

DOI: 10.7672/sgjs2026040152

上海软土深基坑承压水抽水-回灌试验分析

杨光辉¹, 胡世亮¹, 李泽文²

(1. 上海城建市政工程(集团)有限公司, 上海 200032; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

[摘要] 软土地层易受施工扰动, 基坑降水设计不当会严重影响周边环境。以上海某在建车站深基坑工程为例, 通过现场抽水 and 回灌试验, 研究了降水对周边地层沉降的影响规律, 并基于回灌试验结果, 提出相应的措施。试验结果表明, 尽管各层承压水水位补给较慢, 但在减压降水阶段仍不可长时间停止抽水; 抽降承压水引起的地面沉降呈以抽水井为中心的辐射状漏斗形态, 深层沉降主要集中于第⑧₂层承压含水层, 占总沉降约 44.8%; 停止抽水后, 地层沉降随水位恢复出现一定滞后性回弹。为保护基坑周边敏感建筑物, 建议采取延长绕流路径与布设应急回灌井等综合措施, 控制坑内减压降水对坑外水位的影响。

[关键词] 基坑; 软土; 承压水; 试验

[中图分类号] TU43

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)04-0152-06

Analysis of Field Pumping and Recharge Tests in Confined Aquifer for Deep Foundation Excavation in Soft Soil in Shanghai

YANG Guanghui¹, HU Shiliang¹, LI Zewen²

(1. Shanghai Urban Construction Municipal Engineering (Group) Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Soft soil strata are susceptible to construction disturbances, and improper design of foundation excavation dewatering can severely affect the surrounding environment. Taking the deep foundation excavation project of a station under construction in Shanghai as an example, through on-site pumping and recharge tests, the impact of dewatering on the settlement of the surrounding strata was studied, and corresponding measures were proposed based on the results of the recharge tests. The test results showed that although the recharge of confined aquifer levels in each layer was relatively slow, pumping should not be stopped for a long time during the decompression dewatering stage. The ground settlement caused by pumping and lowering confined aquifer exhibited a radial funnel shape centered around the pumping well, with deep-layer settlement mainly concentrated in the ⑧₂ confined aquifer, accounting for about 44.8% of the total settlement. After stopping pumping, the strata settlement showed a certain lag in rebound with the recovery of water levels. To protect sensitive buildings around the foundation excavation, it is recommended to adopt comprehensive measures such as extending the bypass path and arranging emergency recharge wells to control the impact of decompression dewatering inside the pit on the water levels outside the pit.

Keywords: foundation excavation; soft soil; confined aquifer; tests

0 引言

随着轨道交通网络的日益完善, 在已运营车站旁新建换乘车站的情况逐渐增多^[1]。新建基坑开挖不可避免地会对邻近既有车站产生不利影响。

在上海地区, 基坑开挖至一定深度时, 坑底以下的承压水往往难以满足抗突涌稳定性要求, 需要进行抽水降压。对于软土深基坑而言, 地下水处理需格外谨慎, 若降水设计不当, 可能引起周边地层产生显著沉降, 将对邻近建(构)筑物安全构成威胁^[2-4]。

许多学者对抽降承压水引起的周边环境变形进行了研究。叶为民等^[5]基于 Biot 固结理论, 通过

[作者简介] 杨光辉, 高级工程师, E-mail: yanggh44@163.com

[通信作者] 李泽文, 博士研究生, E-mail: jervinlee@163.com

[收稿日期] 2025-10-30

渗流-应力耦合分析,研究了深基坑抽降承压水对周边地表沉降的影响规律,并指出减压降水是引起坑外区域性地表沉降的主要原因。李进军等^[6]结合多个深基坑工程的群井抽水试验结果,总结了群井抽水试验结果对承压水控制设计的作用,并根据试验结果分析了降承压水对周边环境的影响。刘祥勇等^[7]针对深厚富水砂性地层,通过开展一系列抽灌试验,探讨了降水及水位恢复引起周边地层沉降的变化规律。然而,受地质条件变化的影响,不同地区的基坑受力变形性状存在较大差异。因此,有必要通过现场抽水试验确定水文地质条件,为降水设计提供依据,确保基坑安全。

本文依托上海某在建地铁车站深基坑工程,在工程场地内开展现场抽水回灌试验,以获取该场地的水文地质参数,以此为基坑施工的承压水控制提供依据。

1 工程概况

某在建车站位于上海市嘉定区,沿曹安公路东西向敷设,如图 1 所示。该站为地下 3 层岛式车站,内净尺寸为 21.6m×250m,围护结构采用 1 200mm 厚地下连续墙。车站基坑采用明挖顺作法施工,开挖深度 26.36~29.08m。

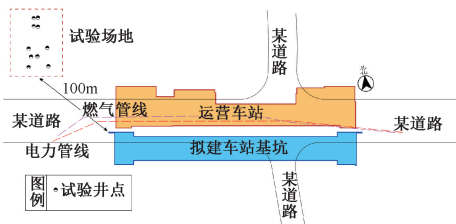


图 1 车站周边环境

Fig. 1 The surrounding environment of the station

车站建设地点位于现状道路旁,道路周边范围管线密集,地下管线类型主要为电力、通信信息、燃气、给排水管线等。在建车站北侧为既有运营车站,二者呈并行设置,最小距离约 4.4m。既有车站主体为单柱双跨现浇混凝土箱形结构,站台中心处顶板覆土约 3.35m,底板埋深约 17.20m,围护采用 800mm 厚地下连续墙,墙深约 35m。

2 工程地质与水文条件

工程地质剖面如图 2 所示,场地地面下 105m 深度范围内主要为黏性土、粉性土及砂土。基坑坑底位于第⑤₃层粉质黏土层中,围护墙趾位于第⑧₂层砂质粉土夹粉质黏土层中。

拟建场地潜水主要赋存于浅部填土、黏性土、粉性土中,补给来源主要有大气降水入渗、潮汛及地表水径流侧向补给,其排泄方式以蒸发消耗为主。

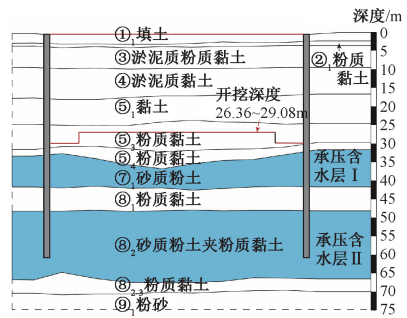


图 2 工程地质剖面

Fig. 2 Engineering geological profile

潜水水位呈季节性波动,年平均水位埋深 0.5~0.7m。勘察期间,钻孔潜水稳定水位埋深 0.75~1.21m。

拟建场地承压含水层分布于第⑦₁层、⑧₂层。承压水补给来源以地下水下渗、越流补给及侧向径流补给为主,排泄方式主要为人工开采。承压水水位呈周期性变化,第⑦₁、⑧₂、⑨₁层中的承压水位埋深的变化幅度一般在 3~12m,均低于潜水位。

3 抽水试验方案

3.1 试验目的

1) 查明主要承压含水层水力联系及各层在试验期间的水头高度,以供计算本场地降承压水的临界开挖深度。

2) 获取主要承压含水层的水文地质参数(渗透系数、弹性释水系数等),测定试验孔实际涌水量和影响半径等。

3) 通过监测抽水试验期间的地表沉降,分析和预测降水引起基坑周边地面沉降的时空分布和影响程度。

4) 确定回灌时间、回灌量与水位恢复的关系,以及回灌的可实施性。

3.2 试验井布置

为保护邻近运营车站,减小抽水试验对该结构的影响,试验场地选址位于拟建场地西北方位,与拟建基坑净距约 100m。采用单井抽水试验、群井抽水试验和单井回灌试验、群井回灌试验,在综合考虑抽水/回灌试验的技术要求、水文地质条件和工程实际情况后,抽水试验井布置方案如图 3 所示。针对第⑦₁层,试验场地内共布置 3 口试验井,其中抽水井 1 口、观测井 2 口,深度均为 42m;针对第⑧₂层,试验场地内共布置 7 口试验井,其中抽水井 4 口(呈四边形分布,边长约 20m),观测井 3 口,深 56~62m,具体参数如表 1 所示。

3.3 深层土体沉降监测

试验场地内布设 1 组 5 个深层沉降监测孔,于孔底对应设置 5 个分层沉降标测标,深度分别为

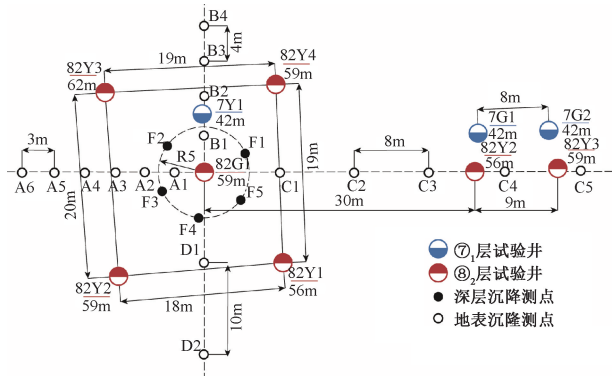


图3 试验井及测点布置

Fig. 3 Layout of wells and monitoring points

表1 试验井结构具体参数

Table 1 Specific parameters of test well structure

含水层	编号	井深/ m	孔径/ mm	管径/ mm	井管埋深/ m	滤管长度/ m	填砾埋深/ m	备注
⑦ ₁ 层	7Y1	42	650	273	0~35	6	33~42	抽水井
	7G1	42	650	273	0~35	6	33~42	观测井
	7G2	42	650	273	0~35	6	33~42	观测井
⑧ ₂ 层	82Y1	56	650	273	0~49	6	47~56	抽水兼回灌井
	82Y2	59	650	273	0~49	9	47~59	抽水兼回灌井
	82Y3	62	650	273	0~49	12	47~62	抽水兼回灌井
	82Y4	59	650	273	0~49	9	47~59	抽水兼回灌井
	82G1	59	650	273	0~49	9	47~59	观测井
	82G2	56	650	273	0~49	6	47~56	观测井
	82G3	59	650	273	0~49	9	47~59	观测井

35,42,48,56,65m,孔间距>5m,测点布设平面和深度如图4所示。

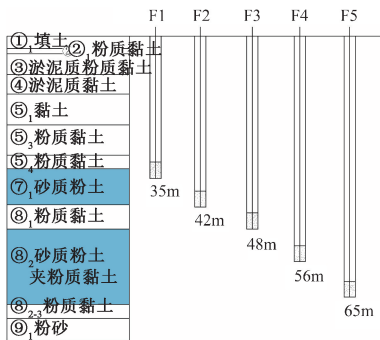


图4 深层沉降测孔剖面

Fig. 4 Deep settlement monitoring borehole profile

4 试验结果分析

4.1 初始水位

在抽水试验正式开始前,对承压水初始水位进行观测。根据观测结果,该工程第⑦₁层承压含水层初始水位埋深为3.21~3.91m;第⑧₂层承压含水

层初始水位埋深为3.72~4.41m。在降水设计时,从安全角度考虑,第⑦₁、⑧₂层承压含水层初始水位均按地面以下3m计算。

4.2 抽水试验

4.2.1 第⑦₁层单井试验

试验期间,抽水井7Y1出水量5.6m³/h,抽水井内动水位下降约27.9m。抽水试验共历时约2900min,随后停止抽水进行水位恢复。各观测井水位变化历时曲线如图5所示。7Y1,7G1(距抽水井30.47m),7G2(距抽水井38.24m)水位降深分别为27.88,9.18,8.41m。

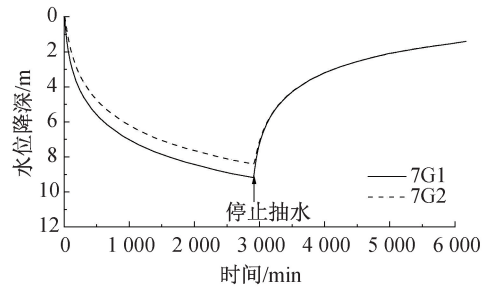


图5 ⑦₁层单井试验水位变化历时曲线

Fig. 5 Duration curve of water level in single well pumping test of ⑦₁ layer

可以看出,单井抽水持续约48h后,水位基本趋于稳定。最终⑦₁层观测孔水位下降8.41~9.18m,结合各观测井与抽水井实际距离,可得水位降深曲线:

$$s = -3.522 \ln r + 21.234 \quad (1)$$

式中: s 为某点水位降深; r 为该点距抽水井距离。 $s=0$ 时,可推测该组单井试验影响半径约为420m。计算得到的影响半径较大,这可能是由于本次单井试验观测井数量较少,从而引起了一定误差。此外,抽水试验结果表明,第⑧₂层水位在⑦₁层抽水期间的变化幅度为3~10cm,没有明显下降趋势,说明第⑦₁层与第⑧₂层水力联系不密切。单井抽水试验结束后,观测井水位恢复较慢,约50min恢复10%左右,恢复500min后,水位基本能恢复至抽水试验前的50%。

4.2.2 第⑧₂层单井试验

试验期间,抽水井82Y1出水量为1.9m³/h,抽水井内动水位下降约27.8m。抽水试验共历时约2880min,随后停止抽水进行水位恢复。各观测井水位变化历时曲线如图6所示,各井水位降深-井距统计如表2所示。单井抽水持续约48h后,水位基本趋于稳定。最终⑧₂层观测孔水位下降4.73~11.41m。结合各观测井与抽水井实际距离,可得水

位降深曲线为 $s = -5.185 \ln r + 24.806$ 。该组单井试验影响半径约 120m。此外,抽水试验结果表明,在第⑧₂层抽水期间,第⑦₁层水位变化幅度 3~5cm,没有明显下降趋势,进一步说明第⑦₁层与第⑧₂层水力联系不密切。单井抽水试验结束后,停抽后观测井水位恢复较慢,约 50min 恢复 10%左右,恢复 250min 后,水位基本能恢复至抽水试验前的 50%。

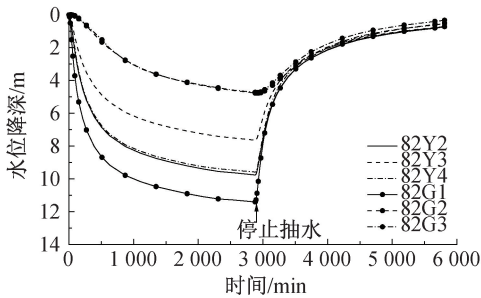


图 6 ⑧₂层单井试验水位变化历时曲线

Fig. 6 Duration curve of water level in single well pumping test of ⑧₂ layer

表 2 第⑧₂层单井试验各井水位降深-井距统计

Table 2 Water level decline and well distance statistics in single well pumping test of ⑧₂ layer

井号	与抽水井距离/m	水位降深/m	备注
82Y1	—	27.77	抽水井
82Y2	18.17	9.77	观测井
82Y3	27.00	7.64	观测井
82Y4	19.35	9.59	观测井
82G1	13.08	11.41	观测井
82G2	23.28	4.76	观测井
82G3	31.84	4.73	观测井

4.2.3 第⑧₂层群井试验

群井抽水期间,4口抽水井出水量较为稳定:抽水井 82Y1, 82Y2, 82Y3, 82Y4 平均出水量分别为 1.83, 1.25, 2.52, 1.45m³/h, 动水位基本分别保持在地下 54, 56, 58, 56m。群井抽水试验历时 7d, 各观测井水位达到稳定, 随后停止抽水进行水位恢复。各观测井水位变化历时曲线如图 7 所示。群井抽水期间, 同层位观测井水位下降幅度明显, 水位稳定后, 群井中心的观测井(82G1)降深约 25.57m, 而距群井中心 30~39m 的观测井水位降深为 10.82~10.85m; 对于第⑦₁层, 相应的观测井水位降深为 21~22cm, 进一步验证前述结论: 第⑦₁层粉质黏土的隔水性能相对较好, 第⑦₁层与第⑧₂层水力联系不密切。

群井抽水试验结束后, 对水位恢复进行监测, 恢复时间约 170h, 各观测井水位已基本恢复至试验前水平。停抽后观测井水位恢复较慢, 约 50min 恢

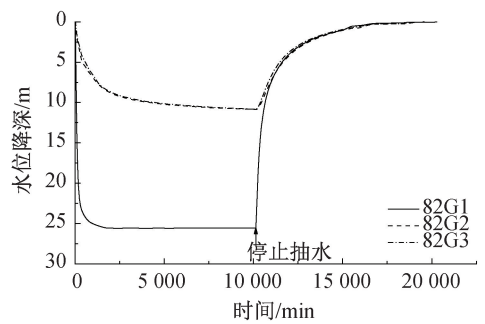


图 7 ⑧₂层群井试验水位变化历时曲线

Fig. 7 Duration curve of water level in group well pumping test of ⑧₂ layer

复 10%左右, 恢复 300min 后, 水位基本能恢复至抽水试验前的 50%。

4.3 回灌试验

为减小坑内降承压水对抗外土体沉降的影响, 实际工程可能需要采取回灌措施以保持坑外承压水位。针对第⑧₂层开展回灌试验, 分析各回灌参数与水位恢复的关系。

4.3.1 单井回灌

以 82Y1 为回灌井对第⑧₂层开展单井回灌试验, 其余井点作为观测井。本次回灌试验进行了 4 个阶段试验, 对应的回灌压力分别为 0, 0.05, 0.10, 0.15MPa。统计不同回灌压力下的回灌量, 回灌量随着回灌压力的增加而逐渐增加, 回灌压力 0.05, 0.10, 0.15MPa 情况下的回灌量分别为 0.30, 0.65, 0.83m³/h。

不同阶段观测井水位上升量与其距回灌井距离的关系如图 8 所示。当回灌压力增大时, 观测井水位上升量相应增加。同时, 距离回灌井较近的 82G1 观测井水位抬升迅速, 且抬升幅度较大, 0.15MPa 的回灌压力下最终抬升幅度约为 2.53m; 而距离回灌井较远的 82G2, 82G3 水位抬升较缓, 幅度较小, 最终抬升幅度约为 0.51, 0.45m。以 0.15MPa 的最终水位抬升为基准, 计算得到各压力阶段的水位上升率: 回灌压力为 0.05, 0.15MPa 下, 分别平均上升 43.1%, 73.1%。

4.3.2 群井回灌

基于 82Y1~82Y4 回灌井开展第⑧₂层群井回灌试验, 其余井点为观测井。回灌试验预计进行 4 个阶段, 对应回灌压力分别为 0, 0.05, 0.10 和 0.15MPa。而在实际试验过程中, 在进行第 3 阶段加压回灌时, 82G1 观测井水位高出井口, 因而停止群井回灌。不同回灌压力下各回灌井的实际回灌量如图 9 所示, 回灌量随回灌压力的增加而增加。其中,

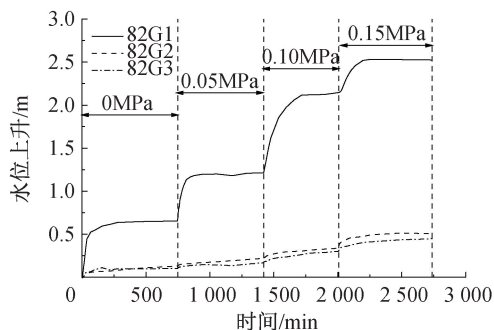


图 8 ⑧₂ 层单井回灌试验回灌压力与水位变化历时曲线

Fig. 8 Duration curve of recharge pressure and water level change in single well recharge test of ⑧₂ layer

回灌压力为 0.05MPa 时,回灌量离散程度相对较大。

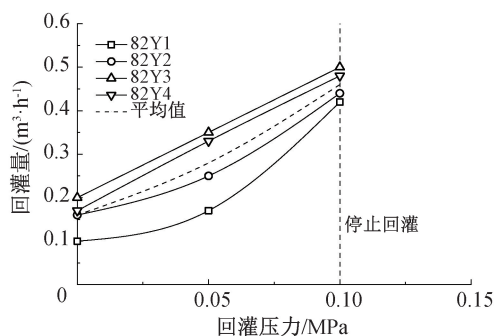


图 9 ⑧₂ 层群井回灌试验回灌量与回灌压力关系

Fig. 9 Relationship of recharge quantity and recharge pressure in group well recharge test of ⑧₂ layer

不同回灌压力阶段观测井水位上升量变化情况如图 10 所示。群井回灌过程中,各观测井水位抬升幅度明显,且距离回灌中心越近,水位上升速度越快。当回灌压力加压至 0.05MPa 时,距回灌中心最近的观测井水位已基本接近井口。以回灌压力 0.10MPa 的最终水位抬升量为基准,0MPa 下的观测井水位平均上升约 31.1%,0.05MPa 下的平均上升可达约 96.2%。

综合第⑧₂ 层回灌试验分析结果可知,由于第⑧₂ 层渗透系数较小,土层含黏土较多,在不同回灌压力阶段,整体回灌量均较小。回灌时,距离回灌中心 <15m 范围内的水位抬升明显,而当距离 >20m 时,水位抬升幅度较小。

5 周边地层沉降

5.1 地表沉降

第⑧₂ 层进行群井试验期间,对场地周边 100m 范围内地表沉降变化情况进行跟踪监测,如图 11 所示。在对承压含水层进行持续抽水时,地面沉降随

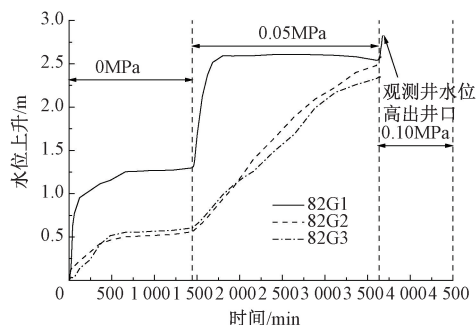


图 10 ⑧₂ 层群井回灌试验回灌压力与水位变化历时曲线

Fig. 10 Duration curve of recharge pressure and water level change in group well recharge test of ⑧₂ layer

着抽水时间的增加不断增大,且距离抽水中心越近,沉降发展速率越快。停止抽水后,地表沉降并未马上回弹,而是继续呈现增长趋势,但沉降增加速率放缓,表现出明显滞后。直至水位恢复至试验前 90% 水平时,地表沉降开始呈现回弹,至水位恢复至试验前水平时,回弹幅度约 38%,回弹速率整体较慢。

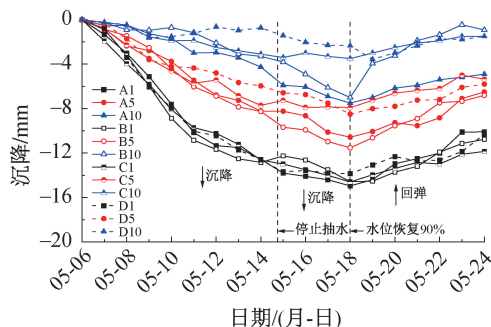


图 11 地表累计沉降历时曲线

Fig. 11 Duration curve of accumulated ground settlement

抽水结束后的最大地表沉降云图如图 12 所示。群井抽水后,地表沉降分布呈现由抽水中心向外辐射状,距离抽水中心越近,沉降值越大,当逐渐远离抽水中心时,沉降值呈减小趋势,且减小幅度逐渐放缓。距抽水中心最近(约 3m)的测点 A1 实测最大沉降达 14.95mm,距离抽水中心最远(约 100m)的测点 D10 实测最大沉降约 2.3mm。

5.2 深层土体沉降

第⑧₂ 层群井试验期间监测点 F1~F5 的深层土体沉降历时曲线如图 13 所示。在抽水试验期间,深层土体沉降变化趋势与承压含水层抽水水位变化基本一致,待水位完全恢复后,回弹明显。根据各层沉降数据,沉降主要集中于第⑧₂ 层承压含水层(深 48~65m),占深度 35m 以下总沉降的 44.8%。

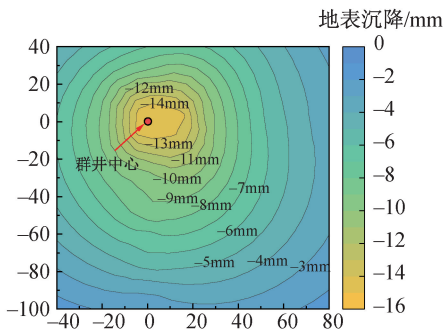


图 12 最大地表沉降云图

Fig. 12 Cloud map of maximum ground settlement

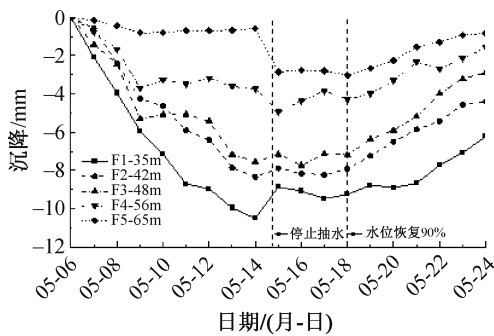


图 13 深层土体沉降历时曲线

Fig. 13 Duration curve of deep soil settlement

6 结语

通过对上海某软土深基坑开展抽水回灌试验,探明了拟建场地的承压含水层水文地质条件,并对抽灌水引起的周边地层沉降响应进行分析,主要得到以下结论。

1) 第⑦₁层承压含水层初始水位埋深为 3.21~3.91m,第⑧₂层承压含水层初始水位埋深为 3.72~4.41m。进行降水设计时,第⑦₁层和第⑧₂层承压含水层初始水位可取 3.00m。

2) 第⑦₁层与第⑧₂层的水力联系弱,在渗流分析中,第⑧₁层粉质黏土层可视作相对隔水层。为尽量减少降水对周边环境产生的影响,2层应分层独立地按需降水,尽量减少降水时间。

3) 停止抽水后,各承压含水层水位最快约 50min 内恢复 10%,恢复速度较慢,但 300min 内水位基本能恢复至 50%。因此减压降水阶段抽水设备不能长时间停止运作,现场应预备备用电源,避免承压水水位恢复导致坑底突涌。

4) 抽水试验期间,地层沉降主要为承压含水层水头下降引起的瞬时沉降。抽水持续期间沉降持

续发展,且存在一定滞后现象。停止抽水后,随着水位恢复,沉降出现回弹,待水位恢复至试验前水平时,沉降回弹幅度约 38%,整体回弹速度较慢。减压降水时应应对坑外水位变化进行严格监控。

5) 根据回灌试验结果,在围护结构具备绕流条件的情况下,在变形敏感区、沉降控制要求严格区域布置第⑧₂层应急回灌井兼观测井。

参考文献:

- [1] 孙波. 与既有地铁并行的车站深基坑变形数值模拟分析[J]. 铁道标准设计, 2018, 61(12): 93-98.
SUN B. Numerical simulation analysis of deep foundation pit deformation parallel to existing subway [J]. Railway standard design, 2018, 61(12): 93-98.
- [2] 宗露丹. 多含水层地层 45m 级基坑承压水控制设计与实践 [J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(7): 116-123.
ZONG L D. Design and practice of confined water control of 45m-level deep foundation excavation in multiple aquifer area [J]. Construction technology, 2024, 53(7): 116-123.
- [3] 邵治理, 贾宝荣, 侯征宇, 等. 上海某超深基坑分区开挖数值计算及模型参数分析 [J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(1): 23-30, 60.
SHAO Z L, JIA B R, HOU Z Y, et al. Numerical calculation and model parameter analysis of partition excavation of a ultra-deep foundation excavation in Shanghai [J]. Construction technology, 2024, 53(1): 23-30, 60.
- [4] 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.
CUI Y G. Research on the group well effect of dewatering in an ultra-large foundation pit in a deep and highly permeable aquifer [J]. Journal of engineering geology, 2015, 23(3): 574-579.
- [5] 叶为民, 万敏, 陈宝, 等. 深基坑承压含水层降水对地面沉降的影响 [J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(S2): 1799-1805.
YE W M, WAN M, CHEN B, et al. Influence of dewatering of confined aquifers on land subsidence during deep excavation [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2009, 5(S2): 1799-1805.
- [6] 李进军, 王卫东. 受承压水影响的深基坑工程中的群井抽水试验 [J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(3): 460-466.
LI J J, WANG W D. Multiple-well pumping test of deep excavation project influenced by confined water [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2010, 6(3): 460-466.
- [7] 刘祥勇, 宋享桦, 谭勇, 等. 南通富水砂性地层地铁深基坑抽水回灌现场试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42(7): 1331-1340.
LIU X Y, SONG X H, TAN Y, et al. Field tests on groundwater recharge of deep excavations in Nantong water-rich sandy stratum [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2020, 42(7): 1331-1340.