

世博大道地道与周边项目协同建设方案研究与实践

姚 坚

上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海

收稿日期: 2024年6月2日; 录用日期: 2024年6月22日; 发布日期: 2024年6月30日

摘要

多地块一体化开发或相邻地块同期建设的工程体量大、建设周期长、实施工况复杂、工程间相互作用和环境影响效应显著, 加上软土蠕变特性显著, 工程的安全及环境变形控制困难。本文结合世博大道地道与周边项目协同建设案例, 对同步开发项目的安全保障及环境变形控制等难点问题进行解答。世博大道地道紧邻大歌剧院和世博文化公园, 三个项目同步开工, 涉及基坑群同步开挖及基坑和堆山加卸载问题, 该同步建设案例通过项目间的统筹协调及工况调整, 既达成了各自的既定期, 又将相互间的影响及环境变形控制在可控范围内, 为软土地区同类工程提供参考。

关键词

深基坑, 基坑群, 人工堆山, 世博文化公园, 地道

Research and Practice on the Collaborative Construction of the EXPO Avenue Tunnel and Surrounding Projects

Jian Yao

Shanghai Urban Construction Design & Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai

Received: Jun. 2nd, 2024; accepted: Jun. 22nd, 2024; published: Jun. 30th, 2024

Abstract

Due to the large volume of the project, long construction period, complex implementation condi-

tions, significant interactions between projects, significant environmental impact effects, and significant creep characteristics of soft soil, it is difficult to control the safety and environmental deformation of multi plot integrated development project or the simultaneous construction of adjacent projects. This article combines the case of collaborative construction of the EXPO Avenue tunnel and surrounding projects to answer the difficult issues of safety assurance and environmental deformation control in synchronous development projects. The EXPO Avenue Tunnel is adjacent to the Grand Opera House and Shanghai EXPO Cultural Park, the three projects have started simultaneously, involving synchronous excavation of foundation pits and loading and unloading of foundation pits and mountains. This synchronous construction case achieved their respective predetermined construction periods and controlling the mutual impact and environmental deformation within a controllable range through coordinated planning and working condition adjustment among projects, providing reference for similar projects in soft soil areas.

Keywords

Deep Excavation, Excavation Group, Piling Hill Project, Shanghai EXPO Cultural Park, Tunnel

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,以上海为代表的软土城市开发呈现超大规模发展趋势,产生了多地块一体化开发或相邻地块同期建设的超大工程,这些工程体量大、同步或先后实施关系错综复杂、土体反复加卸载的应力路径复杂,工程间的相互作用和环境影响叠加效应显著。本文结合世博大道地道和周边相邻的大歌剧院及世博文化公园面临的协同建设开发模式,重点研究了狭小场地下的施工总体筹划,基坑群同步开挖条件下的安全保障和环境变形控制和近距离景观堆载对已建地道的保护等关键问题提出相应的技术措施,并将预测分析数据和实测数据进行了对比,为软土地区同类工程提供参考。

2. 工程概况

2.1. 基坑群概况

世博文化公园、世博大道地道、大歌剧院的平面关系如图1所示。

世博文化公园地处黄浦江核心滨水区凸岸,将建设成为占地近2公顷的世界一流公园。其中的音乐之林区块原为企业、展览建筑和市政道路,拟在地面形成小型山丘,堆山最高设计标高+18.0m,距离世博大道隧道较近的次高点设计标高+15.0m,堆山平面范围约8.40万平方米,总地形塑造需40万方土。

世博大道为城市主干路,道路红线20~45m,路线总长约2353m,其中地道段1350m。地下道路双向6车道与耀龙路衔接,服务过境的机动车交通,联系世博A、B地块、后滩以及前滩区域。整个项目为长条形基坑,基坑长度1350m,基坑面积约4万平方,土方开挖量约50万方。其中有约350m长紧邻大歌剧院基坑,紧邻大歌剧院基坑处开挖深度9.5~11m。

上海大歌剧院项目总建筑面积14.6万平方米,地上建筑面积7.5万平方米,作为大歌剧院紧邻的唯一主干路,在世博大道地下道路设置了联络道,直通大歌剧院地下车库。大歌剧院基坑面积约为4.9万m²,地下两层,开挖深度9.9m(局部舞台挖深25.9m)。



Figure 1. The master plan of the EXPO cultural park

图 1. 世博文化公园总平面图

2.2. 工程水文地质

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。深度 45.0m 范围内揭露的地基土均属第四纪沉积物，各层地基土的构成自上而下分别为：① 1-1 杂填土；① 1-2 素填土；① 3 灰色粘质粉土夹淤泥质粘性土；② 1 灰黄色粉质粘土；② 3 灰色淤泥质粉质粘土与粘质粉土互层；③ 灰色淤泥质粉质粘土；④ 1 灰色淤泥质粘土；④ 2-1 灰色粉质粘土夹粉性土；④ 2-2 灰色砂质粉土；④ 2-3 灰色砂质粉土；④ 2-4 灰色粉质粘土与砂质粉土互层；⑤ 3-1 灰色粉质粘土；⑤ 3-2 灰色粉质粘土夹粉性土；⑤ 4 灰绿色粉质粘土。

场地潜水按地面下 0.5 m 考虑。场地内第④ 2 层粉性土(含亚层)属微承压含水层。根据上海地区区域水文地质资料，微承压含水层水位年呈周期性变化，承压水水头埋深一般在 3~11 m。依据现有勘察资料，第④ 2 层粉性土层顶界埋深一般在 16.0~20.00 m 之间，局部地段④ 2 层微承压含水层和① 3 层潜水含水层相连通。

2.3. 协同建设难点

(1) 工期要求紧，协同建设确保工期

世博文化公园计划于 2021 年 12 月 31 日北区正式开园，其中音乐之林由于场地拆迁等原因，实际开工时间约为 2020 年 5 月。

世博大道地道 2019 年 12 月 18 正式开工，2021 年 1 月 21 日地道主体结构贯通，2021 年 10 月 28 日地道主线通车。

大歌剧院 2019 年 12 月 18 日开工，预计 2024 年年底完工，2025 年试运营。

世博大道地道从开工到主体结构贯通工期仅 13 个月，音乐之林从开始地基处理到公园开园仅约 8 个月，大歌剧院工期相对较长，但是与世博大道地道同时开工，几个项目分属不同的投资主体，各自都有严格的工期目标，施工期间的互相借地及工况协调需充分考虑各自的工期需求。

(2) 施工场地狭小、合理进行施工筹划

如图 2 所示，世博大道地道、大歌剧院和音乐之林三个地块紧邻在一起，其中音乐之林从地道侧墙边开始起坡，大歌剧院与地道距离约 0~20 m，普遍距离约 6 m。三个项目用地非常紧张，必然存在施工期间相互借地的问题。

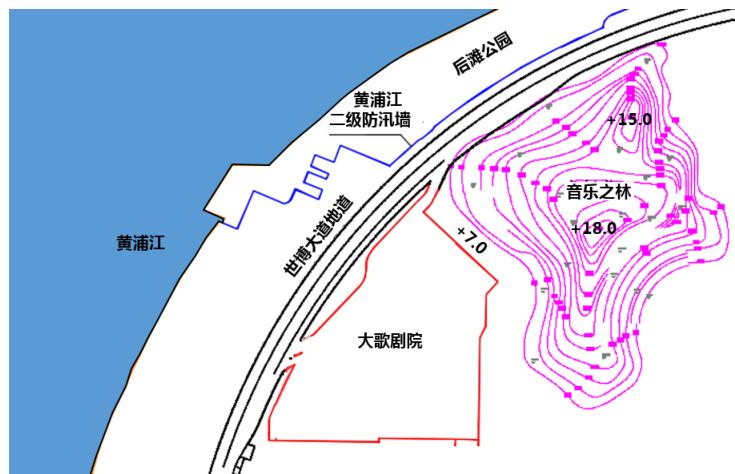


Figure 2. Plan of the World EXPO Avenue Tunnel, Grand Opera House, and Park
图 2. 世博大道隧道与大歌剧院、公园平面图

(3) 同步开挖条件下, 基坑群安全保障和环境变形控制

世博大道地道为长条形基坑, 基坑长度 1350 m, 基坑面积约 4 万平方, 其中有约 350 m 长紧邻大歌剧院基坑, 紧邻大歌剧院基坑处开挖深度 9.5~11 m。大歌剧院基坑面积约为 4.9 万 m^2 , 地下两层, 开挖深度 9.9 m (局部舞台挖深 25.9 m)。两个项目都属大面积深基坑工程, 两个项目基坑距离约 0~20 m, 普遍距离约 6 m, 且根据工期安排上两个项目同时开工, 属于典型的同步开挖“基坑群”问题。两个项目分属不同的建设投资主体, 工期要求高, 协调难度大, 且同时开工, 为了各自的工期目标不可避免会出现开发进度、基坑分区、工况等方面的分歧, 基坑群的设计需充分考虑各自的工期需求。场地水文地质条件复杂, 浅部均分布有较厚的粉土层, 基坑开挖不满足微承压水突涌稳定性要求, 需要大幅抽降承压水, 在紧邻黄浦江的深厚砂土层中大体量的抽降承压水风险巨大, 给基坑自身安全和周边环境保护形成了巨大挑战。

(4) 近距离景观堆载, 对已建地道的保护措施

地道为基坑开挖工程, 整个基坑开挖深度约 11 m, 土方开挖量约 50 万方, 音乐之林为堆山工程, 最大堆山高度约 12 m, 总堆山土方量约 40 万方。且音乐之林从地道侧墙边即开始起坡, 近距离的加卸载如何平衡。音乐之林如此大体量的土方堆载必然引起长时间、大范围的地面沉降, 是否会造成已建的地道产生不均匀沉降引起渗漏水, 甚至引发结构安全是考虑的重点。

音乐之林地基加固大量采用 PHC 管桩, 管桩施工的挤土效应是否会对已施工的世博大道地道止水帷幕造成破坏, 引起建成的地道发生大的变形都是需要考虑的问题。

3. 协同建设总体施工筹划组织

3.1. 工期筹划原则

世博大道地道最先开工, 且工期最紧张, 13 个月即需完成地道主体结构施工, 并且音乐之林先期无施工条件, 因此借地方案需优先考虑地道能按期交付。

地道与大歌剧院同时开工, 属于典型的同步开挖“基坑群”问题, 借地方案应确保两个项目可以同步开挖。

地道和公园在 2021 年年底均已交付使用, 届时大歌剧院施工场地将非常狭小, 公园需要进行借地以确保大歌剧院正常施工。

3.2. 借地方案

音乐之林和大歌剧院先期将靠近地道侧约 20~30 m 区域借给地道作为施工场地用，待地道主体结构贯通覆土完成后再将借地区域还给音乐之林和大歌剧院进行施工。同时后期地道将靠近大歌剧院处的地道上方区域借给大歌剧院做为临时施工场地用。

3.3. 基坑分区

世博大道地道由于长度较长，整体划分为 I 区基坑和 II 区基坑；

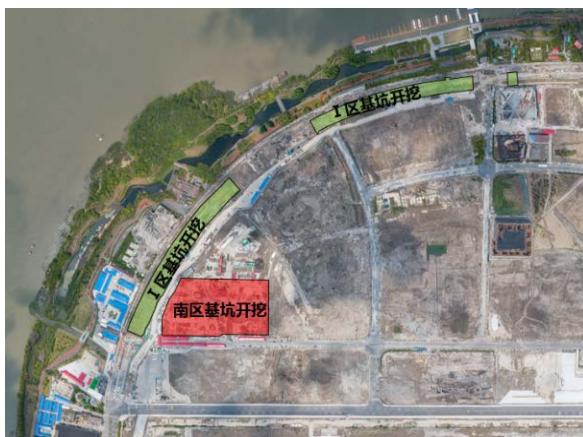
大歌剧院由于基坑面积较大，划分为南区基坑和北区基坑，同时在靠世博大道地道处划分出约 20 m 宽(1.8 H)的条形坑作为“缓冲区”，该缓冲区既可以先期借给世博大道地道施工方作为施工场地用，同时也将地道和大歌剧院两个大基坑分隔开，两个项目的基坑开挖工序基本不受影响；

音乐之林划分为 A 区和 B 区，A 区位于借地区之外的区域，B 区为靠近世博大道的借地范围。具体分区见图 3 所示。

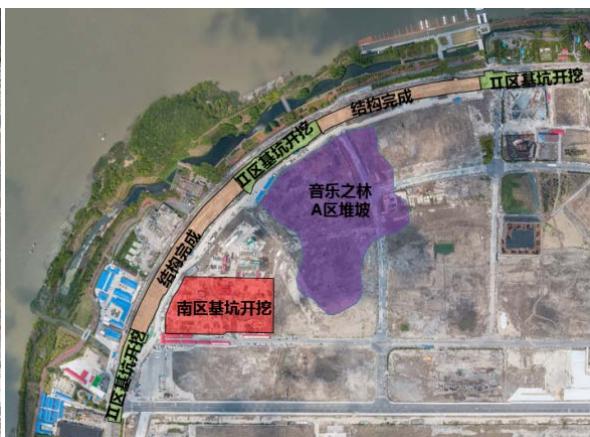


Figure 3. Construction zoning plan
图 3. 施工分区平面图

3.4. 整体施工工序



工况一：地道 I 区及大歌剧院南区基坑施工



工况二：地道 II 区及大歌剧院南区基坑、音乐之林 A 区施工

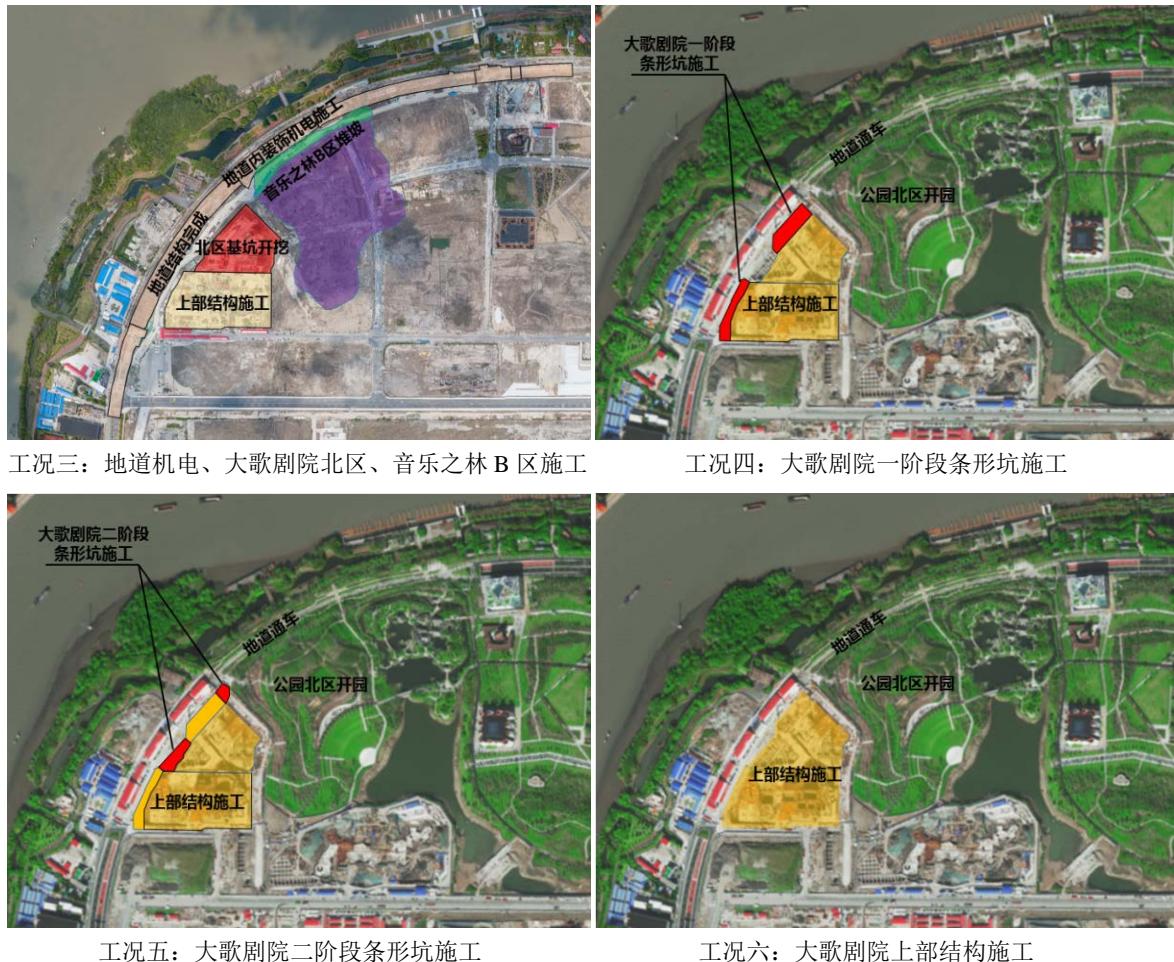


Figure 4. Step-by-step diagram of construction conditions

图 4. 施工工况分步图

工况一：世博大道地道 I 区基坑及大歌剧院南区基坑施工；
 工况二：世博大道地道 II 区基坑施工，音乐之林 A 区进行地基处理及堆土；
 工况三：世博大道地道机电及装饰装修施工，大歌剧院北区基坑施工，音乐之林借地区域 B 区地基处理及堆土；
 工况四：大歌剧院一阶段条形坑施工，世博大道地道通车，公园开园；
 工况五：大歌剧院二阶段条形坑施工；
 工况六：大歌剧院上部结构施工；
 具体施工工况见图 4 所示。

4. 基坑群安全保障与环境变形控制

4.1. 基坑围护设计方案

大歌剧院基坑面积约 4.9 万 m^2 ，地下两层，开挖深度 9.9 m (局部舞台挖深 25.9 m)。大基坑围护采用 $\varphi 900\text{ mm}/\varphi 950\text{ mm}$ 钻孔灌注桩结合两道钢筋混凝土支撑的围护方式，靠近世博大道地道的条形坑区域采用 $\varphi 1050\text{ mm}$ 钻孔灌注桩结合一道钢筋混凝土支撑 + 两道钢支撑的围护方式。考虑到第④ 2 层粉性土层为微承压含水层，顶界埋深一般在 16.0~20.00 m 之间，临界开挖深度为 8 m，基坑有微承压水突涌风

险, 为减少周边环境影响, 止水帷幕采用 700 mm TRD 等厚度水泥土搅拌墙, 止水帷幕底端进入不透水层不小于 2 m。

世博大道地道为长条形基坑, 基坑长度 1350 m, 基坑面积约 4 万平方, 其中有约 350 m 长紧邻大歌剧院基坑, 紧邻大歌剧院基坑处开挖深度 9.5~11 m。围护采用 SMW 工法结合一道钢筋混凝土支撑 + 两道钢支撑的围护方式。考虑到第④ 2 层粉性土层为微承压含水层, 顶界埋深一般在 16.0~20.00 m 之间, 临界开挖深度为 8 m, 基坑有微承压水突涌风险, 为减少周边环境影响, 止水帷幕采用三轴搅拌桩, 止水帷幕底端进入不透水层不小于 2 m。

4.2. 同步开挖技术措施

基坑群设计中, 一般会留设一定宽度土体作为缓冲区, 为两侧基坑同步开挖创造条件, 缓冲区宽度的设置是工程中需要重点关注的内容。理论分析方面岳数桥、马平、杨其润等[1]~[3]对缓冲区有限土压力进行了理论研究和土压力计算的公式推导。数值研究方面戴斌[4]认为上海软土地区类似工程中, 当缓冲区宽度 $B = (1.3 \sim 1.5) H$ 时基坑受力变形可以得到较好的控制又不会造成太多的浪费, 顾正瑞[5]通过综合考虑缓冲区宽度对围护墙侧移、土体潜在滑裂面和坑外地表沉降的影响规律, 建议设计时缓冲区宽度取值不小于 2 倍的基坑开挖深度。工程实践方面, 陈萍[6]以外滩国际金融服务中心工程为背景, 针对缓冲区宽度 $B = 1.3 H$ 的两个深基坑同步开挖这一关键问题提出相应的设计技术措施, 施工过程中各区域围护体变形整体较为均匀, 基地中部留土基本处于稳定状态, 且对周边环境的影响也在安全可控范围内。上述的研究工作主要针对平面基坑之间缓冲区的设置, 针对条形基坑和平面基坑相结合的基坑群问题则研究不多。

本工程两个项目都属大面积深基坑工程, 其中有约 350 m 长两基坑紧邻, 紧邻处平面距离约 0~20 m, 普遍距离约 6 m。大歌剧院由于基坑面积较大, 划分为南区基坑和北区基坑, 同时在靠世博大道地道处分割出约 20 m 宽($1.8 H$)的条形坑作为“缓冲区”, 该缓冲区既可以先期借给世博大道地道施工方作为施工场地用, 同时也确保地道和大歌剧院两个大基坑实现同步开挖。具体分区见图 5 所示。

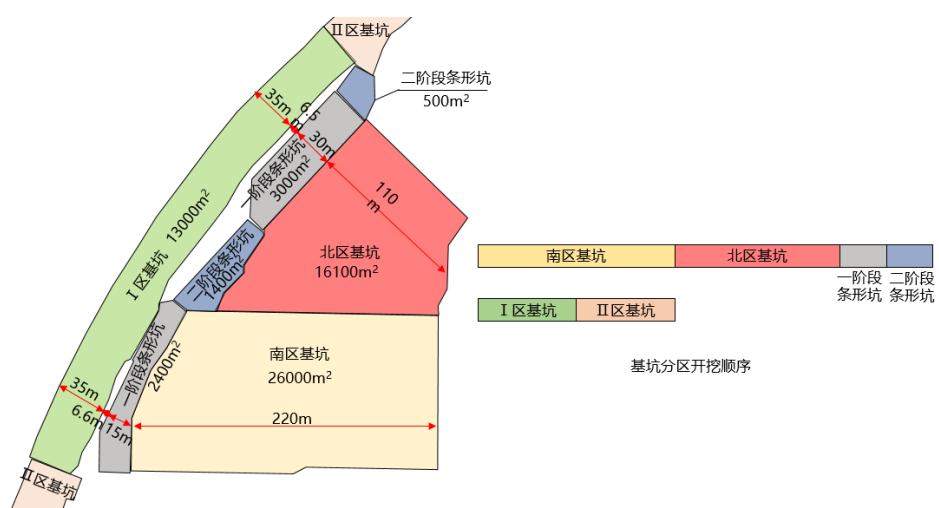


Figure 5. Division and excavation sequence diagram of foundation pit group
图 5. 基坑群分区及开挖顺序图

4.3. 实施与监测数据

本工程采用信息化施工, 对围护墙侧向位移、邻近建构筑物、道路沉降和周边市政管线位移等进行

了监测。图 6 表示围护墙侧向位移随施工开展的变化情况，其中 CX16 为 I 区基坑靠近大歌剧院处测斜监测点，CX17 为 I 区基坑远离大歌剧院处测斜监测点。CX16 最大侧向位移为 24.65 mm，CX17 最大侧向位移为 20.45 mm，理论上 CX16 坑外为有限宽度土压力，基坑测斜应比 CX17 小，但是实际监测结果显示 CX16 测斜反而比 CX17 大，认为主要原因是缓冲区为基坑施工期间的主要交通通道和材料堆放场地，荷载较大，故位移较大。

另外 CX16 较 CX17 侧向位移仅大 4 mm，差距不大，表明基坑群同步开挖对围护墙侧向位移影响不大，也进一步说明缓冲区土体处于稳定的状态。

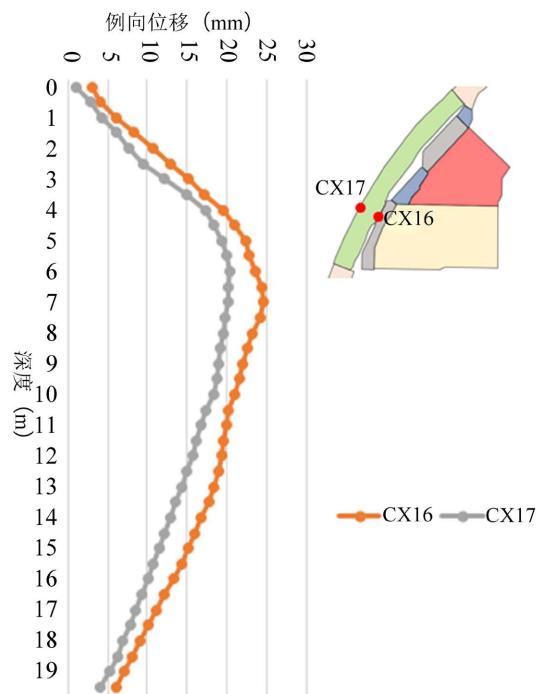


Figure 6. Horizontal displacement diagram of retaining wall
图 6. 围护墙侧向位移图

5. 音乐之林堆土对地道影响控制

建设公园时，利用人工弃土和建筑垃圾进行堆山造景在沿海平原城市多有报道，由于软土高含水率、高压缩性、低渗透性、低承载力、固结时间长等特点，决定了软土地区堆山工程的复杂性。针对堆山工程，大量学者[7]-[10]对软土地区地基承载力及沉降变形特性进行了研究。工程实践方面，叶志荣[11]介绍了郑州龙湖森林公园山体及隧道的总体设计及关键技术。上述研究更多集中在堆山本身的沉降变形上，对周边同步建设的隧道影响则研究较少。本工程的问题主要是一方面隧道基坑和堆山工程同步实施，土体加卸载应力路径复杂，另一方面极短工期下堆山对周边隧道的影响。

音乐之林拟在地面形成小型山丘，堆山最高设计标高 + 18.0 m，距离世博大道隧道较近的次高点设计标高 + 15.0 m，堆山平面范围约 8.40 万平方米，总地形塑造需 40 万方土。音乐之林具体地形设计见图 7 和图 8 所示。

堆土工序：堆土采用两阶段进行，一阶段对地道 30 m 之外区域进行堆土，且堆土在地道开挖到底板施工前完成，一方面减少地道基坑开挖和堆山的互相影响，另一方面尽量减少工后沉降对地道的影响；二阶段待地道结构施工完成后再对地道 30 m 之内区域进行堆土。

堆土地基处理方案：音乐之林总体采用 PHC 管桩地基处理方案来控制工后沉降，桩基持力层选择⑤ 2-1 砂质粉土，桩顶设置钢筋混凝土承台板，承台板上设置 500 mm 褥垫层，设置三道土工格栅加筋。考虑到 PHC 管桩为挤土桩，桩基施工阶段对周边影响较大，地道 50 m 范围内的管桩调整为非挤土的静钻根植桩。

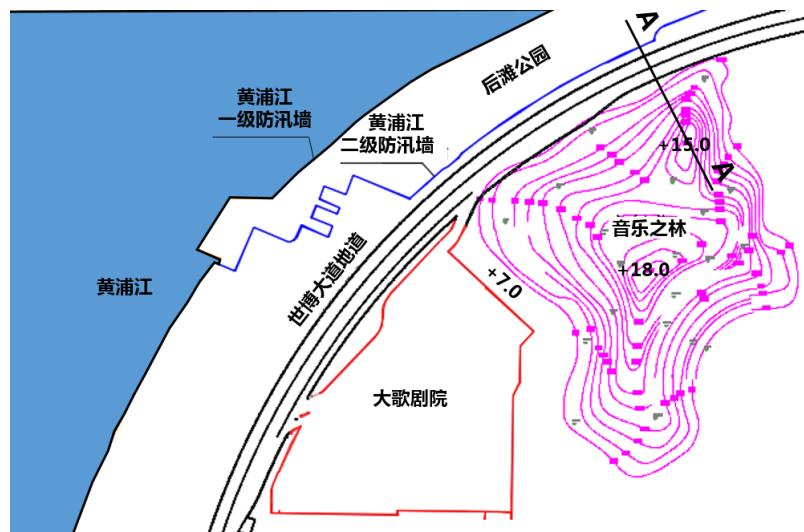


Figure 7. Contour map of the Forest of Music
图 7. 音乐之林等高线图

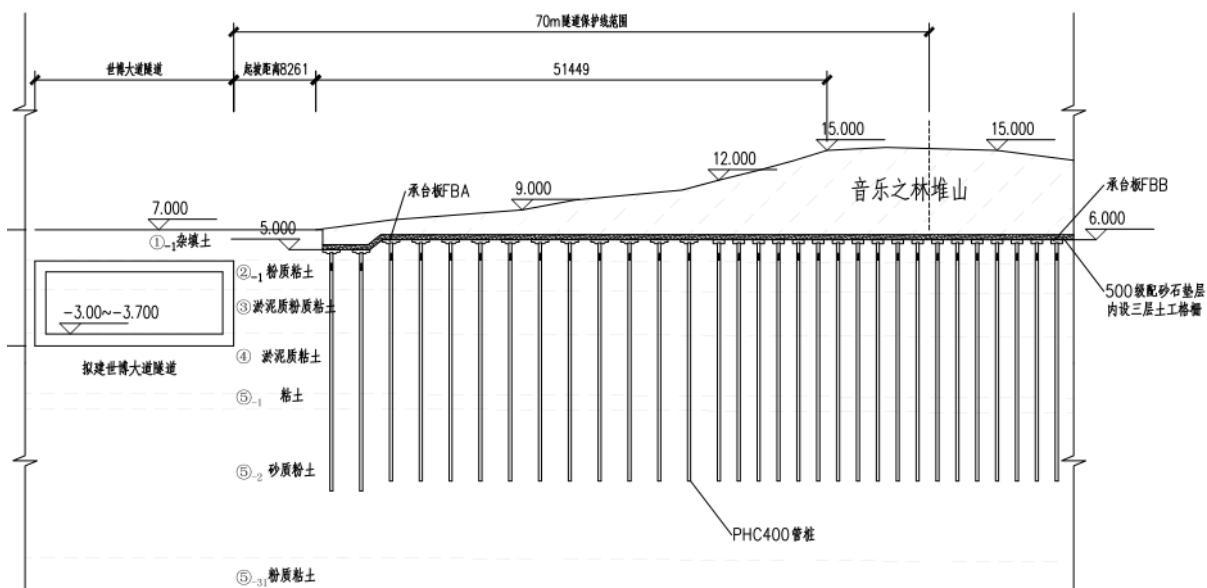


Figure 8. Schematic diagram A-A of the cross-section of World EXPO Avenue and Music Forest
图 8. 世博大道与音乐之林剖面示意图 A-A

利用 Plaxis 2D/3D 专业岩土有限元计算软件进行分析。土体本构模型采用小应变土体硬化模型，土体参数均根据地质勘查报告的数据选取。隧道结构采用板单元模拟，板单元与土体之间均设置有 Goodman 接触单元，用于模拟结构与土体之间的滑移。模型中以线荷载的形式反应堆土高度。

有限元分析采用荷载叠加法分析堆载对隧道的影响，第一部分为 30 m 以外的堆载对隧道的影响，考

虑堆土在隧道底板施工前完成, 预估固结在施工阶段完成 50%, 因此堆载对隧道的影响只考虑 50% 的效果; 第二部分为 30 m 范围内的堆载对隧道的影响。

根据分析 30 m 以外的堆土引起隧道总变形为 23.66 mm, 水平位移 16.6 mm, 坚向位移 16.8 mm, 考虑堆土在隧道底板施工前完成, 预估工后沉降 50%, 则 30 m 之外堆土引起隧道变形为 $23.7 \times 0.5 = 11.9$ mm, 水平位移为 $16.6 \times 0.5 = 8.3$ mm, 坚向位移为 $16.8 \text{ mm} \times 0.5 = 8.4$ mm。

根据分析 30 m 以内的堆土对隧道的总位移为 6.9 mm, 水平位移为 3.0 mm, 坚向位移为 6.2 mm。

综合阶段一和阶段二的分析, 隧道周边堆土引起隧道的总水平位移为 $3.0 \times 0.5 + 10 = 11.5$ mm, 总坚向位移为 $6.2 \times 0.5 + 9.3 = 12.4$ mm。

根据监测结果, 世博大道地道整体沉降情况稳定, 变形缝处无明显渗漏情况, 堆山对世博大道地道影响在可控范围内。

6. 结语

世博大道地道和周边相邻的大歌剧院及世博文化公园属于多地块一体化开发典型案例, 面临基坑开挖面积大、堆山体量大、周边环境保护要求高和工期紧张等诸多挑战, 文章对项目的整体分区、施工工序等进行了系统研究, 总结如下:

- (1) 结合各项目的开工日期及工期要求, 统筹先后期借地要求, 确保各项目顺利实施, 目前世博大道地道、大歌剧院主体结构及世博文化公园均已按工期要求完工;
- (2) 结合基坑形状和工期要求, 考虑时空效应和施工风险要求, 合理划分基坑分区, 设置缓冲区, 确保项目同步实施, 有效控制基坑自身的开挖风险和环境保护风险。
- (3) 结合地道施工和公园堆土的工期要求, 合理设置基坑围护形式及堆土地基处理方式, 统筹考虑施工顺序, 减少加卸载对周边环境的影响。
- (4) 实施中的监测数据仍在收集和梳理中, 后续将进一步分析监测数据, 总结规律, 综合分析技术措施的实施效果。

参考文献

- [1] 岳树桥, 左人宇, 陆钊. 相邻基坑有限宽度土条主动土压力的计算[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 2063-2069.
- [2] 马平, 秦四清, 钱海涛. 有限土体主动土压力计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(S1): 3070-3074.
- [3] 杨其润, 李明广, 陈锦剑, 等. 同步实施的相邻基坑相互作用机理[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(6): 722-729.
- [4] 戴斌, 胡耘, 王惠生, 等. 上海地区相邻基坑同步开挖影响分析与实践[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(z2): 129-132.
- [5] 顾正瑞, 徐中华. 缓冲区宽度对同步开挖基坑群变形影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(z1): 269-277, 293.
- [6] 陈萍, 王卫东, 丁建峰. 相邻超大深基坑同步开挖的设计与实践[J]. 岩土工程学报, 2013(s2): 555-558.
- [7] 张伟锋, 陈盛原, 韦朱. 堆载作用下复合软土地基的沉降规律研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(3): 729-740.
- [8] 刘吉福, 莫海鸿, 魏金霞. 对工后沉降法确定卸载时机的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(z2): 3518-3522.
- [9] 金宗川, 顾国荣, 韩黎明, 等. 大面积堆载作用下软土地基变形特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 1056-1060.
- [10] 翁鑫荣. 软土地区某堆山工程的有限元数值模拟分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(z2): 1788-1793.
- [11] 叶志荣. 龙湖森林公园山体及隧道工程总体设计[J]. 城市道桥与防洪, 2019(7): 298-302.