



# 大型深基坑盆式开挖深井降水法应用研究

李汉渤

(中交四航局第二工程有限公司, 广东 广州 510300)

**摘要:** 广州南沙2个干船坞软土基坑面积大、开挖深, 该软土地基已经过真空预压处理, 淤泥层厚且水平向渗透性极差。鉴于地基土体中残留有经真空预压处理后的排水板, 为含水层中地下水在竖向渗流提供了良好通道, 结合地质条件、通过理论推算并开展了深井降水试验研究, 最后选用深井井点降水设计方案。实践证明干开挖施工安全、高效, 深井降水法适用、合理。该成果可为类似项目的降水工程提供一定的指导作用, 并可为JTS 147-1—2010《港口工程地基规范》修订提供实践依据。

**关键词:** 基坑; 真空预压; 深井点降水; 干地开挖

中图分类号: TU 473

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)09-0169-06

## Application of deep well point precipitation in foundation pit excavation

LI Han-bo

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

**Abstract:** Two dry dock excavation pits in Nansha of Guangzhou are both large in area and quite deep. The soft soil foundation in the pit is already treated by vacuum preloading, and the mud is very thick and its lateral permeability is very poor. Some drainage boards are buried under the soil, and they provide a good channel for the vertical seepage of underground water. Based on the geologic condition, theoretical projections and by launching a study on the deep pilot test area, we select a deep well point precipitation method, which ensures safe and efficient dry construction conditions for the excavation processing, and is proved suitable and rational for the use of a deep well precipitation. The results of the research may serve as a guide for similar projects, and provide a practical basis for the amendment of *Port Engineering Foundation Norms* (JTS 147-1—2010).

**Key words:** foundation pit; vacuum preloading; deep well point precipitation; dry excavation

基坑降水方案主要涉及到方法的合理选择和工程量的正确配置两个问题。一般选择降水工程的最小抽水量或降水的最小费用为目标函数<sup>[1-2]</sup>。本文以广州南沙中船龙穴造船基地修船项目一期工程中2个大型、深厚软基干船坞工程为研究背景, 根据其水文、地质条件, 通过降水理论计算及试验研究, 选择合适的降水设计方案, 节能显著, 取得了良好的经济及社会效益, 可为同类工程借鉴。

## 1 基坑降水方案选择

### 1.1 工程概况

广州中船龙穴造船基地修船项目为2个30万吨级干船坞, 1<sup>#</sup>坞 $L \times B \times H=360 \text{ m} \times 65 \text{ m} \times 13.3 \text{ m}$ , 2<sup>#</sup>坞 $L \times B \times H=300 \text{ m} \times 74 \text{ m} \times 13.3 \text{ m}$ , 两坞间距32 m。基坑开挖规模: 属大型一级基坑, 开挖基坑顶宽363 m, 长522 m, 周长1 715 m, 开挖坑顶总面积166 883 m<sup>2</sup>, 坑底面积83 563 m<sup>2</sup>, 开挖土方175万m<sup>3</sup>; 坞区坑顶高程4.7 m, 坑底高程-9.10 ~

收稿日期: 2013-01-30

作者简介: 李汉渤(1964—), 男, 高级工程师, 从事港口及航道工程施工技术工作。

-10.1 m, 坞口结构坑高程-17.65 m, 总深度达22.35 m; 边坡1:3, 留二级马道, 每级高5.0 m。

### 1.2 工程地质条件

船坞基坑主体主要座落在②<sub>2</sub>层淤泥层, 部分在②<sub>3</sub>层含黏性土粉砂和②<sub>31</sub>层淤泥质粉质黏土混砂层。土层渗透系数见表1, 边坡及坞室主要土质情况柱状图见图1。

### 1.3 基坑边坡开挖工艺

考虑先利用现有的道路, 采用挖掘机开挖第1层, 然后再修筑下坞临时道路, 开挖以下各层。开挖工艺见图2。

### 1.4 降水方案选择

鉴于该场地已进行过真空预压处理, 地基土体中残留的排水板可为含水层中地下水提供良好的竖向渗流通道, 而且其下富含②<sub>3</sub>黏性土粉砂层, 水平向渗透性良好, 故与地基中残留的排水板构成了基坑降水的竖向和水平的地下水渗流通道。依据水文、地质特点及工程要求降水深度, 技术上适宜采用深井井点降水法, 见图3。深井井点施工经济指标计算结果见表2。鉴于深井井点技术上可靠, 且与土方开挖的干扰及用电量均较小, 故选用深井井点。

表1 地基加固深度范围内土层渗透系数

土层编号	土层名称	室内试验成果		抽水试验成果	建议值
		垂直 $K_v$	水平 $K_h$		
① <sub>2</sub>	吹填土	$1.11 \times 10^{-6}$	$2.59 \times 10^{-6}$		$5.0 \times 10^{-6}$
① <sub>21</sub>	粉砂	$1.56 \times 10^{-2}$	$2.2 \times 10^{-2}$		$5.0 \times 10^{-3}$
② <sub>2</sub>	淤泥	$2.71 \times 10^{-6}$	$3.58 \times 10^{-6}$	$2.07 \times 10^{-5}$	$9.0 \times 10^{-6}$
② <sub>21</sub>	淤泥质粉质黏土混砂	$7.47 \times 10^{-6}$	$1.30 \times 10^{-5}$		$1.0 \times 10^{-5}$
② <sub>3</sub>	含黏性土粉砂	$8.89 \times 10^{-3}$	$1.41 \times 10^{-2}$	$1.81 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^{-3}$
② <sub>31</sub>	淤泥质粉质黏土混砂	$1.84 \times 10^{-5}$	$9.38 \times 10^{-6}$	$3.97 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-5}$
③ <sub>1</sub>	粉质黏土混砂	$2.23 \times 10^{-6}$	$5.14 \times 10^{-6}$	$1.68 \times 10^{-6}$	$5.0 \times 10^{-6}$

地质编号	地层高程/m	层底高程/m	分层厚度/m	柱状图	岩土名称及其特征	取 样	标贯 击数/击
① <sub>2</sub>	1.13	3.10	3.10		吹填土: 灰黑, 由淤泥吹填而成, 夹有机质和腐烂物, 有臭味, 局部含少量粉砂	$N_1$	=1.0
② <sub>2</sub>	-6.97	13.20	10.10		淤泥: 灰黑; 系新近沉积而成, 夹有少量粗砂及贝壳碎片, 局部夹有有机质, 有臭味	$N_1$	3.25-3.55
						$N_2$	6.65-6.95
						1	10.40-10.65
② <sub>3</sub>	-14.27	18.50	5.30		含黏性土粉砂: 灰黑, 次圆, 稍密-中密, 由细砂组成, 局部含5%-10%的黏粒	2	13.90-14.15
						$N_1$	16.35-16.65
						3	18.70-18.95
③ <sub>1</sub>	-16.52	20.75	2.25		粉质黏土混砂: 灰黄, 主要由粉黏颗粒组成, 夹有中细砂	$N_1$	20.45-20.75

a) 边坡 (编号为3004)

地质编号	层底高程/m	层底高程/m	分层厚度/m	柱状图	岩土名称及其特征	取 样	标贯 击数/击
① <sub>2</sub>	0.47	3.60	3.60		吹填土: 灰黑, 由淤泥吹填而成, 夹有机质和腐烂物, 有臭味, 局部含少量粉砂	$N_1$	=0.0
② <sub>2</sub>	-9.73	13.80	10.20		淤泥: 灰黑; 系新近沉积而成, 夹有少量粗砂及贝壳碎片, 局部夹有有机质, 有臭味	$N_1$	2.95-3.25
						$N_2$	6.05-6.35
						$N_3$	9.05-9.35
② <sub>3</sub>	-15.63	19.70	5.90		含黏性土粉砂: 灰黑, 夹有机质和腐烂物, 以黏粉颗粒为主, 含中粗砂约25%, 夹有少量的贝壳和贝壳碎屑, 有臭味	1	11.80-12.10
						2	14.80-15.10
						3	17.90-18.20
③ <sub>1</sub>	-19.13	23.20	3.50		粉质黏土混砂: 褐黄, 由黏粒和粉粒组成, 含少量的中粗砂, 占10%-15%, 黏性较好, 干强度较高, 韧性中等	4	21.0-21.3
						5	24.0-24.3
⑤	-20.23	24.30	1.10		黏土: 灰黑, 砂以中粗砂为主, 黏性强, 干强度较高, 韧性中等		=25.0
⑥ <sub>2</sub>	-21.33	25.40	1.10		细砂: 褐黄, 砂以中粗砂为主, 主要成分为石英, 呈棱角, 次圆状, 夹薄层粉土, 混少量黏性土		24.45-24.75
⑨ <sub>1</sub>	-23.73	27.80	2.40		全风化混合花岗岩: 灰白中粗粒结构, 原结构较清晰, 风化较完全, 含铁锰等矿物, 岩心手捏易碎, 遇水易软化崩解	$N_1$	28.15-28.40
⑨ <sub>2</sub>	-29.18	33.25	5.45		强风化混合花岗岩: 灰白中粗粒结构, 原结构较清晰, 风化较完全, 含铁锰等矿物, 岩心手捏易碎, 遇水易软化崩解	$N_1$	33.05-33.25

b) 坞室 (编号为4063)

图1 地质柱状图

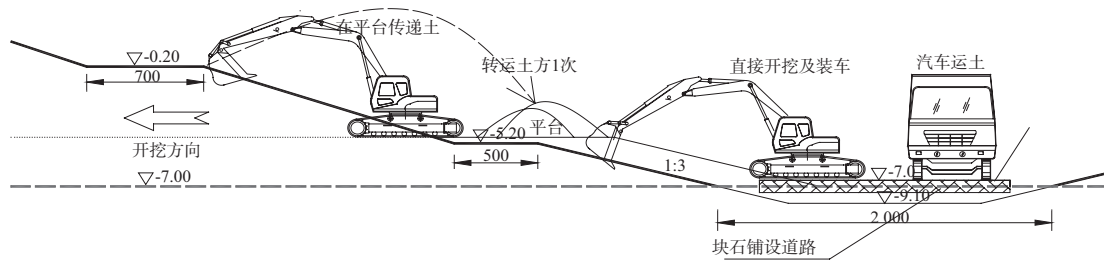


图2 第2层土方开挖工艺

表2 深井井点施工经济指标计算结果

井点类型	井点数/个	建造费/万元	维护费/万元	耗电量/( $\text{万kW}\cdot\text{h}$ )	电费/万元	合计费用/万元
深井井点	253	240.4	101.2	222.2	184.5	526.1

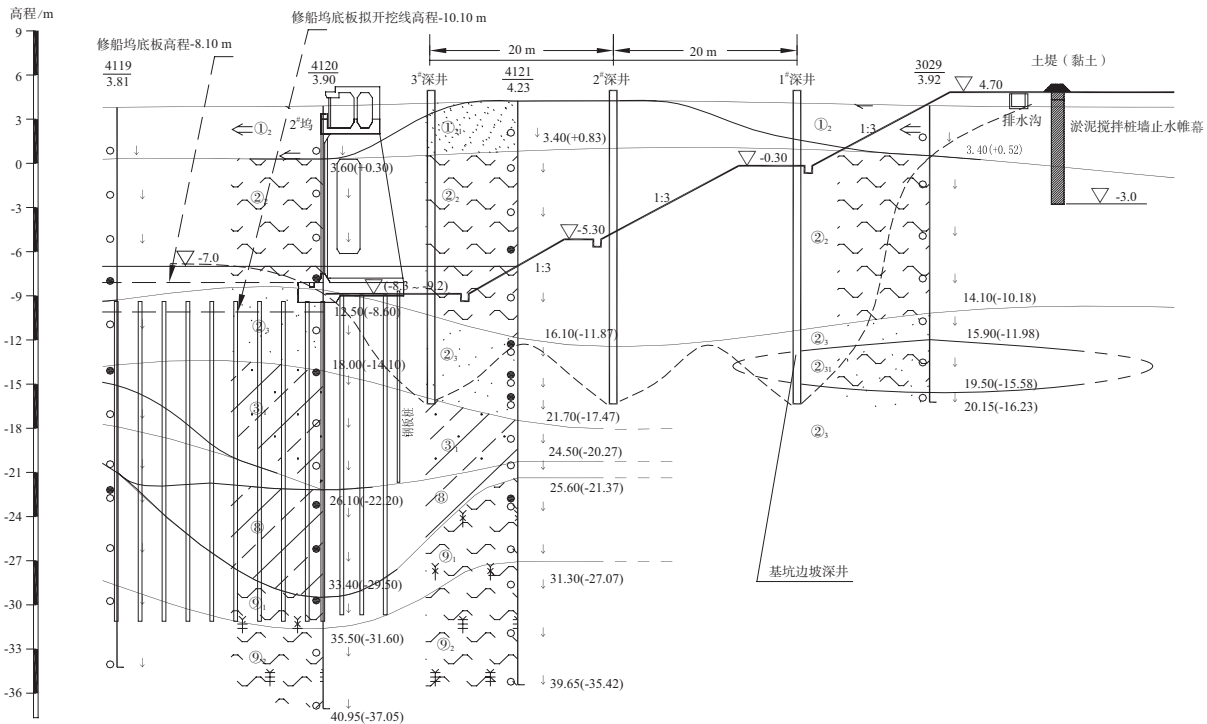


图3 采用的边坡深井降水方案

## 2 基坑深井井点降水系统的设计

井点降水系统的设计内容包括确定降水井的深度、基坑涌水量、单井出水量、降水井数量与井点间距、抽水设备等<sup>[3-5]</sup>。经分析本工程井流特点，符合著名的裘布依(Dupuit)微分方程的基本假定<sup>[6]</sup>，故可使用完整井流的裘布依流量公式。

### 2.1 潜水含水层厚度确定

根据地质资料数据分析：②<sub>3</sub>含黏性土粉砂层渗透系数较高，其下卧层③<sub>1</sub>粉质黏土混砂层的渗透系数较低，处于高程-16.0 m以下，地面高程为4.70 m，见图4，故可将其视为隔水层。因地下潜

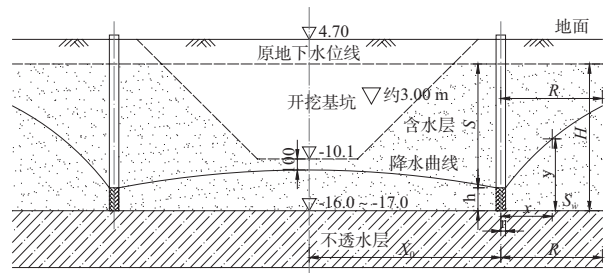


图4 环圈无压完全井计算简图

水位为3.0 m，故潜水含水层厚 $H=3.0\text{ m}-(-16\text{ m})=19.0\text{ m}$ 。主基坑开挖面高程为-10.1 m，考虑到降水水面低于开挖面1.0 m，且管井在边坡的边沿，故

要求井内水位最高不高于-12.5 m，因此，稳定的滤管高度： $h=16.0\text{ m}-12.5\text{ m}=3.5\text{ m}$ ，降水高度 $S_w=H-h=19.0\text{ m}-3.5\text{ m}=15.5\text{ m}$ 。井点管至基坑中心水平距离 $X_0$ 用于水力参数计算时暂取15 m。

### 2.2 水力参数及深井计算

根据本工程的土层特点，计算含水层的复合渗透系数为 $K_p=2.405\text{ m/d}$ ；采用水力坡度1:10设计深井降水区内的水力坡度、1:6设计影响区内水力坡度。由此可计算出降水井深度为23 m；根据地下水渗流的基本理论以及“大井法”原理，按面状基坑、均质含水层、潜水完整井进行有关水力计算，得到基坑涌水量为 $Q=4\ 079.05\text{ m}^3/\text{d}$ ；单井出水量 $q=72.5\text{ m}^3/\text{d}$ ；根据基坑总出水量 $Q$ 、设计单井出水量 $q$ 及基坑的尺寸、周长 $L$ ，可以计算出井距 $l=28\text{ m}$ 和在相同井距下每级边坡平台上不同的管井数量 $n$ 。

初步认为边坡可按间距28 m布置深井、需设166个，而坑底则按30~50 m间距布置深井、需设87个。深井抽水采用QY6-60-1.5型抽水泵（流量 $8\text{ m}^3/\text{h}$ ，扬程60 m，功率1.5 kW），开工后先进行降水试验，待取得初步数据后，再对整个基坑的深井分布做详细调整，确保降水效果。

### 2.3 深井结构

结合施工设备考虑，成孔孔径为800 mm；井管选用内径300 mm的PVC集水管；选择100目的玻璃丝滤布，孔眼直径约0.005 mm，可防止粉砂质土颗粒进入；采用中粗砂作滤料；选用双壁波纹管滤管，管身布满20 mm孔，内层100目玻璃布，外裹双层土工布，下部封底，见图5。

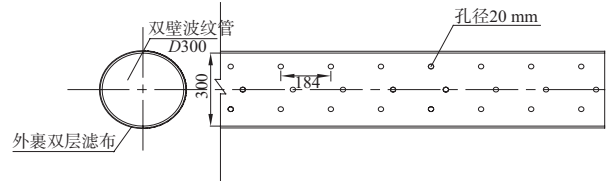


图5 集水井管构造

## 3 基坑边坡深井降水试验

### 3.1 降水试验目的

为大面积降水提供合理的降水参数（井距、井深和抽水泵等）；为基坑开挖边坡稳定性验算、监测报警值选择和坡率优化提供科学依据；分析外界地下水水源补给情况。

根据施工总体安排，选择0+060~0+220作为试验区，深井井点布置在0+080~0+170。基坑内外共施工了9口试验深井，并在井管周围布置了观测管，见图6。

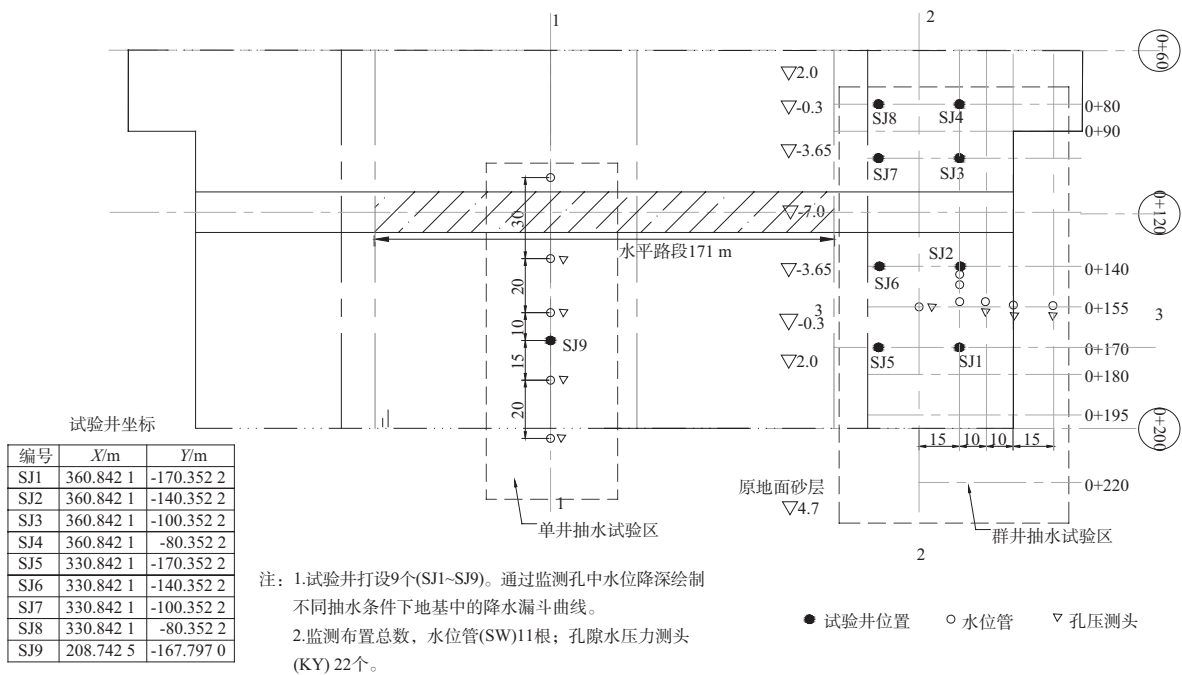


图6 抽水试验井和监测仪器布置总平面

### 3.2 深井降水试验结果分析

#### 3.2.1 单井

单井试验区地下水及孔隙水压动态曲线见图7~10。单井平均出水量约3.0 m<sup>3</sup>/h；随着开挖深度达到进入②<sub>3</sub>层（透水层）后，单侧水位便迅速下降，1~2 d内就观测不到水位，这证明了原土层中的排水板“垂直透水”作用明显。

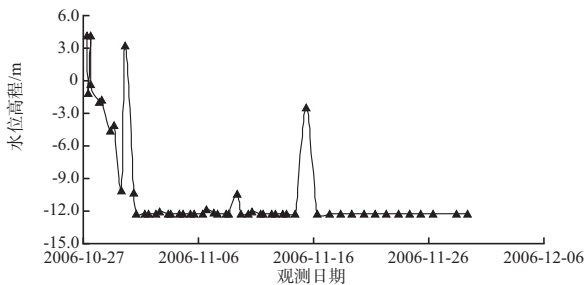


图7 SJ9单井区地下水动态曲线

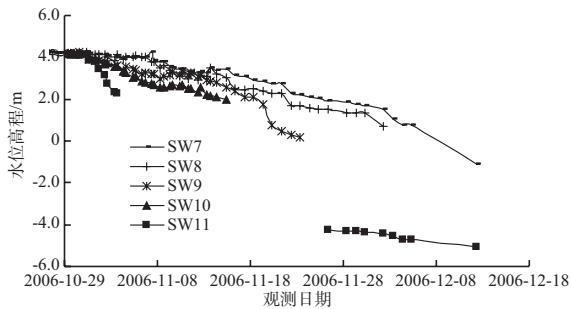


图8 单井区观测井地下水水位动态曲线

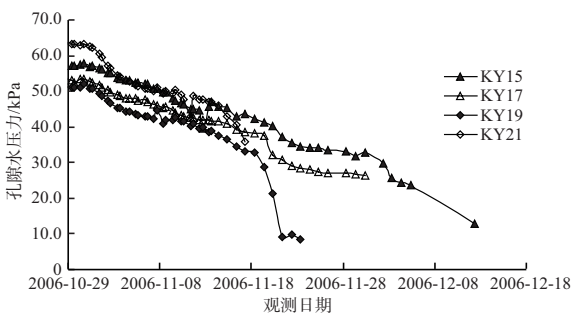


图9 单井区7 m深处孔隙水压力动态曲线

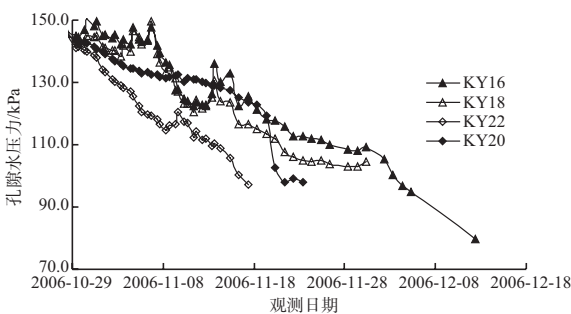


图10 单井区16 m深处孔隙水压力动态曲线

#### 3.2.2 群井

群井试验区试验井地下水位及孔隙水压动态曲线见图11~14。

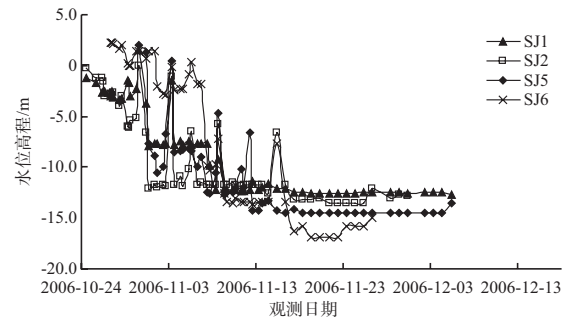


图11 群井区试验井地下水水位动态曲线

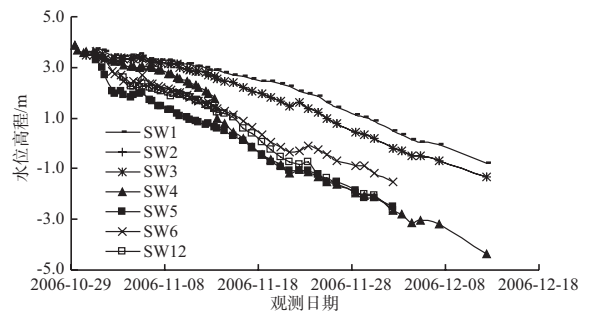


图12 群井区观测井地下水水位动态曲线

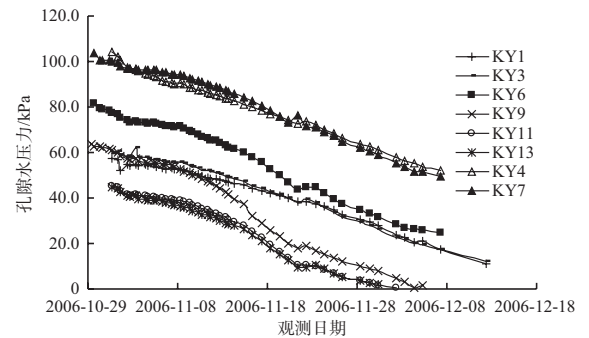


图13 群井区7 m, 10 m深处淤泥孔压动态曲线

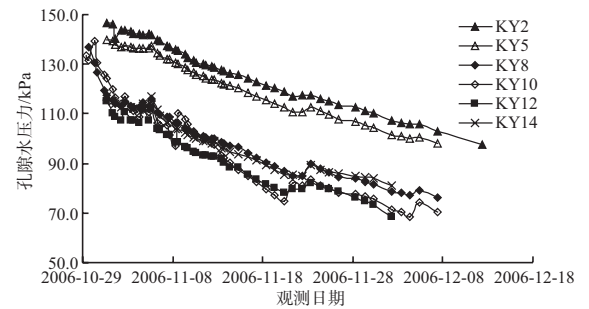


图14 群井区16 m深处相对强透水层孔压动态曲线

除了对9眼试验井实施监测外，同时，也对后期陆续完成的深井的出水量进行了观测。对编号1#~47#的单井进行45 d的观测，其平均流量的情

况统计为：第1~15 d, 3.74 m<sup>3</sup>/h；第16~30 d, 2.88 m<sup>3</sup>/h；第31~45 d, 0.83 m<sup>3</sup>/h。与单井出水量理论计算值72.5 m<sup>3</sup>/d基本一致。

### 3.2.3 结果分析

1) 深井降水效果明显，抽水深井周围地下水水位基本上是同步下降的，而且下降趋势非常明显。按日降深估算，即每4 d降深1 m，要降到基坑底高程以下需30 d左右。

2) 地基深层透水层中地下水水头降深远大于淤泥中日降深。

3) 群井试验区观测期间，深层含水层中水头日降深为0.27~0.29 m，淤泥中日降深为0.12~0.18 m。

4) 试验区中心孔隙水压力保持每天2~3 kPa的速率下降。

通过分析抽水试验成果，专家一致认为：边坡降水深井应布置199口，间距取20 m，在上下平台间布置成梅花形状；基坑内疏干深井应布置54个，间距取40 m。整个基坑共需布置253口深井。

### 3.3 边坡稳定性验算

边坡降水前，采用无侧限抗压及直剪试验指标，计算的抗滑安全系数为0.763~0.947；降水后，采用十字板抗剪强度计算，抗滑安全系数约1.55。边坡稳定性得到保障。

### 3.4 边坡安全监测报警值调整

进行试验段开挖后，发现边坡变形的速率较大，虽达到报警但边坡仍稳定，经专家讨论，并参照一些工程实例等经验，对报警值进行修订，见表3。

表3 修订后监测警戒值

监测项目	监测警戒值/mm	
	日变量	累积变量
深层侧向位移(测斜)	[-5,5]	[-100,100]
围护墙顶水平位移	[-5,5]	[-100,100]
围护墙顶垂直位移	[-10,10]	[-200,200]
基坑外地下水位	[-300,300]	[-1 000,1 000]

### 3.5 应用效果分析

试验区的现场测试结果和试验段的土方开挖效果表明该基坑采取深井井点降水可行而且有效，因此试验是成功的。采用深井降水效果非常

明显，不但节约了成本，且创造了高效的干地开挖施工条件，开挖边坡稳定。

开挖工效：本工程最早开始抽水时间为2006年10月，直至边坡回填后终止，平均运行时间约1 a。最高峰使用的主要设备有反铲25台、25 t运土汽车51台、推土机14台。开挖生产效率若按每天平均，则最高峰挖土18 000 m<sup>3</sup>/d，平均10 500 m<sup>3</sup>/d。

## 4 结论

1) 深井单井出水量和土体中水位下降速率表明该地基边界外地下水水源补给量较小，边坡深井抽水后能有效地隔断外界地下水对基坑内地下水的补给来源。

2) 单井区40 m处和群井区排井外30 m以远均测出明显的水位下降，观测期间土体中没有出现稳定降深，表明该地基抽水影响范围远大于40 m。

3) 实测降水期间边坡上水力坡度均小于1:8，而基坑分级边坡的坡率为1:3，总坡率大于1:6，因此试验数据表明该基坑开挖边坡面上不会出现管涌现象。

4) 研究表明，该基坑工程采取深井井点降水方案，充分利用了该地基的深层土体的渗透性相对较好、表层土体的渗透性差及地层中残留排水板等地层结构特点，工程实践充分证明，深井井点降水施工节能效果显著，经济及社会效益明显。

### 参考文献：

[1] 李再兴. 有关基坑降水方法的探讨[J]. 地下水, 2008(2): 72-74.

[2] 徐岩, 赵文, 李慎刚. 基于目标函数法的地铁隧道群降水优化[J]. 水文地质工程地质, 2009(5): 98-101.

[3] 雷斌. 深基坑井点降水设计与施工[J]. 地质与勘探, 1994(6): 64-67.

[4] 吴昌瑜, 李思慎, 谢红. 深基坑开挖中的降水设计问题[J]. 岩土工程学报, 1999(3): 348-350.

[5] 任红林, 杨敏. 基坑工程井点降水分析计算[J]. 水文地质工程地质, 2000(1): 31-35.

[6] 薛禹群. 地下水动力学原理[M]. 北京: 地质出版社, 1986.