

吕文龙, 范昊. 地铁竖井及横通道施工对邻近建筑基础影响分析[J]. 华南地震, 2022, 42(2): 68-77. [LYU Wenlong, FAN Hao. Analysis on the Influence of Subway Shaft and Cross Passage Construction on Foundations of Adjacent Buildings[J]. South China journal of seismology, 2022, 42(2): 68-77]

地铁竖井及横通道施工对邻近建筑基础影响分析

吕文龙¹, 范昊²

(1. 广东省建筑科学研究院集团股份有限公司, 广州 510000; 2. 广州大学土木工程学院, 广州 510000)

摘要: 以广州市轨道交通十三号线某竖井及横通道施工项目工程为背景, 使用三维有限元模拟的方法, 研究竖井及横通道施工对邻近建筑产生的影响。分析结果表明: 竖井及横通道的开挖诱发周围建筑群基础发生一定量的位移, 基础之间产生一定量的沉降, 随着竖井以及横通道开挖施工的进行, 结构位移变化呈现先逐步增加, 后逐步减小, 最终趋于稳定。根据数值计算结果的位移大小, 均在规范的安全控制值内, 不危及周围建筑群基础的安全, 并进一步提出相应的施工建议。

关键词: 竖井施工; 基础沉降; 土体变形; 数值模拟

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2022)02-0068-10

DOI: 10.13512/j.hndz.2022.02.10

Analysis on the Influence of Subway Shaft and Cross Passage Construction on Foundations of Adjacent Buildings

LYU Wenlong¹, FAN Hao²

(1. Guangdong Provincial Academy of Building Research Group Co., Ltd., Guangzhou 510000, China; 2. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510000, China)

Abstract: Taking the construction project of shaft 1 and cross passage of Memorial Hall Station of Guangzhou Rail Transit line 13 as the background, using the method of three-dimensional finite element simulation, the paper studies the impact of shaft and cross passage construction on adjacent buildings. The analysis results show that the excavation of the shaft and cross passage induces a certain amount of displacement of the surrounding buildings, and a certain amount of settlement between the foundations. With the excavation and construction of the shaft and cross passage, the change of structural displacement increases first, then decreases gradually, and finally tends to be stable. According to the numerical calculation results, the displacement is within the standard safety control value, which does not endanger the safety of the surrounding building group infrastructure, and puts forward corresponding construction suggestions in one step.

Keywords: Shaft construction; Foundation settlement; Soil deformation; Numerical simulation

收稿日期: 2022-02-10

基金项目: 住房和城乡建设部科技计划资助项目(No.2017-k10-006)

作者简介: 吕文龙(1984-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 一级注册结构工程师, 注册岩土工程师, 主要从事建筑地基基础方面的研究。

E-mail: midworm@163.com

0 引言

随着城市建设的发展,地下工程的修建,尤其是在地面建筑密集、地下管线复杂的城市中心地区,地铁施工不可避免地対岩土体产生扰动,引起地层变形,当变形达到一定程度时将造成地表建筑物沉降、倾斜甚至开裂,严重时还将影响到相关人员的安全以及建筑物的正常使用,从而产生非常恶劣的社会影响。为尽量减少工程中竖井以及隧道的开挖对地层以及建筑物的不良影响,必须对地表沉降和变形以及竖井隧道的开挖进行深入研究和有效预计,必要时需采取注浆加固^[1]、大管棚和小导管超前支护等措施^[2],从而合理控制地铁施工过程中引起的地表沉降和变形。近年来,地铁施工造成的环境影响已经成为地下工程界的热点问题。国内外诸多学者通过研究大量工程实践,运用数值模拟、模型试验、理论计算等方式,对于地铁施工所造成的影响进行分析,并且已经有许多可观的研究成果。

杨福麟^[3]等以武汉地铁虎门区间隧道开挖工程为背景,运用有限元数值模拟软件MIDAS/GTS建立隧道断面开挖的数值模型,计算隧道开挖引起的地表沉降量,与实测沉降量进行拟合,模拟结果表明,优化后地表沉降仍在安全范围内。卫守峰^[4]依托西安地铁五号线区间黄土隧道工程的施工,进行了竖井转横通道施工方案的数值试验研究,对比研究“竖井—横通并行”与“先竖井后横通”两种施工方案引起的地表沉降及围岩塑性区的变化。数值分析表明,“竖井—横通并行”施工时,马头门横向收敛位移和竖井靠近马头门一侧井壁的支护结构应力较“先竖井后横通”施工方案小约14%以上,因此对稳定性较好的黄土地层,“竖井—横通并行”施工方案更优。赵华松^[5]等以上海地铁明珠线某隧道区间施工工程为基础,建立了隧道施工的三维有限元数值模型,在对比分析模拟沉降及实测沉降的基础上,总结了隧道周围地层位移的规律。白铭海^[6]利用有限元分析软件ABAQUS对超前小导管、超前管棚等预加固措施进行论证并对小竖井施工大跨隧道过程进行三维数值分析。在竖井转入横通道后采用桩梁体系成功地解决了因上部荷载过大引起的横通道稳定问题,并有效地控制了地表沉降。韩日美^[7]等指出在地层条件较差、沉降控制指标较高的工程施工

中,最好选择横通道随竖井下挖交替进行,既可减弱马头门部位的应力集中、减少地层沉降、降低施工风险并可利用土体作为作业平台,施工也较方便。李静^[8]针对城市地铁竖井横通道转正洞施工难度大、工序繁杂的特点,通过方案比选,提出了竖井横通道转正洞采用大包施工工法。

本文基于广州地铁十三号线某竖井及横通道施工项目,采用数值模拟的方法,研究了地铁施工中竖井以及横通道的开挖对于周围建筑群基础造成的影响。

1 工程概况

该项目竖井埋深约32 m,竖井采用倒挂井壁工法施工,拟采用锚杆或注浆锚管+格栅钢架+钢筋网+喷射混凝土联合支护,横通道采用上下台阶法施工,拟采用锚杆+格栅钢架+钢筋网+喷射混凝土联合支护,拱顶设置大管棚和小导管超前支护。

周边建筑群分别位于竖井的西侧、西南侧、东侧与东南侧,除西南侧有一栋9层采用10 m桩长的锤击桩基础形式的高层建筑外,其余均为1~3层的浅基础平房建筑。竖井与西侧建筑群浅基础的最小水平净距为8.4 m,与西南侧高层建筑桩基础的最小水平净距为23 m,与西南侧平房浅基础的最小水平净距为12.2 m,与东侧建筑群浅基础的最小水平净距为12.1 m,与东南侧建筑群浅基础的最小水平净距为18.2 m。图1为竖井、横通道与周边建筑群位置关系图;图2为竖井、横通道平面图;图3为竖井、横通道剖面图及施工工序。



图1 竖井、横通道与周边建筑群位置关系图

Fig.1 Location diagram of shaft, horizontal passage and surrounding buildings

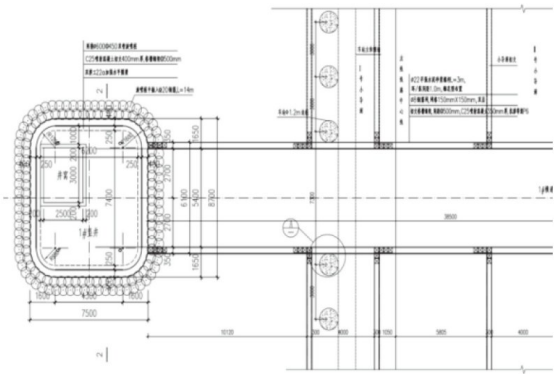


图2 竖井、横通道平面图
Fig.2 Plan of the shaft and horizontal passage

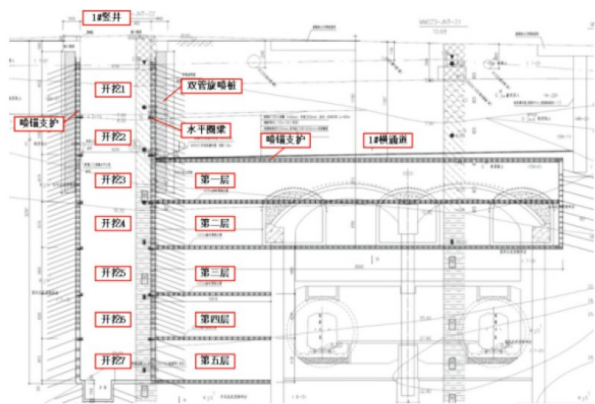


图3 竖井、横通道剖面图及施工工序
Fig.3 Section drawing of shaft and cross passage
and construction process

2 计算模型的建立

根据周边建筑群和竖井及横通道工程的空间立体关系以及工程施工特点，用MIDAS GTS建立三维有限元计算模型，并充分考虑本工程的地层分布特点并合理选取计算参数、划分网格。

2.1 结构三维模型

三维有限元计算模型的边界条件为：模型底部Z方向位移约束，模型前后面Y方向约束，模型左右面X方向约束。三维有限元整体模型示意如图4所示，建筑群分区示意图如图5所示。

2.2 材料参数的确定

施工场地周边地层的力学性质对该竖井及横通道施工过程中周边建筑群的受力和变形起着关键作用，为此，进行三维模拟分析计算时须充分结合本工程的地层分布特点合理选取计算参数。

三维有限元计算模型中的地层主要根据该竖井及横通道附近的工程地质资料进行适当简化，主要有素填土、粉质粘土、全风化泥质粉砂岩、强风化泥质粉砂岩、中风化泥质粉砂岩等地层，各地层的计算参数取值主要依据相关工程地质勘察资料和工程经验综合分析确定；1#竖井及横通道和周边建筑群基础的力学计算参数依据相关设计施工图纸资料，经综合考虑相关因素后确定，部分模型具体材料参数取值见表1，模拟单元参数见表2。

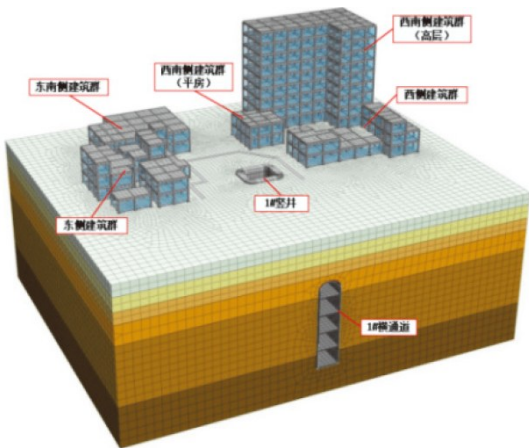


图4 三维有限元整体模型
Fig.4 Three dimensional finite element model

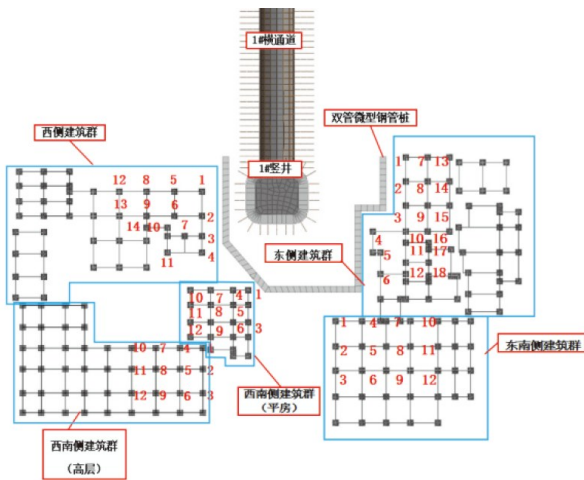


图5 建筑群分区示意图与基础编号
Fig.5 Schematic diagram and base number of the
building complex zoning

2.3 施工工况的模拟

竖井及横通道对周边建筑群基础影响的三维动态施工模拟的主要流程为：初始应力场分析、竖井开挖；横通道开挖。本次三维数值模拟工况见表3。

表 1 三维数值模拟材料参数取值表

Table 1 Material parameters for 3D numerical simulation

材料	本构模型	容重 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	粘聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ
素填土	摩尔库伦	19	17	16	10	0.30
粉质粘土	摩尔库伦	18	19	19	15	0.35
全风化泥质粉砂岩	摩尔库伦	21	34	26	45	0.23
强风化泥质粉砂岩	摩尔库伦	20	200	28	100	0.20
中风化泥质粉砂岩	摩尔库伦	26	500	33	500	0.18
C25 混凝土	线弹性	25	—	—	28 000	0.25
C30 混凝土	线弹性	25	—	—	30 000	0.20
钢材	线弹性	78	—	—	200 000	0.30

表 2 三维数值模拟单元参数表

Table 2 Element parameters of 3D numerical simulation

单元名称	材料属性	单元属性	单元尺寸
素填土	素填土	三维实体单元	—
粉质粘土	粉质粘土	三维实体单元	—
全风化泥质粉砂岩	全风化泥质粉砂岩	三维实体单元	—
强风化泥质粉砂岩	强风化泥质粉砂岩	三维实体单元	—
中风化泥质粉砂岩	中风化泥质粉砂岩	三维实体单元	—
建筑浅基础	C30 混凝土	三维实体单元	
喷混支护	C25 混凝土	板单元	300 mm
竖井锚杆	钢材	线单元	$\Phi 40$ mm
横通道	钢材	线单元	$\Phi 20$ mm
高层建筑桩	C30 混凝土	线单元	$\Phi 400$ mm
建筑柱	C30 混凝土	线单元	400*400 mm
建筑梁	C30 混凝土	线单元	600*600 mm

表 3 施工工况表

Table 3 Construction working sheet

施工工况	主要施工内容
工况 1	场地初始地应力场分析
工况 2	双排微型钢管桩加固
工况 3	锁口圈梁与双管旋喷桩施工
工况 4	竖井开挖 1
工况 5	竖井开挖 2
工况 6	竖井开挖 3
工况 7	横通道超前小导管支护施工
工况 8	横通道第一层开挖 1
工况 9	横通道第一层开挖 2
工况 10	横通道第一层开挖 3
工况 11	竖井开挖 4
工况 12	横通道第二层开挖 1

(转下表)

(接表 3)

施工工况	主要施工内容
工况 13	横通道第二层开挖 2
工况 14	横通道第二层开挖 3
工况 15	竖井开挖 5
工况 16	横通道第三层开挖 1
工况 17	横通道第三层开挖 2
工况 18	横通道第三层开挖 3
工况 19	竖井开挖 6
工况 20	横通道第四层开挖 1
工况 21	横通道第四层开挖 2
工况 22	横通道第四层开挖 3
工况 23	竖井开挖 7
工况 24	横通道第五层开挖 1
工况 25	横通道第五层开挖 2
工况 26	横通道第五层开挖 3

3 计算结果分析

3.1 对西侧建筑群的位移影响

图6为竖井及横通道施工过程中关键工况下西侧建筑群基础总位移云图；图7为竖井及横通道施工过程中关键工况下西侧建筑群基础位移折线图，其中横坐标为施工工况，纵坐标为位移大小。

竖井及横通道施工过程对西侧建筑群结构影响的三维模拟分析位移结果表明：该竖井及横通道施工过程诱发西侧建筑群浅基础的最大水平X位

移为 1.3 mm，水平Y位移为0.8 mm，最大竖向位移为 3.4 mm，最大总位移为 3.7 mm。相邻基础之间的最大沉降发生在 1 号桩与 5 号桩之间，为 0.91 mm。

3.2 对西南侧建筑群(高层)的位移影响

图8为竖井及横通道施工过程中关键工况下西南侧建筑群(高层)基础总位移云图；图9为竖井及横通道施工过程中关键工况下西南侧建筑群(高层)基础位移折线图，其中横坐标为施工工况，纵坐标为位移大小。

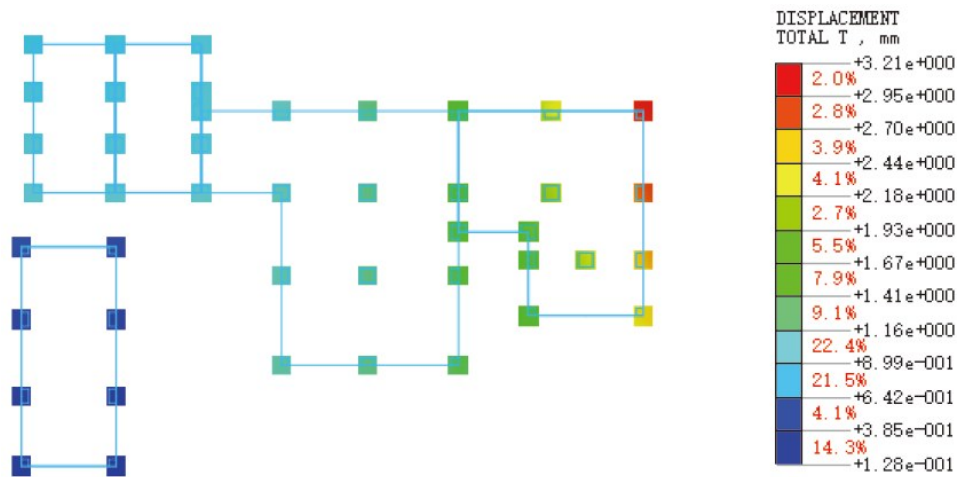


图6 西侧建筑群基础总位移
Fig.6 Total displacement of west buildings

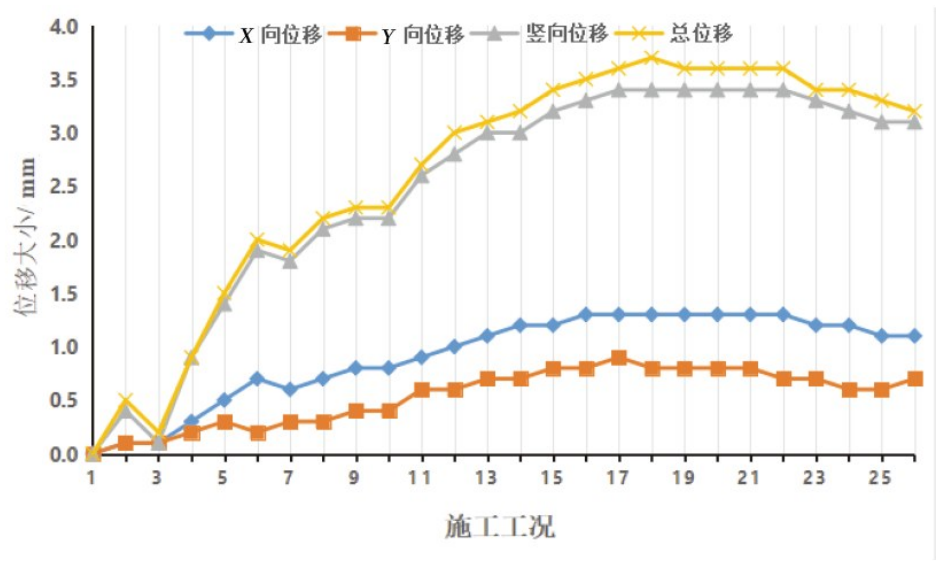


图7 各工况下西侧建筑群基础各位移图

Fig.7 Diagram of foundation structure displacement of west buildings

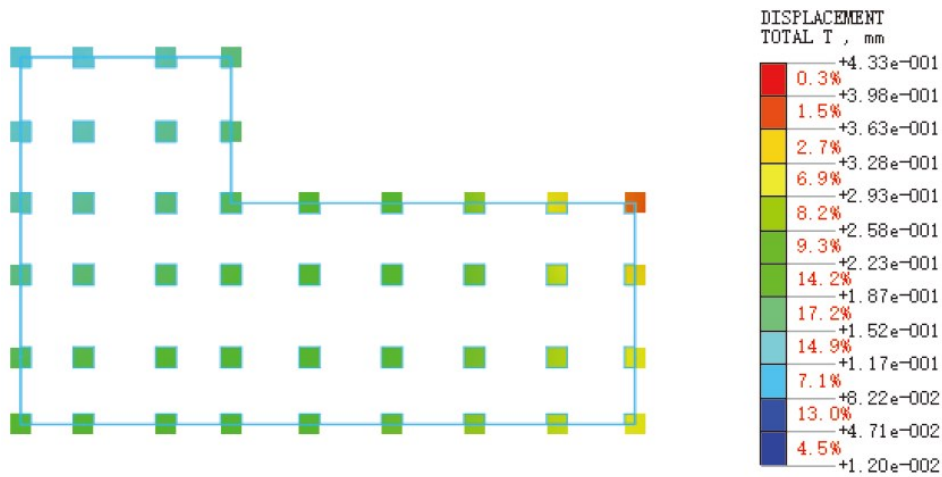


图8 西南侧建筑群(高层)基础总位移

Fig.8 Total displacement of foundation of southwest buildings (high-rise)

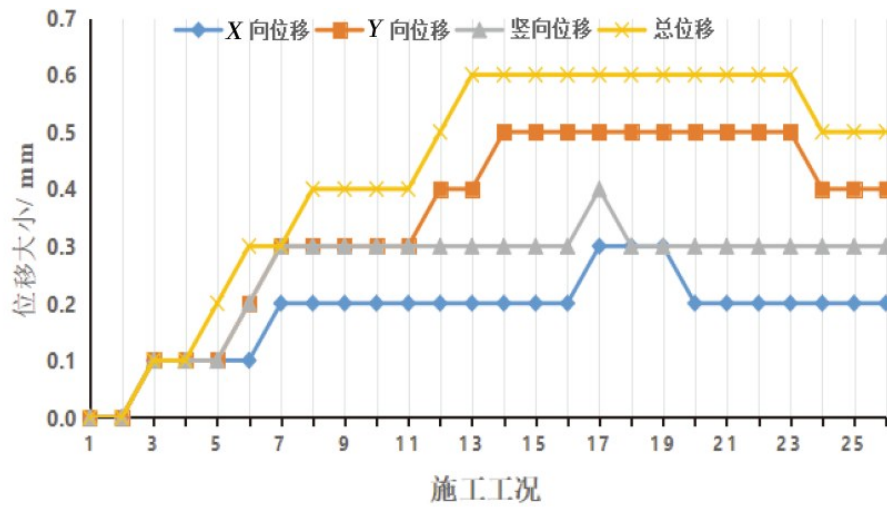


图9 各工况下西南侧建筑群(高层)基础位移图

Fig.9 Diagram of foundation displacement of southwest buildings (high-rise)

该竖井及横通道施工过程中对西南侧建筑群(高层)结构影响的三维模拟分析位移结果表明:该竖井及横通道施工过程中诱发西南侧建筑群(高层)桩基础的最大水平 X 位移为0.3 mm,水平 Y 位移为0.5 mm,最大竖向位移为0.3 mm,最大总位移为0.6 mm。相邻基础之间的最大沉降发生在4号桩与7号桩之间,为0.06 mm。

3.3 对西南侧建筑群(平房)的位移影响

图10为竖井及横通道施工过程中关键工况下西南侧建筑群(平房)基础总位移云图;图11为竖井及横通道施工过程中关键工况下西南侧建筑群(平房)基础位移折线图,其中横坐标为施工工况,纵坐标为位移大小。

该竖井及横通道施工过程中对西南侧建筑群(平房)结构影响的三维模拟分析位移结果表明:竖井及横通道施工过程中诱发西南侧建筑群(平房)浅基础的最大水平 X 位移为0.4 mm,水平 Y 位移为1.0

mm,最大竖向位移为2.2 mm,最大总位移为2.5 mm。相邻基础之间的最大沉降发生在2号桩与3号桩之间,为0.32 mm。

3.4 对东侧建筑群的位移影响

图12为竖井及横通道施工过程中关键工况下西南侧建筑群(平房)基础总位移云图;图13为竖井及横通道施工过程中关键工况下西南侧建筑群(平房)基础位移折线图,其中横坐标为施工工况,纵坐标为位移大小。

该竖井及横通道施工过程中对东侧建筑群结构影响的三维模拟分析位移结果表明:竖井及横通道施工过程中诱发东侧建筑群浅基础的最大水平 X 位移为1.3 mm,水平 Y 位移为0.7 mm,最大竖向位移为2.2 mm,最大总位移为2.4 mm。相邻基础之间的最大沉降发生在4号桩与10号桩之间,为0.60 mm。

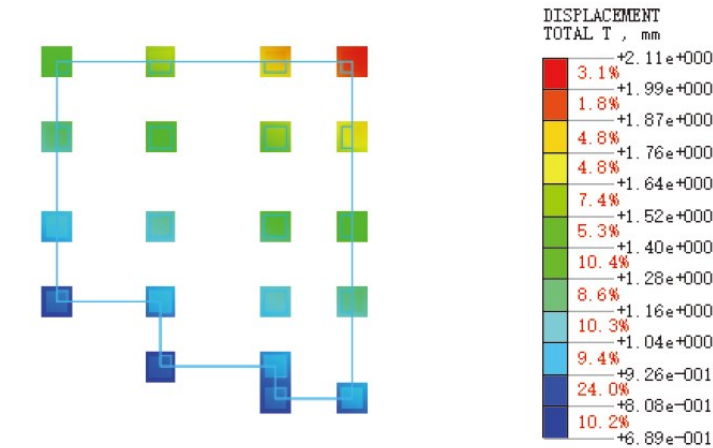


图10 西南侧建筑群(平房)基础总位移
Fig.10 Total displacement of southwest buildings (bungalow)

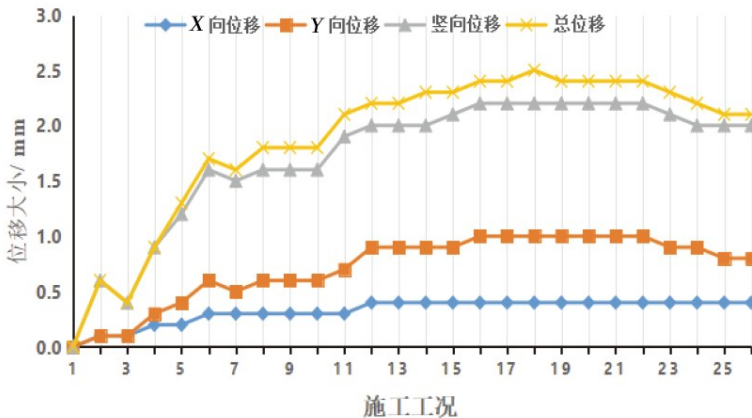


图11 各工况下西南侧建筑群(平房)基础位移图
Fig.11 Diagram of foundation displacement of southwest buildings (bungalow)

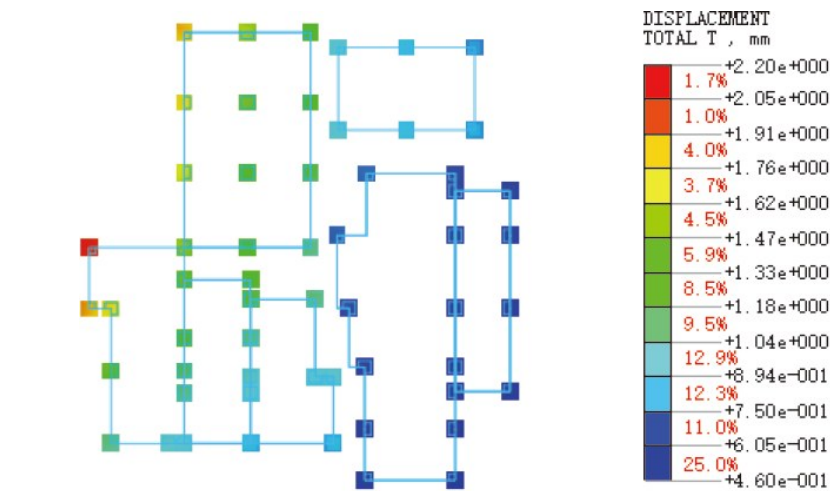


图12 东侧建筑群基础总位移

Fig.12 Total displacement of the east buildings

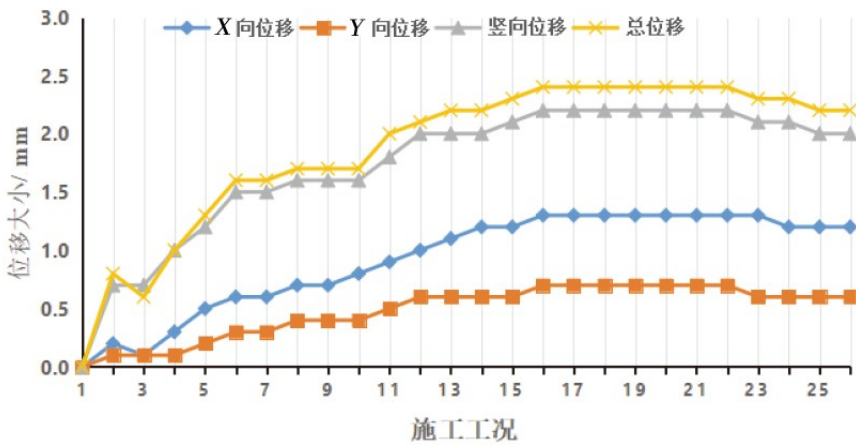


图13 各工况下东侧建筑群基础位移图

Fig.13 Diagram of foundation displacement of east buildings

3.5 对东南侧建筑群的位移影响

图14为竖井及横通道施工过程中关键工况下东南侧建筑群基础总位移云图；图15为竖井及横通道施工过程中关键工况下东南侧建筑群基础位移折线图，其中横坐标为施工工况，纵坐标为位移大小。

竖井及横通道施工过程对东南侧建筑群结构影响的三维模拟分析位移结果表明：该竖井及横通道施工过程诱发东南侧建筑群浅基础的最大水平X位移为0.6 mm，水平Y位移为0.6 mm，最大竖向位移为1.1 mm，最大总位移为1.2 mm。相邻基础之间的最大沉降差发生在4号桩与5号桩之间，为0.22 mm。

综上所述，竖井及横通道施工诱发周围建筑群浅基础发生了一定量的位移。引起的桩基竖向位移较大，基础之间产生一定量的沉降，随着竖

井以及横通道开挖施工的进行，结构位移变化呈现先逐步上涨，后逐步减小，最终趋于稳定。根据《广东省建筑地基基础设计规范》(DBJ 15-31-2016)^[9]对建筑物地基变形的允许值，竖井及横通道施工诱发既有周围建筑群结构的位移量可控。因此认为本项目的竖井及横通道施工不危及周围建筑群的安全。

4 设计与施工建议

结合该竖井及横通道工程的岩土工程地质条件、结构设计特点及施工特点、周边建筑群结构特点分析，为确保竖井及横通道施工过程中不危及周边建筑群结构安全，不影响周边建筑群的结构安全，建议：

(1)项目建设过程应加强紧邻受影响范围内的建筑群结构的位移监测工作，尤其重点关注靠近

竖井的建筑物的位移监测工作，及时监控建筑群结构的安全状态。

(2)在竖井及横通道施工前，对受影响范围的周边建筑群的基础及结构状况开展调查分析。

(3)严格控制竖井及横通道的围护结构施工质量，严格监控围护结构的定位、垂直度等，避免由于围护结构出现倾斜、偏曲等现象对周边建筑群结构造成直接冲击破坏。

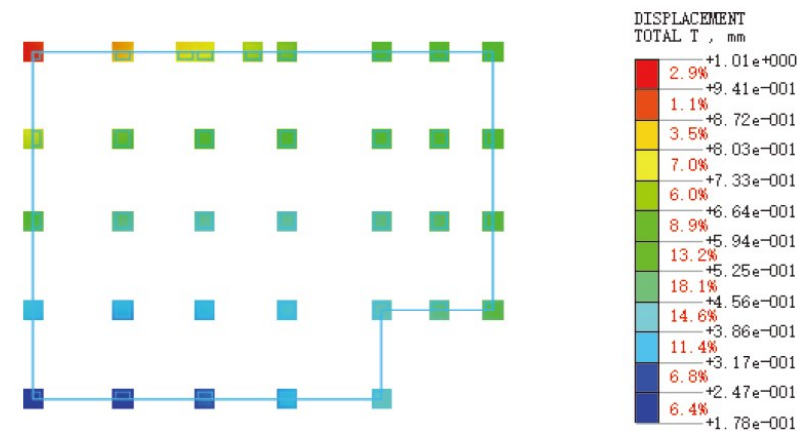


图 14 东南侧建筑群基础总位移
Fig.14 Total displacement of foundation of southeast buildings

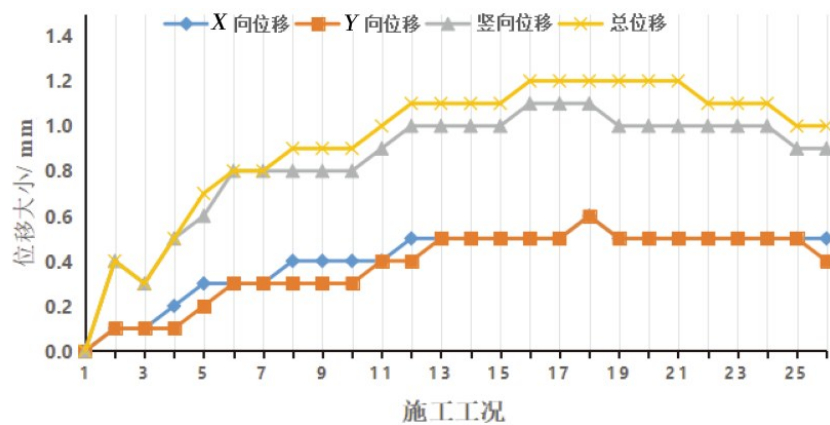


图 15 各工况下东南侧建筑群基础位移图
Fig.15 Diagram of foundation displacement of southeast buildings

5 结论

综合竖井及横通道施工场地的工程地质、支护结构及周边建筑群的基础资料，依据所开展的系列三维数值模拟计算结果，得到的结论如下：

(1)本项目竖井及横通道施工对周边建筑群结构的危险，主要体现在竖井及横通道开挖施工过程中对紧邻周边建筑群基础位移造成的不利影响。

(2)本项目竖井及横通道施工过程诱发西侧建筑群浅基础的最大竖向位移为 3.4 mm，相邻基础之间的沉降差最大为 0.91 mm，均符合规范要求。

(3)本项目竖井及横通道施工过程诱发西南侧

建筑群(高层)桩基础最大竖向位移为 0.3 mm，相邻基础之间的沉降差最大为 0.06 mm，均符合规范要求。

(4)本项目竖井及横通道施工过程诱发西南侧建筑群(平房)浅基础的最大竖向位移为 2.2 mm，相邻基础之间的沉降差最大为 0.32 mm，均符合规范要求。

(5)本项目竖井及横通道施工过程诱发东侧建筑群浅基础的最大竖向位移为 2.2 mm，相邻基础之间的最大沉降差最大为 0.60 mm，均符合规范要求。

(6)本项目竖井及横通道施工过程诱发东南侧建筑群浅基础的最大竖向位移为 1.1 mm，相邻基

础之间的最大沉降差最大为 0.22 mm, 均符合规范要求。

参考文献

- [1] 贾波,刘干斌,徐立,等. 地铁竖井施工对周边建筑影响及加固措施[J]. 工业建筑,2011,41(08):121-125.
- [2] 吴伟民. 加旦一良马引水隧洞超前支护方案设计与施工[J]. 人民黄河,2013,35(01):120-122.
- [3] 杨福麟,刘永林,胡斌. 武汉地铁隧道开挖引起地表沉降的数值模拟研究[J]. 工程地质学报,2013,21(01):85-91.
- [4] 卫守峰. 黄土地区地铁竖井转横通暗挖施工稳定性分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(03): 366-375.
- [5] 赵华松,周文波,刘涛,等. 双线平行盾构施工引起的土体位移分析及其软件开发[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2005(04): 416-422.
- [6] 白铭海,吉小明. 地铁小竖井转横通道施工大跨隧道数值模拟分析[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(02):469-476.
- [7] 韩日美,谢永利. 浅埋暗挖法施工中结构受力的合理转换[J]. 现代隧道技术, 2007(03): 71-76.
- [8] 李静. 竖井横通道转正洞施工方案比选[J]. 隧道建设, 2008(04): 476-478.
- [9] 广东省住房和城乡建设厅. DBJ 15-31-2016: 广东省建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.