

降水开挖引起地面沉降的控制措施分析

刘帅君,张扬清

上海交通大学土木工程系,上海 200240

摘要: 复杂城市环境条件下深大基坑工程降排水所引发的地面沉降问题日益突出,针对地面沉降的控制措施已引起普遍关注。本文采用考虑饱和土流固耦合的有限元方法建立深基坑工程的二维分析模型,模拟深基坑施工的降水开挖过程,研究深厚承压含水层中止水帷幕深度和坑外地下水回灌等措施对地面沉降的影响规律。结果表明,加深止水帷幕和加大回灌量均可以有效地减小基坑外的水位变化,控制降水开挖引发的坑外地面沉降。止水帷幕深度超过抽水井深度 10 m 时,止水帷幕的控制作用最优;回灌量至少达到抽水量 1/5,回灌才会对地面沉降有较明显的影响。

关键词: 降水开挖;地面沉降;控制措施

中图分类号: P642.26

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2016)05-0760-05

Analysis on the Measures Controlling the Ground Settlement Induced by Rainfall and Excavation

LIU Shuai-jun, ZHANG Yang-qing

Department of Civil Engineering/Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract: As environmental impact induced by deep excavation and drainage in complex urban condition gets increasing attention, ground surface settlement controlling has been a hot study area. This paper mainly focused on impacts caused by various sealing curtain depth in the confined aquifer and groundwater recharge outside the excavation. To analysis the overall excavation process, a two dimensional numerical model which took fluid-solid coupling mechanics into consideration was adopted in this paper. The numerical calculation indicated that a deeper sealing curtain and a larger groundwater recharge volume would result in an effective controlling for ground surface settlement. To be specific, a 10 m-sealing curtain and a recharge quantity which equaled 20% of the pump-out would minimize the environmental impact.

Keywords: Rainfall and excavation; ground settlement; control measures

在大规模的地下空间开发过程中,深基坑施工中浅层地下水抽水所导致的土层压缩变形已成为地面沉降的主要影响因素,加剧了区域地面沉降的发展。工程经验和监测数据表明,深基坑开挖卸荷引起的临近土体沉降影响范围通常为 2~4 倍开挖深度^[1],但承压水减压降水引起的周边地面沉降影响范围可达 10~15 倍开挖深度以上^[2]。大量研究结果也表明,承压水的降压抽水是基坑施工过程引起地面沉降的主要因素^[3,4],在深厚承压含水层采用悬挂式止水帷幕时尤为突出^[5]。

为了降低基坑减压降水带来的不利影响,国内外学者已提出多种控制方法优化基坑降水方案从而控制地面沉降的方法^[6,7]。采用间歇性降水方案也可以一定程度上减小地面沉降^[8]。悬挂式止水帷幕也会影响基坑外水位降深,减小地面沉降^[9]。地下水回灌也对地面沉降有比较显著的控制作用^[10],另外分仓降水也可以减小地面沉降^[11]。工程实践中,合理设置止水帷幕和适度进行地下水回灌是较为常用的控制措施,但目前对相关措施的作用规律、实施效果及优化分析的研究较少。本文针对深厚承压含水层中的深基坑降水开挖问题,对不同止水帷幕深度和不同回灌量条件下的施工过程进行数值模拟,研究不同控制措施对地面沉降的影响规律,分析其作用机理和控制效果。

1 工程概况

大定海泵站基坑工程位于上海市杨浦区杨树浦路南侧、平定路西侧、黄浦江北岸,泵房距黄浦江规划黄浦江岸线约 70 m,占地近 4730 m²,泵站出入口接向平定路。

泵站主体结构平面形状接近矩形,总长 56.4 m,总宽 38.4~43.2 m,底板标高一般为-16.10 m,局部落段底板标高-17.7 m 或-19.90 m。泵站及调蓄池合建构筑物采用厚 1000 mm、深 36 m 或 43 m 地下连续墙作为基坑围护。

收稿日期: 2015-01-16

修回日期: 2015-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372282)

作者简介: 刘帅君(1989-),男,硕士研究生,研究方向桩基工程与岩土工程数值分析。E-mail:lsjsjtu@sju.edu.cn

本工程场地内地势较为平坦,勘察期间勘探孔地面标高一般在+3.62~+4.90 m,为滨海平原地貌。本次勘察揭示场地内为正常沉积区,在 55 m 深度范围内主要由饱和粘性土和粉性土组成,按其成因可分为 9 层。

根据基坑开挖深度,深基坑开挖到达⑤₁层中下部,而地下连续墙进入⑦₂层上部,未隔断⑦层承压水,对降水不利。

2 数值分析模型

基于上海地区大定海泵房的基坑开挖工程实例,根据 Biot 固结理论及流固耦合理论,采用考虑饱和土流固耦合特征的有限元方法建立深基坑工程的二维分析模型,分别采用“生死”单元和节点渗流量控制^[12]来模拟基坑开挖和降水过程。基于该模型,分别对不同止水帷幕深度条件和不同回灌量条件下的基坑降水开挖进行数值分析,探讨止水帷幕深度和回灌量对地面沉降的影响作用。

数值分析模型采用平面应变模型进行模拟,计算总体模型水平方向取 340 m,计算宽度为基坑开挖深度的 15 倍;模型竖直方向取 80 m,为开挖深度的 4 倍。据估算,承压水井点降水影响半径约为 75.09 m,模型的尺寸也充分考虑到承压水降水对周围土体扰动的影响。

基坑降水开挖的示意图如图 1 所示,基坑开挖深度为 20 m,宽度为 80 m。基坑采用连续墙加钢支撑的围护体系,连续墙宽为 1 m,共设 7 道支撑。 D 为承压含水层厚度, D_2 为止水连续墙插入承压含水层的深度, D_3 为抽水井插入承压含水层的深度,抽水井深度为 38 m。

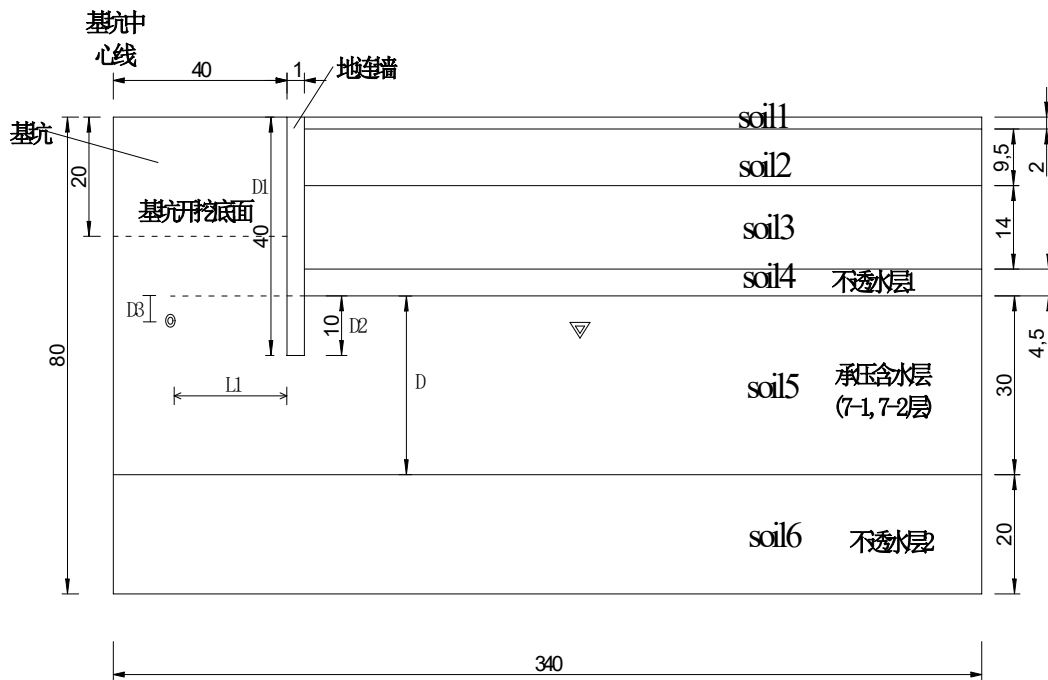


图 1 基坑降水开挖的示意图
Fig.1 Sketch of foundation excavation

实际施工中土体中布设了多级梯次的降水井,对降水的模拟采用流量控制的方法,即在降水深度处某个节点施加一个流量荷载。潜水层疏干降水,每一级降水抽水时间为 3 d,降水后水位降至该级开挖面以下;承压水降水为减压降水,抽水时间为 5 d,抽水流量为 400 t/d。

土体采用带孔压的平行四边形单元 (CPE4P) 模拟,连续墙采用平行四边形单元 (CPE4) 模拟,支撑采用梁单元 (Beam) 模拟,土体与连续墙接触设置接触面。模型底部采用固定约束,左右两侧则采用水平约束。

基坑内土体开挖以及架设支撑都采用单元生死法模拟,每开挖一步就杀死该步所移除的土体,并且激活需要架设的支撑。

土体的 MCC 模型可以合理地连续墙的变形和连续墙后土体的变形情况^[13],所以本文采用 MCC

模型。结合上海地区的典型土层分布，参考文献[14]的分析结果，土层计算参数选取如表 1 所示。

表 1 土层计算参数

Table 1 Parameters of soil layers

土层 Soil layers	厚度 h/m Thickness	重度 $\gamma/(KN/m^3)$ Density	孔隙比 Void ratio	渗透系数/(m/s) Permeability coefficient		λ	k	M
				K_v	K_h			
Soil1	2.0	18.5	1.035	2.11×10^{-9}	3.30×10^{-9}	0.1177	0.0098	1.29
Soil2	9.5	17.4	1.338	1.22×10^{-8}	2.21×10^{-8}	0.1005	0.0084	1.16
Soil3	14.0	17.3	1.397	1.35×10^{-9}	2.57×10^{-9}	0.1081	0.0100	0.69
Soil4	4.5	19.3	0.850	2.31×10^{-9}	3.48×10^{-9}	0.0721	0.0068	1.20
Soil5	30.0	18.9	0.899	2.90×10^{-6}	4.52×10^{-6}	0.0670	0.0058	1.33
Soil6	20.0	19.1	0.890	1.49×10^{-9}	3.05×10^{-9}	0.1063	0.0088	0.90

3 止水帷幕深度的影响分析

如图 1 所示，定义隔断比 R 为地连墙插入承压含水层的深度 D_2 与承压含水层的总厚度的比值，地下水的止水条件用隔断比来表示。针对不同止水帷幕深度，分别取隔断比 R 为 2/6、3/6、4/6、5/6 和 6/6（即完全隔断）五种情况进行研究。

3.1 止水帷幕深度对地下水水位的影响

基坑外的承压水层顶部的水位沿水平方向的分布如图 2 所示。由图可见，最低水位随着隔断比增大而逐步上升，即连续墙对渗流场的阻隔作用更好，基坑坑内减压降水对抗外水位的影响越小。这主要是因为加大止水帷幕深度能减小承压含水层中的过水断面，增大了坑内外地下水渗流的绕流路径，从而控制承压含水层的渗流，减小基坑外地下水对基坑内地下水的补给，进而减小基坑降水对抗外水头的影响。

3.2 止水帷幕深度对地面沉降的影响

不同止水条件下坑外地面沉降的分布曲线如图 3。当 $R=2/6$ 时，隔断比最小，基坑外地面的最大沉降为 28.978 mm；当 $R=6/6$ 时，止水帷幕完全隔断承压含水层，基坑外的地面最大沉降为 18.770 mm。

不同止水帷幕深度时的基坑外 100 m 处的地面沉降依次为 12.679 mm、11.888 mm、11.577 mm、9.459 mm 和 7.853 mm，连续墙越深，沉降越小。连续墙完全隔断时基坑外 100 m 处的沉降量约为连续墙隔断比 $R=2/6$ 时的 60%，而且承压水层完全隔断时，地面沉降 3 mm 的位置对应在基坑外约 170 m 处，隔断比最小（ $R=2/6$ ）时，地面沉降 3 mm 的位置对应在基坑外约 215 m 处。

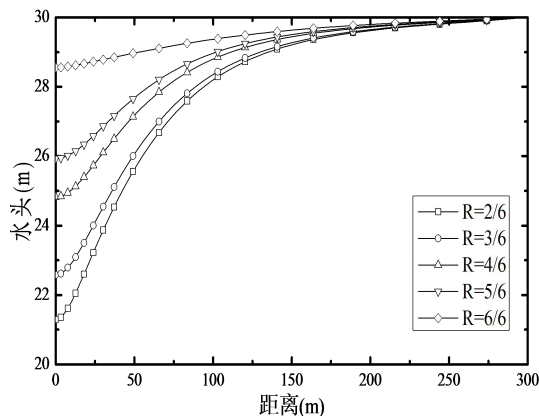


图 2 基坑外承压含水层水位沿水平方向分布

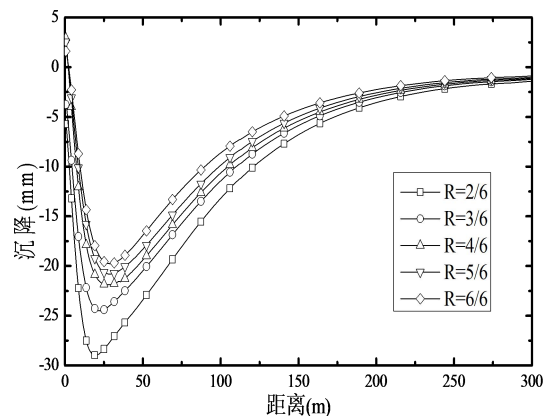


图 3 地面沉降分布曲线

Fig.2 Horizontal distribution curves of water level outside pit Fig.3 Distribution curves of ground settlement

最大沉降随止水帷幕深度变化图如图 4 所示，由图可见，止水帷幕越深，基坑外的水位变化越小，基坑外的地面沉降越小，而且地面沉降的影响范围也越小，加大止水帷幕深度可以有效地控制承压水降水引起的地面沉降。 R 小于 4/6 时，最大沉降随止水帷幕加深变化较明显， R 大于 4/6，最大沉降随止水帷幕加深变化幅度很小，所以止水帷幕深度为 50 m，超过抽水井深度 12 m 时，止水

帷幕的作用效果最优。

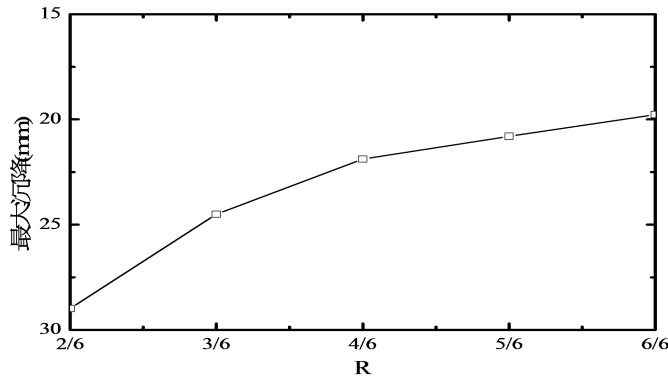


图 4 最大沉降随止水帷幕深度变化

Fig.4 Change of maximum settlement with depth of diaphragm wall

4 坑外地下水回灌的影响分析

在基坑外 20 m 处设置回灌井，回灌井深度和抽水井相同，取为 38 m，对承压水进行人工回灌。定义回灌流量与承压水抽水流量之比为 F ，分别取 F 为 0（相当于无回灌）、1/20、1/10、1/5 和 1/2 五种情况进行研究。

4.1 坑外回灌对地下水水位的影响

四种不同地下水回灌条件和无回灌时的基坑外承压水水位沿水平方向的分布图如图 5 所示。从图中可以看出，随着回灌流量的增加，基坑外承压水的孔压在增大，基坑外的承压水水位降深在减小。当回灌量达到抽水量的 1/5 时，承压水水位比无回灌时上升了 1.8 m，当回灌量达到 1/2 时，承压水水位比 $F=1/5$ 的水位上升了 2.6 m，回灌的流量越大，对承压水水位的影响幅度也越大。

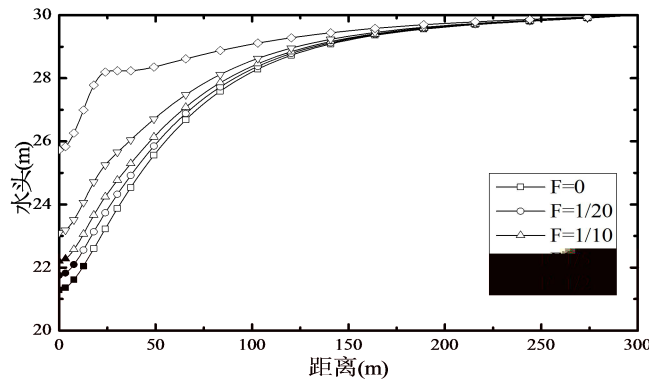


图 5 基坑外承压含水层水位沿水平方向分布

Fig.5 Horizontal distribution curves of water level outside pit

4.2 坑外回灌对地面沉降的影响

不同回灌条件下地面沉降的分布曲线如图 6 所示。当无地下水回灌时，基坑外地面的最大沉降为 28.978 mm，此时的地面沉降最大；当回灌量达到抽水流量的 1/2 时，基坑外的地面最大沉降为 22.863 mm。

不同的回灌条件下基坑外 100m 处的地面沉降如表 2 所示，回灌量越大，沉降越小，回灌抽水比为 1/2 时基坑外 100 m 处的沉降量约为无回灌时的 75%，而且回灌量最大 ($F=1/2$) 时，地面沉降 3 mm 的位置对应应在基坑外约 185 m 处，无回灌时，地面沉降 3 mm 的位置对应应在基坑外约 215 m 处。

增加地下水回灌也会减小基坑外的水位变化，从而控制基坑外的地面沉降，回灌流量越大，地面沉降越小。当 F 小于 1/5 时，回灌对地面沉降的影响不明显，当 F 大于 1/5 时，尤其是回灌量达到抽水量的一半时，回灌可以显著地减小地面沉降量。

表 2 基坑外 100 m 处的地面沉降
Table 2 Ground settlement at 100 m outside pit

回灌量 Recharge amount	$F=0$	$F=1/20$	$F=1/10$	$F=1/5$	$F=1/2$
地面沉降/mm	12.679	12.324	11.970	11.267	9.184

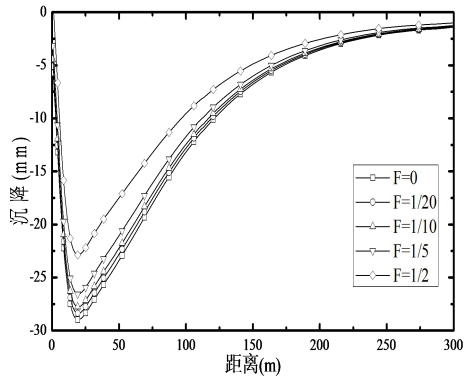


图 6 地面沉降分布曲线

Fig.6 Distribution curves of ground settlement

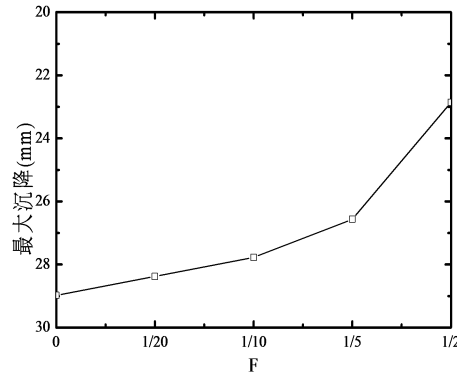


图 7 最大沉降随回灌量变化图

Fig.7 Change of maximum settlement with recharge amount

5 结论

本文采用考虑流固耦合的数值模拟方法,研究了止水帷幕和坑外回灌对地面沉降的影响进行研究,得到如下结论:

(1) 止水帷幕对承压含水层的止水作用会影响承压水的渗流,止水帷幕隔断越深基坑外的水位变化越小,地面沉降越小,影响范围也越小。在深厚承压含水层中,当止水帷幕无法完全隔断坑内外水力联系时,应至少保证止水帷幕深度超过抽水井深度 10 m 以上。

(2) 坑外回灌可控制回灌点以外的地下水头下降量,在基坑周边较小范围内形成局部的渗流场平衡,从而减小地面沉降,减弱地面沉降的影响范围;回灌流量越大,地面沉降会越小。回灌量达到 1/5 的抽水量时,回灌才会对地面沉降有明显的控制作用,回灌量达到抽水量 1/2 时,回灌对地面沉降的控制效果较好。

参考文献

[1] 丁勇春,王建华,徐中华,等.上海软土地区某深基坑施工监测分析[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,2007,39(3):333-338

[2] 龚士良,叶为民,陈洪胜,等.上海市深基坑工程地面沉降评估理论与方法[J].中国地质灾害与防治学报,2008,19(4):55-60

[3] 陈洪胜,陈宝,贺翀.上海深基坑工程地面沉降危险性分级[J].地下空间与工程学报,2009,5(4):829-833

[4] 叶为民,万敏,陈宝,等.深基坑承压含水层降水对地面沉降的影响[J].地下空间与工程学报,2009,5(S2):1799-1805

[5] 周火焱,王华钦,张维泉.悬挂式止水在基坑工程中的应用[J].岩土工程学报,2012,34(S1):471-473

[6] 张莲花,孔德坊.沉降变形控制的基坑降水最优化方法及应用[J].岩土工程学报,2005,27(10):1171-1174

[7] Luo ZJ, Zhang YY, Wu YX. Finite element numerical simulation of three-dimensional seepage control for deep foundation pit dewatering[J]. Journal of Hydrodynamics, 2008,20(5):596-602

[8] Wilson AM, Gorelick S. The effects of pulsed pumping on land subsidence in the Santa Clara Valley, California[J]. Journal of Hydrology, 1996,174(3):375-396

[9] 陈新国.悬挂式止水帷幕对基坑降水影响的定量研究[D].北京:中国地质大学,2007

[10] 瞿成松,陈蔚,黄雨.人工回灌控制基坑工程地面沉降的数值模拟[J].中国海洋大学学报:自然科学版,2011,41(6):87-92

[11] 刘运生.深大型基坑降水引起地铁隧道沉降的控制措施分析[J].土工基础,2013,27(1):8-10

[12] 刘婧,陈锦剑,王建华.上海世博 500 kV 地下变电站降水流固耦合分析[J].上海交通大学学报,2010,44(6):721-725

[13] 徐中华,王卫东.敏感环境下基坑数值分析中土体本构模型的选择[J].岩土力学,2010,31(1):258-264

[14] 徐中华.上海地区支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形形状研究[D].上海:上海交通大学,2007