

基于无止水条件下富水砂卵石层深基坑降水论证分析

穆清君, 陈诚

(中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430012)

摘要:以襄阳某深基坑工程为依托,现场采取单井及群井抽水试验,将试验数据、理论计算及数值模拟结果进行对比分析,得出该区域地下水及周围湖泊的补水规律,并复核地层渗透系数,为后续采用合理的止水措施提供必要的依据。试验发现:36口抽水井满功率工作后,仍未能达到地下水位降至基底以下1 m的要求,含水层给水度大;抽水井附近与远端的观测井降水速度差异很大,表明地层透水性差,前期以消耗地层静储量为主;以现场实测数据为依据,采用稳定流解析法计算得出的平均渗透系数为56.97 m/d,非稳定流算法得出的平均渗透系数为64.5 m/d,从安全角度考虑,综合渗透系数按64.5 m/d取值,为后续格型地连墙的施工提供依据。当确定了降水井数量和布设位置后,为了缩短工期,适当增大水泵功率可达到缩短工期的目的;当地下水位已降至设计深度后,可按需降水,适当减小开启水泵的数量,可减小地下水的开采总量,保护地质环境。

关键词:深基坑;降水试验;渗透系数;补水规律;富水砂卵石层

中图分类号: U416

文献标志码: A

城市建设的发展日新月异,有限的地上土地资源难以满足社会进步的需要,地下空间的进一步开发利用已迫在眉睫,基建项目中基坑的开挖深度也越来越深,基坑地下水处理的合理与否直接关系到整个工程的进度和成败,有效降水+止水联合应用控制基坑地下水的方法,早已成为广大工程界的共识^[1-4]。富水砂卵石地区具有地下水储量丰富、含水层渗透性强且补水速率快等特点,在该区域实施井点降水,即便采用止水帷幕也难以隔断地下水的补给,施工难度很大。因此,在施作止水帷幕隔断场外地下水之前,采用合理的方法预测降水效果,对于确保场内深基坑施工边坡稳定具有重要的意义^[5-8]。

对于施工降水成效,解析法存在较大的局限性,其不能较好地运用于复杂的地质环境,而有限元分析法能够较好地模拟非均质及不等厚等水文地质条件,因而更加普遍应用于分析地下水的控制,许多学者在这个领域做了大量研究。徐永亮等^[9]采用数值模拟方法论证并分析了北京某开放式深基坑工程的降水方案,指出在未能闭合围降的场地降水,井的布设间距最低为6 m,且单井的出水量需大于等于43 m³/h;袁斌等^[10]对比分析了在富水砂砾地层中,不采用挡水帷幕以及采用不同深度的挡水帷幕条件下,将深基坑降水至安全水位时的总抽水量、基坑内外水位及降水引起的坑外地表沉降,得出了挡水帷幕深度对降水后环境

影响的规律,并在综合考虑工程对环境影响后,得到了最优化的基坑降水方案;马昌慧等^[11]采用数值模拟软件 Visual Modflow 研究了武汉某深基坑工程的地下渗流场,并利用分层总和法分析其地基变形场,通过研究发现,基坑外的水头与距基坑的距离成正比,地基沉降变形与距基坑的距离成反比,距离越远水头越大,呈逐级递增的变化趋势,另外,止水帷幕落底越深降水效果越好,且可以有效减小地表沉降及降低对基坑周边渗流场的紊乱影响;杨强等^[12]亦通过 Visual Modflow 软件模拟了实际基坑降水过程,充分利用了软件对基坑中井位、井数、井结构、涌水量、井径等灵活确定的特点,实现了可视化、预期化的操作。

该文依托湖北襄阳某深基坑工程,其基坑开挖平均深度约25 m,该区域存在渗透性极强的砂卵石潜水含水层,设计降水深度大于12 m。现采用降水试验辅以数值模拟分析,论证能否达到设计降深要求并验证渗透系数,为后续选择合适的止水帷幕方案提供合理的依据。

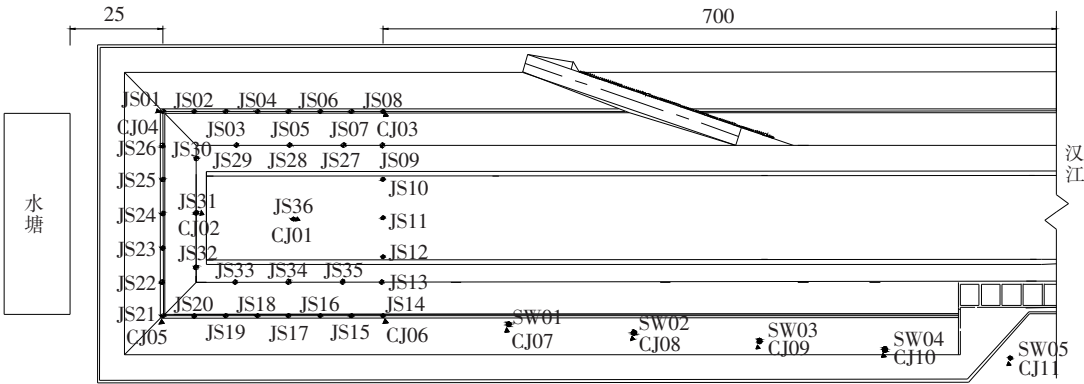
1 工程背景

湖北襄阳某深基坑工程最大开挖深度约25.5 m,此次为生产性降水试验,降水井在后期可继续使用,因此井位布置时尽量不影响基坑的正常开挖。综合考

虑,此次试验井横向布置 4 排,即布置在边坡平台及坡脚位置,具体降水井数量可通过预测的基坑总涌水量及单井出水能力计算。

计算得出此次试验段共需布置降水井 36 口,如图 1 所示,环向封闭布设,内环纵向间距约 25 m,外环间距约 15 m。36 口试验井中包含了 6 口观测井兼做备

用井,暂定为 JS01、JS08、JS14、JS21、JS31、JS36,为了解群井外侧不同距离处以及污水处理厂附近地下水位下降情况,另在群井外侧(JS14 观测井)与污水处理厂之间间距约 60 m/口布置了 5 个水位监测孔(SW01~SW05)。试验井孔径为 600 mm、井管直径为 325 mm,其他细节如图 2 所示。



注:JS 表示降水;CJ 表示沉降;SW 表示水位。

图 1 试验降水井布设平面示意图(单位:m)

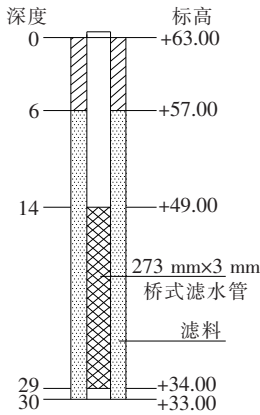


图 2 试验井结构示意图(单位:m)

2 无止水条件下降水试验方案设计

2.1 试验目的

依托工程深基坑段主要为强透水性的砂卵石层,厚度为 55~72 m,且与汉江水存在密切的水力联系。此次选取东汉干坞段 K12+567.5~K12+667.5 长约 100 m 的距离为试验段,在无止水措施条件进行试降水,旨在观测敞开式条件下,能否将试验段水位降低至基底以下 1 m(标高约 51.00 m),并对渗透系数进行复核。通过计算,降水井深取值为 30 m。

2.2 地表沉降监测点布设

地面沉降观测点与水位观测井(孔)成组布设,每

个水位观测井(孔)附近埋设一个地面沉降观测点(CJ01~CJ11),以获取水位下降引起的地表沉降差。

2.3 抽水工况安排

拟采用单井和群井两种降水模式分阶段进行。

(1) 第一阶段:单井抽水

拟选取 JS17 为抽水井,进行 1 个降深抽水,分别在平行、垂直河流方向进行水位下降观测,暂选取 JS14、JS16、JS18、JS20、JS34、JS36 为此阶段水位观测井,待水位稳定 24 h 后停止抽水,并进行水位恢复观测。

(2) 第二阶段:群井抽水

分 3 个降深进行,第一次开启 18 口,为奇数号井,JS01、JS21、JS31 兼做观测井,更换开启 JS02、JS20、JS24,直至水位稳定;第二次加开至 30 口井抽水;第三次除了预留作为观测井的 JS36 号之外,其余 35 口全部开启。群井围合范围内水位降至要求水位后,维持抽水 3~5 d,继续进行观测,待水位和地表沉降变化稳定后停止抽水,并进行水位恢复观测。

2.4 试验数据采集

2.4.1 静止水位观测

在正式抽水前先做好地下水静止水位的原始记录。观测频率为每 30 min 一次,当出现 4 h 内水位无持续上升或下降趋势,且变幅不超过 2 cm 时,记录此时的水位,即为静止水位。

2.4.2 动水位、水量观测

(1) 第一阶段抽水开始后,对涌水量和动水位进

行观测,观测频率宜为抽水开始后逐级递增,第 1 min、2 min、3 min、4 min、6 min、8 min、10 min、15 min、20 min、25 min、30 min、40 min、50 min、60 min、80 min、100 min、120 min 各测一次,以后隔 30 min 测一次,直到水位稳定。抽水结束后,观测恢复水位的时间也按此要求。

(2) 第二阶段开始进行群井抽水时,观测频率宜为抽水开始后每 5 min 测一次,其后宜每隔 30 min 或 60 min 测一次;抽水停止后进行恢复水位观测,观测

时间间隔同抽水水位观测。

2.4.3 沉降观测

大范围持续降水会对地表沉降产生影响,在整个试验抽水过程中,对场区内的地表进行沉降监测,观测频率为 1 次/d。为了降低抽水过程中的扰动影响,垂直观察控制点应远离抽水范围。

2.5 抽水试验设备

抽水试验设备及配套装置如表 1 所示。

表 1 抽水试验及水位观测设备

名称	规格	数量	性能或用途	功率或性能
水泵	QS200—40—37	4 台	额定流量 200 m ³ /h	37 kW
	QS110—30—15	8 台	额定流量 100 m ³ /h	15 kW
水表	DN—100 型、DN—8 型	3 台	数字水表仪,测量抽量	可电子记录
抽水水管	10、16、15、24 cm 钢管	800 m	抽水试验抽水管	
测量器材	电测水位仪	1 套	测量水位	人工测量
	液位变送器	13 只	测量水位	电子采集
远程传输设备	DATA—6216	13 套	数据采集、传输	

3 单井降水试验结果分析

3.1 静止地下水位

抽水试验过程中,每阶段抽水前均记录静止地下水位,单井降水、群井降水工况下水位标高平均约 62.80 m。单井抽水期间,出现暴雨天气,导致恢复水位较初始水位高约 0.20 m,说明地表透水性好,雨水对地下水影响较大。

3.2 单井降水工况

现场于 2018 年 7 月 26 日 07:58 选取 JS17 作为抽水主井,开始单井降水试验。分别对 6 个观测孔进行水位观测,抽水持续时间 30 h,测得平均抽水量约

为 3 210 m³/d,最大水位降深约 0.70 m,试验结果见图 3 及表 2。

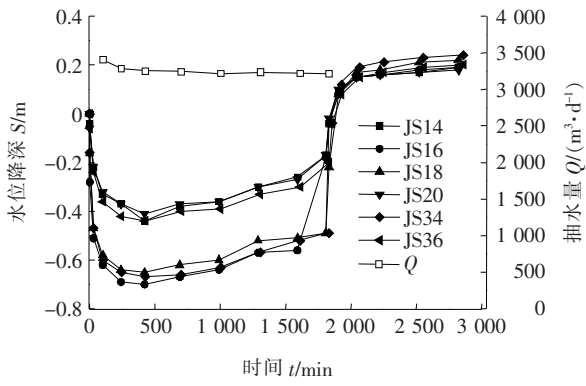


图 3 JS17 单井抽水试验 $Q-t$ 、 $S-t$ 曲线

表 2 JS17 单井单降深抽水试验结果

阶段	抽水时间	历时/ h	各井水位降深/m						抽水量/ (m ³ ·d ⁻¹)
			JS14	JS16	JS18	JS20	JS34	JS36	
抽水阶段	26 日 07:58—27 日 14:00	30	0.44	0.70	0.65	0.40	0.69	0.43	3 210
水位恢复	27 日 14:00—28 日 07:00	17							

由图 3 可知:
(1) 抽水开始约 3.5 h,观测井水位已逐步趋于稳定,但持续抽水 6~8 h 后,天气突降暴雨,地表水汇集

导致观测井水位线性上涨,至停止抽水时,水位上涨 16~20 cm,水位恢复结束后,较试验前上涨 19~24 cm,进一步表明该区域地层透水性好,地表雨水补给

地下水迅速。

(2) 抽水过程中,水位较快稳定,恢复也很快,且曲线的拐点明显,反映了含水层分布较广、透水性较好、水量补给较为充沛的特点。

4 群井降水试验结果分析

4.1 降水工况

(1) 2018 年 7 月 27 日 07:00,单井试验结束且水位已恢复,开始进行 18 口井的单井抽水试验,但由于抽水量大、现场排水系统不畅通,无法将抽出的水排除场外,群井试验被迫中止,进行排水系统修建。

(2) 至 2018 年 8 月 11 日 08:30,现场重新进行群井试验:① 第 1 次先开启 18 口降水井,抽水 36 h 后,群井中心(JS36 号观测井)水位降深约 5.93 m;② 第 2 次开启 30 口降水井,抽水 21 h,JS36 观测井水位降深约 7.91 m;③ 第 3 次开启 35 口降水井,抽水 27.5 h,总出水量 7.6 万 m³/d,JS36 观测井水位降深约 9.02 m,未达到要求水位标高;④ 抽水主井内动水位较高,单井未达到最大出水能力,因此,准备更换更大功率的抽水泵,停止抽水并进行水位恢复观测。试验结果见图 4、5。

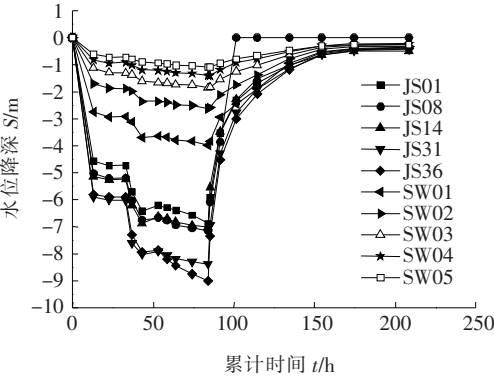


图 4 群井降水试验观测井 S-t 曲线

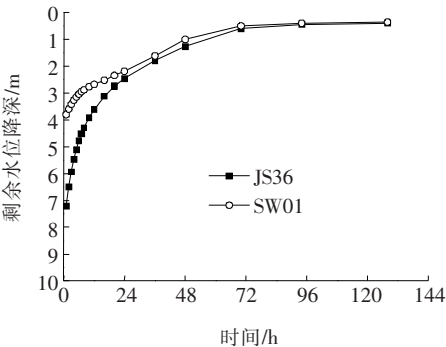


图 5 JS36、SW01 观测井水位恢复曲线

(3) 2018 年 8 月 21 日下午 17:40,现场更换了 12 台 37 kW 水泵(额定流量 200 m³/h)抽水后,水位仍未达到要求的水位标高(+51.00 m),具体见图 6。群井外围观测孔水位下降约 0.6 m(较上次),中心水位下降约 0.10 m(较上次),并且呈缓慢下降趋势。

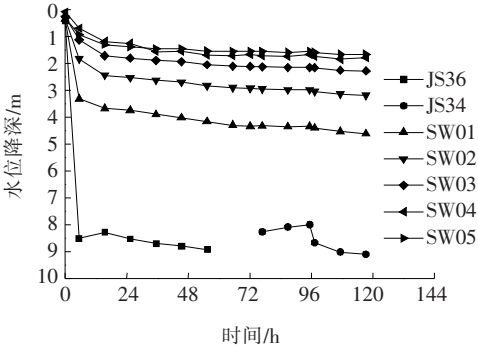


图 6 更换水泵后各观测井水位降深-时间曲线

更换了大功率的抽水泵后,原有功率 15 kW 的 23 台水泵出水量均变小,平均为 85 m³/h,12 台 37 kW 的水泵抽水量也只能达到 140 m³/h,总抽水量约 8.7 万 m³/d。

4.2 数据分析

(1) 编号 JS 的观测井位于抽水井附近,在抽水前期水位下降迅速,表明该区域地层透水性好;而编号为 SW 的外侧观测井在抽水进行一段时间后才开始缓慢出现水位下降,特别是 SW03、SW04、SW05 约在抽水 30 min 后出现水位下降,表明前期以消耗地层静水储量为主,含水层给水度大。

(2) 当开启了 30 口抽水井后,观测井水位先下降到一定深度,随后出现一定程度的上涨,上涨幅度与距离观测井的距离成正比,距离越近,涨幅越明显,这表明在持续抽水过程中,地层中的地下水获得了新的水源补给。同时周边池塘水位出现明显下降,至停止抽水时,池塘水位下降约 0.80 m;停止抽水后,水位继续下降约 0.20 m。

池塘水位下降进一步表明该区域地层透水性强,地表水与地下水之间存在明显的水力联系,地下水位降深越大,水头差导致地表水渗入越快。

根据卫星地图量测,离试验区最近池塘面积约 58 000 m²,按水位下降 0.8 m 计算,考虑池塘底部不平整,按修正系数 90% 换算,渗透量约为 11 800 m³/d,占抽水量的 15.5%,此次尚未考虑远处池塘的补给量。

更换大功率抽水泵后,池塘水位进一步快速下降,至停止抽水塘底基本暴露,水位下降约 1.6 m。

标准曲线。

表 4 Neuman 公式拟合结果

观测井 编号	导水系数 $T/$ ($\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$)	渗透系数 $K/$ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	给水度 S_y	距抽水井 距离/ m
JS16	4 060	62.5	0.103	15.18
JS14	4 200	64.6	0.274	43.49
JS34	4 180	64.3	0.265	15.79
JS36	4 400	67.7	0.198	45.12
JS18	4 340	66.8	0.190	14.15
JS20	3 980	61.2	0.192	46.64
平均值	4 190	64.5	0.204	

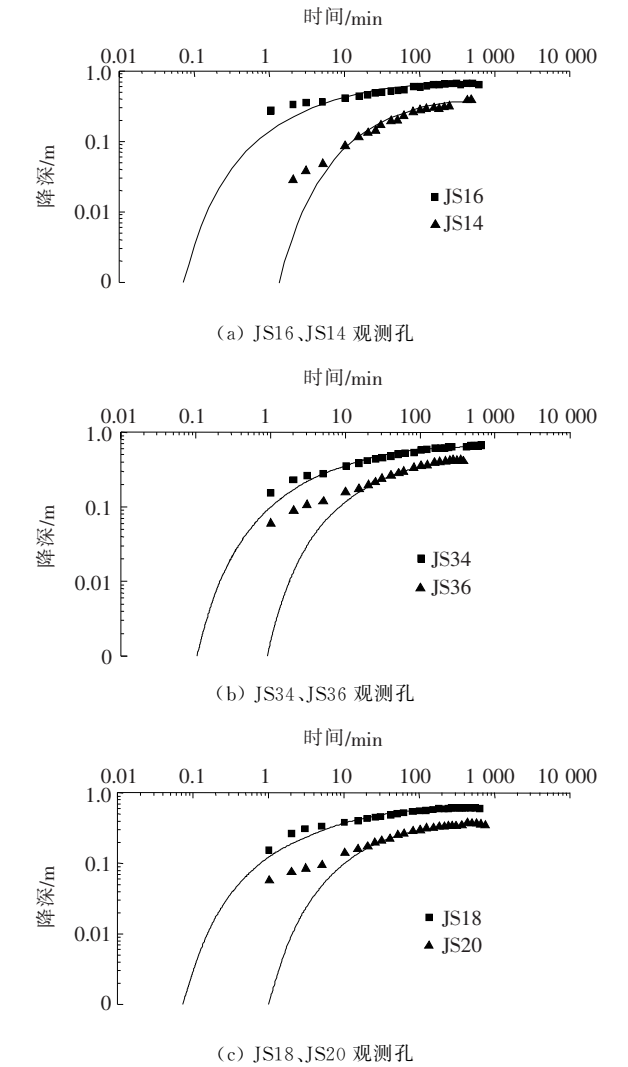


图 9 降深时间曲线与 Neuman 拟合曲线

6 结论

(1) 在实施落地止水帷幕前,在基坑范围内进行

试验降水,从降深结果可知:已完成的 36 口降水井从井位和数量上均不能满足要求,表明该区域含水层给水度大,抽水前期以消耗地层静水储量为主;池塘水位下降进一步说明地层透水性好,地表水与地下水之间存在明显的水力联系,水位降深越大,水头差越明显,地表水渗入越快。

(2) 单井抽水试验时,水位降深较小,水头差异不明显,使前期周边池塘和排水沟入渗的影响也相对较弱,此时计算得到的水文地质参数较能反映地层渗透性能;当降水井数量和位置一定的前提下,地下水位降至设计降深前适当选择大功率水泵抽水,可有效缩短工期;地下水位降至设计降深后,可按需降水,在保证地下水位满足设计降深时,适当减小开启水泵的数量,可保护当地生态环境,减少地下水资源浪费。

参考文献:

[1] 秦坤元,刘五一,肖育斐,等.深基坑开挖对邻近边坡稳定性影响与控制[J].中外公路,2019,39(4):15-19.

[2] 李再兴,李静,宋鹏飞,等.三维数值模拟技术(Visual Modflow)在基坑降水中的应用[J].地下水,2016,38(2):22-25.

[3] 王海林.跨海隧道填海围堰内深大基坑支护选型与设计技术[J].中外公路,2018,38(6):190-193.

[4] 焦莹,刘玉琦,杨建民,等.天津站交通枢纽基坑降水工程策略[J].岩土工程学报,2008,30(S1):299-305.

[5] 张学文.建筑密集区地铁车站深基坑施工关键技术研究[J].中外公路,2018,38(2):40-44.

[6] 金生吉,陈华,于贺,等.沈阳快速干线隧道深基坑施工监测与分析[J].中外公路,2018,38(1):220-224.

[7] 崔永高.深厚强透水含水层超大基坑降水群井效应研究[J].工程地质学报,2015,23(3):574-579.

[8] 李宝健.复杂条件下锚碇深基坑开挖安全控制技术[J].中外公路,2014,34(1):209-212.

[9] 徐永亮,张晋勋,高文新,等.深厚卵石地层超深基坑降水论证分析[J].施工技术,2019,48(7):6-12.

[10] 袁斌,武永霞,廖少明,等.基于数值模拟的富水砂砾地层深基坑降水方案优化[J].工程勘察,2017,45(1):34-39.

[11] 马昌慧,毛云,黄魏,等.帷幕在降水条件下对基坑周边渗流及变形影响的研究[J].岩土工程学报,2014,36(S2):294-298.

[12] 杨强,丁伟翠,王洪德,等. Visual Modflow 在基坑降水设计中的应用[J].中国给水排水,2009,25(20):97-101.