

黄土场地基坑大降深降水试验研究

冯志焱, 刘 林

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

【摘 要】 【目的】研究黄土场地基坑内水位最大降深和降水工艺对降水效果的影响,为西安黄土梁洼地区深基坑大降深降水设计与施工提供依据。【方法】通过对陕西西安黄土梁洼地区不同管材、不同井径、不同井间距群井抽水对比试验,用潜水完整井稳定流理论分析抽水试验过程,获得场地水文地质参数和基坑内水位最大降深,研究降水过程中渗透系数、基坑总出水量、单井出水量、降水影响半径、井损等的变化特性。【结果】西安梁洼区黄土的渗透系数为 $4\sim 10\text{ m/d}$,群井中单井出水量为 $200\sim 500\text{ m}^3/\text{d}$,降水影响半径为 $150\sim 200\text{ m}$,降水过程中井损为 $38.6\%\sim 65.5\%$,降水井间距以 $15\sim 20\text{ m}$ 为宜,基坑内水位降深 20 m 左右时,降水井深度以不超过 50 m 为宜。【结论】在西安黄土梁洼区,采用基坑外布置降水井,可以达到基坑内地下水水位降深超过 20 m 的要求,可采用潜水完整井稳定流理论对降水过程进行分析。

【关键词】 黄土地基;深基坑;大降深降水;基坑降水试验

【中图分类号】 TU753.66

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2010)09-0192-07

Pumping test for over-deep groundwater lowering in foundation pit in loess site

FENG Zhi-yan, LIU Lin

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: 【Objective】Combining geological and hydrological conditions of Xi'an loess ridge and depression district, the paper studied the possible deepest groundwater lowering and the effect of dewatering techniques on dewatering for the purpose of design and construction of over-deep groundwater lowering in loess foundation pit engineering. 【Method】By pumping test of well group with different pipe materials, well diameters and well spacing, the dewatering process is analyzed by complete well steady flow theory to obtain hydrological parameters and the deepest groundwater lowering in foundation pit and variation characteristics of total water yield of foundation pit and single well, depression-cone curves and well loss are studied. 【Result】It is found that, in Xi'an loess ridge and depression district, range of permeability coefficient is $4\sim 10\text{ m/d}$, water yield of one well in well groups $200\sim 500\text{ m}^3/\text{d}$, influence radius of dewatering $150\sim 200\text{ m}$, and well loss $38.6\%\sim 65.5\%$. For the case of groundwater lowering is about 20 m in foundation pit, the well depth and well spacing can be less than 50 m and $150\sim 200\text{ m}$ respectively. 【Conclusion】In Xi'an loess ridge and depression district, more than 20 m of groundwater lowering in foundation pit can be achieved by well-points dewatering systems around pit, the complete well steady flow theory can be used to analyze groundwater lowering process in foundation pit.

Key words: loess foundation; deep foundation pit; over-deep groundwater lowering; pumping test in foundation pit

* 【收稿日期】 2010-02-26

【基金项目】 陕西省重点学科建设专项资金资助项目(No. E01001)

【作者简介】 冯志焱(1964—),男,陕西延长人,副教授,博士,主要从事岩土工程研究。E-mail: zyfeng5769@xauat.edu.cn

在基坑工程施工中,经常会遇到需要降低地下水位的情况^[1]。降水的设计、施工以及降水所引起的其他岩土工程问题,对基坑工程和周边环境的安全至关重要^[2-4]。基坑降水引起的可能是稳定流^[5],也可能是非稳定流^[6]。对基坑降水的研究可以采用数值模拟^[7-8],也可采用现场抽水试验^[9]。黄土是一种特殊的区域性土,黄土地区常见建筑基坑降水深度大多都不超过 10 m,降水难度不大,由降水引起的地面沉降问题也不严重。在这类降深不大的降水设计中,一般采用潜水完整井理论,含水层渗透系数根据抽水试验和工程经验选取(西安黄土地一般 在 3~12 m/d),按照干扰群井形成“大井”,计算确定降水井数量、井深,并进行降水影响范围预测^[10-11]。

在西安地铁工程中,地铁车站基坑往往深度较大,有的可达 30 m 左右,地下水位降深有时超过 20 m。对于这类黄土地大降深降水,可采用坑内降水和坑外降水 2 种方案。前者是将降水井点布置在基坑开挖范围内,它一般与止水帷幕一起使用,对坑外水位影响很小或没有影响,降水也不会对基坑周边建筑物和市政地下管线造成影响,但这种方案一般造价较高,且对后期基坑内施工有一定干扰^[12]。坑外降水则是沿基坑外侧四周布置 1 道或几道降水井,利用降水漏斗使基坑内的水位降至要求深度,其对施工干扰小,经济节省,但存在以下问题^[13-15]:(1)采用一阶井管降水,能否达到降深要求,无工程经验

可以借鉴;(2)采用多阶井管降水,容易受到周边场地的限制;(3)大降深降水设计方法和水文地质参数的选取比较困难;(4)在没有止水帷幕情况下,基坑降水引起基坑外侧地下水位降低,使土体中有效应力增加,并产生渗流,造成因坑外土体固结而产生地表沉降和不均匀沉降。以往这一方面的研究主要集中在理论分析和数值模拟计算,且主要针对软土地基^[4,16]。

本研究通过黄土地大降深降水试验,估计基坑大降深降水时黄土地场的渗透系数和影响半径,研究降水井在不同材质、不同井径、不同井间距条件下的出水量、井损和基坑内最大降深等的变化特性,以期为黄土地大降深降水的设计和施工提供依据。

1 试验概况

1.1 试验场地的水文地质与工程地质条件

本研究的目的是为西安地铁梁洼地区的降水设计与施工提供依据,经过现场调查,选择能反映地铁沿线地层特征的西安梁洼典型地段作为试验场地。该场地位于西安市繁华地带,地下水潜水类型为松散岩类孔隙水,含水层为弱透水黄土和粉质粘土,水位埋深 6.7~7.8 m,含水层厚度平均为 38 m,在埋深 42.9~43.8 m 处有薄层中粗砂透镜体,呈不均匀分布,厚度为 1.2~2.6 m。场地地层描述及主要物理、力学性质见表 1。

表 1 试验场地的岩土工程条件

Table 1 Site engineering geological conditions

序号 Serial number	土层名称 Soil strata	土层厚度/m Layer thickness	层底深度/m Depth of layer bottom	状态 State	孔隙比(<i>e</i>) Void ratio	塑性指数(<i>Ip</i>) Plasticity index
①	素填土 Plain fill(Q_4^{2ml})	3.4~5.2	3.4~5.2	可塑 Plastic	0.703	10.2
②	黄土 Loess(Q_3^{col})	2.2~4.1	7.3~8.1	可塑 Plastic	0.892	12.3
③	古土壤 Fossil soil(Q_3^{cl})	4.0~4.8	11.7~12.3	可塑 Plastic	0.682	11.6
④	黄土 Loess(Q_2^{col})	5.0~6.7	16.9~18.8	可塑 Plastic	0.637	10.7
⑤	粉质粘土 Silty clay(Q_2^{cl})	25.5	≥ 50	可塑 Plastic	0.646	11.8

1.2 降水试验方案及试验目的

结合西安黄土地形地貌和场地工程地质、水文地质条件,在不开挖基坑的天然状态下,模拟基坑外布置降水井,采用不同管材、不同井径群井抽水方式,进行基坑降水试验。现场试验时,开启不同材质、不同井径降水井进行对比试验,确定降水效果;开启所有降水井,进行基坑内水位最大降深试验;应用干扰井群稳定流理论,获得场地水文地质参数,研究降水过程中水位降深等的变化规律。

试验模拟基坑平面为 14 m×21 m 的长方形,在其外环形布置 10 眼降水井,其中钢管井(管径 325 mm,编号 1#、3#、5#、7#、9#)和混凝土管井(管径 600 mm,编号 2#、4#、6#、8#、10#)各 5 眼,井深均为 50 m,间距 7~8 m,均采用一井到底井结构,圆砾填料,洗井至水清沙净。在基坑中心及周围布置 21 眼观测井,其中 30 m 深观测井 17 眼,50 m 深观测井 4 眼。该场地降水井和观测井平面布置见图 1。

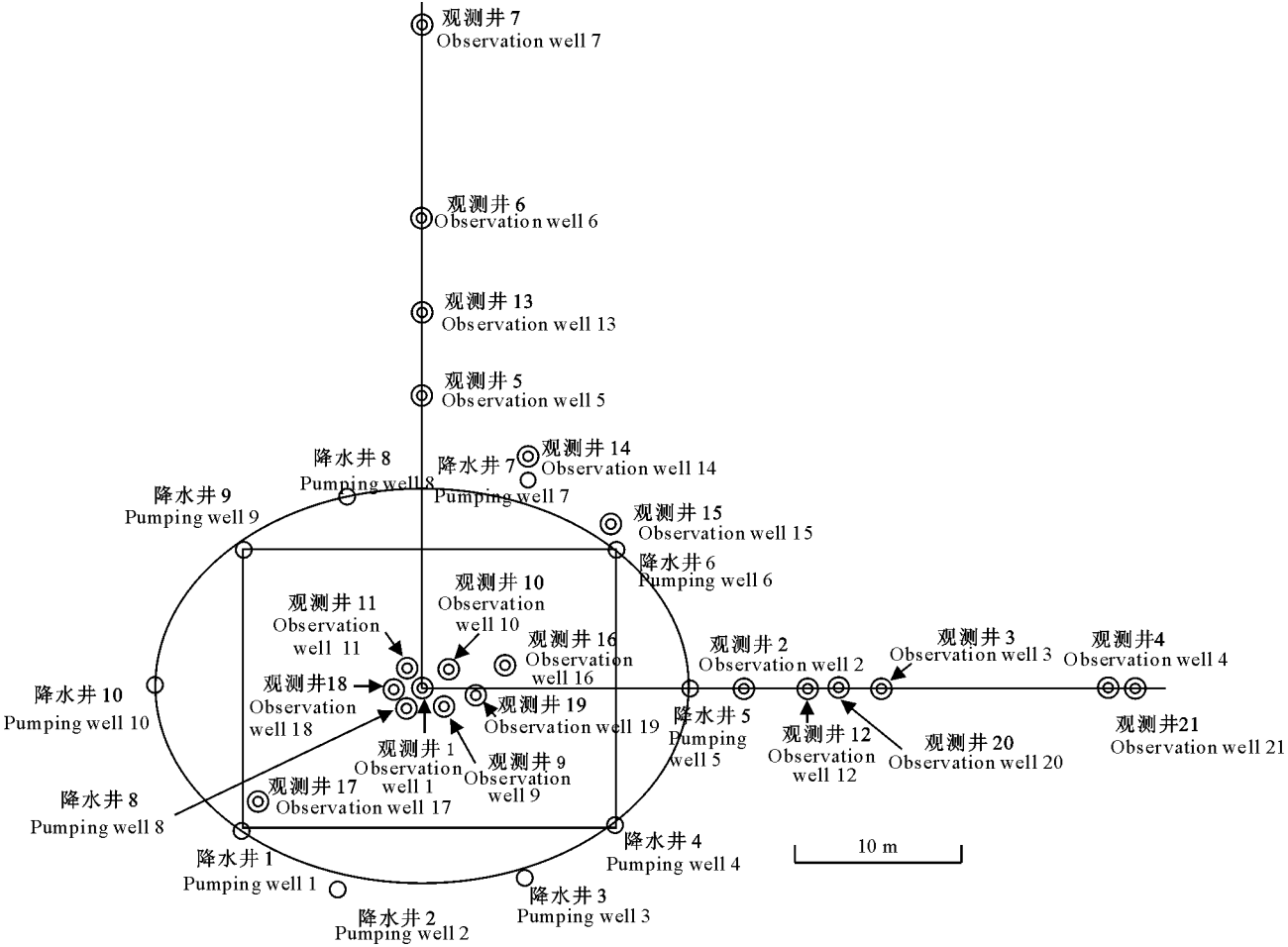


图 1 降水试验井的平面布置图

Fig. 1 Plane of pumping and observation well

1.3 观测项目及测定方法

试验时,分别进行 5 眼钢管井、5 眼混凝土管井和 10 眼混合管井的 3 组抽水试验,每组试验完成后,要求水位恢复接近静止水位,然后进行下一组试验。抽水试验过程中,对每眼抽水井的井内水位和出水量进行观测,同时对各观测井内水位进行监测,由群井中各单井出水量相加得到群井出水量。井内水位用电测水位计量测,单井出水量采用三角堰进行量测。

2 结果与分析

根据降水过程中各观测井水位的监测结果,可以得到不同降深时不同剖面的降水漏斗和降深等值线图。本研究给出了基坑中心水位降深(S)分别为 12.01,25.92 m 时不同位置处的降深剖面图(降水漏斗),以及基坑中心水位降深 11.5 m 时的降深等值线图,分别如图 2 和图 3 所示。根据这些试验结果,可进行试验场地渗透系数、出水量、降水影响半

径等的分析。

2.1 渗透系数

渗透系数是基坑降水中最重要水文地质参数之一,由抽水试验结果可反算渗透系数。将基坑等代为一个 大井,运用基坑出水量和 2 个观测井内的水位,采用潜水完整井稳定流理论,按下式计算土层综合渗透系数 k :

$$k=\frac{0.733\times Q\times(\lg r_2-\lg r_1)}{(2H-S_1-S_2)\times(S_1-S_2)}。$$

式中: Q 为出水量, m^3/d ; r_1 、 r_2 分别为抽水孔(大井中心)距第 1、2 个观测井的距离, m ; H 为含水层厚度, m ,本试验取 $H=38.0\text{ m}$; S_1 、 S_2 分别为第 1、2 个观测井的井内水位降深, m 。

对混凝土管群井、钢管群井和混合群井的抽水试验,按基坑中心降深在 11.0~12.5 m 时各取不同观测井分别进行渗透系数计算,得到渗透系数 k 的平均值分别为 4.01,4.40 和 5.90 m/d ,它反映了黄土、粉质黏土和中粗砂薄层的综合渗透性,而黄土的

渗透性介于粉质黏土和中粗砂之间。因此,测试结果与西安黄土梁洼区降水工程使用的渗透系数经验

值(5~10 m/d)基本一致,可以反映该试验场地土层

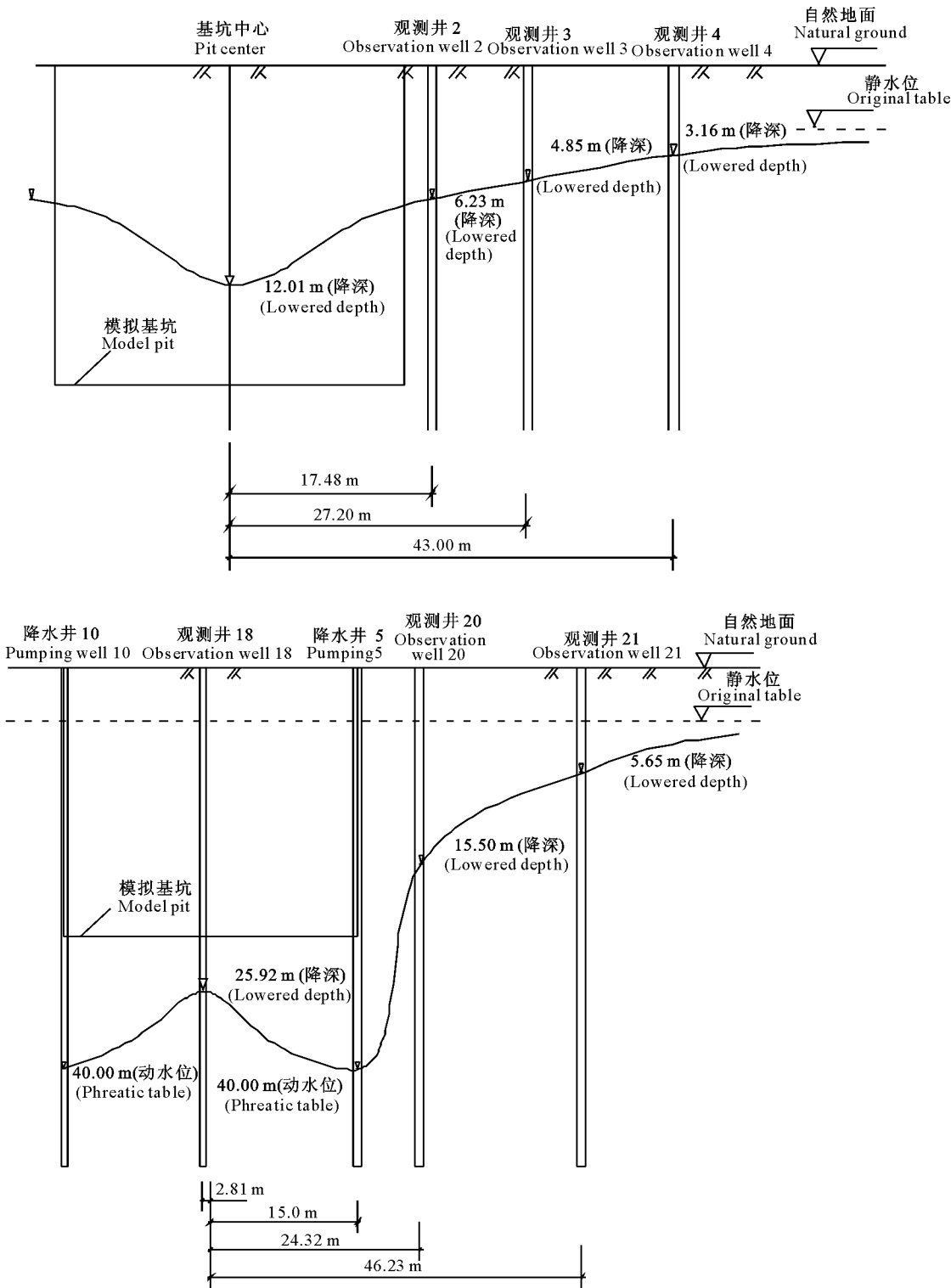


图 2 不同基坑中心降深的降水漏斗

A. 基坑中心水位降深(S)12.01 m;B. 基坑中心水位降深(S)25.92 m

Fig. 2 Depression-cone curves at different times

A. S=12.01 m beneath center of pit;B. S=25.92 m beneath center of pit

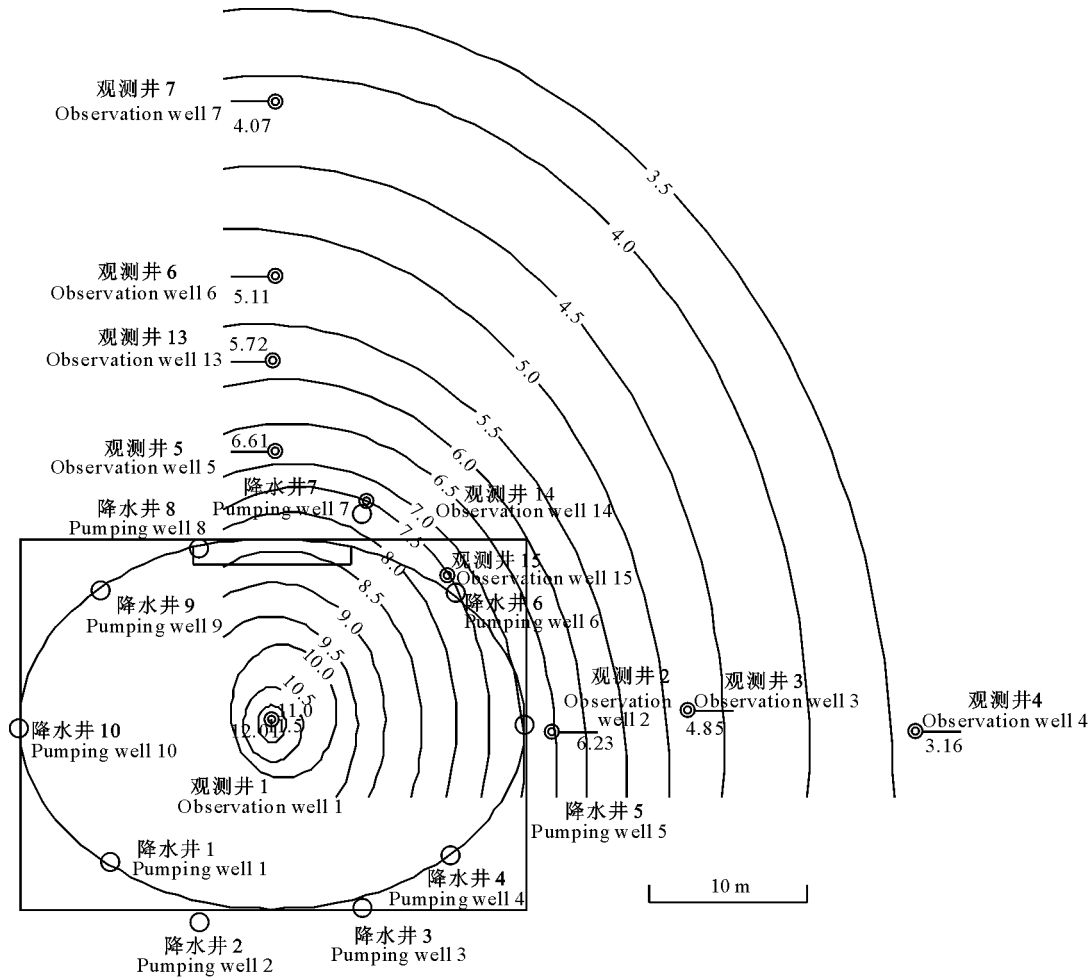


图 3 基坑中心水位降深为 11.5 m 时的降深等值线

Fig. 3 Groundwater isopiestic line when $S=11.5$ m beneath center of pit

2.2 单井出水量和基坑总出水量

试验中采用三角堰对单井抽水和群井抽水时的单井流量进行了实测。图 4 为 1#降水井井内水位降深为 9~14 m 时的出水量及 10 眼混合群井总出水量随时间的变化情况。由图 4 可见,单井出水量和混合群井总出水量均随时间的增加逐渐衰减,但单井出水量衰减较混合群井慢。试验还表明,单井出水量较混合群井中的单井出水大,反映了抽水时群井相互干扰。此外,由于场地存在一薄层中粗砂透镜体,出水量大,且混合群井中各单井出水量不均匀,其为 170~985 m^3/d ,结合当地经验,群井中的单井出水量可按 200~500 m^3/d 考虑。

在抽水试验中,从混合井抽水期间同一降深同一时段内各单井出水量的情况看,场地西南部的单井出水量(最大 985 m^3/d)明显大于东北部(最小 170 m^3/d)。这是由于在试验场地的 42.9~43.8 m 深度处存在一薄层中粗砂透镜体,且其呈不均匀分布,其西南部厚度为 2.6 m,东北部厚 1.2 m,且颗粒

由西向东逐渐变细。因此,在工程实践中,应根据不同地段选择合适的水泵类型。

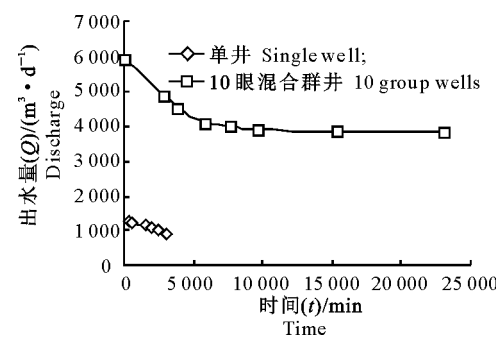


图 4 单井和 10 眼混合群井的 $Q-t$ 曲线

Fig. 4 $Q-t$ curves of single well and 10 group wells

2.3 影响半径

影响半径的计算方法与渗透系数的计算方法一样,将基坑等代为一水井,利用潜水完整井稳定流理论,对抽降初期(基坑内水位为 11~11.5 m 时)混凝土管群井、钢管群井和混合群井的抽水试验结果分

别用下式计算影响半径 R :

$$\lg R = \frac{S_1(2H - S_1)\lg r_2 - S_2(2H - S_1)\lg r_1}{(2H - S_1 - S_2) \times (S_1 - S_2)}。$$

计算可知,混凝土管群井、钢管群井和混合群井 3 种群井抽水试验的影响半径分别为 123~199.5, 125.9~147.9 和 107.1~213.8 m,平均值分别为 151,136 和 150 m。

对混合群井,基坑中心水位降深在不同深度时,由各观测井水位降深 s 与各观测井到基坑中心距离 r ,绘制 $s \sim \lg r$ 曲线,用直线将各观测井数据进行拟合,其延长线与 $\lg r$ 轴的交点即为 R ,如图 5 所示。由此确定的影响半径也在 150 m 左右。

以上 2 种方法确定的 R 十分接近,也与本地降水工程采用的经验值一致。

此外,结合图 2 和图 3 还可以看出,由于地下水位降深大,降水的影响范围也大,由此会引起较大的土体固结沉降及周边建筑物和地下管线的沉降和不均匀沉降,这些问题还需要进一步研究。

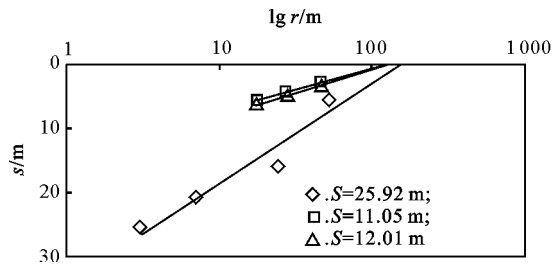


图 5 不同基坑中心水位降深(S)下各观测井水位降深(s)与各观测井到基坑中心距离($\lg r$)的关系曲线

Fig. 5 Relation curves of lowered depth(s)

of observation wells and distance($\lg r$) from observation wells to center of foundation pit

2.4 井 损

基坑降水过程是基坑内含水层的疏干过程,要求降水井达到最大出水量,井内水位降深最大。因此,井内水位往往低于井壁水位,即存在井损现象,这是抽水井中常见的一种水力现象。井损主要由以下因素引起的水头损失产生,即钻井施工时在井壁产生的泥皮增加了水流阻力、水流通过过滤器孔眼时的阻力、水流在滤水管内运动时的水头损失等。由于存在井损,因此利用抽水井中水位降深计算水文地质参数时,会造成误差,井损越大,误差越大。

为了研究黄土场地抽水井中的井损情况,试验时在抽水井管外布设测管,同时观测井内动水位和测管水位。试验结果表明,在稳定渗流和非稳定渗流情况下,均存在井损,且降深越大,井损值越大。

通过计算,在试验地西安黄土梁洼场地,井深为 50 m、井内动水位为 33.0~40.0 m、井内降深为 18.61~33.76 m 时,利用测管确定的井损百分比为 38.6%~65.5%,其中钢管井井损为 50.5%~65.5%,混凝土管井井损为 38.6%~61.8%,可见在弱透水土层中采用钢管井与混凝土管井时的井损相当,但后者较前者明显节省造价。由于井损值较大,当用降水井水位确定相关水文地质参数时,必须合理估计井损及其影响。而严格控制施工工艺,填砾符合规范要求,充分洗井,可有效减小井损,增强降水效果。

2.5 基坑内水位的最大降深及降水井深度和井间距

本次混合群井抽水试验延时 617 h,结果表明,用 10 眼群井混合抽水,井间距为 7~8 m,基坑出水量为 2 632 m³/d,基坑中心观测水位最大降深为 25.94 m(图 2b)。对 5 眼群井进行抽水试验,当基坑内水位达到相同值时,其基坑总出水量略小于 10 眼混合群井。这说明基坑总出水量是有限的,当降水井超过一定数量后,即使再增加降水井数量,基坑总出水量也不会明显增大,降水效果并不十分显著。

从不同管材降水井的降水效果来看,在相同的井间距和井深条件下,钢管滤水管(管径 325 mm,空隙率 20%)和混凝土滤水管(管径 600 mm,空隙率 2.6%~7.8%)可达到基本相同的降水效果,二者单井出水量也几乎相同,从施工成本考虑,黄土梁洼区降水井采用大直径混凝土井管更为经济。

本次试验分别进行 5 眼降水井(井间距 15~16 m)和 10 眼降水井(井间距 7~8 m)群井抽水试验,前者群井基坑出水量比后者略小,但二者基坑中心水位降深基本一致,表明二者可达到基本相同的降水效果。因此,西安黄土梁洼区降水井间距为 15~20 m 较为适宜,当降水井深度较浅时,可适当减小井间距;井深度较大时,可适当增加井间距,以优化布井数量。

在西安梁洼区,潜水含水层底界一般埋深在 50 m 左右,由井损和井间距试验成果分析,降水井最大井深不宜超过 50 m,若降水井深度在 50 m 以内不能达到降深要求时,可通过适当减小井间距予以解决。

2.6 达到设计降深所需要的降水时间

根据试验场地地层和降水井的布置情况,分析基坑内水位降深随时间的变化及其对实际工程工期等的影响。图 6 为 3 种不同降水井布置情况下,基

坑中心水位降深(S)与降水时间(t)的关系。由图 6 可见,降深越大,降水难度越大。降水井数量越多,达到相同降深的时间越短。因此,当基坑工程工期要求较紧时,可适当增加降水井的数量。从本次试验结果看,10 眼混合群井水位降深达到 25.94 m 时所需要的时间为 15~20 d。

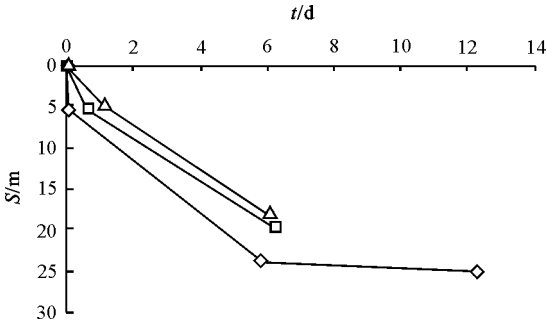


图 6 基坑中心水位降深(S)与降水时间(t)的关系曲线
—◇—, 10 眼混合管群井; —□—, 5 眼钢管群井;
—△—, 5 眼混凝土管群井

Fig. 6 Relation curves between lowered depth (S) and time (t) beneath center of foundation pit
—◇—, 10 mixed group well; —□—, 5 steel group well;
—△—, 5 concrete group well

3 结 论

通过对陕西省西安市黄土梁洼地区的潜水含水层降水试验研究,对该场地条件下基坑大降深降水工程得出以下结论:

- (1)采用基坑外布置降水井的方法,可以达到基坑内水位降深 20 m 左右要求;对基坑降水过程,可采用潜水完整井稳定流理论进行分析。
- (2)西安黄土梁洼区土层综合渗透系数为 4~10 m/d,群井中单井出水量一般为 200~500 m³/d,影响半径一般可取 150~200 m。
- (3)降水过程中井损一般为 38.6%~65.5%;在弱透水含水层中采用钢管井和混凝土管井时,二者的井损基本相同。
- (4)对于黄土场地潜水土类降水,降水井深度以不超过 50 m 为宜,井间距以 15~20 m 为宜。降水井较浅时可适当减小井间距;井深度较大时,可适当增加井间距。
- (5)基坑大降深降水时降水影响范围大,因其引起的地面下沉及对周边建筑物和地下管线的影响,还需要进一步研究。

[参考文献]

[1] 侯学渊,刘建航. 基坑工程手册. 北京 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社,1997.
Hou X Y, Liu J H, Handbook of foundation pit engineering [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997. (in Chinese)

[2] 李玉歧,谢康和. 考虑渗流作用的基坑围护结构稳定性分析 [J]. 科技通报, 2005, 21(4): 440-444.
Li Y Q, Xie K H. Analysis of the stability of retaining structure in excavation considering seepage [J]. Bulletin of Science and Technology, 2005, 21(4): 440-444. (in Chinese)

[3] 李玉歧,周健,谢康和. 渗流作用对基坑坑底回弹变形的影响 [J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1749-1752.
Li Y Q, Zhou J, Xie K H. Influence of seepage on heave of foundation pit base during excavation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(11): 1749-1752. (in Chinese)

[4] 徐耀德,童利红. 利用 Modflow 预测某基坑降水引起的地面沉降 [J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(6): 96-98.
Xu Y D, Tong L H. Prediction of dewatering induced ground settlement using Modflow [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004, 31(6): 96-98. (in Chinese)

[5] 李义昌,李宾亭. 地下水动力学 [M]. 江苏徐州: 中国矿业大学出版社, 1995.
Li Y C, Li B T. Underwater dynamics [M]. Xuzhou, Jiangsu: Publishing House of CUMT, 1995. (in Chinese)

[6] 邵艳,胡孔珠. 干扰井群变流量非稳定井流计算分析 [J]. 安徽建筑工业学院学报: 自然科学版, 2000(3): 18-51.
Shao Y, Hu K Z. The Analysis of calculating for unsteady well flow of variable discharger well interference [J]. Journal of Anhui Institute of Architecture: Natural Sciences Edition, 2000 (3): 18-51. (in Chinese)

[7] 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, 22(增刊): 2333-2337.
Sun R L, Liang X, Zhang X L, et al. Application of numerical modeling to dewatering design for foundation pit [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (S1): 2333-2337. (in Chinese)

[8] 黄勇,周志芳,王锦国. 低渗透性含水层水文地质参数确定方法及其应用 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2006, 34(6): 672-675.
Huang Y, Zhou Z F, Wang J G. Method for determination of hydro-geological parameter of aquifers with low permeability and its application [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences Edition, 2006, 34(6): 672-675. (in Chinese)

[9] 周志芳,汤瑞凉,汪斌. 基于抽水试验资料确定含水层水文地质参数 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1999, 27(3): 5-8.
Zhou Z F, Tang R L, Wang B. Determination of hydrogeological parameters of leaky aquifer based on pumping test data of partially penetrating well near the boundary [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences Edition, 1999, 27(3): 5-8. (in Chinese)