

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.03-10

黄土深基坑降水区降水诱发地面沉降的简化算法

胡长明^{1,2}, 林 成¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省岩土与地下空间工程
重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 针对黄土地区深基坑降水导致地层不均匀沉降, 危及坑周建筑物的问题, 论文基于基坑降水诱发地面沉降机理分析, 以分层总和法和剪切位移法为基础, 推导出降水引起地面沉降的简化计算公式。在忽略群井效应和土层侧向变形的前提下, 依据 Dupuit 公式得出基坑降水曲线方程, 将坑周土体以降水曲线为界分为疏干区和饱和区。引入修正系数, 对黄土地区不同性质土层因孔隙水压力减小产生的有效应力增量修正, 同时考虑桩-土界面侧摩阻力对土体的约束作用, 分别计算距井轴不同距离处的沉降量, 叠加后得出最终的沉降值。对比数值模拟计算结果及工程实例监测值, 分析表明: 在桩-土交界处, 侧摩阻力对土体竖向沉降的约束作用最明显; 在 1.5 倍降水深度范围内的沉降计算值精度远高于规范算法, 能够较好的预测降水期间黄土地区坑周不同距离处的地面沉降量。

关键词: 黄土地区; 基坑降水; 地面沉降; 侧摩阻力; 数值模拟

中图分类号: P642.26

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)03-0076-08

Simplified calculation of settlement due to dewatering of phreatic aquifer in loess area

HU Changming^{1,2}, LIN Cheng¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: Focusing on the uneven settlement of surrounding buildings caused by deep foundation pit dewatering in loess area, this study analyzed the mechanism of ground settlement induced by foundation pit dewatering, deduced the simplified calculation formula of ground settlement caused by dewatering based on the layer-wise summation method and shear displacement method. First, the equation of the cone of depression was derived from Dupuit formula by ignoring group well effect and lateral displacement. The soil around the pit was divided into a drained zone and a saturated zone by the precipitation curve. Then introduce modification factor, and the effective stress increment caused by the reduction of pore water pressure in different loess layers was corrected. Finally, the constraint function of lateral friction located in soil-pile interface towards soil settlement was considered. The settlement at different distances from the dewatering well was calculated respectively, the actual settlement was the sum of the both. Instance calculates was performed based on an engineering example of foundation pit dewatering by finite element software Abaqus, and comparative analysis was carried out between numerical results and measured field data. The research results show that the position where the constraint effect of lateral friction became most significant was at the interface of soil and pile; the accuracy of settlement calculation in this paper was much higher than that of the normative method in the range of 1.5 times of precipitation depth, which can better predicted the ground settlement at different distances around the foundation pit in loess region during dewatering. The study could provide reference for

收稿日期: 2020-06-26; 修订日期: 2020-08-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408463); 陕西省教育厅专项科研计划项目(17JK0424)

第一作者: 胡长明(1963-), 男, 博士, 教授, 主要从事土木工程建造与管理方面的研究。E-mail: hu.tm@163.com

calculating ground subsidence in similar phreatic aquifers.

Keywords: loess area; dewatering of foundation pit; settlement of the ground; lateral friction; numerical simulation

0 引言

随着经济的发展,西北地区高层建筑和地下轨道交通的开发与日俱增,使得黄土地段深基坑工程的数量不断增加。基坑大多数处于潜土层,为了确保深基坑在干燥环境下施工而进行的降水工作,破坏了降水井周围地下水渗流场的收支平衡,形成区域性漏斗状弯曲水面,使得水力梯度增加。当水面趋于稳定时,周围地表会在竖直方向上发生固结沉降,严重时将会危及基坑周边建筑物和地下管线的安全。

目前国内外学者主要采用数学模型预测^[1]、数值模拟^[2-3]、理论公式^[4]等方法来分析计算降水引发的地面沉降量:吴意谦等^[5]通过试验并结合陈正汉非饱和土有效应力计算公式,改进分层总和法后得到的计算值更接近实际。HUGO^[6]研究了降水在潜水含水层和承压含水层中诱发的土体沉降,把推导的公式与三维弹性多孔介质理论的计算结果进行对比,证明了公式的精确性。娄平等^[7]以长沙地铁5号线为依托,基于渗流理论研究富水砂卵石地层基坑降水沉降量。杨清源等^[8]以深圳软土地区地铁工程典型潜水地层为例,采用模型试验方法,结合理论分析,提出坑外地表沉降计算方法。这些学者在研究过程中均以太沙基一维固结理论和饱和土有效应力原理为基础,但未依据不同地区成层土的性质寻求土体较精确的有效应力增量值,并且忽略了围护结构侧摩阻力对土体沉降的影响。实际上在降水期间,土层中增加的有效应力是地面产生沉降的主要原因,故有效应力增量的大小是影响地表沉降量的重要因素,而侧摩阻力对沉降约束量的计算同样与土层有效应力增量有关,可见通过对不同土层有效应力增量引入修正系数,对较准确的计算降水诱发坑外地表沉降变化具有实际意义。

故本文选取西北地区地层中的砂土、黏土和黄土,就其因孔隙水压力消散产生的有效应力增量进行修正,同时基于剪切位移法分层考虑围护结构侧摩阻力对沉降的约束作用,推导出适用于黄土地区潜土层、成层土地质降水引起地面沉降的简化计算公式。最后基于实际工况进行数值模拟,并将本文理论计算值与数值模拟结果、现场监测数据对比分析,进一步验证出本文理论能够较好的预测降水期间坑周不同距离处的地面沉降量。

1 降水引起地面沉降理论公式计算

1.1 地面沉降机理

根据太沙基一维固结理论和饱和土有效应力原理,饱和土是二相体系,土中应力由土骨架和孔隙水共同承担,即:

$$\sigma = \sigma' + \mu \quad (1)$$

式中: σ ——土体承受的总应力;

σ' ——土骨架承担的有效应力;

μ ——孔隙水压力。

在整个基坑降水过程中,假设土体的总应力保持不变,孔隙水压力与有效应力可以相互转化,则有效孔隙水压力的减小等于有效应力的等量增加。土颗粒传递的有效应力会使土骨架压密变形,具有抗剪强度,每层土体的变形累计,最终表现为地面沉降,即:

$$\Delta\sigma' = (\sigma - \mu - \Delta\mu) - \sigma' = -\Delta\mu \quad (2)$$

式中: $\Delta\sigma'$ ——土体有效应力的增量;

$\Delta\mu$ ——孔隙水压力的增量。

在潜土层中进行降水,随着地下水位的下降,在降水井周围会形成如图1所示的降水漏斗。 h_0 为原地下水位到地面的距离; Δh 为降水到一定时刻的降深; h 为降水井滤水管长度; x 为降落曲线上某点到井轴的距离; y 为降落曲线的高度; r 为降水井的半径; H 为原有地下水位高度; R 为降水影响半径,当 $x=R$ 时, $y=H$ 。

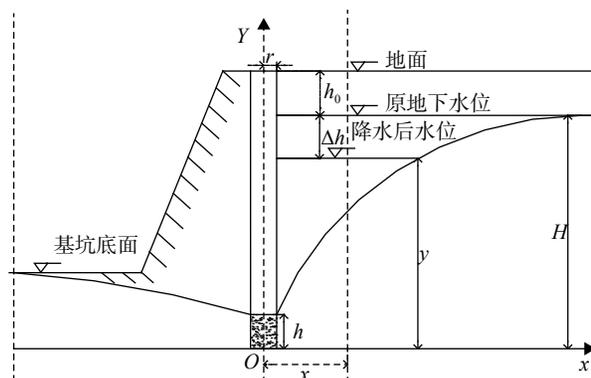


图1 单井降水示意图

Fig. 1 Single well dewatering diagram

基坑在未排水前,深度为 $p(x, y)$ 处的有效应力表达式为:

$$\sigma' = \sigma - \mu = h_0\gamma + (h_p - h_0)(\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w) \quad (3)$$

式中: γ ——地下水位以上土体的天然自重;

γ_{sat} ——土的饱和重度;

γ_w ——水的重度;

h_p —— p 点到地面的距离。

当 p 位于原水位和降水水位之间的疏干区, 此深度处总应力相对于未排水前不变, 孔隙水压力为零, 则有效应力表达式为:

$$\sigma' = h_0\gamma + (h_p - h_0)\gamma_1 \quad (4)$$

式中: γ_1 ——降水后土层的重度。

当 p 位于降水水位以下的饱和区, 其有效应力表达式为:

$$\sigma' = h_0\gamma + \Delta h\gamma_1 + (h_p - h_0 - \Delta h)(\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w) \quad (5)$$

土体中有效自重应力增量为饱和土的有效重度在降水后变为土体持水重度的过程, 因此有效自重应力增量与各层土的给水度 μ_i 有关。为提高工程安全, 进行保守分析, 令 $\gamma_1 = \gamma_{\text{sat}}$, 则疏干区和饱和区的土体有效应力增量为:

$$\Delta\sigma' = \gamma_w(h_p - h_0) \quad (6)$$

$$\Delta\sigma' = \gamma_w\Delta h \quad (7)$$

1.2 水位降深的计算

在基坑降水过程中, 随着降水漏斗曲面的逐渐稳定, 距井轴不同距离处的 x 点对应的降水曲线水位高度 y 并不一致。由于:

$$\Delta h = H - y \quad (8)$$

则计算土体的有效应力增量, 须求得降水漏斗曲线方程。

本文探讨的基坑位于潜水层, 除去止水帷幕进入隔水层的情况, 降水时地下水通常会从基坑周围或底部逐渐渗入坑内, 这时基坑内外之间存在一定的水力联系, 在降水井周围会形成显著的降水漏斗。不考虑群井效应和地下水渗流速度在垂直方向上的分量, 将周围土体流向降水井的地下水视为水平, 降水井周围等水头面近似圆柱面, 按稳定层流分析处理地下水的渗流问题^[9]。将渗流问题从三维简化为二维来解决, 则潜水完整井的降落漏斗曲线方程为:

$$\text{因 } Q = \frac{k\pi(H^2 - h^2)}{\ln \frac{R}{r}} \quad (9)$$

$$\text{则 } y^2 = h^2 + (H^2 - h^2) \frac{\ln \frac{x}{r}}{\ln \frac{R}{r}} \quad (10)$$

式中: Q ——基坑涌水量;

k ——含水层的渗透系数。

1.3 有效应力增量的修正

目前国内对地面沉降的计算一般采用《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)中的弹性变形分层总和法, 总和基础中心轴线上的沉降值对地面沉降量进行估算。

$$S = \sum_{i=1}^n S_i = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma'_i}{E_i} H_i \quad (11)$$

式中: S ——降水引起的地面沉降量;

S_i ——第 i 层土的沉降量;

$\Delta\sigma'_i$ ——降水引起的第 i 层土有效应力增量;

H_i ——第 i 层土的厚度;

E_i ——第 i 层土的弹性模量。

参数 H_i 、 E_i 可依据工程勘察报告确定, 但 $\Delta\sigma'_i$ 由土层孔隙中的静水压力转化而来。在规范算法中, 认为整个土层孔隙中存在的水都能传递静水压力, 未考虑不同水文地质土层的岩性不一。故有效应力增量计算值偏大, 使沉降量过于保守, 与实际沉降值相差过大。

因本文重点研究黄土潜水区降水引发的地面沉降量, 故选取黄土地层中的砂土、黏土和黄土, 对其因孔隙水压力消散产生的有效应力增量进行修正。

(1) 砂土层

砂性土压实后水稳性好、强度较高、沉降量小, 进行沉降计算时应使用《铁路桥涵地基和基础设计规范》中的平均有效应力增量, 即

$$\Delta\sigma' = \frac{(\Delta h_{r-1} + \Delta h_r)}{2} \gamma_w \quad (12)$$

式中: Δh_i ——第 i 层土的降水深度。

(2) 黏土层

黏性土保水性能强, 透水性能差, 有的孔隙在自然状态下几乎是完全封闭的, 不能在土壤中传递静水压力。只有那些贯通的孔隙中才存在着一定的重力水用于传递静水压力, 故用孔隙贯通率(k)对有效应力增量进行修正, 但 k 值的求取非常繁琐, 为提高工程应用的简便性, 经推导验证用给水度(μ)替代孔隙贯通率进行应力修正是合理可行的^[10]。

$$\Delta\sigma' = \mu\Delta h_i\gamma_w \quad (13)$$

(3) 黄土层

黄土的成分较均匀, 结构性能强, 故降水时如果有有效应力增量不能完全克服其结构强度, 产生的沉降量将非常小。同时黄土层在固结沉降时, 与其本身的变形模

量密切相关, 在降深段内被逐渐疏干后变形模量会显著增高, 但沉降变形却相应减小。所以本文引用西安地铁二号线基坑实际测量数据反演后的经验系数^[1]对其进行修正。

$$\Delta\sigma = \varepsilon\Delta h_i\gamma_w \quad (14)$$

式中: ε ——沉降计算经验系数, 当地下水位埋深小于 10 m 时, 取 0.03 ~ 0.1, 当地下水位埋深大于 10 m 时, 取 0.03 ~ 0.6。

降落漏斗稳定后, 将地下水位线以上土体划为干土区 S_a , 因其有效应力不变, 则 $S_a = 0$ 。地下水位线和浸润曲线之间划为疏干区 S_b , 而浸润曲线以下土体划为饱和区 S_c 。考虑不同土层的修正系数, 得出疏干区和饱和区土层的沉降量, 即:

$$S_b = \sum_{i=1}^n \varphi_i \frac{(h_p - h_0)\gamma_w}{E_i} H_i \quad (15)$$

$$S_c = \sum_{i=1}^n \varphi_i \frac{\Delta h\gamma_w}{E_i} H_i \quad (16)$$

式中: φ_i ——不同性质土层对应的修正系数, 砂土取 0.5, 黏土取 μ , 黄土取 ε 。

2 围护结构对沉降的约束

桩-土相对位移会在桩和土之间产生剪切力, 由于主动体不同, 剪切力的大小、分布和效果也不同(图 2)。本文探讨由桩周土体作为主动体的情况, 当地下水位下降时, 土体有效应力增加, 使得桩周土沉降大于桩的沉降, 土体下沉过程中将部分重量通过桩-土间的剪切应力转移到桩上, 土体损失的重力势能是桩侧负摩阻力的能量来源。

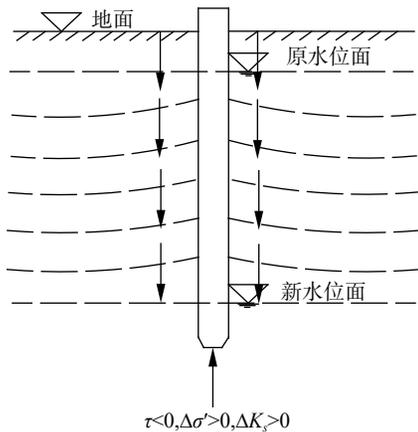


图 2 地下水位下降时桩-土剪切应力传递性状模式

Fig. 2 Pile-soil shear stress transfer behavior and pattern while groundwater level drops

目前桩侧摩阻力的计算方法主要有荷载传递法、剪切位移法、弹性理论法。剪切位移法建立了桩周土体的竖向位移场表达式, 不需要对桩体进行单元划分, 便于计算, 故本文将基于剪切位移法对桩-土间侧摩阻力进行计算。如图 3, 当第 i 层土中基坑降水引发土体沉降时, 因桩体侧摩阻力产生的约束作用, 使土体产生剪切变形, 由原来的 O 点向上移动到点 A , 随后剪切力逐渐传递给相邻土体, 直到在距离桩体 r_m 的 B 点处, 剪应变忽略不计。则 r_m 表示摩阻力对土体沉降的约束范围, 其值为:

$$r_m = 2.5L\rho_m(1 - V) \quad (17)$$

式中: L ——桩的长度;

ρ_m ——有限深度均质土中的影响修正系数, 取 1.0;

V ——土体的泊松比。

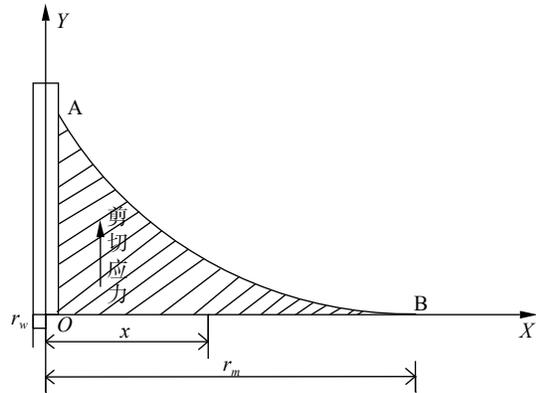


图 3 围护结构侧摩阻力传递示意图

Fig. 3 Schematic diagram of lateral friction transfer of envelope

将围护结构的厚度视为 $2r_w$, 在第 i 层土的桩土交界处 ($x = r_w$) 剪切力为 $\tau_{0,i}$ 。则在约束范围内, 距离围护结构中心轴线处 x 的剪切应力为:

$$\tau_i = \frac{\tau_{0,i}r_w}{x} \quad (18)$$

$$\text{因 } \gamma = \frac{ds}{dx} \quad (19)$$

$$\tau_i = G_s\gamma = G_s\frac{ds}{dx} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \text{则 } S_{\tau,i} &= \int dS_{\tau,i} = \int_x^{r_m} \frac{\tau_i}{G_s} dx \\ &= \frac{r_w\tau_{0,i}}{G_s} \ln \frac{r_m}{x} \end{aligned} \quad (21)$$

式中: γ ——竖向剪切力产生的剪应变;

G_s ——剪切模量;

$S_{\tau,i}$ ——第 i 层土中剪切力产生的纵向位移。

参考《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)中对中

性点以上桩周负摩阻力标准值的计算公式, 得出降水前已固结稳定状态下第 i 层土桩-土交界处剪切力为^[12]:

$$\tau_{0,i} = \delta_{n,i} \Delta \sigma'_{v,i} \quad (22)$$

式中: $\Delta \sigma'_{v,i}$ ——围护结构和土体交界处第 i 层土的有效应力增量;

$\delta_{n,i}$ ——第 i 层土的负摩阻力系数, 对黏性土、粉土取 0.25, 砂土取 0.35, 黄土取 0.2。

$$S_{\tau,i} = \frac{r_w \delta_{n,i} \Delta \sigma'_{v,i}}{G_s} \ln \frac{r_m}{x} \quad (23)$$

综上, 在 $r_w < x < r_m$ 的围护结构约束范围内, 总的沉降量为:

$$S = S_b + S_c - S_{\tau} \quad (24)$$

3 工程实例分析

3.1 工程概况

该地铁换乘站位于西安市交通主干道长乐路与金花路十字路口西侧, 周边以商业建筑物为主, 交通繁忙。车站场地位于黄土梁洼区, 地表一般均有厚度不均的全新统人工填土 (Q_4^{ml}), 其下为上更新统风积新黄土 (Q_3^{eol})、饱和软黄土 (Q_3^{eol}) 及残积古土壤 (Q_3^{el}), 再下为中更新统风积 (Q_2^{eol}) 老黄土、冲积粉质黏土 (Q_2^{al})、中砂等, 场地土层大致分为 7 层, 其物理力学性能指标见表 1。

表 1 地层物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil formation

岩土名称	层厚/m	弹性模量/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	泊松比	容重/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)
杂填土	2	8 000	0.37	16.5	25	16.0
素填土	3	21 350	0.35	15.1	33	17.3
新黄土	5	16 100	0.28	15.2	45	19.0
饱和软黄土	2	16 450	0.35	17.0	35	17.0
古土壤	5	19 600	0.30	18.6	45	18.5
老黄土	10	19 600	0.33	19.2	45	17.5
粉质黏土	13	20 650	0.29	19.4	45	21.0

车站整体呈“T”型布置, 为内框架箱型结构岛式车站, 车站全长 150.2 m, 宽 22.7 m, 中心线处基坑开挖深度为 24.5 m。主体围护结构采用 35 m 长的 $\Phi 800@1200$ 钻孔灌注桩+钢管内支撑, 外围设置旋喷桩形成止水帷幕。地下潜水位稳定埋深 8.6~12.5 m, 考虑地下水位变幅 2 m, 则降水深度为 16 m, 根据实验数据计算得出降水影响半径为 100 m^[13-17]。

3.2 降水设计和监测方案

根据工程和水文地质情况, 基坑采用 800 mm 井

径, 直径 600 mm 无砂管坑内降水, 降水方式为潜水完整井。在灌注桩和止水帷幕施工完毕后, 为给后续施工提供干燥环境, 拟对基坑内整体进行降水, 将坑内水位降至设计水位。

结合基坑中心线和旋喷桩深度, 降水井取 34 m, 嵌入基坑底部 8.4 m, 井底为粉质黏土层, 距离中砂层 2 m。避免降水井置于结构转角处, 拟定降水井中心距排桩内边缘 3.5~4.5 m。结合地勘报告和工程经验, 土体综合渗透系数取 8 m/d, 计算得出基坑等效半径 52.2 m, 管井数量 21 口, 井与井之间的间距为 16.5 m, 尽可能避免周边地下水的侧向补给。

基坑降水效果直接影响工程进度, 为了实时监测降水期间水位变化情况以及降水井周边不同距离处地表的竖向沉降量。在基坑外侧 1.5 m 处布置 12 口观测井进行水位监测, 同时在降水井 J4 附近, 垂直于降水井 2, 4, 10, 16, 22, 28 m 处布置了 6 个地面沉降测点。地下水位采用水位管和水位计量测, 测点位于基坑四角点及长短边中点(长边处每 20~40 m 布置一个), 竖直沉降监测则采用水准仪, 所有监测点、降水井和观测井的具体布置见图 4。

3.3 监测数据分析

在基坑降水初期坑内外水位下降较快, 降水稳定时, 坑内水位 26.5~28 m 基本达到设计水位, 坑外观测井水位 13.5~16.9 m。在基坑南北两面各选取两个具有代表性的观测井 G9、G5 和 G2、G8, 在西面选取观测井 G12, 其水位累计变化值如图 5 所示。由图可知, 降水期间观测井水位虽均有下降, 但幅度较小, 水位变化最大值为-3.21 m 在观测井 G9 处, 最小值为-1.62 m 在 G12 处。此变化差异是因为北侧降水井布置均匀, 数量最多, 则水位受基坑内降水影响最大, 南侧次之, 东西两侧影响最小。可见本工程止水帷幕有效减小了基坑外围水位下降过大对周边环境造成的影响。

如图 6 所示, 从开始降水到降水稳定后一段时间内, 各监测点沉降值组成的曲线呈非线性, 沉降量总体趋势为随着到达降水井的距离增大而减小, 满足相关规范对基坑降水引起地表沉降的控制值。各时间段实测最大沉降值均发生在 C2 监测点处, 比距离降水井最近的监测点 C1 略大, 这是因为基坑北侧 3~10 m 范围内建筑物众多, 地面荷载较大, 加大了土体中的附加应力。

3.4 基坑周边地面沉降量计算

基坑工程地下水主要赋予上更新统残积古土壤、中更新世风黄土及冲积粉质等黏土层中, 含水层厚度取 30 m。依据工程实际参数, 将本文提出的公式带入

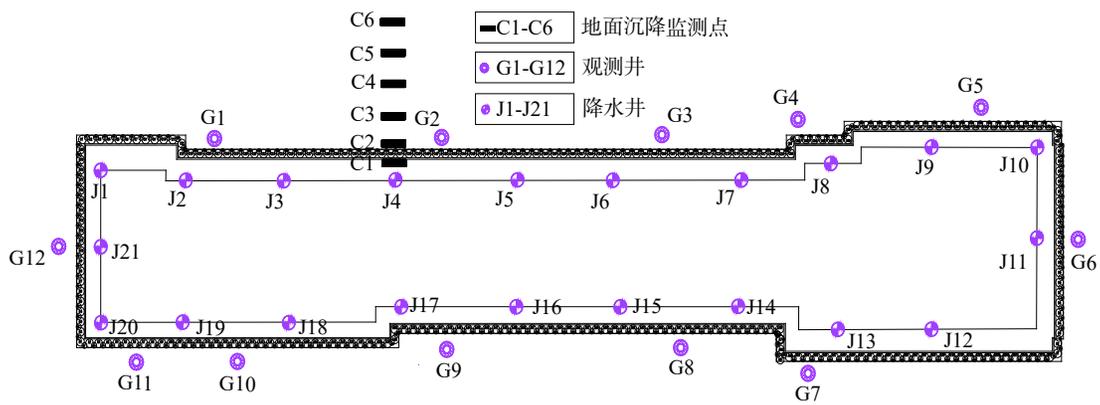


图4 降水井、观测井及各监测点平面布置图

Fig. 4 Arrangement of dewatering well, observation well and monitoring points

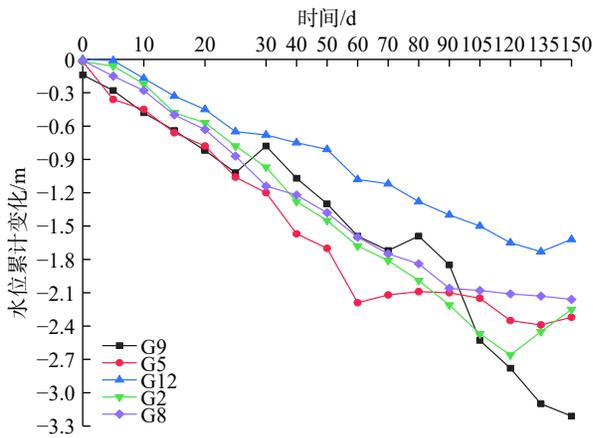


图5 地下水水位累积变化图

Fig. 5 Cumulative change of groundwater level

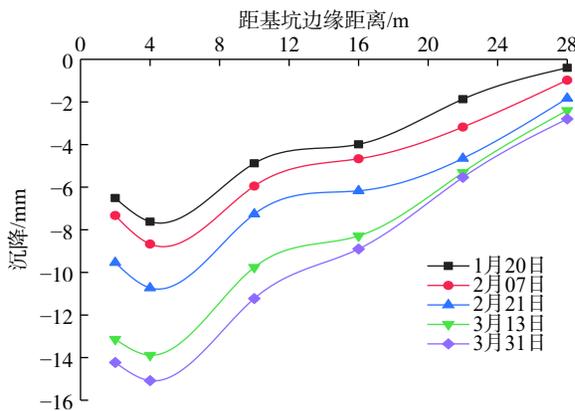


图6 基坑周边地面沉降变化曲线

Fig. 6 Ground settlement curve around foundation pit

MATLAB 软件编程计算, 分析对比考虑不同因素影响后的地面沉降值(表2)。

由表2和图7可知:

(1) 由于各土层的性质不同, 在降水时对竖直方向上层土的有效应力增量引入系数修正后, 对比仅把土

表2 距降水井不同距离地面沉降计算值

Table 2 The settlement calculation values around foundation pit from different distance

计算方法	最终地面沉降值/mm					
	距井 2 m	距井 4 m	距井 10 m	距井 16 m	距井 22 m	距井 28 m
规范算法	64.2	54.2	41.2	32.7	26.2	21.8
对 $\Delta\sigma'$ 进行修正	24.8	20.6	16.0	12.7	10.2	8.5
考虑围护结构约束	21.8	18.9	14.9	12.1	9.8	8.2

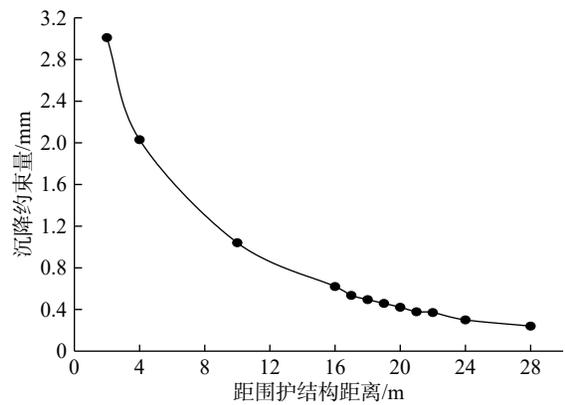


图7 围护结构对地面沉降的约束量

Fig. 7 Constraint value of pit support structure to ground surface settlement

体分为疏干区和饱和区计算出的沉降量, 修正后的沉降值减小了61.3%。

(2) 侧摩阻力对土体沉降的影响范围较小, 距离围护结构越近约束作用越明显, 在桩土交界处的约束量约为距离井轴28 m处的11倍。地面沉降受侧摩阻力的约束作用主要局限于1.5倍的最大水位降深范围内。

4 数值模拟

4.1 模型的建立

为研究分析监测范围之外(28 m)的坑周地表沉降

情况,采用 ABAQUS 有限元软件模拟计算基坑工程降水影响范围内的地面沉降量。根据现场勘测结果,将基坑土体分为 7 层,基坑桩体等效于具有相同抗弯刚度,同时还起到止水帷幕作用的地下连续墙,其弹性模量取 30 GPa,容重 25 kN/m³,泊松比为 0.2。基坑土体和地连墙分别采用 CPE4P、CPE4R 实体单元模拟,网格划分见图 8。

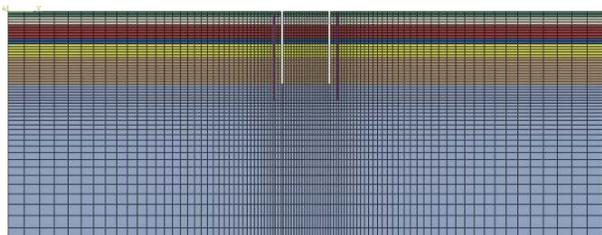


图 8 网格划分后的基坑模型

Fig. 8 The geometric model of the pit after meshing

由圣维南原理选取模型边界距基坑边缘 4 倍开挖深度作为计算范围。所有土层采用 M-C 本构模型,左右两侧水平方向位移为零,底面法向位移为零,顶面为自由边无约束,初始地应力整体加载重力,运用 ODB 导入法进行平衡,土体与地连墙两侧设置为摩擦接触,底面相互绑定。

4.2 降水过程模拟

在有限元模型里,地下水的存在形式为孔隙水压力,降水前将初始孔压水头设置在 -12 m,利用标高,线性赋予土体孔压水头,降水后的孔压云图如图 9 所示。降水井采用分层降水,降水时间为每层 4 d,通过编辑关键字,利用时间函数设置相应位置的 DOF 边界条件,控制降水速率(图 10)。

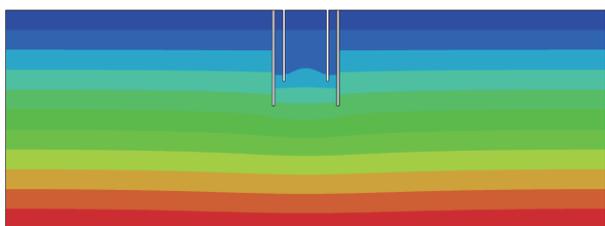


图 9 降水后孔压云图

Fig. 9 Pore pressure after dewatering

4.3 降水沉降分析

图 11 是降水后沉降稳定时期,距降水井不同距离处土体的竖向沉降量。由图可知,地面最大沉降为 -13.7 mm,位于距降水井较近的位置,沉降量总体趋势与监测值相似,类似于降水稳定期漏斗状水位面形态;在距降水井最近处,因设置了桩-土摩擦接触,此处桩体

对土层的沉降约束最大,此后随着距离扩大,约束作用逐渐减小;坑外距井轴 2 倍降水深度处(约 30 m)的沉降量最为显著,4~5 倍降水深度处(约 60~80 m)的沉降量显著减小,此范围外的沉降量可忽略不计,故土体沉降影响范围小于降水影响半径。

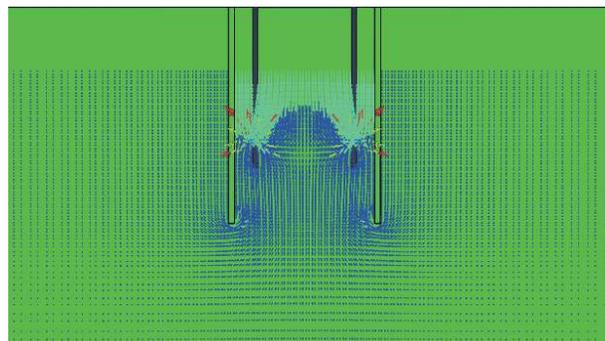


图 10 基坑降水向量

Fig. 10 Dewatering vector of foundation pit

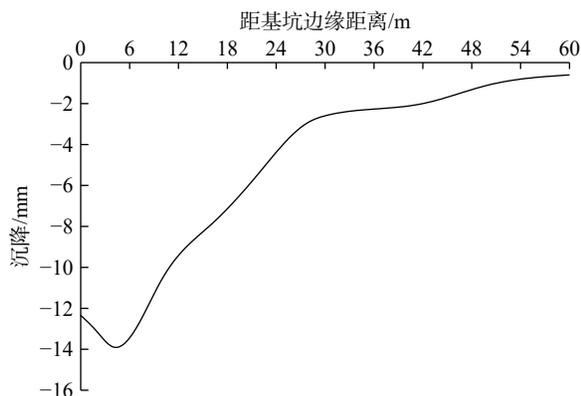


图 11 地表沉降曲线

Fig. 11 The settlement curve of ground surface

4.4 沉降量对比分析

将本文提出的计算方法、规范算法带入实际工程水文地质参数,和现场监测值、数值模拟得出的各井周地表沉降值对比分析(图 12)。

(1)在降水影响范围之内,理论计算得出的地面沉降变化趋势和工程案例实际监测值基本一致,即最终的沉降值和距降水井的距离成反比。

(2)规范算法考虑的实际施工因素较少,计算值过于保守;数值模拟结果因未考虑时空效应和周围建筑物造成的地面超载等因素,和实测值存在差距,但差距较小可用于今后复杂的深基坑降水工程;本文提出的理论计算方法所得出的降水稳定后地面沉降值虽然也与实测值存在一定差距,但比规范算法得到的结果更精准,可为解决黄土地区类似问题提供参考。

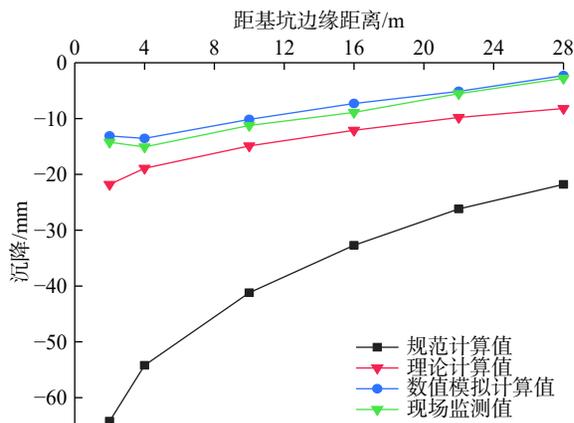


图 12 不同距离地面沉降计算值与监测值对比

Fig. 12 Comparison of the settlement values from the different distance after dewatering using different methods

5 结论

(1)降水期间,土体产生的有效应力增量不仅是地面沉降的主要原因,同时也在很大程度上影响了围护结构与土体之间侧摩阻力对土层的约束量。故对不同土层有效应力增量引入修正系数,对较准确的计算降水诱发坑外地面沉降变化具有实际意义。

(2)地面沉降受侧摩阻力的约束作用主要局限于1.5倍的最大水位降深范围内。土体越接近围护结构,产生沉降时受到的约束作用越强,桩-土交界处约束作用最为显著。

(3)依据裘布依公式推导出基坑降水漏斗曲线方程,以曲面为界将土体分为疏干区和饱和区后,选取西北地区地层中的砂土、黏土和黄土,就其因孔隙水压力消散产生的有效应力增量进行修正,同时基于剪切位移法分层考虑围护结构侧摩阻力对沉降的约束作用,叠加后算出沉降量。该公式可以简单明了的计算出降水井不同深度和距离处的沉降值,能够有效的预测基坑沉降值,可为计算类似的黄土深基坑潜水层降水诱发地面沉降提供参考。

(4)对比规范算法,本文计算方法得到的地面沉降量更接近实测值,在一定程度上证明了该的可行性和合理性,但黄土深基坑潜水区降水引起地面沉降受到多重因素的干扰和制约,精确解还需进一步寻求。

参考文献 (References) :

[1] 高旭,郭建波,晏鄂川.考虑止水帷幕的深基坑降水预测解析计算[J].岩土力学,2018,39(4):1431-1439. [GAO Xu, GUO Jianbo, YAN Echuan. Dewatering forecast of deep foundation pit considering waterproof curtain using analytic approach [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(4): 1431-

1439. (in Chinese with English abstract)]

[2] XU Y S, WU H N, WANG B Z F, et al. Dewatering induced subsidence during excavation in a Shanghai soft deposit [J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(9): 1-15.

[3] WANG J X, DENNG Y S, MA R Q, et al. Field experiment and numerical simulation of coupling non-Darcy flow caused by curtain and pumping well in foundation pit dewatering [J]. Journal of Hydrology, 2017, 549(6): 277-293.

[4] 张莲花,李荣强,刘德坊.基坑降水总应力变化时有效应力增量和沉降量计算[J].中国地质灾害与防治学报,2001,12(1):75-77. [ZHANG Lianhua, LI Rongqiang, LIU Defang. The calculation of effective stress and settlement based on the variable total stress in pit dewatering [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2001, 12(1): 75-77. (in Chinese with English abstract)]

[5] 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. [WU Yiqian, ZHU Yanpeng. Calculation of settlement considering unsaturated soil influence on the dewatering of foundation pits [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(3): 179-187. (in Chinese with English abstract)]

[6] HUGO A. LOÁICIGA. Consolidation Settlement in Aquifers Caused by Pumping [J]. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 62(9): 1191-1204.

[7] 姜平,赵星,汤卓,等.朝阳站富水砂卵石层施工动态降水控制技术研究[J].铁道科学与工程学报,2019,16(2):457-463. [LOU Ping, ZHAO Xing, TANG Zhuo, et al. Study on dynamic dewatering control technology for water-rich sandy gravel layer in Chaoyang station [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(2): 457-463. (in Chinese with English abstract)]

[8] 杨清源,赵伯明.潜水层基坑降水引起地表沉降试验与理论研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(6):1506-1519. [YANG Qingyuan, ZHAO Boming. Experimental and theoretical study on the surface subsidence by dewatering of foundation pit in phreatic aquifer [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(6): 1506-1519. (in Chinese with English abstract)]

[9] 苑莲菊,李振栓,武胜忠,等.渗流工程力学及应用[M].北京:中国建材工业出版社,2001. [YUAN Lianju, LI Zhenshuan, WU Shengzhong, et al. Seepage engineering mechanics and application[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001. (in Chinese)]

[10] GORDON T, HSEIN C K. Simplified model for wall deflection and ground-surface settlement caused by braced excavation in clays [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(6): 731-747.