

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.08.014

深基坑悬挂止水帷幕结合回灌对 控制沉降数值模拟分析

汪鹏程, 吴云涛, 徐永恺

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:悬挂式止水帷幕不能完全阻隔基坑内外水力联系,此时基坑周边环境难免受到基坑降水的影响;当深基坑内降水程度较大时,为保证周边建筑安全,悬挂式止水帷幕结合坑外回灌的方案开始被用于实际工程中。文章以某深基坑工程实例为依托,利用有限差分软件 FLAC3D 对基坑降水工程进行数值模拟,对悬挂式止水帷幕条件下深基坑工程降水与回灌过程中的水位变化与地表沉降进行分析。研究表明,止水帷幕结合回灌的方案能够大幅减小基坑外水头降深,有效控制基坑外的地表沉降发展,对比未设置止水帷幕和回灌措施的降水方案,水头降深和地表沉降控制率可达 80% 以上。合理排布回灌井位置,尽早启动回灌井回灌,可使沉降控制效果最优化。

关键词:承压水;止水帷幕;回灌;群井降水;地表沉降

中图分类号:TU463

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2023)08-1097-06

Numerical simulation analysis on settlement control by recharge in deep foundation pit with suspended waterproof curtain

WANG Pengcheng, WU Yuntao, XU Yongkai

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The suspended waterproof curtain cannot completely cut off the hydraulic connection inside and outside the foundation pit. If the degree of dewatering inside the foundation pit is large, the surrounding environment will still be affected. To ensure the safety of surrounding buildings, the scheme of suspended waterproof curtain combined with recharge has been used in practical projects. Aiming at a deep foundation pit project, the finite difference software FLAC3D was used to conduct numerical simulation, the laws of water head and ground settlement outside the foundation pit were obtained under the action of suspended waterproof curtain combined with recharge. Results show that the scheme of suspended waterproof curtain combined with recharge can greatly reduce the drawdown of water head and effectively control the development of ground settlement outside the foundation pit. Compared with the scheme without suspended waterproof curtain and recharge, the control rate of water head drawdown and ground settlement can reach 80%. Besides, the effect of settlement control can be optimized by arranging the recharge well position reasonably and starting the recharge well as soon as possible.

Key words: confined aquifer; waterproof curtain; recharge; group wells dewatering; ground settlement

近几十年,随着地下空间开发的不断发展,基坑开挖深度迅速增加。沿海地区地下水位高,土层

中常埋藏着不同深度的承压含水层,对各深大基坑工程具有重要影响。在含高承压水头的深基坑开

收稿日期:2022-06-10;修回日期:2022-08-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51579063)

作者简介:汪鹏程(1968—),男,安徽桐城人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师。

挖过程中,基坑底板经受不住高承压水头产生的顶托力引发诸如坑底突涌、流砂、管涌等工程事故不断涌现,这一现象随着深大基坑开挖时承压含水层上覆土压力的减小而更为明显^[1-2]。为防止此类问题发生,往往需要在基坑开挖前对承压含水层进行降压处理,但已有诸多研究发现,承压含水层在降低水头的同时会引起地表发生沉降,影响周边环境安全^[3-5]。对此,实际工程中常设置止水帷幕来阻隔基坑内外的水力联系以达到减小坑外地表沉降的效果,实践证明效果良好^[6-7]。在中国沿海地区,承压含水层厚度较大,埋深较深,若全部截断含水层则会导致工程造价昂贵,因此工程中多采用悬挂式止水帷幕^[8]。但悬挂式止水帷幕不能完全阻隔坑内外水力联系,当基坑内降水幅度较大时,周边环境仍会受到基坑降水的影响产生一定的沉降。回灌是基坑降水工程中用于抬高承压含水层水位,控制地表沉降,保护周边建筑的技术,实践已证明了回灌的可行性^[9-10]。因此,为更好地保护周边建筑物安全,在设置悬挂式止水帷幕的基础上结合人工回灌来控制深基坑降水对周边建筑物产生的不良影响开始被用于实际工程中^[11]。目前,关于止水帷幕或回灌控制沉降的理论和实践的研究已经较为成熟,但针对悬挂式止水帷幕结合回灌控制沉降的效应方面研究仍然较少,且多数以现场试验的监测为主,监测对象多为降水后的水位变化,尚未对地表沉降效应方面进行深入研究。

本文以某深基坑工程为案例,通过有限差分数值模拟方法,利用 FLAC3D 软件模拟悬挂式止水帷幕结合回灌作用下,深基坑降水引起承压层的水位变化和地表沉降发展规律,并对不同方案进行对比,分析悬挂式止水帷幕结合回灌对沉降控制的效果,以期优化基坑抽水方案提供一定参考。

1 工程概述

1.1 深基坑设计方案

某工程拟开挖 $50\text{ m} \times 50\text{ m} \times 12\text{ m}$ 的深基坑,经勘测,基坑底下存在含有高水头的承压含水层。为保证开挖过程中的安全,需在开挖前对基坑底部的承压层进行降压处理。基坑内采用群井降水,现场设置有 9 口 23 m 深的抽水井(标记为 P1~P9),预期将基坑底部承压含水层的水头降低 15 m 。基坑东侧为房屋住宅区,距离基坑的垂直距离约为 20 m ;基坑北侧为城区道路,距离基坑的垂直距离为 $18\sim 22\text{ m}$ 。为了研究降水引起住宅区和城区道路的地表沉降规律,在其周边设有 9 个监测点(标

记为 B1~B9),用于记录观测点的地表沉降和水位变化,工程平面及监测点布置如图 1 所示。

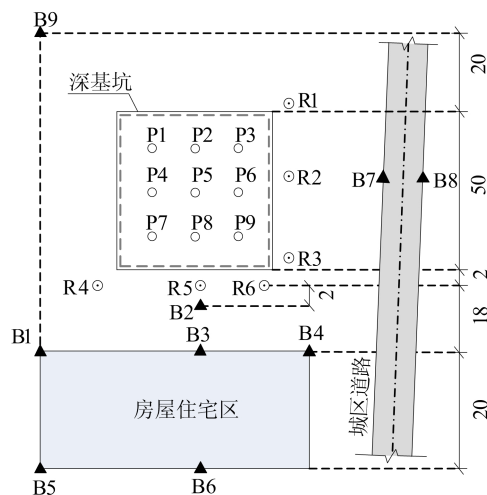


图 1 工程平面及监测点布置

为防止基坑东侧和北侧的住宅区及道路发生大范围沉降,拟在基坑四周设置悬挂式止水帷幕,用于阻隔基坑内外的水力联系,本文采用 $1\ 000\text{ mm}$ 厚的地下连续墙兼做止水帷幕,深约 35 m ;水平支撑系统采用 3 道支撑设计方案:第 1 道水平支撑采用规格为 $800\text{ mm} \times 900\text{ mm}$ 的钢筋混凝土支撑体系,距离地表约为 2 m ;第 2 道和第 3 道均采用 $\phi 609\text{ mm}$ 、壁厚 18 mm 的钢支撑,分别位于地表以下 6 m 、 10 m 左右。基坑外设有 6 口 23 m 深的回灌井(标记为 R1~R6),井的滤网均位于承压含水层中,具体地层和基坑结构剖面如图 2 所示。

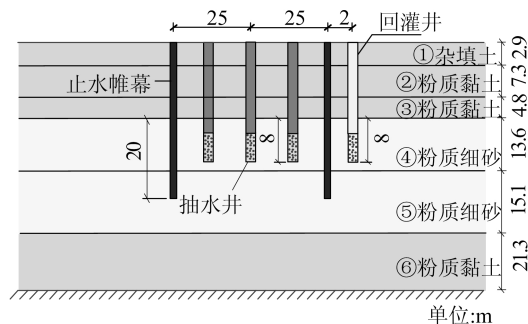


图 2 地层与基坑结构剖面

1.2 深基坑设计方案

根据岩土工程勘察报告,场地样貌为 II 级阶地,地面平坦,地质较为稳定,土体物理、力学参数见表 1 所列。勘探期间测得地下水埋深约 15 m ,高出承压含水层顶板约 18 m ,地下水位年变化幅度为 $0.6\sim 0.8\text{ m}$ 。

表 1 基坑工程的土层情况

地层	厚度/m	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	密度/(kg/m ³)	渗透系数/(m/d)
① 杂填土	2.9	36.58	0.38	13	12	1 760	22.000
② 粉质黏土	7.3	43.23	0.30	35	18	1 850	1.800
③ 粉质黏土	4.8	83.51	0.28	42	13	1 620	0.001
④ 粉质细砂	13.6	120.20	0.30	8	31	1 940	25.000
⑤ 粉质细砂	15.1	150.37	0.38	30	35	2 250	3.600
⑥ 粉质黏土	21.3	83.51	0.28	51	17	1 730	0.001

2 三维有限差分数值模拟

2.1 模型的建立

选取上述案例作为工程背景,本文使用有限差分软件 FLAC3D 对深基坑降水进行三维数值模拟,分析悬挂式止水帷幕结合回灌对地表沉降的控制效果。根据经验公式求得基坑降水的影响半径,模型尺寸选取为 500 m×500 m×65 m,模型降水中心的区域采用小网格划分,较远区域采用网格放射增大划分,其中模型主体部分如图 3 所示。模型计算采用耦合数值方法,本构模型选用摩尔-库伦,渗流模型选用各向同性,利用 Biot 固结理论考虑流体-力学相互耦合作用,土层参数见表 1。

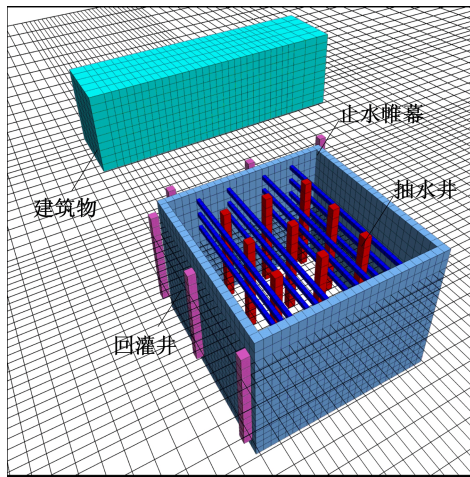


图 3 三维数值模型

2.2 边界条件

模型侧边界为定水头补给,承压含水层无越流补给,基坑降水影响半径外的土体变形和承压含水层水位未受中心降水影响,模型设有如下边界条件:模型侧面边界土体在水平方向上位移受到限制,只能在垂直方向自由移动;模型下表面土体在水平和垂直方向上位移受约束;上表面为自由边界,位移不受约束;模型侧边界使用 fix 命令固定孔压,为定水头边界;承压含水层顶板和底板

设为不透水材料,土层之间无越流补给;止水帷幕设为不透水材料,对基坑内外水力联系具有阻隔作用。

2.3 基坑抽水和回灌方案

抽水井设为井壁进水,通过 fish 语言固定降水井的井壁孔压以实现降水井恒定抽水,令抽水井的孔压自上而下为线性变化,使基坑内的水头降至目标值并达到稳态。回灌井设为井壁出水,使用 fish 语言固定回灌井的井壁孔压以实现回灌井的恒定补给,使基坑外水头变化达到稳态,并令回灌井的水头比承压层的初始水头高出 2 m,提高回灌效果。

3 结果分析

3.1 地下水位分析

若仅考虑悬挂式止水帷幕的阻隔作用,抽水井以恒定速率抽水,当承压层内的渗流达稳态后,承压层顶面的水头等值线如图 4 所示。

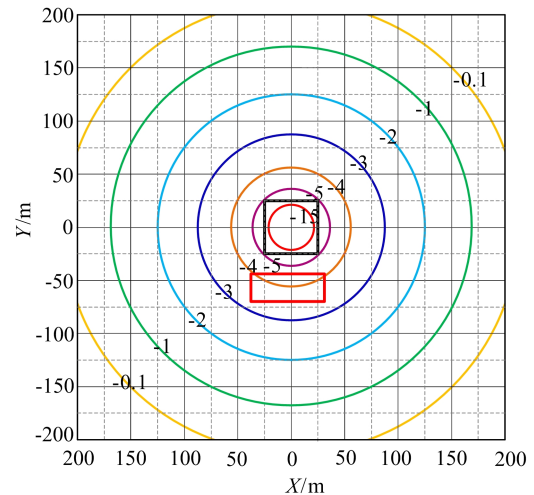


图 4 止水帷幕阻挡下的水位等值线

由于基坑内群井抽水速率恒定,基坑外地下水位的等值线图呈圆形分布并逐级递减。坑内水头降深为预期的 15 m,坑外最大水头降深为 5 m,说明悬挂式止水帷幕对坑内外水力联系具有一定

的阻隔作用。但悬挂式止水帷幕未能完全隔断坑内外的水力联系,基坑内大幅度的降水仍使坑外的水头发生较大的变化,居民楼处最大水头降深达到了4.5 m。若同时考虑悬挂式止水帷幕和回灌井的作用,承压层顶面的水头等值线如图5所示。回灌井补给速率恒定,基坑外回灌井一侧水头降深控制效果尤为明显,坑外最大水头降深为2 m,居民楼处最大水头下降也仅有1 m左右。此外,本文引入文献[12]的理论公式,验证数值模拟结果的准确性。

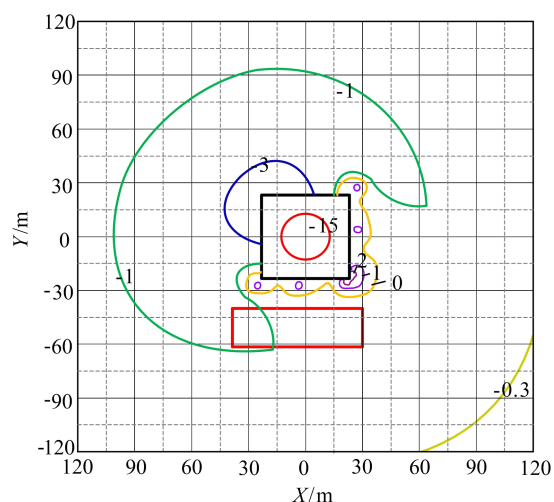


图5 止水帷幕结合回灌方案下的水位等值线

文献[12]将基坑等效为大直径承压水非完整井,假设抽水点位于承压含水层,构建一种抽水井插入深度较浅的情况下深基坑外水头的计算方法,并通过有限元计算分析验证在止水帷幕插入比 $L/M > 0.6$ 、基坑半径与承压含水层厚度之比 $r_0/M < 2.0$ 时,式(1)~式(3)具有较好的精度。

$$H_R = \frac{Q_2 \left(\ln \frac{R}{r} + f_0 \right)}{2\pi k_h M} + H_w \quad (1)$$

$$H_w = h_0 + \alpha(H - h_0) \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{2\pi M \frac{k_h}{k_v}}{2\pi M \frac{k_h}{k_v} + \frac{S}{2L} \left[\ln \frac{R}{r} + \frac{B}{L} \left(1 + \frac{LB}{Mr} \right) \right]} \quad (3)$$

其中: H_R 为基坑外距离基坑边为 R 处任一点的水头降深; H 为承压含水层初始水头; Q_2 可通过文献[13]的大井计算公式求得; H_w 为坑外井边水头; h_0 为坑内井中水头; k_v 为承压含水层的垂直渗透系数; k_h 为水平渗透系数; r 为大井半径; R 为大井的减压影响半径; M 为承压含水层厚度; S 为基坑的平面面积; L 为止水帷幕插入承压含水

层的长度; B 为下部渗流场②区厚度; f_0 为不完整井贯入度 $L/M < 1.0$ 时所引起附加阻力的局部阻抗,为无量纲值。

为了更直观地对比不同方案下水头的控制效果,绘制基坑北侧断面上承压层顶部水头的变化曲线,如图6所示。图6中:方案1在降水过程中不考虑悬挂式止水帷幕和回灌井的作用;方案2在降水过程中仅考虑悬挂式止水帷幕的阻隔作用;方案3在降水过程中同时考虑悬挂式止水帷幕和回灌井的作用。对比方案2下本文数值模拟结果和文献[12]的理论曲线,文献[12]假设抽水井抽水口在承压层顶端,减弱了实际抽水效果,因此本文模拟所求水头降深大于理论计算,但两者曲线趋势仍较一致,证明本文模型具有较好的真实度。

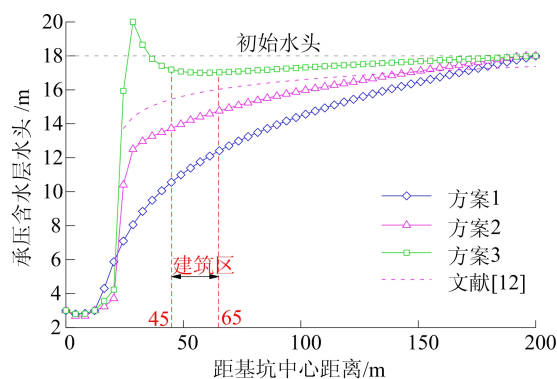


图6 不同降水方案下承压含水层水头的变化曲线

从图6可以看出,若深基坑降水过程中不考虑悬挂式止水帷幕和回灌井的作用,基坑内大幅度降水将引起基坑外承压水位发生大范围下降,严重影响周边环境的安全,因此合理选取止水方案非常重要。3种降水方案在基坑外引起的最大水头降深分别为-10、-5、-1 m,易得方案2和方案3的止水效果分别为50%、90%;3种方案在房屋住宅区处引起的最大水头降深分别为-7.5、-4.5、-0.8 m,易得方案2和方案3的止水效果分别为40.0%、89.3%。对比可知方案3的止水效果远优于方案2。因此可以得出悬挂式止水帷幕具有隔断基坑内外水力联系的作用,但当止水帷幕对承压含水层的插入比不是特别深,且基坑内降水幅度较大时,止水帷幕对基坑内外水力联系的阻隔作用有限,而止水帷幕结合人工回灌的方案能够非常有效地控制该工况下基坑外由群井抽水引起的水头下降,止水效果可达90%左右。

3.2 沉降分析

不同降水方案下基坑北侧的地表沉降变化规律如图 7 所示。从图 7 可以看出,若不考虑悬挂式止水帷幕和回灌井的作用,基坑内群井降水会引起坑外地表发生较大的沉降,影响范围甚广。受基坑降水影响,地表沉降最大值发生在基坑中心,为 16.29 mm,房屋住宅区处的最大地表沉降也达到了 11.52 mm,易对房屋结构和居住安全造成一定影响。若考虑悬挂式止水帷幕和回灌井的作用,基坑外地表沉降的发展得到了明显的控制。方案 2 中房屋住宅区处的最大地表沉降被控制在 5.69 mm,而方案 3 中房屋住宅区处的最大地表沉降仅为 2.28 mm。方案 2 和方案 3 的地表沉降曲线在离基坑中心 25 m 处左右斜率符号相反,原因是止水帷幕由混凝土灌注而成,刚度大、变形小,对其两侧土体下沉具有一定阻碍作用,并限制了基坑内的土体沉降向基坑外的发展。此外,对比方案 2 和方案 3 的地表沉降曲线,悬挂式止水帷幕的阻隔作用可有效地控制房屋住宅区处的地表沉降,平均控制效率约 47.8%,而悬挂式止水帷幕结合回灌井对沉降控制的效果则更为明显,房屋住宅区处的平均控制效率约 80.4%。说明通过悬挂式止水帷幕结合回灌井来控制由降水引起的地表沉降是可行的,且控制效果优异。

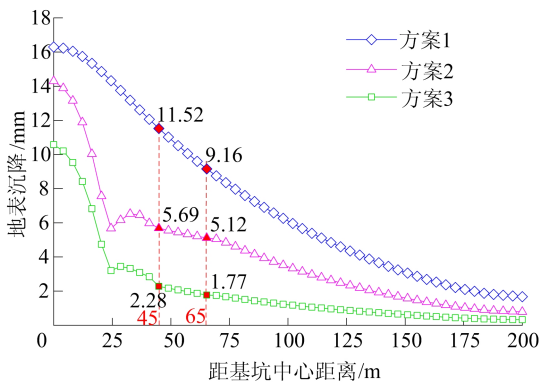


图 7 不同方案下地表沉降的变化曲线

监测点(B2~B4、B6~B8)处的地表沉降变化曲线如图 8 所示。地表沉降在前期快速发展,而后进入缓慢发展阶段。曲线中有向上隆起趋势,原因是回灌井启动晚于抽水井,在抽水井和回灌井形成平衡前,回灌井逐渐增大补给速率会使局部土层发生隆起,尤其以靠近回灌井周围的监测点最为明显。对比 B3 与 B7、B6 与 B8 的监测曲线,4 点离基坑中心的距离相近,但监测点 B3 的沉降值要小于 B7,B6 的沉降值小于 B8,原因是

房屋住宅区底部的土体在建筑物自重作用下固结度大于周围土体,故房屋住宅区的地表沉降会偏小。监测点(B1、B4、B5、B9)的地表沉降曲线如图 9 所示。

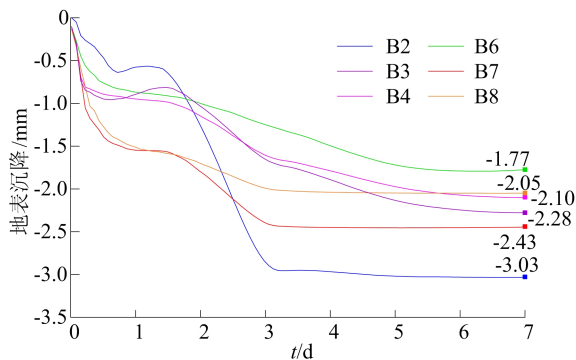


图 8 B2~B4、B6~B8 监测点的地表沉降变化曲线

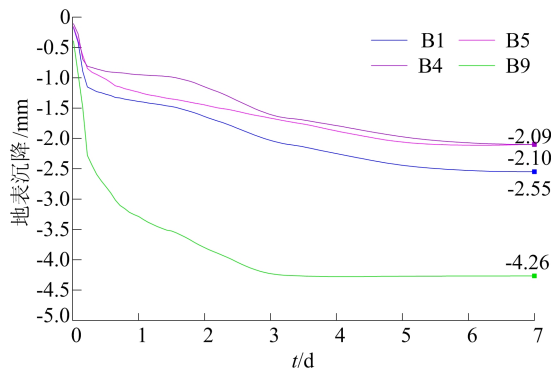


图 9 B1、B4、B5、B9 监测点的地表沉降变化曲线

各监测点的地表沉降从小到大依次为 B4、B5、B1、B9,监测点 B4 距离基坑最近但沉降最小,B1 和 B9 距离基坑中心大小相同,但监测点 B9 的沉降值最大。图 5 显示回灌井的补给水流在回灌井 R3 和 R6 附近达到最大,称作回灌补给中心,则各监测点距离回灌补给中心的大小不同,沉降控制效果差异显著,可知回灌补给中心是控制沉降的关键因素。因此实际工程中若合理排布回灌井的位置,使回灌补给中心靠近目标区域可以实现对建筑物的最佳保护效果。此外,文献[14]也指出回灌可以有效限制降水引起的建筑物沉降,但通过回灌很难抬升建筑物,无法补偿已经发生的建筑物沉降,因此工程中回灌的目的应当以维持水位为主,而不是盲目地大幅度抬升地下水位。

土层变形剖面云图如图 10 所示,土体沉降最大值发生在承压含水层的隔水顶板处,并在向地表传递中逐渐减小。此外,在基坑底部的土层深处发生隆起现象,隆起最大值发生在承压含水层

的隔水底板处。文献[15]在对承压水降压引起上覆土层沉降的分析中提出,承压含水层降压后水头降低,承压水对上覆土层的顶托力大幅下降,打破了上覆土层降水前的平衡状态,使得地层应力重新分布,这相当于在上覆土层和承压层的界面处产生了一个向下的附加作用力,从而使土体发生沉降。同理,承压层下方的土层会因上部承压层水头的降低发生应力重分布,相当于在承压层和深部土层的界面处施加一个向上的附加作用力,使深部土体产生隆起。

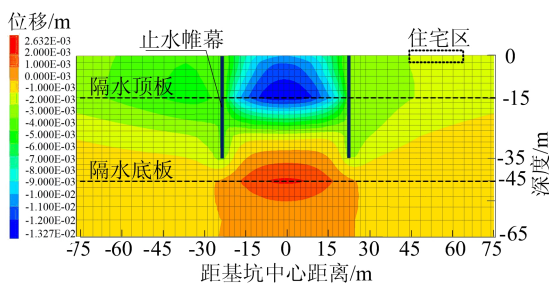


图 10 土层变形剖面云图

4 结 论

通过上述研究分析,针对本工程实例,可以得到如下结论:

1) 悬挂式止水帷幕具有隔断基坑内外水力联系的作用,但当止水帷幕对承压含水层的插入比较小,且基坑内降水幅度较大时,止水帷幕对基坑内外水力联系的隔断作用有限,而止水帷幕结合回灌的方案能够非常有效地控制该工况下基坑外由抽水引起的水头下降。

2) 悬挂式止水帷幕结合人工回灌对控制基坑外由降水引起的地表沉降效果优异,通过合理排布回灌井的位置可以较好地实现对目标区域的保护。

3) 降水引起的地表沉降前期进展快,后期进展缓慢,因此回灌应当尽早启动,才能使沉降控制效果最优化。

[参 考 文 献]

- [1] 刘国彬,王洪新. 上海浅层粉砂地层承压水对基坑的危害及治理[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(6): 790-792.
- [2] 蔡来炳,周红波. 城市轨道交通深基坑工程承压水风险与控制研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(5): 617-623.
- [3] 曾超峰,薛秀丽,宋伟炜,等. 开挖前降水引发基坑变形机制模型试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(9): 2963-2972, 2983.
- [4] 骆冠勇,潘泓,曹洪,等. 承压水减压引起的沉降分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊 2): 196-200.
- [5] 张刚,梁志荣. 承压水降水引起地表沉降现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(增刊 1): 323-327.
- [6] ZHOU N Q, VERMEER P A, LUO R X, et al. Numerical simulation of deep foundation pit dewatering and optimization of controlling land subsidence[J]. Engineering Geology, 2010, 114(3): 251-260.
- [7] 吴奇,李俊才. 高承压水基坑降水对周边环境的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(增刊 1): 265-271.
- [8] 周火焜,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(增刊 1): 470-473.
- [9] GAMBOLATI G, TEATINI P. Geomechanics of subsurface water withdrawal and injection[J]. Water Resources Research, 2015, 51(6): 3922-3955.
- [10] 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.
- [11] 郑刚,石建成,程雪松,等. 含水层未截断条件下超深基坑回灌控制沉降技术研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(增刊 2): 7-10.
- [12] 李瑛,陈东,刘兴旺,等. 悬挂式止水帷幕深基坑减压降水的简化计算方法[J]. 岩土力学, 2021, 42(3): 826-832, 862.
- [13] 沙金焯. 不完整井渗流的近似计算[J]. 岩土工程学报, 1985, 7(5): 36-48.
- [14] 曾超峰,薛秀丽,郑刚. 基坑工程长期地下水回灌控沉应注意的几个问题[J]. 土木工程学报, 2019, 52(增刊 2): 127-131.
- [15] 龚晓南,张杰. 承压水降压引起的上覆土层沉降分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 145-149.

(责任编辑 张 镛)