

文章编号: 1005-0523(2017)02-0045-09

地铁盾构近距离下穿多座高铁桥梁影响分析

唐黎明

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 盾构法施工被广泛应用于城市轨道交通建设中, 盾构区间隧道不可避免会存在穿越既有桥梁的情况; 而穿越既有桥梁时必须考虑施工过程桥梁墩顶的位移情况, 确保桥梁运行安全。以宁波市轨道交通4号线金达路站—钱湖大道站区间下穿杭深线、北环线鄞县特大桥工程为例, 利用Plaxis 3D有限元软件对盾构施工过程进行了数值模拟分析, 对不同施工工况下桥梁墩顶的变形情况进行了研究, 得到了高铁桥梁桥墩横桥向、顺桥向及垂向位移, 并对该设计方案进行了技术分析和安全评估。

关键词: 城市地铁; 盾构隧道; 下穿施工; 既有桥梁; 数值分析

中图分类号: U24 文献标志码: A

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2017.02.006

全国各大城市争相开始轨道交通建设, 截至2016年2月, 全国已有27个城市建成地铁并通车, 到2020年中国地铁总规划里程达7 000 km^[1]。随着城市轨道交通网络的进一步完善, 新建地铁盾构下穿高铁桥梁的情况越来越多, 考虑盾构隧道施工会改变原土体的应力场, 造成开挖面周围土体的扰动^[2-3], 进一步引起地表变形, 使既有高铁桥梁发生隆沉变形, 引起高铁桥梁产生垂向沉降和水平(横桥向、顺桥向)位移^[4-5]。过大的变形甚至会影响铁路的运营安全^[6]。为保证高铁桥梁的运营安全, 新建盾构隧道在穿越高铁桥梁时, 高铁桥梁的横桥向、顺桥向及垂向变形应该控制在1.0 mm内^[7]。综上所述, 为了减少盾构下穿施工对高铁桥梁的影响, 研究盾构施工时高铁桥梁和运行机车的安全性^[8]及相应的控制措施具有重要意义。

1 工程概况

宁波市轨道交通4号线工程是轨道交通骨干线网西北—东南向的内部填充线, 路线从宁波市中心城区穿越。轨道交通4号线全长约35.95 km, 地下线24.55 km, 高架线11.1 km, 过渡段0.3 km。全线共设25座车站(含6个换乘站), 其中地下车站18座, 高架车站7座, 平均站间距1.48 km。金达路站—钱湖大道站区间沿首南路前行, 具体如图1所示, 于云龙站北端下穿杭深线铁路桥和北环铁路桥时为避开首南路桩基而向温州方向偏移两桥跨。此段区间为盾构法施工, 盾构隧道结构于高铁桥梁桩基中间穿过, 形成盾构下穿铁路桥节点。



图1 金达路站—钱湖大道区间线位示意图

Fig.1 Sketch map between Jinda Road Station and Qianhu Road section

收稿日期: 2016-10-16

作者简介: 唐黎明(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为城市轨道交通研究。

拟建场地位于宁波平原中部,地形平坦开阔,稳定性较好。区间地层从上自下主要为粘土、淤泥质粘土、淤泥、粘质粉土、粉质粘土等;盾构隧道穿越粘质粉土、粉质粘土,地层物理力学指标如表1所示。场地沿线埋藏分布有浅部孔隙微承压水和深部孔隙承压水,河水位一般低于地面0.5~1.2 m,水深3.0~3.5 m,局部水深可达6.0 m。

表1 土层物理力学性质指标表
Tab.1 Physical and mechanical property indexes of soil layer

层号	岩性名称	天然重度 $r/(\text{kN}/\text{m}^3)$	孔隙比 e	压缩模量 E_s/MPa	内摩擦角 $\Phi/(\text{°})$	粘聚力 C/kPa
①2	粘土	18.8	0.957	4.14	13.9	32.9
①3b	淤泥质粘土	17.4	1.335	2.29	9.4	11.8
②1	粘土	18	1.154	3.02	11.7	19.8
②2a	淤泥	16.5	1.611	1.81	9.3	9.2
②2b	淤泥质粘土	17.2	1.36	2.19	9.1	13.1
②2c	淤泥质粉质粘土	17.7	1.175	2.68	10.3	14.4
③1a	粘质粉土	19.4	0.775	6.19	25.9	10.8
③2	粉质粘土	18.6	0.928	3.78	11.2	16.1
④1a	淤泥质粉质粘土	17.8	1.126	2.96	10.5	16.5
④1b	淤泥质粘土	17.4	1.285	2.72	10.1	16.7
④2a	粘土	17.5	1.218	3.08	12.2	22.7
⑤1b	粉质粘土	19.6	0.756	6.45	16.4	41
⑤4a	粉质粘土	18.3	0.949	4.85	12.9	19.3
⑤4b	粘质粉土	19	0.835	7.85	23.1	12.8
⑥1	粉质粘土	19.6	0.752	6.53	15	31
⑥2	粘土	18.3	1.067	4.93	13	25

2 设计方案

2.1 路线平面设计

金达路站—钱湖大道站区间盾构穿越高铁桥梁分为3幅,中间为杭深线鄞县双线特大桥,北环铁路鄞县左、右线特大桥分居两侧。区间左线隧道结构与桩基中心最小距离为7.57 m,右线隧道结构与桩基中心最小距离为7.53 m。左线线路与铁路桥的交角约 87° ,右线线路与铁路桥的交角约 82° 。穿越段盾构埋深约16.5 m。金达路站—钱湖大道区间隧道与铁路桥平面关系图如图2所示。

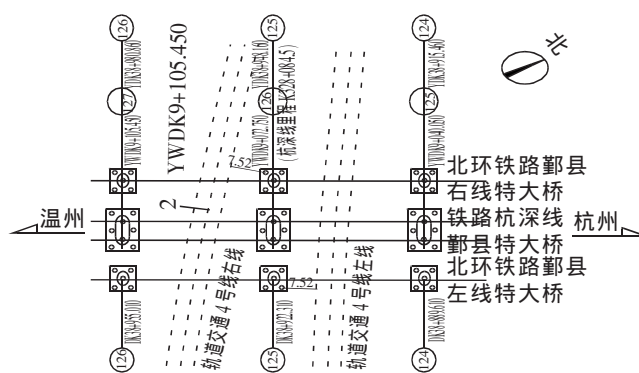


图2 金达路站—钱湖大道区间隧道与铁路桥平面关系图
Fig.2 Plan view of tunnel and railroad bridge between Jinda Road Station and Qianhu Road section

2.2 路线与杭深线鄞县特大桥关系

杭深线鄞县特大桥上部结构为简支 32 m 双线箱梁,桥面为有碴轨道,线间距 5.0 m,通行高速动车;下部为圆端式墩,承台尺寸 11.6 m×7.1 m×2.5 m,基础为 8Φ1.25 m 钻孔桩,桩长 68~69 m,桩底持力层为圆砾层,σ₀=350 kPa。盾构左右线分别从本桥 125~126 墩和 126~127 墩之间穿越,墩顶高程 7.5~7.7 m,地面高程约 2.0 m,桥下空间高度约 5.4 m。盾构隧道下穿甬台温鄞县特大桥如图 3 所示。

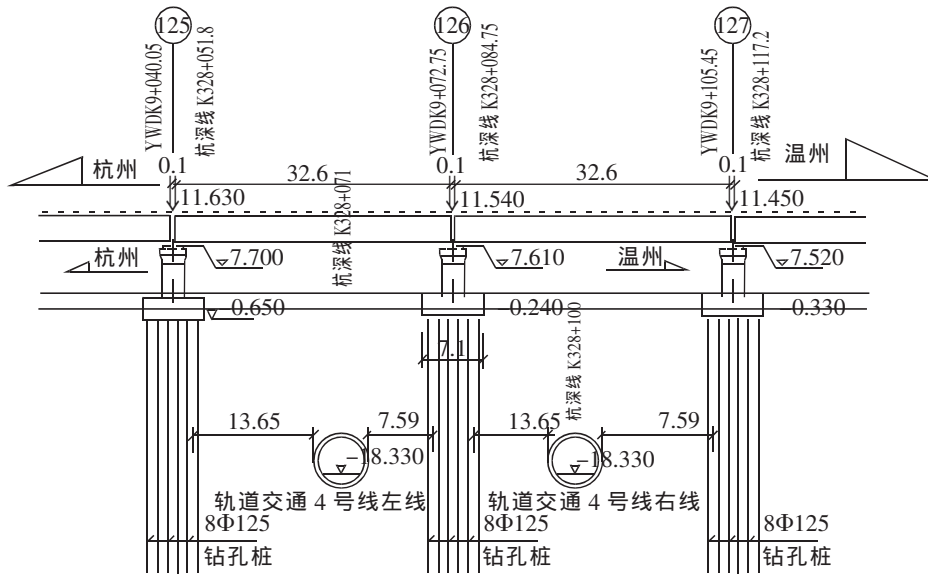
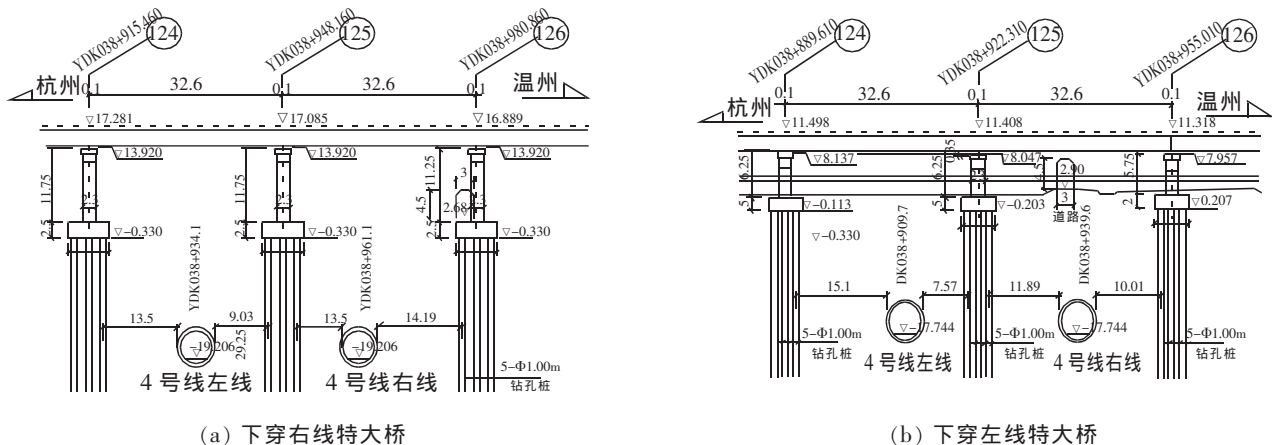


图 3 区间盾构下穿甬台温鄞县特大桥

Fig.3 The shield undercrossing the Taiwan-Ningbo Yinxian Bridge

2.3 路线与北环铁路鄞县特大桥关系

北环铁路鄞县左线特大桥 5 659.65 m、鄞县右线特大桥 5 683.665 m。北环铁路鄞县左、右线特大桥与杭深线特大桥采用对孔布置,上部结构孔跨为 32 m 简支 T 梁,下部采用圆端形桥墩,承台尺寸 11.6 m×7.1 m×2.5 m,基础为 5Φ1.0 m 钻孔桩,桩长 56~66 m,桩底持力层为粉质粘土,σ₀=180 kPa。盾构左右线分别从 124~125 墩和 125~126 墩之间穿越。左线墩顶高程约 8.0 m,地面高程约 2.0 m,桥下空间高度约 6.0 m;右线墩顶高程约 13.7 m,地面高程约 2.0 m,桥下空间高度约 11.7 m。盾构隧道下穿北环线铁路鄞县特大桥如图 4 所示。



(a) 下穿右线特大桥

(b) 下穿左线特大桥

图 4 金达路站-钱湖大道区间隧道下穿北环线铁路鄞县特大桥

Fig.4 Tunnel undercrossing Taiwan Ningbo Yinxian Bridge between Jinda Road Station and Qianhu Road section

3 工程特点

3.1 周边环境要求高

宁波市轨道交通4号线穿越杭深线甬台温高速铁路,甬台温高速铁路为已开通运行的高速铁路,线路列车最高开行速度为300 km/h,限制开行速度为200 km/h,宁波铁路枢纽北环线铁路车速为120 km/h,轨面平顺性控制要求高,高架桥梁尤其是连续梁桥对桥墩的不均匀沉降要求高^[9]。

3.2 隧道与桥梁桩基净距小

穿越点盾构隧道距离北环线鄞县左、右线特大桥净距均较小。右线隧道结构与桩基中心最小距离为7.53 m,高架桥梁桩基变形控制要求高,对盾构施工提出了很高的控制要求^[10]。

3.3 盾构施工控制难度较大

盾构隧道洞顶位于粉质粘土层,工程地质条件较差。因此两穿越点处的盾构施工控制难度均较大。

3.4 盾构隧道与铁路斜交穿越

穿越点处线路为斜交穿越铁路。4号线左线线路与铁路桥的交角约 87° ,右线线路与铁路桥的交角约 82° 。斜交穿越会增加线路的不平顺性,影响铁路行车安全和舒适性;同时也会引起隧道管片偏载,影响隧道的长期运营。

4 设计方案数值模拟分析

4.1 三维模型建立

根据区间隧道与杭深线、北环线鄞县特大桥的相对位置关系,采用岩土有限元软件Plaxis 3D建立三维模型进行数值计算分析。模型总长度为124 m,总宽度为108 m,深度约为75 m。模型包含了隧道穿越段杭深线、北环线鄞县特大桥桥墩、承台、桩基及左右线两条隧道。按照列车活载最不利布载形式将荷载施加到轨道结构上,建立模型如图5所示(图中隐藏了部分土层)。

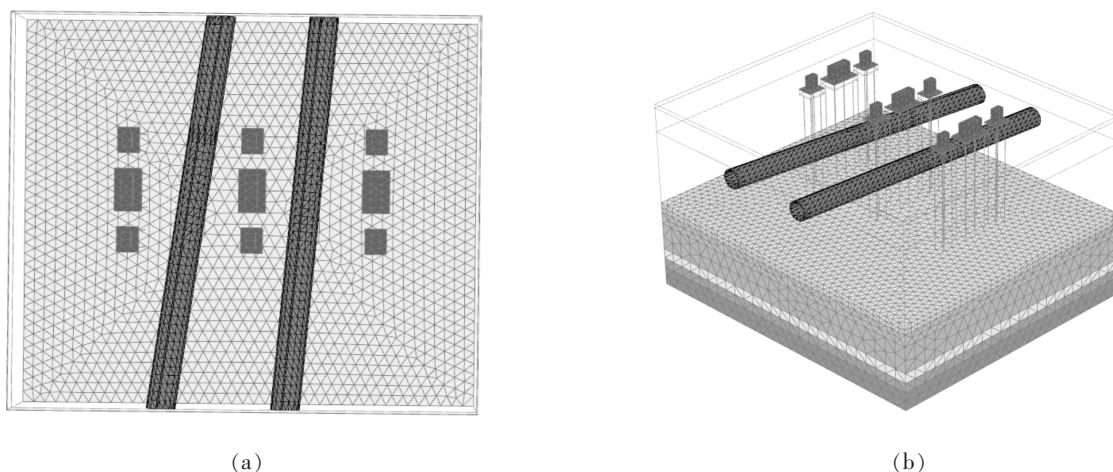


图5 三维计算模型图

Fig.5 Diagram of three-dimensional calculation model

1) 模型参数的选取。模型中的土体本构模型选用小应变土体硬化模型(small hardening soil model^[12], SHS模型),可有效模拟软粘土的剪切硬化和体积硬化过程,也可考虑砂土的剪胀性,同时可以反映出不同应变水平下的刚度衰减规律,服从Mohr-Coulomb破坏准则^[12]。计算模型中的土体参数参照表1确定。

2) 模型荷载的确定。根据盾构下穿的实际施工方案,下穿桥梁均为预应力混凝土连续箱梁,跨度为32 m的箱梁重约900 t,桥梁墩顶长宽分别为6.0 m×2.8 m,利用高铁桥梁桥面横载和活载计算得到高铁桥梁墩顶面荷载约为800 kN/m²,结合模型中的隧道选取板单元进行模拟,隧道直径为6.2 m,壁厚为0.35 m,材料为C50混凝土。

4.2 盾构下穿施工过程模拟

针对本工程的特点,结合工程设计方案,在 Plaxis 3D 有限元软件中通过冻结隧道范围内土体单元,激活管片单元,并进行断面收缩来模拟盾构掘进过程。整个隧道施工过程模拟按照实际施工顺序进行分步开挖,先施工左线隧道,再施工右线隧道。将这个盾构下穿施工分为 16 个工况,盾构下穿施工模拟过程见表 2,盾构下穿施工工况示意图如图 6 所示。

表 2 盾构下穿施工模拟过程
Tab.2 Simulation process of shield tunneling construction

工况序号	左线盾构模拟施工	工况序号	右线盾构模拟施工
工况 1	刀盘到达 126-3 号承台 4 号桩最近位置	工况 9	刀盘到达 127-3 号承台 4 号桩最近位置
工况 2	刀盘到达 126-3 号承台 3 号桩最近位置	工况 10	刀盘到达 127-3 号承台 3 号桩最近位置
工况 3	刀盘到达 126-2 号承台 6 号桩最近位置	工况 11	刀盘到达 127-2 号承台 6 号桩最近位置
工况 4	刀盘到达 126-2 号承台 5 号桩最近位置	工况 12	刀盘到达 127-2 号承台 5 号桩最近位置
工况 5	刀盘到达 126-2 号承台 4 号桩最近位置	工况 13	刀盘到达 126-2 号承台 3 号桩最近位置
工况 6	刀盘到达 126-1 号承台 4 号桩最近位置	工况 14	刀盘到达 126-1 号承台 1 号桩最近位置
工况 7	刀盘到达 126-1 号承台 3 号桩最近位置	工况 15	刀盘到达 126-1 号承台 2 号桩最近位置
工况 8	左线隧道全线贯通	工况 16	右线隧道全线贯通

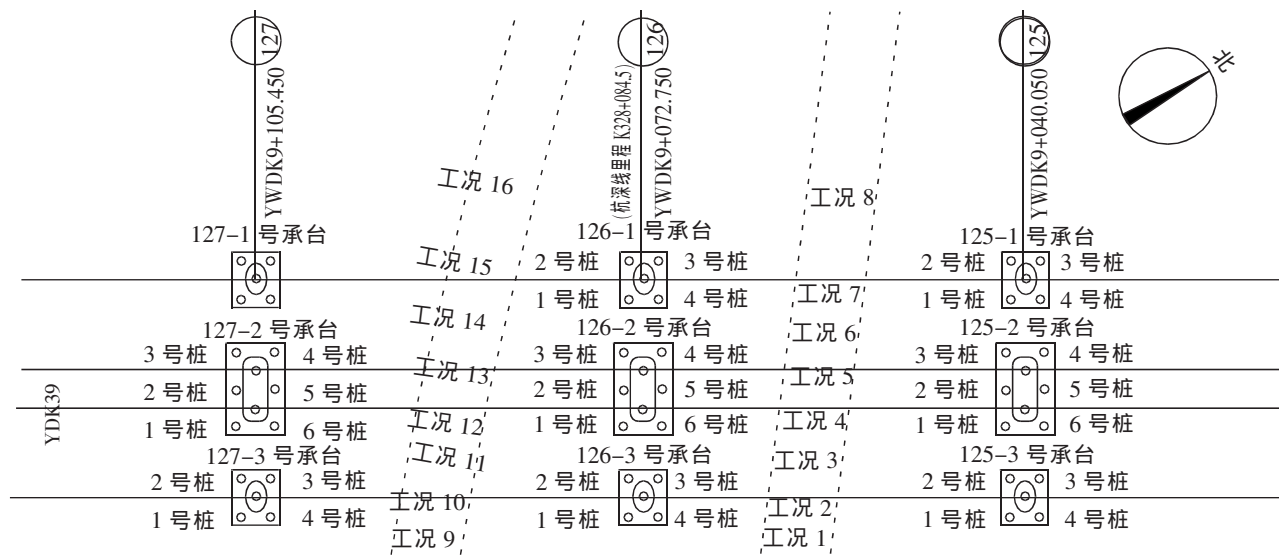


图 6 盾构下穿施工工况示意图
Fig.6 Sketch map of shield tunneling condition

4.3 盾构下穿施工结果分析

分析隧道下穿对抗深线、北环线鄞县特大桥桥墩顶面的位移影响,最大垂向位移为-0.413 mm,施工过程中相邻桥墩最大差异位移为 0.191 mm。隧道下穿引起桥墩顶面横桥向最大位移为-0.558 mm,横桥向位移的最大差异量为 0.248 mm。隧道下穿引起的桥墩顶面顺桥向最大位移为-0.936 mm,顺桥向位移的最大差异量为-0.369 mm。综上所述,隧道施工对抗深线、北环线鄞县特大桥桥墩顶面位移影响较小,各方向位移量及相邻承台的变位差异量均满足控制要求。16 个施工工况下 125~127 号墩的垂向位移、横桥向、顺桥向如图 7~15 所示。

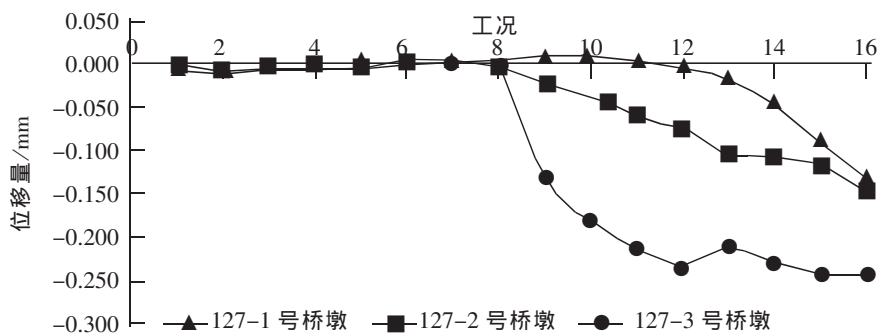


图7 16个施工工况下127号墩的垂向位移

Fig.7 Vertical displacement of No.127 pier in 16 construction conditions

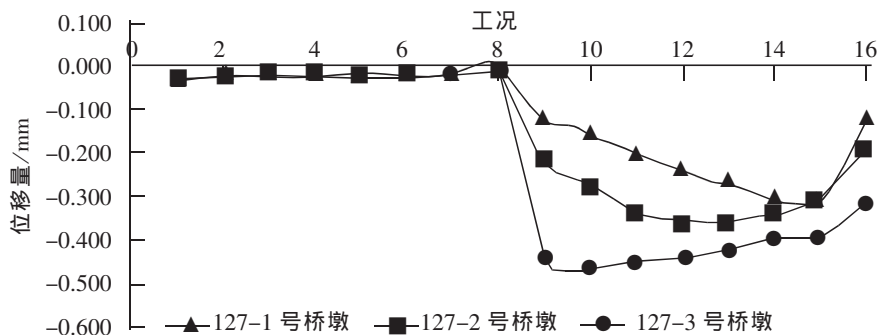


图8 16个施工工况下127号墩的横桥向位移

Fig.8 Transverse displacement of No.127 pier in 16 construction conditions

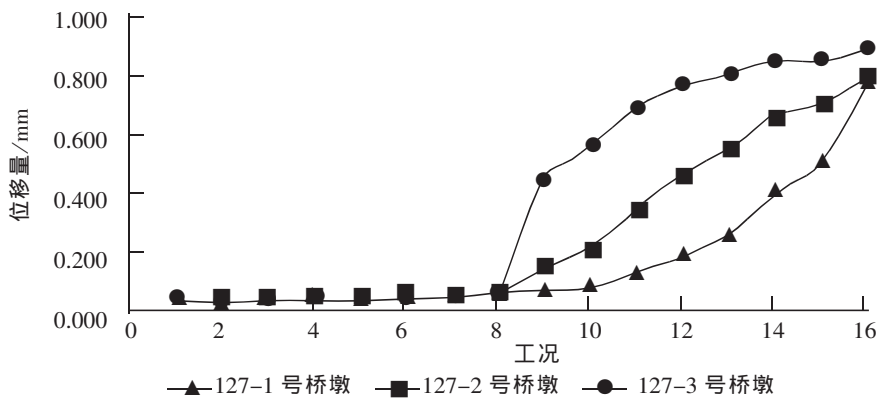


图9 16个施工工况127号墩顺桥向位移

Fig.9 Bridge-to displacement of No.127 pier in 16 construction conditions

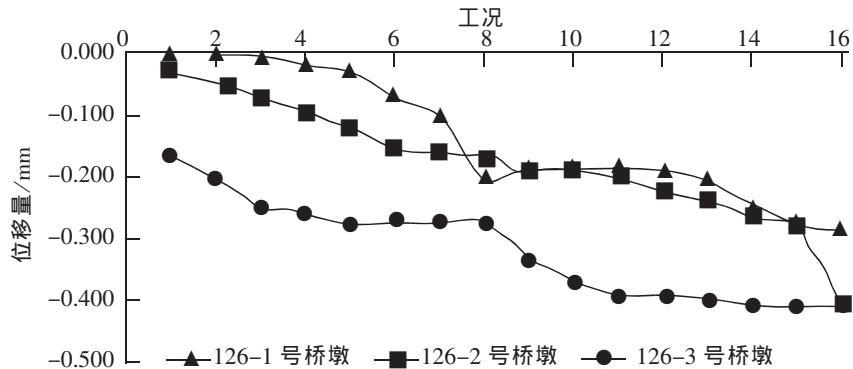


图10 16个施工工况下126号的墩垂向位移

Fig.10 Vertical displacement of No.126 pier in 16 construction conditions

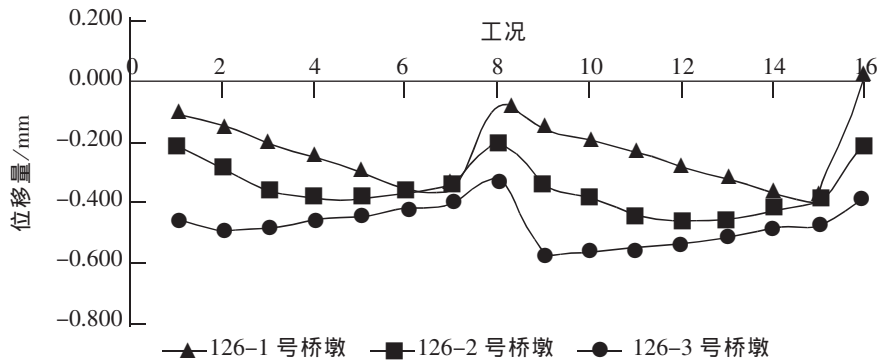


图 11 16 个施工工况下 126 号墩的横桥向位移

Fig.11 Transverse displacement of No.126 pier in 16 construction conditions

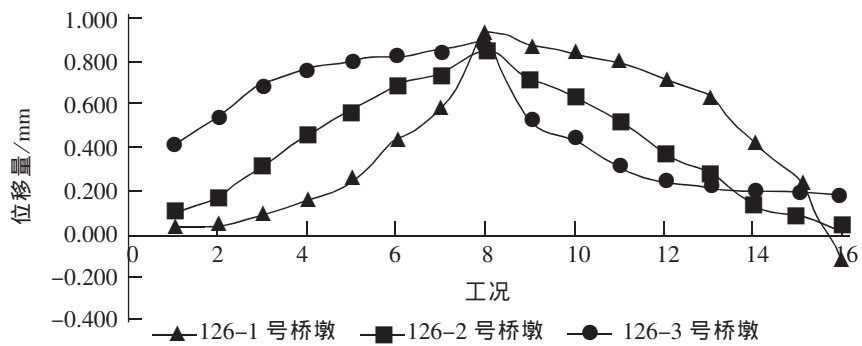


图 12 16 个施工工况下 126 号墩的顺桥向位移

Fig.12 Bridge-to displacement of No.126 pier in 16 construction conditions

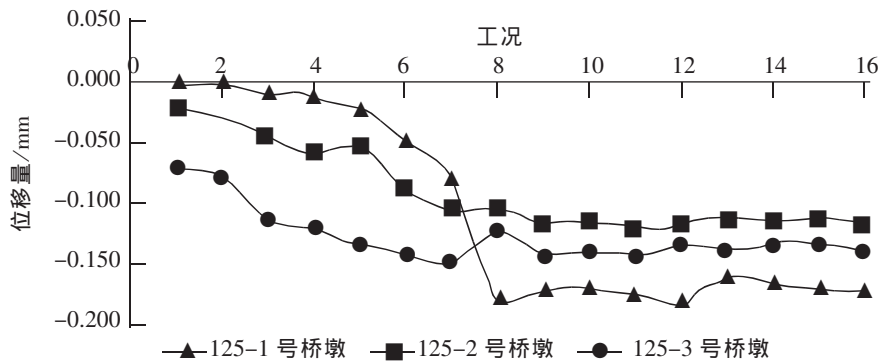


图 13 16 个施工工况下 125 号墩的垂向位移

Fig.13 Vertical displacement of No.125 pier in 16 construction conditions

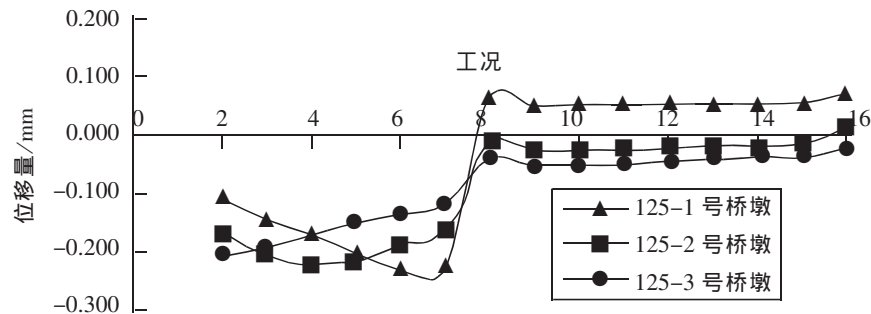


图 14 16 个施工工况下 125 号墩的横桥向位移

Fig.14 Transverse displacement of No.125 pier in 16 construction conditions

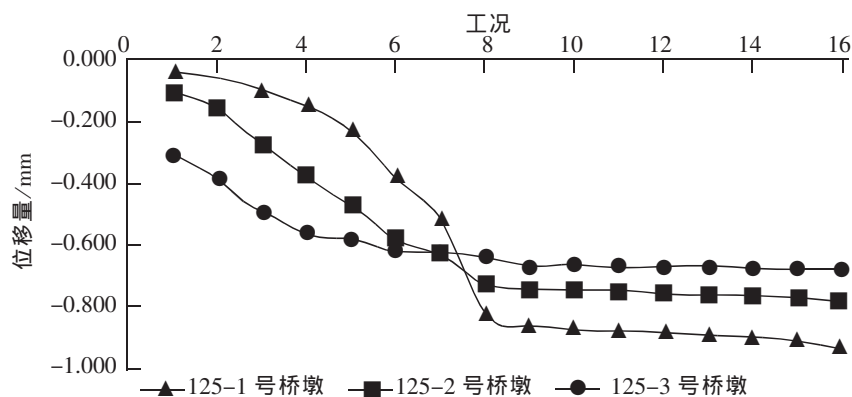


图 15 16 个施工工况下 125 号墩的顺桥向位移

Fig.15 Bridge-to displacement of No.125 pier in 16 construction conditions

同时计算了地层损失率为 5%、8%、10% 时桥梁桥墩墩顶的沉降量。获得 3 种地层损失率情况下隧道下穿对杭深线、北环线鄞县特大桥墩顶位移影响,如表 3 所示。

表 3 不同地层损失率时桥墩墩顶的垂向位移

Tab.3 Vertical displacement of pier top in different formation loss rate

mm

墩号	地层损失率/%			墩号	地层损失率/%			墩号	地层损失率/%		
	5	8	10		5	8	10		5	8	10
125-1 号墩	0.164	0.246	0.452	126-1 号墩	0.421	0.573	0.902	127-1 号墩	0.13	0.201	0.37
125-2 号墩	0.113	0.165	0.302	126-2 号墩	0.299	0.412	0.659	127-2 号墩	0.14	0.2	0.359
125-3 号墩	0.127	0.257	0.393	126-3 号墩	0.407	0.576	0.959	127-3 号墩	0.24	0.359	0.614

5 结论

通过对宁波市轨道交通 4 号线金达路站—钱湖大道站区间下穿杭深线、北环线鄞县特大桥工程设计方案进行可行性分析,同时结合 Plaxis3D 有限元软件进行数值模拟,对 16 个施工工况进行分阶段论证;同时绘制了不同施工阶段高铁桥梁桥墩墩顶变形图,形象地表征了地铁盾构隧道施工整个过程中各桥墩的变形情况。主要结论与建议如下:

1) 经过本次计算,宁波市轨道交通 4 号线金达路站—钱湖大道站区间下穿对杭深线、北环线鄞县特大桥影响较小,方案可行;

2) 隧道施工完成后,杭深线、北环线鄞县特大桥垂向最大位移为 -0.413 mm,横桥向最大位移为 -0.558 mm,顺桥向最大位移为 -0.936 mm,均小于 1 mm,满足《高速铁路设计规范(试行)》(TB10621-2009)中相关规定;

3) 考虑施工控制的不可预估性,建议采用在盾构施工期间左右线隧道分期施工方案,为确保铁路行车安全,建议先采用加设隔离桩后在桩间穿越的方案;

4) 为保证铁路运营安全,在盾构施工过程中应加强对高铁桥梁桥墩变形情况的监测。

参考文献:

- [1] 梁玉. 北京某大直径盾构下穿既有地铁桥梁影响研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.
- [2] 方勇,杨斌,杨志浩,等. 地铁盾构隧道施工对地层扰动的影响因素分析[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2014(1):36-41.
- [3] 刁伟轶. 轨道交通盾构隧道下穿铁路保护技术分析[J]. 地下工程与隧道,2015(2):17-21.

- [4] 傅雅莉. 盾构隧道下穿市政桥梁的施工影响数值分析[J]. 城市轨道交通研究, 2014(7): 76-81.
- [5] 邹鹏. 城市地铁盾构法施工对上部桥梁的影响研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [6] 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.
- [7] 中华人民共和国铁道部. TB10621—2009/J 971—2009. 高速铁路设计规范(试行)[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
- [8] 张银屏, 雷震宇, 周顺华. 浅埋暗挖隧道对地表变形影响的三维数值分析[J]. 华东交通大学学报, 2005(5): 58-61.
- [9] 梁玉. 北京某大直径盾构下穿既有地铁桥梁影响研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [10] 张健. 地铁盾构区间下穿城际铁路桥梁结构及轨道变形分析和控制措施研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [11] 王海波, 徐明, 宋二祥. 基于硬化土模型的小应变本构模型研究[J]. 岩土力学, 2011(1): 39-43.
- [12] 杨赞. 小应变土体硬化模型参数对基坑数值计算的影响分析[D]. 天津: 天津大学, 2013.

Numerical Analysis for the Construction of Metro Shield Tunnel under Multiple High-speed Railway Bridges

Tang Liming

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Shield tunneling method is widely used in the construction of urban rail transit. It is inevitable that the shield tunnels will pass through the existing bridges; meanwhile, the pier displacement in construction should be taken into consideration to maintain safe operation of the bridge. Taking Ningbo rail transit line 4 Jinda Road Station to Qianhu Road Station interval under cross bridge of the Hangshen line and north link of Yinxian as an example, this paper analyzed the process of shield tunnel construction by using the Plaxis 3D finite element software in numerical simulation and studied the deformation on the top of the bridge piers under different construction conditions, and the deformation and displacement of high-speed railway bridge pier were obtained. The technical analysis and safety assessment of the design scheme were carried out.

Key words: urban metro; shield tunnel; under-crossing construction; existing bridge; numerical analysis

(责任编辑 刘棉玲)