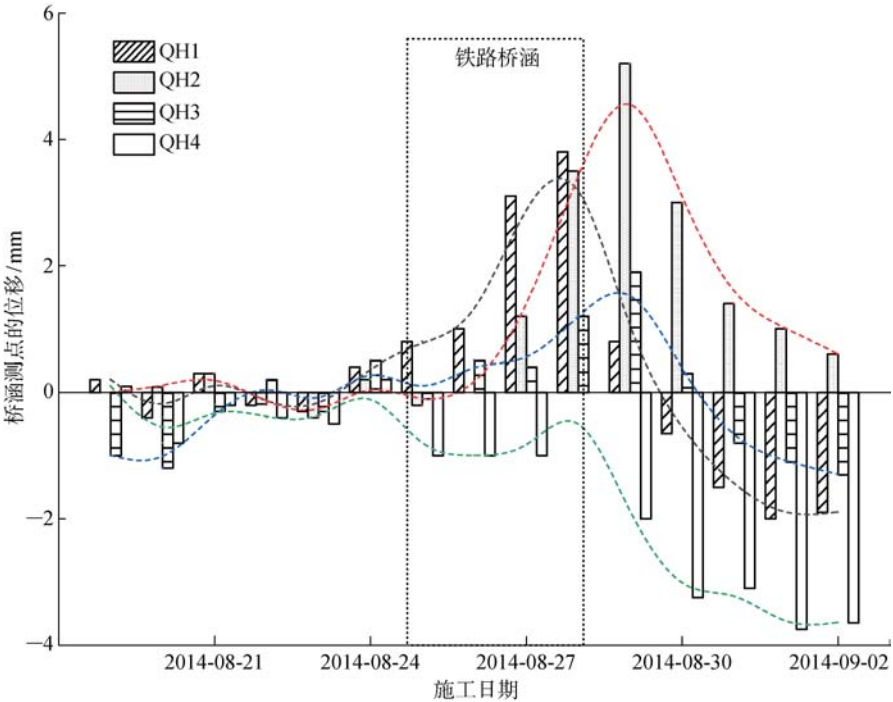


图 12 盾构推进过程中桥涵各测点的位移值
Fig. 12 Displacement of monitoring points during shield advancing

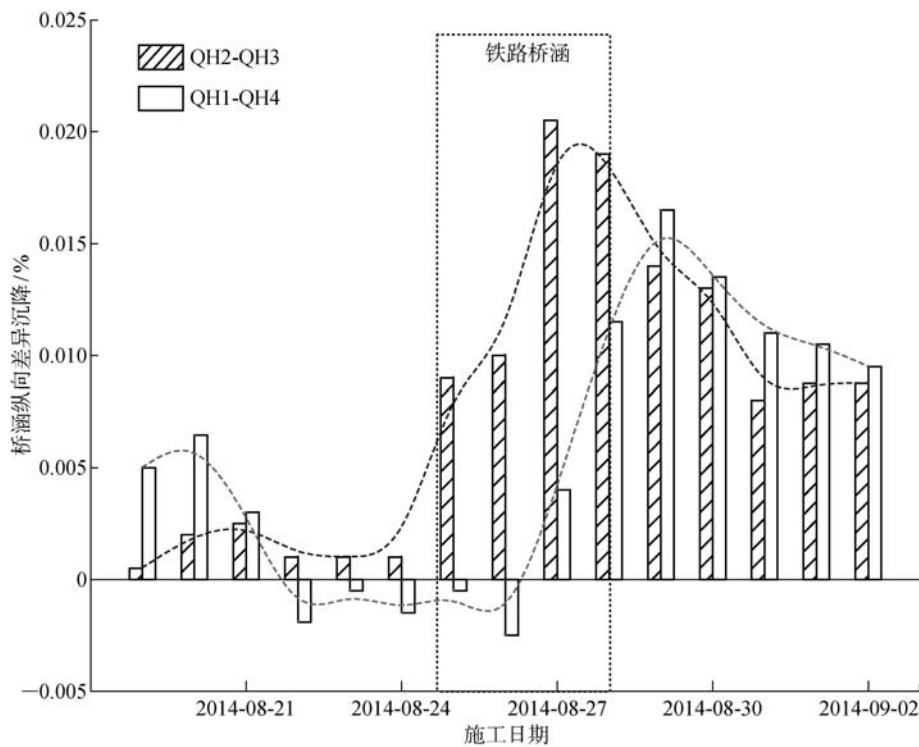


图 13 桥涵纵向差异沉降变化曲线

Fig. 13 Longitudinal differential settlement of bridge during shield advancing

点都发生了 3~4 mm 的隆起.当盾尾通过后,桥涵测点再次发生了约 4 mm 的下沉.上述变形均处于铁路安全运营规范允许范围内.工程实测结果与数值模拟结果存在微小差异,其产生的原因为数值模拟分析中未对盾构切口压力进行调整,而在工程实践中切口压力比静止土压力计算值大 25 kPa,较大的切口压力导致盾构挤压土体,造成地面的预隆起.

进一步对铁路桥涵的差异沉降进行分析.根据监测数据,盾构机到达桥涵前,桥涵纵向差异沉降很小,基本介于 $-0.005\% \sim 0.01\%$ 之间.盾构穿越铁路桥涵过程中,纵向差异沉降逐渐增大,QH2、QH3 两点的差异沉降由 0.01% 增加到 0.02% ,QH1、QH4 两点的差异沉降由 -0.001% 增加到 0.017% .盾构机通过 3 d 后,差异沉降降低并较快趋于稳定,最终稳定在 0.01% 左右.

以上研究结果可以说明,在对桥涵下方土体进行旋喷桩加固后,桥涵变形和受力的各项指标均在铁路安全运营允许的范围之内,盾构穿越施工对运营铁路桥涵安全性的影响可控.

4 结论

本文结合杭州环北地下快速路大直径泥水平衡盾构隧道工程,采用数值分析的方法对盾构穿越引起的运营铁路桥涵力学行为进行了预测,并结合工

程实测分析了盾构施工参数的控制方法和实施效果,主要结论如下.

(1) 数值分析表明:未进行桥涵区域的土体加固时,直接穿越铁路桥涵施工将导致桥涵最大沉降达到 21.6 mm,且在桥涵中隔墙的顶部和底部出现应力集中,最大拉应力可达 1.60 MPa;进行土体加固后,穿越铁路桥涵施工导致桥涵最大沉降为 9.3 mm,部分区域的最大拉应力为 1.46 MPa.

(2) 常规情况下,切口压力较静止土压力大 15 kPa,为确保盾构穿越铁路桥涵时结构的安全,切口压力调至比静止土压力大 25 kPa.此外,考虑上覆水土荷载降低约 13%,盾构总推力降低了约 10%,转矩降低了约 10%,盾尾注浆量处于 150%~200%之间,可确保穿越铁路桥涵盾构施工安全.

(3) 现场实测表明:当盾构机即将穿越铁路桥涵时,桥涵结构将产生 3~4 mm 的预隆起;待盾构穿越后,将产生约 4 mm 的沉降;盾构机通过 3 d 后,差异沉降降低并较快趋于稳定,最终稳定在 0.01% 左右.

参考文献:

[1] ALSAHLY A, STASCHEIT J, MESCHKE G. Adaptive computational simulation of TBM-soil interactions during machine-driven tunnel construction in saturated soft soils[C]// *Tunneling and Underground*

- Construction: Selected Papers from the Proceedings of the 2014 Geoshanghai International Congress**. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2014.
- [2] 张鹏. 地铁隧道下穿高速铁路地表沉降控制标准研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2014, 10(增1): 1700-1703.
- ZHANG Peng. Study on the surface settlement control standard of metro tunnel under the High-speed railway[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2014, 10(S1): 1700-1703.
- [3] 廖少明, 杨俊龙, 奚程磊, 等. 盾构近距离穿越施工的工作面土压力研究[J]. *岩土力学*, 2005, 26(11): 1727-1730.
- LIAO Shaoming, YANG Junlong, XI Chenglei, *et al.* Approach to earth balance pressure of shield tunneling across ultra-near metro tunnel in operation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(11): 1727-1730.
- [4] 廖少明, 余炎, 彭芳乐. 盾构近距离穿越相邻隧道施工的数值解析[J]. *岩土力学*, 2004, 25(增): 223-226.
- LIAO Shaoming, YU Yan, PENG Fangle. Numerical analysis of shield tunneling construction through adjacent objects[J]. *Rock and Mechanics*, 2004, 25(S): 223-226.
- [5] 廖少明, 余炎, 李文林. 地中弹性边界对盾构近距离掘进位移场的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(19): 3534-3540.
- LIAO Shaoming, YU Yan, LI Wenlin. Effects of elastic boundary in ground on displacement field induced by shield tunneling[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(19): 3534-3540.
- [6] 胡群芳, 黄宏伟. 盾构下穿越已运营隧道施工监测与技术分析[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(1): 42-47.
- HU Qunfang, HUANG Hongwei. Analysis and monitoring on shield tunneling under existing adjacent tunnel[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(1): 42-47.
- [7] 廖少明, 徐意智, 陈立生, 等. 穿越不同建(构)筑物的地铁盾构选型与控制[J]. *上海交通大学学报*, 2012, 46(1): 47-52.
- LIAO Shaoming, XU Yizhi, CHEN Lisheng, *et al.* Shield type selection and its control on tunneling across various structures[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2012, 46(1): 47-52.
- [8] 宋克志, 王梦恕, 孙谋. 基于 Peck 公式的盾构隧道地表沉降的可靠性分析[J]. *北方交通大学学报*, 2004, 28(4): 30-33.
- SONG Kezhi, WANG Mengshu, SUN Mou. Reliability analysis of ground settlement with shield tunnel construction based on Peck formula[J]. *Journal of Northern Jiaotong University*, 2004, 28(4): 30-33.
- [9] 蒋洪胜, 侯学渊. 盾构掘进对隧道周围土层扰动的理论与实测分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(9): 1514-1519.
- JIANG Hongsheng, HOU Xueyuan. Theoretical study and analysis of site observation on the influence of shield excavation on soft clays around tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(9): 1514-1519.
- [10] 孔祥鹏, 刘国彬, 廖少明. 明珠线二期上海体育馆地铁站穿越施工对地铁一号线车站的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(5): 821-825.
- KONG Xiangpeng, LIU Guobin, LIAO Shaoming. Influence of construction of Shanghai stadium transverse station of pearl line pashe II on station of metro line No. 1[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(5): 821-825.
- [11] LIU Hanlong, LI Ping, LIU Jinyuan. Numerical investigation of underlying tunnel heave during a new tunnel construction[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2011, 26(2): 276-283.
- [12] 郭瑞, 方勇, 何川. 隧道开挖过程中应力释放及位移释放的相关关系研究[J]. *铁道工程学报*, 2010, 114(9): 46-50.
- GUO Rui, FANG Yong, HE Chuan. Study on the correlation between stress release and displacement release during tunnel excavation[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2010, 114(9): 46-50.
- [13] 肖广良. 盾构在软土地层穿越既有铁路施工技术[J]. *隧道建设*, 2008, 28(3): 344-349.
- XIAO Guangliang. Construction technology for tunnel boring crossing underneath existing railway by shield machine in soft ground[J]. *Tunnel Construction*, 2008, 28(3): 344-349.

(本文编辑:方华)