



# 基于数值模拟技术的 超大型基坑排水设计及优化

董洁<sup>1</sup>, 张杰<sup>2</sup>, 李剑男<sup>1</sup>, 李翰泽<sup>2</sup>

(1. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027; 2. 河海大学, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 基于多哈新港大型内挖式码头项目, 将传统的基坑排水设计方法与现代的有限元分析技术结合, 针对超大型基坑开挖的工程特点, 对影响工程进度的关键因素——降排水设计进行分析。对原有规范中根据实际情况与设计经验进行取值的深井井深与井间距利用有限元软件进行模拟分析, 从而给出优化建议, 提高了设计的可靠度。结果表明, 数值模拟技术的应用起到了节约设计成本、优化设计方案的重要作用, 这种传统与现代方法相结合的设计模式对于类似的项目实施有着很好的借鉴意义。

**关键词:** 超大基坑; 降排水技术; 有限元分析; 设计优化

中图分类号: TU 472

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)04-0068-04

## Design and optimization of large pit drainage design based on numerical simulation technology

DONG Jie<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>2</sup>, LI Jian-nan<sup>1</sup>, LI Han-ze<sup>2</sup>

(1. China Harbor Engineering Co., Ltd., Beijing 100027, China; 2. Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Based on the project of large internal digging harbor in Doha, and according to the engineering characteristics of the large foundation pit excavation, we analyze the key factors affecting the drainage engineering progress, i. e. the drainage design by combining the traditional foundation pit drainage design method and the modern finite element analysis technology, simulate the deep well depth and the distance between wells using the finite element software according to the actual situation and the design experience in the original specification, and put forward the optimum design, by which the reliability is improved. The results show that the application of numerical simulation technology plays an important role in saving the design cost and optimizing the design scheme. The design pattern which combines the traditional with the modern method may serve as reference for similar projects.

**Keywords:** large foundation pit; drainage technology; finite element analysis; design optimization

早在 20 世纪初, 人工降水技术就已经出现在了工程应用中, 在 20 世纪 50 年代后开始被越来越多的国家应用, 但是人们对排水技术重要性认识尚且不足。调查结果显示, 近年国内发生的 100 个基坑事故中, 由于地下水降水不利导致基坑壁内外侧出现较大的水头差而导致的失稳事故达到了 22%<sup>[1]</sup>。由此可见, 无论是施工安全还是工程结构安全, 基坑降排水的合理设计都是十分重要的。

位于卡塔尔的多哈新港项目工程量巨大, 港池面积高达 4 km<sup>2</sup>、最大挖深达 22 m, 港池基坑邻近外海、地下水补给迅速、施工工期紧迫, 社会关注度极高。由于项目采用干施工方法完成大型挖入式港池设计施工, 其排水量极大且有着极高的环保要求, 因此排水方案设计对于码头的成功建设起着关键性作用。本文以多哈新港项目为依托, 通过数值分析技术研究了满足超大型基坑排水要求的设计优化方法。

收稿日期: 2015-09-29

作者简介: 董洁 (1984—), 女, 工程师, 从事港口工程科技研发管理。

## 1 排水方案设计

### 1.1 设计背景

多哈新港地处卡塔尔 MASAEED 工业城内,离多哈市区 40 km,该项目为内挖式港口,工程场地原地面高程约为 2.0 m,东侧及南侧为海,平均海水位为 1.3 m,港池基坑最深开挖至 -19.7 m。基坑采用放坡方式进行干开挖,典型开挖断面见图 1。施工现场地表高程约为 2.5 m,水位一般在 0.8~1.8 m,因此必须采取科学合理的止水/降排水措施,才能保证后续土石方开挖、爆破的正常进行。该项目作为当地政府的重大项目对环保要求十分严格,排放水的各项物理、化学指标不得超过原海水中的各项指标数值。

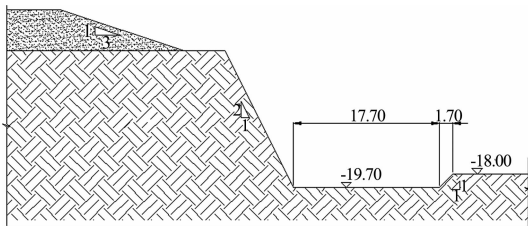


图 1 典型开挖断面 (单位: m)

### 1.2 传统设计方法

综合考虑各种因素,多哈新港项目基坑降水采用防渗墙止水、港池岸壁深井与港池中轻型井点降水相结合<sup>[2]</sup>的方法;根据合同节点工期对场地的需求,排水系统分 3 期布置在港池的开挖线、港池中心线、沿码头岸线防冲刷层,排水系统通过自流或者提升至沉淀池经严格的 4 级沉淀后有选择性外排。

其中深井的设置包括井深、井数、井距、渗透系数、降水出水量和最终降水水位预测。根据 JGJ/T 111—1998 《建筑与市政降水工程技术规范》<sup>[3]</sup>,井深计算为:

$$H_w = H_{w1} + H_{w2} + H_{w3} + H_{w4} + H_{w5} + H_{w6} \quad (1)$$

式中:  $H_w$  为井深 (m);  $H_{w1}$  为基坑深度 (m);  $H_{w2}$  为降水水位距基坑底要求的深度 (m);  $H_{w3}$  为水力坡度与降水井等效半径乘积;  $H_{w4}$  为降水期间地下水位变幅 (m);  $H_{w5}$  为降水井过滤器长度 (m);  $H_{w6}$  为沉沙管长度 (m)。

基坑总涌水量、渗透系数及井径确定则是按

照试算法求得。基坑总涌水量为:

$$Q = 2\pi k \cdot \frac{Ms_0}{\ln(1 + \frac{R}{r_0}) + \frac{M-l}{l} \ln(1 + \frac{0.2M}{r_0})} \quad (2)$$

承压含水层渗透系数为:

$$k = \frac{0.366Ql \lg \frac{R}{r}}{MS} \quad (3)$$

潜水含水层渗透系数为:

$$k = \frac{0.733Ql \lg \frac{R}{r}}{(2H-S)S} \quad (4)$$

承压含水层井径为:

$$R = 10S \sqrt{k} \quad (5)$$

潜水含水层井径为:

$$R = 2S \sqrt{kH} \quad (6)$$

式中:  $k$  为渗透系数 (m/d);  $s_0$  为基坑水位降深 (m);  $R$  为降水影响半径 (m);  $r_0$  为沿基坑周边均匀布置的降水井群所围面积等效圆的半径 (m);  $H$  为潜水含水层厚度 (m);  $r$  为管井半径 (m);  $M$  为含水层厚度 (m);  $Q$  为基坑降水的总涌水量 (m<sup>3</sup>/d);  $S$  为水位下降值 (m)。

规范的方法为假定渗透系数值,代入上述各式中求得计算值,通过不断调整得出一个渗透系数使得上述各式近似成立,既得到了渗透系数的真实值,又得到了相应的涌水量、降水影响半径。另外还根据降水场地的实际情况,通过经验取值确定井数、井距以及位置等安排,最终利用公式进行降水水位预测确定方案的可行性。

### 1.3 方案初选

根据上述规范,初步拟定在多哈新港项目中深井由两部分组成: 1) 港池开挖区边沿布置的 242 口井间距 50 m、井底高程 -30 m 的较为密集深井 (A 类井); 2) 开挖区内较为稀疏布置的抽水井 (B 类井)。A 类深井主要作用为截断基坑外渗水,防止渗透水从码头墙后棱体岸坡上涌出,降低开挖区周围地下水位,保证码头岸墙前后水位无高差,保证基槽底部的冲蚀稳定,同时与 B 类深井一起保证码头的干作业条件; B 类深井主要作用为将岩层中原有水及部分渗漏水抽干,保证石

方爆破、开挖以及码头施工的干作业条件。开挖区周围深井(A类)的抽水能力大于开挖区外部的地下水渗流量,然后利用开挖区内部深井(B类)降低岩层水位,则能够达到干施工的目的。可见A类深井是保证港区内能够达到干施工条件的主要影响因素。

从当前的计算过程中可以看出,设计者个人经验对设计方案合理性也至关重要,关于井数、井距以及最终布置等并没有相应的规范公式可循,而是靠人为取值验算合理性。这样的方式具有一定的偶然性,并不能保证设计方案的最优化。因此引入数值模拟技术能够省去大量人工试算的过程,并能验证更多组合的可能性。

## 2 数值模拟技术的应用

### 2.1 井间距优化

由于A类井起到主要作用,B类井主要作为疏干井,因此有限元模拟优化仅考虑基坑边线处的A类井。

将原有的设计方案作为计算工况1:开挖区面积 $300\text{ m} \times 300\text{ m}$ ,降水井沿边线布置,井间距 $50\text{ m}$ ,当抽水量为 $500\text{ m}^3/\text{d}$ 时,计算得等水头线(图2)。

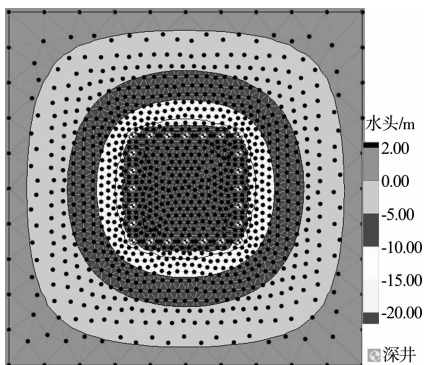


图2 工况1等水头线

由图2可见, $300\text{ m} \times 300\text{ m}$ 开挖区的水位均在 $-20\text{ m}$ 以下,而港池基坑的最深开挖高程为 $-19.7\text{ m}$ ,因此可保证港池基坑的干开挖要求。由于深井的出水能力及抽水机的抽水能力均超过 $500\text{ m}^3/\text{d}$ ,因此可考虑提高单井抽水量,并适度增大井的间距,从而在保证相同水位降深的前提下,减少井的数量并节省施工成本。由此提出以下两

种优化方案:

1) 计算工况2。开挖区面积 $300\text{ m} \times 300\text{ m}$ ,降水井沿边线布置,井间距 $100\text{ m}$ ,当抽水量为 $1\,000\text{ m}^3/\text{d}$ ,计算得等水头线(图3)。

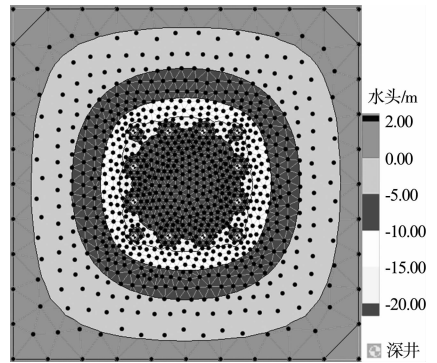


图3 工况2等水头线

2) 计算工况3。开挖区面积 $300\text{ m} \times 300\text{ m}$ ,降水井沿边线布置,井间距 $100\text{ m}$ ,深井抽水量增大至 $1\,100\text{ m}^3/\text{d}$ ,计算得等水头线(图4)。

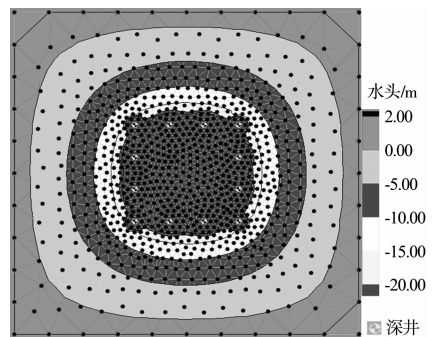


图4 工况3等水头线

由图3可见,工况2中 $300\text{ m} \times 300\text{ m}$ 开挖区大部分区域的水位在 $-20\text{ m}$ 以下,然而由于井间距拉大,导致小部分区域的水位在 $-20 \sim -15\text{ m}$ ,不满足干施工要求,因此须加大抽水量。

由图4可见,工况3中 $300\text{ m} \times 300\text{ m}$ 开挖区的水位均在 $-20\text{ m}$ 以下,可保证港池基坑的干开挖要求。相比于工况1来说,工况3的深井数量减少一半。

### 2.2 井深优化

1) 计算工况4。

在原设计开挖区面积 $300\text{ m} \times 300\text{ m}$ 、降水井沿边线布置上,取井间距 $100\text{ m}$ ,新井底高程为 $-22\text{ m}$ ,井水位降至 $-20\text{ m}$ ,通过数值模拟技术

对场区内部及周围地下水情况进行模拟,计算得等水头线(图5)。

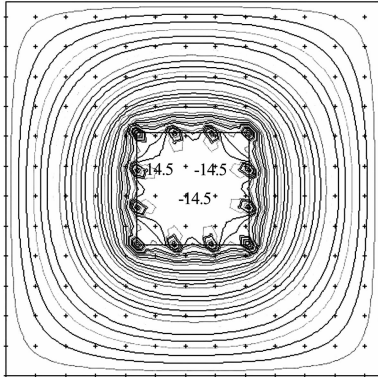


图5 工况4等水头线

由图5可见,300 m × 300 m 开挖区内的水位为 -14.5 m,即降水深度不足,不能满足港池基坑的干开挖要求。

## 2) 计算工况5。

根据上述模拟结果改变井底高程,仍取开挖区面积 300 m × 300 m,降水井沿边线布置,井间距 100 m,但井底高程为 -25 m,井水位降至 -23 m,计算得等水头线(图6)。

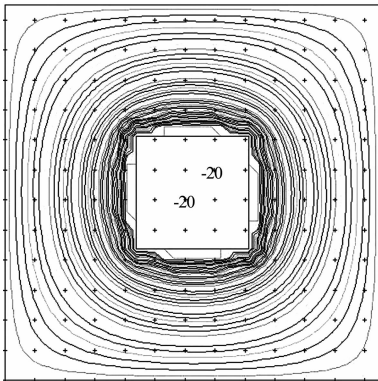


图6 工况5等水头线

由图6可见,300 m × 300 m 开挖区的水位降至坑底高程以下,即井底高程为 -25 m 即可,比原设计的井底高程节省了 5 m 的钻孔量及 PVC 管材,更为经济合理。

## 2.3 小结

使用当前广泛应用的有限元数值模拟技术,并结合原有传统的降排水设计方法,对多哈新港的项目优化设计起到了很好的作用:原设计的 A 类深井的井间距为 50 m,经有限元数值模拟计

算,井间距可增大 1 倍,即至 100 m,仍可保证港池基坑的干开挖要求;原设计的 A 类深井底高程位于基坑底高程以下 10 m,经有限元数值模拟计算,井底高程至基坑底高程以下 5 m 即可,可节省 5 m 的钻孔量及 PVC 管材。很大程度上减少了工程造价,设计更合理。通过这种设计模式得出最终的设计方案,实际降排水总平面布置见图 7。

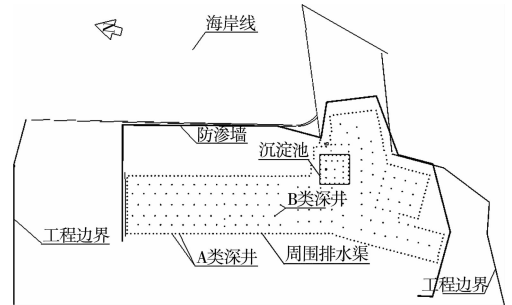


图7 降排水总平面布置

## 3 结论

依托卡塔尔多哈新港项目,本文利用有限元分析技术进行设计优化工作,既通过模拟改变原来过于保守的设计方法,降低工程成本;又通过模拟分析寻找设计误差,减少后期不必要的麻烦。

1) 尝试在设计优化过程中有针对性地使用有限元分析技术,解决工程上的一些具体问题:一是提出了一种合理的深井(A类)布置间距;二是针对原有井深设计方案进行一定的优化,缩小井底高程。使得项目设计在深井布置上不仅技术上可行,而且经济上更为合理。为所依托的多哈新港项目提高设计效率与设计效果提供了保障。

2) 通过对挖入式港池基坑降水的研究,为该工程项目及今后在中东地区的其它类似工程的设计、施工提供一定的借鉴和指导,带来较好的经济及社会效益,有利于提高我国在相关领域的国际竞争力。

## 参考文献:

- [1] 唐业清,李启民,崔江余. 基坑工程事故分析与处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999: 12-13.
- [2] 张永波,孙新忠. 基坑降水工程[M]. 北京: 地震出版社, 2000: 6-8.
- [3] JGJ/T 111—1998 建筑与市政降水工程技术规范[S].