

某新建桩基近接施工对毗邻地铁区间隧道的影响

金生吉,慕安鑫,毕博,徐超,于贺

(沈阳工业大学 建筑与土木工程学院,辽宁 沈阳 110870)

摘要:桥梁桩基及承台施工不仅对其地基和周围土体造成扰动,而且对毗邻已有结构同样会造成一定的影响。为研究新建桩基近接施工对毗邻地铁区间隧道的影响,该文以位于沈阳市长青大桥两侧扩建辅桥桩基施工过程为研究对象,采用Midas/GTS有限元数值模拟与施工监测结合的方法,开展新建桩基近接施工对邻近地铁区间隧道的影响研究。研究表明:① 在施工过程中,地铁区间隧道的竖向沉降和水平收敛总体表现为下沉和向内收敛趋势,相比之下所造成的沉降更明显;② 地铁区间隧道的变形特点与多种因素相关,但受相邻结构净距大小影响最显著,距施工区域越近,变形值越大;③ 在骑跨式布桩和单侧布桩施工方案选择上,根据所引起的隧道最大拱顶沉降值对比,骑跨式承台对隧道拱顶位移影响更小,近接地铁区间隧道施工的安全性比较容易得到保障。研究表明在已有建(构)筑物近接范围内进行新建结构施工必须保证足够的安全距离和采取有效的安全施工措施以降低影响。

关键词:地铁区间隧道;新建桩基;近接施工;施工监测;数值模拟;布桩方案;骑跨式承台;拱顶沉降

中图分类号:U455;TU473

文献标志码:A

0 引言

随着21世纪经济的快速发展,交通拥堵问题使得中国城市交通建设不断趋向于地下空间^[1-2]。因城市地下分布着众多具有敏感性的各类建(构)筑物(如隧道、地铁、各种管线等),使地下工程在建设过程中面临着新建工程施工对既有结构产生不利的影响,由此在很大程度上增加了施工难度和施工成本^[3-4]。如果处理不当,不但会增加施工过程的风险,也可能导致工程事故的发生^[5]。因而,新建工程与原有建筑的近接施工是当前地下工程领域研究的一个热点问题^[6-8]。本文以沈阳长青大桥的扩建工程为研究对象,运用有限元分析与施工监测结合的方法开展新建辅桥桩基施工对毗邻地铁变形影响研究,以期为类似近接工程施工方法提供有益的参考和借鉴。

1 工程概况及水文地质条件

沈阳长青大桥始建于1995年6月,于1997年7

月通车。主桥为三孔中承式钢管混凝土拱桥,桥长629.35 m,宽32.50 m,设有四车道及两侧人行道。2017年,对拥有20年桥龄的长青大桥加宽改造,在老桥毗邻两侧各新建一座辅桥,辅桥每幅桥宽为14.5 m。加宽改造后,桥宽增至十车道。新建辅桥和旧桥梁位置关系如图1所示。

长青大桥改造施工前,沈阳市地铁10号线已开始施工,该线北起丁香湖公园,南至苏家屯副城,全长49.92 km,均为地下线路。隧道为单洞单线圆形断面,两线间距12~17 m,采用盾构法施工,覆土厚度16~25 m。辅桥新建桩基采用长螺旋钻加长护筒施工,桩基顶部承台采用明挖扩大基础施工。

经地质钻探勘察,勘察深度范围内的地层结构由第四系全新统人工填筑层(Q_4^{ml})、第四系全新统浑河高漫滩及古河道冲积层(Q_4^{2l})、第四系全新统浑河新扇冲洪积层(Q_4^{1al+pl})、第四系上更新统浑河老扇冲洪积层(Q_3^{2al+pl})、第四系中更新统冰水沉积层(Q_2^{fgl})组成,基岩为前震旦系混合花岗岩(AnZ)。地下水位年变化幅值为1~2 m,主要补给来源为大气降水和河流地下渗入。

新建辅桥下部结构共分两期施工,西侧右幅

收稿日期:2022-09-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:10872134);辽宁省交通运输厅科技项目(编号:202006,202007,202009);沈阳市科技计划项目(编号:20-206-4-11)

作者简介:金生吉,男,博士,教授,博士生导师.E-mail:shengjijin@sina.com

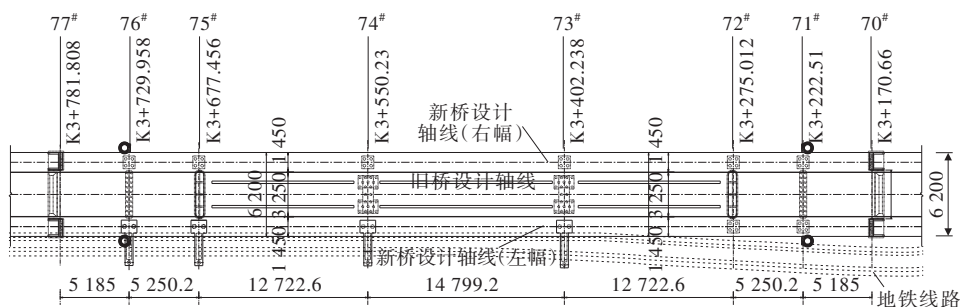


图 1 长青大桥新建辅桥和旧桥梁位置关系(单位:mm)

70#~77#墩台基础为一期先开工,东侧左幅70#~77#墩台基础为二期施工。其中距离地铁10号线水平投影距离仅有6.61 m的是72#桥墩。从73#桥墩到77#桥墩基础均采用上跨地铁10号线骑跨式低桩承台基础,其中75#桩基础最小净距仅为3 m。72#、75#桥墩处桩基与地铁区间隧道位置关系分别如图1所示。其中,72#桥墩基础承台平面尺寸为9.0 m×9.4 m,承台下设置4根钻孔灌注桩,直径均为2 m。75#桥墩的内侧2根桩基均采用直径2.8 m的钻孔灌注桩从地铁上方横跨,外侧设置1根直径2.5 m的钻孔灌注桩,两侧桩顶都设置了6.0 m×4.0 m空心钢筋混凝土梁相连的承台(图2)。本文以72#、75#桥墩桩基为研究对象,开展近接桥桩基施工对毗邻既有地铁影响研究。

2 隧道变形机理分析

桥梁桩基近接施工可能引起毗邻地铁区间隧道整体偏移,造成结构整体弯曲或局部形变^[9]。根据桩

基施工对既有地铁线路纵向弯曲变形的影响分析,结合地铁围护结构的受力变形特点,将地铁围护结构作为一个整体视为温克尔地基梁,满足伯努利梁假定条件,得到隧道纵向挠曲方程为^[10-11]:

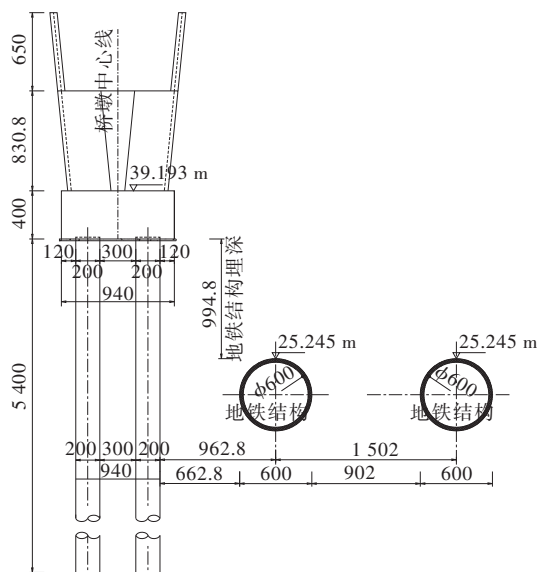
$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} = -Kw + q \quad (1)$$

式中: EI 为地铁管片刚度系数; K 为地基基床系数, $K=kd$ (k 为系数, d 为地铁管片横截面宽度); q 为地铁表面上覆荷载; w 为管壁纵向沉降位移。

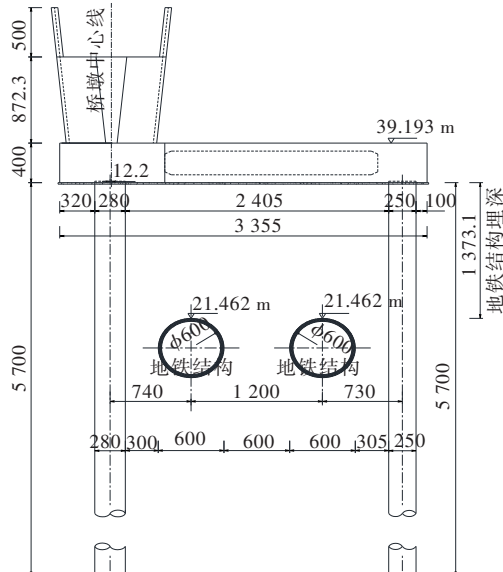
地铁管壁的纵向剪力呈现出的非均匀性,不仅会造成管壁结构在纵向与地基协调变形,亦能使横截面出现剪切变形与横向弯曲。经过有限差分法可以推导出纵向结构弯矩与剪力的公式:

$$M_i = -EI \left(\frac{d^2 w_i}{dx^2} \right) = -EI \frac{w_{i+1} - 2w_i + w_{i-1}}{L^2} \quad (2)$$

$$Q_i = EI \left(\frac{d^3 w_i}{dx^3} \right) = -EI \frac{w_{i+2} - 2w_{i+1} + 2w_{i-1} + w_{i-2}}{2L^3} \quad (3)$$



(a) 72#桥墩桩基横断面图



(b) 75#桥墩桩基横断面图

图 2 桥墩桩基横断面图(单位:cm)

式中: M_i 为地铁管壁纵向结构弯矩; Q_i 为纵向结构剪力; w_i 为纵向结构位移。

将沿地铁线路轴线方向距离 x 处垂直轴线方向的位移设为 $W(x)$,隧道自身位移设为 $S(x)$,当满足变形协调条件存在 $S(x)=W(x)$,设上部附加荷载为 $q(x)$,可得到纵向变形微分方程:

$$(EI)_{eq} \frac{d^4 S(x)}{dx^4} + S(x) = q(x) \quad (4)$$

新建桥梁桩基及承台施工过程引起围岩内力释放,导致既有地铁维护结构径向(环向)内力发生变化。地铁围护结构横截面为均质圆环的超静定结构,可以利用力法求解得到在衬砌中与数轴成 ϕ 角的任意横截面内弯矩 M 与轴力 N :

$$M = M_p + X_1 - X_2 R_h \cos \phi \quad (5)$$

$$N = N_p + X_2 \cos \phi \quad (6)$$

式中: N_p 、 M_p 为外荷载作用产生的内力; X_1 、 X_2 为被移到衬砌环中心的赘余力; R_h 为衬砌圆环计算半径。

3 施工影响的数值模拟

采用Midas/GTS有限元软件建立三维模型,进行新建桩基近接施工对既有地铁影响模拟分析。结合工程实际情况,采用线弹性模型(Linear-elastic)和德鲁克普拉格(Drucker-Prager)两种本构关系的材料单元。桥梁桩基与隧道衬砌结构均采用线弹性模型,土体采用D-P模型,新桥桩基与土体单元选用八节点六面体的三维实体单元,盾构管片选用板单元。设置弹簧单元为弹性边界单元。模型选用地面支承边界,对 x 方向左右自由度、 y 方向前后自由度以及 z 方向底面自由度同步进行约束,不约束地面自由度。

3.1 施工阶段数值模拟假定

结合工程实际情况,进行数值模拟过程中做如下假设^[12]:

(1) 土体为均匀分布、各向同性的弹塑性体,在准备施工阶段土体已完成固结沉降,采用D-P模型。

(2) 进行施工阶段分析,自动考虑水压力,根据水位情况计算水压力。

(3) 在桩基施工过程中,不考虑机械、场地及人为因素的影响。浇筑混凝土过程不发生渗漏,忽略桩底沉渣、泥皮对桩土传力的影响。

(4) 采用等效计算的方法构建钢筋混凝土模型,

将钢筋材料的弹性模量折算到相邻的混凝土材料。

(5) 不同施工阶段,包括钢护筒贯入、钻孔开挖、桩基浇筑等均为连续的瞬时过程,不考虑时效对桩基周围土体和下部结构的影响。

3.2 模型基本参数设定

计算模型尺寸为:133 m×100 m×116 m(长×深×宽)。根据岩土工程的勘察报告对场地土体层数进行简化,场地土体共划分为5层。各层土体力学参数见表1,结构材料属性见表2。

表1 各层土体力学参数

层号 土层	重度/ (kN· m ⁻³)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	弹性模 量/MPa	静止侧 压力 系数	泊松 比
①压实填土	22.00	10	16	6.3	0.35	0.3
②-4砾砂	19.00	5	30	16.8	0.35	0.3
③-5圆砂	18.96	4	35	42.0	0.35	0.3
④-4砾砂	19.28	6	38	58.8	0.35	0.3
④-5泥砂	18.80	10	35	54.6	0.35	0.3

表2 结构材料属性

构件	压缩模 量/GPa	重度/ (kN·m ⁻³)	泊松比	截面尺寸
初支喷射混凝土	35	22	0.22	$T(T_1)=0.3$ m
新桥桩基	35	22	0.22	$\phi=2.5$ m, 2.8 m
定位器	30	22	0.22	$\phi=2.84$ m, 3.14 m
钢护筒	108	65	0.20	$h=54$ m, 57 m

注: h 为钢护筒高度; $T(T_1)$ 为厚度; ϕ 为直径。

3.3 计算模型与施工工序

为更全面研究新建桩基近接施工的影响,对72[#]、75[#]桥墩分别按不同钻孔顺序和不同布桩方案,共建立4种数值模型,如图3所示。4种工况数值模型分别为:72[#]桥墩按交叉钻孔顺序模型[图3(a)],72[#]桥墩按单方向钻孔顺序模型[图3(b)],75[#]桥墩按骑跨式施工模型[图3(c)],75[#]桥墩按单侧承台施工模型[图3(d)]。

3.4 钻孔顺序对地铁拱顶沉降影响分析

利用Midas/GTS软件,模拟72[#]桥墩桩基施工对侧下方穿过的隧道产生的影响时,在隧道拱顶布置7个监测点,监测点在沿隧道左线里程方向K3+215~K3+335范围。不同工序中交叉钻孔和顺序钻孔对隧道拱顶竖向位移的影响对比分析结果如图4所示。

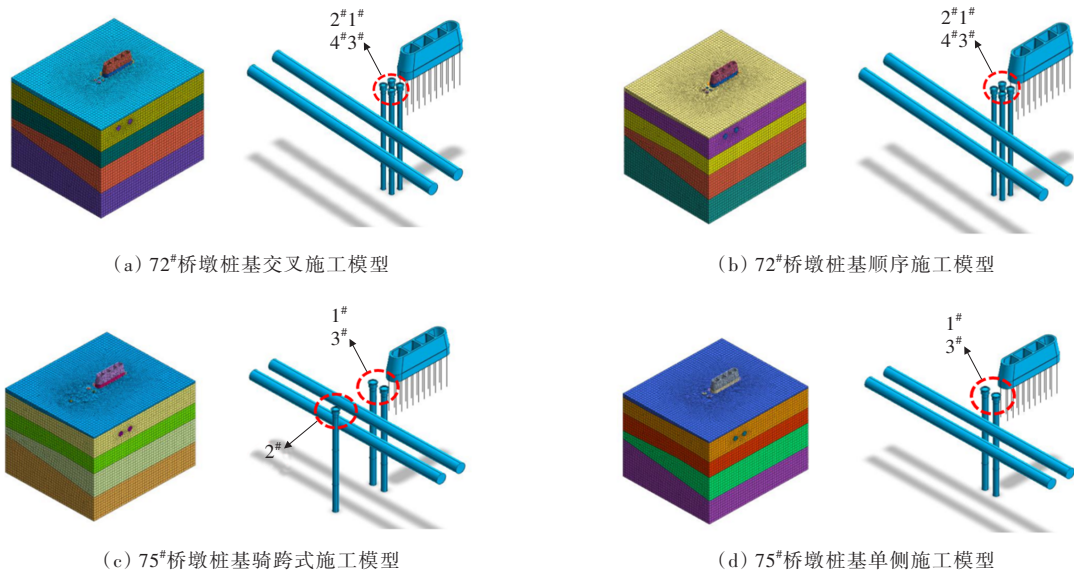


图 3 各工况数值模型

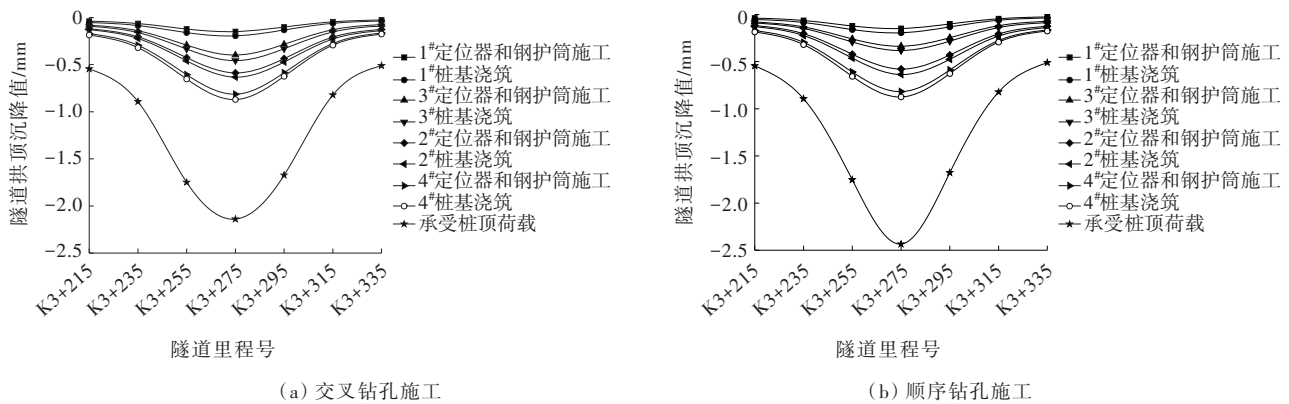


图 4 72#桥墩处隧道拱顶沉降曲线

由图4可以看出:当桩基承受桥梁上部荷载时,沿地铁围护结构纵向各测点竖向位移值明显增大,在各工序施工过程中,距离施工区域隧道里程号越近,拱顶沉降值越大。位移图像呈现“U”形分布,以坐标系里程号K3+275的Y轴呈轴对称分布。此外由两种工况对比分析可以得到,拱顶最大沉降值分别为2.13 mm和2.43 mm,均在监测变形控制标准范围内,经对比两种工况分析结果,表明交叉钻孔顺序对隧道拱顶沉降影响更小,对地铁结构更安全。

3.5 钻孔次序对拱腰水平收敛的影响

对比分析在不同工序中两种钻孔顺序对隧道衬砌水平收敛的影响,结果如图5所示。

由图5可知:在桩基施工过程中,各测点隧道水平收敛值变化速率表现为先大幅增大后小幅减小,再先小幅增大后大幅减小。位移图像呈现“几”形分布,以坐标系里程号K3+275的Y轴近似对称。此

外由两种工况对比分析可以得到,最大水平位移值分别为1.49 mm和1.41 mm,远小于控制标准,钻孔顺序对隧道水平收敛影响非常有限。

3.6 布桩方案对拱顶沉降的影响

在隧道拱顶布置7个监测点,监测点沿隧道左线里程方向K3+617~K3+737范围。在不同工序中两种布桩方案对拱顶沉降的影响情况如图6所示。

由图6可知:当隧道两侧均有桩基施工时,隧道两侧土体卸载引起围岩应力释放,使得隧道发生隆起。在钻孔挖土及混凝土硬化阶段,由于减小围岩应力扩散,拱顶变形部分恢复,隧道出现下沉。由于隧道单侧布置2根单桩承受桥梁上部荷载,与两侧共布置3根情形相比,骑跨式施工引起的土体应力不集中,有效影响范围不大,对隧道拱顶沉降影响较小。在各工序施工过程中,距离施工区域隧道里程号越小,隧道拱顶沉降值越大。位移图像呈现抛物线分

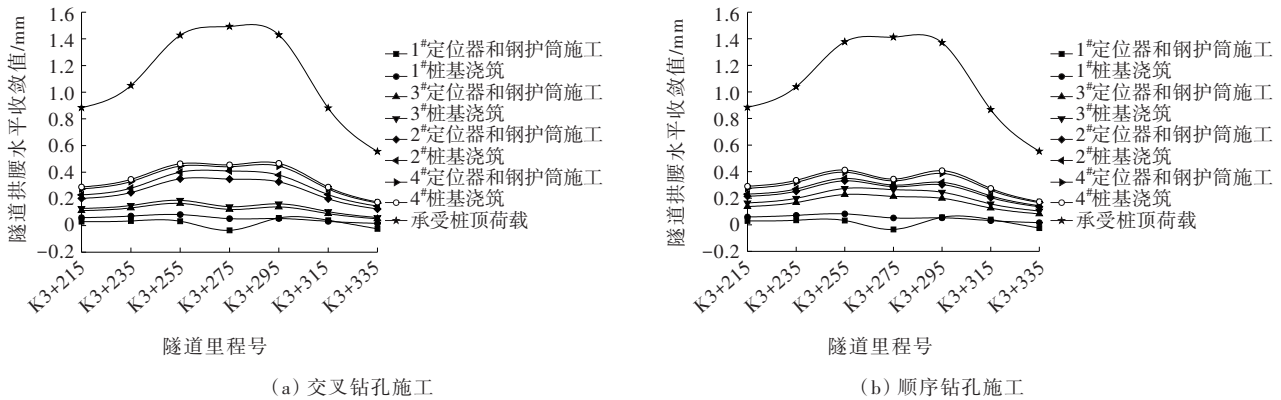


图5 72#桥墩处隧道拱腰水平收敛曲线

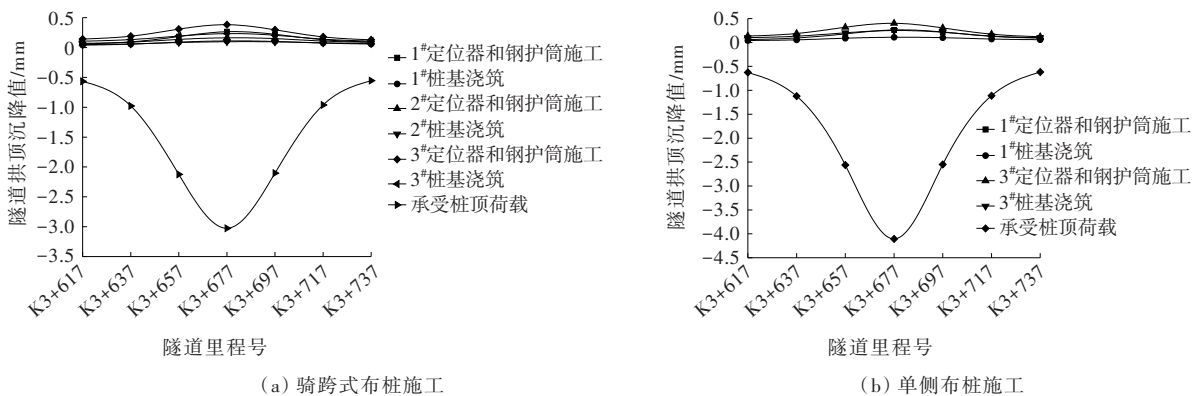


图6 75#桥墩处隧道拱顶沉降曲线

布,以坐标系里程号K3+677的Y轴成轴对称分布。当施加桩顶荷载后,隧道拱顶累计沉降值分别为3.02 mm和4.11 mm,其中单侧施工所引起的隧道拱顶沉降值超过监测变形预警值4 mm。经对比两种工况模拟结果,表明骑跨式布桩施工方案对隧道拱顶沉降影响更小,对隧道结构更安全。

3.7 布桩方案对隧道拱腰水平收敛影响分析

在不同工序中两种布桩方案对隧道衬砌水平收敛的影响情况如图7所示。

图7表明:在钢套筒回转下压的过程中,对邻近

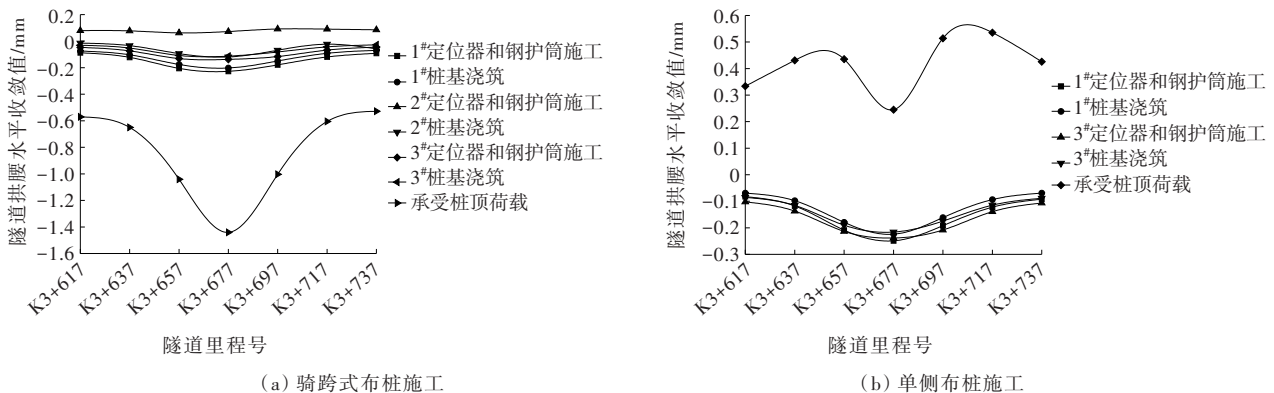


图7 75#桥墩隧道拱腰处水平收敛曲线

地铁隧道两侧桩周土体产生侧向挤压,骑跨式承台下方的隧道向远离钻孔区域变形。由于隧道右线起到应力遮拦作用,当2#定位器与钢套筒施工时对隧道左线水平位移影响较小。当新桥桩基承受桩顶荷载后,沿隧道纵向各测点水平收敛值明显增大。单侧布置2根单桩影响相互叠加,位移图像呈现“M”形分布,以坐标系里程号K3+677的Y轴近似对称分布。与骑跨式布桩相比,桩基单侧施工导致土体应力在隧道拱腰处产生应力集中,当混凝土灌注完成后隧道衬砌侧壁发生轻微回弹,其最终累计水平收敛值

仍大于骑跨式桩基施工。此外两种工况对比结果表明小净距近接施工对隧道影响明显,骑跨式布桩可以有效减小隧道横截面变形,使地铁区间隧道结构安全更容易得到保障。

4 地铁区间隧道监测

4.1 施工对地铁区间隧道变形影响监测

采用全站仪和极坐标观测法对地铁区间隧道结构水平收敛和隧道净空收敛进行监测。采用电子水准仪和二等附合水准路线观测方法进行结构沉降监

测,以水准控制点为观测基准点,建立控制网,在水准控制网上联测各监测点,计算各监测点标高,从而获得沉降量。

4.2 监测方法及控制标准

由地铁区间隧道变形控制规范和设计要求,制定施工监测控制标准。结构沉降累计值方面:下沉或上浮 5 mm 或变化速率 1 mm/d;结构水平收敛累计值 5 mm 或变化速率 1 mm/d;地铁区间隧道净空收敛 6 mm 或变化速率 2 mm/d;取控制值的 80% 作为预警值,具体施工监测方案及控制标准见表 3。

表 3 监测方法及控制标准

监测项目	测量仪器	仪器精度	测点埋置	监测频率/次				预警值/mm
				1~7 d	8~15 d	16~30 d	>30 d	
地铁区间隧道结构竖向横向位移	静力水准仪	<5/100(F.s)	断面/12 m	1~2	1~2	1~2	1~3	4.0
地铁区间隧道结构净空收敛	全站仪	1 mm+1 ppm	断面/12 m	1~2	1~2	1~2	1~3	4.8

4.3 模拟结果与监测值对比分析

对 72[#]和 75[#]桥墩的现场监测值与数值模拟结果进行对比分析。

按照交叉钻孔的施工方案进行 72[#]桥墩承台桩基施工。其中工序 1 对应在原土体开挖后,初始位移为 0。工序 2、4、6、8 代表各桩设置钢护筒混凝土定位器,工序 3、5、7、9 代表各桩进行旋挖掏土、下放钢筋笼、灌注混凝土,工序 10 代表桩顶施加静力荷载。72[#]桥墩处桩基施工对邻近隧道沉降和水平收敛的模拟值与监测值的对比情况如图 8 所示。各施工工序监测值与模拟计算值均在 4.0 mm 以内,各项数值相差不大。72[#]桥墩桩基施工隧道累计沉降值为 2.55 mm,水平收敛累计变化值为 3.80 mm。

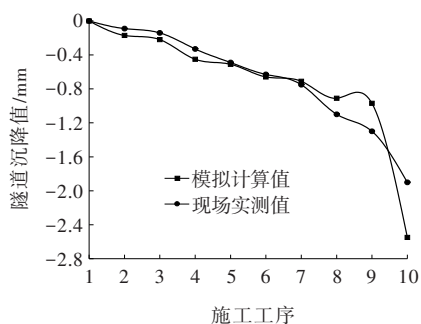
按照隔桩跳桩的施工方案进行 75[#]桥墩桩基施工(骑跨式)。其中工序 1 对应的是在原土体开挖后,初

始位移为 0。工序 2、4、6 代表各桩设置钢护筒混凝土定位器,工序 3、5、7 代表各桩进行旋挖掏土、下放钢筋笼、灌注混凝土,工序 8 代表桩顶施加静力荷载。75[#]桥墩处桩基施工对邻近隧道沉降和水平收敛值的对比情况如图 9 所示。各施工工序监测值与模拟计算值均在 3.30 mm 以内,相差不大。75[#]桥墩桩基施工隧道累计沉降值为 3.16 mm,水平累计变化值为 2.32 mm。

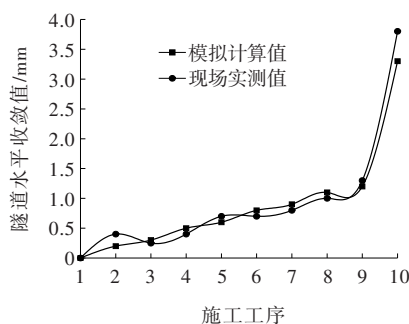
4.4 对比分析结果

将 72[#]和 75[#]桥墩的现场监测数据与数值模拟结果进行对比分析,结果表明:

(1) 在新建桩基施工过程中,对于 72[#]、75[#]桥墩风险源,地铁区间隧道的沉降和水平收敛总体表现为下沉趋势,相比之下,对沉降影响明显。72[#]与 75[#]桩基施工时隧道水平收敛变化方向相反。



(a) 隧道沉降曲线



(b) 隧道水平收敛曲线

图 8 72[#]桥墩桩基施工对邻近隧道变形影响监测曲线图

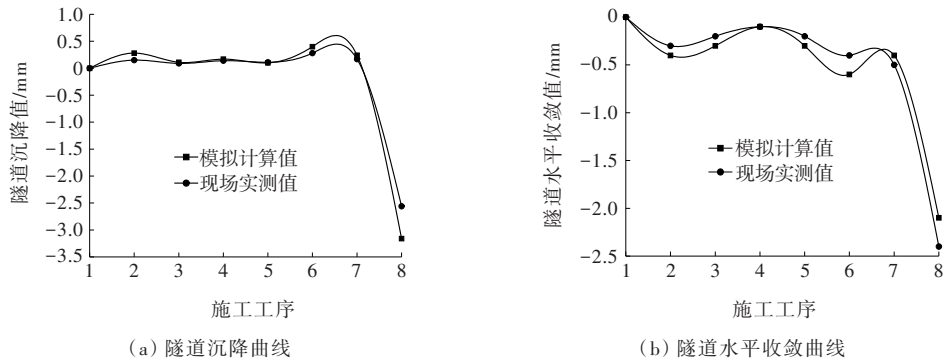


图9 75#桥墩桩基施工对邻近隧道变形影响监测曲线图

(2) 从位移变化图像中可以看出:隧道的沉降(水平收敛)变化与相邻结构净距密切相关,距施工区域越近,变形结果越大。

(3) 在各施工工序中,模拟结果与现场实测值变化趋势相同,累计最大值均未超出监测预警值,满足监测变形控制标准。

5 结论

通过开展新建桩基近接施工对毗邻地铁区间隧道影响研究,得出主要结论如下:

(1) 在钻孔顺序工况施工作业下,交叉钻孔和顺序钻孔所引起的隧道最大水平收敛值分别为 1.49 mm 和 1.41 mm,表明钻孔顺序对隧道水平收敛影响较小。

(2) 沿隧道左线里程方向 K3+215~K3+335,距离施工区域隧道里程号越近,隧道沉降值越大。交叉钻孔和顺序钻孔所引起的隧道最大拱顶沉降值分别为 2.13 mm 和 2.43 mm,表明交叉钻孔顺序施工对隧道拱顶位移影响更小。

(3) 在分析两种布桩施工方案时,骑跨式布桩和单侧布桩所引起的隧道最大拱顶沉降值分别为 3.02 mm 和 4.11 mm,其中单侧布桩施工所引起的沉降值超过监测变形预警值 4.0 mm。与独立承台相比,骑跨式承台对隧道拱顶位移影响更小,使隧道结构安全更容易得到保障。

(4) 沿隧道左线里程方向 K3+617~K3+737,

小净距近接施工对隧道影响明显,骑跨式布桩方案可以有效减小隧道横截面变形。

参考文献:

- [1] 宋玉芹,林永亮.大直径盾构隧道近距离穿越桩基的方案比选[J].中外公路,2020,40(6):231-236.
- [2] 程永欢.新建桥梁桩基对既有地铁隧道影响的数值分析[J].天津建设科技,2020,30(2):30-33.
- [3] 郭双喜,金平,汲广坤,等.复合地层盾构上方建筑物沉降特征及原因[J].中外公路,2020,40(3):16-21.
- [4] 许桂生.大跨浅埋暗挖隧道近接桥桩施工扰动影响及控制技术[J].中外公路,2019,39(1):185-189.
- [5] 陈发东.盾构隧道施工对临近桥梁桩基及周围土体影响的模拟研究[J].中外公路,2018,38(6):177-181.
- [6] 丁智,张霄,周联英,等.近距离桥桩与地铁隧道相互影响研究及展望[J].浙江大学学报(工学版),2018,52(10):1943-1953,1979.
- [7] 吕宝伟.超临界桥桩基施工对既有隧道影响数值与实测分析[J].铁道标准设计,2017,61(3):103-107.
- [8] 杨敏,靳军伟.桩基础与既有地铁隧道相互影响的研究进展[J].建筑结构学报,2016,37(8):90-100.
- [9] YOO C. Three dimensional numerical investigation on the effect of bridge construction on existing tunnel[J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2014,18(3):794-802.
- [10] 金生吉,陈华,于贺,等.沈阳快速干线隧道深基坑施工监测与分析[J].中外公路,2018,38(1):220-224.
- [11] 黄国超.某立交桥梁桩基础施工对既有地铁隧道影响的数值模拟研究[D].广州:华南理工大学,2015.
- [12] 路平,郑刚.立交桥桩基础施工及运营期对既有隧道影响的研究[J].岩土工程学报,2013,35(S2):923-927.