

DOI: 10.11779/CJGE20220255

坑外群桩阻隔效应对基坑内抽水引发变形影响机制

曾超峰, 张祖浩, 高文华*, 蔡 钢, 朱 龙, 陈宏波, 薛秀丽, 贺建清

(湖南科技大学岩土工程稳定控制与健康监测湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘 要: 城市已有地下结构会对地下水流动和地层运移带来阻隔作用, 该条件下的基坑设计与施工应考虑该阻隔效应的影响, 但传统研究尚未充分揭露邻近结构阻隔作用对地下水渗流及基坑变形的影响机制。依托天津某地铁站基坑工程开展了室内模型试验, 通过在基坑-土-邻近结构(以桩基结构为例)物理模型中布设应力与变形传感器以全过程实时监测基坑抽水过程中坑内外水位变化、围护结构侧移、坑外地表沉降和围护结构两侧水土压力, 探讨了有/无桩基结构时基坑降水引起的围护结构及周边土体变形规律, 并揭示桩基结构阻隔效应对基坑抽水引发变形的影响机制。研究发现: ①当基坑外存在桩基结构时, 由于其对地下水运动的阻隔效应, 较小的基坑涌水量可引起较大的坑内水位下降, 此时, 可适当减少坑内降水井的数量来实现同样的降水效果; ②邻近桩基结构对地层运动的阻隔效应将导致基坑抽水过程中围护墙前侧向总压力更大、围护墙后侧向总压力更小, 为此, 抽水引起的围护结构侧移及坑外地面沉降更小。基坑设计时应考虑邻近结构对基坑施工环境效应的影响, 从而得到更合理的基坑支护与施工方案。

关键词: 基坑; 降水; 阻隔作用; 桩基; 变形; 模型试验

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)11-2378-09

作者简介: 曾超峰(1987—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程方面的科研与教学工作。E-mail: cfzeng@hnust.edu.cn.

Barrier effects of surrounding group piles on deformation of foundation pits induced by dewatering

ZENG Chaofeng, ZHANG Zuhao, GAO Wenhua, CAI Gang, ZHU Long, CHEN Hongbo,
XUE Xiuli, HE Jianqing

(Hunan Provincial Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Stability Control and Health Monitoring, Hunan University of
Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The existing underground structures in urban areas can block the groundwater flow and soil movement (i.e., barrier effects). On this occasion, the design and construction of foundation pits should consider the influences of the barrier effects. However, the mechanism of groundwater seepage and deformation of foundation pits under the barrier effects of the adjacent structures has not been fully revealed. In this study, two laboratory-scale tests are conducted based on a metro foundation pit in Tianjin. A series of stress and deformation sensors are placed in the physical model for pit-soil-structures (taking pile foundation as an example) to monitor the real-time variation of water level, deformations of retaining wall, settlements of ground surface, and pore-water and earth pressures at both sides of the retaining wall during dewatering of the foundation pit. Based on the tests, the deformation laws of the retaining wall and surrounding soil caused by dewatering considering and without considering the adjacent pile foundations are discussed. The mechanism of deformation of the foundation pit induced by dewatering under the barrier effects of pile foundations is also revealed. Two main conclusions are drawn: (1) Larger groundwater drawdown in the pit can be caused by smaller water yield due to the barrier effects of pile foundations on groundwater flow. In this case, the number of pumping wells in the pit can be appropriately reduced to achieve the same pumping effects. (2) The barrier effects of the adjacent pile foundations on the ground movement may lead to a larger lateral pressure in front of the retaining wall and a smaller lateral pressure behind the enclosure wall. On this occasion, the deformation of dewatering-induced retaining wall and settlement of ground surface outside the pit may be much smaller. The effects of the adjacent underground structures on the foundation pits should be considered in the design so that a more reasonable supporting scheme and construction plan can be obtained.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978261, 51708206); 湖南省自然科学基金项目(2022JJ20023); 湖南省教育厅项目(21A0290, 20A190); 湖南省科技创新计划项目(2022RC1172)

收稿日期: 2022-03-09

***通信作者** (E-mail: wenhuagao@163.com)

Key words: foundation pit; dewatering; barrier effect; pile foundation; deformation; model test

0 引 言

近些年, 中国城区涌现出许多深基坑工程, 常紧邻已有建筑设施, 这使得基坑施工的环境效应需被谨慎评估且引发的变形需被严格防控^[1-3]。中国东南部地区地下水资源丰富, 基坑降水往往成为基坑施工中不可缺少的一部分^[4-5]。现阶段, 国内外诸多学者针对不同工况下基坑抽水及其引起的周围环境变形问题进行了试验与理论研究。杨清源等^[6]研究了基坑内降水引起坑外地表沉降变化机制, 提出了不完整井降水有效影响深度及基坑外地表沉降简化计算方法; 吕斌泉等^[7]提出了适用于古河道承压含水层中基坑涌水量的计算方法, 大大提高了基坑涌水量计算的准确性。

上述研究均未考虑邻近已有地下结构对基坑抽水引发变形的影响, 针对该方面, 许焯霜等^[8]发现地下结构的存在阻挡了地下水的自由渗流, 导致下游地下水无法得到及时补给, 引起地下水位出现更大下降, 从而加剧地面沉降; 曹依雯等^[9]研究发现基桩对地下水渗流有明显的阻挡效应, 且基桩的数量及布置形式会对渗透效应产生较大的影响; 薛秀丽等^[10]发现基坑与既有地下结构间距会对基坑抽水引起的地面沉降产生重要影响; Tan 等^[11]、Liao 等^[12]研究了紧邻地铁站、既有桩基建筑的基坑变形特性, 发现坑外地下结构的存在减小了基坑开挖引起的变形。通过以上研究发现, 邻近地下结构会限制地下水和地层的运动。但上述研究主要以工程实测和数值模拟为主要方法, 仅重点探讨了邻近结构阻隔效应对渗流与基坑变形性状的影响规律, 并未揭露阻隔效应对基坑抽水引发变形的影响机制。为此, 本文开展了室内模型试验, 通过在基坑-土-邻近结构(以桩基结构为例)物理模型中布设应力与变形传感器以全过程实时监测基坑抽水过程中坑内外水位变化、围护结构侧移、坑外地表沉降和围护结构两侧水土压力, 探讨有/无桩基结构时基坑降水引起的围护结构及周边土体变形规律, 并揭示桩基结构阻隔效应对基坑抽水引发变形的影响机制。

1 模型试验

1.1 工程背景

某地铁基坑, 如图 1, 宽约 20 m, 最大挖深约 19 m。围护结构采用钢混地连墙, 强度等级为 C30, 最大厚度为 1.0 m, 标准段高度为 33 m。基坑主要分为右基坑 A、左基坑 B, 其邻近约 8 m 处有需保护建筑, 基坑施工期该建筑允许沉降为 20 mm。

为检查抽水系统的工作性能并评价抽水施工的环境影响, 在地连墙和抽水井完工后, 对 A, B 两段基坑进行了抽水试验。A 基坑的试验表明约 10 d 的群井抽水引起地连墙最大约 10 mm 向坑内的侧移(测斜孔 C3 处); B 基坑试验中, 虽提前施做了墙顶支撑, 但约 5 d 的坑内抽水仍引起最大约 5 mm 的侧移(测斜孔 C13 处), 并导致坑外建筑超 8 mm 沉降。

以上结果表明, 基坑抽水引起的地连墙及周边环境变形是不可忽视的。但通过该工程尚无法得到坑外邻近结构对基坑抽水引发变形影响规律与机制。为此, 下文依托本工程进行室内模型试验, 研究有/无邻近结构对基坑抽水引发周边环境变形的影响。

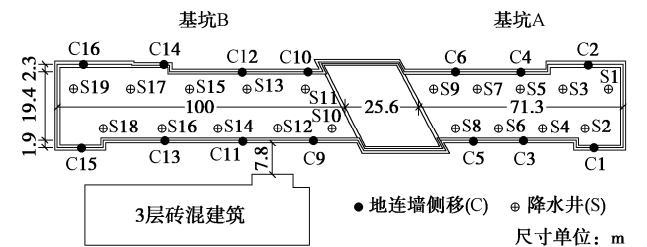


图 1 基坑降水井及变形监测点平面布置^[13]

Fig. 1 Layout of dewatering wells and monitoring points for foundation pit

1.2 模型试验目的

图 2 展示了本文试验模拟区域, 模拟范围为长条基坑中间小段, 该位置的基坑变形大致呈平面应变状态。考虑对称性, 仅模拟 1/2 的基坑区域。本试验的几何相似比为 1:50 (缩尺 50 进行试验模拟); 需指出的是, 本文目的仅为探讨邻近结构阻隔效应对基坑抽水引发变形影响机制, 并非通过试验结果反算并预测实际工程变形, 为此仅考虑了几何相似。

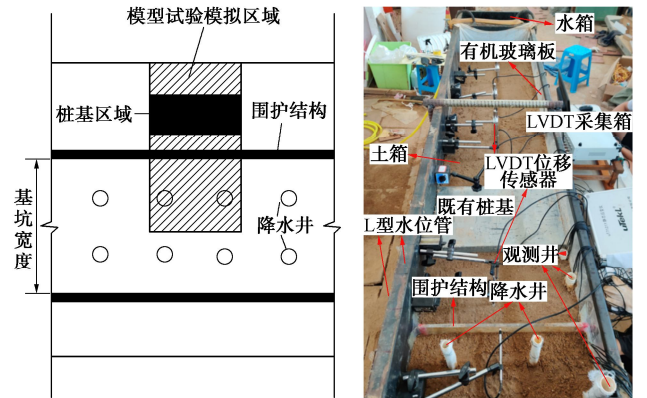


图 2 模型试验模拟区域及模型箱实体图

Fig. 2 Simulated area in model tests and picture of model box

1.3 模型箱

模型箱长 2.4 m、宽 0.5 m、高 1.2 m (图 2), 包括土箱和水箱两部分, 两者在长度方向紧连。土箱长

2.2 m, 水箱长 0.2 m, 两者的其余尺寸相同。在水、土箱连接处设置了开孔钢板以保证水箱对土箱的补水, 其目的是模拟土体边界的常水头补给。文献[11, 12]中研究表明, 由于止水帷幕的截水作用, 基坑内降水的影响半径会大幅减小, 为此在类似模型试验中将常水头边界固定在基坑围挡后方 1.3 m 处; 本文为考虑一定的安全储备, 将常水头边界(即水箱位置)设置在基坑围挡后方 2.2 m 处, 以更好地反映坑外地下水的渗流补给并防止设定的常水头边界对坑内外渗流与变形结果带来不利影响。模型箱的一长边侧设置了透明有机玻璃板, 以便试验中直观地观察围护结构、土体及水位的变化; 另一侧布设了 15 根内径 4 mm 的 L 型透明有机玻璃管, 用于观测土箱内不同位置的水头变化。此外, 在模型箱的周边焊接了高强度槽钢以限制其侧壁变形。

1.4 试验方案

本次试验探究的是桩基结构阻隔效应对基坑抽水引发变形影响机制。故设置了坑外有/无桩基结构的两组工况试验以进行对比(开展了两次独立的试验而非

在一次试验过程中进行先布设桩再取出桩的抽水试验), 有桩工况试验中桩基结构埋深为 95 cm, 与围护结构距离设置为 30 cm, 水土压力传感器、L 型水位管、降水井、水位观测井及 LVDT 位移传感器的布设位置见图 3, 其中, 观测井中的水位是通过在观测井里放置“标有刻度线的浮漂”来进行的实时采集。坑外无桩基结构工况仅在观测井和 LVDT 位移传感的布置上与坑外有桩基工况略有不同, 在此就不再展示。值得注意的是, 本次试验研究并不考虑桩基结构自身的变形, 因此将桩基的埋深设置在接近模型箱底部位置, 以更好体现其阻隔效应。

1.5 降水系统

采用 PVC 管(直径 20 mm)制作降水井和观测井, 管身设置了梅花形布置的小孔以模拟降水井和观测井的过滤段。为防止降水过程中大量的模型土涌入降水井以造成堵塞, 用纱布将井管外侧进行包裹。将一端连有抽水泵的水管插入降水井, 通过开启抽水泵实现抽水过程。

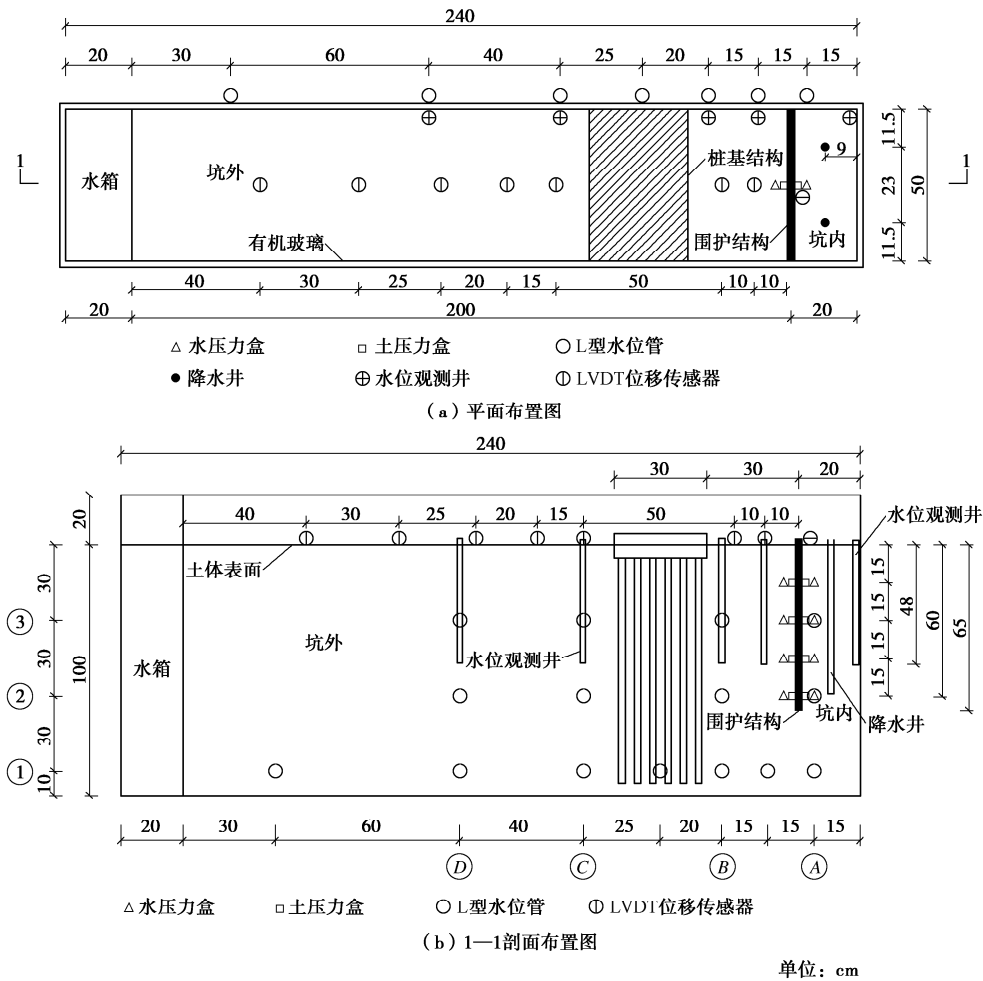


图3 有桩工况下降水井及监测点布置图

Fig. 3 Layout of dewatering wells and monitoring points for case with pile foundation

1.6 模型土体、围护结构及既有桩基结构

由于本试验只是为了探究桩基结构阻隔效应对基坑抽水引发变形影响规律及机制, 并不是利用试验结果反算并预测变形, 因此为了简便, 本文模型土体采用均质粗砂, 其填入土箱内的总高度为 100 cm。模型土颗粒级配见图 4^[14], 主要土性参数见表 1^[14], 均采用装填过程中的土样进行常规土性试验测试计算得到。

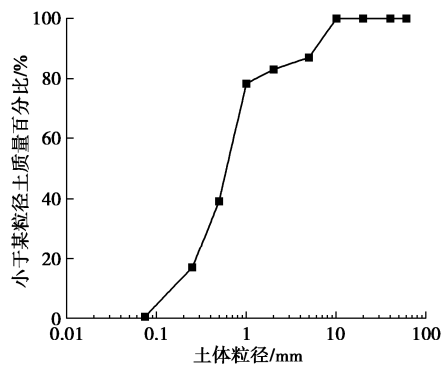


图 4 试验用土颗粒级配曲线^[14]
Fig. 4 Grain-size distribution curves of model soil

表 1 土性参数表

Table 1 Parameters of model soil

土层	湿密度/ (g·cm ⁻³)	含水率/ %	土的相 对密度	孔隙比	渗透系数/ (m·d ⁻¹)	压缩模 量/MPa
粗砂	2.07	31.3	2.67	0.69	19.4	9.63

本试验中采用 9 mm 厚的透明亚克力玻璃板对围护结构进行模拟, 通过压缩试验测得其弹性模量为 2.87 GPa。围护结构在土中的插入深度设计为 660 mm (按原型缩尺 50 倍)。为了防止坑外地下水通过围护结构两侧渗入坑内, 在围护结构两侧布置透明薄膜(图 5), 并对薄膜两侧进行折叠预留变形量以防止试验过程中围护结构运动被薄膜约束; 此外, 在围护结构两侧均匀涂抹凡士林减小摩擦力。

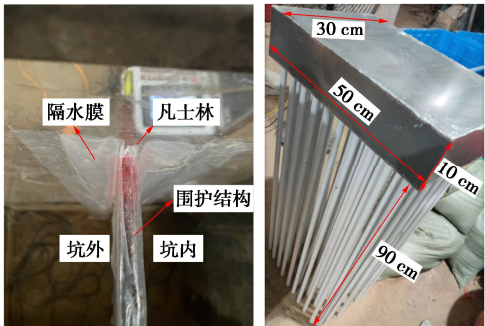


图 5 围护结构侧壁塑料薄膜布置及桩基结构实体图

Fig. 5 Arrangement of plastic film on side edges of model retaining wall and picture of pile foundation

桩基结构承台部分采用 1 mm 厚的铁板焊接而成(图 5), 基桩部分采用外径 16 mm, 长度 900 mm 的

PVC 管黏结而成, 其排列方式为 10 排 5 列, 共 50 根。桩基结构模型总高 1 m、长度 0.5 m, 宽度 0.3 m。

1.7 试验步骤

(1) 铺设模型土及结构。按 10 cm 每层逐步填实模型土体, 总填土高度为 100 cm。采用小型触探仪对每层土体进行密实度检测(需要指出的是, 透明隔水薄膜附近的土体用口径较小的细棍先进行重点夯填, 再进行更为细致地触探), 以保证填土过程中每层土体的密实度大致相同。在铺设土体的过程中, 每当需要填入水、土压力盒、降水井和观测井、围护结构及既有桩基结构等部件时, 停止铺设土体, 并按照布置图对相关结构、设备进行布设。在试验开始之前, 对所有相应元器件进行初始平衡。

(2) 模型土饱和。在土体及相关设备与结构装填完毕后, 向水箱中缓慢注水, 由于水箱和土箱的连通性, 土箱中填筑好的土体中将慢慢贮水饱和, 该过程中可以发现土箱中 L 型水位管的水位不断上升, 当水位接近土表时(有/无桩工况实测初始水位分别在土体表面下约 7.7, 8.5 cm) 停止加水, 并静置 24 h。

(3) 抽水试验。将一端连在抽水泵的水管插入降水井中, 打开抽水泵进行持续抽水。在两组试验过程中, 确保水箱内水位一直与其初始水位保持一致, 并实时采集传感器数据, 当数据显示坑内外水位、变形与应力基本稳定时停止抽水以结束试验。

2 试验结果及分析

2.1 基坑涌水量与水位降深

图 6 为坑外有/无桩基试验过程中基坑涌水量与坑内水位降深时程曲线。

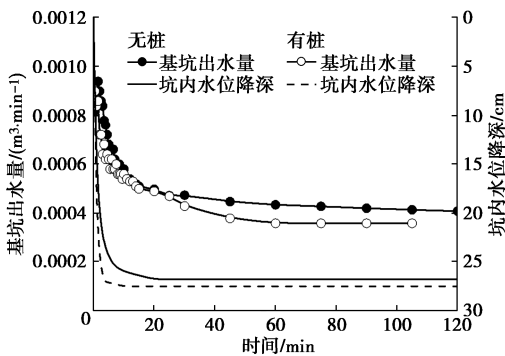


图 6 有/无桩基试验中基坑出水量和坑内水位降深时程曲线

Fig. 6 Time-history curves of flow rate and groundwater drawdown in pit with/without pile foundation

在降水前期(约 10 min 内), 两组试验的基坑涌水量均较大, 且水位快速下降; 而约 10 min 后, 两组试验的涌水量和坑内水位变化均较小, 这与 Xu 等^[15]开展的类似抽水模型试验结果大体相符。需要指出的

是, 坑外有桩时的基坑出水量要低于坑外无桩时的情况, 但坑内水位降深却大于坑外无桩工况的情况 (无桩工况下, 坑内水位下降 26.8 cm, 有桩工况下, 坑内水位下降 27.5 cm), 这是由于坑外邻近桩基的存在起到一定阻水作用, 坑外土中水在向坑内补给过程中受到一定阻碍。在实际工程中, 当坑外存在邻近地下结构时, 可以适当减少坑内降水井的数量来实现同样的降水效果。需要特别指出的是, 本次试验土层采用粗砂, 其透水性比原型工程更强; 而在土层透水性相对较弱的原型工程中, 由于地下水的补给速度会变慢, 桩基结构阻隔效应所带来的坑内水位下降可能更明显。

图 7 以坑外无邻近桩基结构试验为例, 展示了降水过程中坑内外水位变化曲线 (基于水位观测井得出)。从图 7 中可以看出, 降水漏斗随降水过程的发展而不断扩展, 同样在 10 min 后, 坑内外水位变化很小。有桩工况试验得到的坑内外水位变化规律与无桩工况大致相同, 在此不再赘述。

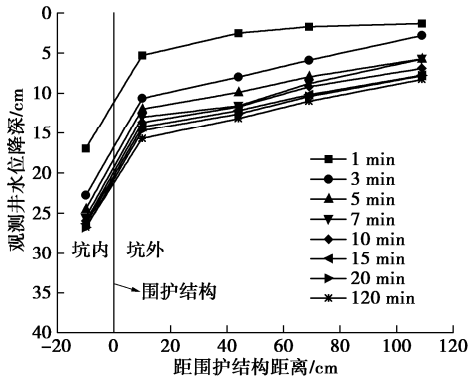


图 7 无桩基试验过程中坑内外水位降深分布

Fig. 7 Distribution of water levels at both sides of foundation pit for case without pile foundation

图 8, 9 分别是坑外有/无桩基结构试验结束时坑内外不同埋深水头变化分布和距围护结构不同距离水头变化分布, 其中#1, #2, #3 分别为埋深 10, 40, 70 cm 的水平断面, #A, #B, #C, #D 分别为坑内距离围护结构 5 cm 和坑外距离围护结构 25, 70, 110 cm 的竖直断面。

可以看出, 在有桩工况下, 基坑围挡范围内的稳定水头降深比坑外无桩工况时更大, 这与图 6 中有桩工况下坑内水位降深更大相匹配; 其余位置水头降深均总体上相差不大。另外, 根据图 9 中基坑外相邻竖直断面 (即过水断面) 间水头差值按达西定律可粗略估算出试验时模型箱内土体的实际渗透系数 (15.4~17.0 m/d), 这与模型土体装填过程中取样按常水头渗流试验得到的数值 (表 1) 相当。

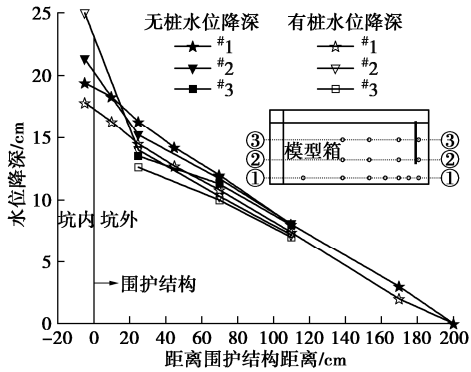


图 8 有/无桩基试验结束时不同埋深水头降深分布

Fig. 8 Distribution of water head at different buried depths in the end of both tests with/without pile foundation

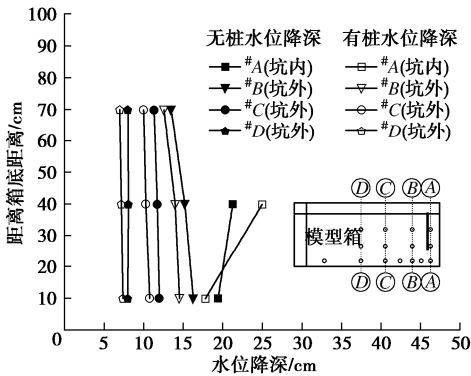
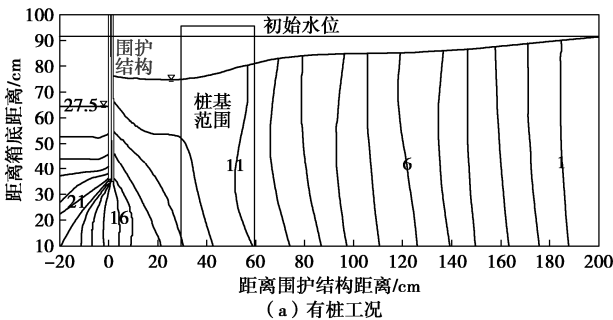


图 9 有/无桩基试验结束时距围护结构不同距离水头降深分布

Fig. 9 Distribution of water head at vertical sections with different distances to retaining wall in the end of both tests with/without pile foundation

2.2 水头降深分布

图 10 为坑外有/无桩基工况试验结束时坑内外水头降深等值线图。可以看出, 坑外无桩基工况试验条件下, 基坑抽水引起的坑外水头降深等值线分布模式统一; 而坑外有桩基结构时在桩基附近的水头降深等值线出现扭曲, 这说明桩基的存在对水的流动起到一定的阻隔。同时, 这也是上文坑外有桩工况时坑内水位降深比无桩工况时更大的原因。需要指出的是, 此图是根据 L 型水位管、观测井的实测水头变化数据, 运用插值方法得到的, 由于数学插值方法存在局限, 无法准确反映渗流边界所应呈现的规律, 故本文中等值线图与理论等值线图在渗流边界上存在细微差别。



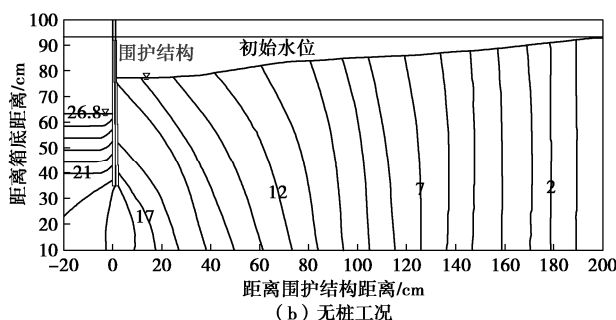


图 10 有/无桩基试验结束时坑内外水头降深等值线图

Fig. 10 Contour maps of change of water heads at both sides of foundation pit in the end of both tests with/without pile foundation

2.3 围护结构侧移与坑外地面沉降

图 11 为坑外有/无桩基工况试验稳定时土体沉降变化曲线图。为了便于对比, 将文献[14]里在同样的粗砂地层中开展的基坑抽水模型试验所测得的土体沉降绘制在图中。图 11 中, 正值代表土体向下沉降。可以看出以下 3 点规律: ①本文两组工况试验下坑外土体沉降均呈凹槽型且最大沉降位于墙后第二个测点处, 而紧邻墙体的测点沉降相对较小, 这与基坑围挡出现向外挤土的运动有关(见图 12, 将在下文详细分析)。②在有桩工况试验的坑内水位下降略多而坑外水位下降大体一致的情况下, 有桩工况的坑外土体最大沉降要明显小于无桩工况时的沉降, 这是由于桩基结构的存在对土体运动起到阻隔作用, 使得桩基结构附近的土体沉降减小。③在文献[14]中开展的坑外无邻近桩基基坑抽水模型试验中, 实测坑内水位下降约 20 cm, 坑外最大地表沉降约为 0.04 mm; 而本文坑外无邻近桩基基坑抽水模型试验坑内水位下降 26.8 cm(大于文献[14]中试验的坑内水位下降), 因此本文试验的土体沉降更大; 此外由于文献[14]的试验中基坑围挡未出现向外挤土的运动, 因此其土体沉降呈拱肩型分布, 在分布模式上与本文有所差别。

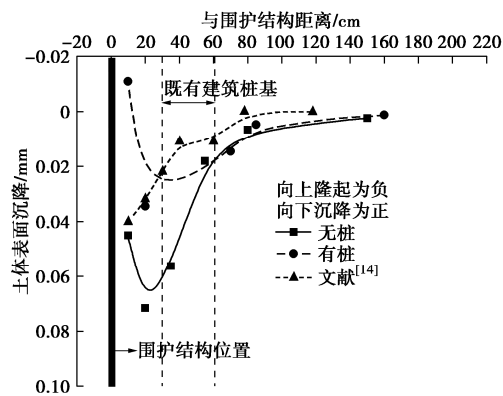


图 11 有/无桩基试验结束时土体表面沉降分布图

Fig. 11 Distribution of final surface settlements in both tests with/without pile foundation

图 12 为坑外有/无桩基工况试验结束时围护结构侧移变化曲线。需要特别指出的是, 围护结构侧移是

通过高清数码相机拍摄出试验前后围护结构位置的变化, 并通过后期测量围护结构距离模型箱上基准线的像素数量来计算出位移的大小。同样地, 为了便于对比, 将文献[14]中开展的类似模型试验所测得的围护结构变形绘制在图中。图 12 中, 正值代表围护结构向坑内位移。可以看出以下 2 点规律:

(1) 本文两组试验得到的围护结构变形模式相同, 即上部围护结构向坑内运动, 下部则向坑外运动, 这与文献[14]中开展的基坑抽水试验结果有所差别, 在文献[14]的试验中发现坑内抽水引起围护结构整体向坑内发生悬臂式侧移; 这可能是由于两点原因造成的。其一, 本文试验坑内降水深度更大且围护结构刚度更小, 因此围护结构变形响应更大且围护结构更柔; 其二, 本文试验中围护结构侧边止水塑料膜的安装方式与文献[14]中的试验有所区别(图 13), 在文献[14]的试验中, 围护结构两端部止水塑料膜的折叠方式可能导致墙后土颗粒渗入到围护结构两端部与薄膜的缝隙中, 从而使得围护结构的运动受到一定限制; 而本文试验中围护结构两侧独立设置了止水薄膜并各自预留了变形量, 这就使得土颗粒无法渗入到围护结构两端部。

(1) 对于本文的两组试验, 当坑外有桩时, 抽水引起围护结构变形整体小于坑外无桩时的情况, 这同样是由于坑外桩基结构的存在起到了阻隔作用, 对墙土压力产生了一定影响(详见 2.4 节分析)。

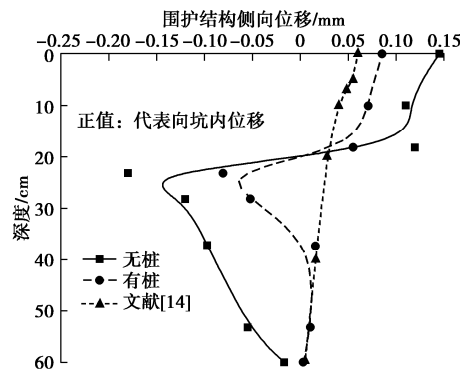


图 12 有/无桩基试验结束时围护结构的侧移分布

Fig. 12 Distribution of final wall deflections in both tests with/without pile foundation



(a) 文献[14]的试验

(b) 本文试验

图 13 围护结构侧壁塑料薄膜布置

Fig. 13 Layout of plastic films on side edges of model wall

2.4 墙前/后孔隙水压力、侧向总压力及有效应力

图 14 为有/无桩基工况试验过程中墙前/后孔隙水压力变化沿深度分布曲线。图 14 中, 负值代表压力减小。由于试验中坑内水位变化较快, 坑内孔隙水压力计不能精准测出水压力变化; 为此, 图 14 (a) 墙前孔隙水压力变化是用坑内 L 型水位管的降深结果反算出来的; 此外, 为了考虑水土压力计在标定时的误差, 本文试验进行了多次标定, 并对水土压力计标定结果进行误差棒分析 (本文中除墙前孔压外, 均采用误差棒形式作图), 以体现试验过程中墙前后水土压力平均变化值及误差范围。从中可以看出 3 点规律: ①降水过程中, 墙前/后孔压均减小, 且墙前的孔压减小幅度整体大于墙后。②墙前/后孔隙水压力变化沿深度分布模式是不同的, 墙前孔压变化在水位液面以下随深度增加越来越小, 在水位液面以上随深度增加越来越大, 而墙后孔压随着深度的增加不断变大, 这符合土体中水的基本渗流规律, 即越靠近渗流终点, 水头损失越大, 而越靠近渗流起点, 水头损失越小。③无论坑外是否有邻近桩基结构, 基坑抽水引起孔压变化模式是一样的, 但在变化量上略有区别, 其中, 在墙前位置处坑外有桩工况试验测得的孔压变化大于坑外无桩监测的结果; 而在墙后位置处, 坑外有桩工况的孔压变化略小于坑外无桩工况时的孔压, 这一结果与前述 2.1 节水位降深相匹配。

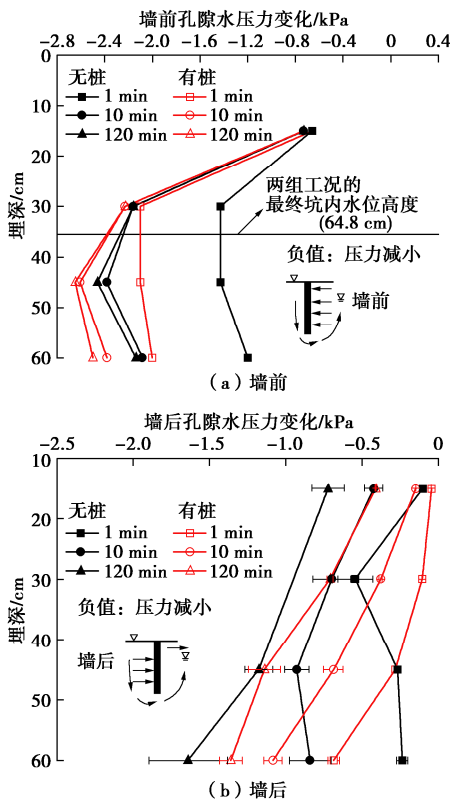


图 14 有/无桩基试验墙前/后孔隙水压力变化沿深度分布
Fig. 14 Distribution of change of pore-water pressures at both sides of retaining wall in both tests with/without pile foundation

图 15 为有/无桩基工况试验结束时墙前/后侧向总压力变化沿深度分布曲线。图中, 负值代表压力减小。可以看出, 由于基坑抽水引起的坑内/外孔压减小及墙体运动, 墙体两侧的总压力也出现了重分布, 且两组工况下总压力沿深度分布较为凌乱, 其大小分布无统一规律, 这可能与以下 3 个因素的相互作用有关: ①围护结构的运动使得侧向总压力发生相对应的变化, 如围护结构发生向坑内的侧移, 会使得墙前侧向总压力增大, 墙后侧向总压力减小; ②土体中水的渗流也可能导致总压力发生变化, 如坑内土中水向上渗流, 会使得坑内土体有效应力增大, 进而对作用在围护结构上的侧向总压力产生影响; ③墙前后孔压的减小会使得有效应力增大, 从而可能使得侧向总压力发生变化。显然以上 3 种因素在基坑抽水过程中将同时出现, 这导致了围护结构两侧总压力的复杂分布规律。此外, 即使总压力分布凌乱, 但仍呈现出与围挡变形相统一的分布规律, 以无桩工况为例, 墙前总压力变化更小 (总值也更小)、墙后总压力变化更大 (总值也更大), 这与图 12 中揭露的无桩工况基坑围挡侧移更大相匹配。

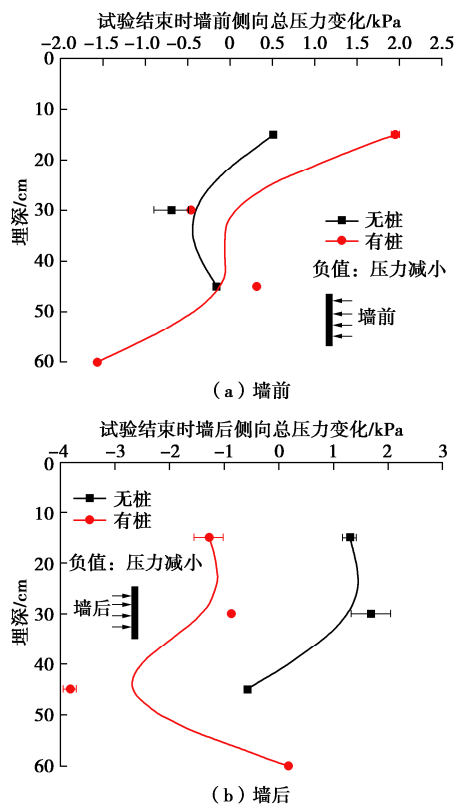


图 15 有/无桩基试验结束时墙前/后侧向总压力变化
Fig. 15 Change of lateral total pressures at both sides of retaining wall in both tests with/without pile foundation

图 16 为坑外有/无桩基工况试验结束时墙前/后侧向有效压力变化沿深度分布曲线。图中负值代表压力减小, 图 16 中有效压力数据为图 15 中总压力与图 14

中孔压之差。可以看出, 两组工况下墙体两侧有效压力变化沿深度分布模式与墙体两侧总压力变化分布类似(均呈现较为凌乱的分布规律), 这同样与基坑抽水时围挡的运动方向、土体中水的渗流及坑内/外水位变化三者复杂的相互作用有关。需要指出的是, 墙前侧向有效压力以增大为主, 这是因为坑内水位下降较大, 孔压减小是侧向有效压力变化的主要原因, 而坑外侧向有效压力增减不一, 这就是墙后孔压的减小、围挡结构的运动及土体中渗流三者相互耦合的结果。

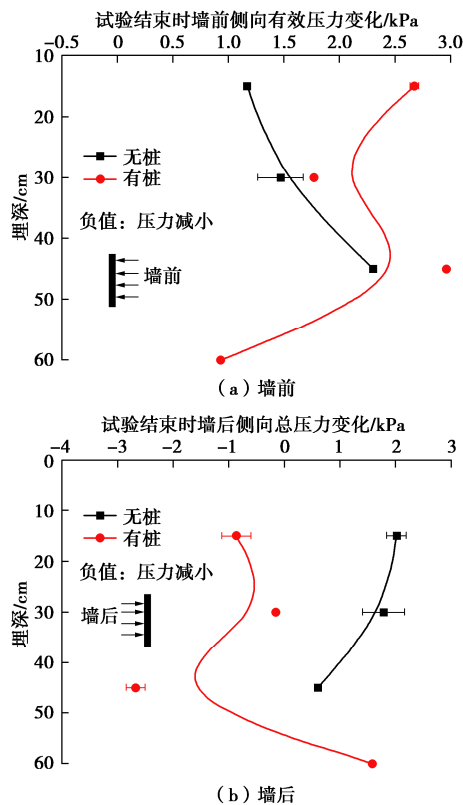


图 16 有/无桩基试验结束时墙前/后侧向有效压力变化

Fig. 16 Change of lateral effective earth pressures at both sides of retaining wall in both tests with/without pile foundation

3 结 论

为了揭示桩基结构阻隔效应对基坑抽水引发变形的影响机制, 本文开展室内模型试验, 通过在基坑-土-桩基结构物理模型中合理布设应力与变形传感器来全过程实时监测基坑抽水过程中坑内外水位变化、围挡侧移、地表沉降和围挡两侧水/土压力, 探讨了有/无桩基结构时基坑降水引起的围护结构及周边土体受力变形规律。本研究可以得到 3 点结论。

(1) 当基坑外有邻近桩基结构时, 基坑抽水过程中的出水量要小于坑外无桩时的情况, 而坑内水位降深却大于坑外无桩的情况, 这体现了坑外邻近桩基结构阻隔效应对地下水渗流的影响。在实际工程中, 当

坑外存在邻近建筑桩基时, 可适当减少坑内降水井的数量来实现同样的降水效果。

(2) 当基坑外存在邻近桩基结构时, 基坑抽水引起的围护结构侧移量及最大沉降均要小于坑外无桩的情况, 这体现了桩基结构对土体运动的阻隔作用, 使得围护结构和桩基结构附近的土体运动受到限制。在工程设计时, 应考虑邻近结构对基坑施工环境效应的影响, 以优化基坑支护设计。

(3) 基坑抽水引起了围挡两侧侧压力重分布, 围挡因此发生侧移直至达到新的平衡。当坑外无邻近桩基时, 围挡前侧总压力相对于坑外有邻近桩基时更小、而围挡后方总压力则更大, 这也是无邻近桩基工况基坑围挡侧移更大的原因。

值得注意的是, 某些地区含水层中存在的非均质弱透水夹层(或透镜体)也会产生阻隔效应, 与群桩阻隔效应不同的是非均质透镜体是一种天然赋存于含水层中的散状分布土质结构, 若工程勘察未揭露它, 很难知道其分布、形状及渗透性等, 故不易分析其阻隔效应。此外, 本文并未深入探讨坑外桩基结构阻隔效应的影响因素, 也无法准确得到群桩的等效渗透能力、远端补给能力、基坑截渗能力以及它们之间的关系, 关于这方面的研究有待进一步探讨。

参考文献:

- [1] 木林隆, 朱孟玺, 黄茂松, 等. 基于临近桩基保护要求的基坑变形控制指标研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(3): 465-470. (MU Linlong, ZHU Mengxi, HUANG Maosong, et al. Control criteria for deformation of foundation pits based on protection requirements of adjacent pile foundations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(3): 465-470. (in Chinese))
- [2] 李 涛, 杨依伟, 贾奥运, 等. 空间效应下狭长深基坑地表三维变形预测[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(6): 1101-1110. (LI Tao, YANG Yiwei, JIA Aoyun, et al. Prediction of three-dimensional surface deformation of long and narrow deep foundation pit under spatial effect[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(6): 1101-1110. (in Chinese))
- [3] 徐长节, 成守泽, 蔡袁强, 等. 非对称开挖条件下基坑变形性状分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1929-1934. (XU Changjie, CHENG Shouze, CAI Yuanqiang, et al. Deformation characteristic analysis of foundation pit under asymmetric excavation condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 1929-1934. (in Chinese))
- [4] 曾超峰, 白 宁, 袁志成, 等. 邻近结构埋深对开挖前抽水

- 引发基坑变形影响[J]. 中国矿业大学学报, 2022, **51**(2): 283-292. (ZENG Chaofeng, BAI Ning, YUAN Zhicheng, et al. Effect of buried depth of adjacent structure on the foundation pit deformation during pre-excavation dewatering[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, **51**(2): 283-292. (in Chinese))
- [5] 刘祥勇, 宋享桦, 谭 勇, 等. 南通富水砂性地层地铁深基坑抽水回灌现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(7): 1331-1340. (LIU Xiangyong, SONG Xianghua, TAN Yong, et al. Field tests on groundwater recharge of deep excavations in Nantong water-rich sandy stratum[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(7): 1331-1340. (in Chinese))
- [6] 杨清源, 赵伯明. 潜水层基坑降水引起地表沉降试验与理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(6): 1506-1519. (YANG Qing-yuan, ZHAO Bo-ming. Experimental and theoretical study on the surface subsidence by dewatering of foundation pit in phreatic aquifer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(6): 1506-1519. (in Chinese))
- [7] 吕斌泉, 冯晓腊, 熊宗海. 武汉古河道承压水井流理论及在基坑降水中应用[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(3): 533-541. (LÜ Binqun, FENG Xiaola, XIONG Zonghai. Theory of artesian well flow in ancient river in Wuhan and its application in foundation pit dewatering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(3): 533-541. (in Chinese))
- [8] 许烨霜, 沈水龙, 马 磊. 地下构筑物对地下水渗流的阻挡效应[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, **44**(10): 1902-1906. (XU Yeshuang, SHEN Shuilong, MA Lei. Cutoff effect of groundwater seepage due to existence of underground structure[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, **44**(10): 1902-1906. (in Chinese))
- [9] 曹依雯, 黄润秋, 沈水龙, 等. 基桩对含水层渗流阻挡作用效应研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(6): 1617-1622. (CAO Yiwen, HUANG Runqiu, SHEN Shuilong, et al. Investigation of blocking effect on groundwater seepage of piles in aquifer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(6): 1617-1622. (in Chinese))
- [10] 薛秀丽, 廖 欢, 曾超峰, 等. 既有地下结构水-土阻隔效应对基坑抽水引发地层变形影响机制[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(1): 103-111. (XUE Xiuli, LIAO Huan, ZENG Chaofeng, et al. Barrier effect of existing underground structure on strata deformation induced by foundation pit dewatering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(1): 103-111.
- [11] TAN Y, LI X, KANG Z J, et al. Zoned excavation of an oversized pit close to an existing metro line in stiff clay: case study[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2015, **29**(6): 04014158.
- [12] LIAO S M, WEI S F, SHEN S L. Structural responses of existing metro stations to adjacent deep excavations in Suzhou, China[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, **30**(4): 04015089.
- [13] 曾超峰, 王 硕, 宋伟伟, 等. 内隔墙对开挖前抽水引发软土区地铁深基坑变形的控制效果[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, **40**(6): 1277-1286. (ZENG Chaofeng, WANG Shuo, SONG Weiwei, et al. Control effect of cross walls on metro foundation pit deformation induced by pre-excavation dewatering in soft soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, **40**(6): 1277-1286. (in Chinese))
- [14] 曾超峰, 薛秀丽, 宋伟伟, 等. 开挖前降水引发基坑变形机制模型试验研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(9): 2963-2972, 2983. (ZENG Chaofeng, XUE Xiuli, SONG Weiwei, et al. Mechanism of foundation pit deformation caused by dewatering before soil excavation: an experimental study[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(9): 2963-2972, 2983. (in Chinese))
- [15] XU Y S, YAN X X, SHEN S L, et al. Experimental investigation on the blocking of groundwater seepage from a waterproof curtain during pumped dewatering in an excavation[J]. Hydrogeology Journal, 2019, **27**(7): 2659-2672.