

高承压水地层深基坑抗突涌技术

张光辉¹, 刘云凯¹, 卢春雨², 任一青², 陈保国²

(1. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610081; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为了防止高承压水地层深基坑突涌破坏, 以韩江-榕江-练江水系连通后续优化工程 GX12 号井深基坑为依托, 采用有限元软件建立三维数值模型, 对考虑地连墙深度以及布设减压井的 5 种技术方案进行模拟分析, 研究各方案的抗突涌效果, 并通过综合考虑基坑抗突涌效果及地连墙施工技术难度和工程造价等, 确定基坑工程抗突涌的优化方案。结果表明: 1) 地连墙深度可由原设计的 91.8 m 优化为 78 m; 2) 坑内增设减压井可有效减小坑底隆起和地连墙水平位移, 但是增加了基坑周边地表沉降, 而增加地连墙深度可显著减小基坑周边地表沉降和坑底隆起; 3) 增大地连墙深度的抗突涌效果优于增设减压井的效果。本文成果可为类似高承压水地层深基坑工程抗突涌技术提供一定的借鉴。

关键词: 深基坑; 超深地连墙; 承压水; 抗突涌; 减压降水

中图分类号: TV223

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)07-0028-06

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.07.088

Anti-inrush technology for deep base pit in high confined water stratum

ZHANG Guanghui¹, LIU Yunkai¹, LU Chunyu², REN Yiqing², CHEN Baoguo²

(1. Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu 610081, Sichuan, China; 2. School of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: In order to prevent the inrush damage of deep base pit in high confined water stratum, relying on the deep base pit of Well GX12 of the follow-up optimization project of Hanjiang-Rongjiang-Lianjiang water system connection, the three-dimensional numerical model is established by finite element software, and five technical schemes considering the depth of the slurry wall and the laying of the pressure reducing well are simulated and analyzed, the anti-inrush effect of each scheme is studied, and the optimization scheme of anti-inrush of base pit engineering is determined by comprehensively considering the anti-inrush effect of the base pit, the technical difficulty of the construction of the slurry wall and the engineering cost. The results show that: 1) The depth of the slurry wall can be optimized from the original design of 91.8 m to 78 m; 2) The addition of a pressure reducing well in the base pit can effectively reduce the horizontal displacement of the pit bottom uplift and the slurry wall, however, the surface settlement around the base pit is increased, and the surface settlement and pit bottom uplift can be significantly reduced by increasing the depth of the slurry wall; 3) The anti-inrush effect of increasing the depth of the slurry wall is better than that of increasing a pressure reducing well. The results can provide some reference for the anti-inrush technology of deep base pit engineering in similar high-confined water stratum.

Key words: deep base pit; ultra-deep slurry walls; confined water; anti-inrush; decompression precipitation

水资源配置工程往往穿越富水地层, 土层的渗透系数变化较大, 含有较多承压水层。当工作井基

收稿日期: 2023-12-01

基金项目: 中国水利水电第七工程局有限公司科技攻关项目(GSSC-科研-2023-001)

作者简介: 张光辉(1975—), 男, 正高级工程师, 从事水利水电工程施工技术与管理方面的工作。

通信作者: 卢春雨(1999—), 女, 硕士研究生, 从事岩土工程领域方面的研究。

坑开挖后, 基坑底面不透水土层的自重应力小于下部承压水水头压力时, 会引起基坑底部土体隆起破坏并同时发生喷水涌砂现象。施工过程中, 为了避免承压水层引起的突涌破坏, 许多学者对抗突涌稳定性以及减压降水方案进行了研究。李境培等^[1]设计了基坑突涌离心模型试验, 模拟不同承压水位条件下黏性土体隔水层突涌状态, 提出基坑土体的抗突涌条件应计入黏性土体强度与土体结构相互作用的影响; WANG 等^[2]通过模型试验验证了基坑底部突水过程, 得到了不同水压作用下各层的变形破坏特征, 将突涌变形过程划分为连续变形、渐进变形、剪切破坏和突涌下沉 4 个阶段, 且该过程包括蠕变变形和破坏前的微裂纹发展; LI 等^[3]构建了基底突涌的三维破坏机制, 基于极限平衡理论推导了承压水突涌底座安全厚度的预测方法, 得出了土体强度参数及承压水压力临界安全厚度的影响规律; CHENG 等^[4]采用 ABAQUS 建立深基坑抗突涌稳定性三维数值分析模型, 分析了不同承压水位作用下基坑坑底的突涌破坏机制和变形行为, 揭示了承压水作用下桩基应力和土体变形的规律, 通过引入桩侧摩阻综合修正系数, 提出了考虑工程桩影响的基坑抗突涌稳定性分析方法; 张祥龙等^[5]分析不同降水井布置方案下的现场监测结果, 得到适用于工程的降水方案。

基坑突涌的防治方法大多采用地连墙隔断承压含水层或对承压含水层进行减压降水。然而, 不合理的地连墙深度以及减压降水井布置方式会增大施工难度, 增加施工成本。韩江 - 榕江 - 练江水系连通后续优化工程中的 GX12 号井深基坑所处软土地层深厚, 地下水与河道连通为承压水, 初步方案设计 91.8 m 超深地连墙插入基岩防止工作井发生突涌。本文通过数值模拟方法建立 GX12 号井深基坑的三维数值模型, 分析不同地连墙深度以及减压井降水方案的抗突涌稳定性, 进而优化地连墙深度, 提出合理的抗突涌技术方案, 为类似工程中的抗突涌技术方案提供参考。

1 工程概况及重难点问题

GX12 号工作井深基坑位于一处池塘, 以北约 100 m 为榕江北河不知名支流, 所处地层为第四系

冲积层, 以黏性土、中粗砂和淤泥质土为主, 其中 ②-3、②-5、②-7 中粗砂层为含水层, ②-2、②-4、②-6 为隔水层。GX12 号井深基坑周围地层水头高度为 2 m, 开挖深度为 34.83 m; 坑底承压水水头高度达到 30 m, 隔水层 ②-4 承压水水头高度达到 54 m, ②-6 承压水水头高度达到 77 m。初步设计地连墙深度为 91.8 m, 底部进入基岩, 地连墙穿越杂填土层、淤泥、淤泥质土层、中粗砂层等复杂地层, 淤泥质土压缩性高, 自稳能力差, 井底部有厚度约 10 m 中粗砂层, 透水性好, 水量丰富。

GX12 号工作井深基坑坑底高程 -32.33 m, 外径为 24 m, 采用地下连续墙 + 混凝土内衬墙支护方案。地连墙、压顶冠梁以及内衬的混凝土强度等级均采用 C30。基坑开挖采用地下连续墙垂直支护, 内衬墙采用逆作法施工。具体的基坑支护结构设计: 地下连续墙厚度为 1.0 m, 嵌入井底, 逆作法内衬墙厚度分别为 0.4、1.0、1.2 m, 衬砌后内直径分别为 21.2、20.0、19.6 m, 工作井的地质剖面及地连墙支护结构如图 1 所示, 工作井的分层开挖高度及每层内衬厚度如表 1 所示。



图 1 地层剖面及地连墙支护结构 m

GX12 号井深基坑位于池塘内, 临近河流, 所处软土地层深厚。黏性土、淤泥质土和中粗砂地层的透水性强弱交互, 强透水层与榕江连通。坑底位于淤泥质土层, 承载力较低; 基底以下存在淤泥隔水层和强渗透地层, 其下淤泥隔水层的承压水水头高, 强透水地层厚度较大, 为高承压含水层, 基坑开挖过程中易发生突涌; 为避免突涌发生, 初步设计地连墙底部进入基岩, 完全隔断强透水层; 地连墙穿越地层较复杂, 深度较大,

表 1 GX12 号工作井逆作法各层层高 m

开挖分层	名称	分层高度
1	压顶梁层	1.300
2	内衬墙厚 0.4	2.800
3		1.728
4		4.500
5	内衬墙厚 1.0	4.500
6		4.500
7		4.500
8		4.500
9	内衬墙厚 1.2	4.500
10		2.000

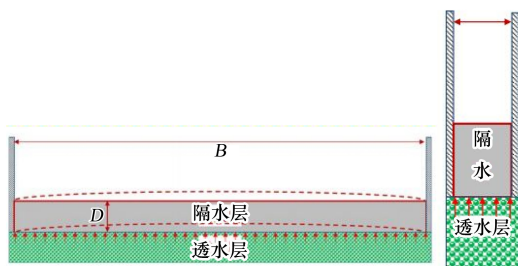
存在槽壁坍塌、接头质量难以控制、泥浆质量要求高等施工技术难题,地连墙深度优化及基坑突涌问题亟待深入研究。

2 抗突涌技术方案

考虑到超深地连墙施工难度大,若不隔断强透水层②-7,坑底将受到较大的水压力,基坑可能会发生突涌破坏;若通过减压井对②-7进行完全降水,将会导致周边环境产生沉降。因此,通过优化地连墙深度,研究合理的抗突涌技术方案。

对于一般基坑来讲,基坑宽度为 B ,承压含水层以上土层厚度为 D , $B/D \geq 1$,基坑中部隆起开裂起控制作用,这种情况下,承压含水层以上的土层压重为主要抗力,两侧墙-土之间的摩擦力作用不大,因此规范不考虑两侧墙-土之间的摩擦力。项目地层深厚,土层厚约为 90 m,基坑下部的土层厚度约为 52 m,而基坑内径只有 22 m, $B/D < 1$,在这种情况下,隔水层呈现刚体整体变形状态,两侧墙-土之间的摩擦力对抗突涌的贡献不可忽略,两种基坑类型如图 2 所示。

综上,共设置 5 种抗突涌技术方案,通过数



基坑宽度/土层厚度: (a) 不小于 1; (b) 小于 1

图 2 基坑类型

值模拟研究各个方案的抗突涌治理效果。

(1) 方案 1: 地连墙进入(v)全风化花岗岩层,深度为 91.8 m,坑外未进行降水,坑内水位随挖随降。

(2) 方案 2: 地连墙进入②-6 淤泥质土层,深度为 78.0 m,坑外未进行降水,坑内水位随挖随降。

(3) 方案 3: 地连墙进入②-6 淤泥质土层,深度为 78.0 m,布置 8 口降水井,每口井抽水量为 $528 \text{ m}^3/\text{d}$,减压井启动高程为 -21 m ,滤管顶高程为 -29.98 m ,滤管底高程为 -69.78 m 。

(4) 方案 4: 地连墙进入②-4 淤泥质土层,深度为 58.0 m,布置 8 口减压井,每口井抽水量为 $528 \text{ m}^3/\text{d}$,减压井启动高程为 -21 m ,滤管顶高程为 -29.98 m ,滤管底高程为 -69.78 m 。

(5) 方案 5: 地连墙进入②-4 淤泥质土层,深度为 58.0 m,布置 1 口减压井,抽水量为 $528 \text{ m}^3/\text{d}$,减压井启动高程为 -1.6 m ,滤管顶高程为 -29.98 m ,滤管底高程为 -69.78 m 。

3 数值模型建立

采用有限元模拟软件 Plaxis 建立三维数值模型,尺寸为 $110 \text{ m} \times 150 \text{ m} \times 102.5 \text{ m}$ ($X \times Y \times Z$),约束法向位移,底面设置固定约束,顶面为自由边界,数值模型如图 3 所示。材料的本构模型选用硬化土模型,根据 Plaxis 对硬化土模型中的参数进行设置, $E_{\text{oed}}^{\text{ref}} = E_{50}^{\text{ref}}$ ($E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 为侧限压缩试验切线刚度, MPa; E_{50}^{ref} 为三轴排水试验割线刚度, MPa), $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 4E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ ($E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为卸载/重加载刚度, MPa); 土层参数结合地勘资料取值,其中根据相关文献资料 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 取 $1.5E_s^{[6-8]}$ (E_s 为压缩模量, MPa),具体参数如表 2 所示。压顶冠梁和内衬墙采用实体单元建模,地连墙采用板单元建模,地连墙与土体之间的界面强度因子取 0.667。

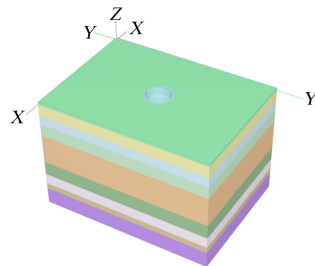


图 3 数值模型

表 2 各地层物理力学参数

土层序号	土层名称	天然容重/(kN·m ⁻³)	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	有效内摩擦角/(°)	渗透系数/(cm·s ⁻¹)	压缩模量/MPa
①	人工填土	19.1	12	10	14	3.00×10^{-6}	5.00
②-1	淤泥~淤泥质土	15.0	4	4	6	6.86×10^{-7}	1.86
②-2	黏土	19.1	12	10	15	6.12×10^{-6}	6.45
②-3	中粗砂	19.7	28	0	28	1.21×10^{-2}	9.14
②-4	淤泥质土	18.1	8	8	10	5.30×10^{-7}	5.61
②-5	中粗砂	19.7	31	0	31	1.62×10^{-2}	10.58
②-6	淤泥质土	18.4	11	9	13	2.10×10^{-6}	5.29
②-7	中粗砂	20.0	32	0	32	1.52×10^{-2}	12.15
②-8	黏性土	19.1	13	15	15	2.00×10^{-6}	7.89
(V)	全风化花岗岩	18.8	26	12	26	7.58×10^{-5}	8.29

4 模拟结果分析

4.1 承压水水头

在黏性土相对隔水层之间含有承压含水层时，随着基坑开挖深度增大，隔水层的覆土压力不足以抵抗承压层的水压力时，隔水层受拉开裂，并且在水力楔劈作用下不断扩展，最终涌水通道贯通发生突涌。因此，通过采取合适的方式降低承压水压力，可以减小坑底土层受到的水压力，避免突涌事故的发生。

各方案的承压含水层水头分布规律如图 4 所示。由图 4 可知：方案 1~3 地连墙进入②-6 隔水层，完全隔断②-5 承压水含水层坑内与坑外土体的水力联系，并未降低坑外的水头，因此方案 1~3 坑外水头仍为 2 m，方案 1、2 坑内水头为 -34.83 m；方案 3 的降水井是对坑底以下的②-5 进行降水，坑底以下②-5 层层顶的水头为 -57 m。②-5 层的水头降低，减少了②-4 和②-5 孔隙水压力、增加有效应力，进而增加了墙-土之间的摩擦力，由此增加基坑抗突涌的能力。方案 4、5 的地连墙进入②-4 层层底，减压井对②-5 承压含水层进行降水，坑外土体的水头降低，坑外土体与坑底土体的水头差减小，基坑坑底所受的水压力减小，降水后方案 4 中②-5 层层顶最小的地下水水头为 -7.05 m，方案 5 中②-5 层层顶最小的地下水水头为 -0.57 m。

4.2 基坑周边地表沉降

在承压水作用下，不同降水以及地连墙深度

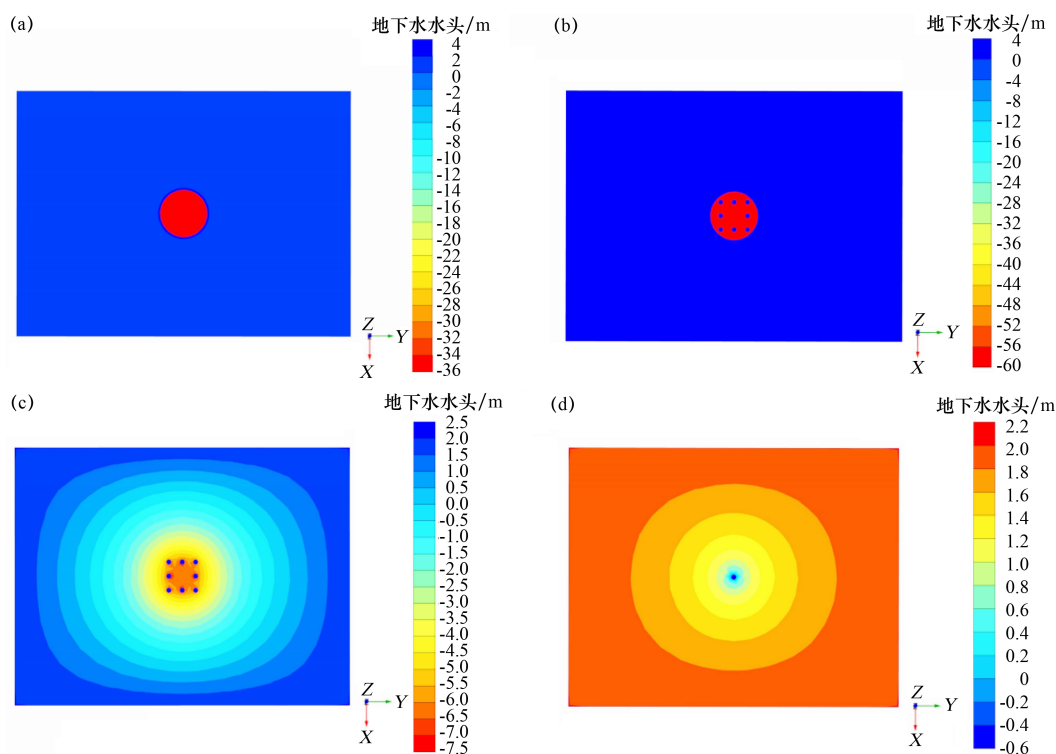
方案的深基坑周边地表沉降如图 5 所示。由图 5 可知：地表沉降值随着离开基坑距离的增加呈现先增大后减小的趋势。方案 4 的基坑周边地表沉降最大，沉降值为 6.6 mm；方案 1 的基坑周边地表沉降最小，沉降值为 0.9 mm。方案 1、2 的地表沉降值较为接近，距离基坑边缘 60 m 以外的沉降值约为 0.5 mm；方案 3 远离基坑位置的沉降值约为 1.0 mm。方案 4 比方案 3 的最大地表沉降值增加约 3.8 mm，比方案 5 的最大地表沉降值增加约 1.6 mm。

4.3 地连墙水平位移

在承压水作用下，不同降水以及地连墙深度方案下地连墙水平位移如图 6 所示。由图 6 可知：地连墙水平位移沿地连墙深度呈现先增大后减小的趋势，地连墙的最大水平位移值均出现在坑底附近，即高程为 -32.33 m 的位置。其中方案 3 的地连墙水平位移最小，最大水平位移值为 2.0 mm；方案 1、2 的地连墙水平位移值最大，最大水平位移值为 2.6 mm。方案 3 比方案 2 的地连墙位移值小 0.6 mm，方案 4 比方案 3 的地连墙位移值大 0.2 mm，方案 4 和方案 5 的地连墙最大水平位移相同，均为 2.2 mm。

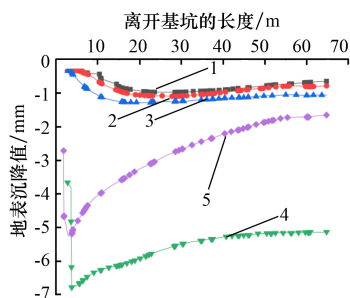
4.4 坑底隆起

在承压水作用下，不同降水以及地连墙深度方案下坑底隆起如图 7 所示。由图 7 可知：靠近坑底中心的位置坑底隆起值较大，靠近基坑边缘的位置坑底隆起值最小。方案 1、2 的坑底隆起值基本相同，隆起值为 90 mm；方案 3 的基坑隆起值最小，



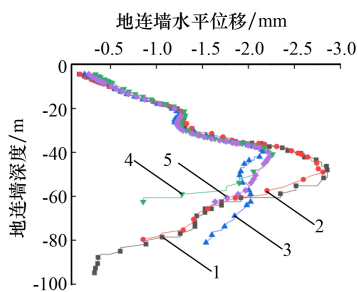
(a) 方案 1、2 (放大 0.2 倍); (b) 方案 3 (放大 0.1 倍); (c) 方案 4 (放大 0.5 倍); (d) 方案 5 (放大 5.0 倍)

图 4 各方案地下水水头分布规律



方案: 1—1; 2—2; 3—3; 4—4; 5—5。

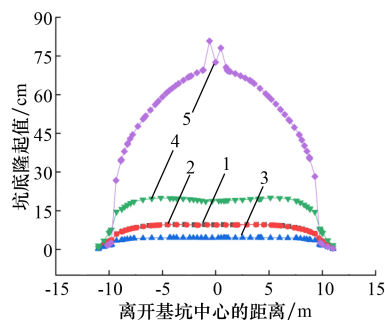
图 5 地表沉降



方案: 1—1; 2—2; 3—3; 4—4; 5—5。

图 6 地连墙水平位移

隆起值为 40 mm; 方案 4 的坑底隆起值接近 200 mm; 方案 5 中, 基坑开挖至 -30.33 m 时, 坑底隆起值达到 800 mm, 说明开挖过程中已经发生突涌破坏。



方案: 1—1; 2—2; 3—3; 4—4; 5—5。

图 7 坑底隆起

方案 3 比方案 2、1 的坑底隆起值小 50 mm, 方案 4 比方案 3 的基坑隆起值大 160 mm。

4.5 突涌稳定性

当地连墙深度较大且基坑截面尺寸相对较小, 通常坑内土层深度与等效直径的比值大于 1 时, 坑内土层与地连墙之间的摩擦作用能够有效提高坑底土层的抗突涌稳定性。考虑墙-土之间的摩擦力, 采用有效应力法分析基坑的抗突涌稳定性。

地连墙内侧土体摩阻力计算公式:

$$f = c + k_0 (\sigma - \mu) \tan \varphi' \quad (1)$$

式中: f 为侧摩阻力, kPa; c 为土的黏聚力, kPa; φ' 为土的有效内摩擦角, ($^\circ$); k_0 为静止土压力系

数,其算式: $k_0 = 1 - \sin\varphi'$; σ 为土体自重应力, kN/m^2 ; μ 为土中的平均孔隙水压力, kN/m^2 。

侧摩阻力合力计算公式:

$$F = f \times \sum_{i=1}^n s_i \quad (2)$$

式中: s_i 为地连墙与坑内分层土体的接触面积, m^2 ; n 为对应的土层数。

坑底土层抗突涌稳定性系数计算公式:

$$K = (\sum \gamma h + F/A) F_w \quad (3)$$

式中: K 为基坑抗突涌安全系数; $\sum \gamma h$ 为不透水层以上土层自重压力之和, kN/m^2 ; γ 为土层的天然重度, kN/m^3 ; h 为土层厚度, m ; A 为基坑底面积, m^2 ; F_w 为不透水层层底水压力, kN/m^2 。不透水层以上土的自重压力合力加上摩阻力合力所提供的反力不应小于隔水层层底水压力的 1.1 倍,即 $K \geq 1.1$, 满足抗突涌稳定性。

数值模拟结果发现, 基坑开挖过程中方案 1 ~ 4 均未发生突涌, 但是方案 2、4 中坑底土层发生严重隆起; 采用方案 5 开挖至第九层时坑底隔水层土层厚度不足以抵抗承压含水层的顶托力, 基坑底部隆起变形过大, 土体发生拉裂破坏, 产生突涌。5 种不同技术方案下的抗突涌稳定性数值模拟结果以及理论计算结果如表 3 所示。

表 3 各方案突涌稳定性结果

方案类型	理论结果	模拟结果
1	满足(完全隔断)	未突涌(完全隔断)
2	1.076, 不满足	未突涌(严重隆起)
3	1.106, 满足	未突涌
4	1.075, 不满足	未突涌(严重隆起)
5	0.789, 不满足	突涌

由表 3 可知: 方案 1 完全隔断强透水层与坑外土体的水力联系, 因此不会发生突涌破坏, 但是地连墙深度大, 施工难度高且风险大, 工程造价高。方案 2、4 在模型计算中未发生突涌, 但引起的坑底隆起位移较大, 超过了规范限值, 数值模拟结果和理论计算的突涌稳定性相符, 突涌稳定性不满足规范要求。方案 5 在模拟中基坑发生突涌破坏, 方案 3 满足基坑抗突涌稳定性要求。经综合比较分析, 推荐方案 3 为工程合理的抗突涌设计方案。

5 结 论

(1) 根据 5 种抗突涌技术方案的三维数值模拟

分析结果, 将基坑地连墙深度由原设计的 91.8 m 优化为 78 m, 既满足了抗突涌稳定性的要求, 又节约了成本, 降低了施工难度和风险。

(2) 地连墙深度采用 78 m, 增加减压井时基坑周边地表沉降最大值由 0.5 mm 增加到 1.2 mm, 而坑底隆起由 90 mm 减小到 40 mm, 减小了 55%, 地连墙水平位移减小了 23%; 地连墙深度由 78 m 减小到 58 m, 基坑周边地表沉降由 1.2 mm 增加到 5.0 mm, 增加了 316%, 而且坑底隆起增加了 400%, 地连墙水平位移减小 10%; 与布设减压井相比, 地连墙插入深度的抗突涌效果更优。

(3) 5 种方案的基坑周边地表沉降值及地连墙水平位移值均在规范要求的范围内, 方案 1、2、4、5 的坑底隆起值超过规范要求的范围(30 ~ 60 mm)。

参考文献:

- [1] 李镜培, 张飞, 梁发云, 等. 承压水基坑突涌机制离心模型试验与数值模拟. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(6): 837 - 842.
- [2] WANG J, LIU X, XIANG J, et al. Laboratory model tests on water inrush in foundation pit bottom[J]. Environmental earth sciences, 2016, 75(14): 1.
- [3] LI Q, WANG H, MEN Y, et al. Estimation of critical safety thickness of the base against confined water inrush for a rectangular foundation pit[J]. Advances in Civil Engineering, 2022(2022): 1 - 10.
- [4] CHENG Z, JIN L, ZHANG C, et al. Numerical analysis of influences of engineering piles for anti-inrush of deep excavation under confined water[J]. Advances in Civil Engineering, 2023(2023): 1 - 13.
- [5] 张祥龙, 陈晓伟. 钱江新城两翼“城市阳台”工程基坑降水设计与施工分析[J]. 工程建设, 2008(2): 46 - 49.
- [6] 冷伍明, 姚康, 门小雄, 等. 考虑工程桩效应的滨海深基坑变形特性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(4): 1347 - 1358.
- [7] 张誉津, 刘俊城, 谭勇. 深厚富水砂性土层深基坑开挖降水变形特性研究[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(9): 1511 - 1522.
- [8] 林世杰, 付浩, 宋二祥, 等. 圆形竖井变形特性及其计算分析方法[J]. 地基处理, 2023, 5(3): 195 - 204.