

[文章编号] 1003—4684(2020)01-0064-05

上海地区基坑地下水控制及真空混合管井的应用

宋倩云¹, 徐国兴², 王翠英¹

(1 湖北工业大学土木建筑与环境学院,湖北 武汉 430068;2 湖北楚程岩土工程有限公司,湖北 武汉 430300)

[摘 要] 针对上海地区具有潜水及承压水,深基坑地下水控制时,通常布置疏干井及降压井,以疏干潜水及降低承压水水头的现象,引入“真空混合管井”,通过辅助真空,将降水井设计成疏干、降压混合井,既能排出潜水起疏干作用,又能降微承压水起降压作用。阐述了上海地区地下水控制理念,并采用全封闭式竖向帷幕+真空管井降水方法。以上海古北某基坑工程为例,建立基坑降水数值模型,利用 Visual modflow 软件,计算微承压降压井数量;真空混合管井 74 口,降压井 4 口。采用 Visual modflow、天汉软件预测了降深及降水引起的地表沉降。水位监测结果:基坑内微承压水均在基坑底 1.0 m 以下,满足施工要求,基坑外水位为平缓状,有效控制了降水引起的地表沉降。该方法减少了微承压含水层内的降水井数量,效率提升。

[关键词] 真空混合管井;地下水控制;弱透水层;微承压水

[中图分类号] TU47 [文献标识码] A

上海地区地处长江三角洲东部滨海平原,大部分地区为弱透水层,地下水类型较多,深基坑开挖时,需要进行地下水控制。以往的降水施工中,疏干井只对潜水工作,降压井只对承压水工作,布井过多,不能有效地利用每一口井,且井的数量增加,工作效率下降,过度降水导致基坑内外土层下沉,影响环境。因此,选择一种合理有效的降水方式有助于施工成本的降低与工艺的提高,部分学者对此做了相关研究,如王忠凯、陈伟^[1]为加快渗流速度,采用多级滤管组成真空混合管井降水技术;肖瑞传、赖俊鹏等人^[2]阐述了真空管井复合降水技术能加快渗流速度,有效减少土层含水量;苗旺、邹剑峰等人^[3]发现真空管井降水技术能够有效排出土体中的毛细水和重力水,降低土体含水量等优点;马祥,罗江波^[4]通过分析管井出水含砂量以及邻近建筑物的沉降、位移的监测,验证了采用大口径管井降水方案在深基坑工程中的应用有效可靠。笔者考虑到管井的工作效率,将疏干井与降压井混合在一起,引入“真空混合管井”,既能排出潜水起疏干井作用,又能降微承压水起降压井作用;阐述了上海地区地下水控制理念,并采用全封闭式竖向帷幕+真空管井封闭式降水方法。以上海古北某基坑工程为例,建立了基坑降水数值模型,对降水方案进行优化设计,既解决了布井数量过多的难题,也提高了单个管井的使用效率;该方法对类似地层地下水控制具有鉴借作用。

1 上海地区地下水控制理念和主要方法

1.1 上海地区地下水类型及水文地质特征

上海地区地处长江三角洲东部滨海平原,地下水类型具有三角洲的水文地质特点,可分为浅部上层滞水、互层土中弱透水、微承压的层间水和深部砂层较高水头的承压水。对基坑工程有直接影响的主要是 50~60 m 以上的上层滞水和层间水。

上层滞水,主要存在于表层填土和淤泥质软土层中,其渗透系数 $K < 10^{-6}$ cm/s,分布局限;层间水,埋藏于互层土内的粉土或粉砂层中,弱透水性,渗透系数 $K < 10^{-4}$ cm/s,具微承压性,与地表水体无直接水力联系;深层承压水,含在 50~60 m 以下的更新世(Q_3)的陆相冲积砂层中,砂中粘粒含量较高,透水性弱($K \leq 10^{-4}$ cm/s),受古河道控制,承压水头较高。

1.2 上海地区地下水控制理念和主要方法

1) 地下水控制理念 针对上部 50~60 m 内含水层具有互层性、弱透水、微承压和含水层本身及相邻地层均欠固结的特点,下部承压含水层埋深大,只对超深基坑有基底突涌影响的现象,地下水控制的基本概念可概括为:上部的上层滞水和层间水以帷幕隔渗为主,坑内降水疏干,不宜采用坑外降水疏干措施;深部承压含水层属超固结、低压缩性地层,且

[收稿日期] 2019—09—02

[第一作者] 宋倩云(1997—),女,湖北潜江人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为深基坑工程

[通信作者] 王翠英(1965—),女,内蒙古包头人,湖北工业大学教授,研究方向为深基坑工程

隔水底板很深,故只需采用深井减压降水措施。

2)地下水控制方法 地下水控制的主要方法是:上部采用各种工法的竖向隔渗帷幕隔断坑外水以控制坑外地面沉降,坑内采用轻型井点或真空管井等强力降水措施疏干弱透水层;下部采用超深管井降低承压水头。

上海地区对上部层间水“以隔渗为主降疏为辅”,且重点是防止深厚的欠固结土地层失水导致地面不均匀沉降。位于长江三角洲上的上海,地层为海陆交互相互层结构,微承压含水层特点是厚度小、弱透水($K=10^{-5} \sim 10^{-4}$ cm/s),且具较高压缩性,影响半径小且随降深加大不再继续扩大,因而降水过程中地面沉降量大,尤其是沉降差普遍大于 3‰。由于地貌单元和地质条件的特点,普遍采用全封闭式竖向帷幕+真空管井封闭式降水,避免在坑外开放式降水。

2 真空混合管井降水

降水管井中辅助真空,弱透水层、微承压含水层设置滤管,其既能排出潜水起疏干井作用,又能降微承压水起降压井作用,“两井合一”的真空混合管井^[1]。真空混合管井结构见图 1。

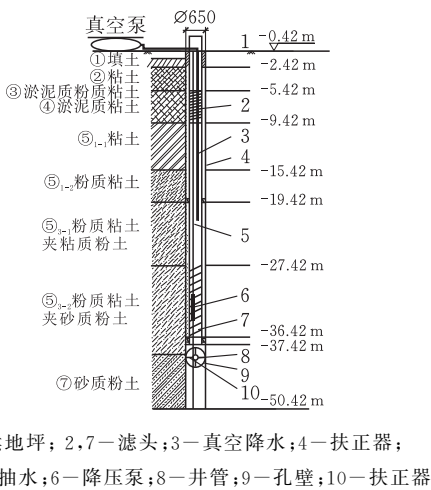


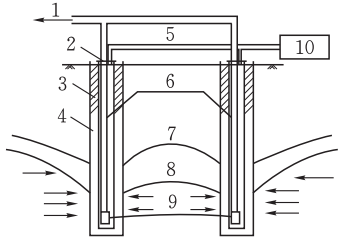
图 1 地层及真空混合井结构示意图

2.1 辅助真空的作用

真空管井降水主要是排出基坑中的自由水。自由水以液态存在于地层中,受重力、压力水头差及毛细作用自由运动;当土层渗透性差时土中的自由水则很难自然排出或排出缓慢,仅用管井降水效率低下,在这种情况下可以通过施加外力来加快地下水的排出速度。在辅助真空作用下,土体受到外部负压力作用,形成的真空负压抵消表面张力产生的负孔隙水压力,打破了原有的平衡状态,从而毛细水被大量抽出,增加出水量。

采用真空装置将井管内空气排出,井管内外会

产生一个气压差 $-u$,这部分气压差增加了水力梯度,同时基坑内井管周围软弱粘土层随着等向应力 $-u$ 的增加而固结,有效疏干潜水,使得给水度增大,增大了出水量,即疏干降水。图 2 为辅助真空的深井降水系统示意图。采用真空泵或其它设备来增加深井井管和填料中的真空度。真空度的大小可以通过调整真空泵的功率和数量实现。



1—出口管;2—密封盖;3—粘土封墙;4—中粗砂填料;
5—减压管;6—井管、真空管;7—无辅助真空降深曲线;
8—辅助真空降深曲线;9—潜水泵;10—真空泵

图 2 辅助真空的深井降水系统示意图

2.2 真空混合管井构造

混合井根据潜水含水层及微承压含水层的埋深及分层挖土深度,合理设置 3 个滤管,滤管长度 2 m,采用圆孔过滤器,外包 40 目滤网,以确保有效降水。根据土方开挖深度,在浅部潜水层内,混合井前期起疏干井作用,井口密封,井身在开挖外露后及时妥善封闭,加真空,利用真空虹吸原理进行潜水疏干,方便土方开挖;随土方开挖深度加大,在微承压含水层内,起降压井作用,井内布置潜水泵进行抽水降压,防止基坑突涌,确保安全;潜水含水层土方开挖、井身外露后,对滤管有可靠的封闭措施,确保井身真空度,确保混合井使用功能从疏干顺利转变为降压。混合井构造见图 3。

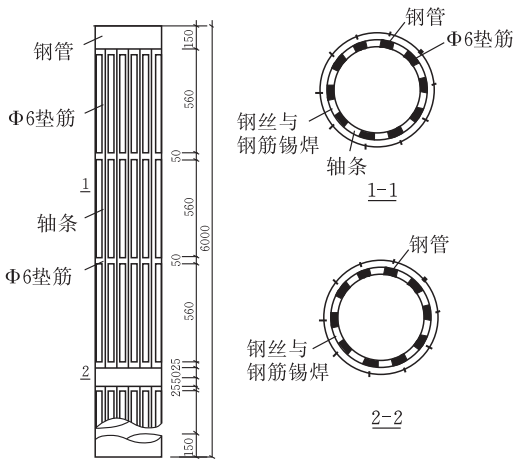


图 3 真空混合井构造示意图 mm

3 渗流计算基本理论

3.1 渗流非稳定流方程

非稳定渗流微分方程^[8]为:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_{xx}\frac{\partial H}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_{yy}\frac{\partial H}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_{zz}\frac{\partial H}{\partial z}\right)+W=\mu\frac{\partial H}{\partial t}$$

式中： μ 为给水度； k_{xx} 、 k_{yy} 、 k_{zz} 为 x 、 y 、 z 方向渗透系数，m/d； H 为点 (x,y,z) 在 t 时刻的水头值，m； W 为源汇项，t/h；

3.2 定解条件

初始条件： $H(x,y,z,t)|_{t=0}=H_0(x,y,z,t_0)$

边界条件： $H(x,y,z,t)|_{\in S_1}=H_1(x,y,z,t)$

式中： $H_0(x,y,z,t)$ 为点 (x,y,z) 处降水前的初始水位(m)； t 为时间(d)； S_1 为一类边界条件，基坑外的边界取降水影响半径边缘，为第一类边界条件； $H_1(x,y,z,t)$ 为第一类边界条件处水位，m。边界定义为定水头边界，水位不变。

4 工程实例

4.1 工程概况

上海古北某工程拟建一幢甲级办公楼及商业裙房组成的综合商业楼，地下三层，基坑面积 16 572 m²，开挖深度 20.30 m，开挖前场地标高 3.9 m；基坑形状近似呈长方形，南北长约 120～190 m，东西方向宽约 110 m，地层结构见图 1。

4.2 水文地质条件

基坑浅部属于潜水类型，潜水水位 0.5～1.2 m；第⑦层土层为上海地区常规的第一承压水含水层，埋深在 40.0～42.0 m 之间，承压水水位埋深 7.84～8.32 m，呈周期性变化。

4.3 降水方案设计

因混合井必须同时满足疏干潜水及降低微承压水头的要求，所以首先按照疏干井及微承压降压井互相独立的原则分别计算数量，然后按“两井合一”的原则进行叠加合并，确定最终的布井数量，可以全部采用混合井，也可以是少量疏干井结合大量混合井。

4.3.1 疏干井数量计算 根据潜土层纯疏干井的思路，疏干井数量计算公式：

$$n=A/a \tag{1}$$

式中： n 为井数(口)； A 为基坑降水面积，m²； a 为单井有效抽水面积，m²。

单井有效抽水面积 a 在上海地区取 200 m²，由式(1)得： $n=A/a=16572/200=82.86$ 口，因施工现场不确定因素较多，为安全储备一口井，取 84 口井。

基坑内浅水疏干井建议采用多段滤管真空深井，根据本工程特点和土质地质资料，拟定 200～300 m² 布置一口疏干井，避开支撑、立柱。

4.3.2 微承压降压井数量计算 根据前期水位地

质勘探资料及现场抽水试验取得的技术参数，以地下水渗流数值模拟及地面沉降预测与控制理论为指导，通过专业软件 Visual modflow，确定微承压降压井数量。

1) 基坑降水数值模拟模型建立 根据基坑的地理信息，以基坑为中心，降水井影响半径以外为边界，在 Visual modflow 中建立模型(图 4)。

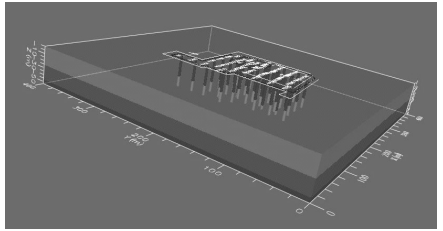


图 4 含水层三维数值模拟图

2) 微承压降压井数量计算 通过 Visual modflow 计算得出降压井 6 口。 $n_{疏}$ (疏干井) $>n_{微承压}$ (微承压井)，则总降水井数量 $n=84-6=78$ 口，其中针对潜水及微承压水(开挖深度 19～20 m)的混合井 74 口，针对塔楼电梯井承台坑中坑(开挖深度 24 m)的降压井 4 口。降水井点平面布置图见图 5。

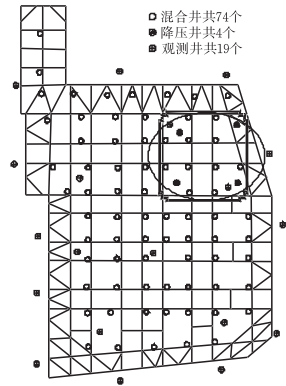


图 5 降水井点平面布置图

4.3.3 降深预测等值线图

1) Visual modflow 软件降深预测 采用 Visual modflow 软件模拟第⑤3 层含水层水头最终降深预测等值线见图 6。数值模拟结果：水位降深超过开挖深度以下 1.0 m，满足土方开挖要求；提前降水 30 d，保证微承压水头降至安全高度。

2) 天汉软件降深预测等值线 通过天汉软件计算得出第⑤3 层含水层水头降幅等值线见图 7。结果：降深能满足开挖要求。

4.3.4 混合井井深确定 因潜土层埋深小于微承压含水层，故混合井井深以降微承压水为目的进行确定，其中第⑦层微承压水埋深在 40.0～42.0 m 之间，则： h (混合井)=微承压含水层层顶埋深+2.00m(滤头长度)–开挖前场地标高=40.0+2.0–3.9=38.1m，取井深 38 m；在第⑦层微承压水中

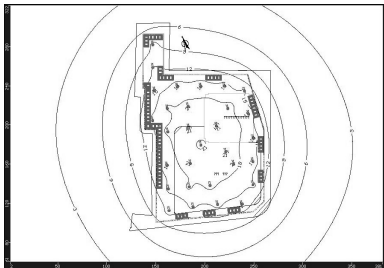


图 6 Visual modflow 预测 第⑤3 层降深等值线

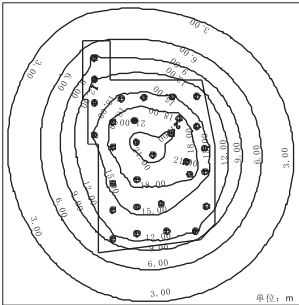


图 7 天汉软件预测 第⑤3 层降深等值线

应有 2.0 m 的滤管。

4.4 预测地面沉降

降水引起的地面沉降理论公式：

$$\Delta S_{\text{总}} = - \sum_{i=1}^N \frac{\gamma_w \cdot dH_i}{E_{si}} S_{0i}$$

式中： γ_w 为水的重度， kN/m^3 ； E_{si} 为压缩模量； S_{0i} 为初始厚度， m 。

1)采用 Visual modflow 预测 采用 Visual modflow 有限差分法,由渗流方程求出某一时刻的水位降深,并对土方开挖到基坑底工况时,对降水引起周边地表沉降进行计算,计算结果沉降等值线见图 8。

2)采用天汉软件预测 通过天汉软件计算得出地面沉降等值线见图 9。

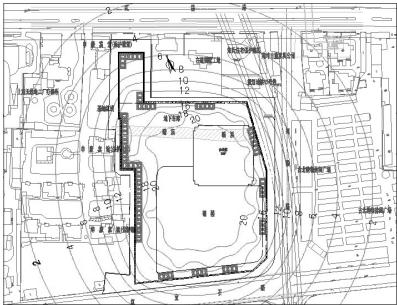


图 8 Visual modflow 预测降水引起地表沉降等值线

由上述计算得出,采用真空混合井降水,基坑内沉降量在 13~20 mm 之间,距基坑边 0~2 h (h 为基坑开挖深度),地表沉降量为 5~12 mm,距基坑边距离 $>2 h$,由于测得地表沉降量小于 5 mm,则该布井方式满足基坑安全及周边环境的要求。综上所述得出混合井方案满足本工程降水要求。

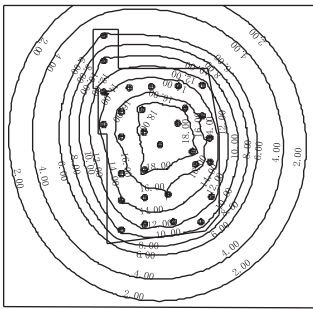


图 9 天汉软件预测降水引起地表沉降等值线

5 地下水位监测

基坑外水位监测点布设 12 点,原则上在基坑每侧每隔 20~50 m 设置一孔,本工程根据实际情况,基坑内西面、北面约 30 m 设置一孔,东面、南面约 50 m 设置一孔,基坑内水位监测布置 7 孔,水位监测孔平面布置见图 5;基坑内微承压水位监测结果见图 10,基坑外西、南侧水位监测结果见图 11。

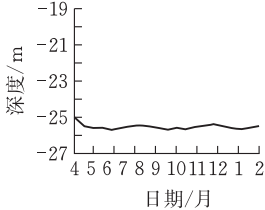


图 10 基坑内微承压水位监测结果

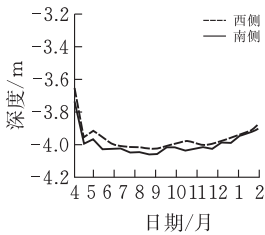


图 11 基坑外西、南侧水位监测图

图 10 结果显示,基坑内微承压水观测孔水位均在基坑底 1.0 m 以下,满足施工要求水位低于开挖深度 1.0 m 以上,很好地保证了土方开挖及基坑的安全;图 11 结果显示,在降水的前两个月,基坑外水位下降较大,基坑降水结束后,水位变化较小,并逐渐回升,整个水位变化在报警值之内,有效控制了降水引起周边地表的沉降,降水对周边环境的不利影响降低到最小,采用的真空混合井降水方法取得了很好的效果。

降水的同时基坑也在开挖,基坑周边地表的沉降监测值为降水、基坑开挖共同引起的沉降量,不易分开,故本文未表述降水引起地表沉降的监测结果。

6 小结

1)上海地区地下水浅部为上层滞水、互层土中

弱透水、微承压的层间水和深部砂层微承压水,且含水层都属于弱透水层。地下水控制的理念为:上层滞水和层间水以帷幕隔渗为主,坑内降水疏干,承压含水层采用减压降水;即采用全封闭式竖向帷幕+真空管井封闭式降水。

2)以上海古北某基坑工程为例,采用地下连续墙+真空混合管井的降水方法,按单井有效抽水面积计算疏干井数量;建立了基坑降水数值模型,利用 Visual modflow 软件,计算微承压降压井数量;最后采用真空混合管井 74 口,坑中坑降压井 4 口,总降水井数量 78 口。

3)分别用 Visual modflow、天汉软件预测了降深及降水引起的地表沉降,并给出降深、地表沉降等值线图。水位监测结果显示,基坑内微承压水均在基坑底 1.0 m 以下,满足施工要求,基坑外水位为平缓状态,有效控制了降水引起的地表沉降。

[参 考 文 献]

[1] 王忠凯,陈伟.真空混合管井降水技术研究与应用[J].

人民长江,2016,47(22):60-63,67.

[2] 肖瑞传,赖俊鹏,区穗辉,等.深厚复杂软土地层深基坑真空降水处理效果分析[J].广东土木与建筑,2018(3):39-41.

[3] 苗旺,邹剑峰,詹志习,等.真空管井降水技术在深埋弱透水层中的应用研究[J].土工基础,2017,31(5):549-553.

[4] 马祥,罗江波.地铁车站超深基坑工程大口径管井降水的设计与施工[J].施工技术,2012,41(13):13-17.

[5] 张焕华,贾晓娟.辅助真空的深基坑深井降水技术及工程应用[J].煤炭工程,2003(11):36-38.

[6] 范文超,蔡新.新型集成管井降水强夯法处理冲填土地基试验研究[J].施工技术,2017,46(20):49-53.

[7] 黄峰.真空管井降水机理研究[D].中国地质大学(北京),2014.

[8] 姚天强,石振华.基坑降水手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2006.

Application of Foundation Pit Groundwater Control and Vacuum Mixing Pipe Well in Shanghai Area

SONG Qianyun¹,XU Guoxing²,WANG Cuiying¹

(1 School of Civil Engin.,Architecture and Environment ,Hubei Univ.of Tech.,Wuhan 430068,China ;
2.Hubei Chucheng Geotechnical Engineering co. LTD , Wuhan 430300, China)

Abstract: In view of the diving and confined water in the Shanghai area, the groundwater control of deep foundation pits is usually arranged with dewatering wells and pressure-reducing wells to drain the diving and reduce the pressure head of the pressurized water, introducing a “vacuum mixing tube well” through the auxiliary vacuum. The design of the precipitation well is a dewatering and pressure-reducing mixing well, which can not only discharge the diving and dewatering, but also reduce the pressure of the micro-pressure water. The groundwater control concept in Shanghai is expounded, and the fully enclosed vertical curtain + vacuum tube well precipitation method is adopted. Taking a foundation pit project in Gubei of Shanghai as an example, a numerical model of foundation pit dewatering was established. The number of micro-pressure-reducing wells was calculated by Visual modflow software, with 74 vacuum mixing tube wells and 4 depressurization wells. Visual modflow and Tianhan software were used to predict surface subsidence caused by deepening and precipitation. According to the water level monitoring results, the micro-confined water in the foundation pit is below 1.0m at the bottom of the foundation pit, which meets the construction requirements. The water level outside the foundation pit is gentle, which effectively controls the surface settlement caused by precipitation. The method reduces the number of precipitation wells in the micro-pressure aquifer and improves the efficiency.

Keywords: vacuum mixing tube well; groundwater control; weak aquifer; micro-pressure water

[责任编辑:裴 琴]