

复杂越流条件下超深基坑抽水试验及工程应用

王建秀^{1,2}, 吴林高^{1,2}, 胡力绳², 李国^{1,2}, 唐益群^{1,2}, 杨坪^{1,2}, 许旭³, 娄荣祥³

(1. 同济大学 岩土工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092;

3. 上海广联建设发展有限公司, 上海 200438)

摘要: 以上海宝钢集团浦钢公司搬迁工程(特殊钢分公司部分)炉卷热轧机项目(第二批)旋流池基坑为例, 通过抽水试验认识到含水层之间存在复杂越流, 建立其合理的水文地质概念模型, 基于该概念模型设计坑内-坑外联合作用的降水方案, 群井试验验证了降水设计的正确性。工程实践表明, 通过坑内-坑外抽水井的联合作用, 完全达到预期降水效果, 开挖过程中, 坑内干爽。结合群井试验中出现的隔断承压含水层无法疏干, 2口井抽水, 停泵1口后, 另一口抽水井水位恢复较快情况, 基于试验数据预测地墙存在渗漏, 建立应急预案, 在问题出现后及时处理, 避免重大工程事故的发生。此工程实践也可作为类似复杂地质条件下深基坑降水的参考依据。

关键词: 土力学; 超深基坑; 抽水试验; 深基坑降水; 地墙渗漏; 工程应用

中图分类号: TU 46+3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2010)增1-3082-06

PUMPING TEST AND ITS APPLICATION TO DEEP FOUNDATION PIT UNDER COMPLEX MORE FLOW HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS

WANG Jianxiu^{1,2}, WU Lingao^{1,2}, HU Lisheng², LI Guo^{1,2}, TANG Yiqun^{1,2},

YANG Ping^{1,2}, XU Xu³, LOU Rongxiang³

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092,

China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Guanlian

Construction and Developing Co., Ltd., Shanghai 200438, China)

Abstract: Taking swirl pool deep pit, PU steel relocated project, Baoshan Iron and Steel Co., Ltd., as an example, the complex more flow of confined aquifer conditions is made clear through pumping test in field, and reasonable conception model is established. The design of deep pit dewatering with pumps inside and outside of pit is completed based on the conception model. The pumping test of well group verifies the reasonability of design, and the dewatering course indicates that the more flow conception model is reasonable, and the pit is dry during construction through the combined function of well group inside and outside of pit, which meets the control standard. In pumping test by opening two wells and resting one well, leakage of concrete wall is predicated and emergency measure is prepared. When the leakage of concrete wall emerged, reasonable measures were adopted in time and serious accident was avoided. The research results can provide a reference to similar project.

Key words: soil mechanics; super-deep foundation pit; pumping test in field; dewatering of deep pit; leakage of concrete wall; engineering application

收稿日期: 2008-11-26; **修回日期:** 2009-03-01

基金项目: 上海市人才发展资金项目(2007); 上海市自然科学基金项目(10ZR1431500); 国家自然科学基金、雅砻江水电联合研究基金资助项目(50579097); 上海市重点学科(地质工程)(B308)

作者简介: 王建秀(1971-), 男, 博士, 1995年毕业于成都理工学院水文地质工程地质专业, 现任副教授, 主要从事地质工程、地下结构、岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: wang_jianxiu@163.com

1 引言

由于降水工程属于地下隐蔽工程, 在实施过程中, 现场试验至关重要。特别是对于存在复杂越流的情况, 不能正确认识其概念模型, 可能造成重大工程事故^[1~12]。

上海宝钢集团浦钢公司搬迁工程(特殊钢分公司部分)炉卷热轧机项目(第二批)位于特钢分公司厂区内, 其旋流池基坑外径 21.60 m, 内径 19.60 m, 坑底相对标高为-26.50 m(以地下连续墙顶标高为±0.00, 相当于绝对标高为+5.00 m), 采用地下连续墙围护, 墙底相对标高为-47.50 m。该基坑位于钢结构厂房内部, 如不能顺利封底, 则附近柱基无法施工, 钢结构也无法拼装, 成为整个工程的控制点。

该场地与基坑施工相关的承压水有 3 层: 第一层为微承压水, 赋存于⑤₂层的砂质粉土中; 第二层承压水赋存于⑦₁层砂质粉土中; 第三层承压水赋存于⑨₁₋₁层的砂质粉土及⑨₁₋₂层的粉细砂中(见表 1), 可能存在着复杂越流条件, 是整个工程最大的风险源。

表 1 基坑范围内代表性土层

Table 1 Strata of the foundation pit

土层编号	地层名称	层底深度 /m	层底标高 /m	地层厚度 /m	重度 /($kN \cdot m^{-3}$)
① ₁	杂填土	1.90	-3.06	1.90	
②	粉质黏土	3.40	-4.56	1.50	18.80
③ ₂	粉质黏土夹淤泥质粉质黏土	6.30	-7.46	2.90	18.70
③ ₃	淤泥质粉质黏土	10.40	-11.56	4.10	17.40
④	淤泥质黏土	21.30	-22.46	10.90	16.70
⑤ ₁	粉质黏土	23.80	-24.96	2.50	17.40
⑤ ₂	砂质粉土	28.20	-29.36	4.40	18.60
⑤ ₃	粉质黏土夹粉土	42.90	-44.06	14.70	18.00
⑦ ₁	砂质粉土	68.00	-69.16	25.10	18.50
⑧ ₂	粉质黏土夹砂质粉土	72.40	-73.56	4.40	17.80
⑨ ₁₋₁	粉质黏土夹砂质粉土	86.45	-87.61	14.05	18.70
⑨ ₁₋₂	粉细砂	-	-	-	19.30

注: “-”表示未打穿。

为此, 现场进行了大量的单井和群井抽水试验(抽水试验前地墙已经施工完毕), 用于完善水文地质概念模型、验证降水设计和分析施工中地墙渗漏风险。试验中发现场地 3 层承压水之间存在着复杂越流, 特别是第二层承压水通过越流补给第一层。

同时, 抽水试验发现地墙存在着渗漏风险。按照分层降水的方法设计了降水方案并通过群井试验进行了验证。在降水过程中, 整个基坑干爽, 未出现坑底突涌现象, 达到了设计要求。在第四层土开挖中, 出现了地墙渗漏, 由于按照试验结果已准备好应急预案, 在最短时间内实现了渗漏点的封堵。抽水试验取得了良好的效果, 保证了整个工程的顺利进行。

2 基于抽水试验的地层复杂越流特性分析

2.1 抽水试验设计

本抽水试验在降水预设计完成后进行, 主要为降水设计提供水文地质参数及查明 3 层承压水的水力联系。图 1 为试验井的平面布置图, 图 2 为 104-83 地质剖面图。井结构参见表 2, 单井、两井抽水试验设计及实施情况参见表 3。

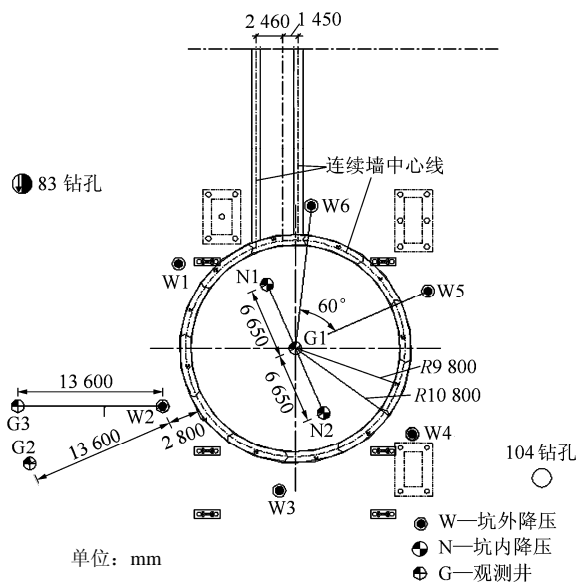


图 1 试验井的平面布置图

Fig.1 Plan distribution of testing well

2.2 地层复杂越流特性分析

2.2.1 第一、二层承压水水力联系

抽水试验表明, 抽水井在坑外第二层承压水减压(W5/W2 抽水量为 6 m³/h, 动水位埋深在 40 m 左右), 坑内第一层承压水观测井水位同步降落, 但与第二层承压水存在着一定水头差, 说明第一层承压水通过越流补给第二层, 二者之间存在着较强的水力联系(见图 3, 图中: N1, N2 为第一层承压水降深; W2, G1, G2 为第二层承压水降深; G3 为第三层承压水降深)。⑤₃层为第二层承压水(⑦₁层)的隔水

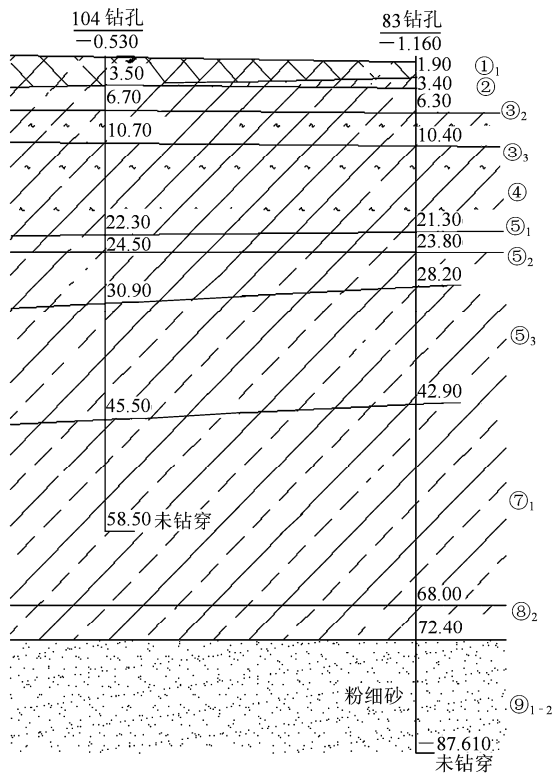


图2 104 - 83 地质剖面图(单位: m)
Fig.2 Geological profile 104 - 83(unit: m)

表2 井结构参数

Table 2 Well structure, excavation and concrete wall depth

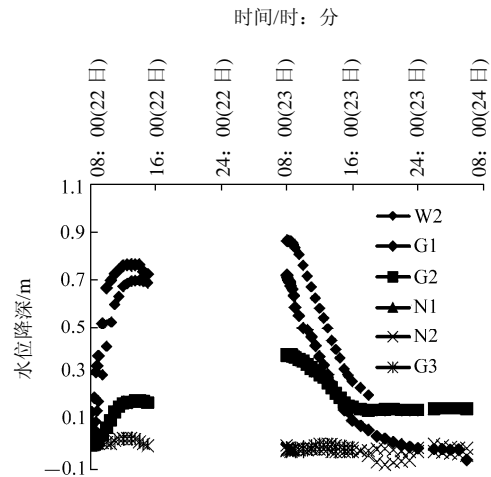
井号	井深/m	井口标高/m	滤管顶标高/m	滤管底标高/m	滤管长度/m
N1 - N2	38.97	+5	-21.97	-31.97	10
W1 - W6	60.97	+5	-41.97	-53.97	12
G1 - G2	52.97	+5	-41.97	-46.97	5
G3	78.56	+5	-68.56	-72.56	4

表3 抽水试验设计及实施情况

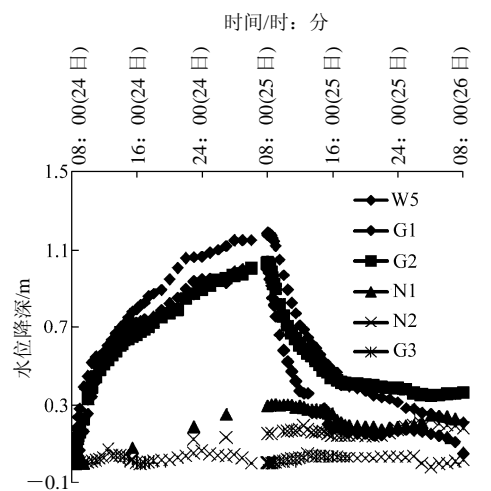
Table 3 Design of pumping test and operation course

试验方式	抽水井号	观测井号	试验周期	实施时间/年月日
单井	W5	G1, G2, G3, N1, N2, W2	24 h 抽观结合	20080622~20080624
	W2	G1, G2, G3, N1, N2, W5	24 h 抽观结合	20080624~20080626
两井	W2, W5	G1, G2, G3, N1, N2	W2 抽 12 h, W2+W5 抽观 12 h, 抽观结合	20080626~20080627

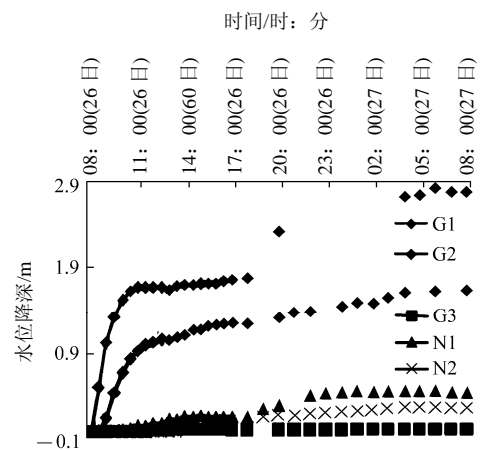
顶板, 其土性为粉质黏土夹粉土, 因夹有粉土导致静探曲线呈“锯齿”状, 比贯入阻力平均值达到 3.19 MPa, 说明粉土含量较高。同时, 按照室内试验成果, 其 $K_h = 5.46 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$, $K_v = 5.18 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 。由于⑤₃层夹有大量粉土, ⑤₂层和⑦₁层存在越流, 场地内第一、二层承压水存在连通性。



(a) W5 单井



(b) W2 单井



(c) W5, W2 “单井+两井”

图3 抽水试验水位降深曲线(2008年6月)

Fig.3 Drawdown curves of pumping test with single well and 2 wells (Jane, 2008)

2.2.2 第二、三层承压水水力联系

抽水试验表明, 抽水井在坑外第二层承压水减压, 第三层承压水观测井水位同步降落, 但变化微

小, 说明二者之间存在水力联系, 但水力联系一般(见图 3)。场地内的⑧₂层为第三层承压水(⑨₁₋₁, ⑨₁₋₂层)的隔水顶板, 土性为物理力学性质较好的粉质黏土夹砂质粉土, 因夹粉土导致标贯锤击数和静力触探比贯入阻力值偏高, 标贯锤击数 N 平均值达到了 26.1 击, 比贯入阻力 P_s 平均值达到了 4.63 MPa。但由于⑧₂层本身坚硬, 隔水性能好, 所以其水力联系在降水设计中可以不予考虑。

2.2.3 复杂越流条件下降水概念模型

由以上分析可知, 场地共有 3 层承压水, 其中一、二层承压水之间存在着水力联系, 在分层降水设计中, 需要考虑二者的耦合作用, 即在开井、关井中需要考虑二者的相互作用, 特别是在坑内减压和坑外减压达到设计深度后, 坑内、坑外开关井特别需要注意二者的叠加作用, 避免一层关井导致另一层水位超标, 造成危害。而第二、三层承压水之间水力联系不强, 在设计中可以不予重点考虑, 但需要随时进行监测(G3 观测井), 保证工程安全。

3 基于抽水试验的基坑降水效果检验

3.1 抽水试验设计

本抽水试验在降水设计完成后进行, 主要是检验降水设计的合理性和群井共同作用的效果。试验井的平面布置参见图 1, 井结构参数见表 2。群井试验于 2008 年 7 月 28 日开始, 抽水试验设计及实施情况参见表 4。

表 4 群井抽水试验工况(2008 年)

Table 4 Operation course of design of group pumping test (in 2008)

抽水井		抽水时间		观测井
坑外	坑内	开始	结束	
W3, W6	N1	7月28日 8:00	7月30日 8:00	G1, G2, G3, N2
W3, W6/W1, W4	N1	7月30日 8:00	8月1日 8:00	G1, G2, G3, N2
W3, W6/W1, W4/W2	N1	8月1日 8:00	8月2日 8:00	G1, G2, G3, N2
W3, W6/W1, W4/W2/W5	N1	8月3日 8:00	8月9日 8:00	G1, G2, G3, N2

3.2 基坑降水效果的群井试验

按照基坑中心部位的 G1 观测井分析, 坑外开启 5 口降水井时, G1 水位降落达到了 10 m 以上(见图 4), 能够满足抗突涌要求(见表 5, 6)。

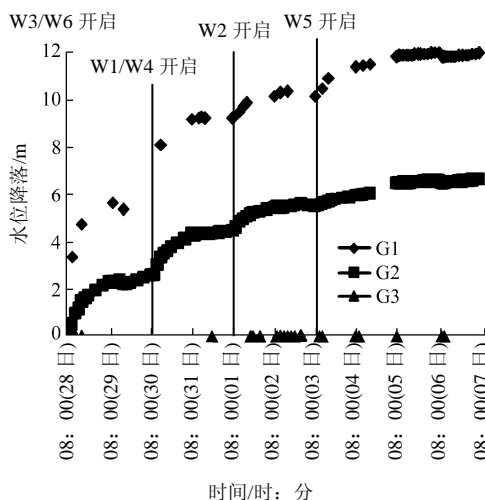


图 4 群井大量流抽水试验各观测井水位降落与抽水工况(2008 年 7~8 月)

Fig.4 Drawdown of wells G1 - G3 in large pumping rate pumping test with well group and corresponding operation condition(July to August, 2008)

表 5 不同安全条件下的第二层承压水允许水位及所需降深
Table 5 Groundwater table permission and drawdown needed for 2nd confined aquifer under different safe conditions

抗浮压力 /kPa	安全系数	允许静水压力 /kPa	天然地下水位/m	允许地下水位/m	要求降深 /m
333.04	1.00	302.76	-5.194	-10.76	5.56
333.04	1.05	289.60	-5.194	-12.34	7.15
333.04	1.10	302.76	-5.194	-13.78	8.59
333.04	1.15	289.60	-5.194	-15.10	9.91
333.04	1.20	277.53	-5.194	-16.31	11.11

表 6 第一层承压水安全水位与降深

Table 6 Groundwater table permitted and drawdown needed for 1st confined aquifer

工序编号	工序内容	坑内	
		水位相对标高/m	降深 /m
1	施工冠梁, 开挖至-7.000 m, 施工第一节内衬至-7.000 m		
2	开挖至-13.500 m, 施工第二节内衬至-13.500 m	-7.403	2.478
3	开挖至-20.000 m, 施工第三节内衬至-20.000 m	-17.271	12.346
4	开挖至-26.500 m, 施工旋流池底板-24.000~-26.500 m	-27.000	22.075
5	施工第四节内衬, -20.000~-24.000 m	-27.000	22.075
6	倒台混凝土达到设计强度后	-	-

注: 计算采用的安全系数为 1.1。

4 基于水位恢复的地墙渗漏分析与控制

4.1 抽水试验设计

本抽水试验与坑外群井大流量降水试验同步进行，用于检验地墙是否存在渗漏现象，避免工程风险。主要的方法是在坑外群井长时间大流量抽水的情况下，N1，N2 共同抽水，然后 N1 停抽，观测恢复水位；N1，N2 共同抽水，然后 N2 停抽，观测恢复水位。

4.2 基于水位恢复的地墙渗漏分析

由于基坑开挖揭露了⑤层承压含水层，坑内⑤层水位降深需要达到-27 m 标高(见表 5)。坑外群井试验开始阶段(2008 年 7 月 28 日~8 月 6 日)，坑内 N1 抽水，N2 观测试验条件不具备(因基坑内第 1 层土开挖，井管挖出部分悬空，爬梯及观测平台尚未搭设，无法测量水位)，获取的零星数据表明，在 N2 停泵后，N2 水位在持续回升，后期回升幅度逐渐减小，转为下降；2008 年 8 月 7 日，N2 观测条件完成，获取的 24 h 监测数据表明，其水位下降速率在 0.11~0.13 m/d，平均为 0.12 m/d，N1 单井抽水、N2 恢复期间相对标高稳定在-23.66 m；N1，N2 两井抽水，N2 恢复，2008 年 8 月 11 日 8 时到 12 日 8 时，24 h 水位恢复 12.38 m(见图 5，6)。

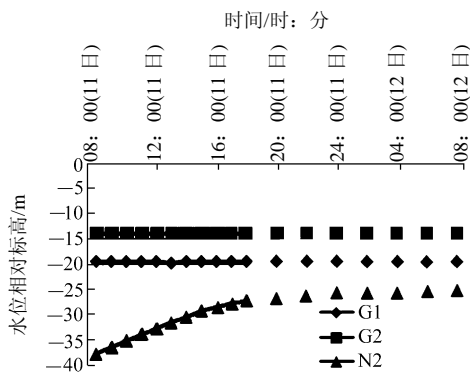


图 5 坑内两井抽水单井停泵后 N2 水位标高恢复曲线 (2008 年 8 月)

Fig.5 Recovery curves of groundwater table in well N2 with single pumping(August, 2008)

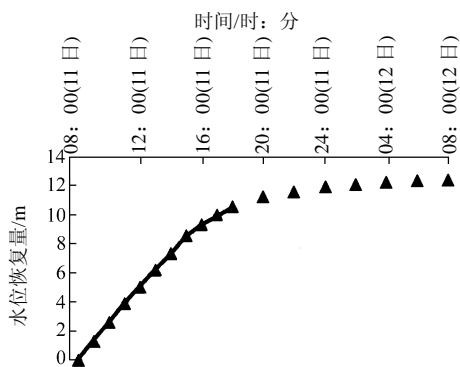


图 6 坑内两井抽水单井停泵后 N2 水位恢复量曲线 (2008 年 8 月)

Fig.6 Recovery value curve of groundwater drawdown in well N2 with single pumping(August, 2008)

在坑内观测条件不具备的情况下，N1，N2 试验前开启 30 d 以上，停泵后 N2 水位出现较快回升；在坑内观测条件具备后，N1 抽水，N2 水位下降缓慢，停泵后 24 h，水位恢复值达到 12.38 m。由此分析，第一、二层承压水之间可能存在一定越流量，地墙也存在渗漏的可能。为此，建议在坑内挖土过程中，特别是在揭露第一承压含水层顶板时，要特别加强地下水突涌、渗漏的观测，并切实做好相关预案。施工单位采纳了相关意见，并且准备好了抢险预案。

4.3 地墙渗漏控制

2008 年 9 月 10 日，在基坑最后一层土开挖过程中，基坑西北角地墙接缝处出现 3 个线状排列的渗漏洞(见图 7)，涌砂 2 m³多，由于坑内外存在着巨大的水头差，随着夹泥的不断冲出，渗漏点不断扩大，达到了 60 cm 长，4~5 cm 宽，致使出现了 40~50 m³左右的涌砂，在采用部分覆土回填 5 m 的情况下，仍有砂不断涌出。2008 年 9 月 11 日下午，采用坑外钻孔灌注聚氨酯，控制了出砂情况，9 月 16 日完成底板浇注。



图 7 基坑出水点

Fig.7 Leakage position of concrete in the pit

由于通过水位恢复试验，较早地确定了地墙存在渗漏风险，制定了应急预案，现场储备了救灾材料，抢险人员 24 h 待命，使风险出现后能够及时补救，合理地控制了工期，避免了附近类似工程、类似事故导致的数月停工以及坑外沉降导致的结构病害。

5 结 论

(1) 由于降水工程属于地下隐蔽工程，在实施过程中，现场试验至关重要。特别是对存在着复杂越流的情况，不能正确认识其概念模型，可能造成重大工程事故。

(2) 对于本工程而言, 通过抽水试验认识到含水层之间存在复杂越流, 正确地建立了其水文地质概念模型, 设计了坑内 - 坑外联合作用的降水方案, 群井试验验证了降水设计的正确性。

(3) 工程实践表明, 基于越流水文地质概念模型设计的降水方案是正确的, 通过坑内 - 坑外水井的联合作用, 完全达到预期降水效果, 开挖过程中, 坑内干爽。

(4) 结合群井试验中出现的隔断承压含水层无法疏干, 2 口井抽水, 停泵 1 口井后, 另一口抽水井水位恢复较快情况, 预测地墙存在渗漏风险, 准备了应急预案, 在问题出现后及时处理, 避免了重大工程事故的发生。

此工程实践, 也可类似复杂地质条件下深基坑降水提供参考依据。

参考文献(References):

- [1] 吴林高. 工程降水设计施工与基坑渗流理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.(WU Lingao. Design and construction of dewatering engineering and theory of pit seepage[M]. Beijing: China Communications Press, 2003.(in Chinese))
- [2] 王国光, 严平, 龚晓南, 等. 采取止水措施的基坑渗流场研究[J]. 工业建筑, 2001, 31(4): 43 - 45.(WANG Guoguang, YAN Ping, GONG Xiaonan, et al. Research on the seepage field of excavation with waterproof structure[J]. Industrial Construction, 2001, 31(4): 43 - 45.(in Chinese))
- [3] 师颖. 基坑工程非稳定渗流场的三维有限元分析[硕士学位论文][D]. 天津: 天津大学, 2004.(SHI Ying. 3D finite element analysis for unsteady seepage in excavation engineering[M. S. Thesis][D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.(in Chinese))
- [4] 张俊霞, 李莉, 张宝森. 基坑降水的三维渗流计算分析[J]. 岩土工程界, 2002, 5(5): 50 - 51.(ZHANG Junxia, LI Li, ZHANG Baosen. 3D calculation and analysis of seepage in pit dewatering[J]. Geotechnical Engineering World, 2002, 5(5): 50 - 51.(in Chinese))
- [5] 俞洪良, 陆杰峰, 李守德. 深基坑工程渗流场特性分析[J]. 浙江大学学报(理学版), 2002, 29(5): 595 - 600.(YU Hongliang, LU Jiefeng, LI Shoude. Study of seepage field characteristics of foundation pit excavation[J]. Journal of Zhejiang University(Science Edition), 2002, 29(5): 595 - 600.(in Chinese))
- [6] 高福华. 深基坑工程渗流与变形分析[硕士学位论文][D]. 南京: 河海大学, 2004.(GAO Fuhua. Analysis of seepage and deformation of deep excavation of foundation pit[M. S. Thesis][D]. Nanjing: Hohai University, 2004.(in Chinese))
- [7] 李晴阳, 刘万兰, 黄毅. 上海软土地区深基坑施工承压水风险及其控制[J]. 建筑施工, 2008, 30(6): 445 - 448.(LI Qingyang, LIU Wanlan, HUANG Yi. Preliminary discussion on construction risk of stratum pressure water in deep foundation pit of Shanghai soft ground area[J]. Building Construction, 2008, 30(6): 445 - 448.(in Chinese))
- [8] 万胜武, 朱丽华. 旋喷桩挡水幕在深基坑工程中的应用[J]. 结构工程师, 2003, (增): 191 - 193.(WAN Shengwu, ZHU Lihua. The application of water-baffle wall of spinning injection cement-soil piers in the project of deep foundation pits[J]. Structural Engineers, 2003, (Supp.): 191 - 193.(in Chinese))
- [9] 王德伟, 刘伟, 代国忠. 周口电信枢纽大楼基坑降水设计方案及效果评价[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2002, (增 1): 202 - 203.(WANG Dewei, LIU Wei, DAI Guozhong. Dewatering design and evaluation of Zhoukou Dianxin building[J]. Exploration Engineering (Drilling and Tunnelling), 2002, (Supp.1): 202 - 203.(in Chinese))
- [10] 章杨松, 李俊才, 董平. 止水帷幕深度对控制周围地面沉降的影响研究[J]. 建筑技术, 2006, (12): 895 - 897.(ZHANG Yangsong, LI Juncai, DONG Ping. Research of influence of water cut-off on controlling ground settlement, architecture technology[J]. Architecture Technology, 2006, (12): 895 - 897.(in Chinese))
- [11] 王翠英, 王家阳. 过滤管、止水帷幕对周边地面沉降影响的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(6): 69 - 72.(WANG Cuiying, WANG Jiayang. Research on effect of filter tube, stop water heavy curtain to surrounding ground settlement[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28(6): 69 - 72.(in Chinese))
- [12] 闰瑞明, 黎志向, 黄秋来. 有悬挂式止水帷幕基坑降水中的几个问题的探讨[J]. 岩土工程界, 2004, 7(增): 58 - 62.(YAN Ruiming, LI Zhixiang, HUANG Qiulai. Discussion on water-seel curtain in dewatering of foundation pit[J]. Geotechnical Engineering World, 2004, 7(Supp.): 58 - 62.(in Chinese))