

基于裘布依理论的基坑降水引起 地面沉降的改进算法

李庚¹, 孙延震¹, 朱彦鹏², 马连强¹, 薛锡胜¹

(1. 山东建勘集团有限公司, 山东 济南 250031; 2. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 以兰州东方红广场地铁车站项目为依托, 对基坑降水过程中井周水位深度及地表沉降进行现场监测, 并对基坑降水进行数值模拟。通过裘布依漏斗曲线、修正后的漏斗曲线以及水位降深实测值进行对比分析, 结果表明: 实测结果更接近修正后的漏斗曲线, 误差在9%以内, 表明修正后的漏斗曲线具有一定的可靠性。通过地面沉降计算值、实测值和模拟对比分析得出, 其变化趋势基本一致, 均为先下凹后上凸, 理论值大于实测值, 偏于保守, 误差在23%以内。当距降水井轴线的距离小于潜水层厚度时, 渗流力的影响相对较大, 当距降水井轴线的距离大于潜水层厚度时, 渗流力的影响很小, 可忽略渗流力的影响。

关键词: 基坑降水; 沉降; 疏干; 渗流; 侧摩阻力

中图分类号: TU473.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)06-0085-08

Improved Algorithm for Ground Subsidence Caused by Foundation Pit Dewatering Based on Dupuit Theory

LI Geng¹, SUN Yanzhen¹, ZHU Yanpeng², MA Lianqiang¹, XUE Xisheng¹

(1. Shandong Jiankan Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250031, China;

2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: Taking the Lanzhou Oriental Red Square subway station project as the support, the depth of the ground level and the surface settlement in the process of groundwater level precipitation in the foundation pit are monitored on site, and the numerical simulation of groundwater level precipitation is carried out. comparing and analyzing the Joubui funnel curve, the modified funnel curve and the measured value of the water level, the results show that the measured results are closer to the modified curve, and the error is about 9%, which shows that the modified funnel curve has a certain reliability. Through the calculation value, the measured value and the simulation comparison analysis the surface settlement, it is concluded that the change trend is basically the same, which is first concave and then convex, the theoretical value is greater than the measured value, and error is within 23%. When the distance from the well axis is less than the thickness of the phreatic water layer, the influence of seepage force is relatively, and when the distance from the well axis is greater than the thickness of the phreatic water layer, the influence of seepage force is very small, and the influence of seepage force can be ignored.

Keywords: foundation pit dewatering; settlement; drainage; seepage; lateral friction resistance

随着中国城市建设的快速发展, 高层建筑与地铁屡见不鲜, 深大基坑工程越来越多, 基坑事故也随之不断发生。多数情况基坑底部位于地下水位以

下, 如果降水处理不当, 则可能会引起基坑渗透、涌水、流沙等破坏, 为保障施工安全、营造一个干燥的施工环境, 一般会通过降水井将水位降到开挖面以

收稿日期: 2025-06-26

修稿日期: 2025-08-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978321)

作者简介: 李庚(1992—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事岩土工程等方面工作。E-mail: 1225461881@qq.com

通讯作者: 朱彦鹏(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事支挡结构、地基处理和工程事故处理与分析等方面的研究。

E-mail: zhuyup1@163.com

下 1 m,然而在降水过程中,会形成以降水井为中心的降水漏斗,从而造成周围地面的不均匀沉降,可能会给周围环境造成严重影响,或造成巨大损失^[1]。

关于基坑降水诱发地面沉降的理论计算方法,国内外相关领域学者已经进行了大量的工作,提出了诸多计算方法^[2-8]。这些学者在开展研究过程中,多数以裘布依漏斗曲线^[9]为基础,但由于裘布依假设中忽略了地下水流速的垂直分量,没有考虑潜水井存在渗出面,漏斗曲线仅在 $x > h_0$ (h_0 为潜水含水层厚度, x 为距离降水井轴线的距离) 区域与实际曲线相吻合,在 $x < h_0$ 区域,特别是在井壁处,裘布依漏斗曲线与实际漏斗曲线相差较大,总是低于实际漏斗曲线,进而影响基于裘布依漏斗曲线计算地表沉降方法的准确性。

本文在忽略基坑降水工程中群井效应影响的前提下,基于裘布依漏斗曲线并对其修正,考虑到基坑降水过程中渗流力所产生的有效应力增量在水平方向存在分量,采用分层总和法分别对疏干和渗流力作用下引起的地表沉降进行计算,叠加后再减去由降水井与土体间侧摩阻力引起的位移,得到坑周地表的总沉降量。最后通过工程实测结果、理论计算结果及数值模拟三者对比分析,验证此计算方法的准确性,试图得到一套基坑降水引起地面沉降的简单可靠计算方法。

1 降水引起地面沉降

1.1 降水引起地面沉降的机理

由基坑降水(单井、群井)引起的地面沉降机理可以运用土力学中的饱和土有效应力原理来解释,如式(1)所示,即土体承受的总应力等于有效应力和孔隙水压力之和。

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

式中: σ 为土体承受的总应力, kPa; σ' 为土骨架承担的有效应力, kPa; μ_w 为孔隙水压力, kPa。

在基坑降水过程中,假设土体的总应力始终保持不变,孔隙水压力伴随着降水逐渐消散,有效应力逐渐增加,从而使总应力保持不变,而有效应力增大必然导致土骨架压缩变形,从而使地面产生沉降。

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

基坑降水产生的土层附加应力 Δp 在数值上等于土体有效应力的增量 $\Delta\sigma'$, 即孔压负增量 $\Delta\mu_w$ ($\Delta\mu_w < 0$)。

$$\Delta p = \Delta\sigma' = \gamma_w (h_0 - h_x) \quad (3)$$

式中: h_0 为潜水含水层厚度, m; h_x 为降水后地下水

位高度, m; γ_w 为水的重度, kN/m^3 。

单井降水会形成一个小范围的、规则的、以降水井为中心的降水漏斗曲线,群井降水则可能会使多个降水漏斗曲线相互重叠,导致同一位置水位降深比单井降水时增加,从而使地面沉降增加。本文以兰州东方红广场地铁车站项目为依托,通过现场抽水试验等,已对降水井群进行了优化处理,其地面沉降监测数据可能略大于单井降水引起的沉降,但用来验证下文提出的基坑降水引起地表沉降的改进算法具有一定的可靠性。

1.2 漏斗曲线计算

关于降水漏斗曲线的计算主要采用解析法与数值模拟方法。黄显贵等^[10]借鉴水库水位下降时坡体内漏斗线作为基坑降水后的降水漏斗曲线方程,杨清源等^[11]采用曲线拟合方法对坑外降水曲线进行研究。由于裘布依漏斗曲线在 $x < h_0$ 区域误差较大,本文通过曲线拟合的方法对其修正,计算思路如下:

(1) 首先利用裘布依公式,分别计算降水后距离降水井轴线 $h_0, h_0 + 2, h_0 + 4, \dots, h_0 + 2n$ ($9 \leq n \leq 14$) 的水位高度。

(2) 然后用一元多项式对各点进行曲线拟合,得到拟合函数。

(3) 由于拟合多项式的系数本身存在误差,随着拟合次数的增加以及自变量的增大会导致计算出的水位高度误差增大,因此,拟合的函数仅在 $x < h_0$ 区域适用, $x > h_0$ 区域依然采用裘布依公式进行计算。最终得到修正后的漏斗曲线方程如下式所示。

当 $x < h_0$ 时,

$$y_1 = B_0 + B_1x + B_2x^2 + \dots + B_jx^j \quad (4)$$

当 $x \geq h_0$ 时,

$$y_2 = \sqrt{h_w^2 + (h_0^2 - h_w^2) \frac{\ln \frac{x}{r_w}}{\ln \frac{R}{r_w}}} \quad (5)$$

式中: B_i 为一元 j 次多项式系数, B_0 近似等于降水后井壁水位高度; h_w 为降水后井内水位高度, m; h_0 为潜水含水层厚度, m; r_w 为降水井半径, m; R 为降水影响半径, m, 一般采用经验值。

修正后的漏斗曲线如图 1 所示。图中 b 为地面至不透水层的距离, h_0 为潜水层厚度, h_s 为降水后井壁水位高度, a 为井底至不透水层的距离, Δh 为水跃值, 即:

$$\Delta h = h_s - h_w \quad (6)$$

S_2 区饱和土在附加应力下产生的位移为:

$$S_{\text{疏干}2} = \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_w(h_0 - y)}{E_i} H_i \quad (11)$$

式中: $h_0 - y$ 为水位降深值。

由疏干作用引起的土体总位移为:

$$S_{\text{疏干}} = S_{\text{疏干}0} + S_{\text{疏干}1} + S_{\text{疏干}2} = S_{\text{疏干}1} + S_{\text{疏干}2} \quad (12)$$

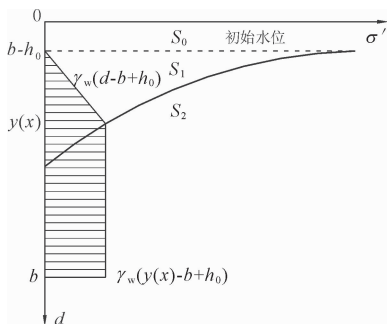


图 4 疏干作用下有效应力增量分布图

1.4 渗流引起地表沉降的计算

基坑降水过程中,由于水头差的存在会产生指向井轴且与潜水面相切的渗流力,地下水发生水平和竖直两个方向的运动,如图 5 所示,越靠近降水井,地下水竖向运动越明显,渗流力的竖向分量越大。本文仅考虑基坑降水稳定后,降水漏斗曲线以下土体在渗流力作用下引起的变形。

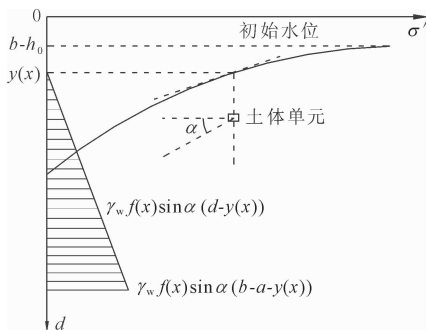


图 5 渗流作用下有效应力增量分布图

渗流力是一种体积力,其大小与水力梯度成正比,可用下式表示:

$$f = \gamma_w f(x) \quad (13)$$

式中: $f(x)$ 为水力梯度。

考虑到基坑降水过程中渗流力所产生的附加应力在水平方向存在分量,首先对漏斗曲线公式进行求导,即:

当 $x < h_0$ 时,

$$\tan \alpha = y'_1(x) = B_1 + 2B_2x + 3B_3x^2 + \cdots + fB_ix^{j-1} \quad (14)$$

当 $x \geq h_0$ 时,

$$\tan \alpha = y'_2(x) = \frac{h_0^2 - h_w^2}{2x \ln \frac{R}{r_w} \sqrt{h_w^2 + (h_0^2 - h_w^2) \frac{\ln \frac{x}{r_w}}{\ln \frac{R}{r_w}}}} \quad (15)$$

根据三角几何关系可得:

$$\sin \alpha = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}} \quad (16)$$

由渗流力引起的土体竖向位移为:

$$S_{\text{渗流}} = \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_w f(x) z' \sin \alpha}{E_i} H_i \quad (17)$$

式中: z' 为计算土中点到漏斗曲线的垂直距离。

1.5 降水井与井周土摩擦力的计算

本文借鉴原华^[5]的方法,将剪切位移法^[14]的思想引入降水期间降水井与周边土体间侧摩阻力的计算中,并假设由侧摩阻力引起的地表沉降呈漏斗状分布,如图 6 所示,在某一截面上土单元 1 在侧摩阻力的作用下发生了向上的位移,位置由 1 变为 1',并将剪应力继续向 x 方向传递,直到传到距离降水井很远的 x_n 处(x_n 为侧摩阻力的影响范围)。图 6 中 $\tau_{0,i}$ 为降水井与土体交界处的侧摩阻力, τ_i 为距离降水井轴线 x 处土体的剪应力,假设发生的剪切变形为弹性,且降水井侧摩阻力与摩擦桩剪应力遵循相同的传递规律,即:

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

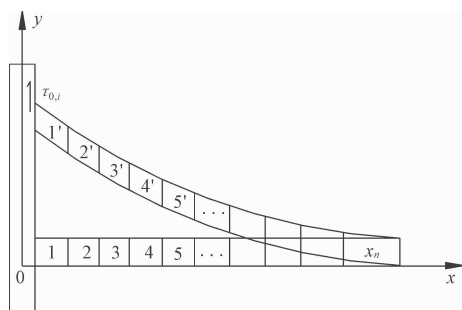


图 6 侧摩阻力在土体中的传递示意图

关于降水井与周边土摩擦力的计算,可以采用《建筑桩基技术规范》^[15] (JGJ 94—2008) 行业标准中桩土负摩阻力标准值的计算公式:

$$\tau_{0,i} = \xi_{n,i} \sigma'_{v,i} \quad (19)$$

式中: $\xi_{n,i}$ 为侧摩阻力系数,井管与井孔间的孔隙主要用砂石填充,根据规范取 0.35; $\sigma'_{v,i}$ 为土体与降水井交界处第 i 层土体的竖向有效应力增量^[15]。

侧摩阻力对第 i 层土体单元的约束位移为:

$$S_{\tau,i} = \int dS_{\tau,i} = \int_x^{x_n} \frac{\tau}{G_s} dx = \frac{r_w \tau_{0,i}}{G_s} \int_x^{x_n} \frac{dx}{x} = \frac{r_w \tau_{0,i}}{G_s} \ln \frac{x_n}{x}$$
$$S_{\tau,i} = \frac{7r_w \sigma'_{v,i}}{20G_s} \ln \frac{x_n}{x} \tag{20}$$

式中: G_s 为剪切模量。

对上式积分便可得到侧摩阻力对地表沉降的约束位移,即:

$$S_{\tau} = \int_{b-h_0}^{b-a} S_{\tau,i} dy = \frac{7r_w}{20G_s} \ln \frac{x_n}{x} \int_{b-h_0}^{b-a} \sigma'_{v,i} dy \tag{21}$$

式中: $\int_{b-h_0}^{b-a} \sigma'_{v,i} dy$ 表示降水井深度范围内土体总的附加应力,最终得:

$$S_{\tau} = \frac{7r_w \gamma_w \ln \frac{x_n}{x} \{ [0.5(h_0 + h_s) - a](h_0 - h_s) + 0.5j(x)(h_s - a)^2 \sin \alpha \}}{20G_s} \tag{22}$$

1.6 总沉降量计算

在降水井深度范围内的不同区域土体中,降水引起的地面沉降等于疏干和渗流单独作用下土体有效应力增量之和。

在 S_0 与 S_1 区域沉降量计算同疏干作用下的计算公式一致,即:

$$S_0 = 0 \tag{23}$$

$$S_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_w z}{E_i} H_i \tag{24}$$

S_2 区域的沉降量计算公式为:

$$S_2 = S_{疏干2} + S_{渗流} \tag{25}$$

疏干与渗流共同作用下引起土体总沉降量为:

$$S = S_0 + S_1 + S_2 \tag{26}$$

考虑侧摩阻力对土体位移的约束作用,地表沉降量为:

$$S = S_0 + S_1 + S_2 - S_{\tau} \tag{27}$$

2 工程实例

2.1 工程概况

车站位于金昌路与庆阳路交叉口,主体长度为 683 m,标准段宽 41 m,最大宽度 52 m,底板埋深约 17.0 m。车站采用明挖法施工,坑壁以卵石、红砂岩为主,卵石厚度变化较大,空间分布均匀,砂岩分布较均匀,坑底以红砂岩为主。

该地区含水丰富,根据勘察结果,所揭露的地下水为第四系松散层孔隙潜水。地下水位埋深为 3.10 m~5.20 m,地下水位高程 1 513.03 m~1 516.36 m。地下水主要赋存于卵石土及红砂岩中,属潜水类型。其中卵石层透性好,赋水性强,是区间的主要含水层,红砂岩富水性较弱,砂岩顶部存在局部裂隙水。潜水补给主要来自大气降水入渗、山前补给及侧向径流补给,地下水位年内变幅在 1.0 m~2.0 m 之间。

根据勘察结果,拟建工程场地在勘探深度 40 m 范围内的地层主要为第四系全新统人工填土(Q_4^{ml})、冲积(Q_4^{al})卵石及第三系古-始新统(E_{1-2})砂岩组成。各岩层详细物理及力学指标见表 1。

表 1 地层参数一览表

土层	厚度 /m	重度 /(kN·m ⁻³)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	压缩模量 /MPa	泊松比	渗透系数 /(m·d ⁻¹)
杂填土	2.0	18.0	10	15	8	0.39	10
卵石	12.5	23.3	10	45	50	0.23	30
红砂岩	>25.0	20.8	24	32	36	0.25	1

2.2 基坑支护与降水设计方案

车站围护结构采用单排钻孔咬合灌注桩,即直径 1 000 mm、间距 1 600 mm 的 C35 钢筋混凝土灌注桩与直径 1 000 mm、间距 1 600 mm 的 C15 素混凝土桩相互咬合而成,咬合深度为 20 cm,如图 7 所示。钢筋混凝土灌注桩长为 22 m,嵌固深度为 5 m,素混凝土桩长度自地面以下 6 m 至基坑底以下 2 m 作为止水帷幕,桩长为 13 m,排桩顶设置冠梁,共设三道支撑,第一道内支撑采用 1 000 mm×800 mm 的钢筋混凝土支撑直接支撑在冠梁上,支撑间距为

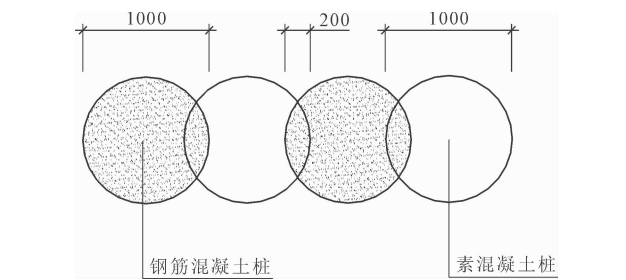


图 7 钻孔咬合桩平面布置图

10 m。第二、三道支撑采用直径 $\Phi 609$ mm,厚度 $t = 16$ mm 的钢支撑,支撑间距为 3 m。支护结构参数

见表 2。

表 2 支护结构参数				
序号	构件名称	密度 ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/GPa	泊松 比 ν
1	钢筋混凝土灌注桩	2500	31.5	0.2
2	素混凝土灌注桩	2500	22.0	0.2
3	混凝土支撑	2500	30.0	0.2
4	钢支撑	7850	200.0	0.3

本工程止水的重点是红砂岩。目前关于红砂岩渗透特性的研究国内还很少。一般认为红砂岩不具有渗透性,且不同地区红砂岩矿物成分和胶质结构的差异较大,这对红砂岩地层基坑的降水带来困扰。

结合本工程实例,为了避免降水方案不合理造成工程事故以及一些不必要的损失,针对工程所在地红砂岩的特殊性,进行了现场原位试验与室内试验研究,分析其渗透特性,试验结果表明,现场红砂岩的透水等级为中等透水,但渗透系数相对较低,并且具有弱胶结、强风化特性。

结合对红砂岩渗透系数的试验研究,降水方案采取坑外降水与坑内降水相结合的方法。

坑外距离咬合桩外 3.0 m 设置降水井,主要是降低卵石层中水,以减小咬合桩侧向水头压力,结合咬合桩的止水特性,可有效避免坑外的砂岩流入坑

内,引起地面沉降,同时保证止水效果。

基坑内采用集水明排系统,疏干卵石层中水流;在砂岩层,为防止出现裂隙水降深不彻底而造成开挖面软化、泥泞等,采用真空泵在坑内小厚度小范围降水。

降水井深度按穿透卵石层进入砂岩层 3 m 考虑,钻孔直径 600 mm,降水井管径 300 mm,布设 65 眼降水井,均间距约为 22 m~24 m。

2.3 监测方案

基坑开挖前 15 d 进行坑外卵石层降水,将水位降低至卵石层以下 0.5 m,即井内水位降深为 11 m。为保证基坑降水的安全顺利进行,同时为了对修正后的漏斗曲线进行验证,在基坑降水过程中需要对地下水位与井周位移进行监测。在降水井 JSJ48 附近布置 3 个观测井,直径均为 150 mm,距离降水井的距离分别为 1.5 m、4.5 m、10.5 m,均垂直于基坑外边线。为了避免观测井对地表沉降的影响,在降水井 JSJ16 附近布置 6 个地表沉降监测点,距降水井距离分别为 1 m、3 m、6 m、10 m、20 m、30 m,均垂直于基坑外边线。监测平面图如图 8 所示。

2.4 漏斗曲线计算结果

本文为了保守计算,取 10 组数据($n=9$)进行曲线拟合,发现一元七次多项式拟合时调整拟合优度最大,拟合的最好,方程系数如表 3 所示。

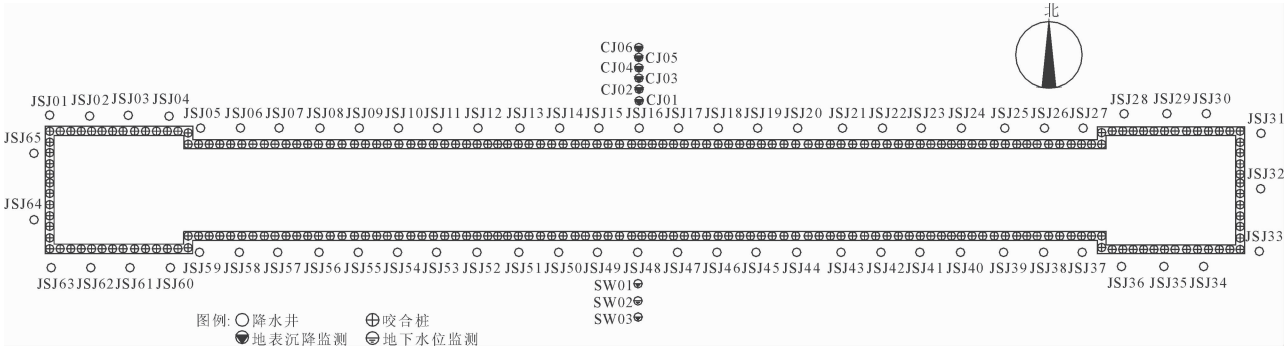


图 8 监测点平面布置图

表 3 拟合曲线方程系数

系数	B_0	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	B_7
数值	12.22189	0.38039	-0.02299	9.94024×10^{-4}	-2.85564×10^{-5}	5.19262×10^{-7}	-5.41341×10^{-9}	2.46681×10^{-11}

关于水跃的估算,埃伦伯格^[9]曾经通过砂槽试验后得出,井壁最大水位降低值等于外边界处含水层厚度 h_0 的一半,即:

$$s_{s_{\max}} = \frac{1}{2}h_0$$

(28)

此外,博尔顿^[9]曾根据松弛法和试验法推出计

算水跃值的近似式,即:

当 $\frac{r_w}{h_0} < 0.1$ 时,

$$\Delta h \approx (h_0 - h_w) - \frac{3.75Q}{2\pi Kh_0}$$

(29)

式中: Q 为涌水量, m^3/d ; K 为渗透系数, m/d 。

当 $\frac{r_w}{h_0} \approx 0.25$ 时,

$$\Delta h \approx (h_0 - h_w) - \frac{3.5Q}{2\pi Kh_0} \tag{30}$$

通过式(28)一式(30) 式可得出:

$$s_{s_{\max}} = \frac{1}{2}h_0 = h_0 - h_s = 9 \text{ m}$$
$$\Delta h \approx (h_0 - h_w) - \frac{3.75Q}{2\pi Kh_0} \approx 8 \text{ m}$$

整理可得 $h_0 - s_{s_{\max}} = 9 < B_0 < h_w + \Delta h = 15$, 表明此方法合理可行。

为了进一步对漏斗曲线进行验证,通过裘布依公式、修正的漏斗曲线公式计算值以及实测水位降深值三者进行对比,如图 9 所示。

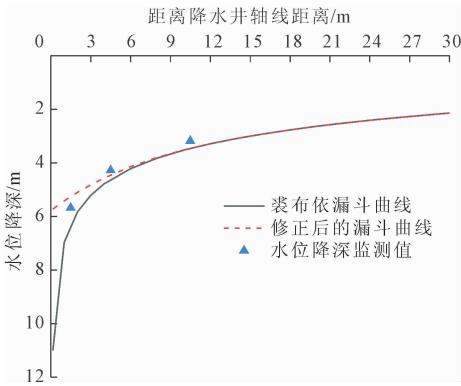


图 9 漏斗曲线计算值与监测值对比

从图 9 可以看出,裘布依漏斗曲线在距离降水井附近特别是在井壁处,与实测值相差较大,实测结果更偏向于修正后的漏斗曲线,误差大约在 1 m 以内,进一步表明此方法合理可行。

2.5 地表沉降计算结果

为对比验证计算结果,采用有限差分软件 FLAC3D 对基坑降水过程进行模拟,基坑长度很长,可按无限长考虑,考虑到工作量以及计算机硬件等因素,本节选择过宽度中心线的一个断面进行计算^[16-17],模型高度取 50 m,长度取 100 m,厚度取 1 m,降水井采用实体单元进行模拟,咬合桩简化成厚度为 800 mm 的地下连续墙^[18],设置为不透水模型,降水井与土体之间通过设置接触面来模拟侧摩阻力对土体位移的影响,土体采用 Mohr-Coulomb 本构模型,地连墙采用 elastic 模型,模型力学边界条件上表面为自由面,侧面与底面采用滑动铰支座限制其法向位移,流体边界条件模型侧面与底面设置为不透水边界,抽水井四周设置为透水边界,通过控制降水井孔压来达到降水效果。地层参数及支护结构参数

分别见表 1 和表 2,模型如图 10 所示。

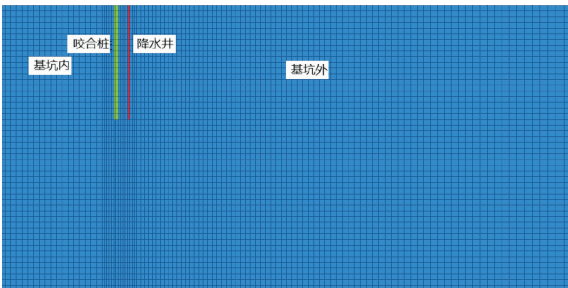


图 10 有限元模型

降水后基坑周边地表竖向位移云图如图 11 所示,从图 11 可以看出,基坑降水后,坑外地表沉降呈抛物线形状,最大位移并不在降水井与土体交界处,而是距离降水井一定距离,这是由于侧摩阻力对土体的约束作用造成的。

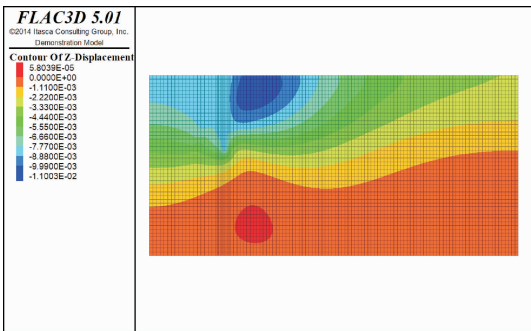


图 11 降水后地面沉降云图

将基坑外地表竖向位移提取出来,与实测值、理论值进行对比分析,如图 12 所示。

从图 12 可以看出,当 $x < h_0$ 时(h_0 为 18 m),疏干作用下的计算值始终小于考虑渗流力作用下的计算值,而当 $x > h_0$ 时,两者计算的地面沉降曲线基本重合,这是因为在 $x > h_0$ 区域,水流比较平缓,可近似认为水流为水平径向流,所以渗流力的影响很小,而在 $x < h_0$ 区域,水流自由面坡度相对较大,所以渗流力的影响相对较大,因此进行理论计算时,为了便于计算,可忽略 $x > h_0$ 区域渗流力的影响。两者的变化趋势及数值大小均与实测值存在一定的差异,疏干与渗流作用下的计算值最大位移出现在降水井井壁处,最大值在 20 mm ~ 22 mm,实测值最大位移出现在距离降水井一定距离,大约在 3 m 处,且位移最大值约为 14 mm。考虑侧摩阻力作用下沉降曲线与实测值沉降曲线更加接近,变化趋势均为先下凹后上凸,且误差在 23% 以内。总体上考虑侧摩阻力作用下的沉降曲线、实测值沉降曲线与数值模拟沉

降曲线的变化趋势大致相同,但数值上仍然存在一定差异,实测值大于模拟值,主要因为在模拟过程中没有考虑实际工程的时空效应等因素,理论计算值大于实测值,偏于保守,但比规范算法的结果(疏干作用下的计算结果)更加接近实测值,具有一定的研究价值。

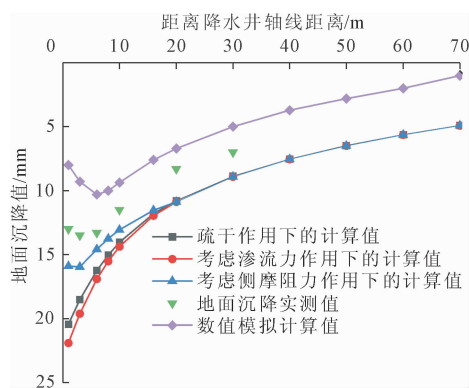


图 12 地面沉降计算值与监测值对比

3 结 论

(1) 本文提出一种基坑降水引起地表沉降的改进算法,首先通过曲线拟合对裘布依漏斗曲线公式区域进行修正,得到修正后的漏斗曲线,通过裘布依漏斗曲线、修正后的漏斗曲线以及水位降深实测值三者进行对比分析得出,实测结果更偏向于修正后的漏斗曲线,误差在 9% 以内,表明修正后的漏斗曲线具有一定的可靠性。然后采用分层总和法对疏干和渗流力作用引起的地表沉降进行计算并叠加,同时考虑到降水井与土体间的侧摩阻力对土体变形的约束作用,最后得到基坑降水引起的地表最终沉降,通过与实测值和模拟值对比分析,得出三者沉降曲线的变化趋势基本一致,均为先下凹后上凸,理论值大于实测值,偏于保守,误差在 23% 以内,具有一定的工程实用价值。

(2) 在 $x < h_0$ 区域,水流自由面坡度相对较大,渗流力的影响相对较大,在 $x > h_0$ 区域,水流比较平缓,可近似认为水流为水平径向流,渗流力的影响很小,便于计算,可忽略 $x > h_0$ 区域渗流力的影响。

(3) 曲线拟合多项式的选取以调整拟合优度的大小为标准。经反复试算,确定 n 的大致取值范围为: $9 \leq n \leq 14$ 。且在此范围内,一元七次多项式拟合时调整拟合优度已达到最大,可作为参考。

参考文献:

- [1] 李 庚. 兰州红砂岩地层地铁站深基坑降水开挖引起的变形规律研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2019.
- [2] 张建明. 兰州软土深基坑降水引起的地表沉降计算方法研究[J]. 铁道建筑技术,2024(11):88-92.
- [3] 于澜涛,徐光黎. 基坑降水引起地表沉降计算系数 M_s 的修正[J]. 科学技术与工程,2022,22(2):700-706.
- [4] 姚文龙,熊习旺,杨果林,等. 基于随机介质理论基坑降水引起地表沉降计算[J]. 科学技术与工程,2020,20(6):2417-2420.
- [5] 原 华,张庆贺,张建伟. 侧摩阻力约束下降水引起地面沉降估算方法[J]. 上海交通大学学报,2013,47(8):1329-1334.
- [6] 韩文君,赵宇豪,闫 鑫,等. 常州地区基坑降水引起的地面沉降计算方法[J]. 城市轨道交通研究,2023,26(1):55-59,64.
- [7] 张志红,郭晏辰,凡琪辉,等. 悬挂式止水帷幕基坑降水引起坑外地面沉降计算方法[J]. 东北大学学报(自然科学版),2021,42(9):1329-1334.
- [8] 王晓华,杨 光,贾文彪,等. 考虑土体水平变形下的基坑降水诱发的地面沉降简化计算[J]. 施工技术(中英文),2022,51(10):65-71.
- [9] 陈崇希,林 敏. 地下水动力学[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1999.
- [10] 黄显贵,陈 梁,刘御刚,等. 基坑降水引起的地基附加应力及沉降简化计算[J]. 地下空间与工程学报,2017,13(3):746-752.
- [11] 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.
- [12] 王小生,李 庚,朱彦鹏,等. 最小二乘法在基坑侧建建筑物沉降监测中的应用[J]. 科学技术与工程,2019,19(27):283-288.
- [13] 李自林,汪 涛. 地铁车站基坑开挖引起的建筑物沉降研究[J]. 河北工业大学学报,2011,40(5):89-93.
- [14] 蒋建平,史旦达,刘文白,等. 桩基工程[M]. 上海:上海交通大学出版社,2016.
- [15] 建筑桩基技术规范:JGJ 94—2008[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [16] 张晓婷. 基坑降水对支护结构及土体变形影响因素的数值分析[D]. 太原:太原理工大学,2013.
- [17] 郭建玮. 考虑流固耦合作用的深基坑降水工程环境影响研究[D]. 太原:太原理工大学,2017.
- [18] 王 涛,韩 焯,赵先宇,等. FLAC 3D 数值模拟方法及工程应用——深入剖析 FLAC 3D 5.0[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.