第40卷 第1期
2020年1月
中国港湾建设
China Harbour Engineering
Vol. 40 No.1
Jan. 2020

临江砂卵石地层井群降水试验及数值反演研究

冯先导，王金绪*，王野
（中交第二航务工程局有限公司，湖北 武汉 430040）

摘 要：汉江中游地区深厚的砂卵石强透水地层与周边地表水系的联系性较强，地下水埋深浅，基坑开挖时降水难度大。针对临江富水砂卵石这一特殊地层，以襄阳市东西轴线沉管隧道工程轴线法管节预制干坞的基坑为例，进行了井群降水试验与数值模拟计算。通过现场降水试验确定了降水影响半径、单井出水量、水位恢复速率等参数，在此基础上利用非稳定流分析法与三维渗流数值模型分别计算出地层的综合渗透系数为64.5 m/d，各分层渗透系数分别为上部砂层12 m/d、中间卵石混圆砾102.5 m/d、下部圆砾25.4 m/d，为轴线干坞基坑降水设计方案提供参考。

关键词：砂卵石地层；渗透系数；井群降水；数值反演；恢复速率
中图分类号：U655.543；TU463　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2095-7874(2020)01-0011-05
doi:10.7640/zggwjs202001003

Test and numerical inversion of well group dewatering in sandy and pebble strata around river

FENG Xian-dao, WANG Jin-xu*, WANG Ye
(CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China)

Abstract: The deep permeable sandy and pebble strata are closely related to the surrounding surface water in the middle reaches of the Hanjiang River, and the depth of the ground water is shallow so that it caused great difficulty to dewater of the strata during the foundation pit excavation. Considering the specific characteristics of the permeable sandy and pebble strata around Hanjiang River, we take the foundation pit of pipe joint prefabrication dry dock with axis method in Xiangyang East-West Axis Road Project as an example to carry out well group dewatering test and numerical simulation calculation. The influence radius of dewatering, water output of single well, water level recovery rate and other parameters are determined by field dewatering test. On this basis, using the unsteady flow analysis method and three-dimensional seepage numerical model, the comprehensive permeability coefficient of the formation is 64.5 m/d, and the permeability coefficient of each layer is 12 m/d for the upper sand layer, 102.5 m/d for the middle pebble mixed with round gravel, and 25.4 m/d for the lower pebble, which can provide reference for the design scheme of axis dry dock foundation pit dewatering.

Key words: sand and pebble strata; permeability coefficient; well group precipitation; numerical inversion; recovery rate

汉江中游地区深厚的砂卵石强透水地层与周边地表水系的联系性强，待开挖基坑透水面大，使用周期长，降水难度较大。基坑止水方案如选择不当，极易发生涌水、管涌等渗透变形破坏[1-3]。因此，充分掌握场地水文地质特征，研究砂卵石强透水地层的地下水渗流变化规律，优化深基坑的降水方案，对于深基坑的安全影响深远[4]。

通过渗流理论与现场实践相结合，吴林高等[5]解决了大量基坑开挖涉及的降水问题。针对上海地下水埋深较浅的软土地层，周念清等[6]以某地铁站基坑为例，建立地下水渗流模型，通过现场降水试验反演出相关水文地质参数。侯玉杰等[7]结合天津滨海地区复杂软土层地下水埋深浅、水量丰富等特点，总结了超大深基坑的降水设计及施工经验。通过建立三维渗流模型来模拟基坑内外渗流场，丁智等[8]提出了有效的基坑降水方案。

收稿日期：2019-08-05　　修回日期：2019-12-24
作者简介：冯先导（1984—），男，河南三门峡人，硕士，高级工程师，主要从事沉管隧道施工项目管理。
*通讯作者：王金绪，E-mail：935536014@qq.com

借鉴上述学者的相关研究，本文以襄阳市东西轴线道路工程鱼梁洲段沉管隧道工程轴线法管节预制干坞的基坑为例进行降水试验与数值模拟，确定降水影响半径、单井出水量、水位恢复速率等参数，并利用非稳定流分析法与三维渗流数值模型分别计算临江富水砂卵石地层的综合渗透系数与分层渗透系数，为基坑降水的设计方案提供参考。

1 工程背景

该地区补充水系主要为汉江及其支流小清河、唐白河和浩然河。自下游崔家营水库建成后，工程区域江面径流平缓，常年蓄水水位 62.73 m，水位变化较小。场地地下水类型主要有上层滞水、第四系孔隙承压水及第四系孔隙潜水，稳定水位埋深 0.1~6.8 m。

降水试验场地覆盖层主要有上层回填土、粉细砂、中砂、圆砾及卵石层，总体透水性好，水量丰富，具有承压性。前期地质勘探参数见表 1。

表 1 前期地质勘探参数

Table 1 Preliminary geological exploration parameters

序号	岩土名称	层厚/m	渗透系数/(m·d^{-1})
1	粉细砂	7.80	12
2	中砂	3.59	14
3	卵石	21.00	28
4	圆砾	39.10	22

2 井群降水试验

2.1 试验参数选取

1）涌水量预测

基坑涌水量按潜水含水层非完整井考虑[9]：

$$Q=1.366K\frac{(H^2-h^2)}{\lg(1+\frac{R}{r_0})+\frac{\bar{h}-l}{l}\lg(1+0.2\frac{\bar{h}}{r_0})} \tag{1}$$

式中：Q 为基坑计算涌水量，m^3/d；K 为渗透系数，m/d；H 为潜水含水层厚度，m；h 为基坑动水位至含水层底板的距离，m，$h=H-s_0$，s_0 为设计水位降深，m；$\bar{h}$ 为平均动水位，m，$\bar{h}=(H+h)/2$；l 为滤管有效工作部分长度，m；R 为降水影响半径，m；r_0 为基坑等效半径，m，$r_0=0.565\sqrt{F}$，F 为井点系统的围合面积。

通过计算，当水位降至要求标高+51 m 时，基坑总涌水量约为 72 725 m^3/d。

2）单井出水量

单井出水能力按下列公式计算：

$$q'=120\pi rl'\sqrt[3]{k} \tag{2}$$

式中：q'为管井单井出水能力，m^3/d；r 为过滤器半径，m；k 为含水层渗透系数，m/d；l'为过滤器进水部分长度，m。

理论计算的单井出水量为 2 760.7 m^3/d，结合类似地层降水资料及地勘抽水试验，理论单井出水量取 2 400 m^3/d。

2.2 试验场地布置

如图 1 所示，本次试验布置 36 口降水井(编号 JS)、5 口水位监测井(编号 SW)，部分降水井兼作观测井。地面沉降观测点(编号 CJ)与水位观测井成组布设，以便获取地面沉降与水位下降之间的关系。降水井封闭成环布置，外侧井纵向间距 15 m、内侧井纵向间距 25 m，监测点间距 60 m。降水井结构详见图 2。

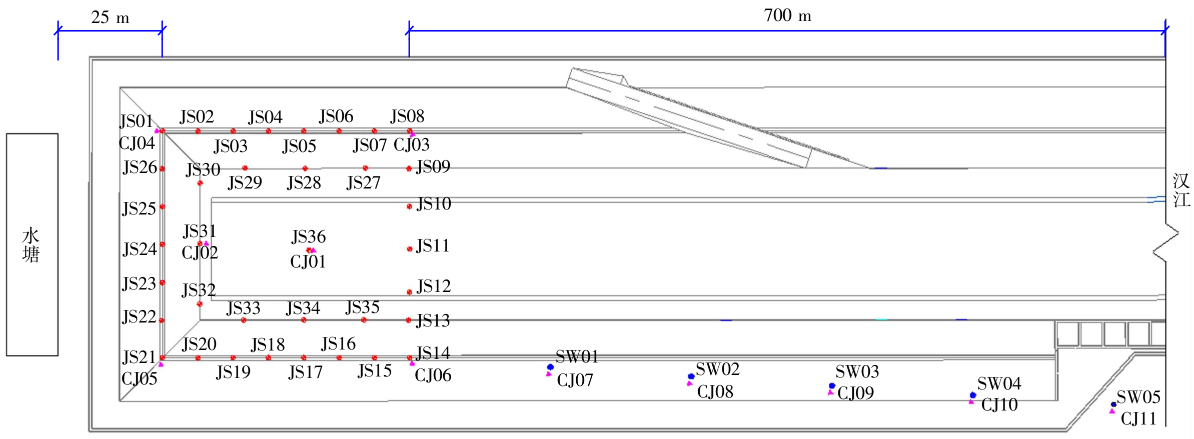

图 1 降水试验区平面布置图

Fig. 1 Layout chart of precipitation test area

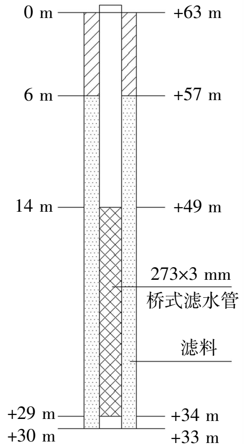

图 2　降水井结构示意图

Fig. 2　Structure diagram of dewatering well

2.3　试验过程及结果分析

2.3.1　静止水位

本次抽水试验中，各阶段抽水前均对静止地下水位进行观测，水位标高 62.73~62.96 m，平均 62.80 m。

2.3.2　单井抽水

现场选取 JS17 作为抽水井，进行单井降深试验。抽水历时 30 h，平均抽水量约 3 210 m³/d，最大降深约 0.70 m，见图 3。

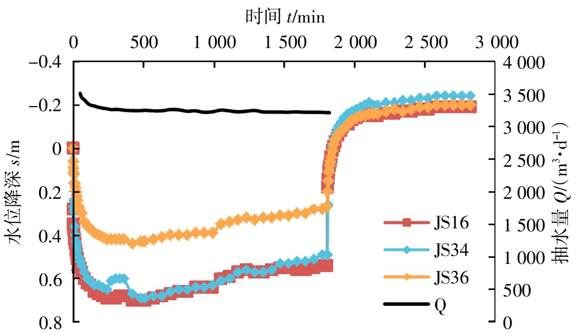

图 3　JS17 单井抽水试验 Q–t、s–t 曲线

Fig. 3　Q–t and s–t curves of JS17 single well pumping test

抽水 3.5 h 后，观测井水位逐步趋于稳定。但抽水 6~8 h 后，开始下暴雨，水位出现线性上涨，至停止抽水时，各观测井水位涨幅 16~20 cm；水位恢复后，较试验前上涨 19~24 cm，充分说明地层透水性好，雨水快速下渗。

2.3.3　井群降水

1）试验过程

依次开启 18、30、35 口降水井，观测井 JS36 最终降深 9.02 m，未达到要求水位。

因抽水主井内动水位较高，还未完全达到单井最大出水能力，因此，将其中 12 台额定流量 100 m³/h 水泵更换为 200 m³/h，同时停止抽水进行水位恢复观测。更换水泵后抽水，水位仍未达到要求的水位标高，井群中心水位较上一次下降约 0.1 m，外围观测孔水位下降 0.5~0.6 m，且仍保持缓慢下降趋势，见图 4、图 5。更换水泵后，原有 23 口降水井出水量变小，平均约 85 m³/h，而其他 12 口也仅能达到 140 m³/h。

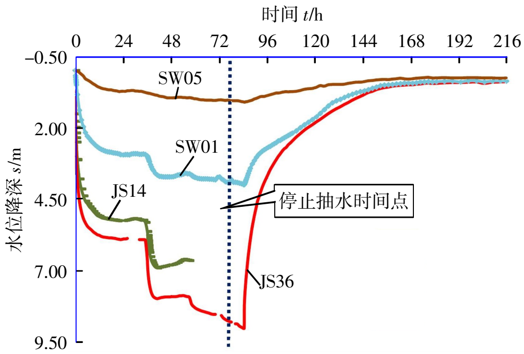

图 4　井群降水观测 s–t 曲线

Fig. 4　s–t curve of well group precipitation

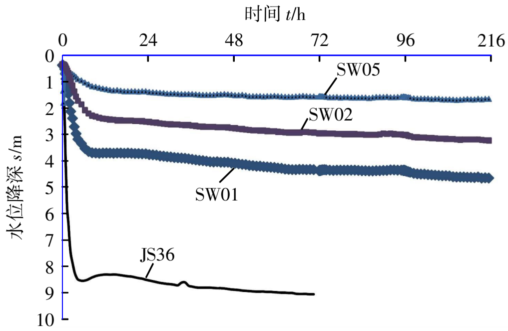

图 5　更换水泵后 s–t 曲线

Fig. 5　s–t curve after water pump replacement

2）数据分析

①编号 JS 井在抽水前期水位迅速下降，反映出地层透水性好；而编号 SW 井在抽水一段时间后才出现水位下降，说明含水层给水度大，前期以消耗地层静储量为主。

②当开启 30 口井时，观测井水位降低到一定深度后出现上涨，离抽水井越近的观测井，涨幅越明显，说明抽水过程中地下水获得新补给源。同时，周边池塘水位明显下降，进一步说明地层透水性好，地表水与地下水具有明显的水力联系，地下水位降深越大，地表水入渗越快。更换水泵后，池塘水位下降进一步加快，至停止抽水时池塘底基本暴露。

③停止抽水后，前期水位恢复较快，后期恢复速率变慢，符合下层砂卵石透水性强与上层粉细砂透水性差的特点。

2.3.4 沉降观测

本次降水过程中，地面沉降最大值为试验区中心 CJ01 观测点的 0.01 m，随着距离的增大，SW05 沉降值仅为 0.004 m，说明降水试验对周边建筑物影响较小。

3 水文地质参数计算

非稳定流分析法可以充分利用抽水试验的全部观测资料，避免个别资料的偶然误差，在求解地层综合渗透系数时效果较好，故选用非稳定流分析法计算场地综合渗透系数。求解地下水运动问题，可以利用地下水流连续性方程及其定解条件式来描述地下水的三维非稳定渗流规律。根据场地地质及水文地质条件，建立与之相适应的地下水三维非稳定渗流数学模型，用以确定场地分层渗透系数。

3.1 非稳定流分析法计算综合渗透系数

将场地概化为巨厚均质各向异性潜水含水层，选择符合条件的 Neuman 公式，借助 Aquifer Test 软件进行分析计算。降水井中水位降深 s 计算公式如下：

$$s=\frac{Q}{4\pi T}w(u_A,u_B,\beta) \tag{3}$$

式中：$w(u_A,u_B,\beta)$为潜水含水层井函数，$u_A=r^2S/(4Tt)$为早期标准曲线，$u_B=r^2S_y/(4Tt)$为后期标准曲线，$\beta=K_vr^2/(D^2K_h)$，K_v、K_h 为垂直或水平向渗透系数，S 为贮水系数，S_y 为给水度，D 为含水层厚度，m；T 为导水系数，$T=KD$，m²/d。

计算得渗透系数 61.2~67.7 m/d，平均 64.5 m/d，给水度 0.103~0.265，平均 0.204。以 JS34、JS36 为例，实际降深时间曲线与标准曲线拟合结果见图 6，除前期少量数据点偏离标准曲线外，其余点均接近标准曲线。

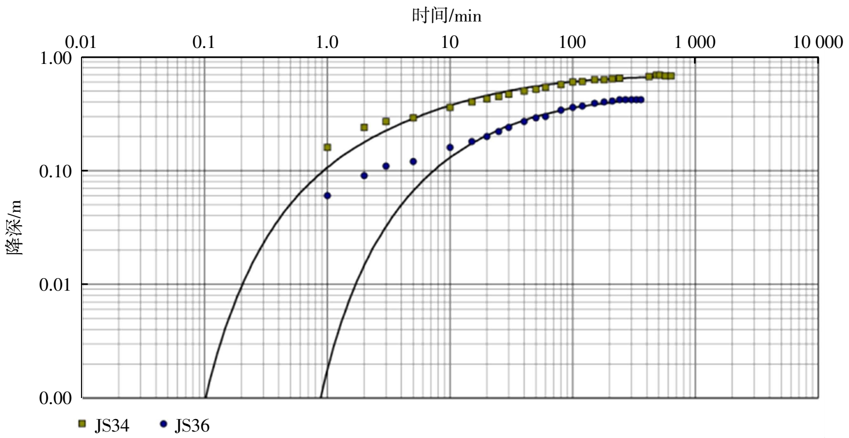

图 6 降深-时间曲线与 Neuman 拟合曲线

Fig. 6 Drawdown-time curve and Neuman fitting curve

3.2 数值法计算分层渗透参数

根据试验场地的水文地质条件，利用 Visual ModFlow 软件，建立地下水三维渗流数值模型，进行各地层水文地质参数反演和验证。

1）模型建立

①水文地质概念模型

根据场地水文地质特征，对其进行概化，建立本工程水文地质概念模型。模型自上而下共划分为 3 层，汉江直接切割含水层，对含水层进行补给，去鱼梁洲四周水体为定水位补给边界。

②模型网格剖分

采用六面体网格剖分，平面上剖分为 227 行、291 列，共 66 057 个网格，尽可能保证模型能详细反映实际工况。

2）数值反演

根据试验资料调整模型，得到水文地质参数，如表 2 所示。

表 2 水文地质参数反演结果表

Table 2 Inversion results of hydrogeological parameters

序号	土层名称	渗透系数/(m·d⁻¹)		储水率 S_s/m⁻¹	给水度 S_y
		K_h	K_v		
1	粉细砂、中砂	11.82	8.42	1.01×10^{-6}	0.076
2	卵石混圆砾	102.51	60.20	1.81×10^{-7}	0.115
3	圆砾	25.40	12.78	1.92×10^{-6}	0.154

3.3 水文地质参数选用

非稳定流解析法求得平均综合渗透系数为

64.5 m/d，该值可用于敞开式基坑降水涌水量预估。单井抽水试验时，水位降深较小，前期池塘的入渗影响相对较小，计算得到参数较能反映地层的渗透性能。

数值法反演得到上部砂层渗透系数为 12 m/d，中间卵石混圆砾的渗透系数为 102.5 m/d，下部圆砾渗透系数为 25.4 m/d。中间卵石混圆砾层的渗透系数大于下部的圆砾地层，与勘察报告描述的卵石混圆砾层粒径大，圆砾层粒径小一致。分层参数可用于悬挂式止水帷幕条件下的基坑涌水量预测。

4　结语

1）经过降水试验及数值分析，得到场地综合渗透系数为 64.5 m/d，各分层渗透系数分别为上部砂层 12 m/d、中间卵石混圆砾 102.5 m/d、下部圆砾 25.4 m/d。上述渗透系数相比前期地勘资料更为准确，可更好地指导基坑降水作业。

2）单井无干扰抽水时，涌水量约 3 210 m^3/d，远大于计算单井出水量 2 400 m^3/d，且主井水位仅下降约 3 m，反映场地所处砂卵石地层富水性强。井群降水时，单纯的增大井泵额定流量效果不佳，宜综合考虑降水井的数量、间距及过水断面面积等因素。

3）本次抽水试验过程中，确定降水影响半径为 700 m，该范围内地面沉降量控制较好，未对周边地表建筑物造成不利影响。

4）场地自上而下为砂卵石层，且砂层直接出露在地表，池塘的入渗补给量大，预估超过 2.3 万 m^3/d，降雨后水位上升明显，反映出地表水与地下水之间水力联系密切。根据水位恢复曲线，水位回升 1 m 约为 21 min，考虑水位降深为基坑底标高以下 1 m，故后期降水过程中，备用发电机需保证断电后 20 min 内及时供电。

5）由于项目基坑开挖深度大、使用周期长，而场地渗透系数大、地表水入渗快、补给源丰富，强降水风险大，轴线干坞基坑开挖时宜采用落底式止水帷幕形式，尽量减少基坑涌水量，以提高施工可行性，降低施工风险。

参考文献：

[1] 燕建龙，赵治海，杨利全，等. 基坑降水设计中水文地质参数计算方法分析探讨[J]. 工程勘察，2011(3)：40–43.
YAN Jian–long, ZHAO Zhi–hai,YANG Li–quan, et al. Discussion on the calculation method for hydrogeological parameters in excavation dewatering design[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2011(3): 40–43.

[2] 王杰，张飞，扬洪，等. 深基坑降水的水位控制[J]. 沈阳建筑大学学报：自然科学版，2008，24(5)：748–752.
WANG Jie, ZHANG Fei, YANG Hong, et al. Study of the groundwater table controlling for deep foundation pits [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University of Architecture: Natural Science, 2008, 24(5): 748–752.

[3] 瞿成松，张国强，罗建军，等. 上海中心大厦基坑降水设计及实践[J]. 资源环境与工程，2011(3)：209–214，231.
QU Cheng–song, ZHANG Guo–qiang, LUO Jian–jun, et al. Dewatering design and practice at Shanghai Center Building[J]. Resources Environment & Engineering, 2011(3): 209–214, 231.

[4] 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会. 深基坑支护技术指南[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2012.
Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Branch of China Civil Engineering Society. Technical guide for deep foundation pit support[M]. Beijing: China Architecutre & Building Press, 2012.

[5] 吴林高，李国，方兆昌，等. 基坑工程降水案例[M]. 北京：人民交通出版社，2009.
WU Lin–gao, LI Guo, FANG Zhao–chang, et al. Dewatering case history for excavation[M]. Beijing: China Communication Press, 2009.

[6] 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，2011，33(12)：1 950– 1 956.
ZHOU Nian–qing, TANG Yi–qun, LOU Rong–xiang, et al. Numerical simulation of deep foundation pit dewatering and land subsidence control of Xujiahui Metro Station[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1 950–1 956.

[7] 侯玉杰，余地华，艾心荧，等. 天津高银 117 大厦工程超大深基坑降水关键技术研究与应用[J].施工技术，2014，43(13)：1–5.
HOU Yu–jie, YU Di–hua, AI Xin–ying, et al. Research and application of dewatering key technology of ultra–large and deep foundation excavation in Tianjin Goldin Finance 117 Project[J]. Construction Technology, 2014, 43(13): 1–5.

[8] 丁智，程围峰，胡增燕，等. 杭州地铁人民广场站深基坑降水研究[J]. 铁道工程学报，2014(1)：89–94.
DING Zhi, CHENG Wei–feng, HU Zeng–yan, et al. Research on water reduction technology for deep foundation pit of People´s Square Station of Hangzhou Metro[J]. Journal of Railway Engineering, 2014(1): 89–94.

[9] JGJ 111—2016，建筑与市政工程地下水控制技术规范[S].
JGJ 111—2016, Technical code for groundwater control in building and municipal engineering[S].