

上海市某工程深基坑设计与施工控制研究

沈 斌

上海新江桥建设发展有限公司, 上海

收稿日期: 2022年3月2日; 录用日期: 2022年3月22日; 发布日期: 2022年3月29日

摘 要

地下水层不仅对深基坑支护工程的设计与施工影响明显, 也影响着施工场地周边建筑物、道路及设施管道等的防护措施布置。本文以上海市中心城区某工程深基坑为例, 设计分析了不间断承压水层对周边环境的影响。在施工过程中采取了地下连续墙隔断承压水、连续墙接头采用H型钢接头、坑外双液注浆等加强措施, 减少深基坑施工对周边环境的影响, 结论和措施可供类似工程项目借鉴。

关键词

承压水, 抽水试验, 减压降水, 抽灌一体化, 双液注浆

Study on Design and Construction Control of Deep Foundation Pit of a Project in Shanghai

Bin Shen

Shanghai New Jiang Qiao Construction Development Co., Ltd., Shanghai

Received: Mar. 2nd, 2022; accepted: Mar. 22nd, 2022; published: Mar. 29th, 2022

Abstract

The underground water layer not only has an obvious impact on the design and construction of deep foundation pit support engineering, but also affects the layout of protective measures for buildings, roads, facilities and pipelines around the construction site. Taking a deep foundation pit of a project in the central urban area of Shanghai as an example, this paper designs and analyzes the impact of uninterrupted confined water layer on the surrounding environment. In the construction process, strengthening measures such as diaphragm wall isolating confined water,

H-shaped steel joint for diaphragm wall joint and double liquid grouting outside the pit are taken to reduce the impact of deep foundation pit construction on the surrounding environment. The conclusions and measures can be used for reference for similar projects.

Keywords

Confined Water, Pumping Test, Decompression and Precipitation, Integration of Pumping and Irrigation, Double-Liquid Grouting

Copyright © 2022 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

工程位于上海市中心城区，基坑面积 27,264 m²，开挖深度 14.30~14.70 m (集水井、电梯井等局部落深 1.50~3.10 m)。项目因为位于老城区，煤气、雨污水、电力、信息管线众多，距基坑开挖面最近距离 9 m；周边有 1~3 层老式民房，8 层住宅等建筑(距开挖面最近距离只有 8 m)。开挖深度深，周边环境保护压力较大。以下从基坑围护设计、降水、房屋沉降处理几个方面[1]，介绍所采取的措施，减少施工对周边环境的影响，保证基坑安全。

2. 减少降承压水对周边环境的影响确定围护方案

项目周边 8 层住宅居民对本项目施工意见很大，在场地平整阶段已发生居民进入施工场地阻止施工的情况，维稳成为本项目顺利施工的第一要素，须严格控制基坑施工和降水对其影响，而降承压水对周边环境的影响是其中关键因素。必须对通常采用的敞开式降承压水、抽灌一体化降承压水对 8 层住宅沉降的影响进行计算分析比较，确定这两种降水承压水方案是否可行[2] [3] [4]。

2.1. 坑内敞开式降承压水

开挖深度 14 m 的基坑，一般可采用钻孔灌注桩+搅拌桩、地下连续墙或 SMW 工法等板式支护作为挡土止水结构，竖向设置两道内支撑的形式。其中地下连续墙整体刚度最好，对周边环境保护最为有利，但同时造价相对也最高，经济性稍差；如采用 SMW 工法，因本工程面积较大，工期较长，型钢租赁期长，造价优势不明显，且刚度偏小对周边环境保护不利，型钢拔除时对周边环境及工期都有一定影响。因此，最初围护设计方案采用钻孔灌注桩挡土+三轴搅拌桩止水，Φ1100@1300 钻孔灌注桩作为挡土结构，桩长 31 m，桩底进入 7-1 层不小于 1 m；止水桩采用单排 Φ850@1200 三轴搅拌桩，桩长 21.5 m，桩底进入坑底不小于 6.85 m (图 1)。

本工程开挖深度 14 m 以上，坑底下存在⑦层承压含水层，基坑底板抗突涌稳定性验算结果表明：按照通常的上海⑦层承压水头高度，须降承压水，避免坑底突涌。为确保本工程顺利进行，建设方为确保安全，委托围护设计单位进行专项抽水试验，为进一步了解承压水水头埋深分布，取得承压含水层的详细水文地质参数、从而制定可行、合理的承压水处理方案。

抽水试验开始前，实测各试验井的⑦层承压水位初始埋深为 3.76~4.08 m，表 1 为根据数值模拟参数反演综合确定⑦层的水力参数。

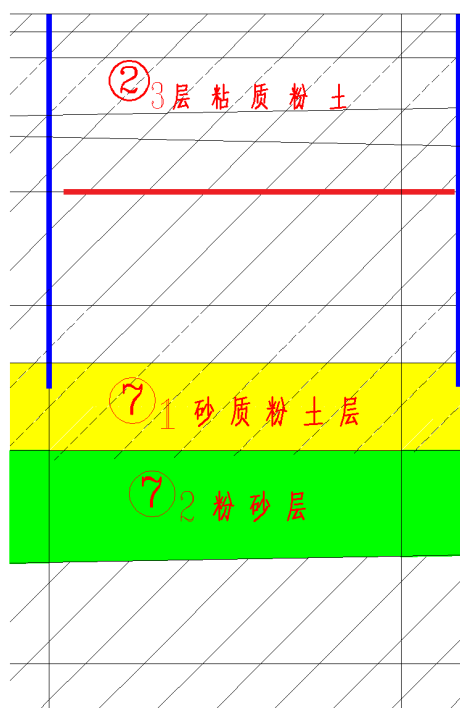


Figure 1. Typical engineering geological profile
图 1. 典型工程地质剖面图

Table 1. Summary of aquifer parameters

表 1. 含水层参数汇总表

含水层		⑦ ₁	⑦ ₂	
含水层土性		砂质粉土层	粉砂	
含水层顶板最浅顶板埋深(m)		28.00	33.00	
含水层平均厚度(m)		6	8	
静止水位(m)	2017年10月抽水试验	3.76~4.08		
	降水设计建议值	3.76		
数值解 (水文地质参数建议值)	水平渗透系数	(m/d)	0.9	2.2
		(cm/s)	1.04×10^{-3}	2.55×10^{-3}
	垂直渗透系数	(m/d)	0.3	0.7
		(cm/s)	3.47×10^{-4}	8.10×10^{-4}
贮水率 μ_s (1/m)		8.0×10^{-5}	1.0×10^{-4}	

地下水三维非稳定流数值模型在采用抽水试验区水文地质求参模型的基础上,对模型范围、地层划分和网格剖分、边界条件等做出调整。模型中采用表 1 的⑦层渗透系数。由于本方案止水帷幕深度未深入至⑦层中,减压降水属于敞开式降水,按照基坑分 2 个区先后施工,基坑内减压降水后,预估由减压降水所引起的地面沉降如图 2。

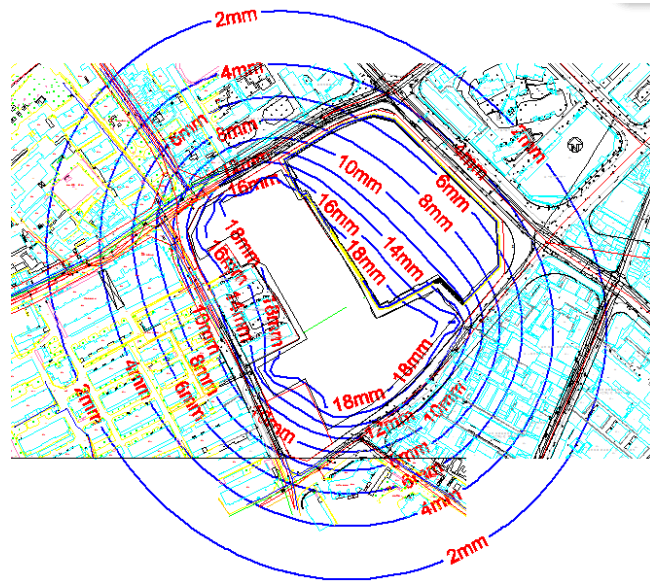


Figure 2. Contour map of ground subsidence around foundation pit caused by decompression and precipitation (unit: mm)
图 2. 减压降水引发的基坑周边地面沉降等值线图(单位: mm)

由以上计算可知, 基坑内降压降水满足各落深坑设计要求外, 预估基坑外由减压降水引发的最大地面沉降为 18 mm。

2.2. 抽灌一体化降承压水

在基坑和被保护建(构)筑物之间(靠近被保护建筑物一侧)设一排回灌井, 在坑内含水层渗水的同时通过回灌井向地下灌水, 使基坑周围被保护地域实际地下水位保持不变或变化在允许的范围内。

在抽灌一体化作用下, 承压水抽水 30 天后, 因减压降水引起的地面沉降预测结果见图 3。

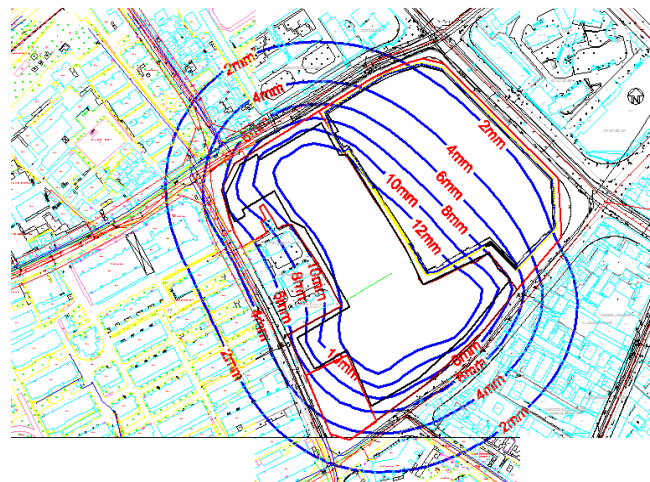


Figure 3. Predicted contour map of land subsidence caused by 30-day decompression and precipitation with integrated pumping and irrigation (unit: mm)
图 3. 抽灌一体化减压降水 30 天引发的地面沉降预测等值线图(单位: mm)

根据上述预测结果，在抽灌一体化设计下，抽水 30 天后由减压降水引起的坑外 8 层住宅地面沉降约为 6~10 mm。上述沉降值为降水引起的沉降理论预估值，实际环境变形由开挖后墙体变形、坑底隆起、降水、墙体渗漏等共同形成，应综合考虑这些因素。

在以上两种不同的降水思路下，坑内所需抽水降压井数不尽相同，且对坑外环境的影响也存在较大差异，详见表 2。

Table 2. Comparative analysis of two design schemes for depressurized and confined water
表 2. 两种降承压水设计方案对比分析

思路	说明	压坑内降抽水井数(口)	坑外回灌井数(口)	8 层住宅地面引起最大沉降(mm)
敞开式降承压水	无回灌措施下，本着“按需降水”的原则仅保障基坑本体安全	17	/	18
抽灌一体化降承压水	坑内抽水与坑外回灌进行一体化设计，保障基坑本体与环境的三重安全	21	27	10

经以上对比分析可知，在现有围护深度下，止水帷幕没有隔断承压水层情况下，抽灌一体化降承压水可以减少周边沉降，但对周边影响还是比较大，最大理论地面沉降 10 mm。

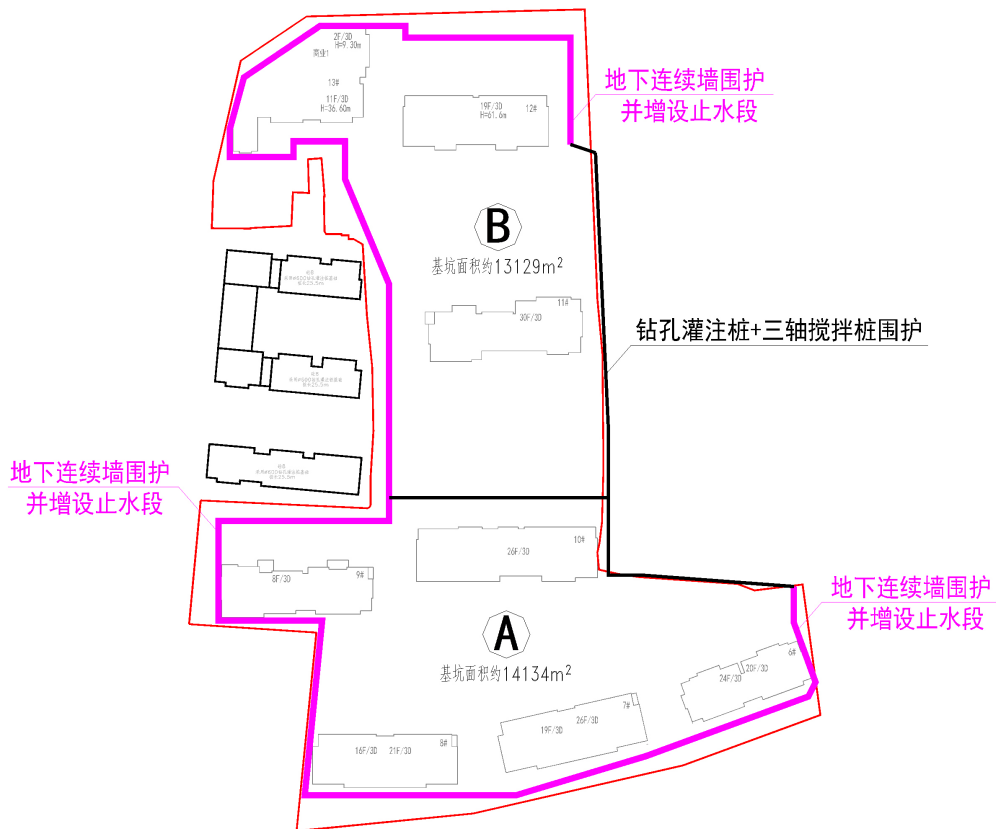


Figure 4. Schematic diagram of different enclosure forms
图 4. 不同围护形式分区示意图

2.3. 地下连续墙隔断承压水层

通过以上两种降承压水方案引起地面沉降分析,这两种方案基本对周边环境保护有特殊要求的基坑存在不可控的风险。本项目施工进度控制重要性远远大于经济性能指标,如果因周边居民影响导致基坑施工无法顺利进行,带来的时间成本和基坑安全风险是无法估量的。最终方案对环境保护要求较高区域采用地下连续墙(非“两墙合一”)并增设素砼段隔断承压水层的围护方案,虽然增加了造价,但提高了围护体刚度、有效阻断了层压水,满足复杂周边环境的保护要求。地下连续墙受力段墙底进入坑底 16.3 m~16.7 m;增设 14.5 m 长素混凝土止水段,墙底进入⑧-1 粘土层不小于 1.2 m。

最终方案(图 4)将大部分区域止水帷幕(地下连续墙)加深,隔断⑦层,基坑内减压降水后,预估由减压降水所引起的地面沉降如图 5。



Figure 5. Contour map of ground subsidence around foundation pit caused by decompression and precipitation (unit: mm)

图 5. 减压降水引发的基坑周边地面沉降等值线图(单位: mm)

由以上计算可知,基坑内减压降水满足各落深坑设计要求外,预估基坑外由减压降水引发的最大地面沉降为 14 mm (东侧,本工程一期),重点保护区域由于已隔断⑦层,理论上由减压降水所引起的沉降较小。

3. 针对周边环境的其它保护措施

1) 根据主体建筑的分布,将基坑分为 2 个区先后施工,可减小每次开挖的基坑面积和边长,缩短地下工程的施工时间,减小基坑的时间和空间效应,从而有利于控制变形。

2) 除临近一期的东侧中部区域外,其余区域均利用地下连续墙增设止水段将⑦层承压含水层隔断处理(厚度 800 的地下连续墙作为挡土结构)。临近 8 层住宅区域采用整体性更好、刚度较大的地下连续墙(地下连续墙厚度增加至 1000 mm),以控制基坑变形和稳定性;为减少连续墙连接处漏水风险,该处连续墙接头由锁口管改为 H 型钢(图 6)。从实际开挖效果来看,H 型钢接头处基本没有漏水现象发生,

3) 8 层住宅区域处设置三轴搅拌桩加固,主要加固深度为坑底至坑底以下 4 m,水泥掺量 20%,坑底以上设置低掺量的弱加固,水泥掺量 10%。

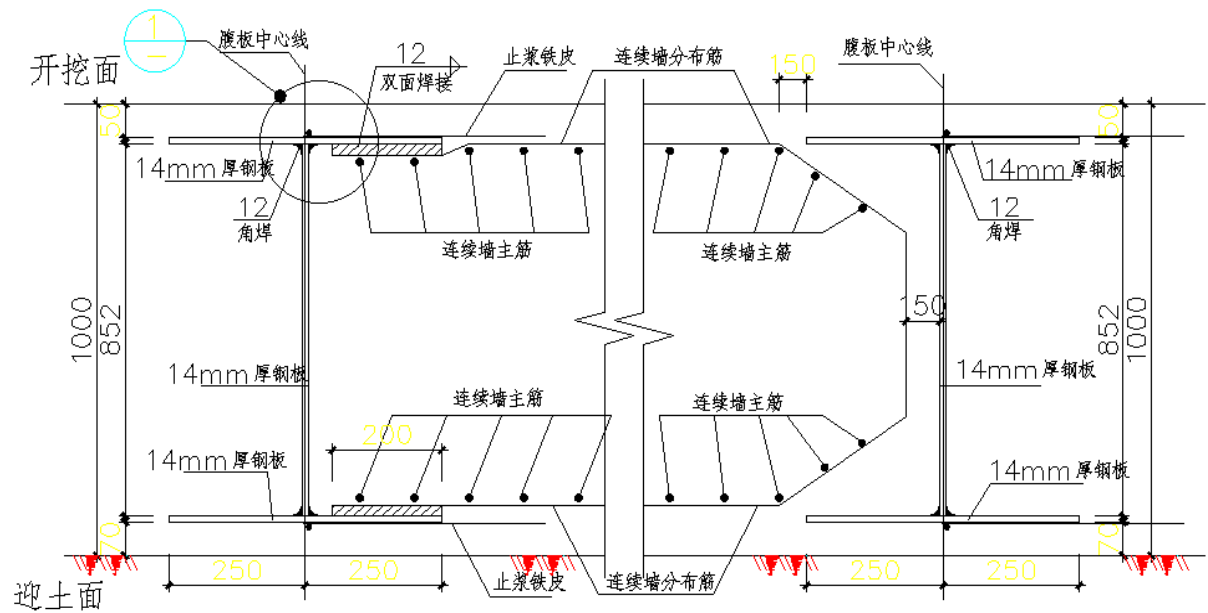


Figure 6. H-beam joint of underground diaphragm wall
图 6. 地下连续墙 H 型钢接头

4) 在基坑开挖过程中充分利用“时空效应”的原理，土方开挖应严格实行“分层分块”，尽可能减小围护结构暴露长度及无支撑暴露时间，临近保护对象区域分块开挖长度不大于 40 m。

5) 基坑开挖期间加强对周边环境的监测与观测，并根据监测结果及时调整施工速度，做到信息化施工。

6) 基坑外侧布置一定数量的坑外水位观测井，随时反映止水体系的封闭状态，如产生渗漏，及时采取封堵措施，防止基坑渗漏水对邻近建筑物及管线等产生影响。

7) 疏干降水、减压降水实行“按需降水”，严禁超降。疏干降水控制水位降至开挖面以下 1 m 的要求；减压降水在最后一层土开挖时进行，每天观测坑内外观测井水位，按照大底板施工、局部深坑施工阶段分别控制层压水头高度，减少降水对周边影响。

8) 垫层应随挖随浇，无垫层坑底暴露面积不大于 200 m²，当天开挖当天浇注完成。混凝土垫层浇至围护桩内侧，可以起一定的支撑作用。

9) 基坑边严禁有大量堆载，地面超载应控制在 20 kN/m² 以内，机械进出口通道应铺设路基箱扩散压力或局部加固地基。

10) 开挖过程中如发现围护墙体有渗漏水现象应及时采取封堵措施。

4. 坑外双液注浆减少周边房屋沉降

本项目采取了分区开挖、地下连续墙隔断层压水层、三轴搅拌桩坑底加固等措施，有效控制了周边环境变形。但由于 8 层住宅居民在原先动迁问题上与开发商条件没有谈拢，导致没有动迁成功；同时基坑开挖面距离他们很近，施工中光污染、噪音、扬尘对 8 层住宅居民生活不可避免产生很大影响。在 A 坑出地面后，8 层住宅最大沉降达到 12 mm。尽管沉降值不是很大，为了消除居民担忧，针对 8 层住宅东侧、南侧的基坑外侧进行双液注浆(水泥浆、水玻璃)予以加固。施工时，坑外双液注浆施工在 B 坑第一道支撑混凝土浇筑时开始，在开挖第二层土前结束。通过基坑监测数据分析得出，注浆时及其后一段

时间, 8层住宅沉降呈现变缓趋势: 在挖第二层土时东南角最大沉降点 F28 出现向上 0.42 mm 回弹, 开挖第三层土、底层土比开挖第一层土的沉降也有趋缓(第一层土 F28 沉降-5.61, 第三层土 F28 沉降-2.45, 底层土 F28 沉降-4.57)。对比表 3、表 4 房屋沉降阶段变化值, 表明双液注浆对其变形控制有效。通过坑外双液注浆的施工, 对坑外及建筑物的地基土进行了加固, 从而使此建筑物沉降变形得到了有效的控制, 确保了项目施工的顺利开展。

Table 3. Changes of house settlement stages
表 3. 房屋沉降阶段变化表

点号	挖第 1 层土阶段		挖第 2 层土阶段		挖第 3 层土阶段		挖底层土阶段	
	阶段变化量	累计值	阶段变化量	累计值	阶段变化量	累计值	阶段变化量	累计值
F21	-4.55	-7.20	0.55	-5.99	-1.06	-7.27	-2.54	-11.29
F22	-2.55	-4.80	0.12	-4.64	-0.02	-4.93	-1.80	-8.22
F23	-1.24	-3.01	-1.10	-4.19	-0.51	-4.50	1.25	-3.95
F24	-1.86	-3.19	-0.93	-4.02	-0.39	-4.49	0.63	-4.07
F25	-1.81	-6.63	-0.84	-8.11	0.77	-7.47	-0.40	-8.17
F26	-1.45	-7.18	-1.05	-8.46	0.02	-8.38	-0.83	-9.82
F27	-3.78	-12.57	-0.10	-13.15	-2.26	-15.11	-3.57	-20.10
F28	-5.61	-17.58	0.42	-17.50	-2.45	-20.07	-4.57	-26.49

Table 4. Changes of house settlement stages
表 4. 房屋沉降阶段变化表

点号	底板施工阶段		3 道支撑拆除阶段		2 道支撑拆除阶段	
	阶段变化量	累计值	阶段变化量	累计值	阶段变化量	累计值
F21	-4.74	-16.03	-0.26	-18.93	-2.19	-22.84
F22	-2.52	-10.74	-0.52	-12.45	-2.51	-16.67
F23	-0.64	-4.59	-0.19	-5.69	-1.41	-7.90
F24	-0.08	-3.99	-0.20	-4.49	-0.68	-5.19
F25	-1.76	-9.93	-0.26	-10.50	-1.37	-13.98
F26	-2.23	-12.05	0.10	-13.75	-1.99	-17.39
F27	-5.76	-25.86	-0.57	-29.66	-2.18	-34.02
F28	-7.15	-33.64	-0.98	-37.12	-2.41	-41.20

5. 结语

本工程针对周边环境的特殊保护要求, 重点采取了地下连续墙隔断承压水; 连续墙接头由锁口管改为 H 型钢, 减少连续墙连接处漏水风险; 坑外双液注浆加固的措施。基坑施工过程中, 围护墙侧向变形、

坑内地下水位变化、地下管线水平及竖向位移、临近建筑物竖向位移均控制在容许范围，邻近建筑物未出现主体裂缝，本工程主体结构已陆续封顶，周边房屋最大沉降 58 mm，证明了这些措施的有效性。地下连续墙隔断承压水及采用 H 型钢接头在上海瑞虹新城等项目上也取得了很好的效果；双液微扰动注浆加固方法在上海地铁隧道沉降控制上几乎是唯一的处理方法。

参考文献

- [1] 金乐文, 王琛, 梁发云. 城市滨海软土地区深层地下空间开发现状及工程问题[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(z2): 178-183.
- [2] 段博, 陈云锋, 张赢军. 紧邻超大超深基坑的地铁隧道施工微扰动双液注浆加固技术[J]. 建筑施工, 2017, 39(10): 1447-1450.
- [3] 黄炳德, 翁其平, 王卫东. 降隔相结合的承压水控制方法在深基坑工程中应用[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(增刊): 338-342.
- [4] 陆建生, 潘伟强, 沈池, 林长荣. 深基坑承压水抽灌一体化设计及工程应用[J]. 施工技术, 2014, 43(1): 48-52.