

引用格式: Yang Hong, Liu Yong, Zhou Yong, *et al.* Analysis of the Effect of Deep Foundation Pit Dewatering on Ground Surface Settlement at a Subway Station in Lanzhou[J]. Journal of Gansu Sciences, 2020, 32(2): 100-104. [杨宏, 柳勇, 周勇, 等. 兰州某地铁站深基坑降水对地表沉降的影响分析[J]. 甘肃科学学报, 2020, 32(2): 100-104.] doi: 10.16468/j.cnki.issn1004-0366.2020.02.018.

兰州某地铁站深基坑降水对地表沉降的影响分析

杨宏¹, 柳勇^{2,3}, 周勇^{2,3}, 杨校辉^{2,3}

(1. 中铁二十局集团市政工程有限公司, 甘肃 兰州 730020;

2. 兰州理工大学甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050;

3. 兰州理工大学西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

摘要 基坑降水会使地下水产生流动, 从而产生渗流附加应力, 基坑周围土体发生应力重分布, 在渗流场与应力场耦合作用下, 对地表一定范围产生不同的影响与破坏。以兰州东方红广场地铁站基坑工程为例, 通过理论研究、数值模拟及现场监测, 分析基坑降水对地表沉降的一般规律, 并验证改进算法的合理性。研究结果表明: (1) 地表沉降总体趋势呈非线性增长, 且随降水稳定趋于稳定; (2) 考虑渗流力算法结果略小于规范法, 更接近实际监测值; (3) 距坑边相同距离处各点最大沉降量不同, 受降水深度及周围环境影响。

关键词 深基坑; 降水; 渗流力; 地表沉降; 环境影响

中图分类号: TU473.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-0366(2020)02-0100-05

随着科学技术和人类文明的进步, 城市化进程的不断加快, 地面的有限空间已经不能满足人们的要求, 城市拥堵日益严重, 因此, 地铁建设势在必行。兰州地铁1号线车站深基坑工程基坑底面均处于地下水位以下, 在基坑开挖前需要将地下水位降至开挖面以下, 保证基坑处于干燥的环境下施工^[1]。基坑降水不仅可以有效的防止基坑坡面和基坑底面发生渗水^[2], 保证基坑处于干燥的环境下施工, 还可以提高基坑的稳定性, 避免基坑边坡及基坑底部的土颗粒流失, 防止发生管涌和流沙现象^[3]。但是基坑降水往往会诱发周围土体的变形和地表的沉降, 对基坑和周围环境造成不利的影响, 甚至出现基坑坍塌、周围构筑物倒塌、地下管线破裂等工程事故^[4-5]。

针对地铁的开挖与降水, 国内已有学者做了大量的研究, 周勇等^[6]以兰州地铁车站基坑支护工程为背景, 分析了基坑开挖降水对地下管道的影响; 柳利丽等^[7]以某地铁站深基坑降水工程为例, 通过现场抽水试验确定了黄土地区基坑降水的影响半径

及渗透系数, 并总结了降水的施工工艺流程及基坑降水中应注意的问题; 李炜明等^[8]以武汉地铁某车站基坑工程为例, 分析了短时强降水对地表沉降的影响, 认为降水对基坑短边的影响较小, 对长边的影响主要集中在基坑中部; 杨卓等^[9]以北京地铁朝阳门站深基坑工程为背景, 采用有限元软件模拟了基坑降水对周围地表沉降的影响, 并与实测数据对比分析, 认为施工顺序对地表的沉降也有的影响。因此, 研究将考虑渗流力产生的附加应力对地表沉降的影响, 通过与规范计算对比分析, 验证改进算法的合理性, 分析不同监测点处地表沉降的变形规律, 以及相同距离处地表沉降差异的原因, 进一步对基坑降水引起地面沉降的变形规律和趋势, 提出相应的治理措施, 为以后类似工程做以借鉴。

1 理论计算

1.1 规范计算方法

目前国内大多依据《建筑基坑支护技术规程》

收稿日期: 2019-02-27; 修回日期: 2019-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(51568042); 教育部长江学者和创新团队发展计划项目(IRT_17R51); 中铁二十局集团市政工程有限公司科研项目(H1704bb029)

作者简介: 杨宏(1973-), 男, 陕西三原人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为房屋建筑及地下工程。E-mail: 292768293@qq.com

通信作者: 柳勇, E-mail: 1223168646@qq.com

(JGJ120-2012)^[10]和《建筑深基坑工程施工安全技术规范》(JGJ311-2013)^[11] 2 个规范,计算由工程降水诱发地表沉降,二者均以分层总和法为理论基础估算降水诱发的地表沉降量,即

$$S = \sum_{i=1}^n S_i = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i}{E_i} H_i, \quad (1)$$

其中: S 为降水所诱发的地表总沉降量(m); S_i 为第 i 计算土层的沉降量(m); Δp_i 为第 i 计算土层由降水所诱发的附加应力(kPa); E_i 为第 i 计算土层的压缩模量(kPa); H_i 为第 i 计算土层的厚度(m)。

对于没有越流的潜水含水层,具体参加计算的地层范围为降水目标含水层及其以上地层。

1.2 考虑渗流力的计算方法

基坑降水使地下水产生运动,从而使降水井周围土体的渗流场与应力场发生改变。渗流力产生的附加应力使得失水土层固结压密,该附加应力方向与渗流力作用方向近似相同,最终使得土层发生竖向沉降和侧向变形。忽略群井效应的影响,基于裘布依假设,则降水后井周地下水水位的漏斗曲线方程为

$$y^2 = (l+h)^2 + [H^2 - (l+h)^2] \frac{\ln \frac{x}{r}}{\ln \frac{R}{r}}. \quad (2)$$

根据分析,降水漏斗形成后,在曲线上下分为干土部分、疏干部分和饱和部分。降水前后 S_0 区土体均位于水位线以上,可近似认为是干土区,始终不含地下水,降水过程中亦不会产生渗流力,不存在附加应力,忽略土体的压密,则 $S_0 = 0$;在整个降水历程中, S_1 区的土体被疏干, S_2 区的土体在降水前后均位

$$\sin \alpha = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}} =$$

$$\frac{[H^2 - (l+h)^2]}{\sqrt{[H^2 - (l+h)^2 + 2x_0 \left(\ln \frac{R}{r}\right) (l+h)]^2 + 4x_0 \left(\ln \frac{R}{r}\right) \left[x_0 \left(\ln \frac{x_0}{r}\right) - l - h\right] [H^2 - (l+h)^2]}} = \frac{\Delta P_{iy}}{\Delta P_i}. \quad (5)$$

S_1 区土层由降水产生的附加应力在竖直方向的分量为

$$\Delta p_{iy\text{疏干}} = \Delta p_i \cdot \sin \alpha = [\gamma_w \cdot z + (1 - \chi)s] \cdot \sin \alpha, \quad (6)$$

则由规范公式计算疏干区内土层的沉降量为

$$S_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_{iy}}{E_i} H_i = \sum_{i=1}^n \frac{[\gamma_w \cdot z + (1 - \chi)s] \cdot H_i}{E_i} \cdot \sin \alpha. \quad (7)$$

于稳定地下水水位面以下故而始终饱和,如图 1 所示。

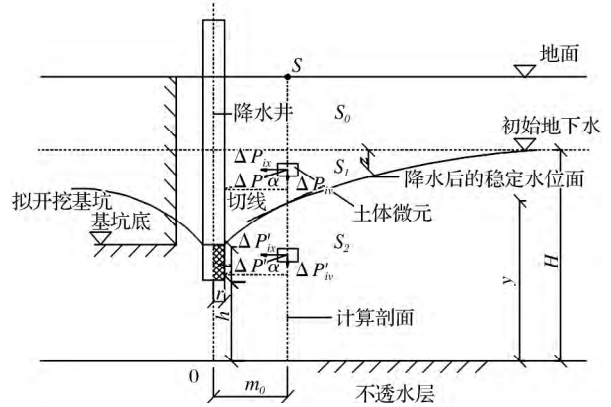


图 1 降水后疏干区及饱和区土层附加应力示意图

Fig.1 Additional stress of soil layers in draining and saturated areas after dewatering

新算法区别规范算法,单独计算三部分土体各自的沉降量,其中疏干部分和饱和土部分考虑渗流力作用^[12],由降水诱发的土层附加应力在数值上等于土体孔隙水压力的负增量,即

$$\Delta p = \Delta \sigma' = \gamma_w (h_1 - h_2). \quad (3)$$

对于疏干区,渗流力所在直线斜率与曲线上 x_0 点的斜率相同,即

$$\tan \alpha = y'(x_0) = \frac{[H^2 - (l+h)^2]}{\sqrt{[H^2 - (l+h)^2 + 2x_0 \left(\ln \frac{R}{r}\right) (l+h)]^2 + 4x_0 \left(\ln \frac{R}{r}\right) \left[x_0 \left(\ln \frac{x_0}{r}\right) - l - h\right] [H^2 - (l+h)^2]}} \cdot \frac{\ln \frac{x_0}{r}}{\ln \frac{R}{r}}. \quad (4)$$

由几何关系可得

对于饱和区, $\sin \alpha$ 值与距抽水井相同距离处的疏干区相同,同理可得

$$\Delta p_{iy\text{饱和}} = \Delta p'_i \cdot \sin \alpha = \gamma_w (H - y) \cdot \sin \alpha. \quad (8)$$

降水后稳定水位面下 S_2 区饱和土的沉降量为

$$S_2 = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_{iy}}{E_i} H_i = \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_w (H - y) \cdot H_i}{E_i} \cdot \sin \alpha, \quad (9)$$

其中: χ 为非饱和土的有效应力参数; s 为非饱和土

基质吸力; x_0 为 S 点距井轴水平距离(m); z 为计算土层中点至初始地下水位的垂直距离(m); y 为计算点的稳定漏斗曲线高度(m), 其公式为

$$y = \sqrt{(l+h)^2 + [H^2 - (l+h)^2]} \frac{\ln \frac{x}{r}}{\ln \frac{R}{r}} \quad (10)$$

综上所述, 基坑降水所引发的井周地面总沉降量即为三块区域的土层产生的沉降量的总和, 即

$$S = S_0 + S_1 + S_2 = S_1 + S_2. \quad (11)$$

2 工程概况

2.1 基坑工程概况

兰州东方红广场地铁车站基坑工程主体长度 743.1 m, 标准段宽 41.30 m, 总高 14.04 m, 结构底板埋深约 17.02 m, 顶板覆土厚约 2.87 m, 基坑深度 17.0~22.0 m, 车站主体建筑面积 6 0757.74 m². 围护结构采用钻孔咬合桩结构, 车站分别在南北两侧各设 4 个出入口, 在车站南北两侧设置 4 组风亭。

2.2 水文地质情况

车站所在区域的地貌单元属黄河 I 级阶地, 场地地形平坦, 勘探深度 45.0 m 范围内的地层主要为第四系堆积物, 即由全新统人工填土(Q₄^{pl})、冲洪积(Q₄^{al+pl})卵石、第三系砂岩(N)组成。场地地层自上而下划分为 4 层, 主要有杂填土、卵石土、全风化砂岩、强风化砂岩。地下水潜水位埋深 3.6~5.0 m, 含水层主要为卵石层, 潜水含水层厚度约 20 m, 卵石下的砂岩为相对隔水层, 砂岩顶部可能存在局部裂隙水。各土层物理力学指标如表 1 所列。

表 1 土的物理力学指标

Table 1 Physical mechanical indicators of soil

土层名称	厚度 h /m	重度 γ /(kN·m ⁻³)	粘聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /°
杂填土	2.6	18.0	8	18
卵石	12.0	23.3	0	40
强风化砂岩	30.4	20.8	25	35

2.3 降水方案设计

依据当地的降水经验及其地勘报告, 采用管井井点降水加咬合桩止水帷幕加集水明排相结合的降水措施完成该工程降水任务。设计中取降水井设计降水深度为基坑底面以下 2.0 m, 考虑到设计降深较大, 因此需要的一定长度的沉砂管, 场地地下水为

孔隙潜水类型, 卵石层为主要含水层, 且其平均厚度为 12.0 m, 井点外露高度 1.0 m。计算模型采用潜水完整井, 水位降深 $S=9$ m, 过滤器半径为 0.15 m, 含水层厚度 $H_0=12$ m(卵石层厚度平均值), 渗透系数 $K=45$ m/d, 降水影响半径 $R=418.3$ m, 计算得到管井数 65 口。井径 300 mm, 井间距 22~24 m, 尽可能的隔绝周边水源的侧向补给。

2.3 监测点平面布置及沉降结果观测分析

各监测点平面布置如图 2 所示。

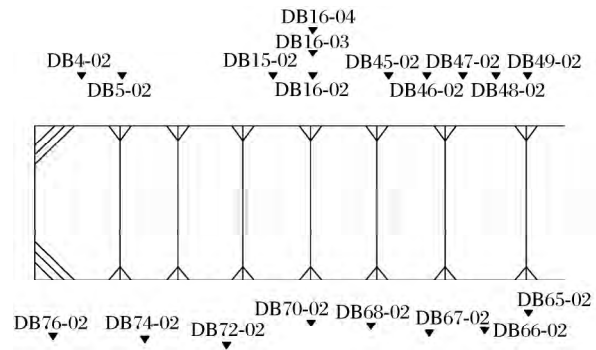


图 2 监测点平面布置图

Fig.2 Monitoring point plan

取 8 个不同监测点进行沉降结果分析, 各监测点沉降量随时间的变化曲线如图 3 所示。

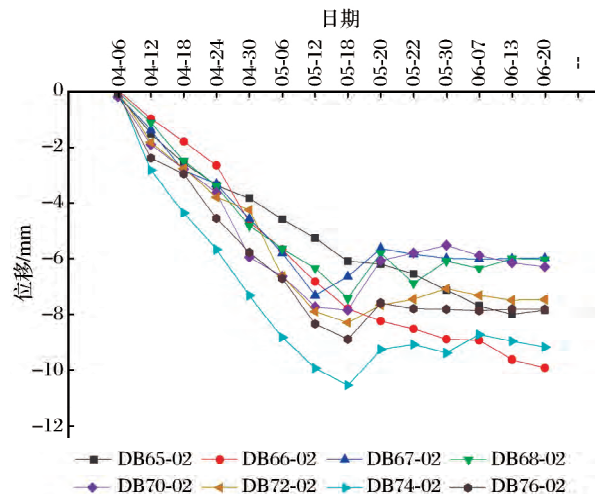


图 3 各监测点沉降量随时间变化曲线

Fig.3 Change curve of settlement over time at each monitoring point

从图 3 可以看出, 随着地下水位的下降, 各沉降量走势基本相同, 最大沉降量为 10.53 mm, 沉降速率随降水的开展逐渐减小, 但沉降依然增加, 5 月 20 日左右, 由于部分降水井停止抽水, 部分沉降出现较小的位移回弹, 随着抽水的继续进行, 沉降又逐渐增大, 当降水达到水位标准时, 沉降逐渐趋于稳定, 基

本在 10 mm 以内,满足相关规范的控制要求。

3 数值模拟和监测结果对比分析

3.1 数值模拟建立

采用大型岩土分析软件 FLAC3D 内置 Extrusion 建模,几何模型尺寸依据圣维南原理选取 360 m×210 m×60 m,平面形状近似等效为 1 m×1 m 的矩形,最终单元数 66 240,节点数 71 589,限制模型 4 个侧壁的法向位移、底面的竖向位移,本构模型选取 Mohr-Coulomb 本构模型^[13],几何模型如图 4 所示。

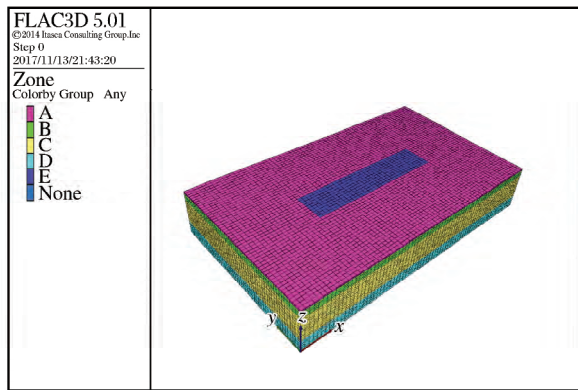


图 4 三维几何模型
Fig.4 3D geometry model

3.2 距坑边不同距离处沉降结果分析

通过前文提出的改进算法、规范算法及数值模拟,结合现场监测数据,得出了在该工程实例水文地质参数背景下的井周土体各沉降值对比图,如图 5 所示。

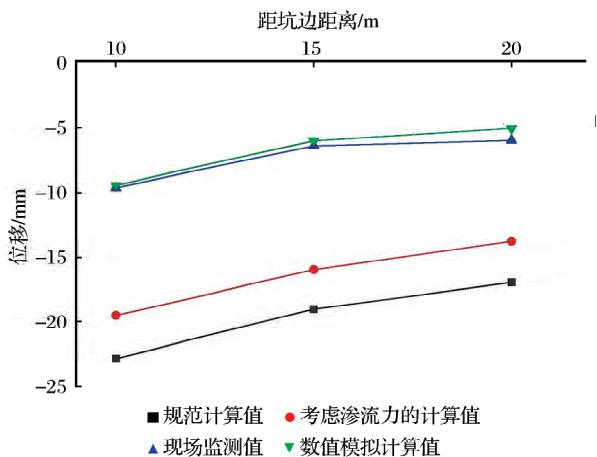


图 5 距井轴不同距离地表沉降量计算值与监测值对比
Fig.5 Comparison between the calculation value and the monitoring value of surface settlement at different distances from the well shaft

从几种计算结果来看,数值模拟、理论计算和现场监测变化趋势基本相同,距坑边越近地表沉降越大,且呈非线性增长,即距坑边越近,沉降增长越快^[14]。由于未考虑时空效应、地面运动荷载及周边基坑工程的影响,数值模拟略小于现场检测值。规范法偏于保守,计算结果值偏大,考虑渗流力的计算方法仍然与实际监测值有一定的差距,但相比规范法更接近于现场监测值,即改进算法较合理。

3.3 距坑边不同距离处沉降结果分析

取距坑边 15 m 处 10 个不同的监测点的沉降结果分析,各监测点最大沉降量如图 6 所示。

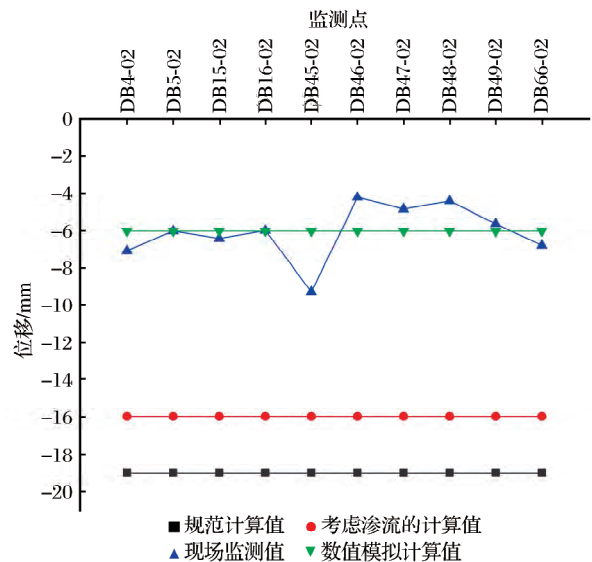


图 6 地表最大沉降量计算值与监测值对比
Fig.6 Comparison between the calculation value and the monitoring value of the maximum surface settlement

结合改进算法、规范算法、数值模拟的计算结果,分析距坑一定距离处的最大沉降量。从图 6 可以看出,最大沉降量为 9.28 mm,最小沉降量为 4.21 mm,平均沉降量为 6.066 mm。沉降最大点附近有荷载堆积,且受附近地面运动荷载影响^[15]。数值模拟较接近于平均值,而由于基坑周围不可控因素,地表沉降与数值模拟仍有一定差距,而改进算法与规范算法依然大于最大沉降量,因而也验证了改进算法的合理性。

4 结论

研究以基坑工程降水为背景,通过理论计算、数值模拟及现场监测,分析降水过程中地表沉降的变化规律,并考虑渗流力产生的附加应力,对规范计算进行了改进。

分析结果表明,随着降水深度的增加,地表沉降

呈非线性增长,各监测点基本走势相近但不相同,最大沉降量因周围环境各有差别;距坑边越近,沉降增长越快,随降水稳定沉降逐渐趋于稳定;改进算法相比规范算法更接近监测值,证明改进算法合理可信。

结合实际工程地质条件,选择合理的降水方案,并在施工中不断完善,以达到更好的降水效果。针对可能出现地表沉降较大的地方,建议对该地方加强监测,严格控制降水,对工程中可能出现的各种情况及时做好预案措施,合理施工,使地表沉降控制在安全范围内。

参考文献:

- [1] 章昕.深基坑降水技术浅析[J].岩土工程学报,2010,32(增刊2):443-446.
- [2] 陈伟.紧邻多条地铁隧道的超深基坑承压水降水技术分析[J].结构工程师,2010,26(4):85-90.
- [3] 陈永才,李镜培,邱国恩,等.某深基坑降水对周边环境的影响分析及处理措施[J].岩土工程学报,2008,30(增刊1):319-322.
- [4] 周勇,祁彦龙.某深基坑降水对周边建筑环境的影响分析[J].甘肃科学学报,2016,28(2):58-61.
- [5] 施有志,李秀芳,林树枝.城市中心地带地铁深基坑开挖对周边环境的影响实测分析[J].防灾减灾工程学报,2017,37(6):900-909.
- [6] 周勇,魏高铸,朱彦鹏.兰州地铁车站深基坑开挖过程中降水对邻近地下管道的影响[J].岩土工程学报,2014,36(增刊2):495-499.
- [7] 柳利丽,胡长明,梅源.黄土地区地铁车站深基坑降水设计与施工[J].建筑技术,2012,43(1):55-57.
- [8] 李炜明,任虹,柳雨叶,等.短时强降水对地铁车站明挖施工引起的地表沉降与结构变形的影响[J].铁道建筑,2018,58(7):80-82,120.
- [9] 杨卓,吴剑波,赵一臻,等.地铁深基坑开挖对紧邻建筑影响的有限元模拟与监测研究[J].建筑科学与工程学报,2016,33(2):121-126.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑基坑支护技术规程:JGJ120-2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑深基坑工程施工安全技术规范:JGJ311-2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [12] 吴意谦,朱彦鹏.考虑疏干带非饱和土影响下基坑降水引起地面沉降的计算[J].工程力学,2016,33(3):179-187.
- [13] 裴红星,李纪云,王学武,等.基坑降水引起地表沉降过程数值模拟[J].郑州大学学报:理学版,2009,41(3):89-92.
- [14] 李文广,胡长明.深基坑降水引起的地面沉降预测[J].地下空间与工程学报,2008,4(1):181-184.
- [15] 王文峰.对基坑降水引起周围建筑物沉降的预测及其防治措施[J].铁道勘察,2013,39(4):48-50.

Analysis of the Effect of Deep Foundation Pit Dewatering on Ground Surface Settlement at a Subway Station in Lanzhou

Yang Hong¹, Liu Yong^{2,3}, Zhou Yong^{2,3}, Yang Xiaohui^{2,3}

(1. China Railway Construction the 20th Group Municipal Engineering Co. Ltd, Lanzhou 730020, China;

2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province,

Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

3. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract The foundation pit dewatering will cause the flow of groundwater and thus produce additional stress of seepage and stress redistribution of the soil around the pit, which will affect and damage the terrain surface within certain region to different degrees under the coupling of the seepage field and the stress field. Taking the foundation pit project in Lanzhou Dongfanghong Square subway station as an example, the general law of the effect of foundation pit dewatering on the surface settlement was analyzed through theoretical research, numerical simulation and on-site monitoring, and the rationality of the improved algorithm was also verified. The results show that (1) the overall trend of surface settlement grows in a non-linear way and tends to be stable with the stability of dewatering. (2) When considering the seepage stress, the calculation results are slightly smaller than that with the specification method and closer to the actual monitoring value. (3) The maximum settlements at points with same distance from the pit edge are different, due to the impact of dewatering depth and surrounding environment.

Key words Deep foundation pits; Dewatering; Seepage stress; Surface settlement; Environmental impact