

文章编号:1007-2993(2010)03-0156-05

# 地下水回灌技术在浅层承压含水层中的实践与探讨

武永霞<sup>1,2</sup> 张楠<sup>1,2</sup> 陆建生<sup>1,2</sup>

(1. 上海长凯岩土工程有限公司, 上海 200002; 2. 上海岩土工程勘察设计研究院有限公司, 上海 200002)

**【摘要】** 上海地区承压含水层埋深较深, 深基坑围护的止水帷幕难以深入到承压含水层底板进行地下水水平向的完全阻隔, 减压降水过程势必对周边环境产生一定影响。以上海盛大国际金融中心深基坑回灌试验为依据, 表明人工回灌地下水对控制承压水位具有一定效果, 并运用数值方法模拟了不同回灌条件下坑外承压水位的变化。

**【关键词】** 人工回灌; 深基坑降水; 非稳定渗流; 数值模拟

**【中图分类号】** P641.25

**【文献标识码】** B

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2010.03.012

## Practice and Research of Groundwater Recharge in Shallow Confined Aquifer

Wu Yongxia<sup>1,2</sup> Zhang Nan<sup>1,2</sup> Lu Jiansheng<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Changkai geotechnical engineering co., ltd, Shanghai 200002, China;

2. Shanghai geotechnical investigation&design institute co., ltd Shanghai 200002, China)

**【Abstract】** The depth of confined aquifer in Shanghai is very deep. The waterproof curtain in deep foundation pit was hard to the bottom of confined aquifer, and the complete barrier to groundwater levels can't be done, then the environment must be impacted. According to the recharge experiment in the deep foundation pit of the shengda international financial center of Shanghai, the result that the artificial recharge has some effect for controlling the level of groundwater was achieved. In the end, according to the numerical simulation the change of groundwater level was gotten under different recharge conditions.

**【Key words】** Artificial recharge; deep foundation pit; unsteady flow; numerical simulation

### 0 引言

随着市政建设的迅速发展,在地下水以下进行开挖的深基坑不断加大、加深,承压水对基坑工程的安全威胁越来越大,对承压水控制的要求越来越高,而抽取承压水可能导致含水层中或邻近含水层的可压缩夹层的压缩,结果导致地面发生沉降<sup>[1]</sup>。为了减少减压降水对周边环境的影响,可以加深止水帷幕的插入深度,但在某些承压含水层埋深较深或厚度很大的地区,止水帷幕不能将承压含水层完全隔断,且造价较高。因此,可以在基坑外侧采用人工回灌方法来减少减压降水对周围环境的影响。

本文以上海盛大国际金融中心基坑降水为例,详细论述了在第四纪巨厚松散沉积层地区多层承压含水层相互连通的地质条件下,基坑围护的地下连

续墙达不到含水层底板,在坑内减压降水的同时在坑外进行人工回灌。实践表明,人工回灌可减小因坑内减压降水引起的坑外承压水位的降幅,从而减少了因地下水位的降低导致的地面沉降。

### 1 工程概况

上海盛大基地办公楼位于上海浦东新区 2—11—1 地块,毗邻浦项广场,东北面至世纪大道,东南面面临向城路,西面靠福山路,场地红线范围内面积约 9 785.9 m<sup>2</sup>。本工程在邻近地铁 4 号线区域设置三层地下室,其余设置四层地下室,采用桩筏基础,桩基采用钢筋混凝土钻孔灌注桩。整个基坑分三个区开挖,基坑挖深主楼为 22.25 m,裙楼为 20.75 m,邻近地铁 4 号线区域为 17.15 m,主楼坑中坑基坑挖深为 27.05 m。基坑围护结构采用 1 m 厚地下连续墙,墙深为 37.95~41.00 m。

基金项目:上海市科学技术委员会科研项目(08201201400)

作者简介:武永霞,1981 年生,女,汉族,内蒙古人,硕士,工程师,主要从事基坑降水。Email:wuyongxia2991@163.com

## 2 工程周边环境及地质特征

本工程周边环境极其复杂,环境要求极高(见图1、图2)。紧邻基坑西北侧、福山路路面下有地铁4号线区间隧道,距离本工程地下连续墙约6.0m;基坑北侧、世纪大道路面下有地铁2号线区间隧道,距离本工程地下连续墙约38m。地铁2号线、地铁4号线均处于运行阶段。另外,在地铁2号线与基坑北侧之间,距离本工程地下连续墙约8.5m,将有9号线盾构准备穿越。此外,紧邻基坑周边的世纪大道、向城路和福山路路面下,均埋设有市政管线,包括电力管线、上下水管、煤气管、通讯管线等。

基坑底部埋藏有高水头的承压含水层,分别为上更新统第Ⅰ、第Ⅱ承压含水层,中更新统第Ⅲ承压含水层,该三层承压含水层相互连通,构成了一个复合承压含水层。承压含水层厚度很大(大于100m),

承压水静止水位埋深较浅,约为9.00m,对基坑地板的稳定性产生严重威胁。为确保基坑开挖施工顺利进行,必须对下部承压含水层进行减压降水,最深坑地下水水位降深达20.00m。

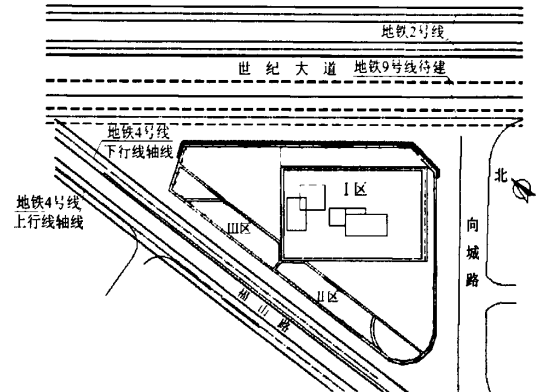


图1 基坑地理位置图

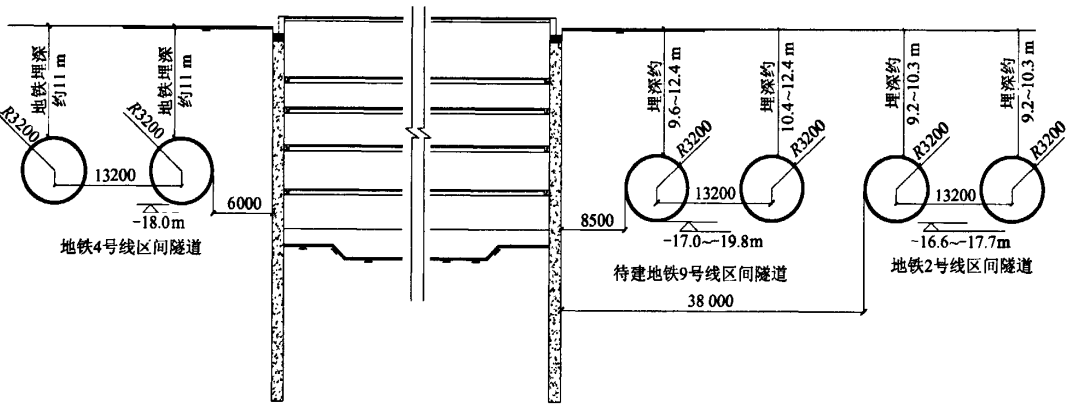


图2 基坑与地铁区间隧道关系剖面示意图(单位:mm)

## 3 回灌试验

### 3.1 回灌试验目的

坑内减压降水的同时,在基坑外侧进行人工回灌,同时观测坑外承压水位的变化情况,了解回灌效果,并测定单井回灌流量。

### 3.2 回灌井布设

结合本工程特点,本工程地下水人工回灌的目的层为第⑦层承压含水层。针对本工程的环境保护对象及其保护要求,在福山路侧和世纪大道侧共布置7口回灌井(见图3),其中世纪大道侧3口,福山路侧4口。回灌井深37.00m,过滤器长7.20m,采用双层缠丝贴砾过滤器(见图4),过滤管外径325mm,内径219mm,夹层中装满砾料。

### 3.3 回灌水源

人工回灌水源进入地下,可能引起含水层水质

变化,使地下水水质恶化,为防止地下水污染,回灌水质必须满足一定的要求。本工程回灌水源采用场地内自来水,自来水出管压力在0.15MPa左右,阀门开至最大时流量为14.81m<sup>3</sup>/h。

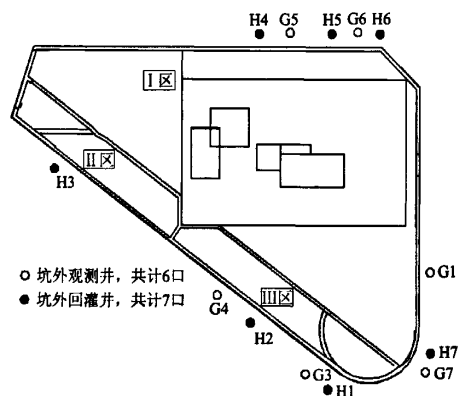


图3 回灌井平面布置示意图

### 3.4 试验过程及分析

回灌试验分别在福山路侧和世纪大道侧进行。对福山路侧 H1 进行单井回灌,观测 G2、H2 水位变化情况;对世纪大道侧 H4、H6 同时进行回灌,观测 G6 水位变化情况。

试验阶段,现场正在进行基坑第五道支撑挖土,基坑内共有 9 口减压降水井运行;试验前,坑内外水位基本达到稳定状态。

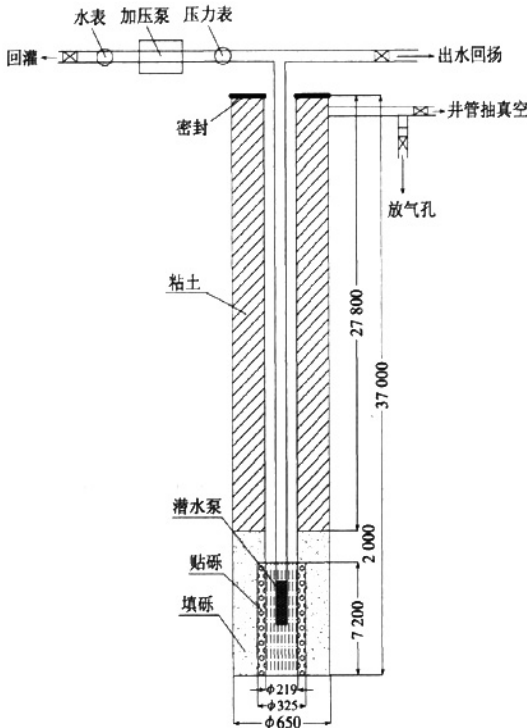


图 4 回灌井结构剖面示意图(单位:mm)

#### 1) 福山路侧 H1 回灌

回灌井 H1 回灌 16 h,回灌过程流量较稳定,回灌总量达到 67.12 m<sup>3</sup>,平均每小时回灌流量达到 4.2 m<sup>3</sup>/h,见图 5。H1 回灌时,对靠近回灌井 H1 的 H2 和 G2 水位进行观测。H2 水位回灌前稳定在-12.86 m 左右,回灌 10 h 左右后,水位达到-12.42 m,水位上升 44 cm,趋于稳定;G2 水位回灌前稳定在-12.08 m 左右,回灌 10 h 左右后,水位达到-11.73 m,水位上升 35 cm,趋于稳定,见图 6。

#### 2) 世纪大道侧 H4、H6 回灌

回灌井 H4、H6 回灌 15 h,回灌过程流量基本稳定,H4 回灌总流量达到 26.0 m<sup>3</sup>,平均回灌流量 1.74 m<sup>3</sup>/h,H6 回灌总流量达到 34.5 m<sup>3</sup>,平均回灌流量 2.33 m<sup>3</sup>/h,见图 7。

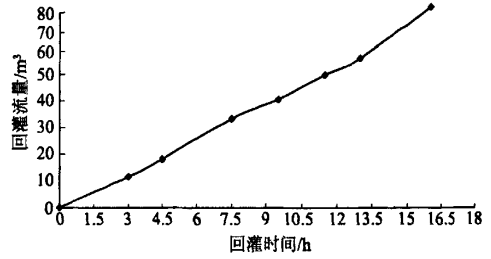


图 5 H1 回灌总流量-时间变化曲线

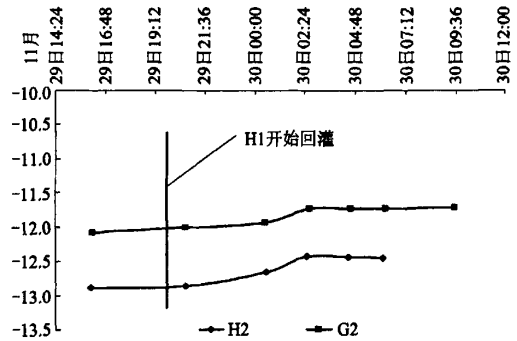


图 6 H1 回灌,H2、G2 水位变化曲线

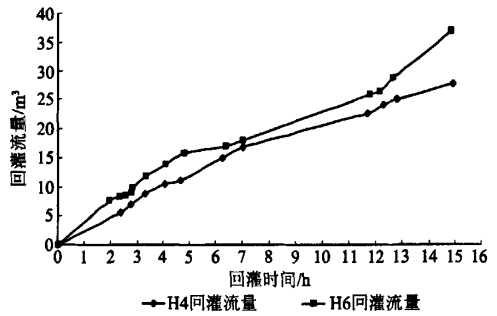


图 7 H4、H6 回灌总流量-时间变化曲线

H4、H6 回灌时,对 G6 水位进行观测。G6 水位回灌前稳定在-14.48 m 左右,回灌 6 h 左右后,水位达到-14.102 m,水位上升 37.8 cm,趋于稳定,见图 8。

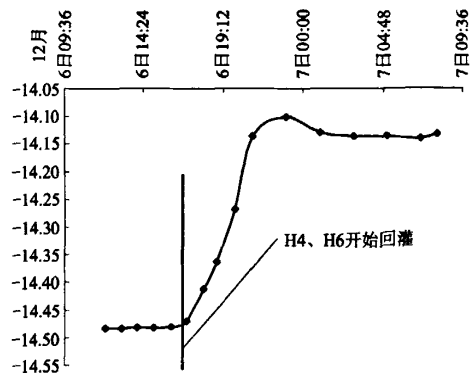


图 8 H4、H6 回灌,G6 水位变化曲线

## 4 数值模拟

### 4.1 地下水运动数学模型

以连续性原理和达西定律为基础,结合该工程的水文地质条件,建立了三维非稳定流数学模型<sup>[2-3]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \frac{\partial h}{\partial z}\right) - W = \frac{E}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (x, y, z) \in \Omega \quad (1)$$

$$h(x, y, z, t) \Big|_{t=0} = h_0(x, y, z) \quad (x, y, z) \in \Omega \quad (2)$$

$$h(x, y, z, t) \Big|_{\Gamma_1} = h_1(x, y, z, t) \quad (x, y, z) \in \Gamma_1 \quad (3)$$

$$\text{式中, } E = \begin{cases} S \\ S_y \end{cases} \quad T = \begin{cases} M \\ B \end{cases} \quad S_s = \frac{S}{M}$$

式中: $S$ 为承压含水层储水系数; $S_y$ 为潜水含水层给水度; $M$ 为承压含水层单元体厚度, $m$ ;  $B$ 为潜水含水层单元体饱和厚度, $m$ ;  $k_x, k_y, k_z$ 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, $m$ ;  $W$ 为源汇项, $1/d$ ;  $h_0$ 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, $1/m$ ;  $t$ 为时间, $d$ ;  $\Omega$ 为计算域;  $\Gamma_1$ 为第一类边界。

### 4.2 地下水人工回灌预测

上述模型采用有限差分法求解,并采用共轭梯度法(PCG)联立迭代求解代数方程组。模型的平面尺度为 $600\text{ m} \times 500\text{ m}$ ,总的垂向深度为 $150\text{ m}$ ,四周均按第一类边界条件处理。根据研究区的实际水文地质结构条件及几何形状,对研究区进行三维剖分。根据研究区水文地质特性及围护结构地下墙插入深度等,水平方向将其剖分为 $124$ 行、 $125$ 列,垂向将其剖分为 $10$ 层。立体剖分图见图9。将上述试验结果设置在数学模型中,经识别验证后,以基坑内承压水位能满足基坑大底板开挖要求为基础,以4种方案预测。

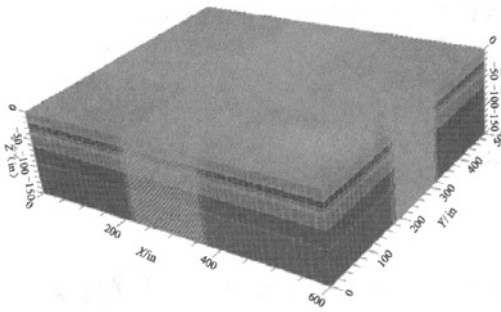


图9 网格立体剖分图

第一种方案:无回灌条件下减压降水引起的承压水位埋深预测,减压降水10天后承压水位埋深等

值线图见图10。

第二种方案:7口井回灌条件下减压降水引起的承压水位埋深预测,减压降水10天后承压水位埋深等值线图见图11。

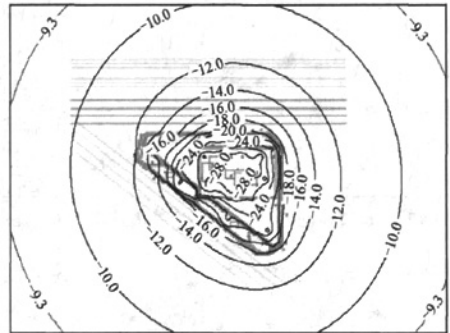


图10 无回灌条件下计算等值线图(单位:m)

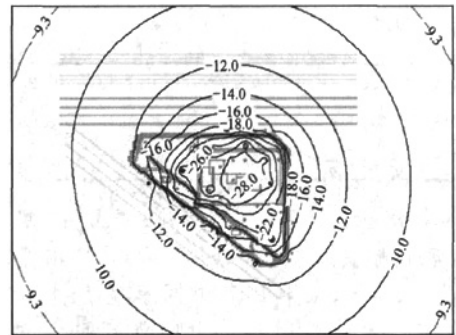


图11 7口井回灌条件下计算等值线图(单位:m)

第三种方案:12口井回灌条件下减压降水引起的承压水位埋深预测,其中世纪大道一侧6口回灌井,福山路一侧5口回灌井,向城路一侧1口回灌井。减压降水10天后承压水位埋深等值线图见图12。

第四种方案:16口井回灌条件下减压降水引起的承压水位埋深预测,其中世纪大道一侧8口回灌井,福山路一侧7口回灌井,向城路一侧1口回灌井。减压降水10天后承压水位埋深等值线图见图13。

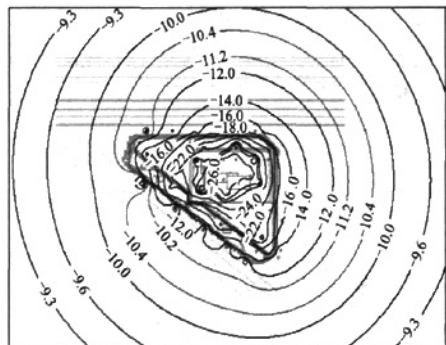
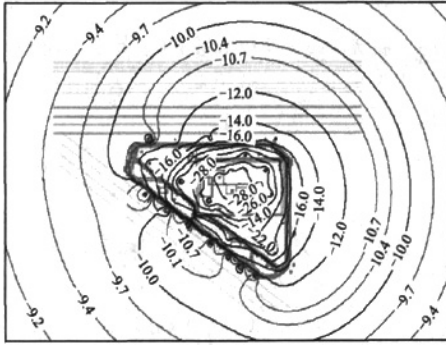


图12 12口井回灌条件下计算等值线图(单位:m)



13 16口井回灌条件下计算等值线图(单位:m)

采用不同的回灌方案进行人工地下水回灌,其回灌效果见表1。

表1 回灌效果对比表

位置	(承压水位埋深预测值/水位回升值)/m			
	方案一 无回灌	方案二 7口井回灌	方案三 12口井回灌	方案四 16口井回灌
4号线	-15.80	-14.50/1.30	-13.30/2.50	-11.20/4.60
9号线	-19.00	-17.70/1.30	-16.50/2.50	-15.00/4.00
2号线	-13.50	-13.00/0.50	-12.00/1.50	-11.80/1.70

计算表明,回灌效果与单井回灌水量、回灌井数量密切相关。采用7口井回灌,承压水位回升值可达1.30m;采用12口井回灌,承压水位回升值可达2.50m;采用16口井回灌,承压水位回升值可达4.60m。

(上接第125页)

进行充分分析的基础上建立的,是能够全面反映盾构隧道结构受力特点的、并综合考虑使用功能的评估指标体系,具有一定的科学性和系统性。

2)该评估方法将定性分析以定量的形式表现出来,将不精确的表达和处理数字化,使评估过程更趋科学化。

3)该指标体系的建立及相应评估方法的运用,具有很强的理论性和实用性,它为建立科学合理的评估模型提供思路,不但可以用于地铁结构系统的安全评估,还可以广泛地用于其它工程之中。

#### 参考文献

- [1] 王山,等. 地铁安全评价研究[J]. 华北科技学院学报, 2006, 3(1): 1-3.
- [2] 房春光,方引晴. 城市地下工程安全性问题分析及病害防治方法[J]. 广东工业大学学报, 2001, 18(3): 1-5.
- [3] 叶耀东,朱合华,王如路. 软土地铁运营隧道病害现

## 5 结论

1)通过回灌试验知,单井回灌引起的基坑外承压水位回升值可达0.44m,表明人工回灌地下水对承压水位控制具有一定的效果。

2)在有止水帷幕的情况下,回灌井深度应不超过止水帷幕底部,使得进入基坑内的回灌水量尽量少。

3)因回灌并成井结束后的间隙时间较短,井管外止水封闭层尚未充分密实,且回灌井深度较浅,井管外止水封闭层垂向厚度小,因此回灌试验采用常压回灌,以避免井管外水或泥水混合物喷出地面。

4)数值模拟结果表明,坑内减压降水,在有止水帷幕的情况下,坑外设置回灌井可以减小坑外承压水位的降幅,回灌效果与单井回灌水量、回灌井数量密切相关。

#### 参考文献

- [1] 李文广,胡长明. 深基坑降水引起的地面沉降预测[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 24(1): 181-184.
- [2] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京:水利电力出版社, 1990.
- [3] 骆祖江,李朗,等. 复合含水层地区深基坑降水三维渗流场数值模拟[J]. 工程地质学报, 2006, 14(1): 72-77.

收稿日期:2010-03-11

状及成因分析[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(1): 157-166.

- [4] 陈勇,朱继文. 上海地铁区间隧道渗漏水发生的机理与防治[J]. 地下空间, 2001, 21(1): 55-61.
- [5] 郑永来,潘杰,韩文星. 软土地铁隧道沉降分析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(1): 67-74.
- [6] 庄丽,张银屏. 软土地层盾构隧道渗水量与沉降关系的模拟分析[J]. 中国建筑防水, 2006(6): 13-15.
- [7] 王如路,刘建航. 上海地铁长期运营中纵向变形的监测与研究[J]. 地下工程与隧道, 2001(4): 6-11.
- [8] 张琳琳. 重大水工混凝土结构健康诊断综合分析理论和方法[D]. 南京: 河海大学, 2003: 35-38.
- [9] 罗鑫. 公路隧道健康状态诊断及系统的研究[D]. 上海: 同济大学, 2007: 52-57.
- [10] 王岩,黄宏伟. 地铁区间隧道安全评估的层次一模糊综合评判法[J]. 地下空间, 2004, 9(3): 1-4.

收稿日期:2010-03-31