

框架逆作深基坑变形特性离心模型试验

柏 挺^{1,2}, 李镜培^{1,3}, 梁发云^{1,3}

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 广西壮族自治区住房和城乡建设厅, 广西 南宁 530028;

3. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 以某超大型深基坑工程为背景, 通过离心模型试验比较了新型框架逆作法与传统逆作法的施工方案基坑变形控制的效果; 基于试验结果, 研究了地表最大沉降与围护结构最大侧移之间的关系, 以及地表沉降大小和影响范围. 试验结果显示: 框架逆作基坑地表最大沉降基本为围护墙最大侧移的 0.35~0.70 倍, 而无支撑暴露时间对二者比值的大小有一定影响; 基于实测总结的国内外多种经验地表沉降预测方法并未能很好地预测试验结果; 框架逆作法与传统逆作法施工方案基坑变形控制的效果大致相当, 框架逆作法方案可以达到有效控制基坑变形的目的, 该结论对于框架逆作法在实际工程中的推广应用具有重要参考价值.

关键词: 基坑工程; 框架逆作法; 变形特性; 离心模型试验
中图分类号: TU473.2 **文献标志码:** A

Centrifuge Model Test Investigation on Deformation of Deep Excavation with Frame-Top-Down Method

BAI Ting^{1,2}, LI Jingpei^{1,3}, LIANG Fayun^{1,3}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Housing and Urban-Rural Development, Nanning 530028, China; 3. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Taking one large deep excavation as the research background, this paper compares the effect of deformation control of the frame-top-down scheme and the traditional top-down scheme through centrifugal model tests. In addition, it further studies the relationship between the maximum wall deflections and the maximum ground settlements, as well as the size and scope of ground settlements. The test results show that the excavation-induced maximum ground settlements using frame-top-down method δ_{vm} is 0.35~0.7 times of the excavation-induced maximum wall deflection δ_{lm} ,

and unsupported exposure time has some effect on δ_{vm}/δ_{lm} . The predicted results by empirical prediction method based on measured data is much different from the test results. Excavation-induced performance using frame-top-down and traditional top-down construction schemes is similar, and the excavation-induced performance using frame-top-down scheme can be controlled effectively. The conclusion of this paper has significant referential meaning for designs and constructions of actual engineering.

Key words: excavation engineering; frame-top-down method; deformation behaviors; centrifuge model test

随着城市建设的不断发展, 上海地区的深基坑工程呈现出开挖面积大、深度深、周边环境敏感以及形式多样的特点. 由于逆作法具有水平支撑刚度大和节能环保的特点, 在上海地区得到了广泛应用, 其中大多采用的是传统逆作法. 传统逆作法利用主体结构板作为支撑, 混凝土板支撑刚度较大, 有利于减小围护结构的变形和地表沉降; 但是采用结构板支撑时, 基坑开挖需要暗挖土方, 且结构板形成所需要的立模、扎筋、浇注和养护等花费了大量的时间, 大大延长了无支撑暴露时间. 而上海地区大多数深基坑开挖地层范围内为强度低、含水量高、流变性强的软塑黏土, 无支撑暴露时间的增加势必增大了基坑的变形^[1]. 框架逆作法^[2]作为一种新型的逆作法, 采用主体框架梁作为水平支撑, 既具备了逆作法的水平支撑刚度大、节能环保的特点, 又避免了传统逆作法暗挖土方等问题. 目前对传统逆作法已进行了较多的研究^[3], 但对框架逆作法基坑变形控制特性的研究还较为鲜见.

目前研究深基坑变形的主要方法有解析法、模型试验及有限元数值模拟等方法. 解析法通常需要

收稿日期: 2013-06-04

基金项目: 国家自然科学基金(51178341); 上海市科技攻关计划项目(10231200500)

第一作者: 柏 挺(1984—), 男, 工学博士, 主要研究方向为基坑工程. E-mail: baitng1984@126.com

通讯作者: 李镜培(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桩基础及深基坑工程. E-mail: lijip2773@tongji.edu.cn

做大量简化,且难以考虑支护结构与土体相互作用;常规室内小尺度模型试验缩小模型后,应力水平也相应缩小,其体现的工程性状与实际情况有较大差异;采用有限元预测基坑变形时,土体本构的选取和材料参数确定对其可靠性影响很大.而离心模型试验能借助离心加速度再现与工程原型应力水平相当的应力场,已成为岩土工程中重要的研究手段.

本文以实际工程为背景,针对两种基本施工方法的特点进行了离心模型试验,对比研究了两种不同施工方案(即框架逆作法与传统逆作法)控制基坑变形的效果;基于试验结果,进一步研究了框架逆作法墙后地表最大沉降与围护结构最大侧移之间的关系,以及地表沉降大小和沉降范围.

1 工程背景

塘东总部基地项目的深基坑位于浦东新区,拟建地面建筑物由 5 幢高楼和商业裙楼组成;地下室地下 3 层为地下车库.该基坑东西长约 250 m,南北宽约 190 m,基坑总面积近 5 万 m^2 ,属于典型的超大型深基坑工程.基坑开挖深度为 13.6 m,穿越的主要土层为厚约 10 m 的淤泥质软黏土,土层的主要物理性质见表 1.整个基坑共设 3 道水平支撑,水平支撑主要采用主体结构框架梁,主梁间距为 8.4 m;竖向支撑采用一柱一桩;围护方案采用 $\phi 1050@1250$ 钻孔灌注桩,外侧采用三轴水泥土搅拌桩作为隔水帷幕墙.基坑支护结构剖面图如图 1 所示.

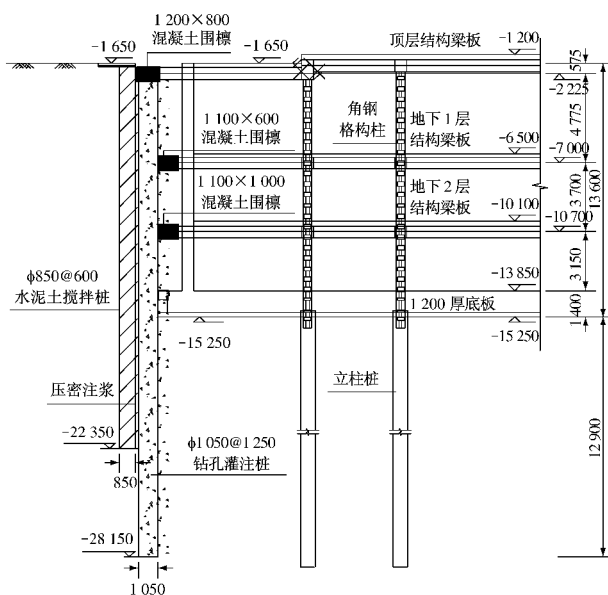


图 1 基坑支护结构剖面图(单位:mm)

Fig.1 Support system in foundation pit(unit: mm)

表 1 土的物理力学指标

Tab.1 Mechanical parameters of soils

土层编号	土层名称	层厚/ m	重度 γ / ($kN \cdot m^{-3}$)	内摩擦角 φ / ($^{\circ}$)	内聚力 c /kPa
①	填土	1.5			
②	褐黄-灰黄色粉质黏土	1.5	18.5	22.5	16
③	灰色淤泥质粉质黏土	3.0	17.6	21.0	12
③夹	灰色黏质粉土	2.0	18.7	29.5	8
④	灰色淤泥质黏土	9.5	16.9	14.0	14
⑤ ₁₋₁	灰色黏土	3.5	17.9	14.5	17
⑤ ₁₋₂	灰色粉质黏土	3.0	18.2	19.0	15
⑥ ₁	暗绿色粉质黏土	4.0	19.7	19.0	48
⑦ ₁	草黄色砂质粉土	11.0	18.9	33.0	4
⑦ ₂	草黄-灰黄色粉砂	36.0			

2 试验设计

2.1 试验设备

离心试验设备采用同济大学岩土工程实验室 TLJ-150 型土工离心机.该设备最大容量为 150gt (g 为重力加速度, t 为运转时间),最大加速度为 200g;有效旋转半径为 3 m.试验使用的模型箱有效尺寸为 0.9 m \times 0.7 m \times 0.7 m(长 \times 宽 \times 高).

2.2 土样制备

基于模量的相似关系,基坑的实际空间尺寸,以及离心试验室设备的工作条件,将模型率取为 $n=100g$.试验用土取自现场原状土,试验根据土体的主要性质对土层作了适当合并和简化,选择厚度较大且具有代表性的土层,模型土层分别为 24 cm 厚的淤泥质黏土和 21 cm 厚的砂质粉土,为了便于排水,底层铺有 5 cm 黄砂(土层厚度见图 2).根据以往离心试验经验表明,同性质的重塑土固结度相近的情况下其物理力学指标也相近^[4-5].

2.3 试验分组

本文主要从水平支撑刚度和无支撑暴露时间出发,共进行了 3 组试验(见表 2),以研究不同施工方案的基坑变形控制效果.本离心试验模拟框架逆作法方案(简称框逆)加撑阶段运转时间为 5 min,由于模型率取 100g,基于离心固结时间原理可知,相当于实际施工 35 d;传统逆作法方案(简称板逆)加撑阶段运转 10 min,相当于实际施工 70 d.

2.4 结构模型制备

钻孔灌注桩顶上的圈梁加强了桩体的整体性,其受力形式与地下连续墙类似.所以可将桩墙按抗弯刚度相等的原则等价为一一定厚度的地下连续墙进行内力分析.然后再按照材料的抗弯刚度等效采用铝板来模拟地下连续墙.模型材料与原型材料抗弯

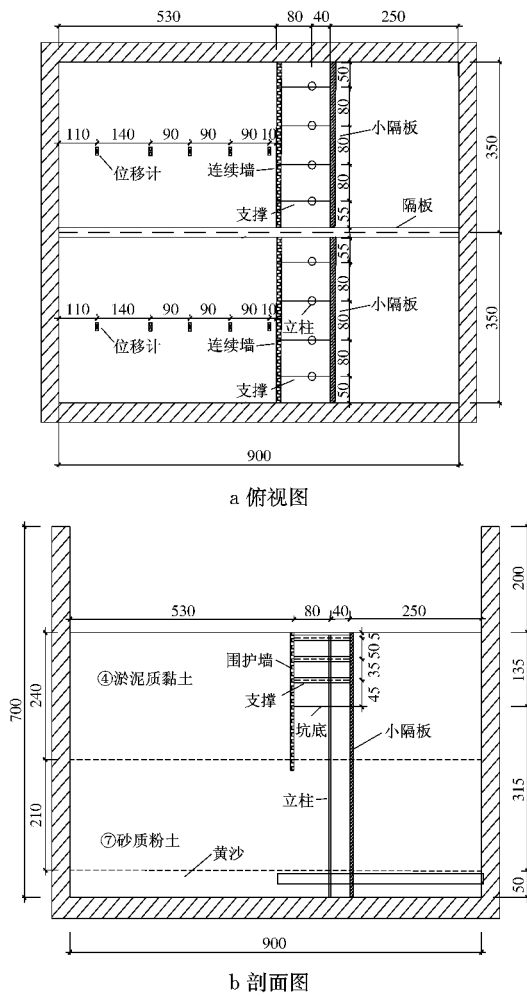


图 2 基坑开挖模型布置图(单位:mm)
Fig.2 Layout of centrifugal model tests on excavation of foundation pits(unit: mm)

表 2 离心试验方案

模型	水平支撑尺寸(直径)/mm	无支撑暴露时间/min
1A	6.8(梁)	10
1B(板逆)	10.0(板)	10
2A(框逆)	6.8	5

刚度应满足如下关系:

$$\left[\frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \right]_{m1} = \left[\frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \right]_{m2}$$

式中: E 为弹性模量; t 为材料厚度; ν 为泊松比; m_1 为与原型相同的模型材料; $\nu_{m1} = \nu_p, E_{m1} = E_p, t_{m1} = t_p/n; m_2$ 为模型替代材料.试验中考虑了围檩,按抗弯刚度相等的原则采用铝条来近似模拟.

对于支撑构件,按抗压刚度相似原则采用铝棒来近似.根据材料的抗压刚度相似要求: $E_{m1} A_{m1} = E_{m2} A_2$,其中横截面积 A 的计算公式由具体截面形式确定.基坑结构模型尺寸见表 3.

2.5 试验工况

由于受离心机设备条件的限制,必须针对研究

的主要问题作一定的简化,基坑宽度取 24 m,深度取 13.5 m,基坑足够长按平面应变考虑,并取半对称结构进行研究.本试验 3 组工况基本一致,沿深度方向设 3 道支撑,分 3 个开挖步(见图 3).根据现实条件和工程实际情况,开挖方式选用国内经验较多、技术成熟的“停机-开挖-开机”方式进行开挖模拟^[4].

表 3 结构模型几何尺寸

Tab.3 Geometry physical parameters of the structure model

种类	原尺寸	1/n 比例替代材料尺寸
连续墙厚度	854.0	6.6
围檩	1 100×1 100	12×8
1B 支撑尺寸	8 000×200	10.0(直径)
1A,2A 支撑尺寸	1 200×600	6.8(直径)

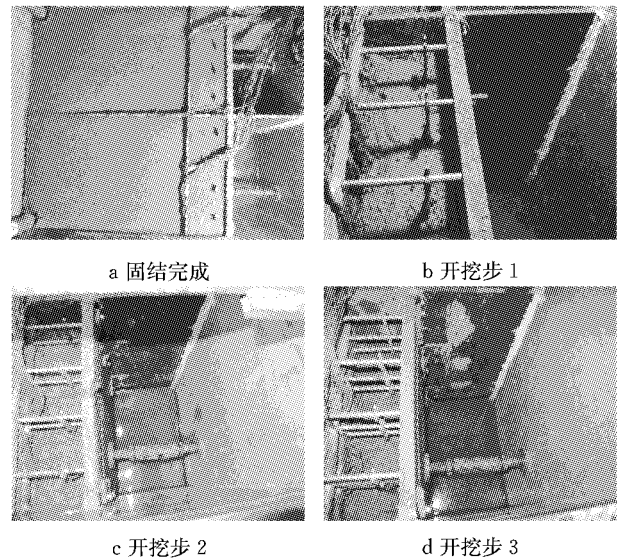


图 3 离心模型试验开挖照片
Fig.3 Photos of key excavation steps for centrifugal model

3 试验成果

试验中围护墙体的变形是通过贴在挡墙模型板上的应变片测出应变,然后间接换算得到^[5];地表沉降通过在土层表面距离地墙外侧 1,10,19,28 和 42 cm 处依次布置的 5 只差动式位移传感器(LVDT)量测得到.为了使试验成果更直观,下文已将离心试验结果转换为相应的原型值.

3.1 不同施工方法基坑变形比较

3.1.1 墙体变形

图 4 为不同支撑形式(梁或板作支撑)、不同开挖工期(梁作支撑)、不同施工方法时墙体变形图.由图可知,3 种情况下引起的墙体变形规律基本一致,

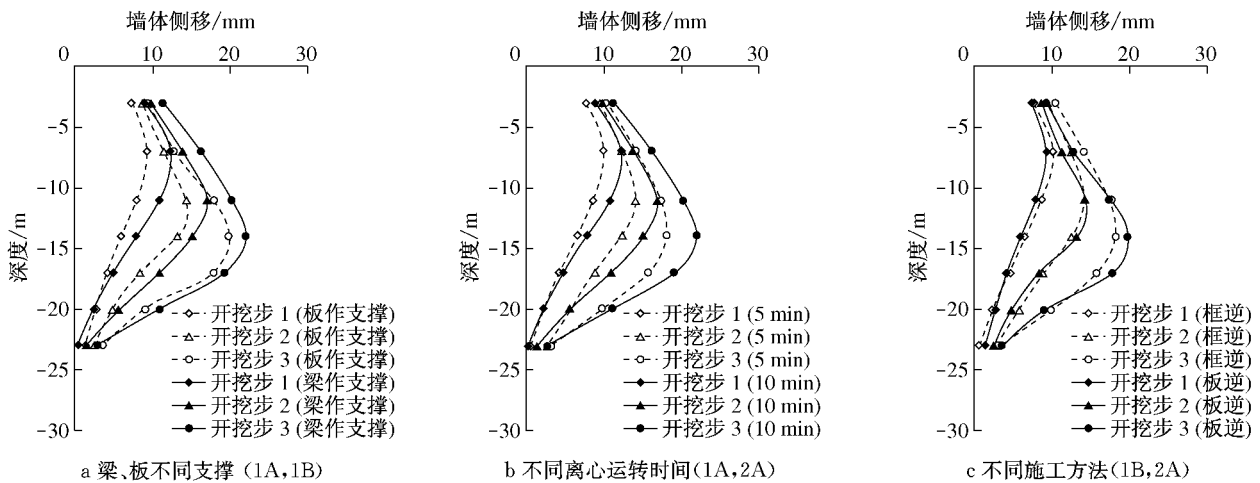


图 4 墙体水平位移比较

Fig. 4 Comparison between lateral displacements of walls

墙体变形随开挖深度增大而增大, 墙体水平最大位移位置随基坑开挖面下移而下移, 并位于开挖面的附近.

由图 4a 可以看出, 梁作支撑(模型 1B)时引起的墙体水平位移略大于板作支撑(模型 1A)时墙体的最大水平位移, 前者最大值为 22.0 mm, 后者只有 19.8 mm. 这说明在同等条件下, 由于板的水平支撑刚度大, 更有利于控制墙体变形. 而图 4b 则显示不同开挖工期对墙体变形有较大影响, 离心运转 10 min(模型 1B)时引起的墙体最大水平位移明显要大于离心运转 5 min(模型 2A)时墙体的最大水平位移. 图 4c 对比了两种不同方案引起的墙体水平位移, 两种方案引起的墙体水平位移差值不超过 2 mm, 说明两种方案控制变形的效果相近. 上海市《基坑工程技术规范(DG/TJ08-61—2010)》要求一级基坑围护结构最大水平侧移控制在 0.18% H_e (H_e 为基坑开挖深度)以内, 即要求本基坑围护墙最大侧移不大于 24.5 mm. 显然, 两种施工方案均满足规范要求.

3.1.2 地表沉降

图 5 给出了不同支撑形式(梁或板作支撑)、不同开挖工期(梁作支撑)、不同施工方法时不同开挖步的墙后地表沉降变化曲线. 由图可以看出, 墙后地表沉降的发展规律与连续墙的水平位移发展规律相对应, 随开挖深度增大而增大, 且均表现为凹槽形, 而随着远处的沉降量不断增大又将引起沉降范围的不断扩展. 由于受试验条件的限制, 本试验地表沉降测量范围为 3 倍开挖深度.

图 5a 为梁、板不同支撑时墙后地表沉降曲线, 很明显沉降规律与墙体变形相似, 梁作支撑(模型

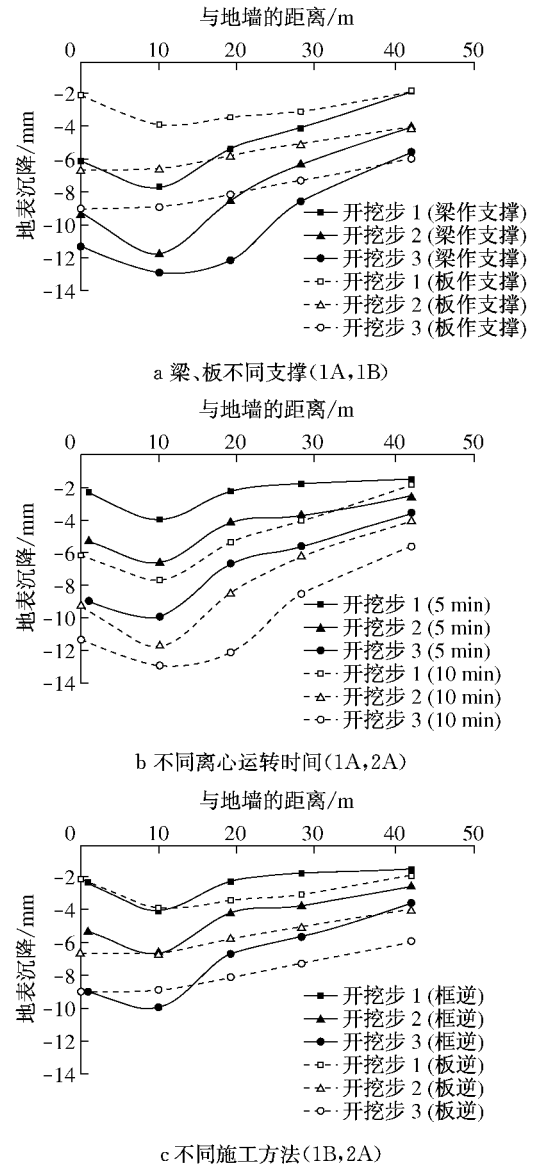


图 5 地表沉降比较

Fig. 5 Comparison between the ground settlements

1B)时沉降要大于板作支撑(模型 1A)时的沉降,其中前者最大沉降量为12.9 mm,后者最大沉降量为9.0 mm.图 5b 为不同开挖工期(梁作支撑)时墙后地表沉降曲线,其中离心运转 10 min(模型 1B)时最大沉降为 12.9 mm,离心运转 5 min(模型 2A)时最大沉降为 9.9 mm.图 5c 对比了两种不同方案引起的墙后地表沉降,如图所示,两种情况下沉降均表现为凹槽形,有明显的主影响区域和次影响区域,最大沉降位置集中发生在 $0.6H_e \sim 1.3H_e$ 之间,两个模型最大沉降量差值不超过 1 mm.上海市《基坑工程技术规范(DG/TJ08-61—2010)》要求一级基坑墙后最大地表沉降控制在 $0.0015H_e$ 以内.其中楼板逆作法基坑(模型 1A)地表最大沉降为 $0.0006H_e$,框架逆作法基坑(模型 2A)地表最大沉降为 $0.0007H_e$,均满足规范要求.

3.2 墙后地表沉降与围护结构侧移之间的关系

围护结构的变形与墙后地表沉降有着较为密切的关系,一旦确定围护侧移与地表沉降两者间特定关系,就可以通过围护侧移对地表沉降进行预测.

图 6 为离心试验量纲一化的墙体最大侧移与量纲一化的墙后地表最大沉降之间的关系,数据中含有中间工况.其中, δ_{hm} 为围护结构最大侧移, δ_{vm} 为墙后地表最大沉降.如图所示,离心试验结果显示框架逆作基坑最大地表沉降 δ_{vm} 主要集中在 $0.35\delta_{hm} \sim 0.70\delta_{hm}$ 之间,与 Ou^[6] 基于台湾软土基坑实测资料得出的基坑墙后最大沉降 δ_{vm} 基本等于 $0.5\delta_{hm} \sim 0.7\delta_{hm}$ 相近;但 δ_{vm}/δ_{hm} 要小于上海隧道工程设计院^[7] 关于上海地铁工程基坑的统计范围($0.71 \sim 1.00$);而与

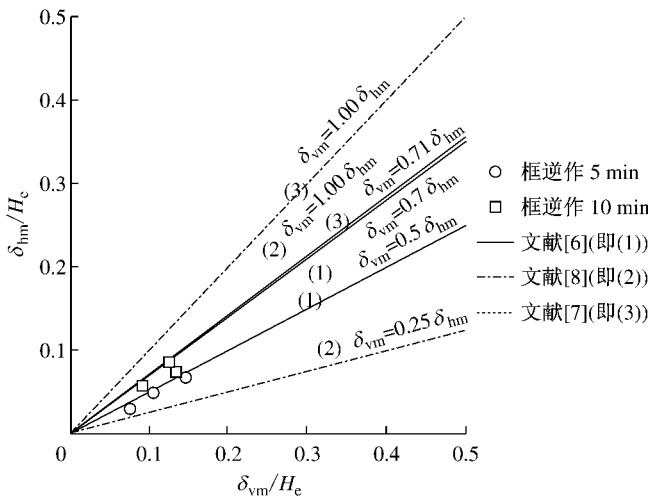


图 6 采用开挖深度进行量纲一化的墙体最大侧移与地表沉降的关系

Fig. 6 Relationship between maximum wall deflections and maximum ground settlements

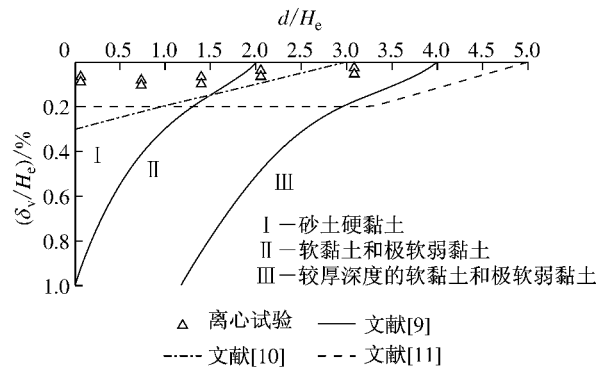
Woo^[8] 统计的 δ_{vm}/δ_{hm} 变化范围($0.25 \sim 1.00$)相比,离心试验变化范围要窄很多,这也表明实际基坑工程中影响地表沉降的因素更加复杂.试验中采用框逆作 5 min 时, δ_{vm}/δ_{hm} 相对稳定,约为 0.5.但增加无支撑暴露时间时, δ_{vm}/δ_{hm} 会变大,即 δ_{vm} 的比重增大,这说明无支撑暴露时间变化对 δ_{vm}/δ_{hm} 有一定影响.

3.3 地表沉降大小及影响范围

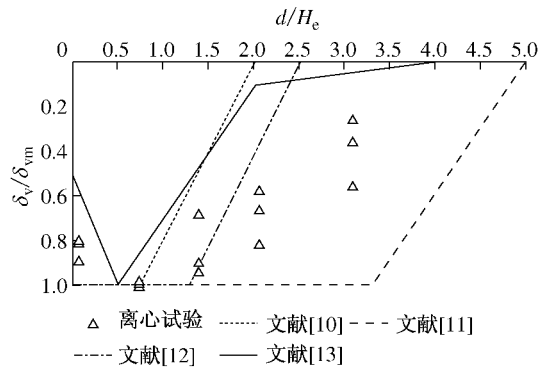
国内外学者基于大量实测资料对地表沉降形态及沉降大小与基坑自身的物理力学参数之间的关系进行了探讨,并建立了许多经验预测方法.

图 7a 为离心试验结果采用开挖深度进行量纲一化的墙后地表沉降情况.其中, d 为墙后离开基坑的距离, δ_v 为墙后地表沉降.如图离心试验的最大沉降量小于 $0.002 H_e$,远小于 Peck^[9] 提出的软土地层条件(Ⅱ,Ⅲ区)的统计范围.为了更好地比较,引入了文献[10-11]提出的经验预测方法,如图所示,离心试验最大沉降量要比文献[10-11]统计的最大沉降量略小,但其沉降影响范围要略大于文献[10]的 3 倍影响范围,远小于文献[11]的 5 倍影响范围,显然试验结果与经验预测有较大不同.

图 7b 为离心试验结果采用最大地表沉降进行



a 采用开挖深度进行量纲一化的墙后地表沉降



b 采用最大地表沉降进行量纲一化的墙后地表沉降

图 7 离心试验与经验预测地表沉降对比

Fig. 7 Comparison of the test and the predicted ground settlements

量纲一化的墙后地表沉降分布情况. 如图 7b 所示, 试验地表沉降影响范围显然超出了文献[10,12]的预测范围; 试验最大地表沉降主要集中在 $0.1H_e \sim 1.5H_e$ 范围内, $1.5H_e$ 以后随 d 的增大而迅速收敛, 但 $3H_e$ 以后沉降量仍达到最大沉降量的 $20\% \sim 45\%$, 这与文献[13]提出的沉降形态有所不同; 尽管文献[11]提出的范围涵盖了试验地表沉降范围, 但其给出的沉降范围较广, 且并未能够反映出墙后地表沉降的形态. 由此可见, 这些预测地表沉降的经验方法还不能很好地预测试验地表沉降.

4 结论

(1) 水平支撑刚度的增大有利于控制基坑变形, 而无支撑时间长短对软土地区基坑变形也有较大影响, 试验结果验证了这个结论. 框架逆作基坑墙后地表最大沉降 δ_{vm} 基本位于 $0.5\delta_{hm} \sim 0.7\delta_{hm}$ 之间, 其中无支撑暴露时间对 δ_{vm}/δ_{hm} 大小有一定影响. 由于实际工程中, 影响基坑变形的因素较多, 所以国内外基于实测统计的 δ_{vm}/δ_{hm} 变化范围通常较大, 与试验结果有一定差异.

(2) 通过对离心试验地表沉降结果采用开挖深度及最大地表沉降进行量纲一化分析, 并与国内外多种地表沉降预测方法对比发现, 试验最大地表沉降要远小于这些预测方法, 而沉降范围和沉降形态与这些经验预测方法也有较大不同. 因此, 这些经验方法预测地表沉降还有待于进一步改进.

(3) 传统逆作法和框架逆作法各具优势, 就本工程而言, 试验结果显示两种施工方案控制变形的效果相当. 采用框架逆作法施工方案基坑墙体最大水平位移与最大地表沉降能够符合规范要求, 研究结论对于实际工程设计和施工具有参考价值.

参考文献:

- [1] Lin H D, Ou C Y, Wang C C. Time-dependent displacement of diaphragm wall induced by soil creep [J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2002, 25(2): 223.
- [2] 罗发扬, 贾坚. 软土地区地铁车站深基坑开挖中框架逆作法的设计与应用[J]. 建筑结构, 2008, 38(9): 82.
LUO Fayang, JIA Jian. Application of frame-top-down construction in deep excavation of subway station in soft clay [J]. Journal of Building Structures, 2008, 38(9): 82.
- [3] 徐中华. 上海地区支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形性状研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
XU Zhonghua. Deformation behavior of deep excavations supported by permanent structures in Shanghai soft deposit [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [4] 马险峰, 张海华, 朱卫杰, 等. 软土地区超深基坑变形特性离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(9): 1371.
MA Xianfeng, ZHANG Haihua, ZHU Weijie, et al. Centrifuge model tests on deformation of ultra-deep foundation pits in soft ground [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(9): 1371.
- [5] 梁发云, 褚峰, 宋著, 等. 紧邻地铁枢纽深基坑变形特性离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 657.
LIANG Fayun, CHU Feng, SONG Zhu, et al. Centrifugal Model test research on deformation behaviors of deep foundation pit adjacent to metro stations [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3): 657.
- [6] Ou C Y, Hsieh P G, Chiou D C. Characteristics of ground surface settlement during excavation [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30(5): 758.
- [7] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
LIU Jianhang, HOU Xueyuan. Excavation engineering handbook [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997.
- [8] Woo S M, Moh Z C. Geotechnical characteristics of soils in the Taipei basin [C]//Proceedings of 10th Southeast Asian Geotechnical Conference, Special Taiwan Session, Volume 2. 1990: 51-65.
- [9] Peck R B. Deep excavation and tunneling in soft ground [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State-of-the-Art-Volume. Mexico City: [s.n.], 1969: 225-290.
- [10] Clough G W, O'Rourke T D. Construction induced movements of in-situ walls [C]//Proceedings, ASCE Conference on Design and Performance of Earth Retaining Structures, Geotechnical Special Publication No. 25. New York: ASCE, 1990: 439-470.
- [11] Hashash Y M, Osooli A, Marulanda C. Central artery/tunnel project excavation induced ground deformations [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(9): 1399.
- [12] Wang Z W, Ng C W, Liu G B. Characteristics of wall deflections and ground surface settlements in Shanghai [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(5): 1243.
- [13] Hsieh P G, Ou C Y. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(6): 1004.