



超大面积港池深基坑截渗与降水分析

李松斌¹, 谢小明¹, 肖莹萍²

(1. 中交四航局第二工程有限公司, 广东 广州 510300; 2. 华南理工大学, 广东 广州 510640)

摘要: 挖入式港池基坑往往具有面积大、开挖深度大、紧邻河海等特点, 因此港池基坑的止降水难度大、风险高。卡塔尔多哈新港港池基坑为石灰岩上覆沉积砂层的双层强透水地层中的超大深基坑。本工程地下水控制设计采用嵌岩地下连续墙和深井降水的组合方法。通过对地下连续墙内外水位实测资料的分析可知, 其隔渗效果较差。地下连续墙在该工程中的功能仅体现在改变了其周边局部区域的渗流场。利用地下水模拟系统软件包 GMS 中的 MODFLOW 模块进行港池基坑局部片区的基坑降水计算, 通过改变深井降水的各参数 (包括抽水井数量、抽水量和井距) 对深井降水进行优化设计, 为类似工程的深基坑降水设计提供借鉴。

关键词: 挖入式港池; 深基坑; 降水; 地下连续墙; 深井

中图分类号: TU 753

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)10-0182-06

Seepage and precipitation analysis of untra-large-area basin deep foundation pit

LI Song-bin¹, XIE Xiao-ming¹, XIAO Ying-ping²

(1. The Second Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510300, China;

2. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Foundation pits of excavated-in basin often has large area and large dredging depth, and they are often close to rivers and sea, so the precipitation of foundation pits of excavated-in basin is difficult and faces high risks. A foundation pit of excavated-in basin in Qatar Doha is super large and deep. Geological conditions of the project site are double strong permeable stratum of sedimentary sand overlying limestone. Groundwater control design of the project uses diaphragm retaining walls and deep wells. Based on the analysis of water level inside and outside the underground continuous wall, seepage flow effects of the underground continuous wall is poorer. Functions of underground continuous walls in this project only embodied in the change of seepage of some areas surrounding the underground continuous wall. Based on MODFLOW module of GMS, we calculate foundation pit precipitation of basin local area. By changing the parameters of deep well precipitation (including the pumping well number, water output and well spacing, and optimize the design of deep wells precipitation, which can be helpful to the design of foundation pit dewatering for similar projects.

Keywords: excavated-in basin; deep foundation pit; precipitation; diaphragm retaining wall; deep well

挖入式港池, 因其面积大、开挖深度大等因素, 将形成超大面积深基坑。由于港池基坑邻近外海或内河, 地下水补给迅速, 所以使得港池基坑的开挖施工面临巨大的挑战。基坑止降水措施是否得当, 在很大程度上决定整个工程的成败。

因此, 对超大面积挖入式港池基坑降水的研究极为重要。

卡塔尔多哈新港港池基坑为双层强透水地层中的超大深基坑, 意味着止降水为制约工程顺利开展的关键。本工程对周边环境的变形控制不严

收稿日期: 2015-03-06

作者简介: 李松斌 (1976—), 男, 高级工程师, 从事港口工程技术管理工作。

格, 采用地下连续墙截水和基坑内深井降水的组合方法。通过对挖入式港池基坑截渗和降水的分析, 为中东地区类似工程的设计、施工提供借鉴。

1 工程概况

多哈新港地处卡塔尔 MASAEED 工业城内, 离多哈市区 40 km。该工程为内挖式港口, 码头岸线长 7 845 m, 包括集装箱码头、散货码头、汽车码头、牲畜码头、海事码头等共 11 个码头 (图 1)。

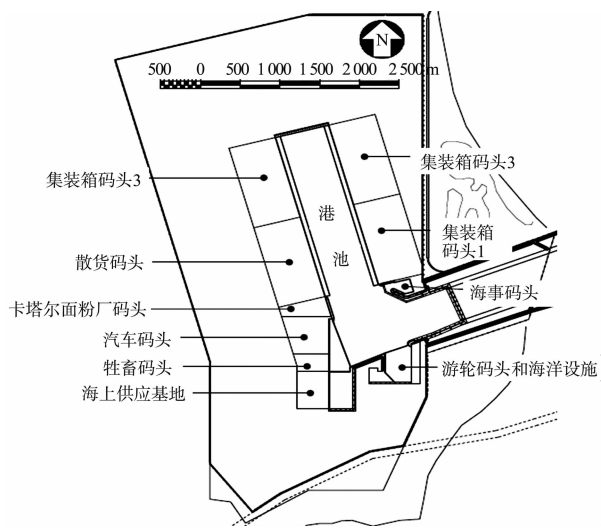


图 1 多哈新港总平面

卡塔尔多哈新港, 港池面积达 400 万 m², 最大超深达 22 m。工程场地原地面高程约为 2.0 m (取海图基准面高程为 0 m, 下同), 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 高程。基坑采用放坡方式进行干开挖, 典型开挖断面如图 2 所示。

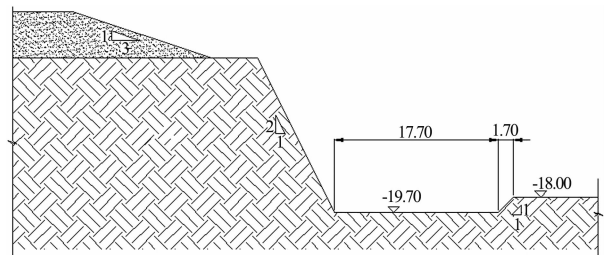


图 2 典型开挖断面 (单位: m)

1.1 地质条件

工程场地大范围地层情况从上至下依次为: 粉细砂层、较破碎强风化石灰岩层和较完整的石灰岩层。典型地质剖面如图 3 所示。

1.2 现场抽水试验和压水试验

为查明场地砂层的渗透性和富水性, 测定有关水文地质参数, 为基坑降水提供水文地质资料, 在现场选取 2 处进行抽水试验。根据现场抽水井和观测孔的观测资料计算水文地质参数。

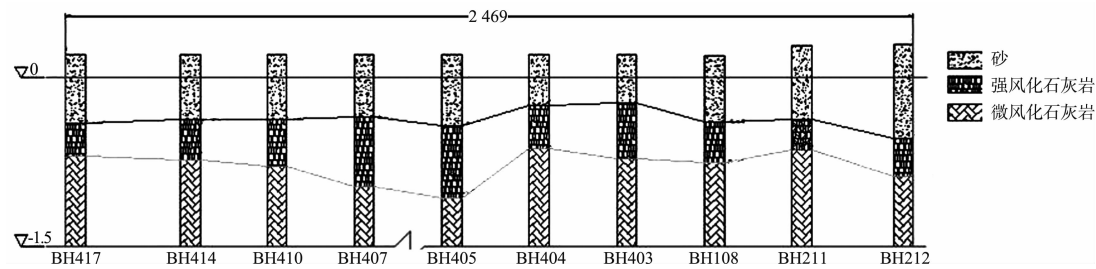


图 3 典型地质剖面 (单位: m)

依抽水试验结果, 渗透系数均值为 5.1×10^{-4} cm/s, 由于抽水试验主要在上部砂层中进行, 根据工程经验, 粉砂的渗透系数一般介于 $6.0 \times 10^{-4} \sim 1.2 \times 10^{-3}$ cm/s, 可见试验所得结果稍小于经验值, 这主要是因为粉砂层下部存在 1 ~ 3 m 厚的粉土或粉质黏土层, 导致地层的整体渗透系数有所降低。

为了进一步探查岩层的裂隙性和渗透性, 在

现场选取若干钻孔进行了分段压水试验。

依据在石灰岩层中进行的压水试验结果, 绘出高程-渗透系数统计图 (图 4)。从图 4 可见, -8.0 ~ -14.0 m 高程段的岩层渗透系数稍大, 为 1.0×10^{-3} cm/s 量级。在港池开挖过程中发现, 该深度范围的岩体确实较为破碎。在高程 -14.0 m 以下, 石灰岩层完整性趋于提高, 渗透系数变小, 一般为 1.0×10^{-4} cm/s 量级。

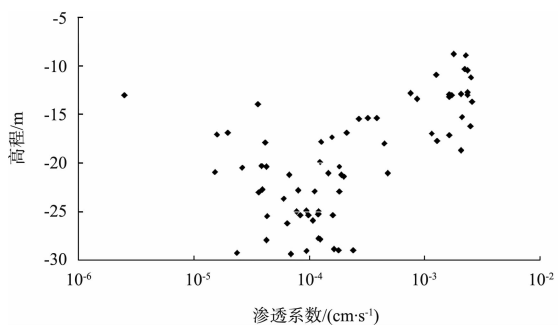


图 4 高程-渗透系数统计

根据现场抽水试验和压水试验的结果，多哈新港工程的岩土层渗透系数取值如下：2.0 ~ -6.0 m 高程段，渗透系数 $k = 5.0 \times 10^{-4}$ cm/s；-6.0 ~ -14 m 高程段，渗透系数 $k = 1.0 \times 10^{-3}$ cm/s；-14.0 ~ -30.0 m 高程段，渗透系数 $k = 1.0 \times 10^{-4}$ cm/s。由此可知，该工程场地的石灰岩层透水性较强。

2 地下连续墙截渗效果分析

多哈新港项目在港池基坑的北侧、南侧和东侧设计了地下连续墙进行截渗（图 5）。地下连续墙施工总长度 8 760 m，墙厚 0.4 m，墙顶高程 2.0 m，墙底高程为 -6.0 ~ -12.0 m，入岩深度不小于 1 m。

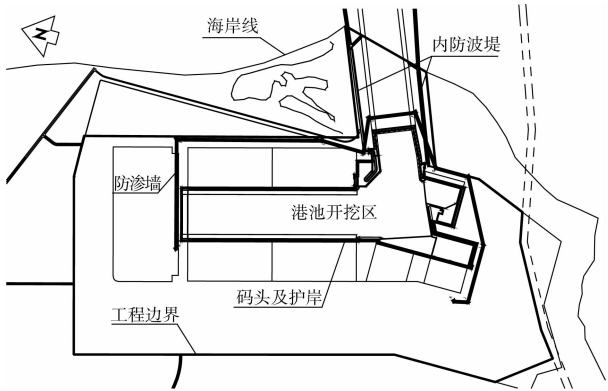


图 5 地下连续墙平面布置

在港池基坑降水及开挖施工过程中，如果地下连续墙能够起到很好的截渗作用，将会大大削弱地下连续墙内外的水力联系，则地下连续墙内外将存在较大的水位差。所以可以通过监测地下连续墙内外的水位差，对地下连续墙的截渗效果进行分析评价。

选取地下连续墙 2 处位置布设 2 组水位管，每组水位管均为地下连续墙内外侧各布 1 支（图 6）。第 1 组水位管的水位观测结果如表 1 所示，第 2 组水位管的管底高程为 -7 m。2 支水位管均未测得地下水位。

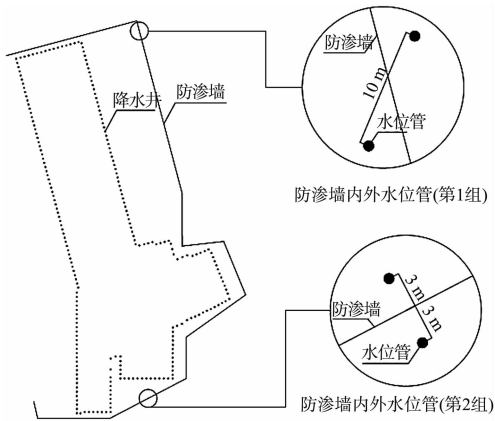


图 6 地下连续墙内外水位管布置

表 1 第 1 组水位管观测成果

观测时间	水位/m		地下连续墙内外水位差/cm
	地下连续墙内	地下连续墙外	
2013-04-03	-0.986	-0.788	19.8
2013-04-09	-1.131	-0.828	30.3
2013-04-18	-1.116	-0.858	25.8
2013-04-24	-0.716	-0.508	20.8
2013-04-30	-0.561	-0.356	20.5
2013-05-08	-0.102	0.047	14.9
2013-05-15	-0.021	0.126	14.7

第 1 组水位管处地下连续墙内外侧水位时程见图 7。由图 7 可知，第 1 组水位管处，地下连续墙内外水位同步变化，可知地下连续墙并未截断地下连续墙内外的水力联系。第 1 组水位管处地下连续墙内外水位差如图 8 所示，墙内外水位差较小，平均约为 20 cm，对于 2 支相距为 10 m 的水位管来说，该水位差值几乎在误差范围内，可忽略不计，因此可认为墙内外不存在明显的水位差，即地下连续墙对墙内外的水力联系几乎没有削弱作用。

第 2 组水位管由于较靠近基坑边线处打设的降水井，且该位置的降水时间已经较长，因此未测得地下水位，说明墙内外的水位均由于降水施工而大大降低。

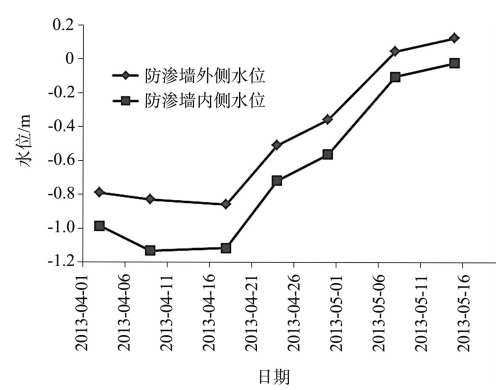


图 7 第 1 组水位管观测成果

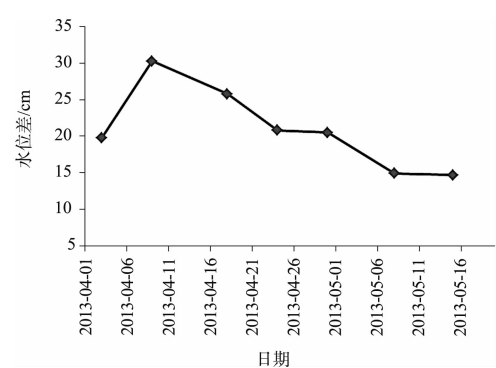


图 8 第 1 组水位管处地下连续墙内外水位差

因此, 从 2 组水位管的观测成果来看, 地下连续墙内外的地下水是基本连通的, 地下连续墙未起到较好的截渗作用, 主要原因是:

- 1) 地下连续墙接头部位可能存在局部渗漏, 而且地下连续墙底部的浅层破碎石灰岩层渗透性较强, 其隔渗效果与某一深度的“悬挂式”地下连续墙的隔渗效果等同^[1];
- 2) 地下连续墙离基坑边线距离过大, 局部达 700 m 之远。

3 深井降水效果分析及设计优化

港池开挖区域采用从地表开始设置的深井进行降水。深井由港池开挖区边沿布置的较为密集深井 (A 类井) 以及开挖区内较为稀疏布置的抽水井 (B 类井) 组成。A 类深井主要作用为截断基坑外渗水, 降低基坑周围地下水位, 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。深井的平面布置如图 9 所示。

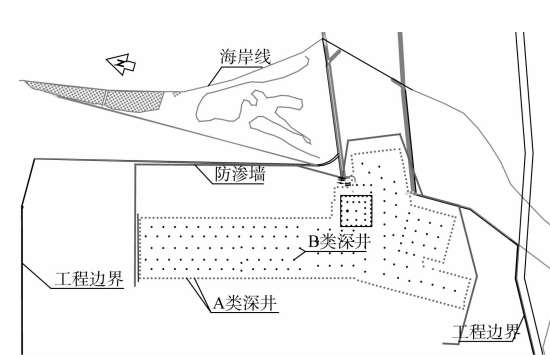


图 9 深井平面布置

该工程原设计中 A 类深井共 242 口, 井间距为 50 m, 井底高程位于基坑底高程以下 10 m, 即井底高程为 -30 m。深井结构如下: 1) 钻孔: 钻孔直径 $\phi 800$ mm, A 类深井钻孔底高程位于基槽面高程以下 10 m, B 类深井钻孔底高程位于港池底高程以下 5 m; 2) 井壁管: 采用 $\phi 400$ PVC 管, 井口高出地面以上 0.5 m; 3) 过滤管: 地表 1 m 以下, 井管底部以上 1 m 起在井壁管打孔即为过滤管; 4) 沉渣管: 沉渣管接在滤水管底部, 直径与滤水管相同, 长度为 1 m, 沉渣管底部封死; 5) 填砾料: PVC 管与钻孔孔壁之间空隙围填 10 ~ 25 mm 粒径碎石。深井结构大样见图 10。

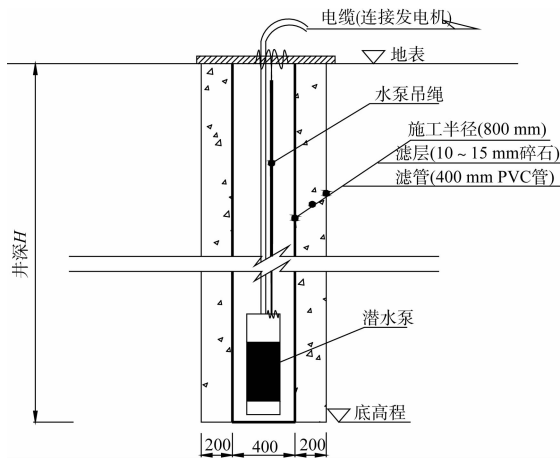


图 10 深井结构大样 (单位: mm)

3.1 深井降水数值模拟

该工程场地东侧及南侧为海, 地下水的流向为从东及南侧的海岸线往西和往北流入基坑。基坑分片区进行开挖施工, 总体降水顺序为从南至北逐步推进片区基坑的降水, 各片区开挖完成后,

均继续进行维护性抽水直至港池充水，因此本文仅选取局部片区进行深井降水计算。有限元数值计算中仅考虑基坑边线处的 A 类井。

建立模型 1，对该工程原设计中的 A 类深井的降水效果进行数值模拟。模型 1 中开挖区面积 $300\text{ m} \times 300\text{ m}$ ，将开挖区域四边均往外延伸 300 m ，形成 $900\text{ m} \times 900\text{ m}$ 的计算区域，取该区域四周边线为定水头边界 2.0 m 。降水井沿基坑边线布置，井径 0.8 m ，井间距 50 m ，当抽水量为 $500\text{ m}^3/\text{d}$ ，计算得等水头线（图 11）。由图 11 可见， $300\text{ m} \times 300\text{ m}$ 开挖区的水位均在 -20 m 以下，而港池基坑的最深开挖高程为 -19.7 m ，因此可保证港池基坑的干开挖要求。现场共 242 口 A 类井，单井抽水量按 $500\text{ m}^3/\text{d}$ ，则总抽水量为 $12.1\text{ 万 m}^3/\text{d}$ 。现场测得沉淀池往海里的排水量为 $5\,300\text{ m}^3/\text{h}$ ，即 $12.7\text{ 万 m}^3/\text{d}$ 。可见，计算值与实测值接近。

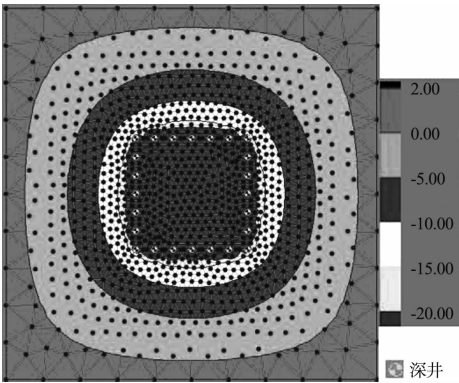


图 11 模型 1 等水头线

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，并增大井间距，从而在保证港池基坑的干开挖要求的情况下，减少井的数量，节省施工成本。现在模型 1 的基础上，调整单井抽水量和井间距，对 A 类深井进行优化设计。

在模型 1 的基础上，将井间距增大至 100 m 得到模型 2，当抽水量为 $1\,000\text{ m}^3/\text{d}$ ，计算得等水头线（图 12）。

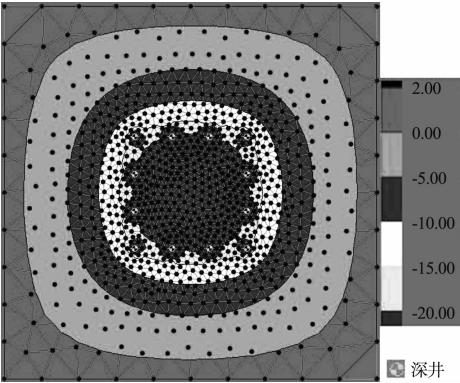


图 12 模型 2 等水头线

由图 12 可见， $300\text{ m} \times 300\text{ m}$ 开挖区大部分区域的水位在 -20 m 以下，然而由于井间距拉大，导致小部分区域的水位在 $-20 \sim -15\text{ m}$ ，无法满足基坑干开挖的要求，因此须加大抽水量。

在模型 2 的基础上，将深井抽水量增大至 $1\,100\text{ m}^3/\text{d}$ 得到模型 3，计算得等水头线（图 13）。

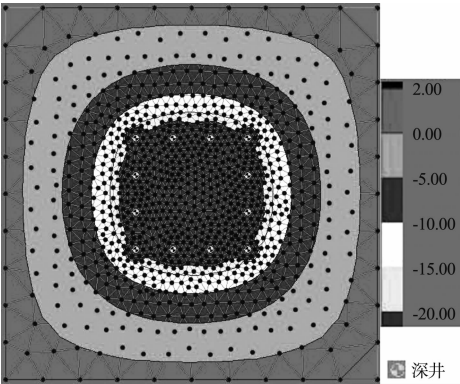


图 13 模型 3 等水头线

由图 13 可见， $300\text{ m} \times 300\text{ m}$ 开挖区的水位均在 -20 m 以下，可保证港池基坑的干开挖要求。相比模型 1，模型 3 中的深井数量减少了一半。将 3 种模拟结果及实测结果汇总于表 2。

表 2 3 种模拟结果及实测结果

编号	单井抽水量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	井间距/m	A 类深井数量/个	总抽水量/ $(\text{万 m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	开挖区的水位情况
原设计	500	50	242	12.7	均在 -20 m 以下
模型 1	500	50	242	12.1	均在 -20 m 以下
模型 2	1 000	100	121	12.1	小部分区域的水位在 $-20 \sim -15\text{ m}$
模型 3	1 100	100	121	13.3	均在 -20 m 以下

综上所述,经有限元数值模拟分析,对原设计中的 A 类深井设计做如下优化:井间增大至 100 m,单井抽水量增大至 1 100 m³/d,并保证了基坑干开挖的要求。

4 结论

1) 对于类似于该工程中石灰岩上覆沉积砂层的双层强透水地层的情况,止水结构物需穿透强透水的破碎石灰岩层进入弱透水的石灰岩层,方能起到良好的截渗效果,从而减少基坑渗流量。

2) 利用有限元数值模拟片区基坑的降水对原设计中的 A 类深井进行了优化设计。在原设计的基础上,通过提高单井抽水量,并增大井间距,从而在保证港池基坑的干开挖要求的情况下,减少井的数量,从而节省施工成本。

参考文献:

[1] 徐杨青,刘国锋,盛永清.深基坑嵌岩地下连续墙隔渗效果分析与评价方法研究[J].岩土力学,2013(10):2 905-2 910.

[2] 王昆泰,胡立强,吕凯歌.悬挂式帷幕条件下基坑渗流特性的计算分析[J].建筑科学,2010(1):81-84.

[3] 祝卫东,韩同春.悬挂式止水帷幕插入深度的数值分析[J].水利水电技术,2009(7):19-21.

[4] 吴世兴.深基坑悬挂式帷幕的渗流分析[J].福建建设科技,2009(5):4-5.

[5] 金小荣,俞建霖,祝哨晨,等.基坑降水引起周围土体沉降性状分析[J].岩土力学,2005(10):54-60.

[6] 谭成发,陈华勇,唐鸿卿.兴隆水利枢纽深基坑开挖中的降水计算分析[J].四川建材,2011(2):58-60.

[7] 张楠.深基坑水文地质参数的确定及降水设计[J].地下空间与工程学报,2011(2):375-379.

[8] 周念清,唐益群,娄荣祥,等.徐家汇地铁站深基坑降水数值模拟与沉降控制[J].岩土工程学报,2011(12):1 950-1 956.

[9] 王彩会.深基坑降水工程优化设计及渗流场与应力场耦合分析[D].南京:河海大学,2001.

[10] 田春亮.深基坑降水群井优化设计及三维渗流有限元分析[D].西安:西安理工大学,2010.

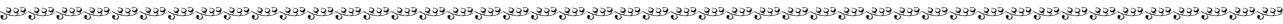
[11] 孙蓉琳,梁杏,张晓伦,等.数值模拟技术在基坑降水中的应用[J].岩石力学与工程学报,2003(S1):2 333-2 337.

[12] 黄应超,徐杨青.深基坑降水与回灌过程的数值模拟分析[J].岩土工程学报,2014(S2):299-303.

[13] 卢智强,冯晓腊,王超峰.悬挂式止水帷幕对基坑降水的影响[J].隧道建设,2006(5):5-7.

[14] 毛昶熙.渗流计算分析与控制[M].北京:水力电力出版社,1990.

[15] 刘建航,侯学渊.基坑工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1997. (本文编辑 郭雪珍)



(上接第 181 页)

2) 针对泥面以下的裂缝,由于泥面以下的裂缝处理难度很大,对于受压桩,可以不处理,其受力类似于短桩支撑在基岩上;对于受拉桩,应将管桩内的土用高压水泵冲走,一直到裂缝以下 6~8 m,然后放置钢筋浇筑混凝土至桩顶,其受力类似全断面嵌岩桩。

6 结语

PHC 桩是一种很好的桩型,但随着 PHC 桩的广泛应用,常出现桩顶击碎、纵向裂缝、泥面下的横向裂缝等工程质量问题,本文通过对分析问题产生的原因,形成以下解决对策:

1) 桩顶击碎问题。可通过提高桩顶混凝土抗锤击能力,主要改善锤、替打及桩顶三者之间的弹性材料,降低波浪对锤击的影响。

2) 桩身纵向裂缝问题。可在桩顶范围增设钢抱箍,同时根据实际情况改良抱箍的细部构造。

3) 横向裂缝问题。主要采取如下措施:①选用有效预应力更大的桩型;②在容易出现最大拉应力的区域增加非预应力钢筋;③在桩身上部某区域涂环氧树脂以降低好土的桩侧阻力;④当桩身进入淤泥一定深度后,沉桩停停打打,直至桩尖进入好土后再连续沉桩。

参考文献:

[1] 胡东,黄松涛.PHC 桩在沉桩过程中出现纵向裂缝的原因分析及相应对策[J].水运工程,2011(5):141-146.

[2] JTS 167.4—2012 港口工程桩基规范[S].

[3] 广州港湾工程质量检测有限公司.本工程桩基动测报告[R].广州:广州港湾工程质量检测有限公司,2010. (本文编辑 郭雪珍)