

DOI: 10.11779/CJGE2021S2030

复杂越流含水层基坑抽水引发围挡变形发展规律

王 硕¹, 曾超峰^{*1}, 薛秀丽¹, 李明广², 蔡 钢¹

(1. 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; 2. 上海交通大学土木工程系, 上海 200240)

摘要: 依托某基坑开挖前抽水试验, 利用ABAQUS建立有限元模型, 探讨了复杂越流含水层中基坑抽水引发围挡变形的发展规律。研究发现: 当基坑内外存在水力联系时, 受弱透水层影响, 基坑抽水过程中各土层围挡两侧孔压差值(ΔP)先增大后减小最后趋于稳定, 从而导致基坑围挡发生同样规律的变形(即, 增大后再减小最后趋于稳定)。而当基坑内外无水力联系时, 基坑抽水导致的各土层围挡两侧孔压差值(ΔP)将单调增大并很快趋于稳定, 此时, 基坑围挡变形不再出现前述先增大后减小的规律, 而同样表现出单调增大的规律。

关键词: 越流含水层; 基坑抽水; 围挡侧移; 数值模拟

中图分类号: TU433 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S2-0125-04

作者简介: 王 硕(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事基坑地下水控制和地下水回灌控沉技术等方面的学习与研究。

E-mail: 19020201028@mail.hnust.edu.cn。

Development of deformation of enclosure wall during dewatering in a leaky aquifer

WANG Shuo¹, ZENG Chao-feng¹, XUE Xiu-li¹, LI Ming-guang², CAI Gang¹

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Stability Control and Health Monitoring, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The finite element model is established to investigate the development of deformation of enclosure wall during dewatering in a leaky aquifer by using ABAQUS on the basis of a practical pre-excavation dewatering test. The results show that when there is hydraulic connection between the inside and outside of a foundation pit, under the influences of an aquitard, the difference of pore pressure at both sides of enclosure wall (ΔP) increases first, then decreases, and finally tends to be stable during the pumping. As a result, the deformation of enclosure wall first increases, then decreases and finally becomes stable. However, when there is no hydraulic connection between the inside and outside of the foundation pit, ΔP increases monotonously and tends to be stable soon. The deformation of enclosure wall no longer first increases and then decreases, but increases monotonously.

Key words: leaky aquifer; foundation pit dewatering; wall deformation; numerical simulation

0 引言

为保证基坑正常施工及防止基坑施工对环境造成不良影响, 需严格控制基坑施工过程中围挡变形, 以免围挡变形过大造成基坑破坏或坑外建筑损坏^[1]。

当地下水位较高时, 为方便基坑施工需将坑内水位降到开挖面下方, 而在正式抽水之前还需进行基坑开挖前抽水, 可用来测试单井出水量能否满足设计要求。目前关于基坑开挖前抽水导致围挡变形的研究较少, 曾超峰发现宽度较大基坑在同一开挖前降水时间和深度条件下将发生更大幅度支护墙侧移; 江杰等^[2]发现止水帷幕存在渗漏缺陷时, 基坑开挖前抽水引起的地下连续墙侧移稍小于无渗漏情况。上述研究均针对基坑开挖前抽水结束后围护结构的变形, 抽水过程中围挡如何变形, 变形稳定时间等尚不清楚。另外,

实际工程中常常出现基坑内外有水力联系情况(如为节省工程造价, 主动选用悬挂式止水帷幕^[3])。

对于软土地区存在的多层复杂越流含水层体系, 由于弱透水层和含水层交替分布, 当基坑内外存在水力联系时, 抽水过程中坑外各土层水位受到弱透水层影响可能不同步, 作用在围挡上的水压力变化复杂, 这应该对围挡变形发展产生影响, 但已有研究并未对此进行考虑。

故笔者针对软土地区开挖前抽水实际工程, 利用有限元软件ABAQUS建立数值计算模型, 研究了基

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(2020JJ5193); 湖南省教育厅资助项目(20A190)

收稿日期: 2021-08-18

*通信作者(E-mail: cfzeng@hnust.edu.cn)

坑内外有/无水力联系情况下围挡变形发展规律, 对墙体变形监测具有一定指导意义。

1 工程背景

图 1 为天津某地铁车站基坑, 基坑长 154 m, 宽 37~40 m, 基坑设计开挖深度 17~19 m。围挡采用地下连续墙, 厚 0.8m, 高 32~34 m(未隔断承压含水层)。为减小基坑施工过程围挡变形, 提前施工了第一道支撑。土层 50 m 范围内存在 5 个含水层, 分别记为 Aq0, AqI, AqII, AqIII 和 AqIV。坑内布置了 25 口疏干井, 同时, 在坑外布置了水位观测井, 墙身位置布置了墙身侧移观测点(由于基坑南北侧土质条件基本一致, 故图 1 中仅给出了基坑北侧的水位观测井)。

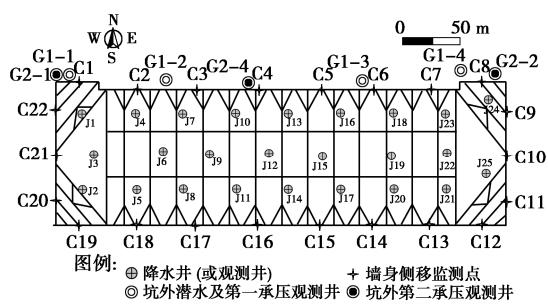


图 1 基坑平面及测点布置

Fig. 1 Plan view of excavation and layout of instrumentation

开展了 3.2 d 的开挖前抽水试验, 其中, 坑内三口疏干井 J6、J12、J22 作为水位观测井, 其余坑内疏干井同时抽水。试验结束后坑内水位降深约 15 m, 坑外第一、二承压含水层也出现了不同程度的水位降低, 最大降深约 7 m, 基坑北侧地下连续墙最大侧移约 6.5 mm, 由于在该试验过程中墙体变形监测频率很低, 无

法通过实际工程详细分析基坑开挖前抽水引发围挡结构变形规律, 故以下通过 ABAQUS 开展数值模拟研究。

2 数值模型及验证

2.1 模型建立

由于该基坑存在对称性, 为减少计算量仅建立 1/2 模型, 如图 2 所示, 由于基坑内外存在水力联系, 故根据 Sichardt 公式 $R=10 s_w \sqrt{K}$ 计算抽水影响半径, 其中 R 为影响半径, s_w 为井水位降深(当 $s_w < 10$ m 时, 取 $s_w = 10$ m)。假设 AqII 最终水位降深为 35.5 m, 得出抽水影响半径为 615 m(采用 $K=3$ m/d)。综上, 模型整体尺寸设置为 1640 m × 877.5 m × 50 m, 其水平方向边界大于抽水影响半径。地下连续墙厚 0.8 m, 埋深 32.5 m; 抽水井直径 0.4 m, 埋深 24.5 m。

假定模型初始水位在地表, 采用莫尔-库仑模型模拟土体在抽水过程中的受力变形行为^[1], 土层分布及其物理力学参数见表 1, K_h 、 K_v 、 E 根据对第 1 节抽水试验的数值反演得到, 其详细步骤可参见文献[4]。根据已有经验^[1], 基坑围挡及抽水井的弹性模量分别

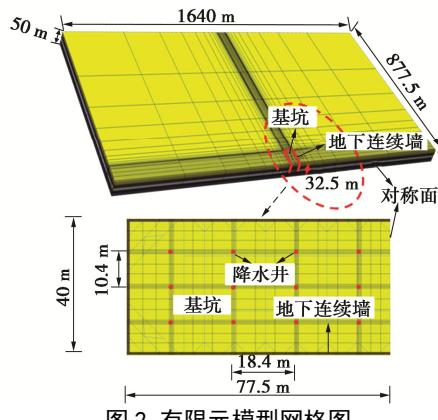


图 2 有限元模型网格图

Fig. 2 Finite element mesh of model

表 1 土层分布及其物理力学参数

Table 1 Soil distribution and its physical and mechanical parameters

土层	土性	H / m	$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	K_0	$w / \%$	e	E_s / MPa	$c' / (\text{kPa})$	$\varphi' / (^{\circ})$	$K_h / (\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	$K_v / (\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	E / MPa	$V_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
Aq0	粉黏	10	19.1	0.58	30.4	0.85	7.4	17	25	0.03	0.003	43.5	152
AdI	粉黏	15	19.3	0.61	28.7	0.81	6.8	18	23	0.025	0.001	56.3	172
AqI	粉土	19	20.2	0.44	21.7	0.62	17.4	10	34	0.2	0.1	137.6	266
AdII	粉黏	22	19.9	0.56	25.1	0.71	8	19	26	0.006	0.001	118.6	246
AqII	粉土	24.5	20.4	0.44	22.3	0.55	14.6	8	34	2.5	0.5	151.8	278
	粉土	29.5	20.6	0.41	20.9	0.58	15.9	8	36	1	0.2	153.3	278
	粉黏	32.5	20.3	0.56	23.6	0.66	8.6	17	26	1	0.16	128	253
	粉砂	35.5	20.6	0.40	16.3	0.52	18.9	7	37	3	0.6	178.5	300
AdIII	粉黏	37	20.5	0.56	20.7	0.6	9.5	19	26	0.02	0.004	152.1	274.5
AqIII	粉土	41	20.7	0.44	18.2	0.54	19.9	10	34	3	0.9	214.5	328
AdIV	粉黏	47	20.3	0.55	22.1	0.64	10.3	18	27	0.0005	0.0001	198.4	315
AqIV	粉砂	50	20.6	0.38	17.5	0.53	25.3	7	38	3.5	1.5	257	360

注: H 为层底埋深; γ 为土的天然重度; K_0 为静止土压力系数; w 为含水率; e 为初始孔隙比; E_s 为压缩模量; c' 为黏聚力; φ' 为内摩擦角; K_h 为水平渗透系数; K_v 为竖向渗透系数; E 为弹性模量; V_s 为剪切波速。

设置为 30, 210 GPa; 土体与结构之间的摩擦服从 Coulomb 摩擦定律, 摩擦系数设置为 0.3; 模型中土体采用 C3D8P 单元模拟, 围挡采用 C3D8I 非协调单元模拟, 抽水井采用 S4 壳单元模拟。

约束模型侧向边界水平方向变形, 且被赋予常水头边界条件。约束模型底部水平方向和竖直方向变形; 模型顶部土体表面设置 0 孔压边界条件。通过在与井接触的土体表面设置恒定的水头边界条件来模拟抽水(抽水速度不恒定), 由于在第 1 节抽水试验中观测到坑内水位下降 15 m 左右, 且模型井底埋深 24.5 m, 故在 0~15 m 范围内设置零孔压边界条件, 在 15~24.5 m 范围内按静水压力设置固定水头边界。

2.2 模型验证

图 3 对比了抽水中期(37 h)以及抽水结束后(3.2 d)基坑内外水位变化的实测值与计算值(水位变化是通过提取相应位置孔压变化计算得到), 可以看出二者吻合程度较高, 故在整个抽水过程中水位计算值与实测值应基本一致。图 4 为抽水结束后基坑北侧地连墙最大侧移实测值与计算值对比, 可以看出, 地连墙侧移实测值与计算值均在中部位置最大(且变形基本相同), 两端位置相对较小, 均揭示了边角效应问题。故模型有效性得到验证。

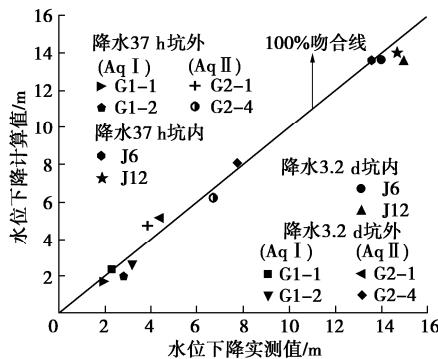


图 3 基坑内外水位变化实测值与计算值对比

Fig. 3 Comparison between computed and measured water level drawdowns

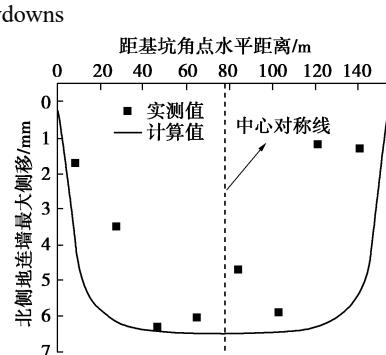


图 4 抽水结束后基坑北侧地连墙侧移实测与计算值对比

Fig. 4 Comparison between computed and measured wall deformations at north side of foundation pit after pumping

水位及墙体侧移没有完全拟合的原因可能是由

于: ①实际土层分布复杂, 该模型土层对实际土层进行了简化; ②本模型的降水模拟方式降水前期“抽水力度”较大(抽水量较大, 水位下降较快)。

3 围挡变形发展规律

第 1 节抽水试验为 3.2 d, 坑外各土层水位、围挡变形可能还未稳定, 且基坑开挖前抽水时间可达 200 d, 故将第 2 节所述模型抽水时间增加至 200 d, 以充分揭示围挡变形发展规律。

3.1 基坑内外有水力联系

在围挡深度范围内不同土层选取孔压特征点(如图 5 所示, 孔压特征点与围挡接触), 并在与孔压特征点相同深度的围挡位置选取墙体侧移特征点。

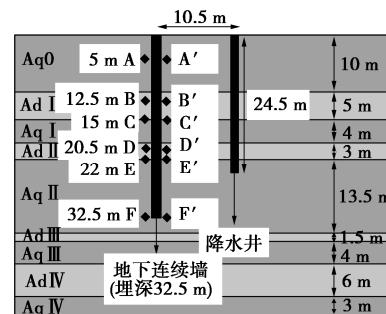


图 5 孔压特征点示意图

Fig. 5 Layout of monitoring points for pore water pressure during numerical simulation

将坑外与坑内孔压特征点位置的孔压变化值相减, 得到围挡两侧孔压差值(ΔP), 图 6 为基坑内外有水力联系情况下(土层参数如表 1)基坑开挖前抽水过程中 ΔP 变化, 可以看出, 各土层 ΔP 均先逐渐增大, 后逐渐减小, 最后稳定不变, ΔP 变化过程中存在峰值。

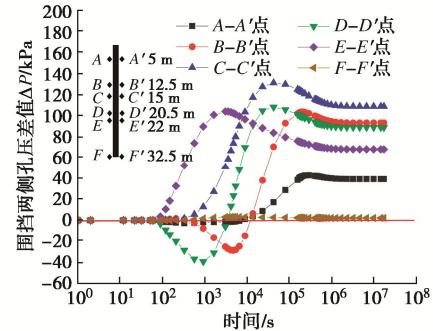


图 6 坑内外水力连通下围挡两侧孔压差值随抽水时间变化

Fig. 6 Time-history curves of ΔP of foundation pit hydraulically connected with outside

ΔP 的变化使得各墙体侧移特征点位置的侧移也出现了同样的规律, 如图 7 所示, 还可以发现, 相同深度位置, 墙体侧移变化峰值略滞后于 ΔP 峰值, 这是因为墙体变形还受到土压力作用, 土体变形需要时间, 且不同深度位置的墙体还受墙体刚度的影响。

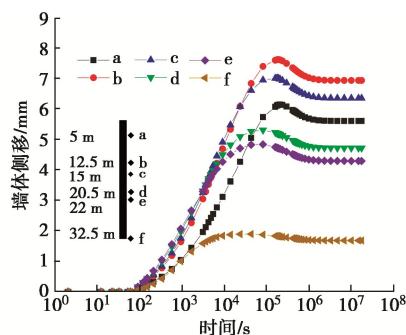


图7 坑内外水力连通下围挡不同深度侧移随抽水时间变化
Fig. 7 Time-history curves of wall deformations at different depths of foundation pit hydraulically connected with outside

3.2 基坑内外无水力联系

将地下连续墙底部32.5~35.5 m范围内土层渗透系数缩小 10^4 倍，使得基坑内外无水力联系。

图8、9分别为基坑内外无水力联系时 ΔP 、墙体侧移随抽水时间变化，可以看出，各土层 ΔP 与墙体侧移均先增大后逐渐稳定，未出现减小情况，这是由于抽水过程中坑内各土层水位不断降低，而坑外水位基本不变，这就使得当坑内各土层水位稳定后，各土层 ΔP 便基本恒定，围挡侧移也先增大后趋于稳定，不会出现围挡侧移减小情况。

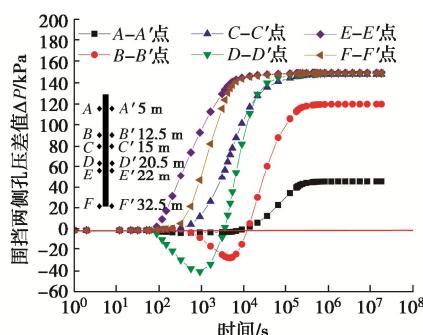


图8 坑内外无水力连通下围挡两侧孔压差值随抽水时间变化
Fig. 8 Time-history curves of ΔP without hydraulic connection between inside and outside of foundation pit

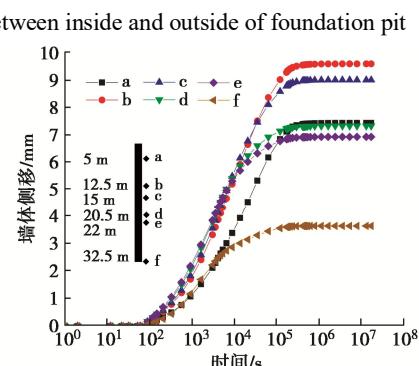


图9 坑内外无水力连通下围挡不同深度侧移随抽水时间变化
Fig. 9 Time-history curves of wall deformations at different depths without hydraulic connection between inside and outside of foundation pit

4 结 论

复杂越流含水层体系下，基坑抽水导致的围挡变形规律较复杂。本文通过ABAQUS对软土地区抽水试验进行模拟，并从基坑内外有/无水力联系两个角度对基坑抽水引发的围挡变形进行了分析，得出如下结论。

(1) 当基坑内外存在水力联系时，基坑抽水导致基坑内外水位均降低，受弱透水层影响，坑外各土层水位下降速度较慢且水位变化不同步，使得基坑抽水过程中各土层 ΔP 先增大后减小最后趋于稳定，从而导致围挡变形先增大后减小最后趋于稳定。

(2) 当基坑内外无水力联系时，基坑抽水仅导致坑内水位降低，坑外水位基本不变，随着抽水时间的增加，各土层 ΔP 不断增大，待坑内水位稳定后，各土层围挡两侧孔压差值(ΔP)也基本稳定，从而导致围挡变形不断增大后逐渐稳定。

参 考 文 献:

- [1] ZENG C F, XUE X L, ZHENG G, et al. Responses of retaining wall and surrounding ground to pre-excavation dewatering in an alternated multi-aquifer-aquitard system[J]. Journal of Hydrology, 2018, **559**: 609 - 626.
- [2] 江杰, 杨杉楠, 胡盛斌, 等. 预降水过程中止水帷幕缺陷对基坑变形的影响[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2020, **45**(5): 996 - 1005. (JIANG Jie, YANG Shan-nan, HU Sheng-bin, et al. Influence of waterproof curtain defect on foundation pit deformation in pre-dewatering process[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2020, **45**(5): 996 - 1005. (in Chinese))
- [3] 王建秀, 郭太平, 吴林高, 等. 深基坑降水中墙-井作用机理及工程应用[J]. 地下空间与工程学报, 2010, **6**(3): 564 - 570. (WANG Jian-xiu, GUO Tai-ping, WU Lin-gao, et al. Mechanism and application of interaction between underground wall and well in dewatering for deep excavation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, **6**(3): 564 - 570. (in Chinese))
- [4] WANG X W, YANG T L, XU Y S, et al. Evaluation of optimized depth of waterproof curtain to mitigate negative impacts during dewatering[J]. Journal of Hydrology, 2019, **577**: 123969.