

# 复杂地质条件和敏感环境中基坑设计实践 及关键技术

邵晨晨

(上海市岩土地质研究院有限公司, 上海 200072)

**摘要:** 上海某国际金融大厦深大基坑项目北侧紧邻运营轨道交通8号线区间隧道,最近处仅7.87 m,南侧与现有世博共同管沟净距2.0~3.0 m,基坑变形控制要求高,周边环境敏感。同时,本项目位于黄浦江畔,场地浅层为典型的淤泥质软土地层,下部为富含承压水粉(砂)土层,且微承压水层与第一、第二承压水层互为连通,止水帷幕无法隔断承压水层,地质条件复杂。设计采用分坑施工、被动区加固、预应力伺服钢支撑系统、抽灌一体化降水方案、超深地下连续墙、跟踪注浆、型钢垫层等技术方案。实测结果表明,区间隧道的最大变形6.52 mm,共同管沟的最大变形15.3 mm,其最大变形均满足变形控制要求,确保了运营区间隧道和共同管沟的安全。

**关键词:** 基坑工程;地铁隧道;两墙合一;承压水控制;悬挂止水帷幕;复杂地质条件;敏感环境

**中图分类号:** TU473.2 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2021)06-0102-07

## Design practice and key technology for the foundation pit in complex geology and sensitive environments

SHAO Chenchen

(Shanghai Geotechnical Engineering & Geology Institute Co., Ltd., Shanghai 200072, China)

**Abstract:** The deep and large foundation pit project of an international financial building in Shanghai is adjacent to the operating rail line interval with the shortest distance of only 7.87m on the north side, and the clearance of 2.0 to 3.0m from the pipe ditch of World Expo on the south side. Because of the high sensitivity of the surrounding environment, the deformation control of the foundation pit is quite demanding; meanwhile, the project is located on the bank of the Huangpu River. The shallow layer at the site is a typical silty soft soil layer, while the lower part is a soil layer rich in confined ground water. Moreover, the micro-confined aquifer is connected to the first and second confined aquifers, and the sealing curtain cannot cut off the confined aquifers. All these factors constitute complex geological conditions. Considering the situation, the project adopted various technical measures. The final measurement results showed that the maximum deformation of the tunnel is 6.52mm, and the maximum deformation of the pipe ditch is 15.3mm, which meet the deformation control requirements, ensuring the safe operation of the tunnel and the pipe ditch.

**Key words:** foundation pit engineering; subway tunnel; diaphragm wall; confined water control; suspended water-cutoff curtain; complex geology; sensitive environments

### 0 引言

随着上海世博会的结束,世博地区的建设进入一个高潮期,新建工程以深基坑为主,大多位于地

铁7、8号线沿线。目前上海地区常规深基坑项目主要通过增加围护墙体和支撑体系的刚度来满足围护变形的控制要求。实践表明围护墙体的最终变

收稿日期:2021-01-06; 修回日期:2021-03-26 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.06.016

作者简介:邵晨晨,男,汉族,1987年生,工程师,岩土工程专业,硕士,主要从事基坑支护设计及咨询工作,上海市静安区灵石路930号地质大厦315,18621850365@126.com。

引用格式:邵晨晨.复杂地质条件和敏感环境中基坑设计实践及关键技术[J].钻探工程,2021,48(6):102-108.

SHAO Chenchen. Design practice and key technology for the foundation pit in complex geology and sensitive environments[J]. Drilling Engineering, 2021,48(6):102-108.

形往往与多种因素相关,最终的实施效果有较大的离散性。地铁作为民生工程的重要组成部分,确保地铁的安全运营必须放在首位,且容不得半点闪失,因此地铁公司对地铁邻近基坑工程施工对其产生的附加变形提出了严苛的控制要求<sup>[1-3]</sup>。

上海作为典型的软土地区,浅部土层以淤泥质土为主,土性软弱,灵敏度高且流变性显著,不利于围护结构的变形控制<sup>[4]</sup>。而世博地区位于黄浦江畔,深部承压水层较厚,在无法隔断承压水水层的情况下,坑内降承压水对坑外的影响巨大<sup>[5-7]</sup>,如何合理确定止水帷幕的长度和制定降水方案显得尤为重要。

本文以地处世博地区的某国际金融大厦为背景,研究并提出了复杂地质条件和敏感环境条件下深基坑的选型思路<sup>[8-10]</sup>,并根据其项目特点提出关键技术对策,确保了地铁及周边管线的安全,对后续类似工程设计具有借鉴意义。

## 1 工程概况

本金融大厦项目位于黄浦江畔,世博梅赛德斯奔驰文化中心南侧,项目总用地面积7824 m<sup>2</sup>,主要建筑物为1栋高49.95 m塔楼,除北侧临近区间隧道为地下2层外,其余地下3层。因本项目部分位于地铁保护区范围内,抗压兼抗拔桩为 $\varnothing 850$  mm钻孔灌注桩,桩长51.5~56.0 m,工程桩桩端进入 $\textcircled{9}$ 层土深度 $\leq 1.7$  m,单桩桩顶抗压荷载最大为3000 kN,单桩桩顶抗拔荷载最大为1000 kN。

本工程基坑面积6195 m<sup>2</sup>,其中地下2层区域736 m<sup>2</sup>,地下3层区域5459 m<sup>2</sup>,基坑开挖深度10.45 m/14.95 m。基坑周边紧邻运营地铁8号线区间隧道和世博共同管沟,环境保护要求极高。根据《上海市基坑工程技术标准》(DG/TJ 08-61—2018),本基坑属于深大基坑工程,地铁隧道及共同管沟一侧环境保护等级为一级<sup>[11]</sup>。

## 2 环境地质情况

### 2.1 周边环境

(1)基坑北侧地下有地铁8号线(中华艺术宫—西藏南路)区间隧道,部分位于红线内,区间隧道直径7.0 m,埋深12.339~13.881 m,基坑开挖边线距离区间隧道8.57~24.28 m。

(2)基坑南侧紧贴用地红线下埋设有世博地下共同管沟,共同管沟埋深2.85 m,管沟结构尺寸3.0~6.0 m $\times$ 3.80 m,混凝土结构,管沟结构壁厚300 mm。

(3)基坑西侧与邻近地块地下室共墙,其地下室埋深与本项目一致。

(4)除上述重要环境因素外,基坑周边尚有大量市政管线设施,如燃气、雨污水、给水等。

### 2.2 工程及水文地质

(1)拟建场地位于长江三角洲入海口东南前缘,其地貌类型属于上海地区五大地貌单元中的滨海平原地貌类型,根据本项目地质勘察报告(详勘),具体土层综合物理力学参数见表1。

表1 土层综合物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

层号	土层名称	重度 $\gamma$ / (kN $\cdot$ m <sup>-3</sup> )	天然抗剪强度		渗透系数 $S_t$	压缩模量/ MPa	$m$ 值/ (MN $\cdot$ m <sup>-4</sup> )
			$c$ /kPa	$\varphi$ /( $^\circ$ )			
①	杂填土	18.0	10(经验值)	10(经验值)	/	/	1.5
②	褐黄—灰黄色粉质粘土	17.5	21	18.0	$5.00 \times 10^{-6}$	4.61	4.0
③	灰色淤泥质粉质粘土	18.6	14	16.5	$5.00 \times 10^{-6}$	3.39	2.0
④	灰色淤泥质粘土	17.5	13	10.5	$4.00 \times 10^{-7}$	2.25	2.0
⑤ <sub>1</sub>	灰色粘土	16.7	15	11.5	$4.00 \times 10^{-7}$	3.13	6.0
⑤ <sub>2</sub>	灰色砂质粉土夹粉质粘土	17.4	8	26.5	$3.00 \times 10^{-4}$	8.32	6.0
⑤ <sub>3</sub>	灰色粉质粘土夹粘质粉土	18.3	18	18.0	$7.00 \times 10^{-6}$	6.18	5.0
⑥	暗绿—草黄色粉质粘土	17.4	41	20.0	$3.00 \times 10^{-7}$	7.26	6.0
⑦	灰绿—草黄色砂质粉土	18.1	4	30.0	$6.00 \times 10^{-4}$	9.75	6.0
⑨	灰色粉砂	18.8	1	34.5	$1.00 \times 10^{-3}$	16.09	6.0

(2)场地土层具有以下特点:表层杂填土较厚,土质松散,渗透系数较高,基坑开挖过程中在动水作用下产生流砂和管涌的风险较高;场地浅层为深厚的淤泥质土层,力学性质差、灵敏度高,流变性显著,不利于围护稳定性和变形控制;拟建场地承压水层埋深较浅,且第⑤<sub>2</sub>层微承压水层、第⑦层第一承压水层和第⑨层第二承压水层部分区域连续分布,相互连通,有承压水突涌的风险。

### 3 基坑支护设计及关键技术

#### 3.1 总体方案

本项目的第一保护对象为地铁区间隧道,根据地

铁运营单位反馈,由于周边地块的相继开发和地铁长期运营,本项目实施前邻近本地块区域间隧道收敛变形已接近100 mm,其对变形极为敏感。要求本项目施工对地铁隧道的附加变形 $\geq 10$  mm,开挖过程中连续3天同方向日变量 $\geq 1$  mm。常规的基坑大开挖方式显然无法满足对地铁区间隧道的保护要求<sup>[12-13]</sup>。

为将“时空效应”的影响降至最低,本项目采用“顺挖施工,分坑围护,限时开挖”的总体安排,分坑情况详见图1。按由远至近的原则,即最先施工A区(地下3层),后施工B区(地下2层),先施工的分坑应在地下室结构出正负零之后方可开挖下一个分坑。基坑总体围护方案选型详见表2。

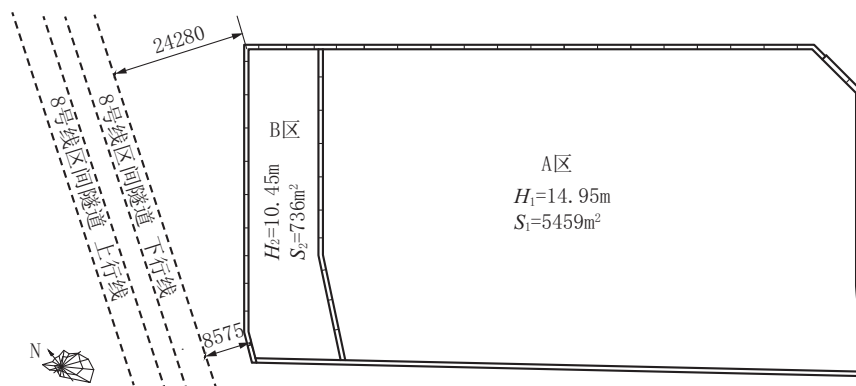


图1 基坑分区示意

Fig.1 Diagram of foundation pit partition

表2 基坑总体围护方案

Table 2 Design of the foundation pit enclosure

基坑分区	围护体系	支撑体系	被动区加固	降水体系
A区	“两墙合一”地下连续墙、地	3道钢筋砼水平支撑	搅拌桩满堂加固	抽灌一体化降水
B区	连墙两侧槽壁加固	1道钢筋砼水平支撑+2道预应力钢支撑	搅拌桩裙边加固	

#### 3.2 围护体系

综合本工程开挖深度、周边环境保护要求和工程地质情况,板式支护体系结合多道水平支撑体系是最优选择。考虑地下连续墙刚度均匀,成墙质量可靠,且可满足超长成墙要求,本项目采用“两墙合一”设计,既可以满足围护变形控制要求,又可以作为永久结构外墙,符合绿色、环保设计理念<sup>[14]</sup>。

A区和B区分隔墙和南侧靠近共同管沟处采用1000 mm厚地下连续墙,墙长28.0 m(外侧地下连续墙底端加长8.8 m止水段),受力段插入坑底以下15.15 m,插入比1.05。

B区靠近地铁侧采用800 mm厚地下连续墙,墙长36.8 m(底端10.8 m为隔水段),受力段插入坑底以下16.55 m,插入比1.58;地下连续墙两侧分别采用单排3 $\Phi$ 850 mm@1200 mm三轴水泥土搅拌桩(迎土面)和3 $\Phi$ 850 mm@1800 mm三轴水泥土搅拌桩(迎坑面)作槽壁加固,桩长均为27.0 m。

基坑围护剖面如图2所示。

#### 3.3 支撑体系

A区采用3道钢筋砼支撑,为确保支撑的刚度和均匀性,支撑采用井字对撑+八字撑的平面布置形式,结合场地2个出入口的位置,设置施工栈桥。

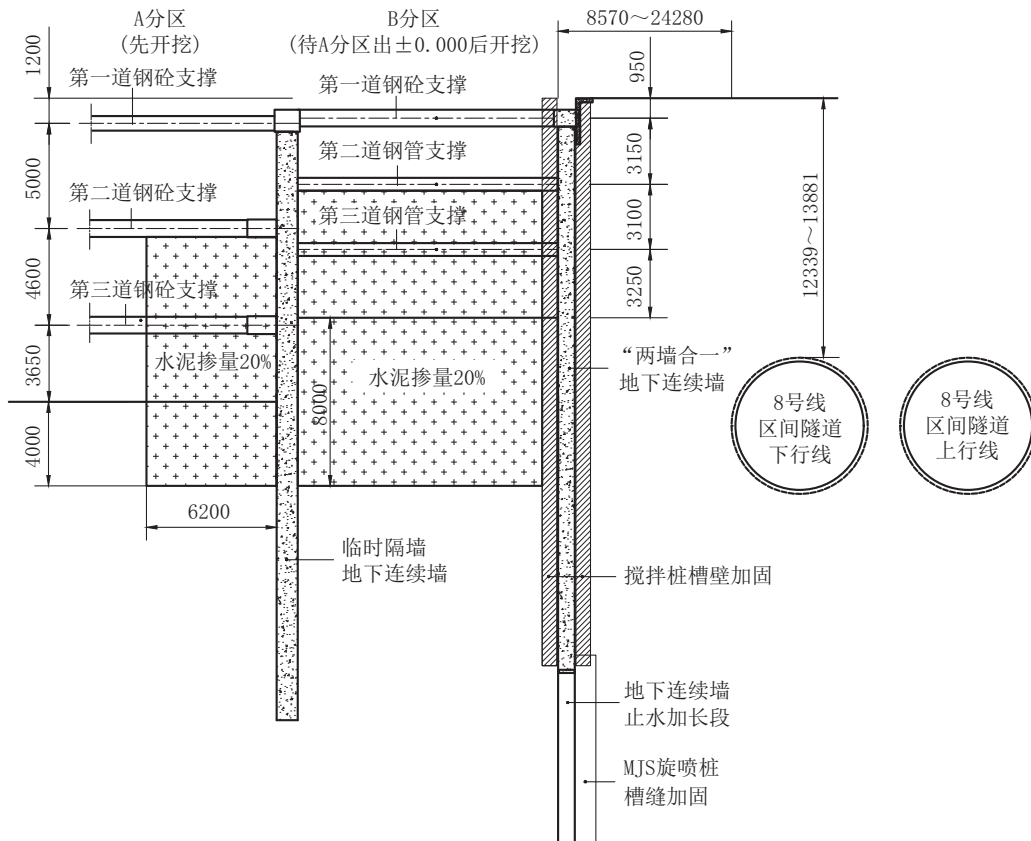


图2 地铁侧基坑剖面

Fig.2 Section of the retaining structure on the tunnel side

竖向受力体系型钢立柱避免工程桩、结构主梁、人防墙体和口部设置。

B区采用3道水平支撑,为减少B区开挖后的无支暴露时间,第一道支撑为钢砼支撑,第二、三道为水平钢支撑<sup>[15]</sup>,每幅地下连续墙确保2根钢支撑。钢支撑体系轴力控制采用油压泵轴压自动伺服系统,自动伺服系统采用压力量程3000 kN的油压泵,油压泵须带回锁功能。钢支撑架设完成后应施加预应力,预应力值为900 kN。

支撑体系的具体平面布置详见图3、图4,剖面计算结果如图5。计算结果表明,第二道支撑受力最大,支撑截面参数详见表3。

### 3.4 被动区加固

A区基坑地铁侧采用8.0 m宽、南侧靠近共同管沟采用6.05 m宽三轴水泥土搅拌桩裙边加固,加固范围自第二道支撑底至坑底以下4 m,水泥掺量20%。B区基坑采用满堂加固,加固范围为第二道支撑至坑底以下8.0 m,水泥掺量20%。加固布置如图6所示。

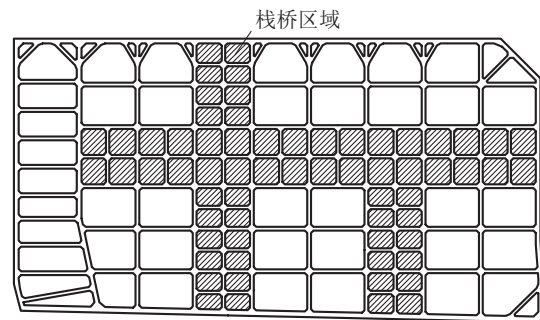


图3 第一道支撑平面布置

Fig.3 Layout of the first support

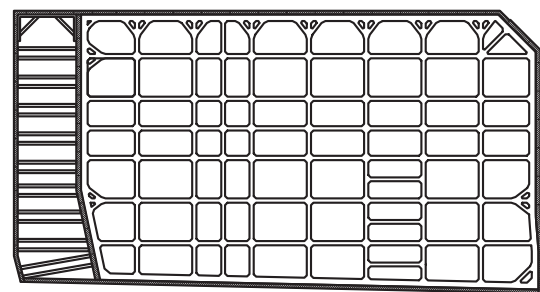


图4 第二、三道支撑平面布置

Fig.4 Layout of the second and third support

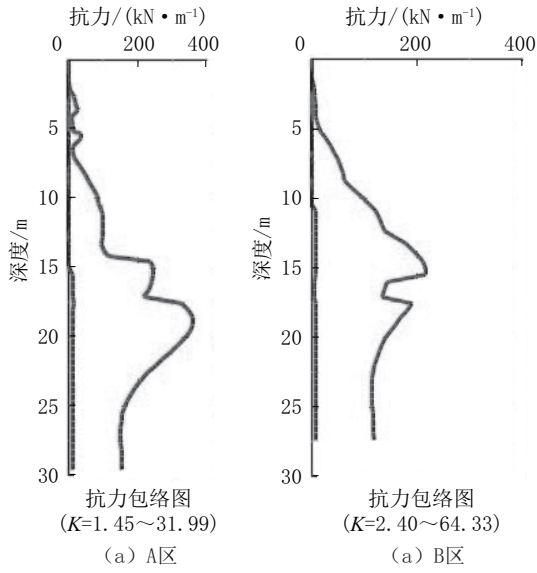


Fig.5 Calculation results of the foundation pit enclosure

表3 基坑支撑截面尺寸

Table 3 Section dimensions of the foundation pit support

分区	支撑	圈梁/mm	主撑/mm	连杆/mm
A	第一道	1200×800	800×700	700×700
	第二道	1400×850	900×800	800×800
	第三道	1400×850	900×800	800×800
B	第一道	1200×800	800×700	700×700
	第二道	双拼H500×300×11×18	Ø609×16	
	第三道	双拼H500×300×11×18	Ø609×16	

邻近地铁侧被动区均进行20%水泥掺量的加固,土体的抗力得到显著提高,在A区和B区基坑开挖叠加效应影响下,邻近隧道地下连续墙变形仍能

保持较低的范围,从而确保隧道变形在可控范围内。

### 3.5 抽灌一体化降水方案

拟建场地承压水主要分布于第⑤<sub>2</sub>层微承压水层、第⑦层第一承压水层和第⑨层第二承压水层中,因3个承压水含水层部分区域连续分布,可认为地下水相互连通。

第⑤<sub>2</sub>层层顶埋深最浅处为16.8 m,根据《上海市基坑工程技术标准》,按抗突涌安全系数1.05计算基坑临界开挖深度为8.05 m(承压水水头埋深按3.0 m计)。本项目基坑开挖深度10.45 m/14.95 m,均超过8.05 m,故本项目须对承压水进行降压。

因本项目微承压水层与第一承压水层和第二承压水层连通,止水帷幕无法隔断承压水,坑内降压势必会引起坑外承压水层水位波动,而地铁区间隧道底部位于微承压水层中,因此合理确定隔水帷幕的长度及制定合理的降水方案尤其重要。

根据计算,为确保A区基坑开挖至坑底不存在基坑突涌的风险,坑内⑤<sub>2</sub>层微承压水水头埋深须降至13.5 m以深。按承压水水头降深10.5 m考虑,基坑四周止水帷幕须插入坑底不小于17.0 m,综合地区经验,最终止水帷幕插入坑底按22.9 m设计,同时设置回灌应急井。

(1)降压井:A区基坑面积约为5459 m<sup>2</sup>,按照每500 m<sup>2</sup>布置1口⑤<sub>2</sub>层降压井考虑,实际布置12口降压井,另外布置2口水位观测井。B区布置3口⑤<sub>2</sub>层降压井兼作观测井,考虑B区采用满堂加固,根据经验可不进行降压,故降压井是备而不降,作为应急井使用。

(2)回灌井:坑内承压水降水对抗外的影响受多重不确定因素影响。为确保地铁隧道区域承压水

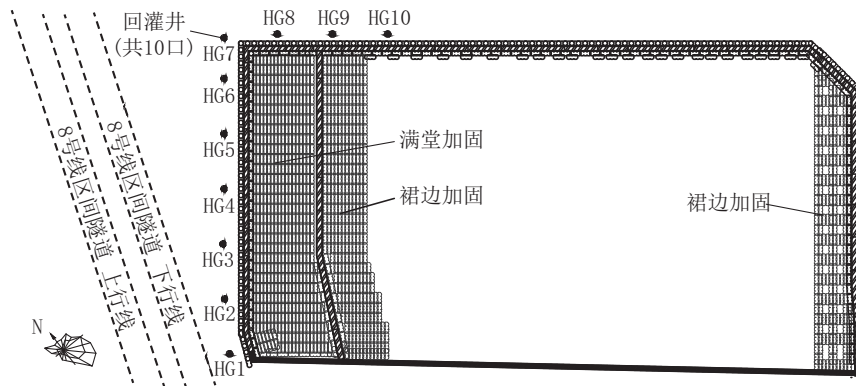


图6 被动区加固及回灌井布置

Fig.6 Layout of passive zone reinforcement and recharge wells

水位变化幅度在可控范围之内,基坑与地铁隧道之间布置回灌井。坑外第⑤<sub>2</sub>层回灌井兼水位观测井按照地铁50 m保护范围内井间距约10 m/口(回灌井布置参见图6),滤管长度为10.0 m。

基坑降承压水期间,坑外承压水水位波动未超过地铁公司要求的1.0 m,故本项目进行过程中回灌井仅作为应急储备措施。表明地下连续墙的接头在多重措施保障下止水效果良好,另外合理增加承压水绕流路径达到预期效果。

### 3.6 其它关键措施

(1)为确保地下连续墙的成墙质量和减小成槽时成槽机产生的负压对邻近隧道的影响,两侧设置三轴水泥土搅拌桩槽壁加固。

(2)地下连续墙外侧槽壁加固,水泥浆液水灰比调整至1.2,搅拌桩下沉速度 $\geq 0.5$  m/min,提升速度 $\geq 1.0$  m/min。

(3)邻近地铁侧地下连续墙接头采用十字钢板刚性接头,确保接头止水可靠性。

(4)为减小B区基坑开挖至坑底后长时间无底板暴露带来的围护变形增量,在垫层中开槽设置H300型钢,间距按每幅地下连续墙不少于2根设置,可显著改善垫层对围护约束刚度不足的问题。

(5)地下连续墙外侧未设槽壁加固段,在地下连续墙接头处采用 $\varnothing 2000$  mm MJS工法桩加固处理,与三轴水泥土搅拌桩搭接长度 $\leq 1.0$  m。

(6)因地下连续墙底标高与工程桩底标高不一致,容易导致差异沉降,为防止地下连续墙与结构桩基出现差异沉降,影响结构与地下连续墙节点受力,在地下连续墙钢筋绑扎时,埋设注浆管,在地下连续墙砼浇筑完成并达到一定强度后,墙底进行注浆。此措施可以有效提高地下连续墙的承载力和减小其沉降<sup>[16-17]</sup>。

(7)浅埋共同管沟距离坑边仅2.0 m,根据计算结果,在增加地下连续墙刚度和对被动区土体进行裙边加固的情况下,仍无法满足其变形控制要求。在共同沟两侧设置跟踪注浆管,基坑开挖过程中当管沟变形 $> 15$  mm后立即进行注浆顶升,确保管沟变形在可控范围内。

## 4 信息化监测数据分析

图7为基坑不同边地下连续墙侧向位移监测点最终位移变化情况。由图可知,随着A区基坑的开

挖,基坑东侧围护测斜CX5变形最大值为49.58 mm,最大变形位置位于坑底附近;基坑南侧(邻近共同管沟)因考虑管沟保护,地下连续墙厚度为1000 mm,大于东侧的800 mm,且被动区设置三轴水泥土搅拌桩裙边加固,围护测斜CX7最大值为40.86 mm,最大变形位置位于第三道支撑与坑底之间;基坑北侧(邻近地铁隧道)在A区基坑施工期间产生测斜变形最大为1.55 mm,B区施工期间围护CX2累计变形最大值为17.54 mm,地铁隧道最大变形6.52 mm。

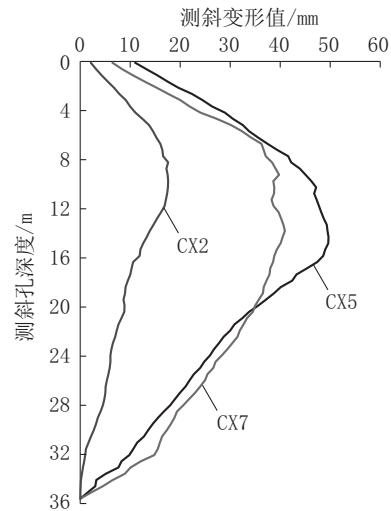


图7 地连墙测斜变形监测数据

Fig.7 Lateral displacements of the retaining structure

基坑开挖前⑤<sub>2</sub>层实测初始水位埋深6.5 m,基坑开挖期间⑤<sub>2</sub>层实降水位约9.0 m,根据坑外水位观测数据,坑外⑤<sub>2</sub>层水位最大降幅0.6 m,满足了地铁公司要求的基坑降水期间,坑外承压水水位降幅 $\geq 1.0$  m的要求。

## 5 结语

(1)根据基坑监测结果,邻近地铁侧围护变形为17.54 mm,地铁隧道变形为6.52 mm,满足了严苛的地铁变形控制要求。采用跟踪注浆技术,共同管沟最终变形15.4 mm,保证了共同管沟结构安全。

(2)坑内承压水水位降9.0 m的情况下,坑外水位平均降深0.6 m,表明通过加长止水帷幕深度,增加承压水绕流路径,可以有效降低坑内降承压水对抗外的影响。

(3)针对基坑周边复杂情况,按照“顺挖施工,分坑围护,限时开挖”总体思路,针对性地采用“两墙合

一”的设计理念,综合运用被动区加固、预应力伺服钢支撑、垫层加设型钢、抽灌一体化降水、强化地下连续墙接头质量等针对性较强的非常规措施,工程顺利实施,证明了方案选型的合理性。同时也为类似工程的实施积累了丰富的经验。

### 参考文献(References):

- [1] 李进军,王卫东.紧邻地铁区间隧道深基坑工程的设计和施工[J].铁道工程学报,2011(11):104-110.  
LI Jinjun, WANG Weidong. Design and construction of deep excavation engineering adjacent to the subway tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011(11):104-110.
- [2] 艾鸿涛,高广运,冯世进.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(S1):31-36.  
AI Hongtao, GAO Guangyun, FENG Shijin. Deformation analysis of deep foundation pits adjacent to subway tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008,30(S1): 31-36.
- [3] 郭鹏飞,杨龙才,周顺华,等.基坑开挖引起下卧隧道隆起变形的实测数据分析[J].岩土力学,2016,37(S2):613-620.  
GUO Pengfei, YANG Longcai, ZHOU Shunhua, et al. Measurement data analyses of heave deformation of shield tunnels due to overlying pit excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016,37(S2):613-620.
- [4] 邸国恩,黄炳德,王卫东.敏感环境条件下深基坑工程设计与施工[J].岩土工程学报,2010,32(S1):383-387.  
DI Guoen, HUANG Bingde, WANG Weidong. Design and application of the deep excavation in sensitive environment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010,32(S1): 383-387.
- [5] 戴斌,王卫东.受承压水影响深基坑工程的若干技术措施探讨[J].岩土工程学报,2006,28(S1):1659-1663.  
DAI Bin, WANG Weidong. Discussion on technologies of deep foundation pit projects affected by confined water[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006,28(S1):1659-1663.
- [6] 张惠忠,刘明建.上海软土中的“微承压水”与基坑工程[J].岩土工程学报,2005,27(8):944-947.  
ZHANG Huizhong, LIU Mingjian. “Feeble confined water” in Shanghai area and related geotechnical engineering problems in foundation excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005,27(8):944-947.
- [7] 娄荣祥,周念清,赵姗.上海地铁11号线徐家汇站深基坑降水数值模拟[J].地下空间与工程学报,2011,7(5):908-913.  
LOU Rongxiang, ZHOU Nianqing, ZHAO Shan. Numerical simulation of deep foundation pit dewatering of Xujiahui Station of Shanghai Metro Line No.11[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011,7(5):908-913.
- [8] 侯新宇,刘松玉,童立元.被动区深搅桩加固对地铁深基坑变形的影响[J].东南大学学报,2010,40(1):180-184.  
HOU Xinyu, LIU Songyu, TONG Liyuan. Effect of deep mixing pile reinforce on deformation of deep foundation pit in metro station in passive zone[J]. Journal of Southeast University, 2010,40(1):180-184.
- [9] 罗晓伟,车国喜,刘斯全.复杂环境工况下大型深基坑工程施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(2):86-91.  
LUO Xiaowei, CHE Guoxi, LIU Siqian. Construction technology of large deep foundation pit engineering under complex environmental conditions[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(2):86-91.
- [10] 董建忠,黄飞.复杂环境条件下深基坑支护方案设计研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(12):34-38.  
DONG Jianzhong, HUANG Fei. Study on the design of deep foundation pit supporting scheme in complicated environment[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015,42(12):34-38.
- [11] DBJ 08-61—2018,基坑工程设计规范[S].  
DBJ 08-61—2018, Code for design of excavation engineering[S].
- [12] 徐中华,宗露丹,沈健,等.邻近地铁隧道的软土深基坑变形实测分析[J].岩土工程学报,2019,40(S1):41-44.  
XU Zhonghua, ZONG Ludan, SHEN Jian, et al. Deformation of a deep excavation adjacent to metro tunnels in soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019,40(S1): 41-44.
- [13] 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,2002,32(5):53-56.  
JIANG Hongsheng, HOU Xueyuan. The influence of deep excavation on adjacent metro tunnel in soft ground[J]. Industrial Construction, 2002,32(5):53-56.
- [14] 刘国彬,王卫东.基坑工程手册(第二版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.  
LIU Guobin, WANG Weidong. Excavation engineering handbook (2nd edition)[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [15] 蔡剑涛.软土地区邻近地铁深大基坑开挖的设计实践[J].岩土工程技术,2015,29(4):163-168,181.  
CAI Jiantao. Design practice of deep foundation pit excavation adjacent to metro in soft soil area[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2015,29(4):163-168,181.
- [16] 孙峰,徐杨青,张婧雯.“两墙合一”地下连续墙竖向承载力设计计算研究[J].岩土工程学报,2014,36(S2):154-158.  
SUN Feng, XU Yangqing, ZHANG Jingwen. Design and calculation of vertical bearing capacity of diaphragm wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014,36(S2):154-158.
- [17] 覃君,张勇.软土地区58 m超深地下连续墙施工关键技术[J].路基工程,2015(5):164-167.  
QIN Jun, ZHANG Yong. Key technology for 58m ultra-deep underground diaphragm wall in soft soil area[J]. Subgrade Engineering, 2015(5):164-167.

(编辑 周红军)