

# 软土地层深基坑开挖对邻近市政隧道的影响分析

叶翔<sup>1</sup>, 岑维杰<sup>2</sup>, 张宏建<sup>2</sup>, 李慧慧<sup>2</sup>, 洪子涵<sup>2</sup>

(1. 杭州上城区城市建设发展集团有限公司, 浙江 杭州 310001; 2. 杭州市勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310012)

**摘要:** 深基坑开挖过程中不可避免地对周边环境产生影响, 尤其是在软土地层中邻近市政隧道的基坑, 在开挖过程中由于周边土体大面积的卸荷将导致市政隧道产生变形, 针对市政隧道保护的要求也越来越高。本文基于邻近杭州香积寺路隧道某大型基坑开挖工程实例, 采用有限元软件 Midas 进行三维建模分析, 并结合基坑及隧道的相关监测数据, 分析了软土地区深基坑开挖对邻近市政隧道的影响, 从而为类似设计工程提供参考。

**关键词:** 深基坑; 软土; 开挖; 市政隧道; 有限元; 监测

中图分类号: TU473.2

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)S1-0090-07

## Impact of deep foundation pit excavation in soft ground on adjacent municipal tunnel

YE Xiang<sup>1</sup>, CEN Wei-jie<sup>2</sup>, ZHANG Hong-jian<sup>2</sup>, LI Hui-hui<sup>2</sup>, HONG Zi-han<sup>2</sup>

(1. Hangzhou Shangcheng Urban Construction Development Group Co., Ltd., Hangzhou 310001, Zhejiang, China;

2. Hangzhou Geotechnical Engineering and Surveying Research Institute with Limited Liability, Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

**Abstract:** The excavation process of foundation pits can significantly impact the surrounding environment, especially in soft soil layers adjacent to municipal tunnel pits. During excavation, unloading process of the surrounding soil can cause deformation in municipal tunnels, which necessitates higher levels of protection. This paper presents a case study of a large-scale foundation pit excavation project near Hangzhou Xiangji Temple Road Tunnel. The finite element software Midas is employed for three-dimensional modeling and analysis. By integrating relevant monitoring data from both the foundation pit and the tunnel, the paper analyzes the influence of deep foundation pit excavation in soft soil areas on adjacent municipal tunnels. The results provide valuable insights for similar design projects.

**Key words:** deep foundation pit; soft soil; excavation; municipal tunnel; finite element; monitoring

## 0 引言

随着我国城镇化进程不断发展, 城市土地资源日趋紧张, 基坑支护工程愈发具有规模大、深度大、工期长、费用高及对周边环境影响大等特点。特别是位于城市中心的软土深基坑, 地层条件差、水文条件复杂、周边环境对基坑变形敏感, 面对如此复杂的情况, 如何在基坑工程施工前评估施工对相邻构筑物安全的影响程度, 以便采取相应的对策, 从而避免基坑工程事故的发生, 保证工程顺利实施是当前需要考虑的问题<sup>[1]</sup>。

董学伟<sup>[2]</sup>以长沙市某邻近浏阳河隧道的基坑工程为背景, 利用 Midas GTS NX 计算软件研究基

坑施工对既有浏阳河隧道的变形及内力影响, 结果表明基坑开挖完成后, 隧道结构的附加位移和内力均满足结构的安全性要求, 并提出相应的施工建议, 确保工程顺利实施。姜叶翔等<sup>[3]</sup>以邻近地铁隧道的杭州市某综合楼地下室基坑工程为例, 利用有限元软件, 预测基坑开挖对地铁隧道的影响, 通过与现场实测值对比, 验证数值分析的有效性。陈仁朋等<sup>[4]</sup>介绍了深开挖工程数值模拟中常用的本构模型及参数获取方法, 并对地铁隧道侧面和上方开挖情况下隧道变形和内力变化规律进行了研究, 提出了侧面开挖和上方开挖隧道变形控制措施。姚爱军等<sup>[5]</sup>以某地铁盾构隧道及邻近基坑工程为研究对象, 分析了地铁盾构隧道在上部基坑开挖卸荷作

用下的变形特征及周边土压力分布规律。黄宏伟等<sup>[6]</sup>通过三维有限元建模, 结合基坑及隧道的监测数据, 表明采用土体加固和堆载这两种措施对隧道进行保护的实施效果较好。

本文基于邻近杭州香积寺路隧道某大型基坑开挖工程实例, 通过有限元软件 Midas 进行三维建模, 采用小应变土体硬化 (HSS) 模型模拟了基坑施工对邻近市政隧道的影响, 并结合基坑及隧道的相关监测数据, 分析了软土地区深基坑开挖对邻近市政隧道的影响, 从而为类似设计工程提供参考。

## 1 工程概况

### 1.1 项目介绍

项目位于杭州市拱墅区, 上塘路和香积寺路交叉口。本工程总用地面积 22 286.29 m<sup>2</sup>, 总建筑面积 128 634.93 m<sup>2</sup>, 其中地上建筑面积 67 719.51 m<sup>2</sup>, 上部拟建 21 层的办公楼 1 幢、23+1 层酒店 1 幢、

5 层裙房 1 幢、6 层裙房 1 幢以及 6 层公交调度楼 1 幢。下部统设 3 层地下室, 南北纵向长约 200 m, 东西横向长约 100 m, 整个基坑开挖面积约 19 500 m<sup>2</sup>, 基坑周长约 570 m, 基坑大面积开挖深度为 14.60 m, 该项目属于一级基坑, 基坑设计使用年限为 2 年<sup>[7]</sup>。

项目东侧邻近上塘高架桥, 北侧邻近香积寺路隧道。上塘高架桥于 2002 年 6 月建成, 建成后与中河高架桥相接, 南起中河立交, 北至石祥路, 全长 7 km。项目南侧邻近香积寺路隧道, 香积寺路隧道东起香积寺路 224 号, 穿越香积寺路延伸段, 西止于余杭塘路, 全长 2 650 m。本项目基坑围护结构与香积寺路隧道最小平面距离约 13.8 m, 邻近范围长度约 80 m。基坑开挖影响范围按 3 倍开挖深度 (43.8 m) 计算, 香积寺路隧道影响范围里程号约 CK1+900~CK2+080, 隧道埋深约 11.4~12.1 m, 香积寺路隧道影响范围约 180 m。基坑平面示意图见图 1。

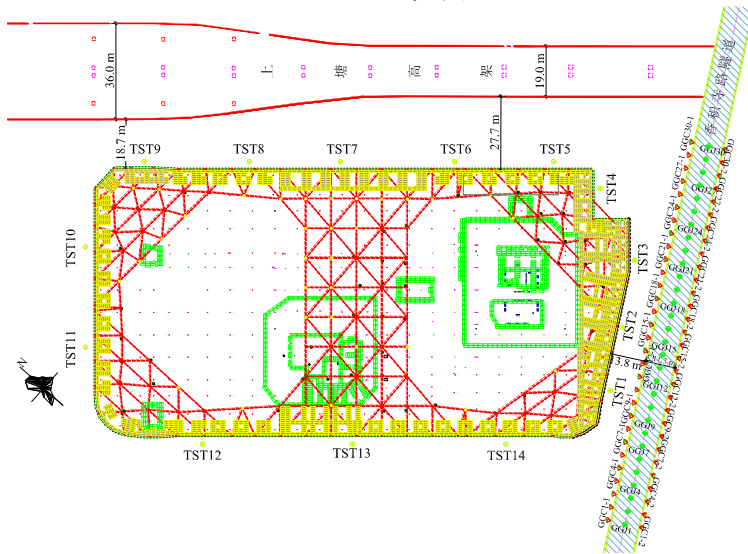


图 1 基坑平面示意图

Fig. 1 Schematic plan of foundation pit

### 1.2 工程地质条件

场地地层按岩石的成因时代、颜色、状态划分工程地质层, 土层物理力学指标见表 1, 现自上而下分述如下:

①<sub>0</sub> 杂填土: 杂色, 松散, 湿。主要由建筑垃圾、碎石、块石、生活垃圾及少量黏性土组成, 局部表层分布 10~20 cm 混凝土。硬杂质含量 30%~60%, 块径一般 10~20 cm, 少量大于 50 cm, 全场分布, 层顶高程 3.68~4.89 m, 层厚 1.10~4.20 m。

①<sub>1</sub> 粉质黏土夹粉土: 灰黄色, 软可塑~软塑。可见较多铁锰质氧化斑点, 层状, 夹稍密状粉土, 可见云母屑, 切面较粗糙, 无摇振反应。局部地段

缺失。层顶高程 0.66~3.53 m, 层厚 0~4.70 m。

② 淤泥质粉质黏土: 灰色, 流塑。含较多腐殖质, 可见半腐烂植物根茎、偶见贝壳碎屑等, 切面稍光滑, 无摇振反应。高压缩性, 全场分布, 层顶高程 1.86~1.90 m, 层厚 13.40~26.80 m。

③<sub>1</sub> 粉质黏土: 灰色、灰黄色, 软可塑。可见少量铁锰质氧化斑点, 局部夹少许粉土, 切面较光滑, 无摇振反应。中压缩性, 全场分布, 层顶高程 -26.58~-13.04 m, 层厚 2.40~14.60 m。

④<sub>1</sub> 粉质黏土: 灰色、青灰色, 软可塑。可见少量铁锰质氧化斑点, 局部粉粒含量稍高, 切面较粗糙, 无摇振反应。中压缩性。全场分布, 层顶高程

-31.58~-22.90 m, 层厚 2.00~10.10 m。

⑩<sub>1</sub>全风化凝灰岩:灰红色、紫红色,硬可塑,已风化成砂土、黏土状,基岩结构构造依稀可辨,夹少量的强风化碎块。局部地段缺失,层顶高程-38.88~-28.50 m,层厚 0.00~8.40 m。

⑩<sub>2</sub>强风化凝灰岩:灰红色、紫红色,岩石具凝灰质结构,块状构造,节理裂隙发育。面见铁锰质渲染,岩心以碎块状为主,少量块状。局部夹中风化凝灰岩块。全场分布,层顶高程-41.40~-29.71 m,控制厚度 6.80~19.40 m。

⑩<sub>3</sub>中风化凝灰岩:紫红色,岩石具凝灰质结构,块状构造,节理裂隙发育。可见铁锰质渲染,岩芯以柱状、短柱状为主,少量块状,锤击声音清脆,钻进稍有跳动,进尺很慢。据抗压试验成果,岩石饱和单轴抗压强度标准值为 91.3 MPa,属坚硬岩。无空洞临界面及软弱局部地段揭示。控制厚度 1.50~11.20 m。

本项目孔隙潜水赋存于场地浅部各土层,①<sub>0</sub>杂填土、①<sub>1</sub>粉质黏土夹粉土为中-弱透土层,含水层厚度不大,有一定的潜水水量;其下的②淤泥质粉质黏土、③<sub>1</sub>粉质黏土、④<sub>1</sub>粉质黏土为弱透土层,为相对隔水层,含水量少。孔隙潜水主要受大气降水的渗透补给,以侧向径流、居民用水和蒸发为主要排泄途径。孔隙潜水含水层埋深较浅,厚度较大,具有一定的含水量,对基坑开挖及地基抗浮力有不利影响,工程施工时应采取有效的工程降水措施及地下室抗浮设计。

本项目基坑大面积坑底位于深厚的淤泥质粉质黏土层中,该土层呈流塑,高压缩性,全场分布,不利于基坑变形和整体稳定性控制,需引起重视。基坑开挖范围内土层渗透性较差,坑外无需专门的降水措施,对于地表雨水及施工用水,可通过地表排水沟拦截并引流至下水管道解决。

表 1 土层物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical properties of different soil layers

层号	岩土名称	重度 $\gamma$ /(kN/m <sup>3</sup> )	黏聚力 $c$ /kPa	内摩擦角 $\varphi$ (°)	水平渗透系数 $k_h$ /(cm/s)	垂直渗透系数 $k_v$ /(cm/s)
① <sub>0</sub>	杂填土	(18.0)	(8.0)	(10.0)	(6.5×10 <sup>3</sup> )	(5.5×10 <sup>3</sup> )
① <sub>1</sub>	粉质黏土夹粉土	18.5	25.9	19.6	1.9×10 <sup>5</sup>	6.5×10 <sup>6</sup>
②	淤泥质粉质黏土	17.3	12.4	9.1	4.1×10 <sup>7</sup>	2.7×10 <sup>7</sup>
③ <sub>1</sub>	粉质黏土	18.4	28.6	16.4	3.9×10 <sup>7</sup>	3.6×10 <sup>7</sup>
④ <sub>1</sub>	粉质黏土	19.3	46.0	20.2	(4.5×10 <sup>6</sup> )	3.4×10 <sup>6</sup>
⑩ <sub>1</sub>	全风化凝灰岩	(22.0)	(50.0)	(25.0)	—	—

注:()内为折减后强度指标。

## 2 市政隧道结构情况

香积寺路隧道由盾构法施工,管片宽为 1.5 m,管片厚度为 0.5 m,隧道直径为 11.3 m,隧道埋深为 11.4~12.1 m。香积寺路隧道盾构段结构见图 2。

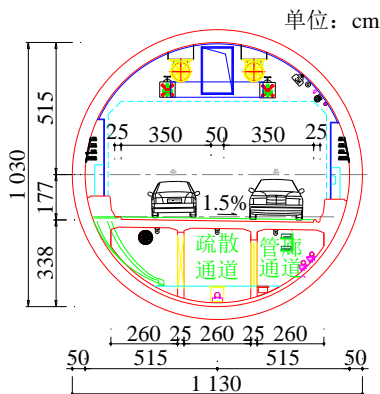


图 2 隧道盾构段结构图

Fig. 2 Structural diagram of tunnel shield section

对本项目影响范围内的香积寺路隧道现状进行调查,调查范围为影响区域 CK1+900~CK2+080,可视范围内的香积寺路隧道由沥青路面、挡墙、搪瓷钢板及上部结构组成,基坑开挖影响范围内无明显滴漏现象,管片缝隙之间有轻微湿渍现象。

## 3 邻近市政隧道侧围护方案

基坑邻近香积寺路隧道侧采用 1 200 mm 直径的钻孔灌注桩作为刚性围护桩,且该侧三轴水泥搅拌桩止水帷幕要求隔断淤泥质粉质黏土层,进入粉质黏土层不小于 1 m,有效桩长达到了 31.6 m。基坑邻近香积寺路隧道侧坑底附近设置大量的三轴水泥搅拌桩土体加固,进一步控制基坑变形。基坑内部设置 3 层钢筋混凝土水平支撑,并在第一道支撑顶部增设混凝土加强板以增强支撑整体刚度,典型剖面见图 3。

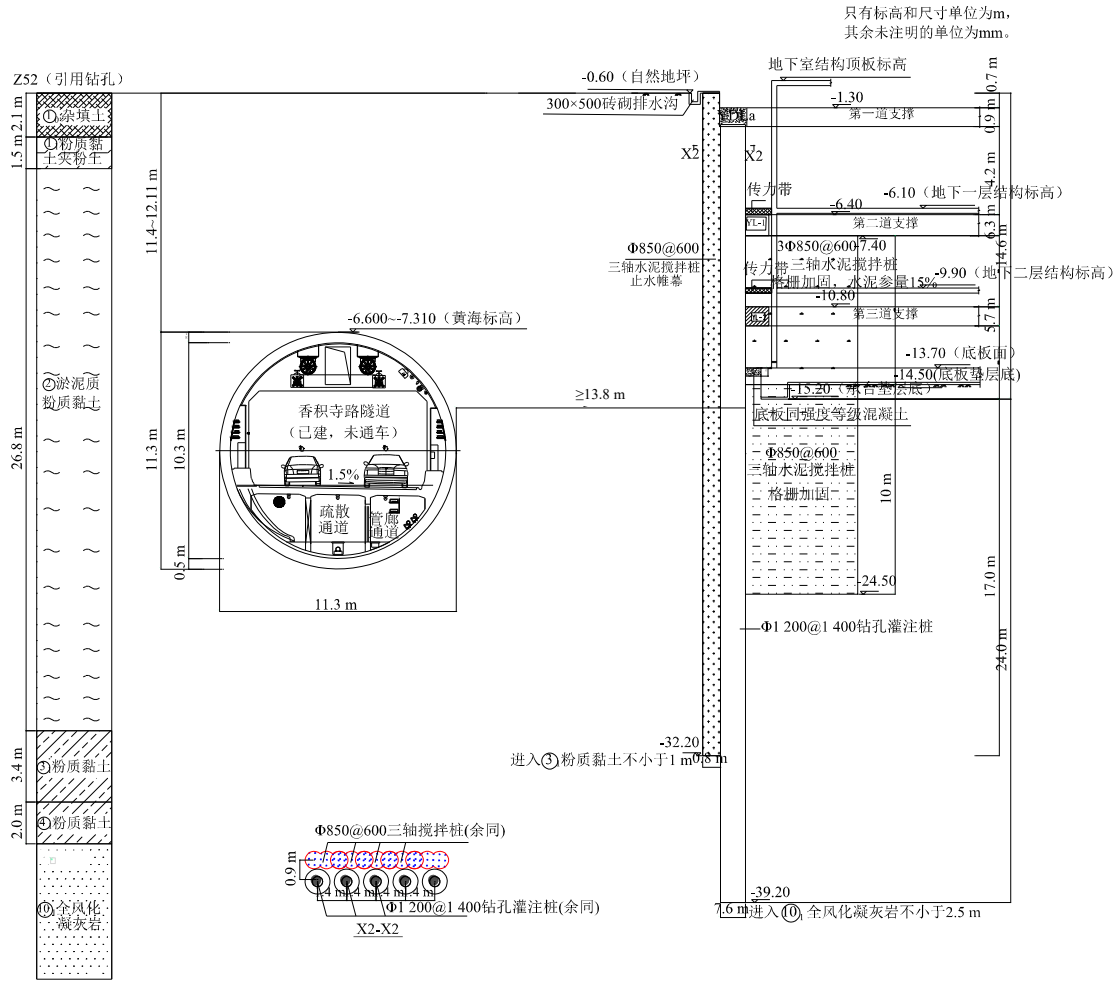


图 3 邻隧道侧围护结构剖面图

Fig. 3 Profile of adjacent tunnel side bracing structure

### 4 有限元数值模拟

采用大型商业有限元数值软件 Midas GTS NX 建立三维有限元模型, 进行基坑在各个阶段的施工工况下对盾构隧道变形影响的分析, 模型的 X 方向取 320 m, Y 方向取 260 m, Z 方向 (厚度方向) 取 60 m。为确保分析结果不受边界约束的影响, 模型边界大于基坑挖深的 3 倍, 模型底部的约束条件为水平、竖直方向固定; 模型两侧的约束条件为水平

方向固定, 竖直方向自由。本项目和既有市政隧道的关系见图 4。

根据现场实际情况, 基坑施工阶段超载取 20 kPa, 地下水位基坑外侧取地表以下 1.0 m, 基坑内部取相应开挖面以下 0.5 m。土体采用 Midas 自带的小应变土体硬化 (HSS) 模型, 围护桩及内支撑等结构单元均采用弹性本构模型。根据抗弯刚度等效的原则, 对围护桩进行了内力分析<sup>[8]</sup>。土体 HSS 模型参数见表 2。

表 2 土体 HSS 模型参数  
Table 2 Soil HSS model parameters

层号	压缩模量 $E_{s0}/\text{MPa}$	割线刚度 $E_{oed}/\text{MPa}$	侧限压缩模量 $E_{ur}/\text{MPa}$	卸载模量 $G_0/\text{MPa}$	剪切模量 $\gamma_{0.7}$
① <sub>0</sub>	(4.0)	(4.0)	20.0	60.0	—
① <sub>1</sub>	4.5	4.5	22.5	67.5	$1.5 \times 10^{-4}$
②	1.8	1.8	9.0	27.0	$1.5 \times 10^{-4}$
③ <sub>1</sub>	7.0	7.0	35.0	105.0	$1.5 \times 10^{-4}$
④ <sub>1</sub>	8.0	8.0	40.0	120.0	$1.5 \times 10^{-4}$
⑩ <sub>1</sub>	12.0	12.0	60.0	180.0	$1.5 \times 10^{-4}$

注: ()内数值为经验值。



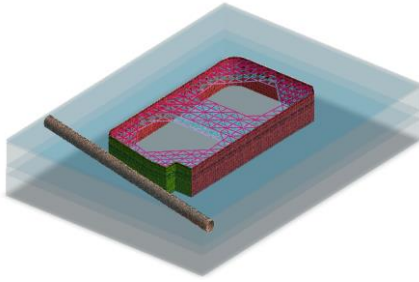


图4 基坑隧道相对位置关系

Fig. 4 Relative position of foundation pit and tunnel

根据 Midas GTS NX 数值模拟分析结果，基坑拆换撑开挖到底时围护结构位移最大，水平位移最大值约为 35.00 mm，土体总位移云图见图 5。基坑拆换撑时市政隧道结构水平位移最大值约为 9.90 mm；基坑开挖到底时市政隧道结构竖向位移最大值约为 5.22 mm，见表 3。市政隧道的水平及竖向位移云图见图 6~7。

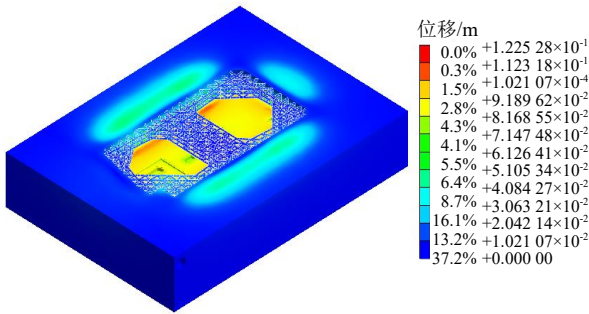


图5 土体总位移云图

Fig. 5 Cloud map of total soil displacement

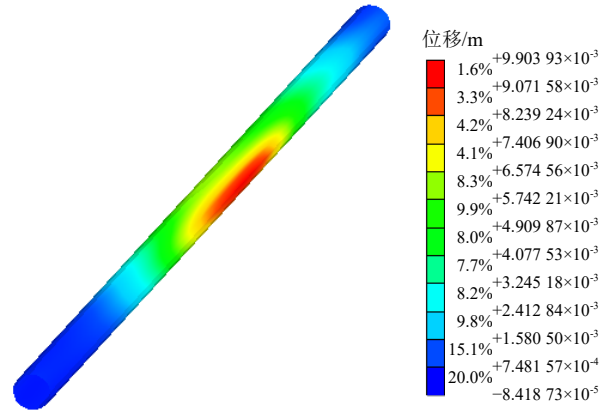


图6 隧道最大水平位移云图 ( $\delta_{hmax}=9.90$  mm)

Fig. 6 Cloud map of maximum horizontal displacement of tunnel ( $\delta_{hmax}=9.90$  mm)

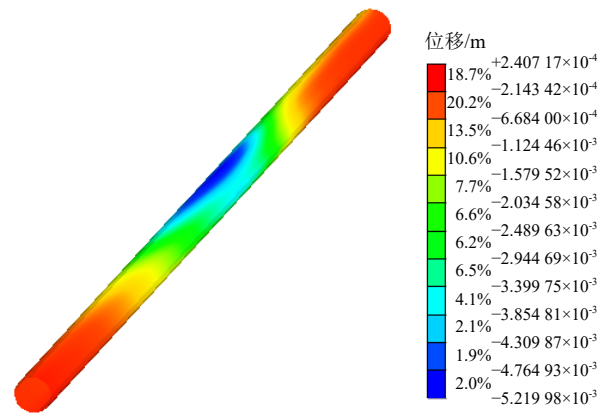


图7 隧道最大竖向位移云图 ( $\delta_{vmax}=5.22$  mm)

Fig. 7 Cloud map of maximum vertical displacement of tunnel ( $\delta_{vmax}=5.22$  mm)

表3 主要工况下隧道最大位移

Table 3 Maximum displacement of the tunnel under the main operating conditions

主要工况	深层土体水平总位移/mm	香积寺路隧道最大位移/mm	
		水平位移	竖向位移
基坑开挖至坑底	+35.00	+9.85	-5.22
基坑完成拆换撑	+35.00	+9.90	-5.17

注：水平位移中“+”代表往本项目基坑内方向；竖向位移中“+”代表向上隆起，“-”代表向下沉降。

## 5 基坑及市政隧道变形监测数据

### 5.1 基坑变形监测数据

通过统计邻市政隧道一侧的基坑测斜数据，得知南侧基坑开挖到底时深层土体测斜变形最大值约 36.18 mm，与有限元模拟结果基本一致。最大值对应测点为 TST3，见图 1，发生在地表以下 9 m 深度位置，位于淤泥质粉质黏土层中，位移变化形态大体呈“弓”形，符合桩+多道支撑支护形式变形特性。测点 TST3 处土体深层水平位移见图 8。

### 5.2 市政隧道变形监测数据

基坑开挖期间市政隧道沉降总体变化较大，正对基坑位置隧道最大沉降点为 GGC27-2，见图 1，最大沉降量为 -7.28 mm，发生在开挖到基坑底这一工况。市政隧道拱底沉降、水平位移随时间变化曲线如图 9~10 所示。地下室底板浇筑完成以后，市政隧道变形逐渐收敛，趋于稳定。

本项目基坑开挖到底时市政隧道变形累计值见表 4。经过对比表 3 和表 4 的结果，市政隧道实测拱底沉降变形值略大于有限元模拟值，实测水平位移变形值略小于有限元模拟值。

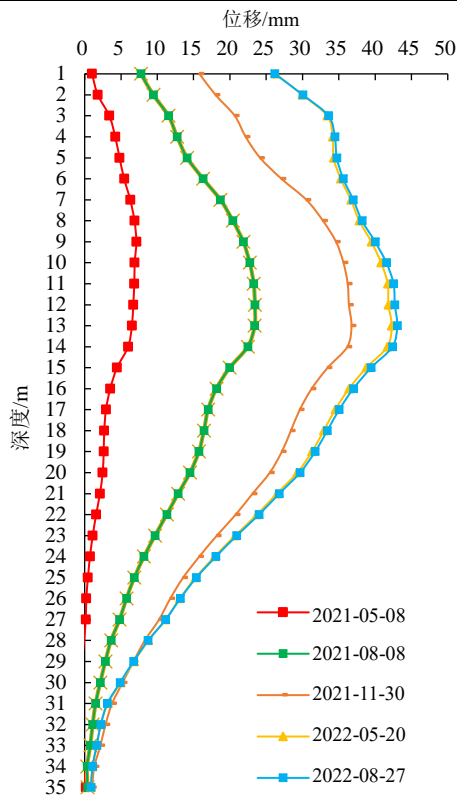


图 8 测点 TST3 处土体深层水平位移

Fig. 8 Horizontal displacements of deep soil at measuring point TST3

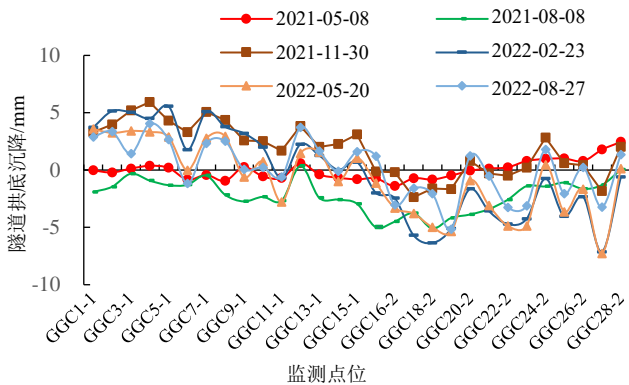


图 9 隧道拱底沉降时程曲线图

Fig. 9 Time history curves of tunnel arch bottom settlement

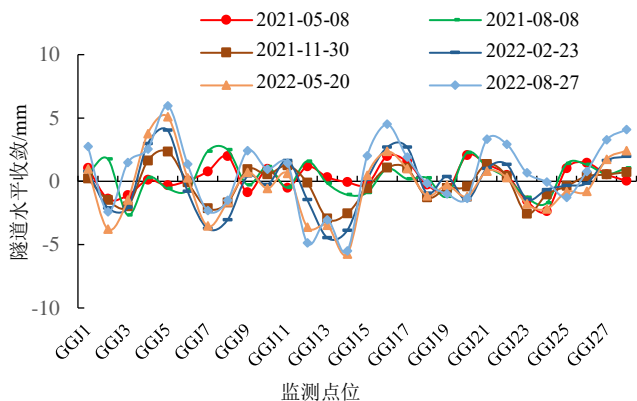


图 10 隧道水平位移时程曲线图

Fig. 10 Time history curves of tunnel horizontal displacement

表 4 市政隧道最大变形实测数据

Table 4 Measured deformation data of municipal tunnel

项目	累计最大变化量/mm
GGC27-2 点拱底竖向位移	-7.28
GGJ5 点水平位移	+6.36

注: 水平位移中“+”代表往本项目基坑内方向;  
 竖向位移中“+”代表向上隆起,“-”代表向下沉降。

### 6 结论

本文基于邻近杭州香积寺路隧道某大型基坑开挖工程实例,通过有限元软件 Midas 进行三维建模,采用小应变土体硬化(HSS)模型模拟了基坑施工对邻近市政隧道的影响,并结合基坑及隧道的相关监测数据,分析了软土地区深基坑开挖对邻近市政隧道的影响,得出以下结论:

(1) 对位于深厚淤泥质土地区开挖在 15 m 左右的基坑,采用大直径钻孔灌注桩结合 3 道钢筋混凝土支撑的方案是可行的,通过坑底设置被动区加固,能够较好地控制基坑变形,从而减少对周边环境的影响。

(2) 本项目运用三维有限元数值模拟软件,模拟了基坑开挖对市政隧道的影响,对后续施工具有一定的指导作用。

(3) 在本工程基坑施工开挖过程中,各监测点均无异常,隧道内拱底沉降、水平位移都未达到设计报警值,实测数据与数值模拟结果基本吻合。

(4) 本项目基坑面积大、深度深,且涉及市政隧道的保护,本项目的围护体系选择可以为后续邻近区域或类似工程提供参考。

### 参考文献

[1] 黄沛, 刘铭, 陈华, 等. 桩基建筑物受邻近深基坑施工影响的安全评估[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊 1): 347-351.  
 HUANG Pei, LIU Ming, CHEN Hua, et al. Safety assessment of impact of construction of deep excavations on adjacent buildings with pile foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S1): 347-351.

[2] 董学伟. 基坑施工对邻近市政隧道的影响分析[J]. 山东交通科技, 2023(1): 79-81.  
 DONG Xue-wei. Analysis of influence of foundation pit construction on adjacent municipal tunnels[J]. Shandong Communications Technology, 2023(1): 79-81.

[3] 姜叶翔, 赖小勇, 张宏建, 等. 深基坑开挖对邻近既有

- 地铁隧道的影响分析[J]. 地基处理, 2020, 2(3): 231-235.
- JIANG Ye-xiang, LAI Xiao-yong, ZHANG Hong-jian, et al. Impact of deep excavation on adjacent subway tunnels[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2020, 2(3): 231-235.
- [4] 陈仁朋, 王诚杰, 鲁立, 等. 开挖对地铁盾构隧道影响及控制措施[J]. 工程力学, 2017, 34(12): 1-13.
- CHEN Ren-peng, WANG Cheng-jie, LU Li, et al. Influence of excavation on exist metro shield tunnel and control measures[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(12): 1-13.
- [5] 姚爱军, 张剑涛, 郭海峰, 等. 地铁盾构隧道上方基坑开挖卸荷-加载影响研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2318-2326.
- YAO Ai-jun, ZHANG Jian-tao, GUO Hai-feng, et al. Influence of unloading-loading of foundation on shield tunnel underneath[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(7): 2318-2326.
- [6] 黄宏伟, 黄栩, SCHWEIGER F H, 等. 基坑开挖对下卧运营盾构隧道影响的数值模拟研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(3): 182-189.
- HUANG Hong-wei, HUANG Xu, SCHWEIGER F H, et al. Numerical analysis of the influence of deep excavation on underneath existing road tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(3): 182-189.
- [7] 浙江省住房和城乡建设厅. 建筑基坑工程技术规程: DB33/T 1096—2014[S]. 浙江: 浙江工商大学出版社, 2014.
- Department of Housing and Urban Construction of Zhejiang Province. Technical Specification for Building Foundation Excavation Engineering: DB33/T 1096 — 2014[S]. Zhejiang: Zhejiang Gongshang University Press, 2014.
- [8] 陈俊辉, 杨磊, 李慧慧, 等. 砂土地基地铁隧道受旁侧基坑开挖变形影响实例分析[J]. 浙江建筑, 2018, 35(3): 26-30.
- CHEN Jun-hui, YANG Lei, LI Hui-hui, et al. Example analysis on the deformation influence of the side pit excavation to the underground railway tunnel with sandyground[J]. Zhejiang Construction, 2018, 35(3): 26-30.