

济南富水孔隙黏性土地层渗透性试验研究

黄薛^{1,2)}, 曾纯品^{1,2)}, 雷炳霄^{1,2)}, 丁庆忠^{1,2)}

1) 山东省地质矿产勘查开发局八〇一水文地质工程地质大队, 济南, 250014;

2) 山东省地矿工程勘察院, 济南, 250014

内容提要:以济南市轨道交通 R1 线大杨庄站主体基坑降水工程为例, 研究表明发育于济南区域孔隙黏性土地层黏性土内具有独特的空间网状孔隙、孔洞结构。通过 4 种渗透性试验成果对比分析, 室内试验、声纳渗流试验测定的渗透系数均较小, 与实际地层渗透能力相差很大; 抽水试验与回灌试验测定的渗透系数相近, 远远大于一般黏性土的渗透性, 渗透系数随着回灌压力的增加而呈线性提高, 回灌引起周边地下水位上升较小, 影响范围有限, 符合济南孔隙黏性土地层的富水性强和渗透性好特性, 具有独特性和鲜明的区域特点。相关试验成果可以为相关区域基坑降水与回灌设计、施工和泉水环境保护提供参考。

关键词:孔隙黏性土; 渗透性试验; 渗透系数; 对比分析

济南是泉水历史文化名城, 分布十大泉群, 独特的地理位置和地质构造为泉水形成提供了条件(Xi Deyin et al., 2017)。近几年, 随着城市规模扩大, 基坑的规模向着深、大的方向发展, 在基坑降水施工过程中发现黏性土地层渗透性好、富水性强, 主要分布在白泉泉群附近和济南西客站片区, 面积约十几平方公里。目前, 对发育于济南区域这种独特发育孔隙的黏性土地层渗透性研究较少, 往往根据经验认为黏性土地层富水性差, 渗透系数小(Hua Jianxin et al., 2018)。室内试验反映该黏性土地层渗透系小, 经验值及室内试验值与现场抽水试验及回灌试验结果差异极大, 需要对孔隙黏性土地层渗透性重新认识。本文以济南市轨道交通 R1 线大杨庄站主体基坑降水工程为例, 针对这种独特的含水层结构, 采用室内试验、声纳渗流、抽水试验、回灌试验等 4 种方法(Jiang Fuwei, 2017; Fu Lei et al., 2017; Xu Xiang et al., 2018; Luo Dan et al., 2018)。研究孔隙黏性土地层渗透性, 为基坑降水工程设计和泉水环境保护提供技术支持。

1 工程概况

大杨庄站是济南市轨道交通 R1 线工程中间

站, 车站位于齐鲁大道与经十西路交叉口, 沿齐鲁大道南北向布置。基坑总长约 516.4 m, 分为 3-3 换乘段、1-1 标准段及 2-2 段盾构加宽段(北端); 3-3 换乘段长约 39.5 m, 开挖深度为 26.0 m; 1-1 标准段长约 459.3 m, 开挖深度约为 16.5 m, 2-2 段盾构加宽段(北端)长为 17.80 m, 开挖深度为 19.71 m。基坑周边环境较复杂, 构筑物、地下管线密集。

2 地质条件

根据勘察报告, 场地属山前冲洪积平原地貌, 地势南高北低, 地形较平坦, 地面标高为 31.25~33.46 m。基坑降水工程涉及的地层主要为: ①杂填土, ⑦黄土, ⑧粉质黏土, ⑧₂细砂, ⑩粉质黏土。详勘期间(2014 年 7 月), 在钻孔中测得静止水位埋深 6.50~7.30 m, 相应静止水位标高为 23.90~24.90 m; 地下水位南高北低, 自南向北径流, 地下水位年变化幅度约 1.5 m。试验井地质剖面见图 1。

3 孔隙黏性土结构及物性指标

根据对土体的电子扫描结果, 土体内发育大量的孔隙、孔洞, 大小约 3~10 mm, 呈点状、长条状,

收稿日期: 2019-08-09; 改回日期: 2019-09-10; 责任编辑: 李曼。

作者简介: 黄薛, 男, 1973 年生。研究员, 注册岩土工程师, 一级建造师, 建筑工程(岩土工程)专业, 从事工程地质水文地质岩土工程相关技术研究。Email: 1037719588@qq.com。通讯作者: 曾纯品, 男, 1976 年生。研究员, 主要从事岩土学研究。Email: 596677856@qq.com。

引用本文: 黄薛, 曾纯品, 雷炳霄, 丁庆忠. 2019. 济南富水孔隙黏性土地层渗透性试验研究. 地质学报, 93(s1): 87~92, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019214.

Huang Xue, Zeng Chunpin, Lei Bingxiao, Ding Qingzhong. 2019. Experimental study on permeability of porous soil with rich water in Jinan. Acta Geologica Sinica, 93(s1): 87~92.

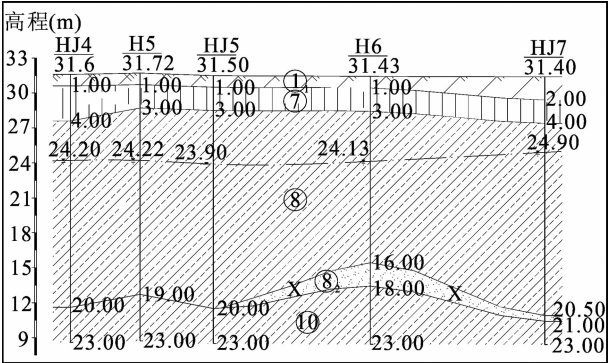


图 1 试验井地质剖面示意图

Fig. 1 Geological profile of test well

空间呈网状分布,孔隙、孔洞分布不均,土体内大量发育的孔隙、孔洞为黏性土地层的富水性提供了结构条件(图 2、图 3)。根据室内物理性质试验成果,其含水率 W 约 25.8%~28.9%,天然密度 ρ 约 1.75~1.89 g/cm³,孔隙比 e_0 约 0.834~0.999。与一般黏性土相比,天然密度要小 3.1%~10.3%,孔隙比要提高 11.2%~33.2%。在基坑开挖过程,在遇水浸泡的情况下,土体结构极易崩解。济南区域发育的孔隙黏性土与一般黏性土相比,无论结构与物性指标都存在较大的不同,具有独特性和鲜明的区域特点。

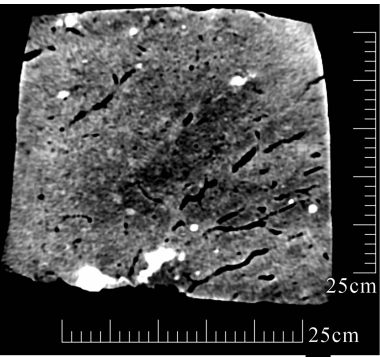


图 2 土样水平向 CT 扫描图

Fig. 2 Horizontal CT scanning of soil samples

4 渗透性试验

济南市轨道交通 R1 线大杨庄站主体基坑降水工程孔隙黏性地层渗透性试验共采用 4 种试验方法,分别为室内试验、声纳渗流试验、抽水试验、回灌试验。

为了研究场地孔隙黏性土含水层的水位、降深、涌水量、渗透系数、影响半径等水文地质参数,在降水工程施工前,进行抽水试验及回灌试验,为基坑降

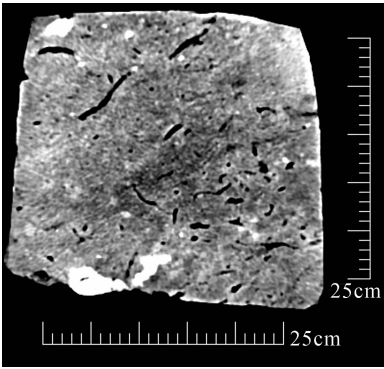


图 3 土样竖向 CT 扫描图

Fig. 3 Vertical CT scanning of soil sample

水与回灌设计提供依据。布置水井 9 眼,HJ2、HJ3、HJ4、HJ5、HJ6 为抽水井,H2、H3、H5、H6 为回灌井(图 4)井深约 23.0 m,井径 0.8 m,钢质滤水管,壁厚 6 mm;抽水井结构地面以下 5.0 m 范围内采用黏土球封堵,回灌井结构地面以下 5.0 m 范围内采用混凝土封堵,抽水井及回灌井深度 5.0 m 以下回填砾石作反滤层。

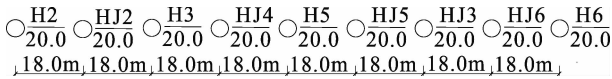


图 4 水井布置示意图

Fig. 4 Schematic layout of water wells

4.1 室内试验

室内土的渗透性试验分别采用常水头试验法和变水头试验法,测定渗透系数。根据室内试验结果分析,孔隙黏性土层渗透系数存在差异性,渗透系数 (K_h 、 K_v) 一般在 10^{-5} m/d 级别,渗透性微,但含姜石、卵砾石黏性土层渗透系数一般在 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ m/d 级别,渗透性弱,试验结果见表 1。

表 1 室内渗透性试验

Table 1 Laboratory permeability test

岩土 编号	岩土 名称	统计 项目	水平渗透系数 K_h ($\times 10^{-3}$ m/d)	竖向渗透系数 K_v ($\times 10^{-3}$ m/d)
⑧	粉质 黏土	统计个数	8	9
		最大值	18.3168	5.1148
		最小值	0.0604	0.0777
		平均值	4.8405	1.8547
⑩	粉质 黏土	统计个数	5	6
		最大值	0.2505	2.8684
		最小值	0.0518	0
		平均值	0.1261	0.5328

4.2 声纳渗流试验

采用南京帝坝工程科技有限公司三维流速矢量测量仪现场数字化声纳渗流测井,研究基坑沿长度

方向水文地质渗流单元的渗透特性、垂直断面岩土分层地下水的渗漏量、渗透流速、渗流方向及其渗透系数等量化指标,测试 3 个水文井,⑧层粉质黏土层渗透系数为 0.09~1.32 m/d,与目前工程应用成果相近 (Du Jiajia et al., 2018; Zhu Min et al., 2015),⑧₂细砂层渗透系数为 2.51~8.10 m/d;⑩层粉质黏土层渗透系数约 0.1 m/d,具相对隔水性。其中 H3 井测试结果见图 5。

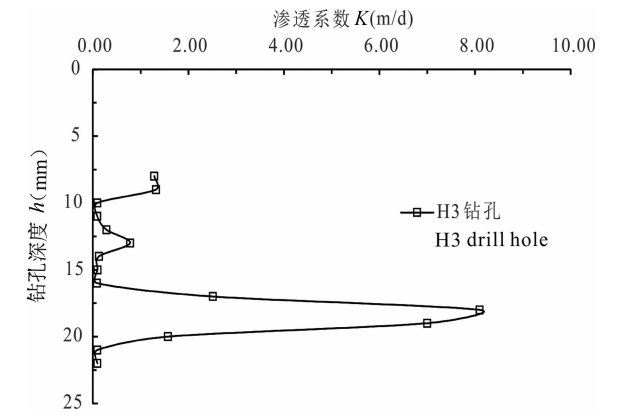


图 5 H3 水井声纳渗流孔深 h 与渗透系数 K 关系曲线
Fig. 5 Relation curve between depth h and permeability coefficient K of sonar seepage hole in H3 well

4.3 抽水试验

由于孔隙黏性土地层特殊的水文性质,在利用裘布依稳定流公式进行渗透系数计算时,若没有观测孔而只能根据抽水井的出水量、水位下降等数据,则应消除抽水井附近产生的三维流、紊流的影响,特别是在抽水井水位下降值较大的情况下,应消除渗透阻力的影响 (Liu Zhengfeng, 2012)。根据 HJ2、HJ3、HJ4 井抽水试验水位下降值 S_0 与相应的出水量 Q 的关系,绘制的 Q - S_0 曲线见图 6。图 6 表明, Q - S_0 关系曲线为直线,相关性为 0.9949~0.9997,表明水流通过过滤器及在过滤器内的流动阻力不太大,从而在井壁附近产生的三维流、紊流区的影响不明显,其渗透系数的计算适用潜水完整井的计算公式:

$$k = 0.773Q \frac{\lg R - \lg r_0}{(2H - S_0)S_0} \tag{1}$$

根据抽水试验成果资料分析,抽水量为 720.0~2880.0 m³/d 时,降深为 1.93~8.25 m,综合渗透系数为 9.62~19.10 m/d,影响半径为 95.85~220.82 m。附近观测孔水位下降 0.24~1.1 m,水位同步变化,水力联系密切,说明各水井之间含水层导通性良好 (Zhao Mengyi et al., 2018; Song

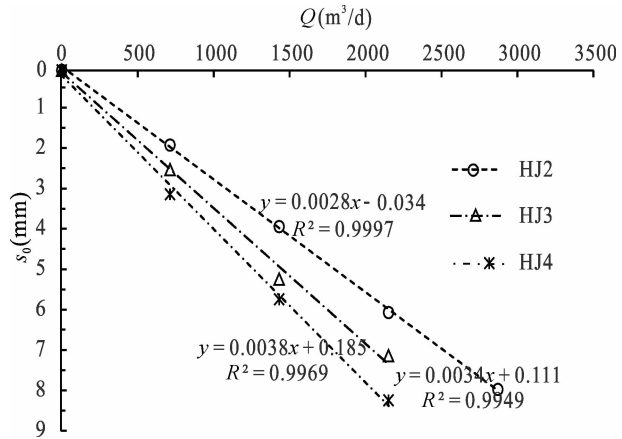


图 6 抽水井 Q - S_0 曲线
Fig. 6 Q - S_0 curve of pumping wells

Linhui et al., 2018; Zhou Zili et al., 2018)。

4.4 回灌试验

为进一步研究场地水文地质条件及含水层水文地质参数,确定单井回灌量及回灌速率及回灌对周边环境的影响,选择 H2、H3、H5、H6 进行回灌试验。以 H3 回灌试验为研究对象,分别抽取 H3 附近水井地下水和采用外部水源进行回灌,其回灌量与回灌压力呈线性关系,相关性为 0.9333~0.9604,回灌量随着回灌压力的增加而呈线性增加 (图 7) 渗透系数与回灌压力呈线性关系,相关性为 0.9515~0.9914,渗透系数随着回灌压力的增加而呈线性增大,说明水头对地层渗透性具有重要影响,见图 8。根据图 7、图 8 对比分析,采用外部水源回灌的关系曲线相关性较抽取 H3 附近水井地下水回灌的关系曲线相关性要好,说明抽取场地地下水对回灌效果存在影响;随着回灌压力的增加,影响不断减弱;回灌压力达到一定值时,两者趋于一致 (Yan Qiao et al., 2015; Lu Shitao et al., 2017)。

回灌试验计算的渗透系数按照《建筑岩土工程勘察设计规范》(J13146-2015)F.0.6 公式:

$$k = \frac{Q}{2\pi HL} \ln \frac{L}{r_0} \tag{2}$$

根据 4 口井回灌成果分析,采用自然回灌 (无压),回灌量为 657~774 m³/d,渗透系数为 9.13~14.19 m/d,周边附近观测孔水位上升 0.16~0.37 m;采用压力回灌时,回灌量为 657~2880 m³/d,渗透系数为 9.87~21.28 m/d,周边附近观测孔水位上升 0.73~1.85 m,影响半径约为 100 m。

在 H3 回灌试验过程中,分别在抽取 H3 附近水井地下水和采用外部水源进行回灌两种情况下对各水井进行了水位观测,确定回灌对周边地下水

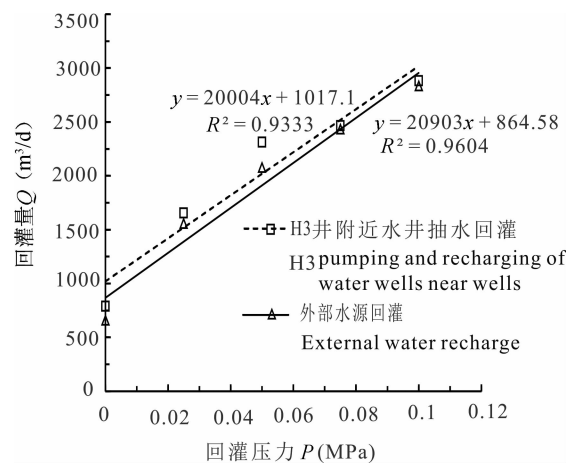


图 7 回灌量 Q 与回灌压力 P 关系曲线
Fig. 7 Relation curve between recharge quantity Q and recharge pressure P

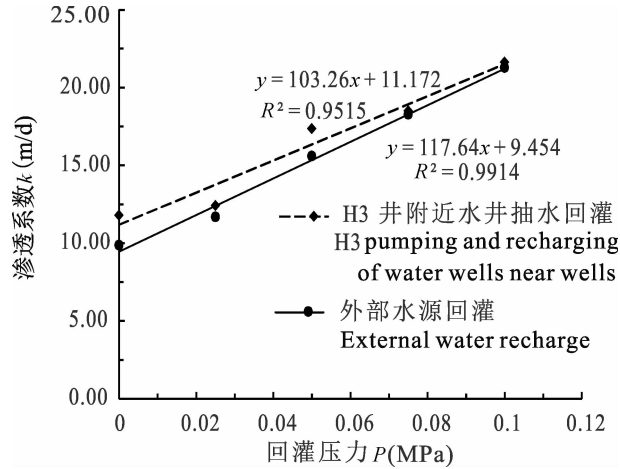


图 8 渗透系数 K 与回灌压力 P 关系曲线
Fig. 8 Relation curve between permeability coefficient K and recharge pressure P

位的影响(图 9、图 10、图 11、图 12)。从图 9、图 10 分析,H3 附近水井水位升幅随着回灌压力的增加而上升,回灌压力越大,回灌引起的水位升幅也越大。距离回灌井越近,各压力段的水位上升达到稳定的时间越短,距离回灌井越远,各压力段的水位上升达到稳定的时间越长(Lu Jiansheng et al. , 2014; Niu Lei et al. , 2016)。

从图 11 分析,在采用外部水源回灌的情况下,回灌引起的水位升幅随距离的增加逐渐变小;越靠近回灌井,水位升幅越大,距离回灌井较远处的水位升幅接近于 0。同时,压力越大,回灌引起的水位升幅也越大,随着距离的增加,回灌压力对水位升幅的影响逐渐变小。

从图 12 分析,抽取地下水对回灌引起的水位升幅影响较大,尤其是靠近抽水井处。靠近回灌井时,

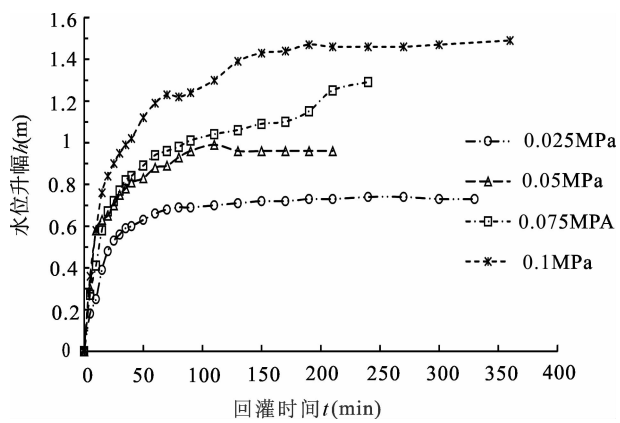


图 9 外部水源回灌 HJ4 井水位升幅 h
Fig. 9 Water level rise of well HJ4 with external water recharge h

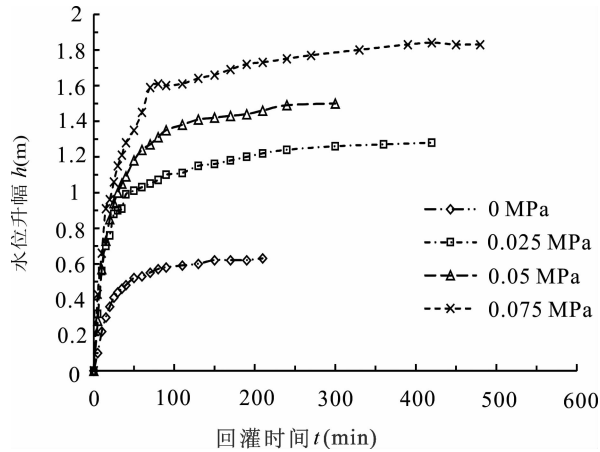


图 10 外部水源回灌 H5 井水位升幅 h
Fig. 10 Water level rise of well H5 recharged from external water source h

地下水位主要是上升为主,回灌效应占优势,靠近抽水井时,地下水位则以下降为主,抽水效应占优势。靠近回灌井处,回灌压力对水位升幅的影响较明显,但是靠近抽水井处,由于距离回灌井较远,回灌压力对水位的变化影响不大。在富水地层进行降水与回灌设计,回灌井应与基坑有一定的距离,减小这种叠加影响。

5 渗透性试验成果对比分析

根据对孔隙黏性土室内试验、声纳渗流试验、抽水试验、回灌试验的成果对比分析,室内试验测定的渗透系数极小,约 $4.8405 \times 10^{-3} \text{ m/d}$,与实际相差很大,主要原因为室内试验所用的土样尺寸相对较小,易受扰动,且受孔隙发育的非均质性影响大,孔隙发育的土样遇水浸泡时极易崩解,试验装置和试验条件无法达到自然状态;声纳渗流试验测定的渗透系

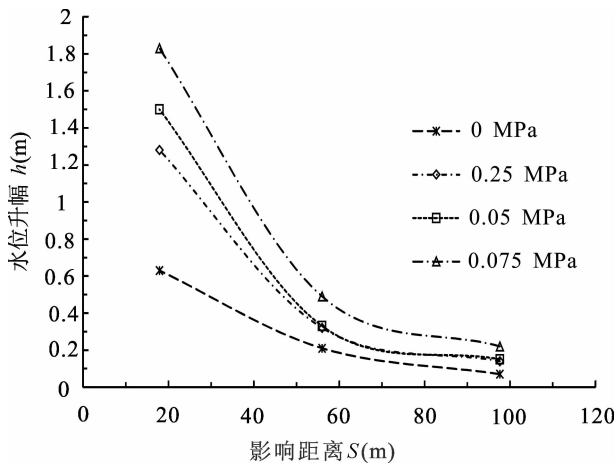


图 11 外部水源回灌周边水位升幅 h 与距离的关系曲线
Fig. 11 Relation curve between water level rise h and distance around external water source recharge

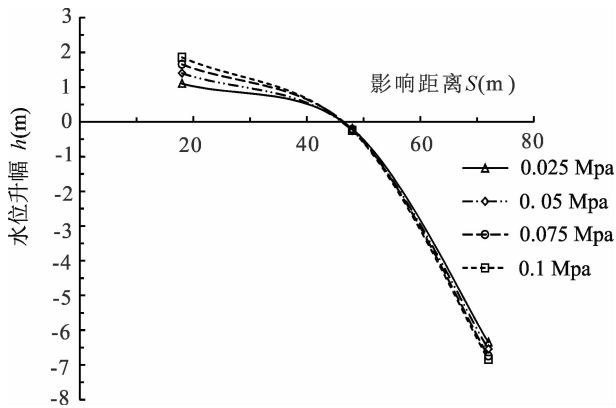


图 12 抽取 H3 附近水井地下水回灌周边水位升幅 h 与距离关系曲线
Fig. 12 Relationship curve between water level rise h and distance around groundwater recharge in wells near H3

数较小,约 0.09~1.32 m/d,声纳渗流试验是一种物探手段,还没有广泛的应用于实际工程中,尤其是民用建筑的基坑工程中,缺少足够的实践经验,基础理论不足,其适用性需要与当地经验相结合。抽水试验与回灌试验采用传统的研究方法,符合裘布依稳定流原理,测定的渗透系数相近,约 9.13~19.10 m/d,远远大于一般黏性土的渗透性,且渗透系数随着回灌压力的增加而呈线性提高,说明水头对地层渗透性具有重要影响,符合孔隙黏性土地层的富水性强和渗透性好的实际情况。

6 结论

(1)本文对发育于济南区域这种独特发育孔隙的黏性土地层渗透性进行了研究,电子扫描结果表明土体内具有独特的空间网状孔隙、孔洞,其物性指

标与一般黏性土相比存在较大的不同,其含水率 W 约 25.8%~28.9%,天然密度 ρ 约 1.75~1.89 g/cm³,孔隙比 e_0 约 0.834~0.999。与一般黏性土相比,天然密度降低 3.1%~10.3%,孔隙比提高 11.2%~33.2%。

(2)通过 4 种渗透性试验成果的对比分析,室内试验、声纳渗流试验测定的渗透系数均较小,与实际地层渗透能力相差很大;抽水试验与回灌试验测定的渗透系数相近,单井涌水量约 720.0~2880.0 m³/d,渗透系数约为 9.62~19.10 m/d,远远大于一般黏性土的渗透性。其渗透系数随着回灌压力的增加而呈线性提高,回灌引起周边地下水位上升较小,符合济南孔隙黏性土地层的富水性强和渗透性好的特性,具有独特性和鲜明的区域特点。

References

Du Jiajia, Lu Jianfeng, Wang Zhen, Song Xiaofeng, Du Guoping. 2018. Control technology of sonar seepage in deep foundation excavation of Wuhan green land international financial center. Construction Technology, 47(1):6~10.

Fu Lei, Yan Di, Huang Qiang, Song Linhui. 2017. Experimental study on effect of clay content on permeability of clayey soil. Science Technology and Engineering, 17(30):280~284.

Hua Jianxin, Zheng Jianguo. 2018. Geological Engineering Handbook (5th edition). Beijing: China Architecture & Building Press, 145~1240.

Jiang Fuwei. 2017. Discussion on formula derivation and test of critical hydraulic condition of cohesive soil. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 13(06):1472~1476.

Luo Dan, Chen Weimeng, Wenfang. 2018. Experimental study on silt permeability-taking the southern margin of gurbantunggut desert as an example. Environment and Development, 30(8): 123~125.

Liu Zhengfeng. 2012. Handbook of Hydrogeology. Changchun, Jilin Province: Silver Sound and Image Publishing House, 702~708.

Lu Shitao, Xu Taotao, Li Liangliang, Li Zuian. 2017. Application of dewatering and recharge test for deep foundation pit in confined sand layer. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 13(2):658~662.

Lu Jiansheng, Pan Weiqiang. 2014. Test and analysis of artifical recharge to the shallow confined aquifer of deep foundation pit in Shanghai. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 10(4):810~817.

Niu Lei, Zhang Chunfu, Meng Xiangyu, Pei Jianxin. 2016. Analysis of shallow groundwater recharge test in Tianjin area. Construction Technology, 45(19):46~48.

Song Linhui, Huang Qiang, Yandi, Mei Guoxiong. 2018. Experimental study on effect of hydraulic gradient on permeability of clay. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 40(9):1635~1641.

Xi Deyin, Sun Bin, Qin Pinrui. 2017. Study on Spring Water in Ji'nan. Ji'nan, Shandong: Ji'nan Publishing House, 1~57.

Xu Xiang, Wu Shenglin, Shi Jibiao. 2018. Study on water richness of Shajiang clay layer on Xu Zhou metro line1. Geotechnical Investigation Surveying, 46(11):31~35.

Yan Qiao, Ma Cong, Zhou Weibo. 2015. Hydrogeology parameters inversion during the process of groundwater recharge. Journal of Irrigation and Drainage, 34(07):88~92.

Zhu Min, Guo Xiaogang, Dong Zhichao. 2015. Application of 3D

- sonar seepage detecting technology in deep foundation pit projects: Case of anchorage base of Miaozi Yangtze river bridge at Yichang, Hubei. Yangtze River, 46(17):43~45.
- Zhao Mengyi, Xie Qiang, Guo Yongchun, Yang Yifan. 2018. Experimental study of unsaturated permeability of Chengdu clay by instantaneous profile method. Journal of Engineering Geology, 26(3):620~625.
- Zhou Zili, Qin Zhiqun. 2018. Comparison of the permeability coefficients for single hole steady water pumping test. Mineral Exploration, 9(4):706~713.

参 考 文 献

- 杜家佳, 陆建峰, 王震, 宋晓峰, 杜国平. 2018. 武汉绿地中心深基坑声纳渗流控制技术. 施工技术, 47(1):6~10.
- 付磊, 闫迪, 黄强, 宋林辉. 2017. 黏粒含量对黏性土渗透性影响的试验研究. 科学技术与工程, 17(30):280~284.
- 化建新, 郑建国. 2018. 工程地质手册(第五版). 北京: 中国建筑工业出版社, 145~1240.
- 姜伏伟. 2017. 粘性土渗透破坏临界条件推导及试验探讨. 地下空间与工程学报, 13(06):1472~1476.
- 罗丹, 陈泉萌, 文方. 2018. 粉土渗透性试验研究—以古尔班通古特沙漠南缘为例. 环境与发展, 30(8):123~125.
- 刘正峰. 2012. 水文地质手册. 吉林长春: 银声音像出版社, 702

- ~708.
- 卢士涛, 许涛涛, 李亮亮, 李咀安. 2017. 承压砂层深基坑降水和回灌试验的应用研究. 地下空间与工程学报, 13(2):658~662.
- 陆建生, 潘伟强. 2014. 上海某枢纽基坑工程浅层承压水回灌试验分析. 地下空间与工程学报, 10(4):810~817.
- 牛磊, 张春福, 孟祥玉, 裴建新. 2016. 天津地区浅层地下水回灌试验分析. 施工技术, 45(19):46~48.
- 宋林辉, 黄强, 闫迪, 梅国雄. 2018. 水力梯度对黏土渗透性影响的试验研究. 岩土工程学报, 40(9):1635~1641.
- 奚德荫, 孙斌, 秦品瑞. 2017. 济南泉水研究. 山东济南: 济南出版社, 1~57.
- 徐翔, 吴圣林, 史继彪. 2018. 徐州地铁一号线砂姜黏土层富水性研究. 工程勘察, 46(11):31~35.
- 闫峭, 马聪, 周维博. 2015. 地下水回灌过程中水文地质参数的反演. 灌溉排水学报, 34(07):88~92.
- 朱敏, 郭晓刚, 董志超. 2015. 三维声纳渗流探测技术在深基坑工程中的应用—以湖北宜昌庙嘴长江大桥锚碇基坑工程为例. 人民长江, 46(17):43~45.
- 赵梦怡, 谢强, 郭永春, 杨毅凡. 2018. 非饱和成都黏土瞬时剖面法渗透性试验研究. 工程地质学报, 26(3):620~625.
- 周子侯, 秦志泉. 2018. 单孔稳定流抽水试验计算渗透系数对比研究. 矿产勘查, 9(4):706~713.

Experimental study on permeability of porous soil with rich water in Jinan

HUANG Xue^{1,2)}, ZENG Chunpin^{*1,2)}, LEI Bingxiao^{1,2)}, DING Qingzhong^{1,2)}

1) 801 Institute of Hydrogeology and Engineering Geology,

Shandong Provincial Bureau of Geology & Mineral Resources, Ji'nan, Shandong, 250014;

2) Shandong Provincial Geo-mineral Engineering Exploration Institute, Ji'nan, Shandong, 250014

* Corresponding author: 596677856@qq.com

Abstract

Taking the main foundation pit dewatering project of Dayangzhuang Station on Line R1 of Jinan Urban Rail Transit as an example, the research shows that the clay of porous clay stratum developed in Jinan region has unique spatial reticulated pore and pore structure. Comparing and analyzing the results of four permeability tests, the permeability coefficients measured by laboratory test and sonar seepage test are small, which differ greatly from the actual formation permeability; the permeability coefficients measured by pumping test and recharge test are close, far greater than that of common clay, and the permeability coefficients are presented with the increase of recharge pressure. Linearity improvement, recharge caused a small rise in the surrounding groundwater level, limited scope of influence, in line with Jinan pore viscous soil layer rich in water and good permeability characteristics, with unique and distinct regional characteristics. Relevant experimental results can provide reference for design, construction and spring water environmental protection of foundation pit dewatering and recharge in relevant areas.

Key words: porous clayey soil; permeability test; permeability coefficient; comparative analysis