

城市轨道交通隧道矿山法暗挖侧穿 高架桥的施工影响

乔洪磊¹ 梁祖铨¹ 耿建仪² 杨新安¹

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海;

2. 上海国际机场股份有限公司, 201207, 上海//第一作者, 博士研究生)

摘 要 目的: 合肥市轨道交通线路暗挖工程存在多次侧穿高架桥的情况, 需研究隧道结构近接侧穿高架桥的施工影响, 选用合理的施工方案, 以有效提高施工的安全性。方法: 以合肥市轨道交通 2 号线天柱路站附属 1 号出入口 CRD (交叉中隔墙) 法暗挖隧道工程为研究对象, 采用 MIDAS GTS/NX 数值模拟软件建立了不同施工工况下的数值模型, 对长江西路高架桥的桥梁承台及立柱变形、桥梁桩基变形、高架桥附近地面沉降进行了分析, 并将数值模拟结果与现场的实测结果进行对比。结果及结论: 监测点地面沉降实测变化曲线与模拟曲线基本一致, 验证了模拟计算的准确性。对于侧穿既有高架桥梁的浅埋暗挖隧道施工而言, 先开挖远离高架侧施工部的工况优于先开挖靠近高架侧施工部的工况, 且 CRD 法中 6 m 台阶长度工况优于 3 m 台阶长度工况。隧道上方地面沉降在 CRD 工法前 3 部开挖及拆撑时产生的变化较大, 而后趋于稳定; 承台边缘地面沉降因桥梁桩体对地层的摩阻力限制有所减小。浅埋暗挖隧道侧穿施工对桥梁承台和桩基水平变形的影响大于其竖向变形的影响, 对靠近浅埋暗挖隧道侧承台和桩基的影响大于远浅埋暗挖隧道侧承台和桩基的影响。

关键词 城市轨道交通; 隧道施工; 浅埋暗挖; 侧穿高架桥; 数值模拟; 力学变形

中图分类号 U455.4

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2023.11.023

Construction Impact of the Side-crossing Viaduct on Urban Rail Tunnel Excavated by Mining Method

QIAO Honglei, LIANG Zuquan, GENG Jianyi, YANG Xinan

Abstract Objective: There are multiple instances of side-crossing viaducts in the underground excavation project of Hefei Rail Transit lines. It is necessary to study the construction impact of the tunnel structure in close proximity to the side-crossing viaduct and select a reasonable construction scheme to effectively improve construction safety. Method:

The CRD (cross road deck) excavation project at the affiliated entrance/exit No. 1 of Tianzhu Road Station on Hefei Rail Transit Line 2 is studied. Using MIDAS GTS/NX numerical simulation software, environmental impact analysis numerical models under different construction conditions are established. The deformation of bridge caps, columns, and the bridge pile foundation, and the surface settlement of the ground near the viaduct are analyzed. The numerical simulation results are compared and analyzed with the monitored results on-site. **Result & Conclusion:** The measured ground settlement curves at the monitoring points are consistent with the simulated curves, verifying the accuracy of the calculation. For the construction of shallow buried tunnel side-crossing the existing viaducts, the working condition of excavating the far elevated side construction section first is better than that of excavating the near elevated side construction section first, and the working condition of 6m bench length in CRD method is better than that of 3 m bench length. The ground settlement above the tunnel changes greatly during the first three parts of CRD excavation and support removal, and then tends to be stable; The surface settlement at the edge of the pile cap will be reduced due to the friction resistance of the bridge pile to the stratum. The impact of shallow buried tunnel side-crossing construction on the horizontal deformation of bridge bearing platform and pile foundation is greater than on the vertical deformation, and the impact on the bearing platform and pile foundation near the shallow buried tunnel side is greater than on those near the far shallow buried tunnel side.

Key words urban rail transit; tunnel construction; shallow buried and deep excavation; side-crossing viaduct; numerical simulation; mechanical deformation

First-author's address Key Laboratory of Road and Transportation Engineering, Tongji University, Ministry of Education, 201804, Shanghai, China

随着城市交通多样化、网络化及立体化发展,城市轨道交通隧道结构近接侧穿高架桥的施工日渐增多。国内外学者针对隧道近接高架桥施工的力学行为特性展开了一系列的研究:在理论解析方面,文献[1]分两个阶段研究了隧道施工对桩基的影响,并采用半弹性体解析方法求解了桩基的内力及变形;文献[2]通过隧道-土体-桩基的相互作用关系,提出了隧道施工造成桩基承载力损失进而产生桩基沉降的理论。在模型试验方面,文献[3]通过离心机试验,针对不同的隧道与桩间距情况,研究了隧道开挖对桩基的瞬时和长期影响。在数值模拟方面,文献[4]采用三维有限元方法,分析得到了既有桩基所产生沉降和倾斜规律;文献[5]通过 FLAC3D 软件,在考虑流固耦合作用下分析了隧道开挖对邻近桩基础性能的影响;在现场监测方面,文献[6]以北京昌平线二期地铁盾构侧穿桥梁为例,采集了桥桩和地面沉降变化数据,结合盾构推进土压和注浆量,分析了桥桩及桥梁周边地面的沉降变形情况;文献[7]结合成都地铁 5 号线盾构侧穿二环路高架桥现场监测数据,分析得到了盾构侧穿高架桩基时双洞间桩基础位置为施工高风险区域,局部的施工保护措施可有效阻隔隧道-围岩-桩基-地面的变形传递的结论。

合肥市城市轨道交通线路暗挖工程也有多次侧穿高架桥的情况,需研究隧道结构近接侧穿高架桥的施工影响,选用合理的施工方案,以有效提高施工的安全性。本文针对合肥市轨道交通 2 号线天柱路站附属 1 号出入口暗挖隧道(以下简称“暗挖隧道”)侧穿长江西路高架桥的施工工况,采用 MIDAS GTS/NX 数值分析软件,结合现场实测数据,研究该暗挖隧道施工侧穿对桥梁变形及地面沉降的影响规律,并提出对应的保护措施。

1 工程概况

1.1 工程地质条件

根据《合肥市轨道交通 2 号线工程天柱路站岩土工程勘察报告》,该暗挖隧道所处地质条件如下:

- 1) 埋深 0~4.30 m 处含杂色〈1-1〉人工填筑土;
- 2) 埋深 3.00~10.20 m 处含灰黄色〈3-1〉黏土;
- 3) 埋深 7.90~12.50 m 处含褐黄色〈3-2〉黏土;
- 4) 埋深 10.60~12.80 m 处含灰褐色〈4-2〉残积粉质黏土;

- 5) 埋深 11.80~15.80 m 处含砖红色〈8-1〉全风化泥质砂岩;

- 6) 埋深 12.80~19.00 m 处含砖红色〈8-3〉中风化泥质砂岩;

- 7) 埋深 11.50~13.80 m 处含砖红色〈10-1〉全风化泥质砂岩;

- 8) 埋深 13.70~20.10 m 处含砖红色〈10-3〉中风化泥质砂岩。

1.2 与邻近的建/构筑物关系

暗挖隧道与长江西路高架桥的位置关系如图 1 所示。长江西路高架桥底部净空约 6.5 m,桥立柱尺寸 2.0 m(长)×2.0 m(宽)×6.5 m(高),桥承台基础尺寸 6.5 m(长)×6.5 m(宽)×1.2 m(高),桥桩基采用灌注桩,直径为 1.5 m,长度为 25 m,桩间距为 4 m。暗挖隧道侧穿长江西路高架,其外轮廓与桩基间的最小净距约为 3.895 m。

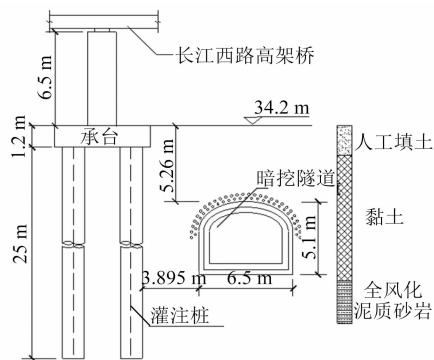


图 1 暗挖隧道与长江西路高架桥的位置关系

Fig. 1 Location relationship between underground tunnel and viaduct of Changjiang West Road

2 数值模拟过程

2.1 数值模型建立

采用 MIDAS GTS/NX 数值分析软件建立了如图 2 所示的数值模型,模型尺寸为 65 m(x 向)×40 m(z 向)×50 m(y 向)。模型上边界取为自由面,左右边界约束 x 向位移,下边界约束 z 向位移,前后界面约束 y 向位移。

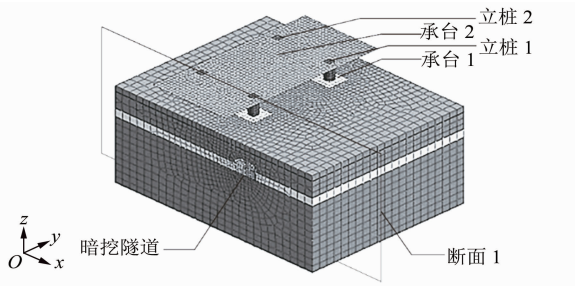


图 2 数值分析模型

Fig. 2 Numerical analysis model

2.2 参数取值

暗挖隧道所处地层及隧道支护结构的基本力学参数如表 1 所示。开挖过程中采用超前支护+初期支护+二次衬砌的组合支护形式,其中超前支护采用超前管棚+小导管的支护方式。

表 1 暗挖隧道所处地层及隧道支护结构的基本力学参数
Tab.1 Basic mechanical parameters of the strata and tunnel support structure located by the underground excavation tunnel is located

土层/支护结构	重度/ (kN/m³)	弹性模 量/MPa	泊松 比	内摩擦 角/(°)	黏聚力/ MPa
〈1-1〉人工填土	18.50	9.000	0.39	12	16
〈3-2〉黏土	19.60	24.000	0.30	15	45
〈10-1〉全风化泥质砂岩	19.80	75.000	0.29	12	32
〈10-3〉中风化泥质砂岩	22.90	90.000	0.21	30	140
小导管	33.60	60.760	0.26		
大管棚	30.80	42.340	0.26		
注浆加固区	22.00	0.036	0.30	18	84
初期支护	25.00	22.000	0.20		
中隔壁	25.00	22.000	0.20		

2.3 方案工况设计

暗挖隧道采用 CRD(交叉中隔壁)法施工。由于隧道侧穿施工势必会对既有高架桥梁带来非对称影响,隧道不同的开挖顺序及台阶长度均会造成不同的空间效应,因此,本文将暗挖隧道分为①、②、③、④ 4 个分部,如图 3 所示。

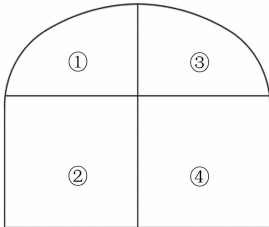


图 3 暗挖隧道采用 CRD 法施工的 4 个分部
Fig.3 Four parts of the CRD method construction for underground tunnels

本文选取左右导洞掌子面前后间隔 15 m 的 4 种工况进行分析,其中:工况 1 按照①→②→③→④的顺序开挖,上下相邻导洞的开挖施工间隔为 3 m;工况 2 按照①→②→③→④的顺序开挖,上下相邻导洞的开挖施工间隔为 6 m;工况 3 按照③→④→①→②的顺序开挖,上下相邻导洞的开挖施工间隔为 3 m;工况 4 按照③→④→①→②的顺序开挖,上下相邻导洞的开挖施工间隔为 6 m。

3 计算结果与分析

在模拟过程中对地面沉降,以及桥梁承台基础、桥梁立柱和桥梁桩基础的变形进行监控量测,对比最终结果,并对实际工程施工方法进行比选。

3.1 地面沉降对比分析

在断面 1(见图 2)设置地面监测点,得到 4 种工况下地面沉降曲线如图 4 所示。图 4 中:横轴坐标等于 0 处为隧道中线断面,取远离承台方向为正向。由图 4 可知,4 种工况下地面沉降值呈现工况 1>工况 3>工况 2>工况 4 的规律;对比高架桥承台边缘处的地面沉降与无承台区域的地面沉降,可明显发现高架桥承台边缘处的地面沉降量小于无承台区域的地面沉降量,其原因推测为桥梁桩体对地层的摩阻力使得地面沉降受到一定的抑制;隧道中线向高架侧的地面沉降值呈现工况 1>工况 3>工况 2>工况 4 的规律;工况 4 为最优工况。

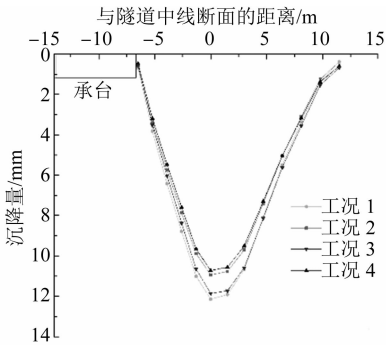


图 4 不同工况下断面 1 的地面沉降曲线
Fig. 4 Ground settlement of section 1 under different working conditions

3.2 桥梁承台、立柱变形对比分析

由于暗挖隧道的侧穿开挖,桥梁承台及桥墩产生了一定的水平变形及竖向变形,且呈现靠近隧道侧承台、立柱的变形大于远离隧道侧变形承台、立柱的变形规律。为方便后续分析,把隧道近侧的承台及立柱编号为承台 1 及立柱 1,隧道远侧的承台及立柱编号为承台 2 及立柱 2(见图 2)。不同工况下桥梁各承台、立柱的沉降差对比如表 2 所示,倾斜度对比如表 3 所示。

根据相关规范,沉降差的一级安全标准为 5 mm,倾斜度的控制标准为 1‰。由表 2 及表 3 可知:4 种工况均符合标准要求;各承台、桥柱的沉降差及倾斜度均呈现工况 1>工况 2>工况 3>工况 4 的规律;工况 4 为最优工况。

表 2 不同工况下各承台、立柱的沉降差对比

Tab. 2 Comparison of settlement differences of various bearing platforms and columns under different working conditions

工况	沉降差/mm			
	承台 1	立柱 1	承台 2	立柱 2
工况 1	1.164	0.242	0.273	0.429
工况 2	1.124	0.232	0.259	0.412
工况 3	1.099	0.203	0.220	0.360
工况 4	1.072	0.196	0.207	0.347

注:沉降差为承台或立柱 4 个角点间最大沉降差值的绝对值。

表 3 不同工况下各承台、立柱的倾斜度对比

Tab. 3 Comparison of inclination of each bearing platform and column under different working conditions

工况	倾斜度/‰			
	承台 1	立柱 1	承台 2	立柱 2
工况 1	0.179	0.121	0.042	0.214
工况 2	0.173	0.116	0.039	0.206
工况 3	0.169	0.101	0.034	0.179
工况 4	0.165	0.098	0.032	0.173

注:倾斜度为承台或立柱与竖向(z 向)之间的夹角。

3.3 桥梁桩基变形对比分析

受暗挖隧道侧穿的影响,桥梁桩基将产生一定的弯曲变形,且呈现越靠近隧道侧桩基的变形越剧烈的规律。为进一步探究隧道侧穿对高架桥梁桩基的变形影响,选取图 2 中承台 1 下方靠近隧道侧的桩基进行变形分析,得到不同工况下该桩基的水平变形曲线如图 5 所示。图 5 中:水平变形等于 0 处为所选桩基的断面,取趋向隧道侧的变形为正向。

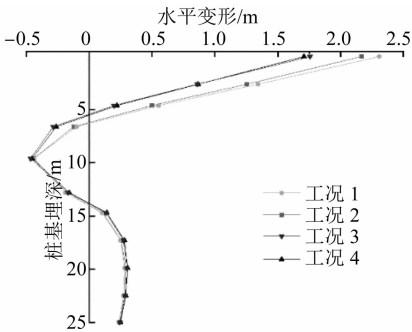


图 5 不同工况下所选桩基的水平变形曲线

Fig. 5 Horizontal deformation curves of selected pile foundations under different working conditions

由图 5 可知:随着桩基埋深的增加,桩基的水平变形呈现从水平正向到水平负向再到水平正向的变形趋势;桩体最大水平变形位于桩顶位置;4 种工况下的桩顶水平变形呈现出工况 1>工况 2>工况 3>工况 4 的规律。

不同工况下所选桩基的竖向变形如图 6 所示,取竖直向上变形为正向。由图 6 可知:随着桩基埋深的增加,桩基的竖向变形呈现从竖直向下变形到竖直向上变形的趋势,其原因可能是由于暗挖隧道开挖导致隧道拱底附近地层卸荷,进而导致土体回弹;桩体最大竖直向下变形位于桩顶位置;4 种工况下的桩顶变形呈现出工况 1>工况 2>工况 3>工况 4 的规律。

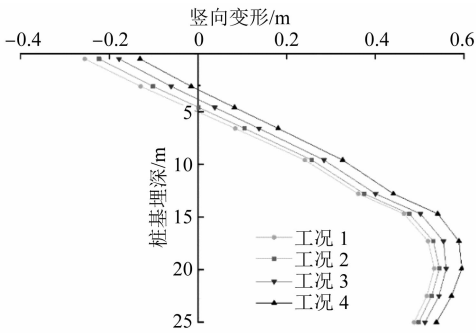


图 6 不同工况下所选取桩基的竖向变形曲线

Fig. 6 Vertical deformation curves of selected pile foundations under different working conditions

因此,针对桥梁桩基的变形分析中,工况 4 为最优工况。

4 现场监测结果分析

该暗挖隧道侧穿既有高架桥梁工程实际施工时,选用工况 4,即先开挖远离高架侧的分部,6 m 台阶长度且左右导洞掌子面前后间隔 15 m 的 CRD 工法施工,并将现场监测结果与数值模拟结果进行对比分析。

4.1 地面沉降实测值与模拟值的对比

监测断面上各监测点布置以隧道中心轴线为中心,向两侧以 5 m/个的间隔布置监测点,同时考虑高架承台边缘等特殊点灵活布点。隧道施工行进方向每隔 20 m 布置 1 个监测断面,且在隧道侧穿高架区段在中线位置加密了 1 组监测断面,加密后施工行进方向监测断面的间隔变为 10 m。选取图 2 中的断面 1,将地面沉降模拟值与现场实测值进行对比,其结果如图 7 所示。由图 7 可知:地面实测沉降变化曲线与模拟沉降变化曲线基本一致,两者的差值均小于 0.5 mm,由此验证了本次模拟计算的准确性;沉降量均小于现行规范要求(小于 30 mm),可保证施工安全。

4.2 桥梁桩基沉降实测值与模拟值的对比

长江西路高架桥承台下设置 4 根桩,沉降监测

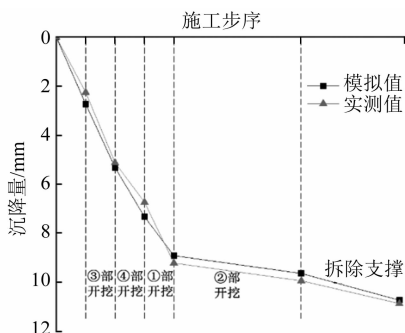


图 7 侧穿高架区段断面处地面沉降的模拟值与实测值对比
Fig. 7 Comparison between simulated and measured values of ground settlement at the cross-section of the side crossing elevated section

点布置在承台下侧中心位置。布置监测点时,采用水准仪对测点标高进行测量,确定标高后修整出 1 块尺寸为 400 mm(长)×400 mm(宽)的平面,并在监测点上安装物位计。选取 3.3 节变形最显著的承台 1 下方靠近隧道侧的桩基进行桩顶沉降监测,其实测值与模拟值的对比结果如图 8 所示。

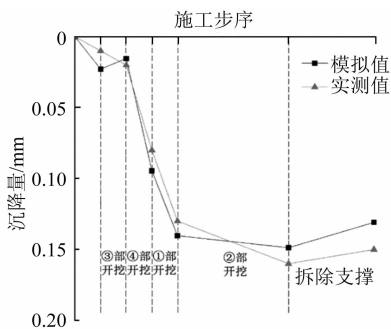


图 8 承台 1 下方靠近隧道侧桩顶沉降的模拟值与实测值对比
Fig. 8 Comparison between simulated and measured values of ground settlement at the lower part of bearing platform 1 near the top of tunnel side pile

由图 8 可知:桩基实测沉降变化曲线与模拟沉降变化曲线基本一致,二者差值均小于 0.1 mm;最终沉降现场的实测值略大于数值模拟值,但二者均小于沉降控制标准(10 mm),这证明暗挖隧道的侧穿并未影响高架桥的安全运作。

5 结语

1) 对于侧穿既有高架桥梁浅埋暗挖隧道施工,先开挖远离高架侧施工部的工况优于先开挖靠近高架侧施工部的工况,且 CRD 工法中 6 m 台阶长度工况优于 3 m 台阶长度工况。

2) 隧道上方地面沉降在 CRD 工法前 3 部开挖及拆除支撑时产生的变化较大,而后趋于稳定;承

台边缘处由于桥梁桩体受地层摩阻力的限制,其沉降较隧道上方地面沉降有所减小。

3) 浅埋暗挖隧道侧穿施工对桥梁承台和桩基水平变形的影响大于其竖向变形的影响,对靠近浅埋暗挖隧道侧承台和桩基的影响大于对远浅埋暗挖隧道侧承台和桩基的影响。

综上所述,对该暗挖隧道可针对性地采取以下保护措施:采用注浆、冰冻帷幕及隔断桩等方法阻断隧道开挖对邻近建筑物的影响;加强桩基、地基等结构物的强度,提高其抵抗地层变形的能力;对结构物进行顶托补偿和注浆补偿,以达到控制沉降的目的。

参考文献

- [1] CHEN L T, POULOS H G, LOGANATHAN N. Pile responses caused by tunneling[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(3): 207.
- [2] 苏洁. 浅埋暗挖法隧道施工对临近桩基的影响及其控制[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [3] 孙庆, 杨敏, 冉侠, 等. 隧道开挖对周围土体及桩基影响的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(7): 989.
- [4] 方勇, 何川. 地铁盾构隧道施工对近接桩基的影响研究[J]. 现代隧道技术, 2008, 45(1): 42.
- [5] 苏宝健. 隧道开挖对临近既有桩基影响的流固耦合数值分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [6] 李旺旺, 韦宏鹄. 北京昌平线二期地铁盾构侧穿桥梁沉降监测分析[J]. 隧道建设, 2015, 35(2): 139.
- [7] 王建伟. 砂卵石地层盾构侧穿高架桥桩基的施工控制技术[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(3): 124.
- WANG Jianwei. Construction control technology of shield side crossing viaduct pile foundation in sandy cobble stratum[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(3): 124.

(收稿日期:2021-05-13)