DOI：10.11779/CJGE2023S20030

# 深基坑开挖对邻近双线地铁隧道变形影响实测分析

顾晓卫[1]，易子浩[2]，王 哲[2]，苌 宽[*2]
（1. 杭州杭港地铁有限公司，浙江 杭州 310017；2. 浙江工业大学岩土工程研究所，浙江 杭州 310023）

**摘 要：**基坑开挖卸载会导致周围土体以及邻近地铁隧道产生变形，过大的变形会严重危害地铁隧道的安全运营。为研究深基坑开挖对邻近双线地铁隧道变形的影响，以杭州某邻近已运营隧道的基坑工程为依托，结合施工现场的监测数据，对基坑开挖全过程中的基坑变形及隧道变形进行实测分析，探究基坑变形与旁侧地铁隧道变形数据的联系。

**关键词：**基坑；运营隧道；实测分析；开挖；变形
**中图分类号：**TU411 **文献标识码：**A **文章编号：**1000−4548(2023)S2-0214-06

**作者简介：**顾晓卫(1983— )，男，硕士，高级工程师，主要从事地铁保护、土建结构及轨道维保、地铁运营管理等方面的工作。E-mail：xiaowei.gu@mtrhz.com.cn。

# Influences of excavation of deep foundation pits on deformation of adjacent double-line subway tunnels through measurement analysis

GU Xiaowei[1], YI Zihao[2], WANG Zhe[2], CHANG Kuan[2]
(1. Hangzhou MTR, Hangzhou 310017, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** The excavation and unloading of foundation pits will lead to the deformations of the surrounding soil and the adjacent subway tunnels. The excessive deformation will seriously endanger the safe operation of subway tunnels. In order to study the influences of excavation of deep foundation pits on the deformation of the adjacent double-line subway tunnels, based on the foundation pit project adjacent to an operating tunnel in Hangzhou, combined with the monitoring data of the construction site, the deformations of the foundation pit and the tunnel during the whole process of excavation of foundation pit are measured and analyzed, and the relationship between the deformation of the foundation pit and the deformation data of the adjacent subway tunnel is explored.

**Key words:** foundation pit; operating tunnel; measurement analysis; excavation; deformation

## 0 引 言

城市轨道交通快速发展，越来越多的基坑工程在既有地铁隧道旁侧或上方施工。然而基坑开挖卸载会导致周围土体的应力状态发生变化，进而导致邻近地铁隧道产生道床沉降、水平位移、水平收敛等变形，当隧道变形超过一定限度，就会影响地铁正常使用和安全。因此为保证基坑工程邻近隧道的安全，需研究基坑开挖施工过程对邻近运营地铁隧道变形的影响。

李志高等[1]通过实测分析研究推导了一种考虑时空效应影响的隧道隆起经验计算方法。胡海英等[2]通过数值模拟和隧道实测综合分析了基坑开挖对地铁隧道的影响，研究表明基坑开挖深度和隧道与基坑之间的位置关系不同会导致邻近隧道不一定受到卸荷影响，有时也会出现围压增加的情况。马少俊等[3]通过实测分析说明了门式加固和分区分块开挖措施对减小隧道变形影响的可行性。丁智等[4-5]通过实测数据对隧道变形与基坑围护结构土体位移之间的关系展开研究，分析了注浆和基坑开挖顺序对地铁隧道变形的影响。Chen 等[6]通过现场监测和数值模拟研究了临近开挖、周围土体与既有双隧道的相互作用机理。张俊峰等[7]通过单纯形法和有限元法计算预测了基坑开挖最终引起的隧道隆起量。黄宏伟等[8]通过有限元模拟对不同工况下基坑开挖对下卧隧道的影响进行研究，得出土体加固以及堆载都能减小基坑开挖引起隧道变形的结论。赵志孟等[9]利用 MIDAS/GTS 有限元软件对基坑开挖工况进行模拟，结果表明“地连墙+3 道内环撑”支护能有效控制邻近隧道变形。郑刚等[10]采用有限元分析法划分了不同围护结构变形模式和最大水平位移条件下坑外既有隧道变形影响区。王利军等[11]建

收稿日期：2023-11-30
*通信作者(E-mail: 1112106007@zjut.edu.cn)

立超大深基坑开挖模型对基坑开挖过程中坑外地表沉降、围护结构变形和隧道整体变形规律进行了研究，并分析了基坑与邻近地铁隧道相对位置对地铁隧道侧移的影响。Meng 等[12]对饱和高岭土地带既有隧道附近基坑开挖进行了三维离心试验，重点研究了基坑和隧道的各项长期特性，得出了围护结构增强土体强度，基坑开挖降低土体强度等结论。

目前相关学者针对基坑开挖对邻近隧道变形影响研究成果不少，但从实测角度分析深大基坑对邻近双线隧道影响的研究还相对较少。本文以杭州某邻近已运营地铁隧道的基坑为背景，对基坑开挖过程中的相关实测数据进行分析，研究基坑开挖对周围土体及邻近地铁隧道的影响，为后续盾构隧道旁侧基坑的设计与施工提供一定的参考。

## 1　工程概况

### 1.1　工程简介

杭政储出(2019)41 号地块住宅、商业商务及社会停车场库用房项目工程位于杭州市上城区望江新城核心区域内，其中二期基坑分为#1，#2，#3 地块以及#4 地块，如图 1 所示，整体上设置 1～3 层地下室，基坑面积约 40000 m$^2$，周长约 800 m，#1，#2，#3 地块一层地下室区域基坑普遍开挖深度约 8.4 m，二层地下室区域基坑普遍开挖深度约 14 m，三层地下室区域基坑普遍开挖深度约 21.1 m；#4 地块二层地下室区域基坑普遍开挖深度约 12.05 m，三层地下室区域基坑普遍开挖深度约 16～17 m。基坑及隧道的位置关系剖面图如图 2 所示。由于该项目尚未施工完成，因此本文选取#1，#2，#3 地块已完成施工的 3A5 分坑进行分析，该分坑位于#1 线与#7 线交界处附近，距离#7 线区间隧道最近约 21.3 m；距离地铁#1 线区间隧道最近约 18.6 m。该坑采用围护墙+止水帷幕+钻孔桩的复核围护结构，设置 1 道混凝土支撑，2 道伺服钢支撑。坑内坑外采用排水沟、集水井明排。

### 1.2　地质水文条件

基坑开挖深度范围内主要潜水主要分布 3 层地下水，上层地下水性质属于孔隙潜水，中部地下水性质属于承压水，下层地下水性质属基岩裂隙水。地下水位埋深 1.17～3.10 m，地下水位年变化在 1.0～2.0 m。土层信息如表 1 所示，3A5 基坑坑底位于 5-1 粉质夹砂质粉土层，地连墙底位于 8 粉质黏土层。

表 1　土层信息

Table 1 Information of soil layers

| 序号 | 土层名称 | 重度 $\gamma$/(kN·m$^{-3}$) | 黏聚力 $c$/kPa | 内摩擦角 $\varphi$/(°) |
|---|---|---|---|---|
| 1-1 | 杂填土 | — | — | — |
| 2 | 砂质粉土 | 18.9 | 6.3 | 32.6 |
| 3 | 粉砂 | 19.5 | 3.7 | 36.6 |
| 5-1 | 粉砂夹砂质粉土 | 19.2 | 4.8 | 34.6 |
| 5-1-1 | 黏质粉土 | 18.5 | 9.1 | 27.4 |
| 5-2 | 砂质粉土 | 19.1 | 5.7 | 33.7 |
| 6 | 淤泥质粉质黏土夹砂土 | 17.6 | 15 | 12.9 |
| 7 | 粉质黏土 | 18.8 | 39.7 | 18.9 |
| 8 | 粉质黏土 | 18.1 | 28.4 | 15.8 |

### 1.3　监测项目及布置

基坑的监测内容主要为深层土体水平位移及地表沉降。隧道监测主要工作内容包括隧道结构道床沉降、水平位移、水平收敛。监测点具体布置情况如图 3 所

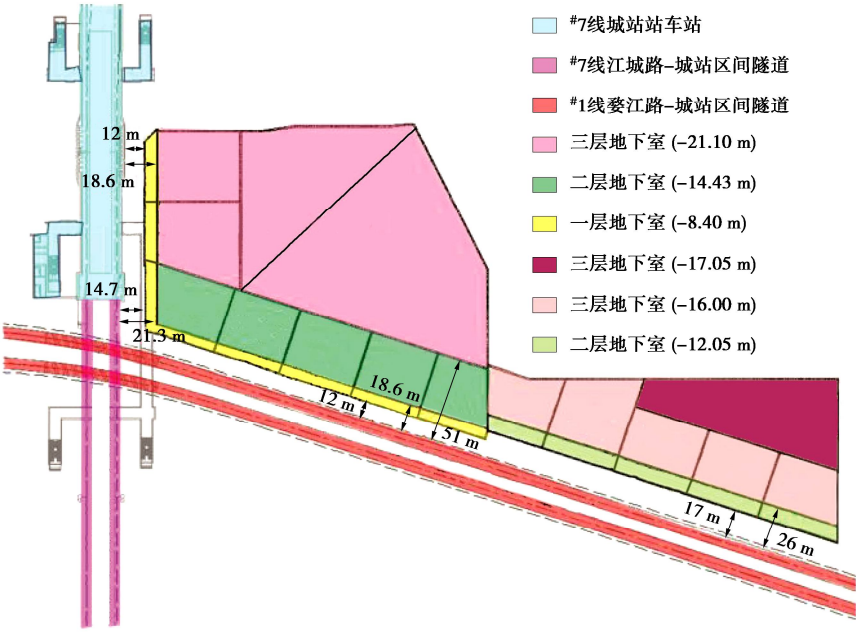



图 1　基坑设计概况图

Fig. 1 Design diagram of foundation pit

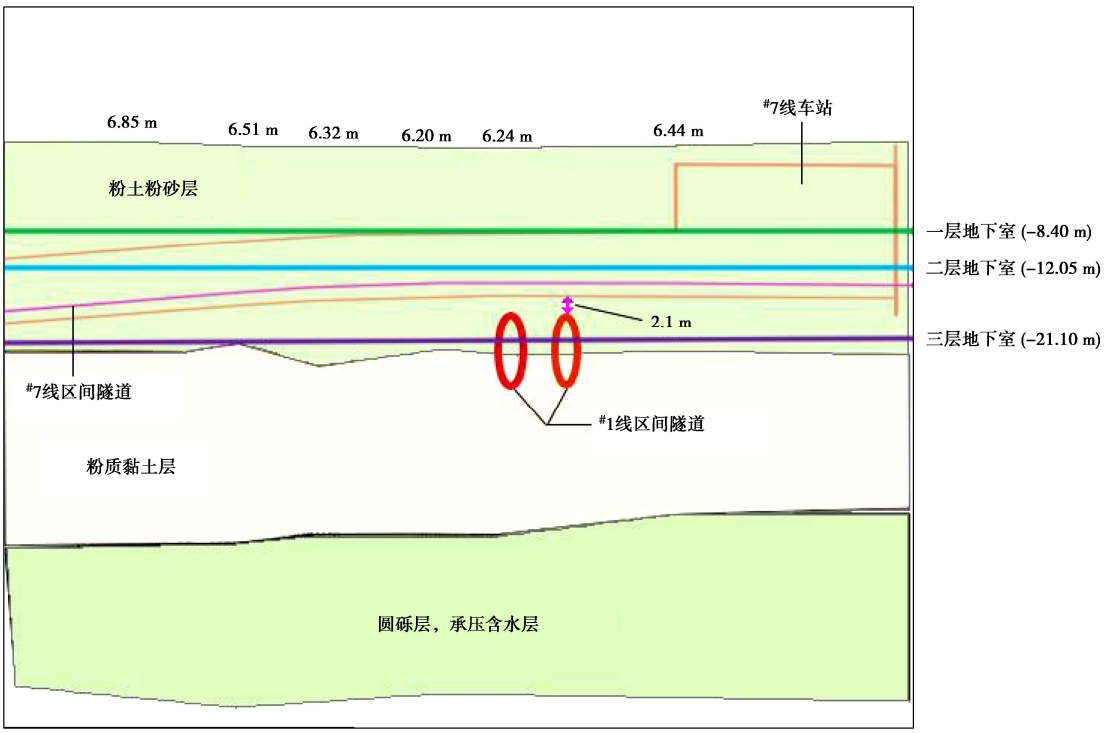



图 2 隧道地质剖面图

Fig. 2 Geological profile of tunnel

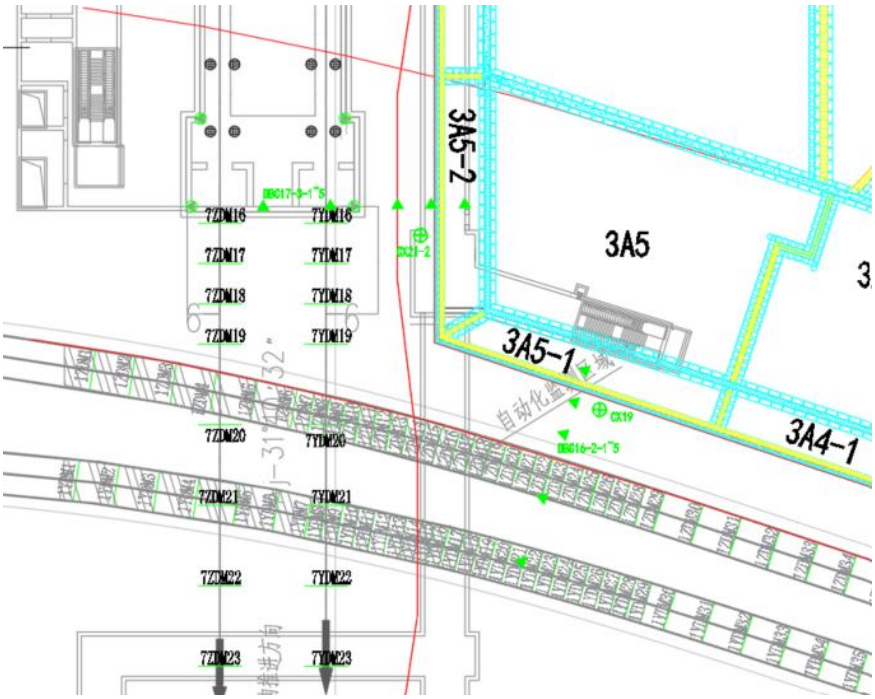



图 3 监测点布置图

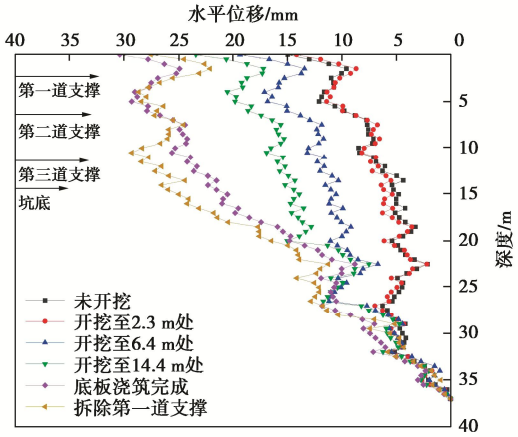
Fig. 3 Layout of monitoring points

示，其中 DBC16-X，DBC17-X 为各地表沉降监测点，CX19，CX21-2 为 3A5 分坑深层土体监测点，其余编号为隧道监测断面，其中常规断面间距 6 m（5 环），加密断面间距 2.4 m（2 环）。

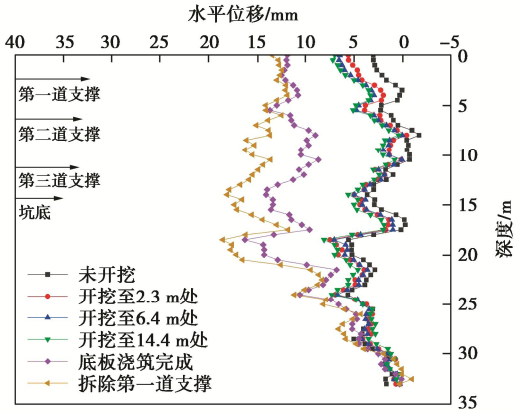
## 2 土体水平位移实测分析

图 4 为深层土体水平位移曲线图，其中纵坐标为深度，横坐标为水平位移，正值表示土体朝坑内方向移动，负值表示土体朝坑外方向移动。总体上基坑开挖过程中围护结构外侧土体深层水平位移表现为朝坑内方向移动，其中开挖后 CX19 测点土体最大累计水平位移为 18.7 mm，出现在地下 10 m 深度处；CX21-2 测点土体最大累计水平位移为 12.9 mm，出现在地下 8.5 m 深度处。

由图 4 可知，基坑开挖过程中地表即曲线顶端都有一定的水平位移，这是因为该基坑开挖深度大，坑顶设置大刚度支撑而产生的土体变形模式。不同于以往文献中的“鼓肚形”、“双峰形”等深层土体水平位移曲线，由于伺服钢支撑系统的应用，本文曲线呈现为“阶梯形”，且“阶梯”出现在 3 道支撑之间，说明支撑的架设能有效控制土体向坑内水平位移。




（a）CX19




（b）CX21-2

图 4　深层土体水平位移曲线图

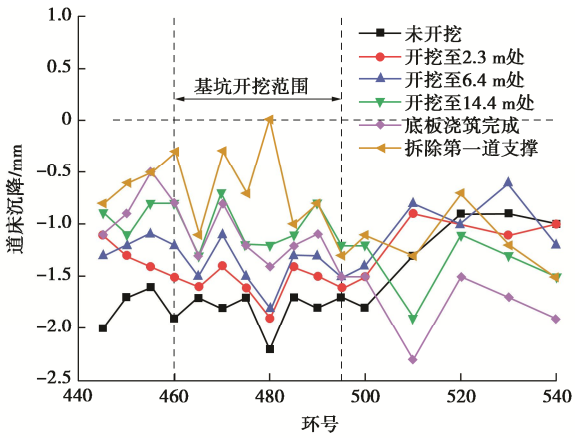
Fig. 4 Curves of horizontal displacement of deep soil

结合两个曲线图可以发现，开挖至 2.3 m 到开挖至 6.4 m 以及开挖至 14.4 m 到底板浇筑完成期间位移变化幅度较大，原因在于这些工况之间往往存在着支撑架设以及底板浇筑等施工环节，因此现场围护结构大概率暴露在无支撑状态下，在两侧土体的挤压下产生了较大的水平位移。

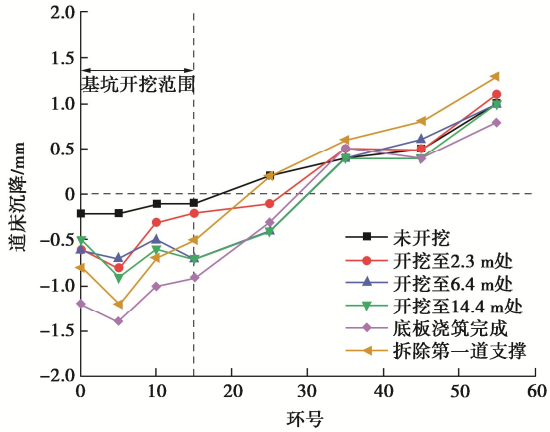
## 3　隧道变形分析

### 3.1　隧道道床沉降分析

图 5 为基坑开挖时隧道道床的沉降曲线图，其中横坐标为隧道环号，纵坐标为道床沉降值，正值表示隆起，负值表示沉降。由图 5 可知，基坑未开挖前地铁#1 线与#7 线隧道均已存在一定程度的沉降，可见开挖前的各项施工措施带来的影响是不可忽视的。




（a）#1线




（b）#7线

图 5　隧道道床沉降曲线图

Fig. 5 Curves of settlement tunnel bed

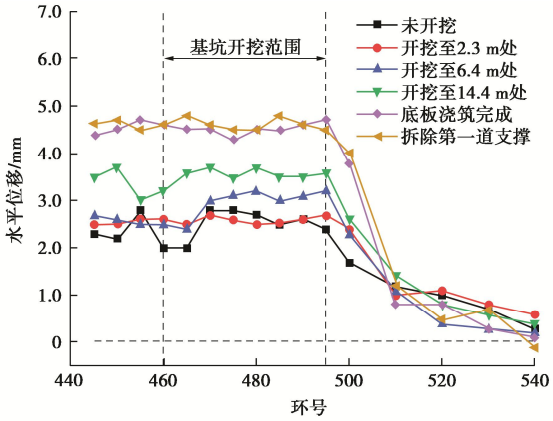
基坑开挖阶段的卸荷作用会导致坑底土体回弹，两侧土体向坑内挤压，土中邻近隧道会受斜上方压力而产生上浮现象，但其影响区存在一个范围，超出影响区不远处的土中隧道反而会有所下沉。#1 线隧道距基坑水平距离较近，在整个基坑开挖过程中始终呈现隆起的趋势，其中道床沉降最大值同时也是变化幅度最大环处，出现在开挖范围对应环段的偏东侧。#7 线地铁隧道顶部埋深与基坑开挖深度相近，位于坑外的变形过渡区，且本次分析采用监测点为地铁车站主体外的 0-55 环隧道，该段隧道已位于基坑开挖边缘处，因此其变形特征与#1 线隧道有所不同。从整体上看#7 线隧道在开挖至底板浇筑完成阶段保持沉降趋势，而在底板浇筑完成到上部结构完成阶段发生小幅隆起。对比两条隧道的道床沉降可以发现，距离基坑较近的隧道，其道床变形以隆起为主，且开挖过程中的变形相对较大，说明底板浇筑能够有效控制坑底土体的变形，进而控制土中隧道的变形。

### 3.2　隧道水平位移分析

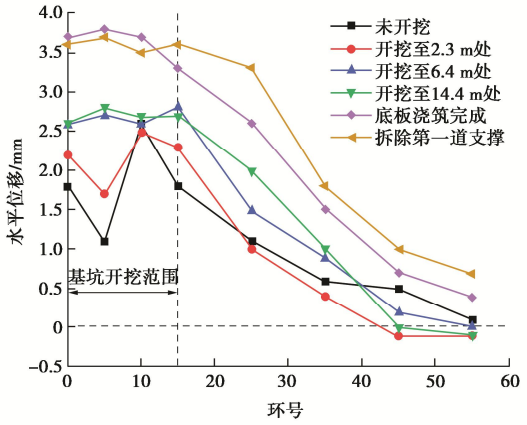
图 6 为基坑开挖时隧道结构的水平位移曲线图，纵坐标为水平位移值，其中正值代表隧道向坑内位移，

负值代表隧道向坑外位移。从整体上看，#1 线隧道在基坑开挖范围内的隧道结构水平位移分布均匀。而由于基坑分块开挖带来的卸荷应力集中效应，#7 线隧道的水平位移增幅主要集中在基坑偏南对应位置。

此外，#1 线与#7 线隧道的最大增幅都出现在开挖至坑底到底板浇筑完成阶段，说明开挖中后期地铁隧道的水平位移发展最快，因为随着基坑的开挖，坑内卸载量逐渐增大，导致基坑围护结构和周边土体的侧移，进而导致邻近隧道的侧向土压力增大，因此其水平位移增长率持续提升。




（a）#1线




（b）#7线

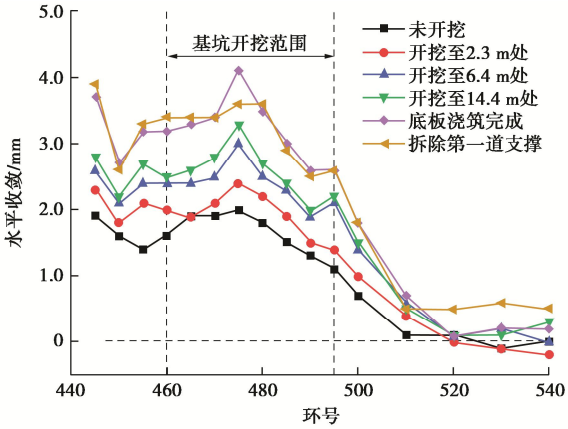
图 6 隧道水平位移曲线图

Fig. 6 Curves of horizontal displacement of tunnel

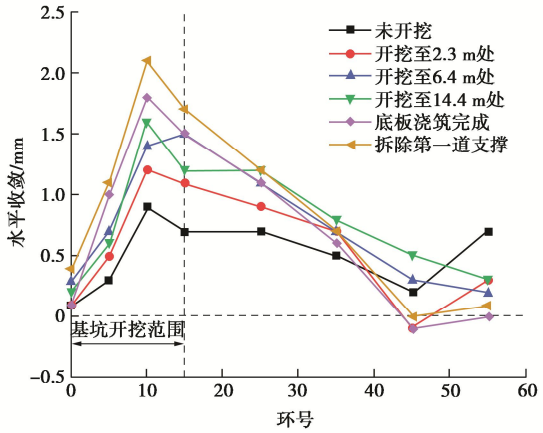
### 3.3 隧道收敛变形分析

图 7 为基坑开挖时隧道结构的水平收敛曲线图，纵坐标为水平收敛值，其中正值代表隧道横向直径变大，负值代表隧道横向直径变小。从图中可以看出，基坑未开挖时隧道断面特别是#1 线隧道已经产生了一定的水平收敛变形，主要原因是开挖前桩基加固后土体的刚度增加，这对下方隧道产生了一个竖向力，导致其产生水平收敛。随着隧道上方基坑的开挖卸载，隧道上方土压力骤减，但水平土压力基本保持不变，导致隧道的收敛变形持续增长。整体上看，水平收敛值及其增幅都是靠近基坑的#1 线隧道变化更明显，这与道床沉降、水平位移所呈现出来的规律基本相同。

无论是#1 线还是#7 线隧道，其水平收敛的增长幅度都均匀地分配在各个工况中，并没有较明显的大幅增长。但#1 线隧道伴随着拱顶拱底受到挤压，以及朝向坑内的水平位移，产生了明显的“横鸭蛋”式变形，且最大水平收敛达到了 4.1 mm，虽未超过 5 mm 的控制值，但也已表明基坑开挖对隧道结构的收敛变形造成了较大影响。




（a）#1线




（b）#7线

图 7 隧道水平收敛曲线图

Fig. 7 Horizontal convergence curves of tunnel

## 4 结 论

以杭州某邻近已运营地铁隧道的基坑工程为背景，结合现场监测数据对周围土体及邻近双线地铁隧道变形进行实测分析，得到 4 点结论。

（1）邻近地铁隧道施工的基坑外侧深层土体水平位移表现为“阶梯形”曲线，最大水平位移出现在基坑开挖面附近，坑外地表沉降变形主要发生在基坑开挖中后期。基坑开挖后围护结构长时间无支撑暴露是坑外土体变形的主要原因，因此在实际工程中应合理安排施工顺序，及时架设支撑，并通过实时监测手段控制基坑变形。

（2）地铁隧道自身的结构刚度能有效控制基坑开

挖引起的土体变形，因此对于长期运营并已产生较多病害的地铁隧道旁侧基坑施工，应在未开挖前做好地铁隧道的病害治理，并重视基坑周围的土体加固情况。

（3）基坑开挖过程中邻近地铁隧道的道床变形以隆起为主，且距离越近道床受到影响越大。但受隧道横向距离与埋深情况影响，超出一定范围的隧道道床在基坑施工期间的变形会由隆起变为沉降。

（4）临近地铁隧道的水平位移较大变化都出现在开挖中后期，底板浇筑完成后变形趋势明显减弱。地铁隧道的水平收敛与水平位移变形趋势相近，并与坑外深层土体水平位移呈现出明显关联，其在基坑开挖过程中产生显著的水平位移和“横鸭蛋”式收敛变形。

限于实际工程的客观原因，未能分析基坑各 分区间开挖互相影响，未能收集围护结构侧向土压力、孔隙水压力等数据，也未能完整分析基坑开挖对邻近隧道的变形机制，后续可进一步开展相关现场监测研究。

## 参考文献：


[1] 李志高, 刘　浩, 刘国彬, 等. 基坑开挖引起下卧隧道位移的实测分析[J]. 地下空间与工程学报, 2005(4): 619-623. (LI Zhigao, LIU Hao, LIU Guobin, et al. Analysis of tunnel displacement caused by excavation of foundation pit [J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2005(4): 619-623. (in Chinese))

[2] 胡海英, 张玉成, 杨光华, 等. 基坑开挖对既有地铁隧道影响的实测及数值分析[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(增刊 2): 431-439. (HU Haiying, ZHANG Yucheng, YANG Guanghua, et al. Measurement and numerical analysis of effect of excavation of foundation pits on metro tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(S2): 431-439. (in Chinese))

[3] 马少俊, 李鑫家, 王乔坎, 等. 某深基坑开挖对邻近既有盾构隧道影响实测分析[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2022, **4**(1): 86-94. (MA Shaojun, LI Xinjia, WANG Qiaokan, et al. Influence of deep excavation on adjacent existing shield tunnel: field measurement and analysis[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2022, **4**(1): 86-94. (in Chinese))

[4] 丁　智, 张　霄, 金杰克, 等. 基坑全过程开挖及邻近地铁隧道变形实测分析[J]. 岩土力学, 2019, **40**(增刊 1): 415-423. (DING Zhi, ZHANG Xiao, JIN Jieke, et al. Measurement analysis on whole excavation of foundation pit and deformation of adjacent metro tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(S1): 415-423. (in Chinese))

[5] 丁　智, 张　霄, 梁发云, 等. 软土基坑开挖对邻近既有隧道影响研究及展望[J]. 中国公路学报, 2021, **34**(3): 50-70. (DING Zhi, ZHANG Xiao, LIANG Fayun, et al. Research and prospects regarding the effect of foundation pit excavation on an adjacent existing tunnel in soft soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, **34**(3): 50-70. (in Chinese))

[6] CHEN R P, MENG F Y, LI Z C, et al. Investigation of response of metro tunnels due to adjacent large excavation and protective measures in soft soils[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2016, **58**: 224-235.

[7] 张俊峰, 王建华, 陈锦剑, 等. 跨越运营地铁隧道超大基坑开挖的土体参数反分析[J]. 上海交通大学学报, 2012, **46**(1): 42-46, 52. (ZHANG Junfeng, WANG Jianhua, CHEN Jinjian, et al. 3-D FEM back-analysis of an over size and deep excavation[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2012, **46**(1): 42-46, 52. (in Chinese))

[8] 黄宏伟, 黄　栩, Schweiger F.Helmut. 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 Hongwei, HUANG Xu, HELMUT S F. Numerical analysis of the influence of deep excavation on underneath existing road tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, **45**(3): 182-189. (in Chinese))

[9] 赵志孟, 郑伟锋, 刘慧芬. 基坑开挖对临近隧道的变形影响分析[J]. 广东土木与建筑, 2021, **28**(5): 71-74. (ZHAO Zhimeng, ZHENG Weifeng, LIU Huifen. Analysis of the deformation influence on adjacent tunnels caused by pit excavation[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2021, **28**(5): 71-74. (in Chinese))

[10] 郑　刚, 杜一鸣, 刁　钰, 等. 基坑开挖引起邻近既有隧道变形的影响区研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(4): 599-612. (ZHENG Gang, DU Yiming, DIAO Yu, et al. Influenced zones for deformation of existing tunnels adjacent to excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(4): 599-612. (in Chinese))

[11] 王利军, 邱俊筠, 何忠明, 等. 超大深基坑开挖对邻近地铁隧道变形影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2020, **40**(6): 77-85. (WANG Lijun, QIU Junjun, HE Zhongming, et al. Influence of excavation of super deep foundation pit on deformation of adjacent metro tunnel[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2020, **40**(6): 77-85. (in Chinese))

[12] MENG F Y, CHEN R P, LIU S L, et al. Centrifuge modeling of ground and tunnel responses to nearby excavation in soft clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2021, **147**(3): 04020178.


（编校：胡海霞）