

城市明挖地下工程开发环境效应研究现状及趋势

朱亦弘^{1,2}, 徐日庆^{1,2}, 龚晓南^{1,2}

(1. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 杭州 310058; 2. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 杭州 310058)

摘要: 随着城市地下空间开发规模不断增大, 城市地下空间开发的主要矛盾从基坑自身稳定问题逐渐转向基坑周边环境变形控制问题。周边环境复杂情况下的地下空间开发极易引起地表不均匀沉降, 建筑物开裂, 造成巨大的经济损失。因此需要系统性地研究城市各类明挖基坑开发形式所带来的环境影响及环境效应控制技术。本文介绍和回顾了统计经验法、数值模拟法、模型试验法在明挖基坑引起的环境效应研究中取得的研究成果, 总结了各类研究方法及其优势和不足。介绍了现有环境控制技术及应用案例, 总结了地下空间开发环境效应研究成果, 并对今后研究方向提出了建议。

关键词: 地下工程; 明挖; 基坑; 环境效应; 变形控制

中图分类号: TU464 **文献标识码:** A

Research Status and Trends of Environmental Effects of Urban Excavation Underground Engineering Development

Zhu Yihong^{1,2}, Xu Riqing^{1,2}, Gong Xiaonan^{1,2}

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: With the increasing developmental scale of urban underground space, the main contradiction of the urban underground space development has gradually turned from the stability of the foundation pit to the deformation control of the environment around the foundation pit. The underground space development surrounding a complex environment may easily lead to uneven surface subsidence and building cracking, resulting in great economic losses. Therefore, the environmental effect of various excavation foundation pits and environmental effect control technology must be systematically studied. This study introduces and reviews the application of statistical, numerical simulation, and model test methods in the study of the environmental effects caused by excavation foundation pits. This study also summarizes the advantages and disadvantages of each research method, introduces the existing environmental control technology and application cases, summarizes the research results on the environment effect of the underground space development, and proposes some suggestions for future research in this field.

Keywords: underground space; excavation; foundation pit; environmental effects; deformation control

收稿日期: 2017-12-06; 修回日期: 2017-12-20

通讯作者: 徐日庆, 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 教授, 研究方向为岩土本构模型、基坑工程环境效应、固化剂等;

E-mail: xurq@zju.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“城市地下空间开发规划战略研究”(2015-XZ-16)

本刊网址: www.enginsci.cn

一、前言

我国自 20 世纪 80 年代起逐步开始开发城市地下空间,经过 30 多年的发展,地下空间开发进入了高速发展时期,其中复杂的城市地下综合体以井喷式的速度发展。以浙江省地下空间开发为例,截至 2012 年年底,浙江省地下空间开发面积达 $12\,181.9 \times 10^4 \text{ m}^2$,且每年地下空间建成面积超过 $1 \times 10^6 \text{ m}^2$ [1]。近年来国内也涌现了一波地铁建设潮,截至 2017 年 7 月,我国已经有 32 个城市开通了城市轨道交通,总里程达 4 454 km,其中上海、北京运营里程已超过 600 km,运营规模分列世界第一和第二位。

城市地下空间开发呈现长、大、深的趋势,随着开挖深度和面积的不断增大,地下空间开发引起的周边环境问题也愈发受到重视。深层地下空间开发会引起周边地层变动,导致既有建筑物、地下管线、盾构管片的不均匀沉降和开裂,影响各类建(构)筑物的使用功能甚至结构安全。因此地下空间开发过程中需要有科学合理的规划、设计、施工、监测控制标准确保环境安全,以保证周边建筑物、道路、地下管线等处于安全可用状态。

二、明挖地下工程环境效应研究现状

我国城市明挖地下工程开发的主要矛盾已由早期的地下工程稳定性问题逐渐转向地下工程周边环境变形控制问题。

我国明挖地下工程多处于城市繁华中心地带,地基开挖往往会影响到周围的重要建筑、市政道路、地下管线、地铁盾构等设施,改变原有地应力场,引起周围地层位移,导致周围建(构)筑物产生不均匀沉降。因此现在亟需探明深基坑开挖引起的周围地层应力场变化和周围地层位移场的变化规律,并采取有效的应对措施控制变形。

(一) 统计经验法

Peck [2] 最早对基坑变形开展了系统性研究,他提出了考虑地层差异的地层沉降及分布的经验估算方法。

在此基础上,学者们将基坑变形区域划分为主

要影响区域和次要影响区域,对两个区域内地层的变形特征及区域分界展开了讨论。学者们通过不断分析基坑变形监测数据提出了基于各种因素影响的基坑变形经验公式,并采用包括基坑坑底隆起、基坑挡土墙后地表沉降等参数来评估基坑的稳定性。

Brand 等 [3] 较为系统地总结了基坑支护系统变形的主要影响因素,包括:①支护类型;②支护体系的刚度;③挡墙的埋设深度;④预加荷载值;⑤施工暴露时间;⑥主体结构的施工方法;⑦地表超载值;⑧开挖形状和深度;⑨地基土的特性;⑩周围既有建筑物。

通过监测统计,基坑变形具有显著的空间效应和时间效应,地基土暴露面积越大、暴露时间越长,其变形增长越大。尤其是在我国东南沿海经济发达的软土地区,土体蠕变可以占到总变形的 30%~60%。因此软土地区控制土体蠕变对控制基坑总变形量十分重要,基坑开挖后及时支设支护结构可以有效控制地基土蠕变。

统计经验法基于实际观测基坑开挖对周围地层扰动的影响并由此提出地层变动形式和主要影响因素。限于实际工程情况和现场测点布置,一般只能获得基坑开挖周边地表沉降、围护结构变形和坑底隆起等参数作为表征指标,与工程地质条件和支护形式相结合进行分析,并不能获得完整的地基变形场。

(二) 数值模拟法

随着计算机科学的快速发展,数值模拟法在传统工程设计中得到广泛应用。基坑开挖的数值模拟可以更好地考虑岩土体的本构特性、工程地质条件、结构与土的相互作用及接触面关系和复杂的开挖工况,因此在地下工程变形预测领域越来越受到重视。

Duncan 等 [4] 采用了非线性弹性模型对边坡开挖的形状进行了数值模拟,开创了地下工程变形数值模拟研究的先河。

数值模拟法可以考虑地下工程变形中的流固耦合问题,并且可以应用各种复杂的本构模型来模拟土体的应力应变性状。自 Duncan-Chang 的非线性弹性模型之后,陆续有 Mohr-Coulomb 模型、Mises 模型、剑桥模型及其修正模型、硬化土模型等应用

到地下工程变形研究中。丰富的本构模型可以用于模拟不同应力路径、各种工况下的岩土体变形性状。

早期的数值分析方法将三维问题简化为二维问题求解。二维数值分析可以较好地模拟隧道断面开挖、长宽比较大的矩形基坑。近年来,随着计算机计算能力的不断增强,三维数值模拟方法逐渐成熟。研究发现,二维分析选取重要断面进行变形预测模拟,其结果比三维模拟结果和实际监测结果偏大 [5]。三维数值模拟方法可以更好地分析异形地下工程引起的地基变形。

数值模拟法可以低成本地模拟各类边界条件、各类工况下地下工程的变形性质。明挖地下工程变形的影响因素繁多,工况的组合形式也较多,数值模拟法可以通过设置不同的变量组合进行研究。Rowe 等 [6] 基于土体各向异性弹性假设,考虑了地层损失及注浆等因素对于隧道开挖时的影响,并引入了间隙参数,使得计算地层沉降时能够考虑各种施工因素的影响。

数值模拟法可以较好地模拟岩土介质、开挖工况、边界条件,并可以考虑渗流场、温度场的影响,因而比传统计算方法有明显优势,但国内数值模拟法应用时间较短,模拟方法和工程参数经验积累较少,需要进一步的应用和积累以保证数值分析中参数选取的合理性。数值模拟对部分施工工况尚不能很好模拟,包括围护结构施工和打桩置换等引起的扰动等。

(三) 模型试验法

模型试验法是研究和验证岩土工程理论的重要手段,早期的室内模型试验主要研究基坑开挖的稳定性和变形机理,取得了丰硕的成果。近年来,基坑变形成为主要研究内容,小比尺模型并不能有效地模拟地基土的应力场,大比尺模型的试验条件和成本较高,因此离心机模型试验得到了快速发展。

早在 1948 年, Terzaghi 等 [7] 利用室内模型试验研究了散粒体填土材料的挡土墙压力、墙体变形与土压力关系、滑裂楔体角。

室内小比尺试验着重研究墙后土体性质变化及墙体与土体接触条件变化对基坑开挖时的土压力及墙后地表沉降变化的影响。小比尺试验的应力场和变形场不能完全模拟实际工况,只能进行基坑变形

影响因素的定性研究。

离心机试验可以较好地模拟应力场,保证模型箱区域范围内应力条件接近实际工况,适合进行破坏失稳型试验,可以较好地模拟基坑开挖各工况下地基与墙体应力和变形的变化趋势。

大比尺试验可以较好地模拟应力场与变形场,模型不需进行大比例缩尺,其加载条件和边界条件也更符合工程和实际情况。我国大型岩土试验平台建设已取得长足进展,北京工业大学建成了目前国内最大的地下工程综合试验平台(6 m×6 m×10 m),达到世界先进水平。大比尺试验适合进行重要工程的多场多工况模拟论证研究。

模型试验仍是明挖地下工程变形研究的最直观手段,需根据研究目标和内容选择合理的试验方案。由于小比尺试验缩尺效应应力场或变形场失真较严重;大比尺试验的试验成本较高,耗时较长;离心机试验对基坑开挖的模拟经验仍有欠缺,需要继续研究开挖卸载工况等模拟方法。

三、环境保护措施研究现状

地下空间开发不可避免地会对周边环境产生影响,当产生的影响超过了既有建(构)筑物容许变形值时则需要采取相应的工程措施控制建(构)筑物的变形。根据保护对象不同可以分为以减小影响源的主动加固技术和保护受影响建(构)筑物的被动加固技术。

(一) 主动加固技术

主动加固技术多是基坑开挖或隧道掘进过程中通过调整施工工艺和施工流程来达到控制变形的目的。其中盾构法、顶管法等非开挖技术施工系统性较好,一般以调整推进速度、刀盘压力等施工参数来控制周边环境变形,在变形敏感区域辅以二次注浆方法加固开挖掘进区域周边土体。基坑开挖由于开发规模大,开挖卸载引起的周边环境变形影响范围大,会采用多种主动加固技术进行基坑自身加固。常用的基坑主动环境控制技术有加固基坑土体、优化基坑围护体系、地下水降水隔断和回灌技术等。

基坑土体加固是运用地基改良方法对坑底土体加固以提高被动区抗力,通过高压喷射注浆法、全

断面注浆法和水泥土搅拌桩等工法改善开挖影响区内的土体强度和性质，为围护结构提供支撑，控制基坑主要变形区的开展。

基坑周边大范围降水会引起周边大面积沉降，需要采取地下水隔断或者回灌技术以控制降水影响区域。俞建霖等 [8] 提出了一种回灌系统的设计方法及程序，可将抽提的地下水回灌到地下，减少地下水水位下降从而避免地基因固结导致的沉降。

（二）被动加固技术

被动加固技术是针对受影响的建（构）筑物进行补强加固，以保证在地下空间开发过程中周边建（构）筑物不会产生明显开裂损坏。常用的被动加固技术包括隔断法、基础托换技术、注浆加固技术等。

隔断法通过在基坑和受保护建筑之间打设隔离桩来隔断由于基坑开挖引起的应力场变化，隔断法常采用钢板桩、树根桩、深层搅拌桩等桩体形成具有一定刚度的墙体以承受基坑开挖引起的侧向力和摩阻力。

为控制港珠澳大桥海底沉管隧道基础沉降，竺明星等 [9] 进行了 4 组高边载作用下隔离桩受力室内模型试验，验证了隔离桩隔断变形场的作用。隔离桩在边载作用下呈被动受力特性，隔离桩邻近桩基的桩身最大轴力较无隔离桩的桩基减小约 10%，桩身最大弯矩减小约 20%，隔离桩隔离效果显著。

基础托换技术是为了避免既有建筑物基础在地应力场变化的情况下产生过大差异沉降而将既有建筑物的荷载逐步转移到新托换基础上的技术。

注浆加固技术是在既有建筑物基础周边土体注浆加固，提高土体的承载力和模量，多适用于加固独立基础或条形基础建筑，常用的注浆方式有压密注浆和劈裂注浆。对注浆加固效果的机理已经有了较深的研究和认知，但在既有建筑物加固实践中对注浆方法和注浆压力的控制仍少有相关的文献。

四、趋势与建议

我国城市明挖地下工程开发的主要矛盾已由早期的地下工程稳定性问题逐渐转向地下工程周边环境变形控制问题，地下空间开发的环境变形预测与控制技术将越来越重要。

重要建（构）筑物的全生命周期变形沉降监测

随着物联网技术的快速发展而成为可能，有助于推断建（构）筑物的容许变形值并提供相应的变形控制标准。

基坑变形监测数据云端存储与大数据分析技术可以更好地分析同类型基坑的变形特质，使各类经验公式的拟合数据规模快速扩大。

应效仿欧美大力推进将既有研究成果转化为工程实践的指导规范，继续搜集完善补充各地区的环境控制案例。我国幅员辽阔，不同地区应根据自身经验和条件设定建筑物保护标准。

应进一步完善现有环境影响分析计算理论，建立考虑不同区域水文地质条件差异、复杂的岩土材料性质、周边环境和荷载差异等多方面因素影响的环境分析方法。大力发展数值分析方法，结合本地区地下工程开发经验，编撰数值模拟分析手册。

随着地下空间建设逐渐向深层地下空间和我国内陆地区发展，需要紧跟现有工程实践情况，针对特殊地质条件、地下空间布局和结构形式、施工方法等开展模型试验和数值模拟研究，以解决由诸如欠固结土区域开挖问题，软土地区暗挖法的稳定性和沉降控制问题，超近距地下空间开发变形控制问题，超深基坑开挖、降水及回灌等新型工程问题引起的环境效应问题。

五、结语

解决城市明挖地下工程的变形预测与控制问题将变得越来越重要。

笔者通过理论推导、模型试验和现场实测统计分析等研究方法研究了基坑开挖引起的周边环境影响变形场，对明挖地下工程的变形性状已有了初步的认知。

变形控制技术还处在经验指导的实施阶段，需要进一步探明变形控制原理。

参考文献

- [1] 李海波, 杨桦. 浙江省地下空间开发利用的技术和技术标准体系研究 [R]. 杭州: 浙江省建筑科学设计研究院有限公司, 2014. Li H B, Yang H. Study on technical standard system for development of underground space in Zhejiang Province [R]. Hangzhou: Zhejiang Academy of Building Research & Design Co. Ltd., 2014.
- [2] Peck R B. Deep excavations and tunneling in soft ground [C]. Proceeding of the 7th ICSMFE, State-of-the-Art Volume, Mexico,

- 1969.
- [3] Brand E W, Benner R P. 软粘土工程学 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.
Brand E W, Benner R P. Soft clay engineering [M]. Beijing: China Railway Press, 1991.
- [4] Duncan J M, Clough G W. Finite element analysis of port allen lock [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1971, 97: 1053–1066.
- [5] Chew S H, Yong K Y, Lim A Y K. Three-dimensional finite element analysis of a strutted excavation underlain by deep deposits of soft clay [C]. Proceedings of the Sixth NTU-KU-KAIST Tri-lateral Seminar /Workshop on Civil Engineering, Korea, 1996.
- [6] Rowe R K, Lo K Y, Kack G J. A method of estimating surface settlement above tunnels constructed in soft ground [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, 20(8): 11–22.
- [7] Terzaghi K, Peck R B. Soil mechanics in engineering practice [M]. New York: Wiley, 1948.
- [8] 俞建霖, 龚晓南. 基坑工程地下水回灌系统的设计与应用技术研究 [J]. 建筑结构学报, 2001, 22(10): 70–74.
Yu J L, Gong X N. Study on the design and the application of the groundwater recharge system in excavation [J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(10): 70–74.
- [9] 竺明星, 于汝康, 龚维明. 边载作用下隔离桩受理特性及隔离效果研究 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 656–661.
Zhu M X, Yu R K, Gong W M. Mechanical characteristics and isolation effects of isolated piles due to side loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 656–661.