

上海地区第三硬土层间粉土夹层抽水沉降效应分析

瞿成松¹, 徐丹¹, 雷丹²

(1.上海长凯岩土工程有限公司,上海 200093; 2.上海勘察设计院(集团)有限公司,上海 200093)

摘要:现场对上海第三硬土层间粉土夹层即第⑩_夹层承压含水层实施抽水试验,对水位、地表沉降及深层沉降进行观测,采用三维渗流及比奥固结理论模拟,分析了深层承压水抽水过程中的地层垂向变形与地下水水位变化之间的关系,为超深基坑地下水控制提供了依据。

关键词:第三硬土层;抽水试验;地面沉降;深层沉降;比奥固结理论模拟;上海地区

中图分类号:TU46⁺3 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)09-0075-05

Analysis on the Pumping Settlement Effect of the Silty Soil Interlayer in the Third Hard Soil Layer in Shanghai/QU Cheng-song¹, XU Dan¹, LEI Dan² (1.Shanghai Changkai Geotechnical Engineering Co., Ltd., Shanghai 200093, China; 2.SGIDI Engineering Consulting (Group) Co., Ltd., Shanghai 200093, China)

Abstract: Pumping test is carried out in the silty soil interlayer in the third hard soil layer in Shanghai, that is, 10th layer of confined aquifer. The water level, surface settlement and deep layer settlement are observed. 3-dimensional seepage and Biot's consolidation theory simulation are used to analyze the relationship between the vertical deformation of the stratum and the change of the groundwater table during the deep confined water pumping process, which provide the basis for groundwater control in ultra deep foundation pit.

Key words: the third hard soil layer; pumping test; surface settlement, deep layer settlement; Biot's consolidation theory simulation; Shanghai area

0 引言

上海地区沉降研究较早,地下水开采是导致地面沉降加剧的主要因素^[1-2],工程建设为次要因素^[3-4]。施伟华^[5]将 75 m 以浅的第一、二压缩层、含水层土体的压缩归结为工程建设,75 m 以深的压缩归结为地下水开采。抽水引起地面沉降中含水层的变形在总沉降量中占有较大比例,无论早期针对第三、四层承压水的地下水开采,政府为缓解地面沉降现象实施对第二、三含水层进行回灌,以及工程建设中抽取第一层承压水^[6],各层承压水水位变化引起的沉降变化均已早有研究,而针对第三硬土层间粉土夹层即第⑩_夹层的抽水沉降效应研究尚无人涉猎。本文针对第⑩_夹层承压水试验引起的沉降进行分析研究。

1 场区地质概况

场地地面标高约 4.00 m。试验区地层情况见

表 1。试验场地地下水类型主要为松散岩类孔隙水,按其形成时代、成因和埋藏条件可划分为潜水含水层及承压含水层。

表 1 试验区地层概况

层序	土层名称	层顶标高/m	层厚/m
⑤ ₃	粉质粘土夹粉砂	-27	22
⑧ ₁	粉质粘土	-49	11
⑧ ₂	粉质粘土、粉砂互层	-58	11
⑨	粉细砂、中粗砂	-69	25
⑩	粘土	-94	13
⑩ _夹	粘质粉土	-107	2
⑩	粘土	-109	5
⑩ _A	粉砂夹粉质粘土	-114	3
⑪	粉细砂夹中粗砂	-117	28
⑫	粘土	-145	未钻穿

工程勘察深度范围内地下水主要为赋存于浅部土层中的潜水、第⑨层中的第Ⅱ承压水及第⑩_夹层、第⑩_A层中承压水及第⑪层中的第Ⅲ承压水,该区域分布有第⑧层及第⑩层粘土,含水层间均未直接连通。

收稿日期:2018-07-15; 修回日期:2018-08-10

基金项目:上海张江国家自主创新示范区专项发展资金重点项目“基于城市更新的既有建筑地下结构加固与地下空间增层关键技术示范应用与推广”(编号:201705-YP-C2090-037)

作者简介:瞿成松,男,汉族,1964年生,副总工程师,高级工程师,水文地质学专业,博士,主要从事水文地质学及岩土工程勘察设计工作,湖北省武汉市八一路463号地建集团上海长凯公司武汉办事处(430072),qcs724@126.com。

2 试验内容

2.1 试验设计

场区内共布置3口试验井,如图1所示:井间距10~30 m,第⑩_夹层3口(2抽1观)。试验中心5 m范围内布设有4个分层沉降标,埋设深度分别为36、60、71和97 m。埋设3个月后沉降进入基本稳定期。另在离试验中心10、20、30、40、50和62 m距离布置了6个地面沉降监测点C4-1~C4-6,测量基准点设于最大影响半径之外和另外122 m深第12层分层标中双控。

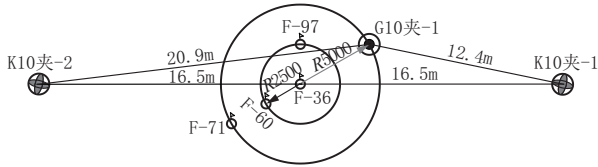


图1 试验井平面位置图

试验期间采用智能数据采集器对观测井水位进行实时采集,采集频率为1次/min。

2.2 试验结果分析

2.2.1 第⑩_夹层单井抽水试验结果分析

第⑩_夹层单井试验于2017年10月30日10:30开始,抽水井为K10夹-1,井深109.5 m,过滤器长4 m;试验过程中,利用G10夹-1及K10夹-2进行水位观测,结果见图2。

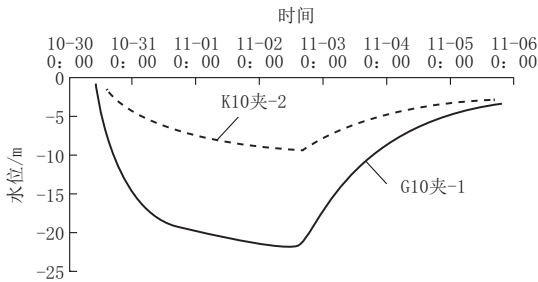


图2 单井抽水期间观测井水位变化曲线

抽水井K10夹-1内投入额定流量6.00 m³/h的水泵进行抽水,下泵深度约100 m,井内稳定水位-40.86 m,该井实际平均流量为1.21 m³/h。

选用Hantush-Jacob方法对数据进行拟合,求得第⑩_夹层水文地质参数(表2)。

表2 第⑩_夹层水文地质参数统计表

井号	水平渗透系数 $K_h/(m \cdot d^{-1})$	导水系数 $T/(m^2 \cdot d^{-1})$	储水系数 S
K10夹-2	0.31	0.63	9.49×10^{-4}
G10夹-1	0.22	0.45	6.24×10^{-5}
平均值	0.27	0.54	5.55×10^{-4}

承压水影响半径 R 计算公式为:

$$\lg R = \frac{s_1 \lg r_2 - s_2 \lg r_1}{s_2 - s_1}$$

式中: R ——影响半径,m; s ——观测井水位降深,m; r ——观测井到抽水井的距离,m。

由此可以得出本场区内第⑩_夹层单井抽水试验期间单井影响半径约为70.00 m。

2.2.2 第⑩_夹层群井抽水试验结果分析

单井抽水试验恢复完成后,2017年11月19日16:00开启群井抽水试验,历时约12 d。K10夹-1、K10夹-2稳定流量分别为0.97、0.77 m³/h;稳定水位分别为62.14、81.15 m。

群井抽水试验期间,对观测井内水位变化进行同步监测,结果见图3。

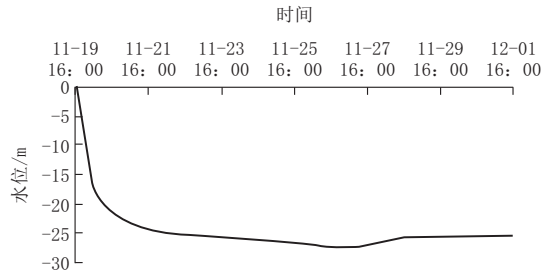


图3 群井抽水期间同层观测井水位变化曲线

2.2.3 沉降监测及分析

第⑩_夹层群井抽水,地面沉降表现出一定滞后性,最大沉降量3.30 mm,沉降试验期间未见明显回弹,最大回弹20%~30%,沉降并未达到稳定,观测结果见图4。

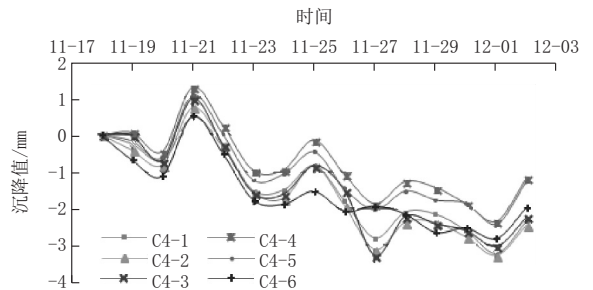


图4 群井抽水期间C4剖面地面沉降变化曲线

埋深107~109 m段是本次试验抽水目的层层位。各组分层标沉降变化曲线总体较为相似,但沉降量大小差异明显,表明不同深度范围地层的变形量不同,如图5。

第⑩_夹层群井抽水试验期间,观测井G10夹-1地下水水位每米降深与36、60、71和97 m深分层沉降标的对应沉降分别为0.100、0.100、0.117和

0.117 mm。土层沉降与地下水水位下降表现出一定的滞后性。如图 6~9。

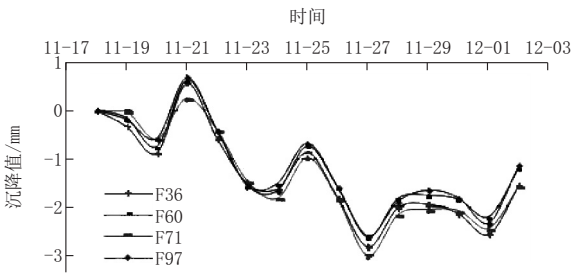


图 5 群井抽水期间深层土体沉降监测点沉降量变化曲线

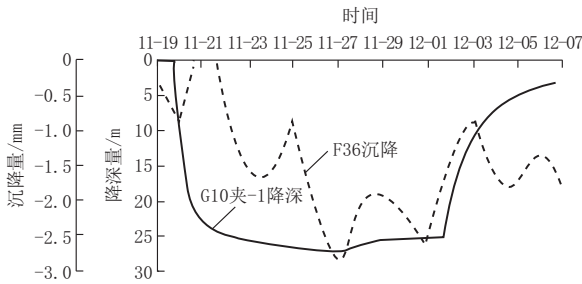


图 6 沉降标 F36 沉降量与降深对比曲线

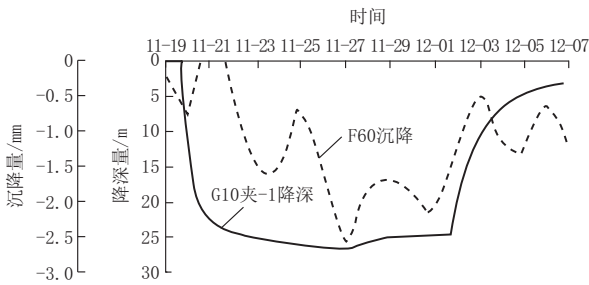


图 7 沉降标 F60 沉降量与降深对比曲线

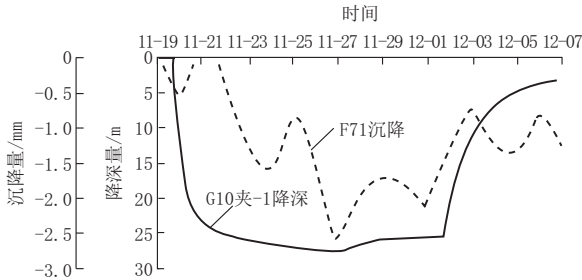


图 8 沉降标 F71 沉降量与降深对比曲线

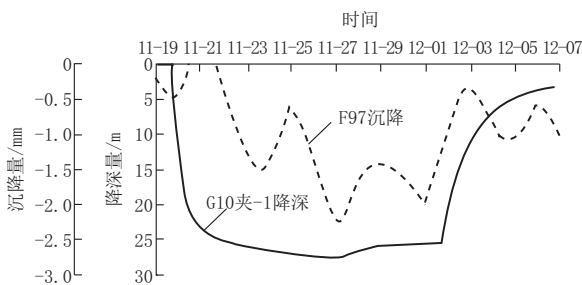


图 9 沉降标 F97 沉降量与降深对比曲线

3 试验区水土流固耦合三维数值模拟

为了基坑地下水控制设计,达到降到安全水位和环境保护的目的,求出水文地质参数,掌握水位下降与地层沉降变化规律,本文采用水土流固耦合模型作三维模拟,耦合计算渗流、应力、变形、孔隙水压随时间的变化情况。

3.1 流固耦合分析理论

3.1.1 渗流计算原理

流动法则为达西定律,单位面积的渗透流量公式如下:

$$q = ki$$

式中: q ——单位面积渗流量; k ——渗透系数; i ——水力梯度。

三维渗流的基本微分方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

式中: H ——水头函数; k_x 、 k_y 、 k_z ——分别为 x 、 y 、 z 三个方向的渗透系数; Q ——流量; θ ——体积含水率; t ——时间。

使用伽辽金法变基本方程为有限元方程式:

$$\int_v ([B]^T [C] [B]) dV \{H\} + \int_v (\lambda \langle N \rangle^T \langle N \rangle) dV \{H\} t = q \int_A (\langle N \rangle^T) dA$$

式中: $[B]$ ——动水坡度矩阵; $[C]$ ——单元渗透系数矩阵; $\{H\}$ ——节点水头向量; $\langle N \rangle$ ——形函数向量; q ——单元边的单位重力; λ ——非稳定流的阻流项; $\{H\} t = \frac{\partial h}{\partial t}$ ——随时间变化的水头。

非稳定流分析的有限元解是时间的函数,使用后退差分法,非稳定流分析的有限元方程可简化为:

$$(\Delta t [K] + [M]) \{H_1\} = \Delta t \{Q_1\} + [M] \{H_0\}$$

式中: $[K]$ ——单元特征矩阵; $[M]$ ——质量矩阵; $\{Q\}$ ——流量矩阵。

3.1.2 固结计算

比奥特固结理论直接从弹性理论出发,满足土体的平衡条件、弹性应力-应变关系和变形协调条件,此外还考虑了水流连续条件,一般称其为真三维固结理论。

比奥特基本方程为:

$$\frac{K}{\gamma_w} \left[k_x \frac{\partial^2 u_w}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 u_w}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 u_w}{\partial z^2} \right] = \frac{\partial u_w}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t}$$

式中: K ——体积模量; p ——平均总应力。

将基本方程用伽辽金方法变有限元后,将有限元方程使用有限差分法对时间积分,并使用完全隐式积分($\theta=1$),形成下面公式:

$$\begin{bmatrix} K & C \\ C^T & -\Delta t K_w \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_{w1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ C^T & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_0 \\ u_{w0} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} p \\ 0 \end{Bmatrix}$$

3.1.3 应力渗流耦合分析

有限元中通过时间积分方法,结合上两节的渗流和固结基本原理,采用牛顿-拉普森法构建耦合的非线性方程组:

$$\begin{bmatrix} K_{mat} + K_{geo} & K_c \\ K_c^T & -\Delta t K_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta u \\ \delta p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} g_u \\ -\Delta t g_p \end{Bmatrix}$$

式中: $K_{mat} + K_{geo}$ ——由材料切线矩阵和几何切线矩阵组成的不平衡力位移微分矩阵; K_c ——不平衡力孔压微分矩阵; K_p ——不平衡力流量微分矩阵; u ——位移矩阵; p ——孔压矩阵; g_u ——不平衡力; g_p ——不平衡孔压。

因此,应力-渗流完全耦合分析是通过时间积分方法,能够耦合计算渗流、应力、变形、孔隙水压随时间的变化情况。

3.2 水土流固耦合三维数值计算模型

根据试验场区水文地质条件,模型整体范围按下述原则确定:以试验场区为中心,边界布置在抽水井影响半径以外。根据本次抽水试验数据及影响范围分析,选定模型水平尺寸为 $1600 \text{ m} \times 1600 \text{ m}$,模型垂直向尺寸为 160 m 。模型水力边界根据试验观测的各层初始水位确定。

3.3 抽水试验含水层三维数值反演分析

根据单井和群井抽水试验结果,对抽水井的实测资料进行整理,在三维计算模型中设置抽水井,将抽水试验井出水量代入三维数值模型中,进行群井抽水试验的数值模拟计算。对比计算结果和实测的观测井水位变化,不断调整并优化相关计算参数,得到合理的承压水参数,同时对群井试验中土层沉降的计算结果与实测结果进行对比。

3.3.1 第⑩层单井抽水试验模拟结果分析

第⑩层单井试验于2017年10月30日10:30开始,抽水井为K10夹-1,井深109.50 m,过滤器长4.00 m。整个试验K10夹-1的实际平均出水量为 $1.21 \text{ m}^3/\text{h}$ 。模型中承压含水层边界水头为 -6.00 m ,试验模拟结果见图10、图11。

3.3.2 第⑩层群井抽水试验模拟结果分析

第⑩层群井抽水试验开始于2017年11月

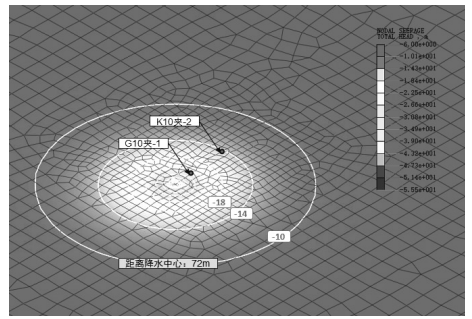


图10 单井试验停抽时第⑩层水位埋深云图

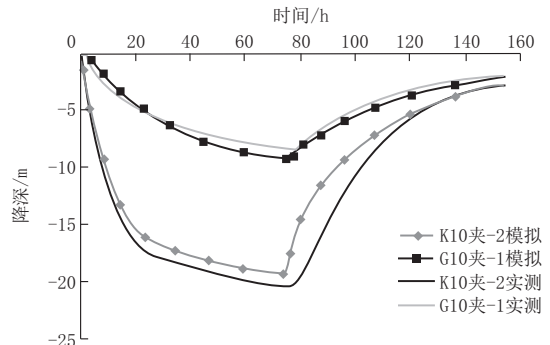


图11 单井试验观测井实测与模拟降深曲线对比

19日16:00,抽水井为K10夹-1、K10夹-2,两口井最终稳定出水量为 0.97 、 $0.77 \text{ m}^3/\text{h}$ 。模型中承压含水层边界水头为 -6.00 m ,试验模拟结果见图12、图13。

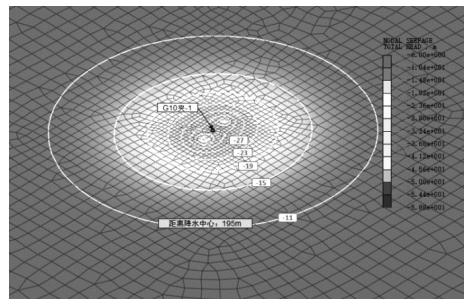


图12 群井试验停抽时第⑩层水位埋深云图

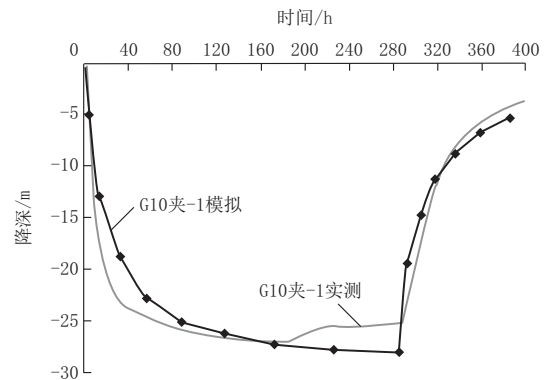


图13 群井试验观测井实测与模拟降深曲线对比

在第⑩_夹层群井试验过程中埋深 36、60、71 和 97 m 处分层沉降的模拟值和实测值对比如图 14~17 所示。

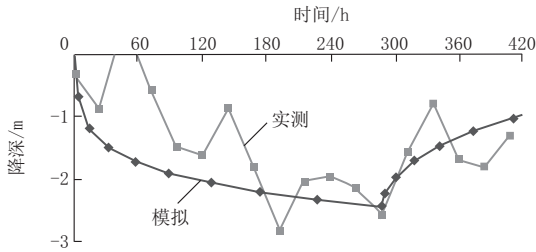


图 14 群井试验沉降标 F36 沉降量实测值和模拟值对比曲线

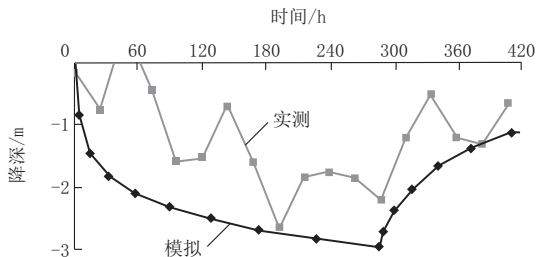


图 15 群井试验沉降标 F60 沉降量实测值和模拟值对比曲线

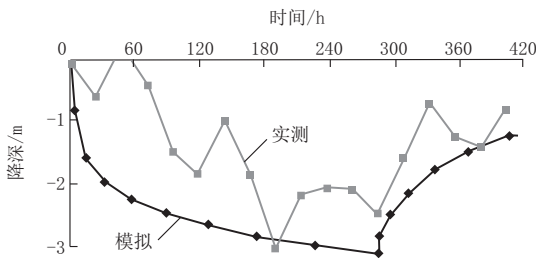


图 16 群井试验沉降标 F71 沉降量实测值和模拟值对比曲线

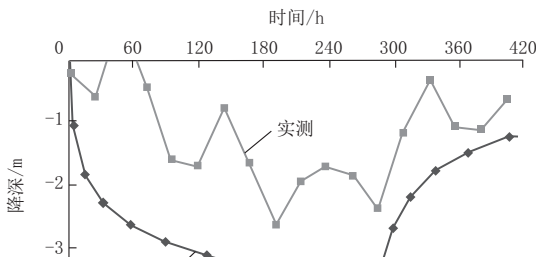


图 17 群井试验沉降标 F97 沉降量实测值和模拟值对比曲线

通过上述水土流固耦合三维数值计算反演分析,获取的本场地模型第⑩_夹层水文地质参数如表 3 所示。采用表中所述承压含水层水文地质参数进行水土耦合数值计算所得到的各观测井模拟水位降深与实测值较为一致,模拟场地地面沉降数据与地面沉降实测值较为接近。

表 3 抽水试验反演参数一览表

层号	埋深/m	土层名称	渗透系数平均值/(m·d ⁻¹)		储水系数
			K _h	K _v	
第⑩ _夹 层	107~109	粘质粉土	0.20	0.03	1.50×10 ⁻⁴

4 结论

(1) 本试验沉降随水位变化的实测值与模拟值均较匹配,降水和地面沉降的耦合模型构建合理。

(2) 水文地质参数建议选取经过地下水三维渗流计算和反演分析的水文地质参数。第⑩_夹层的试验单井影响半径为 70.00 m,单井流量约在 1.0 t/h。

(3) 第⑩_夹层群井抽水,地面沉降表现出一定滞后性,最大沉降量 3.30 mm,沉降试验期间未见明显回弹,最大回弹 20%~30%,试验期间沉降并未达到稳定。

(4) 第⑩_夹层群井抽水试验期间,观测井 G10 夹-1 地下水水位降深变化与 36、60、71 和 97 m 深分层沉降标变化趋势一致,1.00 m 水位降深对应于 36、60、71 和 97 m 深分层沉降标的沉降分别为 0.100、0.100、0.117 和 0.117 mm。土层沉降与地下水水位下降表现出一定的滞后性。

参考文献:

- [1] Shui-Long Shen, Ye-Shuang Xu. Numerical evaluation of land subsidence induced by groundwater pumping in Shanghai[J]. Can. Geotech. J. 2011, (48): 1378-1392.
- [2] J. C. CHAI, S. L. SHEN, H. H. ZHU. Land subsidence due to ground water drawdown in Shanghai[J]. Geotechnique, 2004, 54(2): 143-147.
- [3] Yu-Qun Xue, Yun Zhang, Shu-Jun Ye. Land subsidence in China[J]. Environ Geol. 2005, 48(6): 713-720.
- [4] 叶淑君, 薛禹群, 张云. 上海区域地面沉降模型中土层变形特征研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 140-147.
- [5] 施伟华. 建设工程与水资源开发对地面沉降影响分析[J]. 上海地质, 1999, 72: 50-54.
- [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, 3(6): 460-466.
- [7] 李洪财. 南京长江江心洲超大直径盾构接收井明挖段超深基坑降水技术研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(5): 87-92.
- [8] 李兵. 引渗疏干技术在复杂水文地质条件下深大基坑降水中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(4): 69-72, 77.
- [9] 殷宝兵, 周爱兆, 姜彬霖. 南通市南山湖综合楼基坑工程降水数值模拟分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(10): 61-65, 69.