DOI：10.11779/CJGE2014S2055

砂性土地基深基坑工程对周边环境的影响分析

俞建霖[1,2]，夏 霄[1,2]，张 伟[3]，胡立科[3]

(1. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心，浙江 杭州 310058；2. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室，浙江 杭州 310058；3. 杭州龙湖房地产开发有限公司，浙江 杭州 310058)

摘 要：随着城市建设的发展，周边环境复杂的深基坑工程数量明显增多，基坑的开挖必将改变周围土体应力场，对周边环境产生影响。以杭州一紧邻地铁隧道的砂性土地基深基坑工程为例，运用 Plaxis 软件对基坑施工过程中围护结构以及临近隧道变形进行模拟，并与现场监测数据进行了对比分析，探讨了基坑外土体位移的衰减规律。结果表明：计算结果与实测结果基本吻合，砂性土地基深基坑开挖会引起围护结构、周边土体以及临近隧道产生向基坑方向的位移，变形规律与开挖工况以及距基坑远近密切相关。本文结果为类似砂性土地基深基坑工程设计及施工提供有益借鉴。

关键词：基坑开挖；盾构隧道；现场监测；数据分析

中图分类号：TU470 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2014)S2－0311－08

作者简介：俞建霖(1972－)，男，福建福清人，博士，副教授，主要从事软黏土力学、基坑工程、地基处理及土工数值分析的研究。E-mail: yujianlin72@126.com。

Effect of sandy soil deep excavation engineering on adjacent circumstance

YU Jian-lin[1,2], XIA Xiao[2], ZHANG Wei[3], HU Li-ke[3]

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3.Hangzhou Longfor Properties Co., Ltd., Hangzhou 310058, China)

Abstract: With the rapid development of modern cities, the number of deep excavation sites adjacent to complicated surroundings is increasing significantly. The construction of excavations will change the soil stress around the site and affect the surrounding circumstance. According to the practice of a sandy deep foundation site neighboring the metro tunnel in Hangzhou, the retaining structure of deep foundation and the deformation of tunnel nearby during the construction of excavation are simulated by Plaxis considering the attenuation law of the deformation of the soils around the foundation. By analyzing the measured data, the results show that the calculated results are is basically consistent with the field surveys. Furthermore, the retaining structure, surrounding sandy soils and the adjacent tunnel will shift toward the site during the construction of deep excavation. The deformation rules greatly related with the construction schedule of excavation and the distance of site. This study may provide reference for the design of sandy deep foundation pit engineering.

Key words: foundation excavation; shield tunnel; site monitoring; data analysis

0 引 言

随着城市化进程的快速发展，城市规模急剧扩大，深大基坑工程数量也迅速增加，不可避免地会在临近地铁隧道等复杂周边环境下进行各种基坑的施工活动。由于地铁隧道的变形要求极为严格，若产生变形过大，会使隧道产生附加沉降，衬砌漏水、漏泥，影响隧道的使用和适用性，甚至造成隧道主体结构发生破坏[1]。上海市地铁邻沿线建筑物施工保护地铁技术管理暂行规定[2]中指出：地铁结构最终绝对位移不能超过 20 mm，变形曲率半径不小于 15000 m，相对曲率不大于 1/2500。艾鸿涛[3]和戚科骏[4]分析过临近隧道的基坑开挖变形，指出基坑的加固程度和开挖过程中的时间因素都影响隧道的最终变形。况龙川等[5]通过实测分析指出隧道旁侧开挖将引起隧道向基坑方向产生水平位移。蒋洪胜等[6]也基于实测数据，分别从隧道的水平位移，垂直沉降以及水平收敛研究了基坑开挖对于临近隧道的影响。王卫东等[7-8]通过数值模拟方式分析了基坑开挖对隧道的影响并提出了分析和对

基金项目：杭州市建委资助项目

收稿日期：2014－07－28

策。朱正锋等[9]研究指出了基坑合理的开挖方式可有效地限制隧道位移。但上述研究都集中在北京、上海、广州等地，对于杭州的实测分析较少，考虑到岩土工程的区域性以及复杂性，有必要对杭州地区砂性土地基深基坑开挖对周围环境影响进行分析。

本文以杭州某地块工程实例，采用数值分析方法模拟了砂性土地基深基坑开挖过程中围护结构的变形及其对临近隧道的影响，在施工过程中对基坑以及临近隧道的变形进行了系统的监测，并将实测结果与数值模拟结果进行了对比分析。

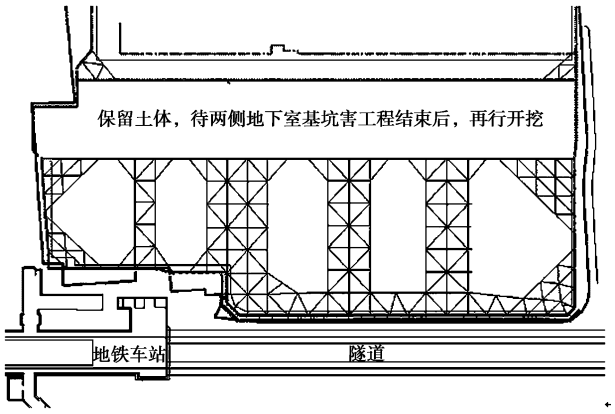


图 1 基坑与隧道相对位置平面示意

Fig. 1 Locations of foundation pit and tunnel

1 工程概况

1.1 基坑概况

某工程位于杭州下沙经济技术开发区，基坑南侧毗邻杭州地铁某车站的主体结构及隧道（图 1）周围环境条件比较复杂，。本工程±0.000 相当于绝对标高 6.300 m，自然地坪相对标高为−0.150 m（即绝对标高 6.150 m）。地铁隧道中心点绝对标高−6.090 m，直径 6.2 m，壁厚 350 mm，轨顶绝对标高−7.950 m，隧道与地下室之间的净距离仅为 9.3 m。基坑周边地下管线密集，对基坑稳定和变形要求较高。因为该工程面积大，开挖深度深，且临近地铁隧道，周边环境条件较为复杂，故该基坑采用二阶段实施的方案，即在基坑中部保留部分土体（宽度大于 22 m），将原基坑分为南、北两个区块先行施工，待二个区块的地下室施工完毕后再开挖中部保留土体。其中南区基坑落地面积近 16790 m^2，东西向最大宽度约为 250 m，南北向最大宽度约为 75 m，开挖深度达到 15.00～18.55 m。

1.2 地质条件

拟建场地地质剖面详图如图 2 所示，基坑开挖深度影响范围内各土层主要物理力学性质指标见表 1 所示。

场地地下水主要存在两层地下水，分别为赋存在浅部粉砂性土层中的孔隙潜水与赋存在下部⑤层砂土及圆砾层的孔隙承压水。勘察期间实测潜水位埋深在 0.7～3.7 m 之间，年水位变化幅度约 1.0～1.5 m。承压水隔水顶板埋深 54.4～57.5 m，承压水水位埋深约 4 m 左右。

1.3 基坑围护体系设计

根据基坑的开挖深度、环境条件和地质条件，该基坑采用钻孔灌注桩排桩墙及地下连续墙结合三道钢筋混凝土内支撑作为挡土结构。

基坑北侧区域环境条件相对较好，采用 φ800@1000 和 φ900@1100 钻孔灌注桩形成排桩墙，排

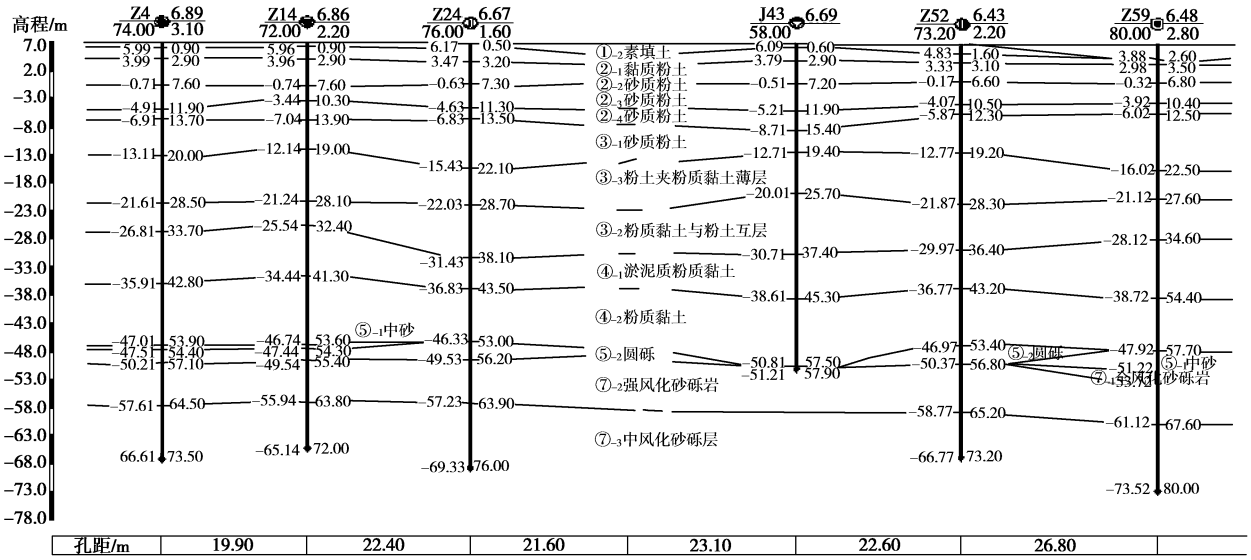


图 2 地质剖面详图

Fig. 2 Geological section

表 1 各土层主要物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

序号	土层名称	w /%	γ /(kN·m^{-3})	e	压缩模量/MPa	水平渗透系数/(cm·s^{-1})	地基承载力特征值/kPa	固结快剪 c/kPa	固结快剪 φ/(°)
1-1	杂填土		18.30					12.0	15.0
1-2	素填土		17.30					13.0	16.0
2-1	黏质粉土	27.6	18.77	0.802	12.40	2.7×10^{-4}	120	8.5	29.6
2-2	砂质粉土	27.3	18.88	0.775	11.80	2.3×10^{-4}	150	8.4 (7.8)	30.2
2-3	砂质粉土	24.8	19.28	0.682	12.63	2.3×10^{-4}	140	6.1	31.9
2-4	砂质粉土	25.4	19.19	0.708	12.94	2.1×10^{-4}	110	6.3	32.7
3-1	砂质粉土	24.3	19.14	0.709	11.83	2.5×10^{-4}	155	8.2 (7.9)	32.5
3-2	粉土夹粉质黏土薄层	29.0	18.49	0.839	10.68		140	10.1	32.7
3-3	粉质黏土与粉土互层	30.9	18.23	0.869	7.26		100	23.0	22.2

桩外侧设置三轴搅拌桩 3φ850@600 止水帷幕，如图 3 所示。

南侧区域基坑临近地铁车站及隧道，周围环境条件比较复杂，采用 800 mm 厚地下连续墙作为围护结构，并在地下连续墙外侧增设一排φ800@1500～2000 钻孔灌注桩排桩墙，地下连续墙与排桩墙顶通过设置混凝土盖板形成门式刚架，以提高围护墙的刚度，减小其变形。为控制地下连续墙成槽对周边环境的不利影响，在地下连续墙二侧采用φ850@600 三轴水泥搅拌桩进行槽壁加固，同时在排桩墙和三轴水泥搅拌桩之间增设一排φ1200@900 高压旋喷桩，如图 4 所示。

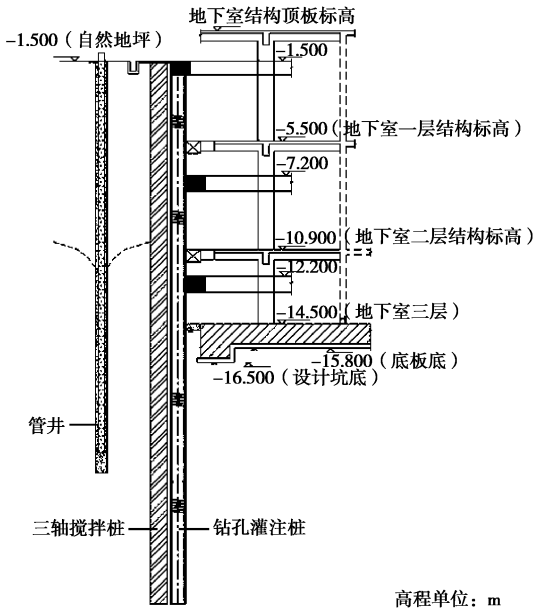


图 3 北面基坑围护剖面图

Fig. 3 Section of north retaining structure

本基坑共设置了 3 道水平支撑，支撑梁顶标高分别为-1.500，-7.200，-12.200 m。支撑梁高度分别为 700，800，800 mm，支撑平面布置如图 5 所示。另外为增加支撑刚度，控制围护结构的变形，在较长的支撑杆件顶面增设 200 mm 厚钢筋混凝土板带。

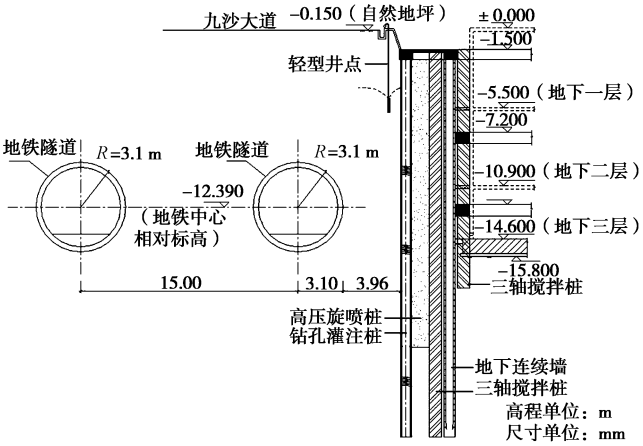


图 4 南面基坑围护剖面图

Fig. 4 Section of south retaining structure

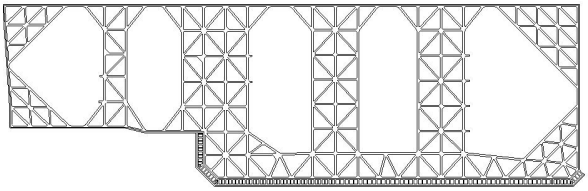


图 5 支撑平面图

Fig. 5 Plan of struts

在基坑外通过采取控制性降水措施减小作用在围护结构上的侧压力，有利于控制围护结构的变形和弯矩，提高基坑稳定性。在环境条件相对宽松的基坑外北侧区域布置适量自流管井，将坑外水位降至地表 8 m 以下。在临近地铁的南侧区域，为减少降水对周边环境的影响，基坑外采用一级轻型井点降水，将地下水位降至地表下 4 m 左右。基坑内部均采用自流管井

疏干降水，为地下室施工创造干燥的施工环境。

经验算，本基坑抗突涌稳定安全系数为 1.43，因此可不考虑承压水突涌问题。

2 基坑开挖引起的围护结构变形及环境影响分析

2.1 分析方法

基坑开挖产生的围护结构侧向变形以及降水渗流均会对周边环境造成影响。为分析基坑开挖与降水施工对周围环境，尤其是地铁隧道的影响，采用两相介质有限元数值模拟开挖与降水过程中水、土、围护结构的相互作用。该基坑长度约 250 m，且与地铁隧道呈平行布置，属于典型平面应变问题，因此采用平面应变模型分析基坑开挖对地铁隧道受力变形的影响，其分析结果是偏于安全的。

2.2 分析模型与参数

平面应变分析模型如图 6 所示。模型两侧水平向约束，底部竖向约束；考虑降水引起的渗流场及其对土体应力场的影响，模型两侧为侧向水源补给，坑外水头分别降至地表下 4 m 与 8 m，坑内采用深井降至开挖面以下 0.5 m；分析方法采用有效应力法，土体材料与桩土界面强度和变形参数均为有效应力指标。

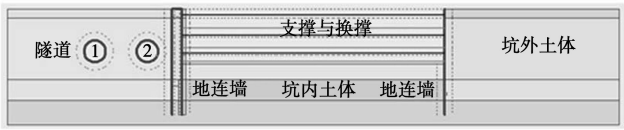


图 6 分析模型

Fig. 6 Numerical model

地下连续墙、支撑结构砼弹性模量取 30000 MPa。地铁隧道外径 6.2 m、壁厚 350 mm、6 片拼装，拼接处按铰接考虑。三轴水泥搅拌桩的割线模量取 260 MPa。水平支撑刚度取主支撑与板截面抗压刚度 5 MN/m。

计算剖面开挖深度为 15.65 m，设有 3 道支撑，开挖与降水计算工况按 4 次开挖和 3 次换撑考虑，具体如表 2 所示。

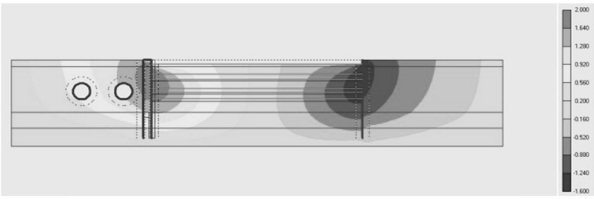
表 2 计算工况

Table 2 Stages of calculation

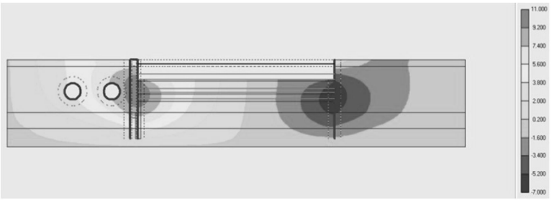
工况	挖深	加撑	拆撑	降水
1	2.1		支撑 3	开始降水
2	7.9	支撑 1	支撑 2	
3	12.9	支撑 2	支撑 1	降至设计水头高
4	15.7	支撑 3		度
5	15.7	底板		
6		负二层板		停止降水
7		负一层板		

分析软件采用岩土工程专用有限元软件 Plaxis。桩体材料采用线弹性模型，土体材料与桩土界面采用 Mohr-Coulomb 理想弹塑性模型，本构关系中参数 c,φ 按照现场如实选取，见表 1。桩土单元均采用高精度的 15 节点三角形等参单元，桩土界面采用 Goodman 单元。

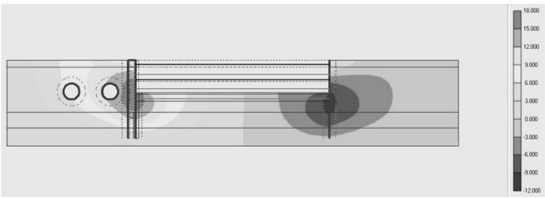
各个施工工况水平位移场分析结果如图 7 所示，地下连续墙的侧向变形分析结果如图 8 所示，隧道水平变形如图 9 所示，隧道竖直变形如图 10 所示。



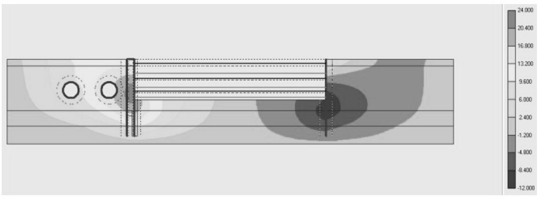
（a）工况1水平位移（地下连续墙位移最大1.9 mm）



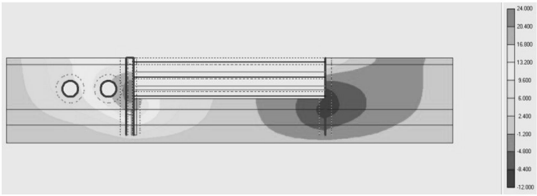
（b）工况2水平位移（地下连续墙位移最大11 mm）



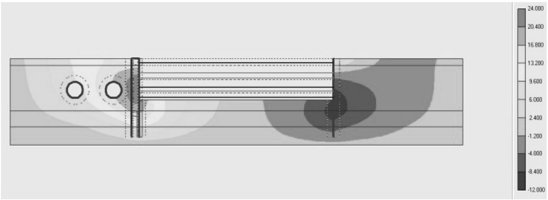
（c）工况3水平位移（地下连续墙位移最大18 mm）



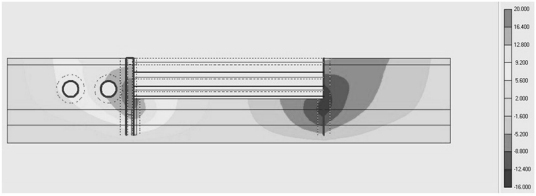
（d）工况4水平位移（地下连续墙位移最大22 mm）



（e）工況5水平位移（地下连续墙位移最大23 mm）



（f）工況6水平位移分布图（地下连续墙位移最大24 mm）



（g）工况7水平位移分布图（地下连续墙位移最大19 mm）

图 7 各工况水平位移云图

Fig. 7 Contours of horizontal displacement at different excavation stages

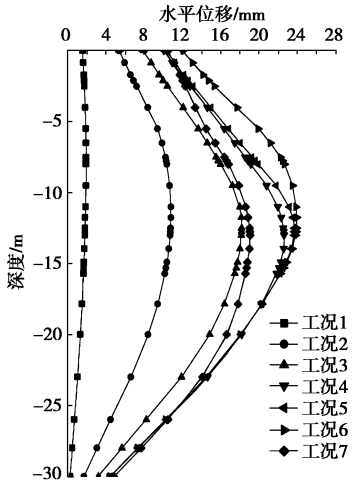


图 8 地下连续墙侧向变形

Fig. 8 Horizontal displacement curves of diaphragm wall

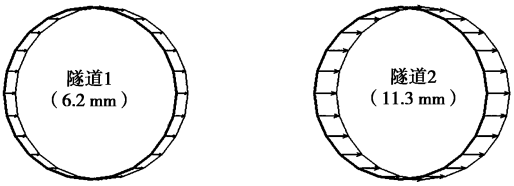


图 9 开挖至基底时隧道水平位移

Fig. 9 Horizontal displacement of tunne after excavation

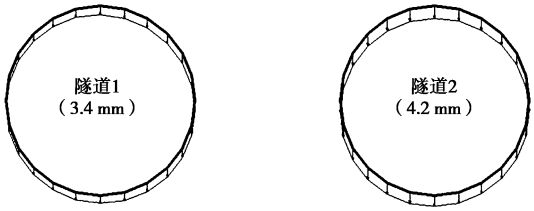


图 10 开挖至基底时隧道竖直位移

Fig. 10 Vertical displacement of tunne after excavation

由上述分析可见：受基坑开挖、降水等因素影响，地下连续墙呈现弓形变形规律，最大位移为 24 mm。基坑开挖至基底时，远离基坑的隧道 1 最大水平位移为 6.2 mm，最大沉降为 3.4 mm；隧道 2 最大位移为 11.3 mm，最大沉降为 4.2 mm。

3 监测方案

在该基坑施工过程中，对基坑支护结构，基坑周围的土体和相邻的隧道进行了全面系统的监测。测点布置见图 11。

3.1 基坑监测

本基坑主要监测内容有：①深层土体水平位移监测，共布置 19 根测斜管（CX01～CX19）。另外在基坑南侧地下连续墙内布置 5 根测斜管（CX09（墙体）～CX13（墙体）），用以研究墙、土之间的位移差异。②基坑内外地下水位监测，共设置 32 个水位观测孔。③钢砼支撑轴力监测：共设置 48 个测点，每道支撑各 16 个测点。④基坑周边地表沉降点：共设置 19 个沉降点。⑤支撑立柱沉降点：共布置 26 个沉降点。此外，在基坑北侧保留土体上布设 2 个深层土体水平位移监测断面，每个断面分别设有 5 根测斜管，测斜管之间中心距为 5 m（TCX01～TCX10），用以研究基坑周围

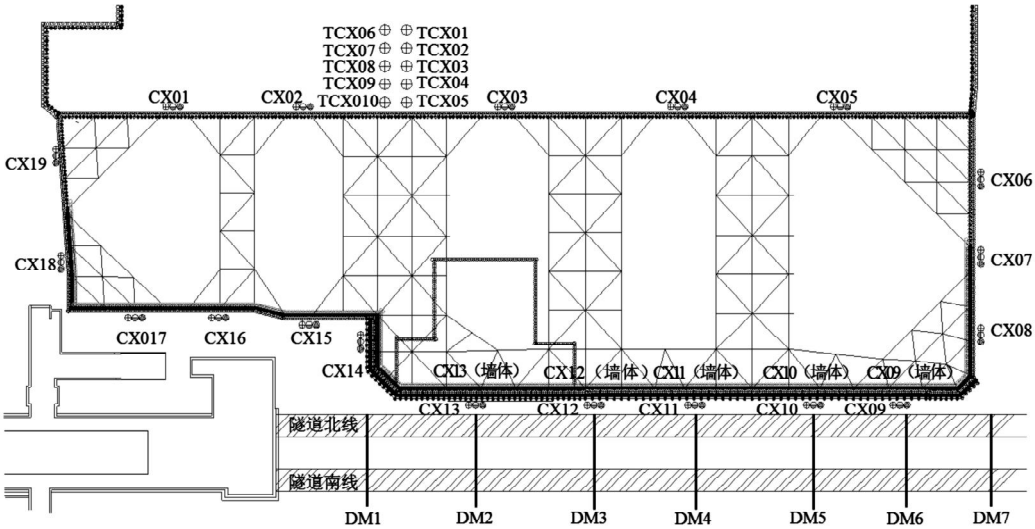


图 11 测点布置

Fig. 11 Layout of measuring points

土体深层水平位移随基坑边距离的衰减规律。

3.2 隧道监测

盾构段隧道监测共布设 39 个断面，其中 7 个为主断面。监测内容包括：①轨道沉降共布置 176 个测点；②隧道沉降共布置 88 个测点；③隧道水平位移共布置 88 个测点；④隧道净空收敛监测共设置 78 组测点；⑤隧道处地表沉降监测共布置 29 个测点。

4 监测数据分析

4.1 基坑围护结构水平位移分析

为了研究基坑围护结构的变形，分别取 CX11（墙体）的水平位移在 4 月 6 日（工况 1）、5 月 3 日（工况 2）、6 月 5 日（工况 3）、7 月 30 日（工况 4）、10 月 1 日（工况 5）、11 月 1 日（工况 6）和 2 月 1 日（工况 7）的监测数据进行分析，得到测斜点 CX11 处地下连续墙最大水平位移与计算结果对比，如图 12 所示。

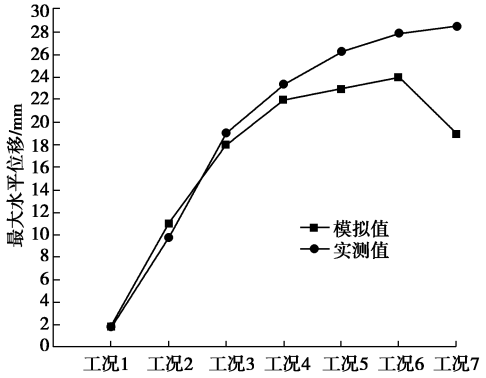


图 12 地下连续墙最大水平位移实测值与模拟值

Fig. 12 Computed and measured maximum horizontal displacements of diaphragm wall

图 12 表明，测斜点 CX11 处地下连续墙的最大水平位移在涉及土体开挖的工况内增长较快，待底板砼浇筑完成后变形速率逐渐放缓。实测值与模拟值基本符合，证实了本文数值模拟计算方案的可行性与正确性。

为分析基坑空间效应对于围护结构变形的影响，现根据基坑东面及南面围护结构各测斜管的最大水平位移进行分析。选取不同工况内基坑东面 CX06～CX08 以及基坑南面 CX09～CX13 的深层土体水平位移监测数据进行分析，得到基坑东面及南面围护结构随时间发展的整体变化趋势，如图 13，14 所示。

图 13 表明，基坑围护结构随工况发展整体向基坑内方向位移，且由于基坑壁两端部的固端作用，导致位于端部附近的 CX6 和 CX8 的水平位移均小于位于基坑中央范围内的 CX7 的水平位移。图 14 同样表明，虽然基坑壁较长，采用的分段开挖施工方式对各点位移发展速率有所影响，但位于基坑壁两端的监测点位移总是小于基坑壁中间范围的监测点位移。由此证实了基坑壁的端部存在显著的空间效应，抑制了其临近区域的位移发展。因此对于长大深基坑的设计、施工以及监测，应充分考虑空间效应的影响，尽可能采取分区分块的施工方法。

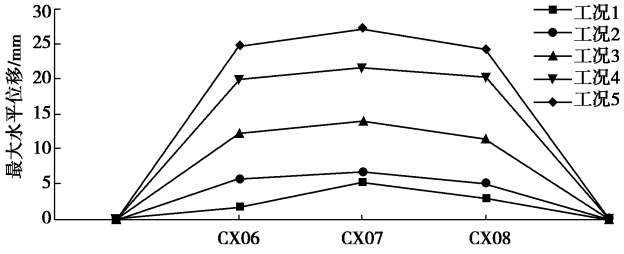


图 13 基坑东侧各测斜管最大水平位移分布图

Fig. 13 Distribution of maximum horizontal displacements of east diaphragm wall

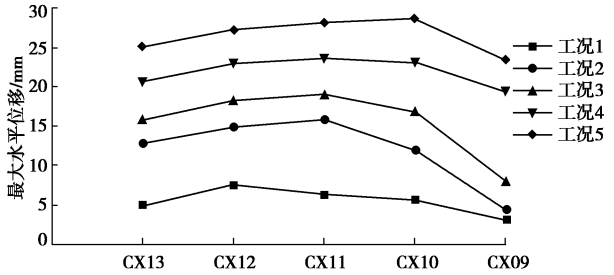


图 14 基坑南侧测斜管最大水平位移分布图

Fig. 14 Distribution of maximum horizontal displacements of south diaphragm wall

4.2 墙土位移历时分析以及相互关系

随着基坑开挖的进行，基坑围护结构及邻近土体均会发生向基坑内方向水平位移。为研究开挖工况对围护结构水平位移的影响以及基坑围护结构和临近土体位移的相互关系，现取基坑南侧地下连续墙中的测斜管 CX11（墙体）和对应坑外土体中的测斜管 CX11（土体）进行对比分析，得到该测点处墙体与土体的最大水平位移历时曲线，如图 15 所示。

图 15 表明，围护结构变形与基坑开挖工况有直接联系。工况 3 挖土期内，墙体最大水平位移从 0.84 mm 发展至 4.29 mm，工况 3 的休止期内土体未进行开挖，但是墙体水平位移仍然发展了近 5 mm。4 月 23 日后墙体水平位移变化速率明显放缓，趋于稳定。工况 4 挖土期内，墙体最大水平位移从 9.52 mm 发展至 16.5 mm，其后变化速率逐渐稳定。可见由于开挖卸荷改变了土体原有应力状态，墙体和土体的水平位移变化速率将明显增大，位移在短时间内迅速增加。待挖土期结束后，因受土体蠕变的影响，桩土位移仍

保持一定的发展，但变化速率会逐渐放缓，趋于稳定。此外，基坑开挖前期围护结构的水平位移大于相应墙后土体的水平位移，即土体变形有一定滞后性。但两位移值于 8 月逐渐逼近，最终水平位移数值趋于一致，以相同变化速率共同发展。说明邻近土体应力重分布完成并且与围护结构变形相互协调稳定。

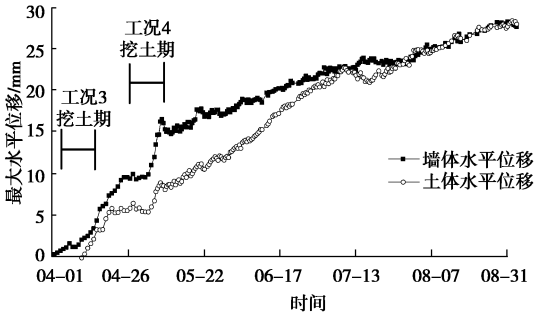


图 15 CX11 实测墙体与土体水平位移曲线

Fig. 15 Curves of horizontal displacement of diaphragm wall and soils during excavation stages

4.3　基坑壁外土体位移衰减规律分析

本工程在基坑北侧保留土体中布设两个深层土体水平位移监测断面，研究深层土体水平位移随着与基坑壁距离增长的变化规律。

选取东侧断面在工况 1、工况 2、工况 3、工况 4 的水平位移监测数据，用断面内各测斜孔最大水平位移值分别除以 TCX05 孔的最大水平位移值，得到水平位移残余系数分布，如图 16 所示。

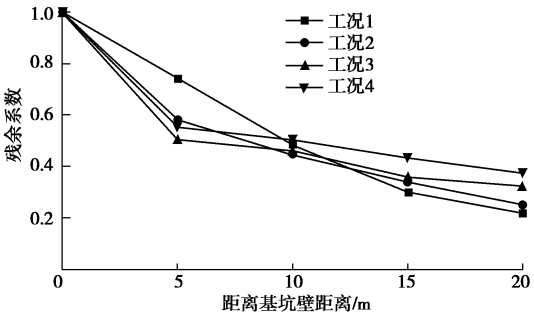


图 16 东断面位移残余系数曲线

Fig. 16 Curves of attenuation coefficient of displacement of east section

图 16 表明，土体水平位移残余系数随与基坑边的距离增大而减小，且在基坑开挖初期近似为线性关系。但随着基坑的开挖，残余系数变化规律发生改变：①距离基坑 5 m 范围内土体水平位移产生了较大衰减，残余系数从开挖初期的 0.74 变为 0.58。②距离基坑 10 m 处的土体水平位移残余系数与开挖初期基本保持一致，约为 0.5。③距离基坑 15 m 和 20 m 处的土体残余系数反而较开挖初期有所增大，说明随着基坑开挖深度的增加，其影响范围不断增大，导致土体水平位移的衰减速度减慢，故残余系数曲线呈现为双折线形式。即基坑边 5 m 范围内土体水平位移衰减较快，5 m 以外的衰减速度较慢且近似成线性分布。

4.4　基坑开挖对隧道水平位移影响分析

杭州地铁一号线隧道紧挨该基坑南侧，故需研究基坑开挖对于隧道位移的影响。图 17，18 为各开挖工况下隧道水平位移的分布曲线。图中 Y 坐标为南北方向，正号代表向基坑方向移动。

图 17，18 表明，①在土体开挖初期，由于隧道距离基坑壁有一定距离，土体位移发展有一定滞后性，且位移传递有所衰减，所以虽然隧道发生向基坑方向移动，但是数值较小。②在开挖至坑底时北线隧道最大水平位移为 9.9 mm，南线隧道最大水平位移为 3.3 mm，实测数据与计算数据比较接近。③北线隧道最大水平位移远大于南线隧道，说明基坑开挖对隧道的影响与二者之间的距离有显著关系。④基坑中部对应的隧道水平位移明显大于其他区域，说明隧道水平位移与基坑水平位移存在着一定的对应关系。

此外，隧道仅在基坑开挖范围内发生明显的向基坑方向位移，开挖范围外的隧道区间反而因为隧道本身具有抗弯刚度而发生一定量背向基坑方向的位移。由此可以看出，基坑开挖范围对隧道水平位移也有一定的影响。

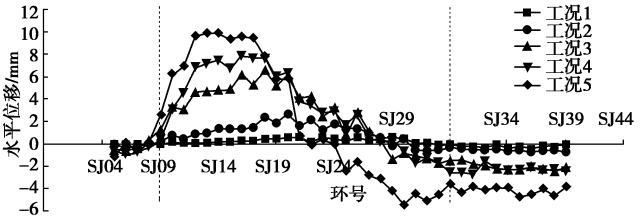


图 17 隧道北线水平位移

Fig. 17 Horizontal displacements of tunnel during excavation stages

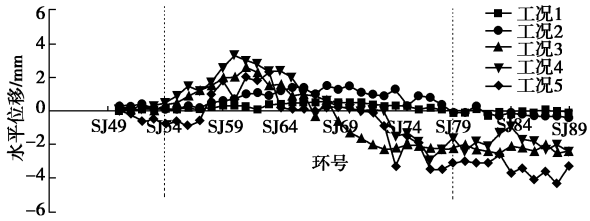


图 18 隧道南线水平位移

Fig. 18 Horizontal displacements of tunnel during excavation stages

5　结　　论

（1）基坑围护结构水平位移随着开挖工况的发展而发展，且具有明显的空间效应。在基坑的设计，

施工以及监测应充分考虑空间效应。

（2）围护结构与临近土体的水平位移在基坑开挖前期会出现差异，但最终两者变形相互协调稳定，基坑开挖阶段后期可将两者水平位移值视作一致。

（3）土体水平位移会随着与基坑壁的距离增加而衰减，其衰减规律与开挖深度有显著关系。随着开挖深度的增加，距离坑壁较近区域土体位移衰减速度加快，但远处土体位移的衰减速度减慢。

（4）临近地铁隧道的深基坑开挖会引起隧道向基坑方向产生明显的水平位移，且与开挖的范围具有比较明确的对应性。

（5）本工程的设计方案有效的控制了基坑开挖对周围环境的影响，通过实测值和计算值对比证明了本文数值模拟计算方案的可行性与正确性。可为类似砂性土地基基坑工程的设计提供有益借鉴。

参考文献：

[1] 高广运, 高 盟, 杨成斌, 等. 基坑施工对运营地铁隧道的变形影响及控制研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(3): 453－459. (GAO Guang-yun, GAO Meng, YANG Cheng-bin, et a1. Influence of deep excavation on deformation of operating metro tunnels and countermeasure[J]. Chinese Journal of Geotechnical and Engineering, 2010, **32**(3): 453－459. (in Chinese))

[2] 沪市政法（94）第 854 号上海市地铁沿线建筑施工保护地铁技术管理暂行规定[S]. 1994. (The interim provisions of metro technology management of the subway protection during construction along the subway in Shanghai[S]. 1994. (in Chinese))

[3] 艾鸿涛. 临近地铁隧道的深基坑工程的变形分析[J].岩土工程学报, 2008, **30**(增刊 1): 43－48. (AI Hong-tao. Deformation analysis of deep foundation pits adjacent to subway tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(S1): 43－48. (in Chinese))

[4] 戚科骏. 临近地铁隧道的深基坑开挖分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(增刊 2): 5485－5489. (QI Ke-jun. Analysis of deep pit excavation adjacent to tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(S2): 5485－5489. (in Chinese))

[5] 况龙川, 李智敏, 殷宗泽. 地下工程施工影响地铁隧道的实测分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, **40**(增刊 1): 79－82. (KUANG Long-chuan, LI Zhi-min, YIN Zong-ze. Analysis of field measurement data on responses of metro tunnel due to substructure construction[J]. Journal of Tsinghua University(Science & Technology), 2000, **40**(S1): 79－82. (in Chinese))

[6] 蒋洪胜, 侯学渊. 基坑开挖对临近软土地铁隧道的影响[J]. 工业建筑, 2002(5): 53－56. (JIANG Hong-sheng, HOU Xue-yuan. The influence of deep excavation on adjacent Metro tunnel in soft ground[J]. Industrial Construction, 2002(5): 53－56.(in Chinese))

[7] 王卫东, 吴江斌, 翁其平. 基坑开挖卸载对地铁区间隧道影响的数值模拟[J]. 岩土力学, 2004, **25**(增刊 2): 251－255. (WANG Wei-dong, WU Jiang-bin, WENG Qi-ping. Numerical modeling of affection of foundation affection of foundation pit excavation on metro tunnel[J]. Rock and soil Mechanics, 2004, **25**(S2): 251－255. (in Chinese))

[8] 王卫东, 沈 健, 翁其平, 等. 基坑工程对邻近地铁隧道影响的分析与对策[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(增刊 1): 1340－1345. (WANG Wei-dong, SHEN Jian, WENG Qi-ping, et al. Analysis and counter measures of influence of excavation on adjacent tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(S1): 1340－1345. (in Chinese))

[9] 朱正锋, 陶学梅, 谢弘帅. 基坑施工对运营地铁隧道变形的影响及控制研究[J]. 地下空间与工程学报, 2006, **2**(1): 128－131. (ZHU Zheng-feng, TAO Xue-mei, XIE Hong-shuai. The influence and control of dip excavation on deformation of operating Metro tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, **2**(1): 128－131. (in Chinese))

（本文责编 胡海霞）