

DOI: 10.11779/CJGE2019S1009

# 降水井错位布置对基坑预降水引发围护结构侧移的影响

曾超峰, 袁志成, 薛秀丽

(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:** 基坑开挖前预降水是富水地层中深基坑施工的一项重要施工步骤, 其引起的围护结构及周边地层变形可以达到 cm 级。然而, 传统基坑设计理论与相关研究未提出基坑预降水引发基坑变形的控制方法。本文提出了一种降水井错位布置的方法用于控制预降水引起的围护结构变形, 指出可使距离围护结构越近的降水井相对越深、相邻降水井间距相对越小。数值计算结果表明, 这种方法相对于常规抽水方式(等间距等长布置降水井, 同时或随意开启)而言, 可以改变预降水过程中坑内渗流场分布, 使得在围护结构附近出现指向围护结构的渗流迹线, 从而限制了预降水过程中背离围护结构的坑内土体水平位移的发展, 最终起到减小围护结构侧移的作用。若合理地对降水井进行错位布置, 可较大程度限制基坑预降水引发围护结构的侧移。

**关键词:** 深基坑; 围护结构变形; 降水; 降水井错位布置; 有限元分析

中图分类号: TU463

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)S1-0033-04

**作者简介:** 曾超峰(1987—), 男, 博士后, 副教授, 从事岩土工程教学与科研工作。E-mail: cfzeng@hnust.edu.cn。

## Behavior of retaining wall during dewatering before soil excavation under layout of staggered wells

ZENG Chao-feng, YUAN Zhi-cheng, XUE Xiu-li

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

**Abstract:** The dewatering conducted before soil excavation is an important stage in deep excavation. This dewatering construction is proved to be able to induce considerable deflection of retaining wall. However, how to control this type of deformation has not been proposed. A method called layout of staggered wells is proposed to control the dewatering-caused wall deformation. In this method, the uniformly-spaced and uniformly-buried layout of wells (i.e., the conventional layout of dewatering wells in practical engineering) is not advocated. It is recommended that (1) deeper wells should be employed near the retaining structures, and when the distance to the retaining structures increases, the wells depth should decrease gradually, and (2) smaller spacings of neighboring wells should adopted near the retaining structures, and when the distance to the retaining structures increases, the spacings of neighboring wells increase gradually. The numerical results show that the proposed method can lead to a smaller seepage flow velocity around the wall. Hence, the horizontal deformation of soil induced by seepage force will be relatively smaller, which eventually limit the deformation development of the retaining structures.

**Key words:** deep excavation; wall deflection; dewatering; well layout; numerical simulation

## 0 引言

随着中国地铁建设的快速推进, 城市环境中出现了大量的深基坑工程, 深基坑施工引起的环境变形需要严格控制<sup>[1]</sup>。在实际工程中, 深基坑施工的整个过程都会造成环境的变形, 基坑开挖前预降水是富水地区基坑施工做过程中一项十分重要的施工步骤<sup>[2-3]</sup>, 它常被用于基坑正式开挖前检查降水井的单井抽水量和降水井中水位降深是否能满足设计需求, 若不满足, 应及时补井以防止基坑开挖后出现降水井抽水效率低而不得不返工的问题。现场施工人员常根据预降水测试

的结果制定基坑正式降水方案(即基坑开挖期间的降水运行方案)<sup>[2]</sup>。基于工程实测, Zheng 等<sup>[4]</sup>建立了数值模型, 研究了基坑预降水引起围护结构变形的原因, 指出预降水诱发的渗流场可改变坑内土体的应力场, 引起坑内土体发生水平位移, 进而导致坑内围护结构侧土压力重分布, 围护结构两侧的土压力不平衡最终

基金项目: 国家自然科学基金项目(51708206); 中国博士后科学基金面上项目(2018M633297); 中国博士后基金特别项目(2019T120797); 广西博士后专项基金(BH2018054)

收稿日期: 2019-04-29

导致围护结构变形。曾超峰等<sup>[5-6]</sup>进一步研究发现在不同的基坑宽度、降水深度和土体渗透性条件下,基坑预降水引发的基坑变形规律完全不同。然而,现有的深基坑变形研究主要集中在土方开挖过程中的一系列施工引起的变形,未充分关注基坑预降水引起的变形问题,且尚无研究提出基坑预降水引发变形的控制方法。为此,本文提出了一种降水井错位布置的对策,通过建立、验证数值计算模型,并开展一系列数值分析,研究了该方法对预降水引发围护结构变形的影响,并将计算结果与常规降水井布置条件下预降水引发的变形规律进行了对比,在此基础上,提出了若干降水井错位布置的优化策略,以期最大限度减小基坑预降水引起的围护结构变形。

## 1 工程背景

天津地铁3号线某车站基坑<sup>[2]</sup>,如图1所示,宽约20 m,开挖深度 $H$ 约19 m,基坑主要分为A、B两段,在B段基坑南部距其仅8 m处有一幢年代久远的3层砖砌结构建筑,其支撑在浅基础之上,由于各种原因,该建筑最终沉降被要求不能超过1‰ $H$ ,即约19 mm。该工程场地潜水水位埋深0.8~2.9 m,潜土层底板埋深约11 m;场区埋深50 m以内存在两层承压含水层,其水头埋深分别为3.26,和4.12 m,其顶、底板埋深分别约为19,33,37,42 m。A段基坑在土方开挖前进行了10天的群井预降水,最大降水深度为16 m。过程中各测斜孔均显示出现悬臂式侧移,而C3测斜孔侧移最大,达到约10 mm。由此可知,在基坑预降水过程中,墙体会发生指向坑内的侧移,且侧移达到厘米级。所以,研究基坑预降水过程引发围护结构侧移的控制措施是非常必要的,下文中将提出一种降水井错位布置的方案,并分析其对基坑预降水过程引发围护结构侧移的影响。

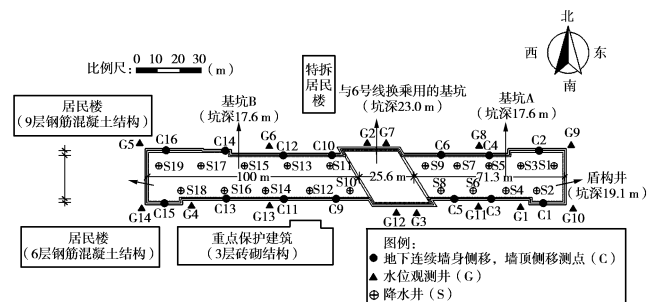


图1 基坑平面及测点布置

Fig. 1 Plane view of excavation and layout of instrumentation

## 2 数值模型及其验证

### 2.1 模型建立

本节基于上述工程背景中的场地条件,建立了二

维数值模型,模型土层概化为9层,其厚度为50 m,假定土体应力应变关系服从修正剑桥本构模型理论,土体计算参数可参照文献[2];地连墙厚度设置为1 m,墙体深度设置为33 m,降水井深度设置为27 m,假定地连墙和降水井的受力变形满足线弹性理论要求,其弹性模量分别为30, 210 GPa。由于模型的对称性,仅模拟了1/2的基坑,基坑宽度( $b$ )为120 m的有限元模型见图2(图中标红部分为降水井几何埋深(27 m)<sup>[2]</sup>,这是按照实际工程降水井深度设置的,但实际降水深度并非27 m,具体见第3节)。模型中各土层的初始地下水位同第1节描述,在模型土体的两个侧向边界上设置水平方向的位移约束,而在土体底部则设置水平方向及竖直方向的位移约束。同时,在侧向对称面和模型底部设置不透水边界,在非对称侧向边界上设置水头在各土层初始水位处的常水头水力补给边界。本模型采用的降水方法为在降水井过滤管位置处设置 drainage-only flow 渗流边界条件,关于该边界条件的详细介绍见文献[3]。有限元模型的预降水过程是参照文献[3]进行的,即,让所有降水井同时降水,降水时间为21 d。假定墙与地基土间的接触关系服从库伦摩擦定律<sup>[3]</sup>,摩擦系数取值为0.3。

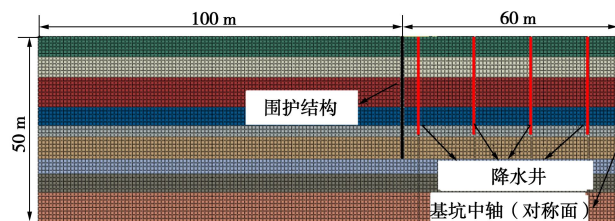


图2 有限元模型网格

Fig. 2 Mesh of FE model

### 2.2 模型验证

图3为降水深度分别为11, 16, 21 m的模型计算结果与文献[3]中120 m宽基坑预降水的实测与计算结果的对比。可以看出,在相同的条件下,本文模型计算出的地下连续墙最大侧移及其变化规律与文献[3]中的结果基本相符,即,随着降水深度的增加,地下连续墙最大侧移随之增大,而当发生不可接受的变形时,应采取对策控制变形。

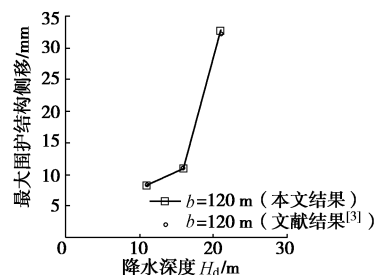


图3 本文计算围护结构变形与文献[3]中结果对比

Fig. 3 Calculated wall deflections and their comparisons with results in Reference[3]

3 降水井错位布置的影响

图 4 为基坑内降水井的常规布置与本文所提的降水井错位布置的对比图(以 4 根降水井为例)。从图 4 中可以看出,在降水井错位布置中:①越靠近基坑围护结构,降水井布置越深,随着井与围护结构距离的增加,井深逐渐减小;②越靠近基坑围护结构,相邻降水井间距越小,随着井与围护结构距离的增加,相邻井间距逐渐增大。利用第 2 节建立的数值模型模拟了 4 个工况的预降水过程,计算工况见表 1,各工况的降水时间均为 21 d。图 5 为不同工况下预降水结束后坑内围护结构侧孔隙水压力( $p_w$ )分布。从图 5 中可以看出,4 种工况下的孔隙水压力分布基本一致,水位降深均可达到约 20 m,这表明各工况的降水强度都是相同的。

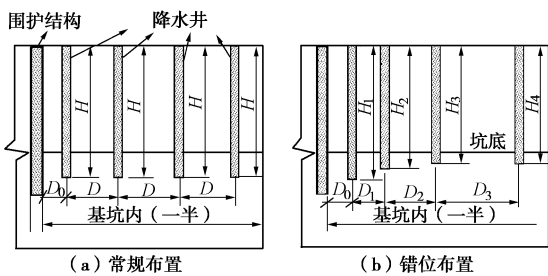


图 4 降水井布置方式  
Fig. 4 Layout of dewatering wells

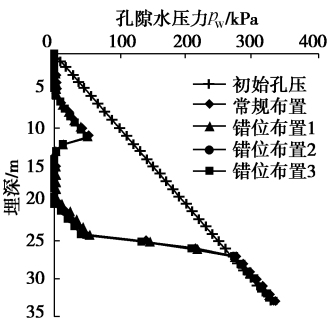


图 5 不同工况下预降水后坑内围护结构侧孔隙水压力分布  
Fig. 5 Distribution of  $p_w$  at excavated side of wall after PED under different cases

图 6 为不同工况下预降水引起的围护结构侧移,从图中可以看出,采用降水井错位布置时围护结构侧移( $\delta_w$ )明显小于常规布置时的  $\delta_w$ ,通过采用错位布置 3,可以使最大  $\delta_w$  从 32 mm 减小到 18 mm,侧移量减小了 44%,说明通过降水井错位布置的方案来控制基坑预降水对围护结构侧移的影响效果显著。值得一提的是,在施工过程中,还可以根据所提出的方案进一步的调整降水井的间距和深度,从而更有效地降低基坑预降水对围护结构侧移的影响。此外,与调整降

水井深度相比,调整相邻降水井的间距的控制效果更佳。根据 Zheng 等<sup>[4]</sup>的报道,在基坑预降水过程中,围护结构侧移与其两侧的土体变形及应力状态有很大关系,预降水过程中降水井周围的渗流力可使坑内土体发生指向坑内的水平位移,围护结构由于变形协调随之发生侧移,同时,造成了围护结构侧土压力重分布,进一步影响围护结构侧移发展。采用降水井错位布置的方法可以减小预降水引起围护结构侧移的原因是:与常规降水井布置情况下的降水过程相比,错位布置预降水条件下基坑内部的渗流场和土体位移场的分布发生了变化。

表 1 计算工况

Table 1 Calculation cases			
序号	深度 $H_i$ /m	间距 $D_i$ /m	备注
1	$H_1=H_2=H_3=H_4=21$	$D_1=D_2=D_3=15.7$	常规布置
2	$H_1=23; H_2=20; H_3=H_4=19$	$D_1=D_2=D_3=15.7$	错位布置 1
3	$H_1=H_2=H_3=H_4=H_5=21$	$D_0=1; D_1=5; D_2=9; D_3=14; D_4=20$	错位布置 2
4	$H_1=23; H_2=20; H_3=H_4=H_5=19$	$D_0=1; D_1=5; D_2=9; D_3=14; D_4=20$	错位布置 3

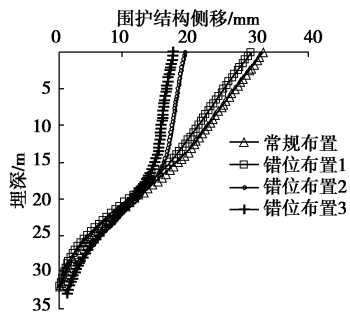


图 6 不同工况下预降水引起的围护结构变形  
Fig. 6 PED-induced wall deflections under different cases

图 7,8 分别为工况 1 和工况 4 下预降水引起的地下水渗流迹线图 and 基坑内部土体水平变形云图(图中红色矩形条为实际降水深度),从图 7 可以看出,在围护结构附近(尤其是围护结构与降水井之间),工况 1 中出现了明显的背离围护结构的渗流迹线,而工况 4 中在同样位置则出现指向围护结构的渗流迹线,由于地下水渗流过程中将对土体施加渗流力作用并进而引起土体变形,这使得采用降水井错位布置的工况 4 在预降水过程中的坑内土体水平位移将小于工况 1 的情况,这可由图 8 看出来,这一渗流和土体变形机制最终限制了工况 4 中围护结构的变形发展。由图 6 可知,3 种错位布置方案控制基坑预降水对围护结构侧移的影响规律类似,且工况 4 的影响效果最为显著,所以图 7 和图 8 只对工况 1 和工况 4 做相应探究,不再对

工况2和工况3做过多探讨。

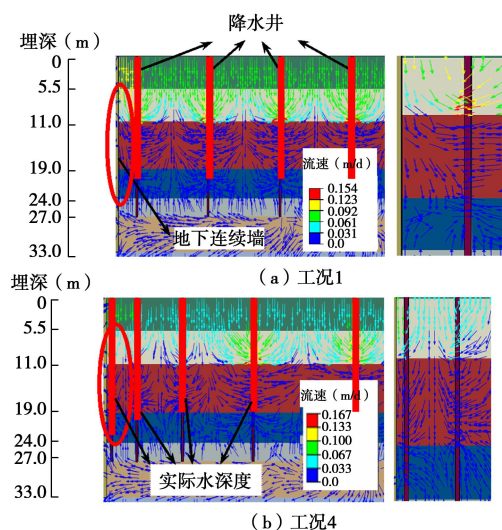


图7 预降水引起的坑内渗流迹线图

Fig. 7 PED-induced seepage traces in caused by dewatering

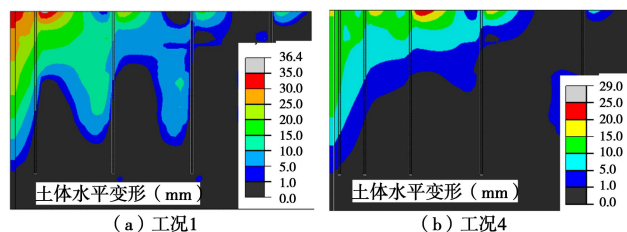


图8 预降水引起的坑内土体水平位移云图

Fig. 8 Horizontal deformations of soil inside excavation

## 4 结论与建议

(1) 本文提出了一种降水井错位布置的方法以减小基坑预降水引起的围护结构侧移。在该方法中,在围护结构附近采用较深的降水井和较小的相邻井的间距,随着井与围护结构距离的增加,井深逐渐减小,相邻井间距逐渐增大。这种方法可以使得预降水过程中在围护结构附近出现指向围护结构的渗流迹线,从而限制了预降水过程中坑内土体水平位移的发展,最终起到减小围护结构侧移的作用。

(2) 根据所提出的方法,可以进一步对降水井的间距和深度进行优化,以更有效地减小基坑预降水过程引起的围护结构侧移,此外,相比于调整降水井深度,调整相邻降水井的间距对于减小基坑预降水引发

围护结构的变形更有效。

## 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] 郑刚, 曾超峰. 基坑开挖前潜水降水引起的地下连续墙侧移研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(12): 2153 - 2163. (ZHENG Gang, ZENG Chao-feng. Lateral displacement of diaphragm wall by dewatering of phreatic water before excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(12): 2153 - 2163. (in Chinese))
- [3] 曾超峰, 郑刚, 薛秀丽. 大面积基坑开挖前预降水对支护墙变形的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(6): 1012 - 1021. (ZENG Chao-feng, ZHENG Gang, XUE Xiu-li. Study of wall deflection induced by pre-excavation dewatering in large-scale excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(6): 1012 - 1021. (in Chinese))
- [4] ZHENG G, ZENG C F, DIAO Y, et al. Test and numerical research on wall deflections induced by pre-excavation dewatering[J]. Computers and Geotechnics, 2014, **62**: 244 - 256.
- [5] 曾超峰, 薛秀丽, 郑刚. 软土地基渗透性条件对基坑预降水过程中支护墙侧移的影响研究[J]. 岩土力学, 2017, **38**(10): 3039 - 3047. (ZENG Chao-feng, XUE Xiu-li, ZHENG Gang. Effect of soil permeability on wall deflection during pre-excavation dewatering in soft ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(10): 3039 - 3047. (in Chinese))
- [6] 曾超峰, 薛秀丽, 郑刚. 软土区基坑预降水引起支护墙侧移的典型参数影响研究[J]. 岩土力学, 2017, **38**(11): 3295 - 3303, 3318. (ZENG Chao-feng, XUE Xiu-li, ZHENG Gang. A parametric study of lateral displacement of support wall induced by foundation pre-dewatering in soft ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(11): 3295 - 3303, 3318. (in Chinese))

(责编: 孙振远)