

城市综合管廊施工过程中位移动态响应规律分析

李 劼¹, 魏爱超², 卢海峰²

¹中冶赛迪城市建设(重庆)有限公司, 重庆

²武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2023年6月25日; 录用日期: 2023年7月16日; 发布日期: 2023年7月27日

摘 要

随着现代社会的日益进步, 城市化的进程也在不断的加快, 各种城市化问题, 比如交通堵塞、人类活动空间受限、绿地面积大幅减少等等, 也随之而来。为了缓解这些问题, 也为了城市的可持续发展, 开发利用地下空间成为了必然的选择。而城市地下综合管廊是在城市的地下建立一个完整的地下隧道空间, 将电力、通信, 燃气、供热、给排水等各种工程管线集于一体, 为满足民生需要和提高城市承载力发挥着重大的作用。本文主要研究了城市综合管廊在施工工程中包括周围地表沉降、地下管线沉降、周边建筑物位移等各类动态响应规律。

关键词

综合管廊, 顶管施工, 地表沉降, 地下管线沉降

Analysis of Dynamic Response Law of Displacement during Construction of Urban Integrated Pipe Corridor

Jie Li¹, Aichao Wei², Haifeng Lu²

¹CISDI Engineering Co., Ltd., Chongqing

²School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan Hubei

Received: Jun. 25th, 2023; accepted: Jul. 16th, 2023; published: Jul. 27th, 2023

Abstract

With the increasing progress of modern society, the process of urbanization is also accelerating, and various urbanization problems, such as traffic jams, limited space for human activities, and substantial reduction of green space, also follow. In order to alleviate these problems, but also for the sustainable development of the city, the development and utilization of underground space

has become an inevitable choice. The urban underground integrated pipeline corridor is to establish a complete underground tunnel space in the underground of the city, integrating various engineering pipelines such as power, communication, gas, heating, water supply and drainage, and playing a significant role in meeting the needs of people's livelihood and improving the city's carrying capacity. This paper mainly studies the dynamic response rules of urban integrated pipe corridor construction, including surrounding surface settlement, underground pipeline settlement and surrounding building displacement.

Keywords

Integrated Pipe Gallery, Pipe Jacking Construction, Land Surface Settlement, Underground Pipeline Settlement

Copyright © 2023 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

我国国土总面积为 960 万平方千米, 随着现代社会的日益进步, 经济的日益发展, 人们对美好物质生活的需要也在日益增长, 城市化的进程也在不断的加快, 各种高层建筑拔地而起, 而为了更加充分地利用土地, 各类高层建筑正在向着越来越高、越来越大的趋势发展。但是随着各类地上建筑的兴建, 各种城市化问题, 比如交通堵塞、人类活动空间受限、绿地面积大幅减少等等, 也随之而来。为了缓解这些问题, 也为了城市的可持续发展, 开发利用地下空间成为了必然的选择。无论是高层建筑的大量兴建, 还是地下空间的开发和利用, 基坑工程都在其中扮演着至关重要的作用。顶管施工作为地下施工工艺的一种, 凭借着它施工工艺安全、施工速度快、对周围的环境影响较小, 尤其是对地面交通的影响较小, 也越来越受到人们的青睐。

对于地下空间的开发与应用, 首先是基坑工程的发展。最早是在上世纪 30 年代, 土力学家 Terzaghi 等人[1]便已经开始研究基坑工程中相关的岩土问题, 之后在 40 年代, Terzaghi 等人[2]便提出了预估挖方稳定程度和支撑荷载大小的总应力法, 50 年代, Bjeruum 等人[3]提出了基坑工程中有关于底板隆起的分析方法……之后, 世界各国的学者陆续在此领域展开了相应的探索与研究, 并且成果斐然。我国对于基坑工程的研究始于上世纪 80 年代, 那时候我国正处于经济建设的关键时期, 建筑行业的发展举世瞩目, 城市地下空间的开发利用也渐露头角, 进而出现了大批的基坑工程, 故我国的众多学者在这一大趋势下开始了相关领域的探索与研究。杨光华等人[4]通过研究土的本构关系方面, 发现传统本构理论存在一定的局限性, 其团队借助广义位势理论得出了土体本构模型建立时的重要条件。李冰河等人[5]研究了影响土体沉降的因素, 并对其进行了分析, 得出支撑结构的刚度、土体的物理力学性质、墙体刚度以及基坑的开挖形状等均在一定程度上影响着土体沉降。俞建霖等人[6]通过研究三种导致基坑变形的因素, 编制出一种三维有限元分析程序, 并使用此程序来分析这三种基坑变形所带来的影响。周秋月等人[7]对钢板桩加钢支撑支护形式下管廊基坑的土体变形以及地面沉降进行了重点监测。

顶管法是指, 隧道或地下管道穿越铁路、道路、河流或建筑物等各种障碍物时采用的一种暗挖式施工方法。顶管施工法最早开始于 1896 年美国的北太平洋铁路铺设工程的施工中, 在我国, 最开始的顶管是手掘式顶管, 并在北京和上海成功得到了实践。近些年来, 我国的顶管技术水平有了很好的发展, 并在大直径、长距离顶管技术方面处于国际领先地位。

综合管廊建设作为完善城市基础设施的重要内容，基坑工程与顶管施工是其中极为重要的内容。陆韬[8]介绍了地下管廊工程中较易出现的工程问题，包括地面沉降、地表渗水、结构病害等等，并对相应问题的处理措施进行了说明。王魁[9]以三维有限元计算模型分析了土体、支护结构、管廊主体结构的作用机理。梁宁慧等人[10]针对国内综合管廊建设中存在的问题提出了一些建设性意见。

地下综合管廊的施工会使得周边土体发生明显的地表沉降现象。姜伟等人[11]发现在顶管施工过程中地表沉降的影响范围为5倍顶管埋深，且地表沉降最大处位于顶管的正上方。郭静等人[12]指出矩形顶管与圆形顶管在施工过程中对土体产生的扰动有所差异，矩形顶管对土体的扰动与顶管机距监测断面距离有关。对于周边存在建筑物的地下管廊工程，其开挖时的工程扰动会对邻近建筑物产生不利的动态响应。胡继伟[13]分析了综合管廊施工过程中掌子面到达位置、盾构埋深、夹角等因素对邻近建筑物的动态响应规律。于宁等人[14]从变形和受力两方面分析了盾构施工对邻近建筑物的影响。Liu 等人[15]对盾构开挖过程中地表动态变形特性进行了研究，发现地表的不均匀沉降使得上部建筑物发生明显变形。薛文等人[16]研究了软土盾构隧道上方建筑物的沉降、变形以及内力随开挖面位置的变化规律。在管廊施工过程中，会对支护结构体系的稳定性有所影响。卢兰萍等人[17]对综合管廊 SMW 工法桩围护结构设计了不同的施工方案，并对其位移抑制效果进行了分析。郑守铭[18]发现在综合管廊施工过程中，围护桩的整体变形由悬臂式变为内凸式。黄侨文等人[19]通过现场监测指出支护结构顶部的水平位移与竖向沉降在施工过程中的变形较大，且在底板浇筑完成后变形变得缓慢。综合管廊施工会使得原有的地下管线产生位移变化。张治成等人[20]通过建立三维有限元模型对管廊顶管施工过程中的周边管线动态响应进行了分析，发现扰动的范围大致为顶管与地下管线相交区域的长度，且开挖面支撑力对于周边管线的隆起或沉降影响较大。曾员等人[21]采用 Flac3D 对矩形顶管施工过程进行了数值模拟分析，发现顶管管节中轴线正上方处的管线位移最大。

本文以深圳市宝安区西接空港新城启动区综合管廊为背景，通过对施工现场的监测分析，来研究综合管廊施工过程中基坑开挖施工以及顶管施工对周围地表沉降、地下管线沉降、周边建筑物位移和地下水的影响。

2. 工程概况

2.1. 工程概述

本项目位于深圳市宝安区，西接空港新城启动区综合管廊(空港新城综合管廊一期)项目，东至乌石岗变电站附近，为深圳市核心电源从林站向宝安区西北部电力负荷中心送电的电力输送大通道的重要组成部分。综合管廊全长约 10.42 km，起于重庆路与松福大道交叉口，止于乌石岗变电站附近(见图 1)。

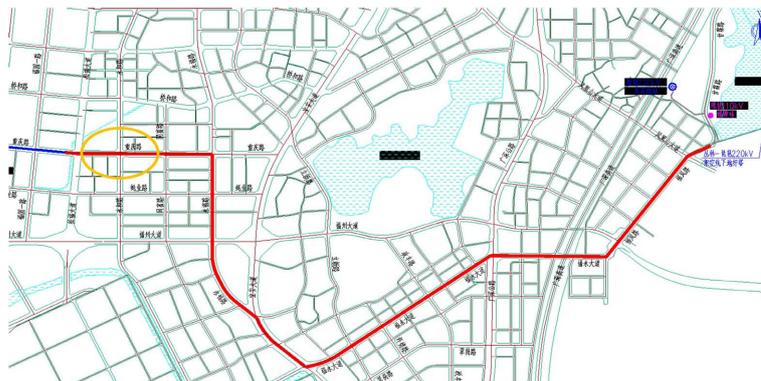


Figure 1. Plan of the proposed project
图 1. 拟建工程平面图

拟建场地属海积~冲积平原地貌,福永大道东及福凤路为剥蚀残丘。拟建管廊沿线为现有道路,地势平坦,钻孔孔口标高在 3.34 m~30.95 m 之间,相对高差为 27.61 m。本文取施工前期的重庆路段(松福大道~永福路)管廊工程进行分析,用以指导后续施工工程的开展。

2.2. 工程地质条件

拟建场地下部土层分布如下表 1 所示。

Table 1. Soil layer distribution under the proposed site

表 1. 拟建场地下部土层分布

路段	场地下土层
永福路段	填土层和砂质黏性土层
宝安大道段	填土层和砂质黏性土层
福永大道段	主要为填土层、粉质黏土层,管廊底板大部分位于全风化岩层上
福凤路段	填土层和粉质黏土层

根据场地岩土工程勘察报告,场地开挖深度影响范围内土层自上而下依次为(见表 2):

Table 2. Stratigraphic parameters of the proposed site

表 2. 拟建场地地层参数表

地层编号	岩土名称	状态	地基承载力特征值 f_{ak} (kPa)	压缩模量 E_s (MPa)	变形模量 E_0 (MPa)	直剪(快剪)		直剪(固快)	
						内摩擦角 φ (°)	凝聚力 c (kPa)	内摩擦角 φ (°)	凝聚力 c (kPa)
① 2	素填土	松散-稍密	90	-	-	8	12	11	14
① 3	填石	稍密为主	100	-	-	15	-	17	-
② 1	淤泥	流塑-软塑	60	2.0	3.0	2	5	8	12
② 2	中砂	松散-稍密	150	-	17.0	25	-	26	-
③ 1	淤泥	流塑	60	2.0	3.0	2	5	8	12
③ 2	粉质黏土	可塑	160	4.5	9.0	15	20	16	22
③ 5	含砂粉质黏土	可塑	160	4.5	10.0	15	20	16	22
④	砂质黏性土	可塑-硬塑	200	6.0	25.0	16	22	18	25

综合管廊基坑下覆土层主要以粉质黏土为主,土体性质较差,故而有必要对施工过程中的动态响应进行监测。

2.3. 水文地质条件

拟建管网工程所处场地水系较为发达,水文情况如下:

上层滞水和潜水主要赋存在第四系素填土和填石层中,属中等-弱透水性地层。基岩裂隙水主要分布于基岩裂隙中,埋藏较深,对拟建工程影响较小。

重庆路段、永福路段分布有承压水,承压水主要分布于第四系冲洪积砂层中,中砂层分布较连续,其上的淤泥③ 1、粉质黏土③ 2层和其下的含砂粉质黏土③ 5层为相对隔水层,砂层受上下相对隔水层的阻隔,略具承压性。

2.4. 支护方案

基坑开挖是工程施工中控制的关键，基坑开挖和支撑的速度直接影响围护变形和安全，进而影响对周边环境的保护。为了有效地控制围护结构变形与坑外地面沉降，其基本原则是“开槽支撑、先撑后挖、分层开挖、严禁超挖”。要想进支护结构的选择，需要先了解各项支护形式，当前基坑工程中常用的支护形式及其适用条件如下(见表 3)：

Table 3. Common support forms and applicable conditions

表 3. 常用支护形式及适用条件

支护形式	适用条件
排桩或地下连续墙 + 内支撑 排桩 + 锚杆	基坑周边环境复杂、变形要求严格时宜采用地连墙 + 内支撑； 适用于各级基坑的支护，但深厚软弱土层不适用；
悬臂桩或双排桩	悬臂桩适用于地质条件较好且深度小于 8 米的基坑； 双排桩不适用于深厚软土地层的基坑
土钉墙或复合土钉墙	较厚软土地层的基坑不宜采用土钉墙；
钢板桩	1) 深度小于 7 米长距离箱涵管沟的基坑； 2) 临近重要建构筑物或地下管线、碎石土等坚硬地层时不宜采用
水泥土墙	1) 深度不大于 6 米的淤泥、淤泥质土等基坑； 2) 不宜用于对变形要求严格的基坑
坡率法	1) 基坑周边环境宽松，有放坡空间； 2) 基坑较深时可与其他支护方案结合

整条管廊位于既有道路下，两侧建筑物密集，且基坑施工时两侧道路需通车，故采用钻孔灌注桩 + 内支撑支护。在灌注桩间施工高压旋喷桩形成止水帷幕用以基坑止水，基坑内设置集水井进行明排水。

3. 施工过程地表沉降动态响应分析

地表沉降是指因基坑开挖引起开挖面围岩的挤出，开挖后围岩和支护的空隙因地下水位下降引起固结，使软弱围岩中支护下沉等原因，导致的地表下沉现象。基坑工程开挖时，随着深度的增加，基坑会出现坑底隆起，这样会导致基坑外部土体向基坑内容流动，导致基坑周边土体发生沉降，而且在围护结构在施工时也可能对土体产生扰动，造成一定程度的沉降。通过对地表沉降的监测数据的分析，可以保证基坑开挖周边地表的变形在容许范围内，以此来保证周围建筑物、埋设管线等设施的安全。管廊施工过程中，基坑周边地表沉降测点如图 2、图 3 所示。D1-D5 为基坑沉降监测点位，D6-D9 为顶管沉降监测点位。

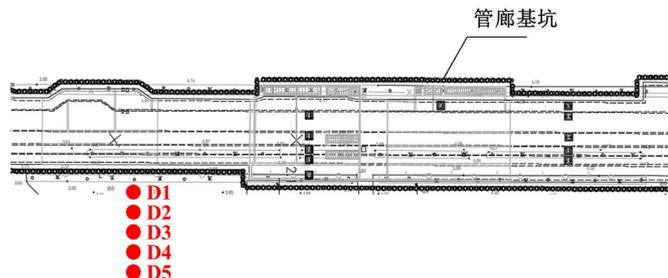


Figure 2. Foundation pit settlement measuring point layout diagram

图 2. 基坑沉降测点布置示意图

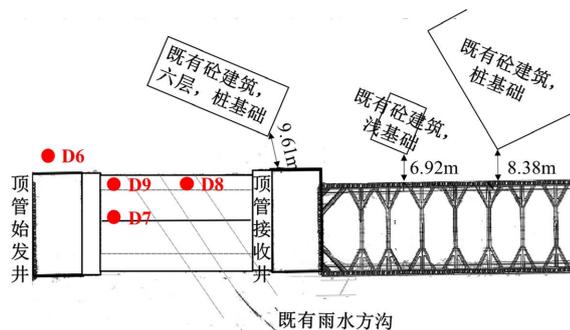


Figure 3. Layout diagram of settlement measuring point of pipe jacking foundation pit

图 3. 顶管基坑沉降测点布置示意图

监测结果如下图所示，图 4 为基坑沉降监测结果图，图 5 为顶管沉降监测图。

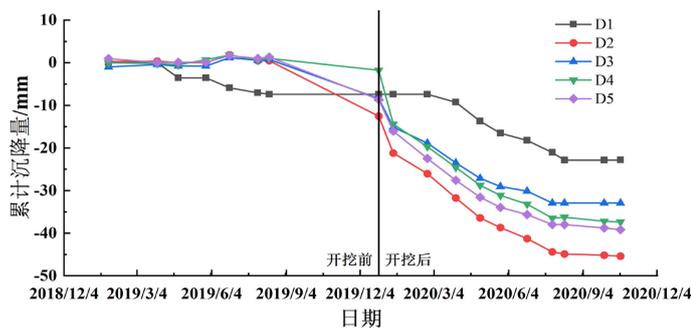


Figure 4. Curve of surface settlement around foundation pit with time

图 4. 基坑周边地表沉降量随时间关系曲线图

由图 4 可以看出，随着支护结构的逐渐完善以及周边土体的固结沉降，基坑周边沉降曲线呈现先增大后平稳的趋势。在基坑上未开挖时，只有离基坑最近的 D1 点土体发生了沉降，在基坑开挖前后，除 D1 点未受影响外，其余各点地表有了明显的沉降，这说明基坑附近存在一定区域土体已在开挖前提前开始了土体的固结沉降。在基坑开挖的完成日期前后，各点沉降均已不在变化，没有开挖的扰动，周边地表不再有所沉降。

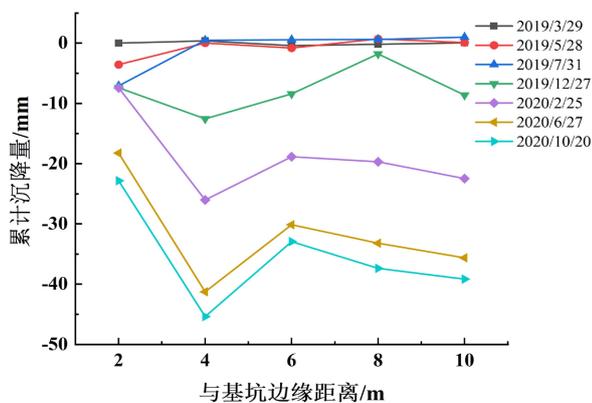


Figure 5. Curve of the surface settlement with distance around the foundation pit

图 5. 基坑周边地表沉降量随距离关系曲线图

图5为开挖后不同时期基坑沉降监测点地表沉降量随距离变化曲线图,2019年12月27日基坑开挖。尚未开挖时,只有基坑边缘处有些微的沉降,其他位置甚至有一些轻微的“隆起”现象。刚开始开挖时,地表沉降量不大,处于波动增长期。开挖一段时日后,沉降量逐渐变大,沉降最大出现在距基坑一定距离处,大概是距基坑4m处左右,沉降量最大达到45mm,而在距基坑大于6m处,沉降已趋于稳定。

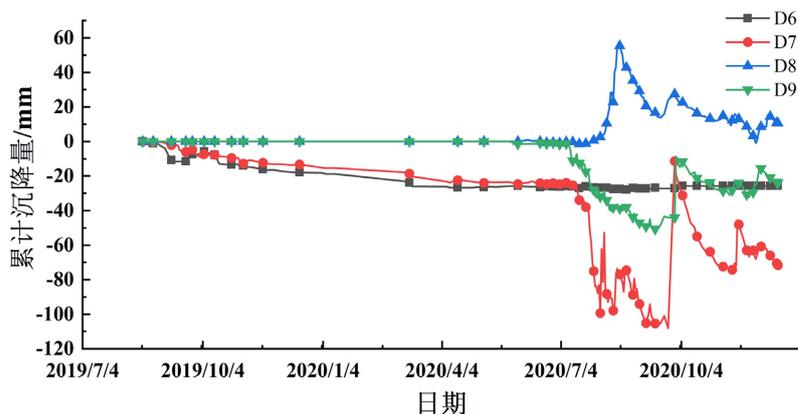


Figure 6. Curve of surface settlement around pipe jacking foundation pit with time
图6. 顶管基坑周边地表沉降量随时间关系曲线图

由图6可以看出,顶管始发井基坑沉降变化不大,而顶管周边沉降曲线波动较大,在施工前期,波动值较大,到施工后期曲线趋于平缓,但是总体趋势较为一致,对于监测点位D7,可能是由于此处对于施工有所特殊要求,导致了地表的骤升,而骤变之后的变化趋势依然与其他点位一致。由于土体土质的差异,导致了位于不同位置处的监测点位D6沉降值大于监测点位D8。

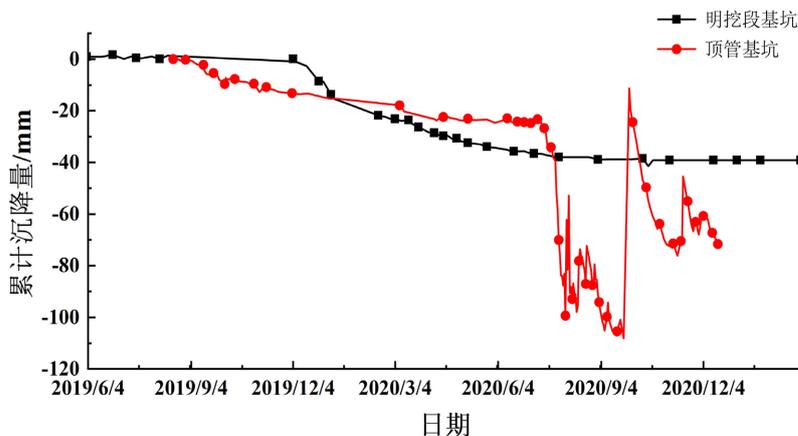


Figure 7. Comparative analysis curve of surface settlement around open-cut pit and pipe-jacking pit
图7. 明挖段基坑与顶管基坑周边地表沉降量对比分析曲线图

由图7可以看出,基坑周边沉降变化曲线较为平滑,变化趋势大体一致;而顶管周边沉降变化曲线起伏较大,且变化周期短,变化呈现迅速且强烈的特点,而且顶管周边沉降量要大于基坑周边沉降量。故而可知,顶管施工对于周边地表的工程扰动要大于基坑施工。

4. 施工过程对支护结构影响分析

4.1. 支护结构水平位移

在管廊施工过程中，难免会使基坑顶部土体发生水平以及竖直方向的位移，为了控制其位移变化，基坑的支护结构发挥了重要作用，为了实时判断基坑支护结构的有效性，现对基坑顶部支护结构水平方向的位移进行监测。监测点位布置如图 8、图 9。WY1-WY4 为管廊基坑监测点位，WY5-WY8 为顶管基坑监测点位。

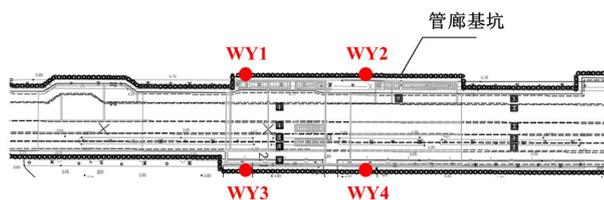


Figure 8. Layout diagram of horizontal displacement measuring point of the top retaining structure of foundation pit

图 8. 基坑顶部支护结构水平位移测点布置示意图

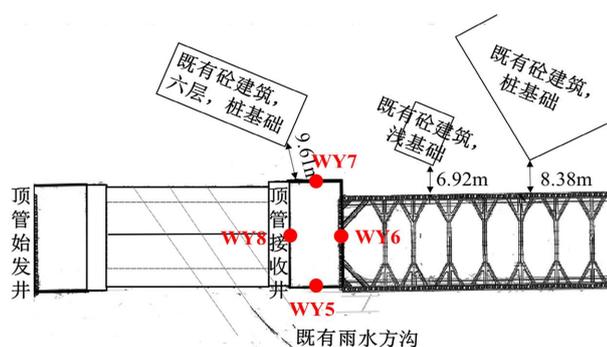


Figure 9. Layout diagram of horizontal displacement measuring point of the top supporting structure of pipe jacking foundation pit

图 9. 顶管基坑顶部支护结构水平位移测点布置示意图

基坑顶部水平位移监测结果如下图所示，图 10 为管廊基坑水平位移监测图，图 11 为顶管基坑水平位移监测图。

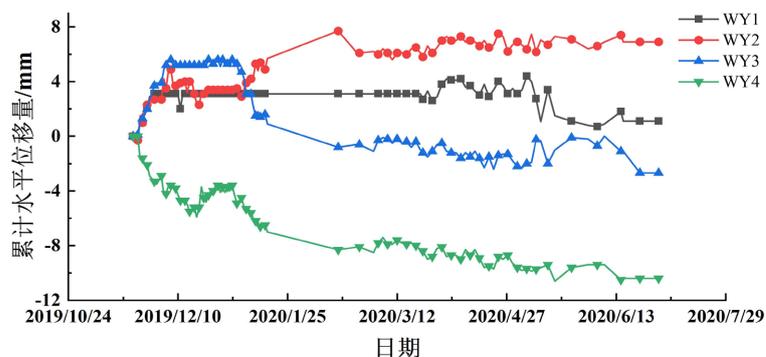


Figure 10. Curve of horizontal displacement at the top of foundation pit supporting structure with time

图 10. 基坑支护结构顶部水平位移量随时间关系曲线图

由图 10 可以看出, 基坑的水平位移变化较为平缓, 由于支护结构以及基坑内支撑的共同作用南北两侧点位监测曲线图在变化上是大致对称的, 至于 1、3 处的位移量略小于 2、4 处, 猜想可能是由于前后两段土体差异, 以及 1、3 处可能位于内支撑施加处, 而 2、4 位于相邻内支撑之间。

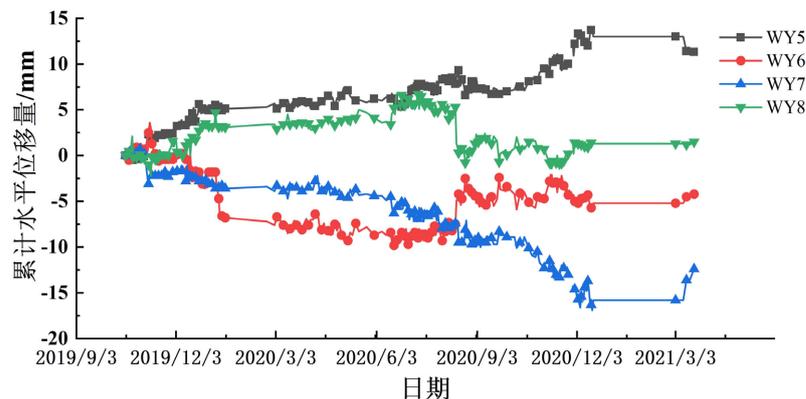


Figure 11. Curve of horizontal displacement on top of pipe jacking foundation pit supporting structure with time

图 11. 顶管基坑支护结构顶部水平位移量随时间关系曲线图

由图 11 可以看出, 顶管基坑支护结构位移, 由于支护结构以及基坑内支撑的共同作用东西两侧点位以及南北两侧点位两两对应、互相对称。由于基坑南北向跨径大于基坑东西向跨径, 导致南北向的水平位移大于东西向。

综合对比图 10、图 11, 水平位移变化曲线皆是两两对称, 但由于顶管基坑支护结构不如管廊基坑, 所以导致顶管基坑水平位移量要略大一些。另外, 管廊基坑水平位移变化主要发生于施工前期, 后面虽有略微波动但变化不大, 而顶管基坑水平位移变化主要发生于施工后期, 施工前期略显平稳。

4.2. 支护结构竖直位移

为了实时判断基坑支护结构的有效性, 现对基坑顶部支护结构竖直方向的位移进行监测。监测点位布置如图 12、图 13。WY1-WY4 为管廊基坑监测点位, WY5-WY8 为顶管基坑监测点位。

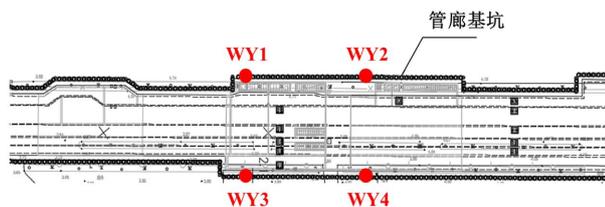


Figure 12. Layout diagram of settlement measuring point on top of foundation pit supporting structure

图 12. 基坑支护结构顶部沉降测点布置示意图

基坑顶部竖直位移监测结果如下图所示, 图 14 为管廊基坑竖直位移监测图, 图 15 为顶管基坑竖直位移监测图。

由图 14 可以看出, 各监测点位的竖直位移呈现先变化波动后趋于稳定的趋势, 且位于同一竖向线的点位, 变化趋势基本一致。由于施工进度的原因, 2、4 点位的竖直位移变化晚于 1、3 点位。

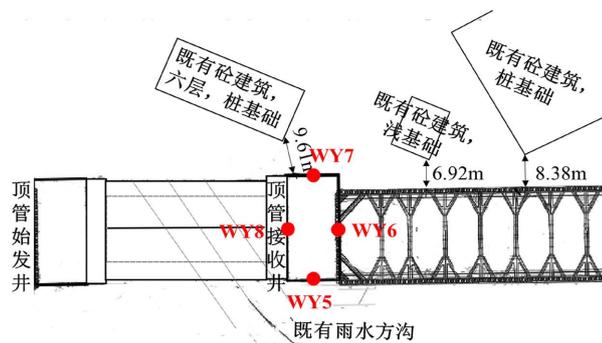


Figure 13. Layout diagram of settlement measuring point on top of pipe jacking foundation pit supporting structure
图 13. 顶管基坑支护结构顶部沉降测点布置示意图

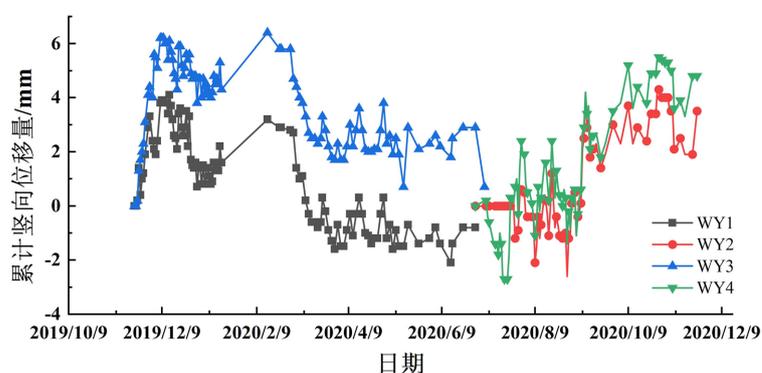


Figure 14. Curve of the cumulative settlement of the top of the foundation pit supporting structure with time
图 14. 基坑支护结构顶部沉降累计量随时间关系曲线图

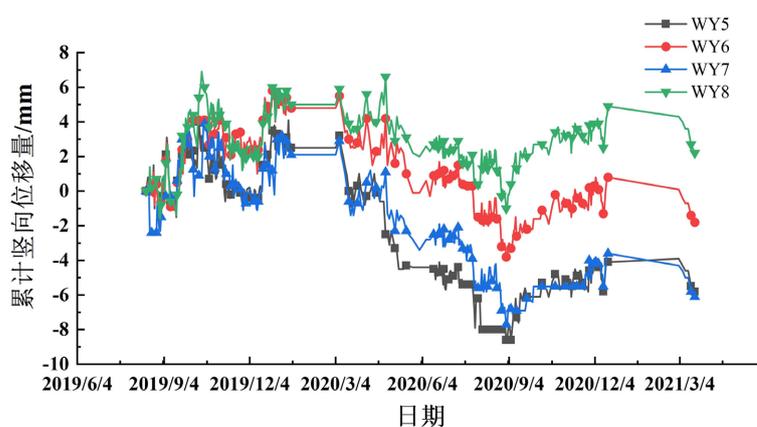


Figure 15. Curve of the cumulative settlement of the top of the pipe jacking foundation pit supporting structure with time
图 15. 顶管基坑支护结构顶部沉降累计量随时间关系曲线图

由图 15 可以看出，顶管基坑南北侧与东西侧监测点位变化趋势高度一致。对于竖向位移，跨径小的东西向点位竖向位移量大于跨径大的南北向。

综合对比图 14、图 15，可以看出处于同一走向线的不同点位，竖直位移的变化趋势都是一致的。由

于顶管基坑支护结构不如管廊基坑，所以导致顶管基坑竖向位移量要略大一些。

5. 施工过程对地下管线影响分析

无论是作何施工，都应建立在不影响周边建筑物的前提之下。综合管廊施工过程中势必会对周边管线的沉降产生影响，因此有必要对综合管廊附近的地下管线进行监控量测，基坑周边地下管线沉降测点如图 16 所示(测点 G1-G4)。

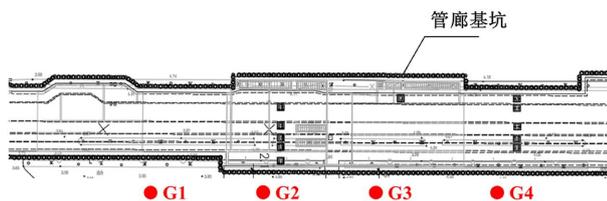


Figure 16. Layout diagram of underground pipeline settlement measuring points around foundation pit

图 16. 基坑周边地下管线沉降测点布置示意图

基坑周边地下管线沉降监测结果如图 17 所示。

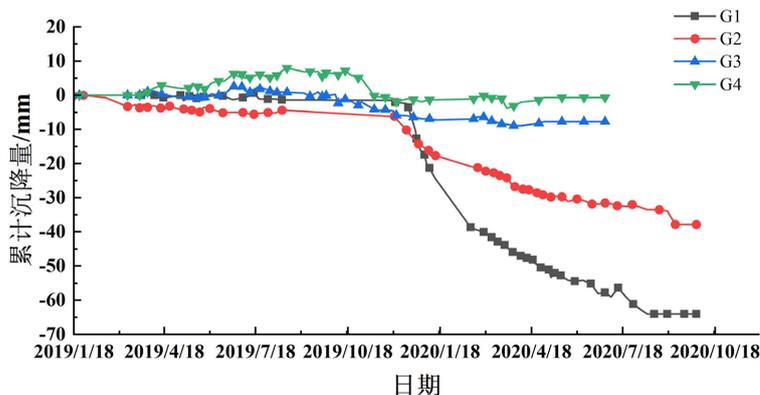


Figure 17. The cumulative settlement of underground pipelines around the foundation pit as a function of time

图 17. 基坑周边地下管线沉降累计量随时间关系曲线图

由图 17 可以看出，从管线东侧向西侧，沉降逐渐变小，而这反映出了从东向西土体逐渐变得致密，土质越来越好。而对于 G1 点的沉降依然高达 60 mm 以上，故而需对其一定的控制，减小施工对周边管线的影

6. 结论

本文以深圳市宝安区西接空港新城启动区综合管廊项目为实际背景，探讨施工过程中临近构筑物的动态响应，主要分析了顶管与基坑施工过程中的周边地表沉降、地下管线沉降以及它们支护结构的水平与竖直位移。

1) 基坑周边地表沉降在支护结构所起效用明显的范围内，随着监测点位置变远，其所处土体的沉降值越大。土体土质的松散程度会对土体产生明显影响。管廊顶管施工过程中的周边地表沉降波动性较大，且顶管施工对于周边地表的工程扰动程度要大于基坑施工。

2) 顶管与基坑支护结构的水平位移变化值呈现明显的对称分布, 基坑支护结构水平位移变化主要发生于施工前期, 而顶管支护结构水平位移变化主要发生于施工后期。基坑与顶管支护结构的竖向位移都是呈现出先波动后稳定的趋势。顶管施工过程中支护结构的水平与竖向位移要大于基坑施工。

3) 随着管廊工程的不断施工, 所处土体不断固结沉降, 地下管线的沉降值也在逐渐变小。

参考文献

- [1] Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G. (1996) *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- [2] 徐宜和. 基坑工程技术现状分析[J]. 四川建筑科学研究, 2005, 31(6): 113-117.
- [3] Bjerrum, L. and Eide, O. (1956) Stability of Struttred Excavations in Clay. *Géotechnique*, **6**, 32-47. <https://doi.org/10.1680/geot.1956.6.1.32>
- [4] 杨光华. 土体的广义位势本构理论及其工程应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [5] 李冰河. 邻近既有地下室深基坑工程支护方案设计及实施效果[J]. 工业建筑, 2010(40): 1032-1035.
- [6] 俞建霖, 龚晓南. 基坑工程变形性状研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(4): 86-90.
- [7] 周秋月, 余湘娟, 高磊, 等. 南京市某综合管廊工程基坑监测分析[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(23): 277-280+316.
- [8] 陆韬. 软土地基地下综合管廊较易出现的病害及修复[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2017(36): 162-164.
- [9] 王魁. 明挖地下综合管廊施工阶段数值模拟分析[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南工业大学, 2017.
- [10] 梁宁慧, 兰菲, 庄炆, 等. 城市地下综合管廊建设现状与存在问题[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(6): 1622-1635.
- [11] 姜伟, 宗秋雷, 王程鹏, 等. 大断面矩形顶管施工对地表及邻近管线的影响[J]. 工程建设, 2021, 53(9): 44-49.
- [12] 郭静, 马保松, 赵阳森, 等. 大断面矩形顶管施工对周围土体扰动实测分析[J]. 特种结构, 2019, 36(1): 1-7.
- [13] 胡继伟. 地下综合管廊施工对地表沉降和邻近建筑物的影响[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2018.
- [14] 于宁, 朱合华. 盾构施工仿真及其相邻影响的数值分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 292-296.
- [15] Liu, J., Qi, T. and Wu, Z. (2012) Analysis of Ground Movement Due to Metro Station Driven with Enlarging Shield Tunnels under Building and Its Parameter Sensitivity Analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **28**, 287-296. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.12.005>
- [16] 薛文, 丁智, 秦建设, 等. 软土盾构隧道掘进对邻近浅基础建筑物影响研究[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(2): 106-113.
- [17] 卢兰萍, 张泽浩, 郑忠良, 等. 综合管廊 SMW 工法桩变形规律研究及优化[J]. 工程勘察, 2022, 50(10): 7-12.
- [18] 郑守铭. 基于 HSS 模型的管廊基坑支护结构受力探究[J]. 福建建筑, 2022(10): 88-92.
- [19] 黄侨文, 李淦泉, 张傲. 城市地下综合管廊基坑监测分析[J]. 广州建筑, 2019, 47(4): 8-12.
- [20] 张治成, 林思, 王金昌, 等. 矩形管廊顶管施工对邻近管线的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(S2): 244-249.
- [21] 曾员, 银英姿. 大断面矩形顶管施工引起的管线沉降特性研究[J]. 建筑技术, 2019, 50(5): 554-557.