

# 常州地区基坑降水引起的地面沉降计算方法

韩文君<sup>1</sup> 赵宇豪<sup>2</sup> 闫鑫<sup>2\*</sup> 童立元<sup>2</sup> 刘松玉<sup>2</sup> 奚赛英<sup>3</sup>

(1. 常州市轨道交通发展有限公司, 213022, 常州; 2. 东南大学交通学院, 210096, 南京;

3. 常州市规划设计院, 213022, 常州//第一作者, 高级工程师)

**摘要** 统计了常州地区多个基坑土层超固结比资料。结合两处场地的抽水试验数据, 对比分析了分层总和法与考虑应力历史影响的沉降计算方法, 并将这两种方法与有限元软件模拟结果、沉降监测结果进行对比。研究结果表明: 相较于分层总和法, 考虑应力历史影响的沉降计算方法更接近于实际沉降监测结果, 可将其用于快速估算大降深条件下、水文地质特点类似常州地区、由降水引起的周围地面沉降量。

**关键词** 常州地区; 基坑降水; 地面沉降

**中图分类号** TU433; TU46<sup>+</sup>3

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2023.01.011

## Calculation Method of Land Subsidence Caused by Foundation Pit Dewatering in Changzhou Area

HAN Wenjun, ZHAO Yuhao, YAN Xin, TONG Liyuan, LIU Songyu, XI Saiying

**Abstract** The data of multiple foundation pits over-consolidation ratio in Changzhou area is counted. Taking the pumping test data of two sites, the splitting summation method and the subsidence calculation method considering stress history influence are compared and analyzed. The finite element software simulation results and subsidence monitoring results are compared. Research results show that compared with splitting summation method, the subsidence calculation method considering stress history influence provides closer results to monitoring ones of actual subsidence. This method can be used to quickly estimate the surrounding land subsidence value caused by dewatering under the condition of large drawdown and in areas with hydrogeological features similar to Changzhou.

**Key words** Changzhou area; foundation pit dewatering; land subsidence

**First-author's address** Changzhou Rail Transit Development Co., Ltd., 213022, Changzhou, China

基坑周围地面沉降的主要原因之一。如何计算基坑降水诱发的沉降也是近年来的研究热点。文献[1]提出了基坑降水后土体总应力可变的原理, 并与常用的不变原理进行对比, 对潜水承压含水层降水后不同条件下的总应力和有效应力计算进行了系统分析。文献[2]提出了一种基于 Dupuit 假设、忽略土体侧向变形及群井效应的基坑周围地面沉降计算方法, 采用分层总和法分别计算了水位降落曲线上疏干土与饱和土的地面沉降量, 叠加后获得了坑周地面总沉降量。文献[3]参照水库水位下降时水面曲线的计算公式, 对降水引起的附加荷载进行简化分解, 综合考虑水面曲线的形状和水位下降等因素, 提出了一套计算基坑降水引起的地基和地面沉降的理论计算方法。

目前, 对于基坑降水引发的地面沉降研究大多集中于计算方法的研究, 对于所提计算方法的适用地区说明较少。鉴于此, 本文结合常州地区多个基坑抽水试验实例, 研究常州地区特殊应力历史及水文地质条件下基坑降水引起的地面沉降变形规律, 对比分析多种基坑降水引起的地面沉降计算方法, 并总结了沉降变形特点, 提出了适用于该地区及类似水文地质特点的沉降计算方法。本研究可为类似区域条件和地域性特点的岩土工程类问题提供一定的工程指导, 简化复杂的岩土工程问题。

## 1 常州地区典型土层应力历史

土体在各种自然地质作用下经历的固结变形过程为土体的固结历史, 将土体先期固结压力  $\sigma_p$  与土层目前承受的上覆自重压力  $\sigma_s$  的比值称为 OCR(超固结比), 其是评价土的固结状态、结构性、变形和强度特性的一个非常重要的参数。土的固结和压缩特性与由 OCR 所代表的土体应力历史高

基坑降水是基坑工程中的重要环节, 也是造成

\* 通信作者

度相关。大量理论与工程实践表明,正常固结土层对由承压水位降低引起的土体固结、压密等问题符合土的单向一维渗流固结理论。对于超固结土,只有当承压水位下降且其能在土层中造成有效剩余孔隙压力时,才能进一步引起土层固结。因此,为了正确选择相应的土体参数来估算常州地铁车站由基坑降水引发的固结沉降,有必要对常州地区的土体应力历史进行研究。

根据常州地区的地层资料,常州市区表层普遍分布着一层厚 3~10 m 的第四系上更新统(Q<sub>3</sub>)冲击相黏土,其具有固结状态好(超固结土)、结构紧密、坚硬可塑、抗压强度较大等良好的工程地质性质,实用效果较好。为获得更准确的相关土层应力历史情况,本文进行了多次项目调研和相关资料的收集,整理常州地区多个工民建场地、地铁车站场地等典型土层应力历史的相关资料,并基于此绘制了常州地区典型土层超固结比统计图,如图 1 所示。

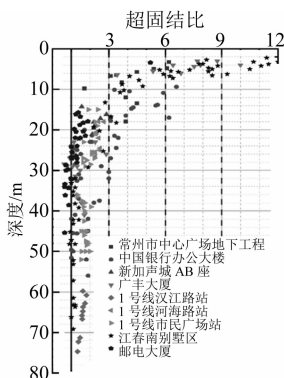


图 1 常州地区典型土层超固结比

Fig. 1 Over-consolidation ratio of typical soil layers in Changzhou area

由图 1 可知:自地面以下 30 m 是目前常州地区地下空间开发的主要影响土层,除 3 m 内杂填土层外,埋深 3~8 m 内主要以第③层黏土层为主,夹有第④层粉土夹粉质黏土层(厚度较小),超固结比为 4~12,为严重超固结土;埋深 8~15 m 内以第⑤层粉砂及粉土层为主,超固结比为 1~6,为重超固结土;埋深为 15~30 m 内以第⑥层黏土层、⑦层粉质黏土层为主,超固结比为 1~3,为轻微超固结土。

综上所述,常州地区基坑工程中常涉及到的地面以下 20 m 内浅部分土层以超固结土为主,部分地区浅层土的超固结比非常大且压缩性较差。基坑工程施工设计过程中需对这一类土层特别注意,以免设计或施工措施不当造成安全事故。

## 2 常州地区降水诱发地面沉降计算方法

### 2.1 分层总和法

目前,国内对于基坑降水引发的地面沉降计算主要依据 JGJ 120—2012《建筑基坑支护规程》的规范算法,即基于分层总和法估算降水引起的沉降。由降水引起的总沉降量  $S$  可以表示为:

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

式中:

$S_i$ ——第  $i$  层计算土层的沉降量;

$\Delta p_i$ ——第  $i$  层计算土层由降水引起的附加荷载;

$E_i$ ——第  $i$  层计算土层的压缩模量,对于黏土及粉土,  $E_i = (1 + e_0)/a_v$ ,  $e_0$  为土层原始孔隙比,  $a_v$  为土层的体积压缩系数;

$h_i$ ——第  $i$  层计算土层的厚度。

### 2.2 考虑应力历史影响的沉降计算方法

对于超固结土,考虑应力历史条件下由基坑降水引发的地面沉降相对较小,大量工程实践经验也证明了这一结论。由于各土层埋深不同,应力历史、应力水平也不尽相同,进而造成各土层压密程度有所不同。在超固结土层中,基坑降水只有当其在土层中造成有效剩余孔隙压力时,才有可能进一步引起土层固结。对于水位降低相同的情况,超固结土层中引发的沉降量小于正常固结土层;同样的,欠固结土层中引发的沉降量大于正常固结土层。对于分层总和法而言,综合多种影响因素下的修正系数十分关键。目前,国内计算规范对于沉降修正系数选取均有不同规定,例如对于软土地基,沉降修正系数为 0.7~1.4,其针对特定地区的沉降修正系数选取也不同。对于常州地区特殊的地质历史,直接应用分层总和法进行简单计算获得的结果偏差较大,无法对实际工程进行设计与指导,因此需要在考虑常州地区应力历史条件的前提下,研究基坑降水诱发地面沉降的计算方法。

目前,针对超固结土的沉降计算采用较广的方法是原位压缩曲线计算方法。对于正常固结、欠固结土层沉降  $S_{ci}$  的计算公式为:

$$S_{ci} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta h_i}{1 + e_{0i}} \lg \left( \frac{1}{m_i} + \frac{\sigma_{zi}}{\sigma_{pi}} \right) C_{ci} \quad (2)$$

式中:

$C_{ci}$ ——第  $i$  层计算土层的压缩指数;

$\sigma_{pzi}$ ——第  $i$  层计算土层中点处的先期固结压力,正常固结时  $\sigma_{pzi} = \sigma_{szi}$ ;

$e_{0i}$ ——第  $i$  层计算土层中点处对应  $\sigma_{pzi}$  时的初始孔隙比;

$\sigma_{zi}$ ——降水对第  $i$  层计算土层中点处的附加应力;

$m_i$ ——第  $i$  层土的超固结比。

对于超固结土层沉降  $S_{c2}$  的计算公式为:

$$S_{c2} = S_{c21} + S_{c22} \tag{3}$$

$$S_{c21} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta h_i}{1 + e_{0i}} [C_{si} \lg(m_i) +$$

$$C_{ci} \lg \left( \frac{1}{m_i} + \frac{\sigma_{zi}}{\sigma_{pzi}} \right)], \quad \sigma_{szi} + \sigma_{zi} > \sigma_{pzi} \tag{4}$$

$$S_{c22} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta h_i}{1 + e_{0i}} \lg \left( \frac{1}{m_i} + \frac{\sigma_{zi}}{\sigma_{pzi}} \right) C_{si}$$

$$\sigma_{szi} + \sigma_{zi} \leq \sigma_{pzi}$$

式中:

$\sigma_{szi}$ ——第  $i$  层计算土层中点处的自重应力;

$C_{si}$ ——第  $i$  层计算土层的回弹指数。

考虑应力历史的沉降计算方法(以下简称“应力历史法”)中,  $C_{si}$  与  $C_{ci}$  是两个非常重要的参数。文献[4]对此进行了大量的侧限压缩试验和三轴试验,并给出了相关的经验公式。

3 工程实例计算

3.1 汉江西路某基坑敞开式抽水试验(实例 1)

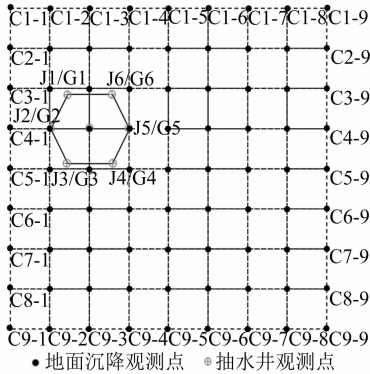
3.1.1 试验条件及场地工程地质概况

该项目位于常州市汉江西路,总建筑面积约为  $1.023 \times 10^5 \text{ m}^2$ ,基坑面积约为  $2 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,基坑普遍区域开挖深度约为 10 m。拟建地段勘察深度范围内揭露的地基土属第四纪松散沉积物,根据地层成因、土层性质、结构特点及物理力学性质上的差异,可将地基土层划分为 7 层,其中第①、⑤、⑦层地基土层又可根据其工程性质分成不同的亚层。本次群井抽水试验为敞开式降水,同时开启 4 口井进行抽水,并同时观测周围水位及地面沉降,抽水时间约 14 d。

3.1.2 抽水试验结果

本次抽水试验的目的是查明第⑤层含水层埋深及试验期间的水头高度,此外在现场实测数据的基础上,分析前述沉降计算方法预测基坑降水引发地面沉降的可靠性。为初步分析本次抽水试验对周围环境的影响,共在试验井周围布置了 81 个地面沉降监测

点。本次群井抽水试验启动抽水井 J1—J4 进行抽水(J5 和 J6 为未启动的抽水井),观测井 G1—G7 进行观测。4 口试验井开泵抽水后出水正常,并同步进行地面沉降观测。试验开始前,对场地内所有沉降监测点测定初值,抽水期间监测频率保持每天一次,抽水持续时间为 14 d。停止抽水后继续观测沉降点的变形恢复情况,直至稳定后停止沉降监测。抽水井与地面沉降监测点的布置图如图 2 所示。



注: C1-1 为第 1 行第 1 列的沉降监测点,其他同义。

图 2 抽水井与地面沉降监测点布置图

Fig. 2 Layout diagram of pumping wells and land surface subsidence monitoring points

本次试验井内所采用的降压泵额定出水量均为  $20.0 \text{ m}^3/\text{h}$ ,6 口井同时运行后,平均出水量约为  $9.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,每日出水量约  $1\,368 \text{ m}^3$ 。群孔抽水试验抽水近 14 d,J1—J4 出水量稳定。第⑤层群井抽水试验期间,对 G1—G3 观测井内的水位变化进行同步监测。观测井 G1—G3 水位埋深与时间的关系曲线如图 3 所示。

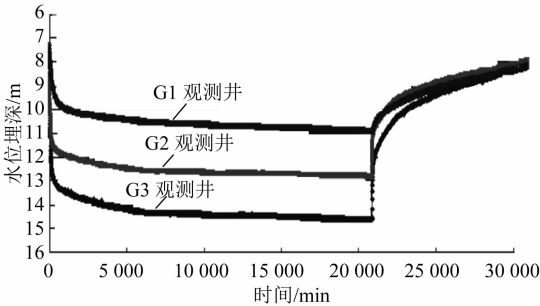


图 3 观测井 G1—G3 水位埋深与时间的关系曲线

Fig. 3 Curve of water level burial depth and time relation of observation well G1—G3

3.1.3 地面沉降监测与计算

根据分层总和法和式(1),计算当第⑤层抽水结束、水位降深为 8 m 时,距降水中心 10~80 m 处

的地面沉降值。根据式(2)一式(5),结合本次工程实例,计算降水后距离抽水中心不同距离处的地面沉降值。根据场地勘察资料、土工试验数据及相应

的参数计算,应力历史法的土层计算参数(实例 1)如表 1 所示。监测数据、分层总和法和应力历史法的地面沉降曲线对比如图 4 所示。

表 1 应力历史法的土层计算参数(实例 1)

Tab. 1 Calculation parameters of soil layer with stress history method (practical case 1)

| 土层编号           | 土层名称  | 重度/<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | 压缩模量/<br>MPa | 初始<br>孔隙比 | 压缩指数  | 回弹指数  | 先期固结<br>压力/kPa | 含水层<br>情况 |
|----------------|-------|-----------------------------|--------------|-----------|-------|-------|----------------|-----------|
| ①              | 填土    | 19.6                        | 5.8          | 0.861     | 0.151 | 0.013 | 182            | 上层滞水      |
| ③ <sub>2</sub> | 黏土    | 20.0                        | 7.7          | 0.715     | 0.194 | 0.018 | 277            | 上层滞水      |
| ③ <sub>3</sub> | 粉质黏土  | 19.4                        | 8.0          | 0.741     | 0.203 | 0.020 | 306            | 上层滞水      |
| ⑤ <sub>1</sub> | 粉砂夹粉土 | 19.1                        | 11.3         | 0.722     | 0.171 | 0.014 | 415            | 承压含水层     |
| ⑤ <sub>2</sub> | 粉砂    | 19.4                        | 13.5         | 0.740     | 0.155 | 0.013 | 548            | 承压含水层     |
| ⑤ <sub>3</sub> | 粉砂夹粉土 | 18.9                        | 10.3         | 0.789     | 0.149 | 0.013 | 624            | 承压含水层     |

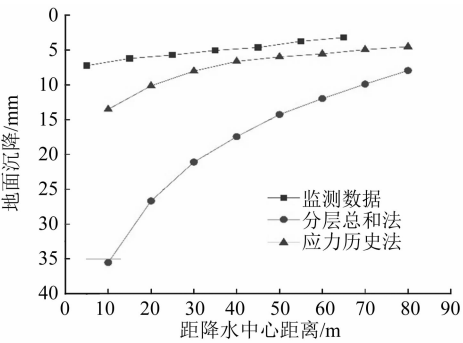


图 4 监测数据、分层总和法和应力历史法的地面沉降曲线对比

Fig. 4 Comparison of land subsidence curves of monitoring data, splitting summation method and stress history method

由图 4 可知,由分层总和法和应力历史法计算得到的地面沉降值差距较大。利用分层总和法的计算结果变化规律较为符合实际情况,但在数值上远大于沉降监测值。利用分层总和法计算获得的距降水中心 10 m 处的地面沉降为 35.53 mm,距降水中心 40 m 处的地面沉降为 17.45 mm,距降水中心 80 m 处的地面沉降为 7.95 mm,整体计算误差超过 400%。相比于分层总和法,应力历史法的计算结果更接近实际监测值。利用应力历史法获得的距降水中心 10 m 处的地面沉降为 13.51 mm,距降水中心 40 m 处的地面沉降为 6.63 mm,距降水中心 80 m 处的地面沉降为 4.03 mm,整体计算误差小于 60%。

3.2 某地铁站悬挂式止水帷幕基坑抽水试验(实例 2)

3.2.1 试验条件及场地工程地质概况

常州市某地铁站基坑沿星港路东西向布置,标

准段开挖深度为 16.66~17.51 m。本次抽水试验位置选取在地铁站 2 号出入口,该出入口止水帷幕深度为 14.60~17.10 m,为悬挂式止水帷幕。根据工程地质勘察资料,工程场地大致划分为 10 个工程地质层,其中,①层为全新世沉积物,③~⑧层为晚更新世沉积物。本次群井抽水试验为悬挂式止水帷幕条件下的坑内抽水试验,同时开启 3 口井进行抽水,并同时观测周围水位及地面沉降,抽水持续时间约为 12 d。

3.2.2 抽水试验结果

为初步分析本次抽水试验对周围环境的影响,共在试验井周围布置了 25 个地面沉降监测点。本次群井抽水试验启动抽水井 J1—J3 进行抽水,观测井 G1—G5 进行观测。3 口试验井启动后出水正常,平均出水量约为 1.34 m<sup>3</sup>/h,每日出水量约为 96.5 m<sup>3</sup>,环境监测同步进行。抽水开始前对场地内的地面沉降点进行初值测量,抽水期间监测频率保持每天一次,抽水时间为 12 d。

3.2.3 有限元法模拟计算

结合基坑现场降水情况,利用 Abaqus 有限元计算软件对其进行数值模拟。基坑降水引起的周围地面沉降云图如图 5 所示。短期群井抽水试验对基坑外的环境影响较小,距离止水帷幕 5 m 监测点处的最大沉降计算值为 2.40 mm,略大于实际监测值 1.70 mm。坑外距离止水帷幕 30 m 处,地面沉降计算值约为 0.80 mm。综上所述,计算值与监测值较为吻合且总体变化趋势一致,因此可认为所建立的模型及其相关参数可较好地模拟抽水过程中的实际情况。

3.2.4 地面沉降监测与计算

根据观测井水位观测数据,坑外最大水位降深

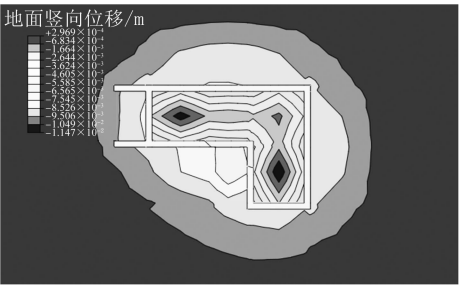


图 5 基坑降水引起周围地面竖向位移云图

Fig. 5 Nephogram of surrounding land vertical displacement caused by foundation pit dewatering

为 2 m,故此处以降水最终稳定、坑外水位降深达到 2 m 时的情况计算坑外地面沉降值。根据分层总和法和式(1),计算当抽水结束时,距离基坑 10~50 m 处的地面沉降值。根据式(2)一式(5),结合本次工程实例,计算降水后距离抽水中心不同距离处的地面沉降值。根据场地勘察资料、土工试验数据及相应参数的计算,应力历史法的土层计算参数(实例 2)如表 2 所示。由监测数据、分层总和法、应力历史法和有限元法获得的地面沉降曲线对比如图 6 所示。

表 2 应力历史法的土层计算参数(实例 2)

Tab. 2 Calculation parameters of soil layer with stress history method (practical case 2)

| 土层编号           | 土层名称    | 重度/<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | 压缩模量/<br>MPa | 初始<br>孔隙比 | 压缩指数  | 回弹指数  | 先期固结<br>压力/kPa | 含水层<br>情况 |
|----------------|---------|-----------------------------|--------------|-----------|-------|-------|----------------|-----------|
| ①              | 填土      | 19.1                        | 4.9          | 0.827     | 0.198 | 0.019 | 92             | 上层滞水      |
| ③ <sub>2</sub> | 黏土      | 19.9                        | 7.1          | 0.735     | 0.223 | 0.023 | 218            | 上层滞水      |
| ⑤ <sub>1</sub> | 黏质粉土夹粉砂 | 19.1                        | 8.9          | 0.822     | 0.131 | 0.008 | 305            | 上层滞水      |
| ⑤ <sub>2</sub> | 粉砂      | 19.6                        | 11.3         | 0.725     | 0.134 | 0.009 | 388            | 承压含水层     |
| ⑤ <sub>3</sub> | 粉砂夹粉土   | 19.3                        | 9.9          | 0.777     | 0.124 | 0.007 | 432            | 承压含水层     |

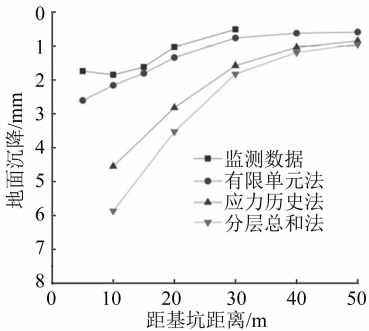


图 6 监测数据、分层总和法、应力历史法和有限元法的地面沉降曲线对比

Fig. 6 Comparison of land subsidence curves of monitoring data, splitting summation method, stress history method and finite element method

由图 6 可知,有限元法的计算结果与实际监测值较为吻合,但应力历史法和分层总和法的计算结果与实际监测值差距较大。分层总和法计算结果的变化规律较符合实际情况,但在数值上远大于沉降监测值。利用分层总和法计算获得的距基坑 10 m 处的地面沉降为 5.87 mm,距基坑 30 m 处的地面沉降为 1.83 mm,距基坑 50 m 处的地面沉降为 0.95 mm,整体计算误差超过 300%。应力历史法的计算结果更接近于实际监测值。利用应力历史法计算获得的距基坑 10 m 处的地面沉降为 4.25 mm,距基坑 30 m 处的地面沉降为 1.58 mm,距基坑 50 m 处的地面沉降为

0.90 mm,计算误差仍达到了 150%。考虑到该实例中,坑外最大水位降深仅为 2 m,对降水漏斗下方第 ⑤层土层产生的附加应力较小,应力历史法对沉降计算结果的修正效果不明显,故可以认为分层总和法与应力历史方法的计算结果较为接近。

4 结语

岩土工程问题具有较强的地域性,为深入研究常州地区基坑降水引发的地面沉降情况,需要结合常州地区典型的地层分布、应力历史等条件进行分析。本文利用常州地区两个抽水试验实例对比分析了分层总和法、应力历史法及有限元法模拟计算的地面沉降结果,主要获得以下结论:

- 1) 应力历史法对土的固结压缩特性有较大影响。根据对常州多个地铁车站及工民建场地的应力历史统计分析,常州地区基坑工程中常涉及到的地面以下 20 m 内浅部分土层以超固结土为主,部分地区浅层土的超固结比非常大且压缩性较差。基坑工程施工设计过程中需特别注意这一类土层。
- 2) 采用应力历史法所得的沉降值更接近实际监测结果。实例一中的计算误差约为 60%,远低于分层总和法的计算误差(400%);实例二中的计算误差约为 150%,低于分层总和法的计算误差

(下转第 64 页)