

DOI: 10.11779/CJGE2014S2053

深基坑降水与回灌过程的数值模拟分析

黄应超, 徐杨青

(中煤科工集团武汉设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430064)

摘要: 武汉地区部分超深基坑基底已揭穿承压含水层, 地下水势必对基坑开挖造成影响, 必须对地下水进行有效控制。以武汉市妇女儿童医疗保健中心综合业务楼深基坑降水工程为例, 对深基坑降水与回灌过程进行三维数值模拟, 分析探讨了模拟的可行性及准确性, 并研究了不同回灌方法的回灌效果、回灌对坑外水位变化及地面沉降的影响。结果表明: 回灌对提高坑外水位有明显作用, 且回灌量越大, 水位恢复越多。采用坑外回灌可控制降水引起的地面沉降, 且回灌量越大, 能控制的沉降量也越大。

关键词: 深基坑; 降水; 回灌; 数值模拟

中图分类号: TU470 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)S2-0299-05

作者简介: 黄应超 (1984-), 男, 硕士, 主要从事岩土工程勘察、基坑工程设计等方面的工作。E-mail: 113296681@qq.com。

Numerical simulation analysis of dewatering and recharge process of deep foundation pits

HUANG Ying-chao, XU Yang-qing

(Wuhan Design & Research institute Co., Ltd. of China Coal Technology & Engineering Group, Wuhan 430064, China)

Abstract: Part of the ultra-deep foundation pits have debunked confined aquifer in Wuhan area, and the groundwater is bound to affect the excavation. So the groundwater should be effectively controlled. Taking the dewatering of deep foundation pit of Integrated Services Building of Wuhan Women and Children Health Care Center as an example the dewatering and recharge process are simulated by using Visual Modflow. The feasibility and accuracy of simulations are analyzed, and the efficiency of different recharge methods and the impact of recharge on changes in water level and ground settlement outside the deep foundation pit are studied. The results show that the recharge plays a significant role in improving water outside the deep foundation pit, and the greater the amount of recharge, the more the water level recovery. The settlement outside the deep foundation pit can be reduced by recharge, and the more the recharge amount, the more the controlled settlement.

Key words: deep foundation pit; dewatering; recharge; numerical simulation

0 引言

随着武汉地区超高层建筑、桥梁、地铁、过江隧道等工程大规模兴建, 基坑类地下工程不断涌现, 且其开挖面积和深度不断加大加深, 基坑周边环境也愈加严峻。武汉地区部分超深基坑基底已揭穿承压含水层, 地下水势必对基坑开挖造成影响, 故必须对地下水进行有效控制, 以保障基坑周边建(构)筑物的安全^[1]。

目前回灌虽在基坑开挖中广泛应用^[2], 但在武汉地区并不多见。本文以“武汉市妇女儿童医疗保健中心综合业务楼基坑降水工程”为例对深基坑降水与回灌过程进行了数值模拟, 并分析探讨了其可行性及准确性, 并研究了不同回灌方法的回灌效果、回灌对坑外水位变化及地面沉降的影响。

1 工程概况与地质条件

1.1 工程概况

武汉市儿童医院位于香港路与光华路交口处, 临香港路, 拟在院内新建综合业务楼内科楼、医技部、门诊部, 设2层地下室, 地下建筑面积63115.8 m², 其中门诊楼地下室占地面积约7200 m², 基坑开挖深度约12 m, 采用钻孔灌注桩加内支撑支护, 地下水采用深井降水结合坑外隔渗帷幕的处理措施。

基坑西北侧为正在使用的老门诊楼(3F), 靠近香港路为近年新建部分门诊(3F), 其基础型式为钻孔桩基础, 距离地下室外墙最近距离约4.6 m, 紧邻基坑开挖外边线。向医院内部方向为早期建设的老门诊

楼（3F），砖混结构，基础底标高为-2.45 m，基础埋深约 2.0 m，地基土经过矿渣换填处理，处理厚度约 1.4 m。距离地下室外墙最近距离约 6.4 m，距离基坑开挖外边线最近距离约 2.1 m。基坑东侧分布有医院内部 8F 民房，砖混结构，有圈梁，柱下独立基础，基础埋深约 3.5 m，距离地下室外墙最近距离约 25.6 m，距离基坑开挖外边线最近距离约 20.0 m，且该房倾斜率超过危房鉴定标准，属整栋危房。基坑周边环境见图 1。

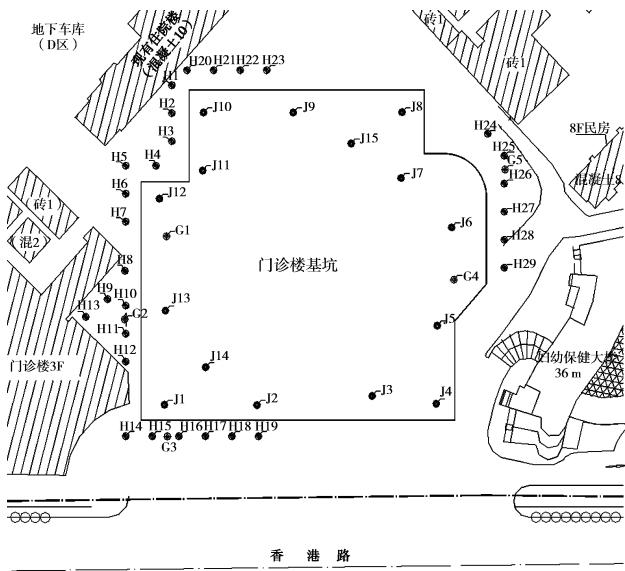


图 1 周边环境及降水与回灌井布置图

Fig. 1 Surrounding environment and layout of dewatering and recharge wells

1.2 工程地质与水文地质条件

场地各土层土性特征如下：①素填土，层厚0.80~5.10 m；②₁黏土，埋深1.40~3.30 m；②₂淤泥质黏土，埋深0.80~4.60 m；②₃黏土，埋深1.10~13.1 m；③₁黏土夹粉土、粉砂，埋深3.70~17.70 m，③₂粉砂，埋深6.70~23.20 m；③₃粉砂，埋深37.00~41.30 m，④₁强风化砾岩，埋深41.80~44.50 m。场地典型地层剖面见图2。

场地地下水分为上层滞水和孔隙承压水两种类型。上层为赋存于杂填土中的上层滞水，主要受大气降水及地表水补给。下层为赋存于黏土夹粉土、粉砂及以下砂层中的承压水，根据勘察报告，勘察单位在2011年5月测得承压水埋深为7.3~7.8 m，绝对标高约12.7~13.2 m，其水位与长江水有一定的水力联系，受长江水位变化的影响，水量丰富。该地段承压水水头年变化幅度约为3.0~4.0 m。

2 深基坑降水与回灌

2.1 深基坑降水与回灌过程

本基坑承压水含水层层顶最小埋深为 6.80 m, 基坑挖深超过 11.85 m, 基坑开挖过程中部分揭露隔水层, 进入承压含水层, 未揭露隔水层区段坑底仅分布有 2~5 m 厚的淤泥质土。经抗突涌验算, 基坑开挖至基底附近时, 会发生突涌, 故必须对基坑承压水进行处理。基坑降水与回灌井布置如图 1 所示, 坑内共布设有 15 口减压井 (J1-J15), 2 口观测井 (G1, G4)。为保护坑外 3F 老门诊楼及 8F 危房, 另布置了 29 口回灌井 (H1-H29) 和 3 口观测井 (G2, G3, G5)。降水井、回灌井及观测井结构参数见表 1。

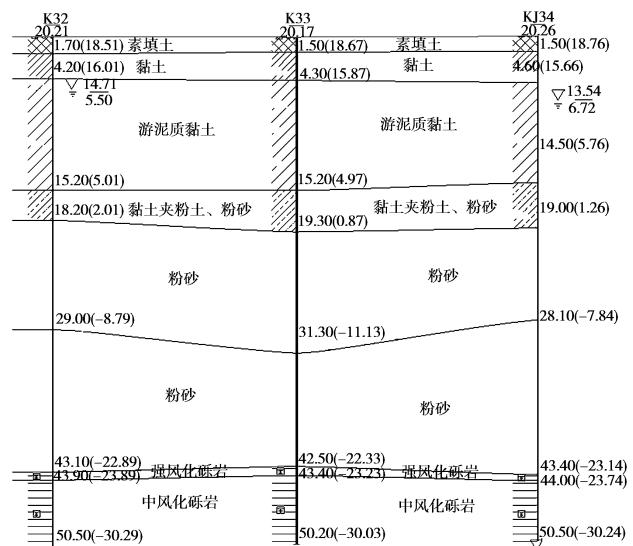


图 2 场地典型地层剖面

Fig. 2 Typical stratigraphic section

表 1 降水井、回灌井及观测井结构参数表

Table 1 Structural parameters of dewatering wells, recharge wells

| and observation wells | | | | | |
|-----------------------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 井类型 | 孔径 /mm | 井深 /m | 井径 /mm | 实管长 /m | 滤管长 /m |
| 降水井 | 600 | 35.0 | 273 | 16 | 18 |
| 回灌井 | 600 | 27.0 | 273 | 17 | 9 |
| 观测井 | 250 | 25.0 | 110 | 16 | 6 |

2013年7月初开始第二层土方开挖,7月11日基坑北侧开挖至-6 m,随后逐步开启降水井,7月底至9月中旬基坑全面开挖,为降水井抽水高峰期,开启降水井数量为10口,坑内水位保持在-12.5 m左右。9月底垫层基本施工完毕,底板浇筑完成50%,开始减少降水井开启数量,10月底底板全部浇筑完毕,但基坑尚未回填,仅开启2口井适当降低承压水头。根据基坑抽水量和周边建筑物监测情况于7月22日和8月8日分别开启基坑西北侧和东侧回灌井,当抽水井减少时,回灌井也随之陆续关闭。

2.2 基坑回灌方法

(1) 水箱回灌法

基坑西北侧采用水箱回灌方法, 在现场设置集水箱, 规格为 $3\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ m}$, 将 2 口降水井抽出来的地下水直接排至集水箱中。集水箱底部连接回灌主管道, 水箱中的水自流至回灌主管道, 集水箱上部设置溢流口, 多余地下水经溢流口由排水管道排走。当需要回灌时, 打开连接回灌井的控制阀, 主管道中的水就会流进回灌井。

(2) 加压泵回灌法(见图 3)

基坑东侧采用加压泵回灌法, 基本方法同水箱回灌, 但需在集水箱中安装加压泵, 通过加压泵增加回灌水压力以增加回灌水量。

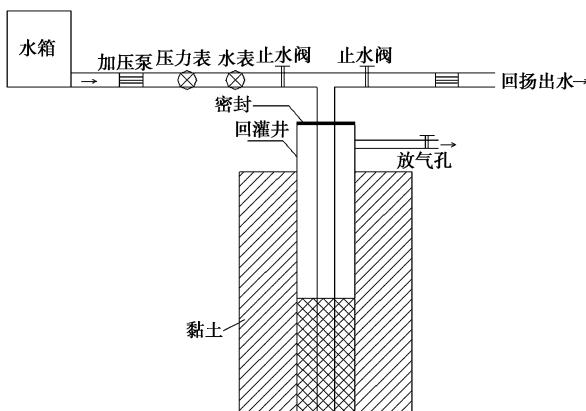


图 3 加压回灌系统示意图

Fig. 3 Pressurized recharging system

3 深基坑降水与回灌的三维数值模型

根据场地地质条件、含水层厚度等情况, 当基坑隔渗帷幕为悬挂式时基坑降水后地下水渗流将以三维渗流为主, 可采用三维有限差分法对场地基坑降水进行仿真数值模拟。模拟区可概化成非均质水平各向同性的三维非稳定地下水渗流系统。模拟区水文地质渗流系统通过概化、单元剖分, 即可形成为地下水三维非稳定渗流模型^[3]。

3.1 地下水非稳定渗流三维数学模型

根据本场地水文地质条件, 可建立下列与之相适应的地下水三维非稳定渗流数学模型:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = \\ S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad ((x, y, z) \in \Omega) \\ h(x, y, z, t) \Big|_{t=0} = h_0(x, y, z) \quad ((x, y, z) \in \Omega) \\ h(x, y, z, t) \Big|_{\Gamma_1=0} = h_1(x, y, z, t) \quad ((x, y, z) \in \Gamma_1) \end{cases} \quad (1)$$

式中 k_{xx}, k_{yy}, k_{zz} 分别为各向异性主方向渗透系数(m/d); h 为点 (x, y, z) 在 t 时刻的水头值 (m); W 为源汇强度 ($1/\text{d}$); h_0 为计算域初始水头值 (m); h_1 为

第一类边界的水头值 (m); S_s 为储水率 ($1/\text{m}$); t 为时间 (d); Ω 为计算域; Γ_1 为第一类边界。

3.2 地下水非稳定渗流三维数值模型

本次数值模型模拟区平面范围以基坑为中心, 以距基坑中心 1.5 倍抽水井影响半径距离处为边界 ($600\text{ m} \times 600\text{ m}$)。根据渗流模拟区域含水层结构、边界条件和地下水水流场特征, 将模拟区每层剖分为 120 行、120 列, 剖分网格共 14400 个。计算模型如图 4 所示。

模型中含水层水平渗透系数按勘察报告数据确定, 垂直渗透系数按各水平渗透系数的 $1/3$ 左右进行折减。土层力学参数见表 2。模型边界定义为定水头边界, 本模型中初始水头与边界水头埋深取值为 -4.5 m (绝对标高 16.5 m)。

表 2 土层分布及物理力学参数

Table 2 Distribution of layers and physico-mechanical parameters of soils

| 层号 | 层厚 /m | 重度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$) | E_s /MPa | c /kPa | φ /($^{\circ}$) | K /($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$) |
|-------|-------|-----------------------------------------|------------|----------|---------------------------|-----------------------------------------|
| (1) | 1.50 | — | — | 10.0 | 8 | — |
| (2-1) | 2.50 | 18.6 | 4.7 | 13.9 | 8.8 | 0.02 |
| (2-2) | 10.00 | 17.0 | 3.0 | 8.6 | 5.3 | 0.02 |
| (2-3) | 1.00 | 18.7 | 5.3 | 17.2 | 9.8 | 0.02 |
| (3-1) | 5.00 | 18.1 | 6.5 | 14.6 | 8.4 | 1.00 |
| (3-2) | 6.00 | — | 16.0 | 0 | 32.8 | 8.50 |
| (3-3) | 17.00 | — | 22.0 | — | — | 8.50 |
| (4-1) | 7.00 | — | $E_0=44$ | — | — | 0.02 |

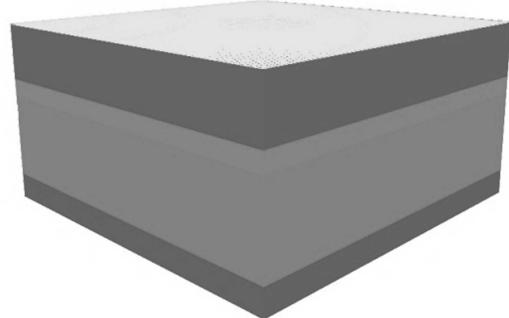


图 4 三维模型图

Fig. 4 Three-dimensional model

4 深基坑降水与回灌的数值模拟分析

4.1 降水与回灌的数值模拟分析

本次模拟期从 2013 年 7 月 12 日基坑开启降水井开始, 至 2013 年 9 月 25 日底开始减少开启的降水井数量结束, 模拟时间共 76 d。降水井及回灌井的开启和关闭、增加和减少等不同的动态过程都包含在模拟过程中。

图 5, 6 分别为坑外观测井 G3 和 G5 的模拟计算水位与实际观测水位的比较图, 曲线代表模拟计算水

位, 点代表实际观测水位 (G5 观测井在已经开始降水一段时间后施工的, 故前期没有观测数据)。从图中可以看出模拟值与观测值总体拟合程度较好, 但受实际边界条件的变化、地层的不均匀性、水文地质参数等因素的影响, 模拟值与观测值还有一定的出入。总体而言模型的建立和模拟结果与降水实际情况基本相符, 说明用 Visual Modflow 来模拟深基坑降水与回灌不但是可行的, 而且是比较准确的。

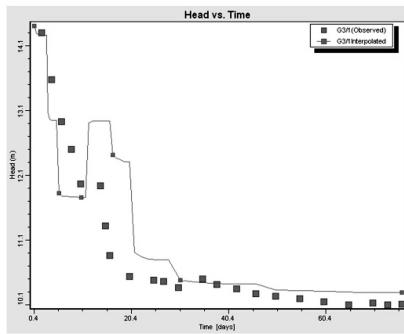


图 5 观测井 G3 模拟水位与观测水位

Fig. 5 Simulated and observed water levels at G3 observation well

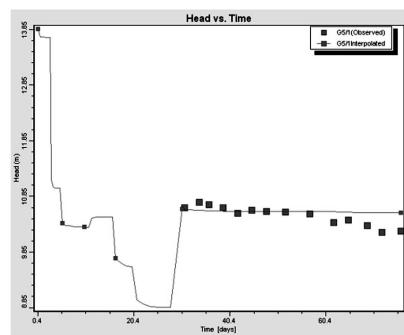


图 6 观测井 G5 模拟水位与观测水位

Fig. 6 Simulated and observed water levels at G5 observation well

假设基坑外未设置回灌井, 坑内降水井的开启及关闭过程没变, 即在模拟过程中关闭回灌井来模拟坑外观测井的水位情况, 如图 7, 8 所示。

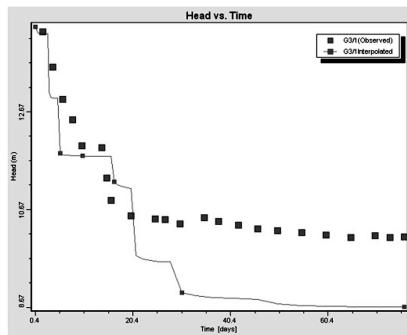


图 7 无回灌井时 G3 模拟水位与观测水位

Fig. 7 Simulated and observed water levels without recharge at G3 observation well

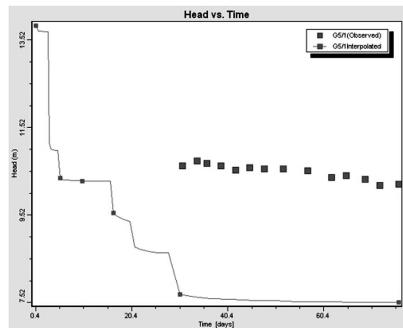


图 8 无回灌井时 G5 模拟水位与观测水位

Fig. 8 Simulated and observed water levels without recharge at G5 observation well

由图可以看出, 此时 G3 观测井的模拟水位与实际水位相差约 2 m, G5 观测井的模拟水位与实际水位相差约 3 m。实际回灌时 G5 这侧采用的加压回灌法, 单井回灌量约 $5 \text{ m}^3/\text{h}$, G3 这侧采用的水箱自然回灌, 单井回灌量约 $2 \text{ m}^3/\text{h}$ 。反推之, 说明有无回灌和回灌量的大小均对坑外水位有着较为明显的影响。且回灌量越大, 水位恢复得越多。

4.2 周边建筑物垂直位移监测

在基坑开挖及开始降水后, 周边建筑物沉降量较前期明显增大, 尤其是浅基础房屋下沉趋势明显。其中 3F 老门诊楼绝大多数监测点沉降量均已接近 30 mm 的报警值, 受降水排水出口有渗漏的影响, 靠近排水口的监测点沉降量大于 30 mm, 但整体倾斜率未超过 0.2% 的报警值; 8F 民房沉降量介于 20.55~45.34 mm 之间, 部分沉降量已超过 30 mm 的报警值, 但不均匀沉降仍位于可控范围以内。住院楼及妇幼保健大楼为桩基础, 受开挖及降水影响较小, 累计沉降量均小于 10 mm。

4.3 回灌对坑外地面沉降影响的分析

由 4.1 节模拟结果可知, 若本工程未设置坑外回灌井, 则 G3 观测井附近水位比实际水位多降约 2 m, G5 观测井附近水位比实际水位多降约 3 m。本地区承压含水层为砂层, 短时间内即可固结完成, 无需考虑滞后效应, 可采用弹性变形公式计算^[4]。一维固结计算公式为

$$s = \frac{\gamma_w \Delta h}{E_{1-2}} H_0 \quad . \quad (1)$$

式中 s 为砂层的变形量 (m); γ_w 为水的重度 (kN/m^3); Δh 为水位变化值 (m); H_0 为砂层的原始厚度 (m); E_{1-2} 为砂层的压缩模量 (kPa) (取值见表 1)。

考虑坑外回灌对坑内降水的负面影响, 若坑外未设置回灌井, 则坑内开启的降水井数量会减少, 相应

的坑外水位降幅也会减少。取 $\Delta h = 1 \text{ m}$ 计算, $s = 0.013 \text{ m}$ 。即若坑外未设置回灌井, 老门诊这侧沉降量在原有基础上增加约 13 mm , 则老门诊大楼大部分监测点沉降量将达到 40 mm , 这将威胁到老门诊楼的安全。

当 Δh 越大时, s 也越大。反推之, 说明回灌对减小坑外地面沉降有着重要的作用, 尤其当坑外有对沉降敏感的建(构)筑物时。且回灌量越多, 能控制的沉降量越大。

5 结 论

(1) 利用 Visual Modflow 来模拟深基坑降水与回灌时, 可将降水与回灌的整个动态过程包含在内, 方法是可行且比较准确的。

(2) 回灌对坑外水位有着较为明显的影响, 采用回灌时水位比未采用回灌时要高出很多, 且回灌量越大, 水位恢复越多。回灌方法对回灌量的影响较大, 单井加压回灌量比水箱回灌量要大。

(3) 回灌对减小坑外地面沉降有着重要的作用, 尤其当坑外有对沉降敏感的建(构)筑物时, 采用坑外回灌可控制降水引起的地面沉降, 且回灌量越多, 能控制的沉降量越大。

(4) 在进行降水与回灌设计时, 需考虑坑外回灌对坑内降水的负面影响, 要合理设置降水井与回灌井, 在保证坑内水位降幅满足施工要求的同时有效地提高坑外水位。

(5) 受回灌压力、水质、回灌井工艺等条件限制,

回灌量有限, 如何有效提高回灌井回灌量是今后可以研究的问题。

参考文献:

- [1] 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(5): 70 - 74. (YU Jian-lin, GONG Xiao-nan. Design and applied technology groundwater recharge systems excavation engineering[J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(5): 70 - 74. (in Chinese))
- [2] 张瑛颖, 龚晓南. 基坑降水过程中回灌的数值模拟[J]. 水力水电技术, 2007, 38(4): 48 - 50. (ZHANG Ying, GONG Xiao-nan. Numerical simulation of re-charging during dewatering of foundation pit[J]. Hydraulic and hydropower Technology, 2007, 38(4): 48 - 50. (in Chinese))
- [3] 刘毅, 瞿成松, 等. Modflow 在上海淮海中路 3 号地块基坑降水中的应用[J]. 施工技术, 2011(增刊): 137 - 140. (LIU Yi, QU Cheng-song, et al. Application of modflow in NO.3 block central Huaihai road foundation excavation dewatering in Shanghai[J]. Construction Technology, 2011(S0): 137 - 140. (in Chinese))
- [4] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation engineering manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)