

临江富含承压水深基坑减压降水现场试验研究

尹忠辉

中铁隧道局集团有限公司, 广东 广州

收稿日期: 2023年3月20日; 录用日期: 2023年4月17日; 发布日期: 2023年4月29日

摘要

对于临江富含承压水的深基坑, 选择合理可行的减压降水方案是深基坑顺利施工的关键。本文依托中俄东线长江盾构隧道工程, 通过抽水试验获取承压含水层水文地质参数, 采用数值法对比分析了止水帷幕进入含水层不同深度条件下, 坑外降水、坑内降水基坑总涌水量的变化规律。结果表明: 随着止水帷幕深度递增, 坑外、坑内降水水量之比随之增加; 坑外井滤管与墙底平齐时, 由于坑内下部存在强补给, 坑外、坑内降水水量之比约34, 表明坑外降水代价巨大; 止水帷幕进入承压含水层仅几米时, 坑内降水也有明显优势; 若需要坑外降水时, 降水井滤管深度须超过止水帷幕深度。研究成果可为类似临江深基坑降水设计提供参考。

关键词

临江深基坑, 承压水, 悬挂式止水帷幕, 降水试验

In-Site Test Research on Depressurization Dewatering of Deep Foundation Pit with Rich Confined Water along the River

Zhonghui Yin

China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

Received: Mar. 20th, 2023; accepted: Apr. 17th, 2023; published: Apr. 29th, 2023

Abstract

Regarding deep foundation pits along the river with rich confined water, one of the keys is how to choose a reasonable and feasible decompression and dewatering plan to benefit the smooth construction of deep foundation pit. In this paper, based on the Sino-Russian Eastern shield-driven tunnel project to cross Yangtze River, the hydrogeological parameters of the confined aquifer are

obtained by pumping tests. And numerical method is used to analyze the total water inflow of the foundation pit for dewatering outside the pit and dewatering inside the pit when the water-stop wall enters the aquifer at different depths. The results show that as the depth of the water-stop wall increases, the ratio of dewatering inflow outside and inside the pit increases fairly. However, when the filter tube of the well outside the pit is flush with the bottom of the wall, due to the strong replenishment in the lower part of the pit, the ratio of the water inflow for dewatering outside to the inside the pit is about 34, which means the cost of dewatering outside the pit is huge. Even if the water-stop wall is only a few meters into the confined aquifer, dewatering in the pit also has obvious advantages. If dewatering outside the pit is required, the depth of the filter tube of the dewatering well must exceed the depth of the water-stop wall. The results can provide a reference for the dewatering design of similar deep foundation pits along the river.

Keywords

Deep Foundation Pits along the River, Confined Water, Hanging Water-Stop Wall, Dewatering Test

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国临江地区普遍发育着多层承压含水层,随着跨江跨河水下隧道的兴建,临江地区基坑开挖面临着承压水头高、水量丰富的问题[1][2],而选择合理可行的减压降水方案是基坑顺利施工中的关键[3][4]。在基坑的施工过程中,随着基坑开挖和降水的交替进行,土体中的渗流场、应力场、位移场均处于不断变化的过程中,同时,由于土体各向异性使得这些场的相互耦合变得异常复杂。因此,基坑开挖中的降水渗流效应一直是国内外关注的焦点问题[5]。

国内外学者在土体渗流方面也进行了大量的研究,并取得了一些重要成果。例如:采用差分方程推导出了饱和度对孔隙水压力的偏微分方程,进而避免了数值解的不收敛;建立了非饱和水土两相不相容、不可压缩渗流的有限元方程,并在分析渗流连续介质模型的基础上,建立了基于孔隙介质中颗粒与流体互相耦合的微观模型,通过对 Navier-Stoke 方程的求解,对二维渗流问题的解析解进行了另一个角度的验证[6]。张哲斐等[7]基于荆州某深基坑降水工程,模拟研究了滤管设置对承压非完整井降水效果的影响,优化了井结构配置。蔡娇娇[8]对武汉地区落底式止水帷幕条件下深基坑渗流及承压含水层基坑降水设计计算等问题进行了研究。龙治国等[9]结合武汉临江某基坑现场抽水试验,求取含水层水文地质参数,并预估了基坑降水对周边环境的影响。王旭强[10]对比分析了未设置、悬挂式及落底式止水帷幕的基坑涌水量,提出止水帷幕对阻止坑外地下水流入基坑内效果显著。郭璐等[11]研究了天津地区某地铁站-隧道系统承压水降水引起的区间沉降。赵勇博[12]结合理论、试验、计算等手段对福州某富水砂卵石地层降水方案进行优化。赵宇豪基于常州地铁典型基坑,系统分析了减压降水对环境的影响及控制对策。

综上,目前对于渗流理论的研究大多是 Darcy 定律为基础的,然而在深基坑较高水力梯度作用下,渗流不在以层流的形式出现,随雷诺数的增加,流体的流动速度大大超出了 Darcy 定律所给出的适用范围[13]。因此,对于临江的分布有强透水性承压含水层的深基坑,因降水难度较大或周边环境复杂,采用封闭式止水帷幕的工程较多,前述文献也多集中于封闭式帷幕条件的降水。但是对于巨厚的承压含水层,止水帷幕无法隔断,不得不采用悬挂式止水帷幕,此类相应的施工经验分享较少[14][15]。

本文依托中俄东线天然气管道工程(永清 - 上海)长江盾构穿越工程北岸工作井项目,通过现场抽水试验取得的水文地质参数,分析对比了不同止水帷幕深度对抗内、坑外降水量的影响,并对降水方案进行优选,给出了临江深基坑合理降水方案的选择原则,可为今后类似工程的降水设计提供借鉴。

2. 区域地质背景

中俄东线天然气管道工程(永清 - 上海)长江盾构穿越工程北岸工作井为始发井,位于南通市海门市滨江街道,场地现状为水稻田,重大环境风险一般。临江基坑开挖尺寸 28.4 m (长) × 16.4 m (宽) × 28.2 m (深),属于深大基坑。采用 58 m 深、1.2 m 厚地下连续墙 + 砼支撑作为围护结构,并在地下连续墙外侧设置一圈深 38.2 m 塑性混凝土墙止水帷幕。基底以下 10 m 深范围内土层满堂加固。

场地自上而下地层主要为②粉土、③淤泥质粉质黏土、④-1 粉砂、④粉质黏土、⑤粉土、⑤2 粉质黏土、⑥粉质黏土、⑦粉砂、⑦-5 粗砂,其中下部⑦粉砂、⑦-5 粗砂为承压含水层,厚度为 68 m,与长江存在水力联系,富水性好,渗透性强。当基坑底板至承压含水层顶板间的土重力与承压水的顶托力,大于安全系数时,基坑开挖后处于抗突涌突涌稳定状态[14],即:

$$D\gamma/h_w\gamma_w \geq K_{ty} \quad (1)$$

式中: K_{ty} 为突涌稳定安全系数,稳定状态时,该系数一般应大于 1.1; D 为承压含水层顶面至坑底的土层厚度(m); γ 为承压含水层顶面至坑底土层的加重量度(kN/m^3); h_w 为承压水头高度(m); γ_w 为水的重度($10 \text{ kN}/\text{m}^3$)。⑦层层顶最高标高为-49.0 m,根据施工实测,⑦层承压水位标高取为+0.95 m,不对⑦层进行降水的条件下, $D\gamma/h_w\gamma_w = 0.86 < 1.1$,不满足抗突涌稳定性要求,1.1 安全系数下的安全水位标高为-10.1 m。

3. 抽水试验

本研究为了获取含水层水文地质参数,首先通过试验井布置,进行了试验井抽水试验,然后进行了试验的结果分析,获得了水位降深时间曲线和含水层的透水性,并通过三维数值模拟计算得到了承压水地层的水文地质参数。

3.1. 试验井布置

为了获取⑦层含水层水文地质参数,并为减压降水合理方案提供依据,现场先进行了 8 口试验井(YJ1~YJ8)的抽水试验。每个试验井深 63 m,泥孔径 650 mm;井管为直径 325 mm、壁厚 5 mm 钢管;滤管为桥式滤水管,外包 80 目尼龙滤网;滤料为中粗砂,滤料以上回填 10 m 厚粘土球止水。见图 1、图 2。

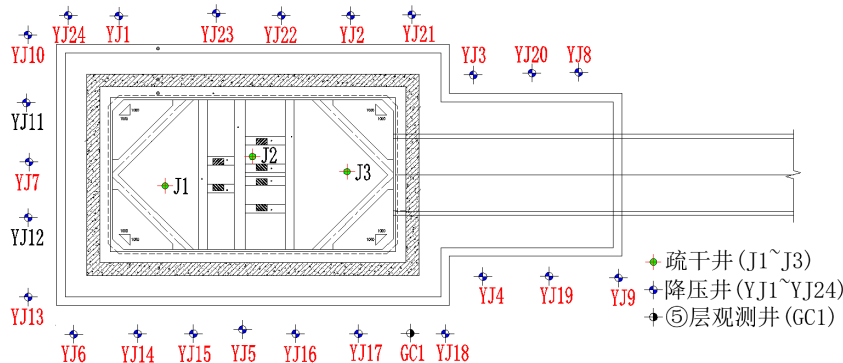


Figure 1. Position of the test wells plan

图 1. 试验井平面布置图

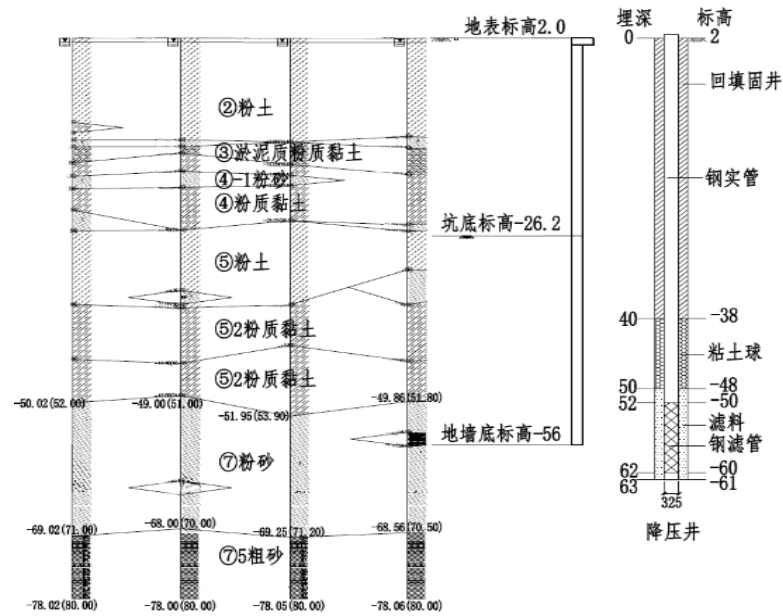


Figure 2. Correspondence diagram of test well structure and formation
图 2. 试验井结构与地层对应关系图

3.2. 试验结果

正式抽水前,测得场地静止水位标高为 0.85~0.95 m。开启 YJ1~YJ2、YJ4~YJ8 共 7 口井(配置 15 kW 水泵),以 YJ3 为观测井,抽水 1780 min 后, YJ3 观测井水位降深为 3.14 m,停抽后水位迅速恢复。抽水井总抽水量为 509.5 m³/h。具体试验结果见表 1 和图 3。

由水位降深时间曲线可知,在抽水过程中,临江深基坑水位容易稳定且停抽后恢复很快,停抽 1 分钟后水位恢复约 60%,停抽 15 分钟后水位恢复约 90%,反映了含水层透水性很好、水量补给非常充沛的特点。

Table 1. Summary of water level drop and flow rate for pumping test
表 1. 抽水试验水位降深和流量简表

井号	水位降深 s (m)	流量(m ³ /h)	备注
YJ1	16.49	80	
YJ2	19.46	92	
YJ3	3.14	/	观测井
YJ4	19.83	82.7	
YJ5	/	33.9	
YJ6	/	79.4	
YJ8	13.52	81.1	
YJ9	30.98	60.4	
合计	/	509.5	

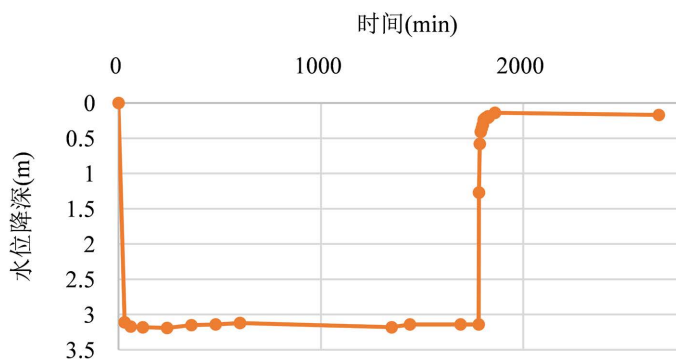


Figure 3. Depth curve of observation well water level (s-t curve)

图 3. 观测井水位降深历时曲线(s-t 曲线)

3.3. 水文地质参数计算

本研究利用地下水数值模拟软件《Visual Mod Flow》，建立了临江深基坑地下水三维渗流数值模型，并利用抽水试验资料，对模型进行参数反演。

所建立的三维模型平面上以基坑为中心，以基坑各边向外扩展约 500 m，人为设定为定水头补给边界，范围为 1050 m × 1050 m。垂向上概化为 2 层，第 1 层为承压含水层上部地层，第 2 层为由⑦粉砂、⑦5 中粗砂等组成的承压含水层，见图 4。

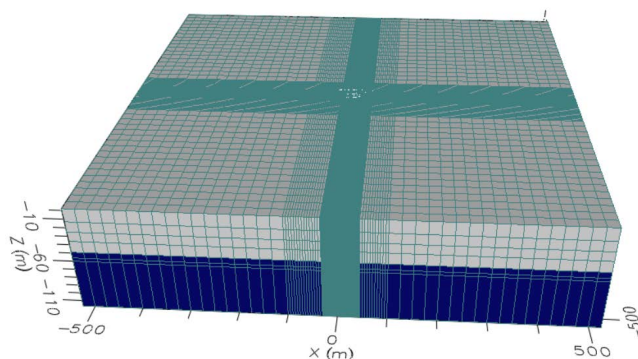


Figure 4. 3D numerical model of groundwater seepage for deep foundation pit along the river

图 4. 临江深基坑地下水三维渗流数值模型

在三维模型中设置抽水井及观测井，将现场试验数据代入模型中，可对抽水试验进行模拟计算，对比计算结果和实测的观测井水位变化，反复调整并反演相关的水文地质参数，使模型计算曲线与实测曲线尽量吻合(见图 5)，最终得到⑦层渗透系数见表 2。

Table 2. Value table of confined aquifer parameters

表 2. 承压含水层参数取值表

地层	渗透系数(m/d)	
	水平 K_h	垂向 K_v
⑦粉砂、⑦5 中粗砂	65	20

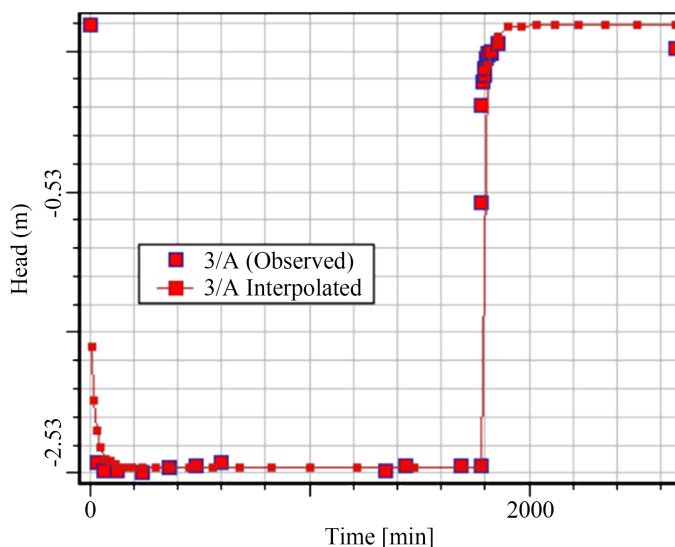


Figure 5. Fitting diagram of measured curve and simulated curve of observation well water-level elevation

图 5. 观测井水位标高实测曲线与模拟曲线拟合图

4. 悬挂式帷幕深度阻水效果影响因素分析

本研究临江深基坑采用地下连续墙未隔断承压含水层，属于悬挂式止水帷幕，可以采取坑内降水或坑外降水两种方式。由于“绕流阻水”的影响，坑内降水总涌水量小于坑外降水总涌水量；但是坑外降水相对于坑内降水，更有利于降水井的管理、保护(图 6 和图 7)。

我们知道，止水帷幕进入含水层越深，绕流阻水效果越强，但是止水帷幕进入含水层不同深度时，坑内降水与坑外降水的水量差异还缺少定量的分析。

本研究借助上述模型，通过分析地墙进入含水层深度不同时，坑内水位降至安全水位的标高，获得了所需的坑内降水总涌水量、坑外降水总涌水量及二者比值。

地墙深度由进入承压含水层 0 m 至 10 m，按 2 m 增幅依次增加，共计 6 种工况。坑外降水井滤管总长度同上取为 10 m，坑内降水井滤管长度与地墙进入含水层深度相同(地墙未进入时同坑外取 10 m)(图 8)。

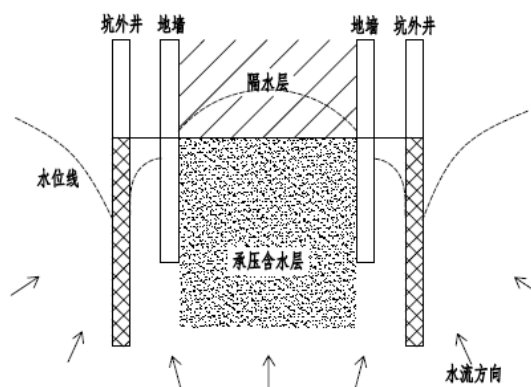


Figure 6. Schematic diagram of dewatering outside the hanging water-stop wall

图 6. 悬挂式止水帷幕坑外降水示意图

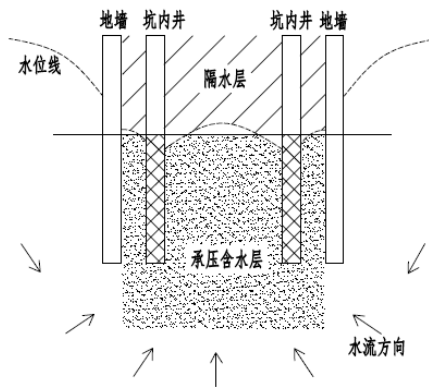


Figure 7. Schematic diagram of dewatering inside the hanging water-stop wall
图 7. 悬挂式止水帷幕坑内降水示意图

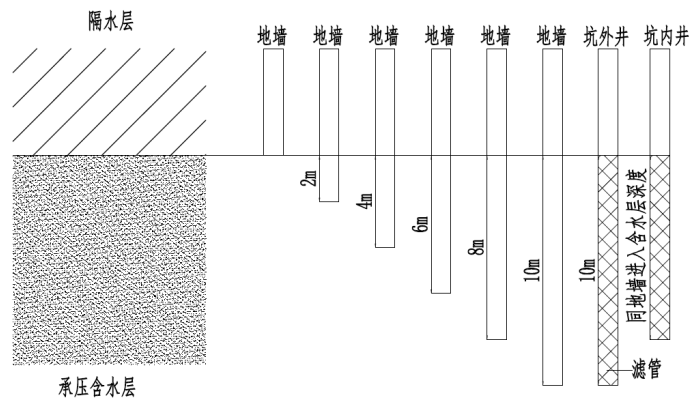


Figure 8. Diagram of working conditions at different depths when the water-stop wall enters the aquifer
图 8. 止水帷幕进入含水层不同深度工况图

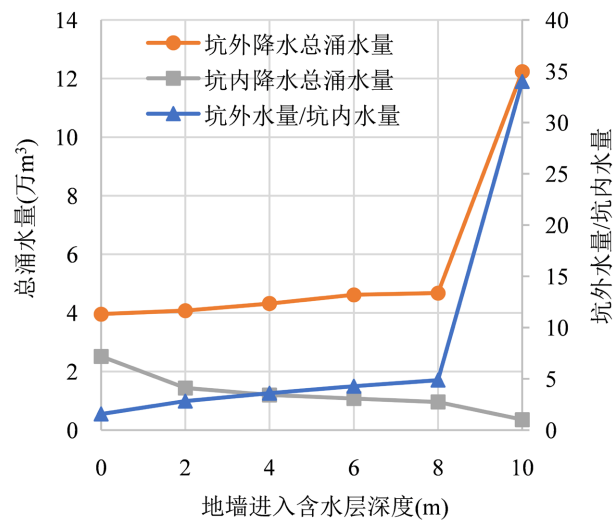


Figure 9. Comparison of dewatering inflows inside and outside the pits at different depths when the water-stop wall enters the aquifer
图 9. 止水帷幕进入含水层不同深度时坑内外降水涌水量对比曲线

基于上面的实际工况, 计算结果如图 9 所示。当止水帷幕未进入承压含水层时, 受布井等效半径的影响, 坑外、坑内降水水量之比约 1.6; 随着地墙深度递增, 坑外、坑内降水水量之比随之增加; 当地墙进入含水层分别为 6 m 和 8 m 时, 坑外、坑内水量之比分别达到 4.3 和 4.9, 坑内降水优势明显; 当地墙进入含水层 10 m, 坑外井滤管与墙底平时, 由于坑内下部存在强补给, 坑外、坑内水量之比约 34, 坑外降水代价显著增大。

综上所述, 悬挂式帷幕深度阻水效果与多种因素相关, 主要控制因素是承压水层大小、隔水帷幕深度、坑内外降水涌水量等。

5. 工程验证

基于上述现场试验结果和计算分析, 本临江深基坑止水帷幕深度进入承压含水层约 6 m, 采用坑内降水。经过上述模型计算, 共需布设 6 口坑内降压井(含 1 口观测井), 以保证水位降至安全标高以下, 总涌水量 $10,800 \text{ m}^3/\text{d}$, 单井水量 $2160 \text{ m}^3/\text{d}$, 预测水位标高等值线图如图 10 所示。

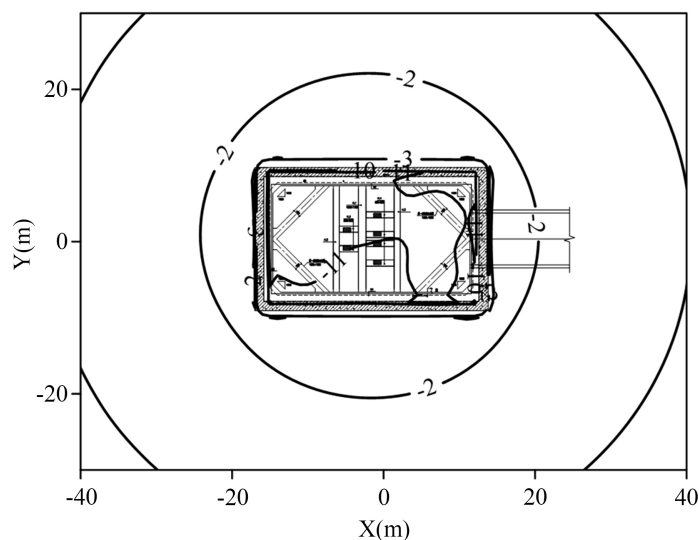


Figure 10. Contour map of confined water-level elevation after predicted dewatering
图 10. 预测降水后承压水位标高等值线图

工程实践表明: 当施工 6 口降压井并运行后, 临江深基坑内水位标高即可降至安全水位标高以下, 与预测结果基本吻合, 且保证了深基坑的顺利开挖。

6. 结论

本文通过临江富含承压水深基坑减压降水现场试验, 对于临江富含承压水的深基坑合理可行的减压降水方案进行了较深入的研究, 并得到了工程实际的验证, 主要结论如下:

- 1) 对于临江含有巨厚承压含水层的深基坑, 止水帷幕仅进入含水层几米时, 即有明显的绕流阻水作用, 且坑内降水优势明显。
- 2) 如果需要坑外降水时, 临江深基坑降水井滤管深度必须超过止水帷幕的深度, 这样才能有效降低坑内水位。
- 3) 渗透系数、含水层厚度等参数的不同, 将会对悬挂式止水帷幕绕流阻水效果带来不同的影响, 后续研究可进一步考虑。

参考文献

- [1] 马建, 冯镇, 邱军领, 等. 改革开放 40 年中国公路交通行业技术变迁及启示[J]. 长安大学学报(社会科学版), 2018, 20(6): 38-67.
- [2] 肖明清. 我国水下盾构隧道代表性工程与发展趋势[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(3): 360-367.
- [3] 宋建禹. 临江高承压水超深基坑支护方案研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(9): 1529-1537.
- [4] 李恒. 临江超深基坑降水开挖对接隧道影响分析研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2019.
- [5] 欧阳健. 超深基坑 TRD 落底式止水帷幕条件下地下水渗流特性及数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2019.
- [6] 杜宪武, 刘运思, 郭磊, 等. 复杂环境下地铁车站 PBA 工法施工降水[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(S2): 326-334.
- [7] 张哲斐, 冯晓腊, 蔡兵华, 等. 深基坑多层承压含水层中混合井降水技术优化研究[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(1): 85-94.
- [8] 蔡娇娇. 落底式止水帷幕条件下承压含水层基坑降水设计方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2018.
- [9] 龙治国, 宋增辉, 李翔. 武汉临江地区深基坑工程中群井抽水试验的应用[J]. 城市勘测, 2019(6): 188-192.
- [10] 王旭强. 悬挂式止水帷幕在深基坑降水中的作用效果研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- [11] 郭璐, 李敬, 王东元, 等. 承压水开采对天津滨海地铁车站-隧道系统影响的模拟研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(S2): 141-146.
- [12] 赵勇博. 富水砂卵石地层深基坑承压水降水优化与规律研究[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福建工程学院, 2018.
- [13] 赵宇豪. 常州地铁深基坑承压水减压降水对周围环境影响及控制措施研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2020.
- [14] 胡云华, 史世波. 基于抽水试验的临江高承压水超深基坑设计[J]. 隧道建设, 2015(S2): 50-56.
- [15] Zhu, Y.G., Gong, J. and Nie, Z.H. (2021) Shear Behaviours of Cohesionless Mixed Soils Using the DEM: The Influence of Coarse Particle Shape. *Particuology*, **55**, 151-165. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2020.07.002>