

基坑降水引起的地基附加应力及沉降简化计算^{*}

黄显贵,陈梁,刘御刚,黄辉

(北京城建设计发展集团股份有限公司武汉分公司,武汉 430075)

摘要:探讨了基坑降水导致周围地基沉降的机理,通过借鉴水库水位下降时的水面曲线计算公式,并简化和分解由降水导致的附加荷载后,推导出一套计算基坑降水引起的地基附加应力和地表沉降的理论计算方法。本方法可以综合考虑水位降深和水面曲线形状等因素的影响,计算结果能比较准确的反映水面曲线以下附加应力的衰减效应,相比传统计算方法更具合理性。笔者利用本理论计算方法对某基坑工程降水实例进行了计算,通过对比分析本方法计算结果及数值模拟和实测值后发现,本方法计算得到的地基附加应力和地表沉降分布规律与数值模拟和实测值基本吻合,误差范围均在15%以内,验证了本计算模型的有效性。

关键词: 基坑降水;水面曲线;附加应力;沉降

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2017)03-0746-07

Simplified Calculation of Ground Settlement and Additional Stress Caused by Foundation Pit Dewatering

Huang Xiangui, Chen Liang, Liu Yugang, Huan Hui

(Beijing Urban Construction Design & Development Group Co. Ltd., Limited Wuhan Branch, Wuhan 430075, P. R. China)

Abstract: The mechanism of additional stress and settlement caused by dewatering in pit engineering was studied. Based on the phreatic surface calculation theory of reservoir, a simplified method for computing additional stress and ground settlement near pit was proposed through simplifying and decomposing the additional load caused by dewatering. In this method, groundwater drawdown and the shape of phreatic surface were considered. The attenuation effect of the additional stress under the phreatic surface was reflected in the calculated results. In comparison with traditional calculation method, this novel method is more effective and rational. Instance calculates was performed in 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. Analysis results suggested that the additional stress and settlement distribution calculated by this method were basically within error limit of 15%, which validated the effectiveness of the calculation model.

Keywords: foundation pit dewatering; phreatic surface; additional stress; settlement

0 引言

近年来,随着城市高层建筑和地铁的建设,深基坑工程已越来越多。在地下水较为丰富的城市,

绝大多数基坑的开挖必然受到地下水的影响。为防止渗透破坏并减小围护结构侧压力,基坑开挖往往采取一定的降水措施。

基坑降水对周围建筑物沉降的影响问题已经

^{*} 收稿日期:2016-11-20(修改稿)

作者简介:黄显贵(1976-),男,湖北兴山人,工学硕士,高级工程师,主要从事城市轨道交通设计工作。

E-mai:hbhxg@126.com

通讯作者:刘御刚(1988-),男,湖南岳阳人,工学硕士,主要从事城市轨道交通设计工作。

E-mai:liuyugangcsu@163.com

引起了广泛的关注。然而,由基坑降水导致的沉降计算方法目前尚不成熟,现有的计算理论不能满足工程应用所需的简便性及可靠性的双重要求^[1-3]。

本文将从基坑降水导致地表沉降的机理出发,分析基坑降水引起地基沉降的发展规律,试图得到一套适用于潜水层、成层土地质情况下,由于基坑降水引起的附加应力和地表沉降的简化计算方法。

1 沉降计算方法

1.1 计算思路

当含水地层基坑开挖时,基坑内地下水需降至基坑底以下。在降水影响范围内,地下水位也相应降低,形成新的水面曲线。在水位下降范围内,由于土体的静水孔压消失,这部分孔压将转为地基土粒间的有效应力。这样,地基土相对于原应力状态就产生了新的附加应力。基于基坑降水与水库水位下降过程的相似性,借鉴水库水位下降时的水面曲线计算公式得到基坑降水形成的水面曲线,再利用弹性半无限体内的应力分布公式计算得到地基的附加应力分布情况,进而计算得到地基的沉降值。

1.2 水面曲线计算

假设在整个基坑开挖过程中不抽取地下水,则基坑内水位始终与地下水位齐平,然后按照基坑开挖速度抽水使得水面逐步下降至基坑底,此过程与河流或者水库水位下降的情况基本一致。因此,在地下水量丰富的地层进行基坑开挖时,其降水形成的水面曲线可以考虑借鉴水库水位下降时的水面曲线计算方法。根据文献[4-5],当水库水位下降时,若原水库水位与地下水位持平,则水位下降后距离基坑壁为 x 处的水头高度 $h_{x,t}$ 可按式(1)计算:

$$h_{x,t} = h_{0,0} - (h_{0,0} - h_{0,t})F(\lambda) \tag{1}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{x^2 \mu}{4K h_m t}} \tag{2}$$

式中: $h_{x,0}$ 为抽水前的地下水位(从隔水层顶面起算),m; $h_{0,t}$ 为抽水后基坑处水位(从隔水层顶面起算),m; $F(\lambda)$ 为地下水位的影响系数,可按式(4)取值; x 为计算点到基坑侧壁距离,m; μ 为重力给水度(土壤中的水在重力作用下能释放出来的水体积与土的总体积之比),一般按照试验来确定,无试验资料时可参考式(3)取值; t 为从开始抽水到水位下降至基坑底的时间,d; K 为渗透系数,m/d; h_m 为含水层平均厚度,m。

对于 h_m ,可先假定降水影响距离为 L ,并简化水面曲线为抛物线,通过积分求得水面曲线以下含水层面积后,再通过等面积法求得。计算公式参见式(5)。

$$\mu = \begin{cases} 1.137n(0.000\ 117\ 5)^{g(x)} \\ \text{其中:} g(x) = 0.067^{(3.063 + \lg K)} \end{cases} \tag{3}$$

$$F(\lambda) = \begin{cases} 0.109\ 1\lambda^4 - 0.750\ 1\lambda^3 + 1.928\ 3\lambda^2 \\ -2.231\ 9\lambda + 1 & (0 < \lambda < 2) \\ 0 & (\lambda \geq 2) \end{cases} \tag{4}$$

$$h_m = h_{0,t} + \frac{2(h_{0,0} - h_{0,t})}{3} \tag{5}$$

式(3)中 n 为孔隙率,公式(1)~(5)的计算图例如图1所示。

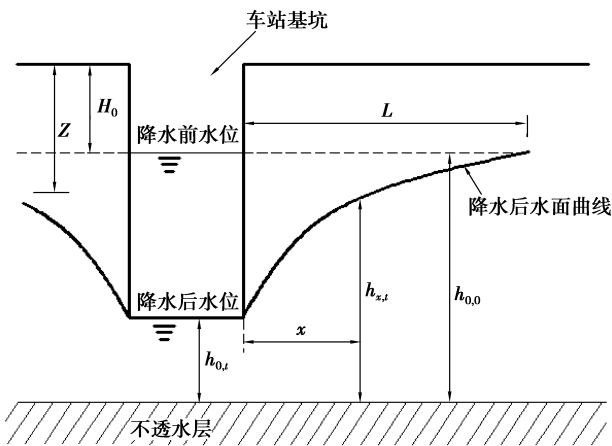


图1 基坑水位下降时水面曲线计算图例

根据参考文献[6],对于多层土,其水平方向的等效渗透系数可按式(6)计算得到:

$$K_x = \frac{1}{H}(\sum K_i H_i) \tag{6}$$

式中: K_x 为水平方向的等效渗透系数,m/d; H_i 为第 i 层土的厚度,m; H 为土层总厚度,m。

1.3 计算地基的附加应力

根据有效应力原理,有如下表达式:

$$\sigma' = p - p_w \tag{7}$$

式中: p 为土体的总应力,kPa; p_w 为孔隙水压力,kPa; σ' 为土体有效应力,kPa。

如图1所示,未排水前,深度为 Z 处土体的总应力为上覆土体的自重应力,即:

$$p = H_0 \gamma_1 + (Z - H_0) \gamma_{sat} \tag{8}$$

式中: γ_1 为地下水位以上土体天然重度,kN/m³; γ_{sat} 为地下水位以下土的饱和重度,kN/m³。

深度为 Z 处的孔隙水压力为:

$$p_w = (Z - H_0) \gamma_w \tag{9}$$

式中： γ_w 为水的重度， kN/m^3 。

所以，联立式(7)~(9)，得到 Z 处的有效应力表达式为：

$$\sigma' = p - p_w = H_0 \gamma_1 + (Z - H_0) \cdot (\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w) \tag{10}$$

深度 Z 处的地下水被疏干后，疏干范围内的土体重度应该取其天然重度 γ 进行计算，此处近似认为 $\gamma = \gamma_{\text{sat}}$ ，则降水后深度 Z 处的总应力相比降水前不变。由于降水后 Z 处的孔压消散为零，则总应力与有效应力相等，得到式(8)即降水后深度 Z 处的有效应力表达式。

降水前后土体的有效应力增量 Δp 可通过式(8)和(10)计算得到：

$$\Delta p = (8) - (10) = \sigma'_1 - \sigma' = (Z - H_0) \gamma_w \tag{11}$$

式(11)与《基坑工程支护技术规程》^[7]推荐的计算公式一致。但在公式的推导过程中，认为降水范围内土体疏水后的重度仍等于饱和重度，使得计算得到的附加应力相比实际值偏大。根据工程经验可知，对于一般土体，其误差范围是可接受的^[8]。

根据式(11)可以看出，地下水疏干范围内的附加应力即为消散的孔隙水压力，其大小随水位降水深度线性增加，可等效为均布体力荷载，其荷载集度即水的重度。

基坑降水是局部的水位下降，具有一定的影响深度和范围。至降水影响深度以下时，附加应力趋于零，降水前后土体的有效应力相等。从而得到降水后土中附加应力随深度的分布情况大致如图2所示^[9-10]。

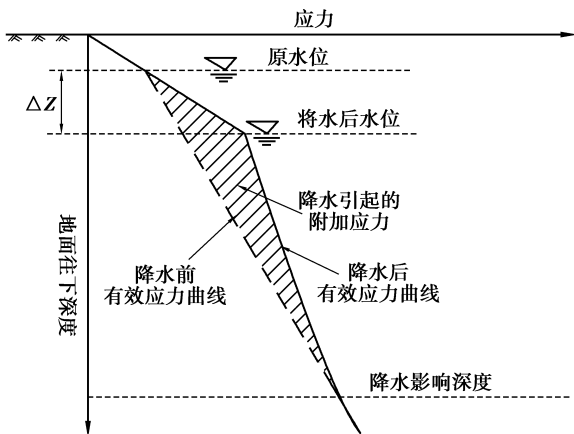


图 2 基坑降水前后土中应力分布情况

Fig.2 Stress distribution in soil before and after dewatering

在图2中，阴影部分即为降水后土中的附加应力。对于图中 Δz 范围内的附加应力可按式(11)计算得到。而水面以下的附加应力由于水面曲线的不规则性，目前并没有一套简单可行的理论计算方法，因此，本文将通过简化水面曲线，试图得到水面曲线以下附加应力的简化计算方法。

为便于理论计算，本文对水面曲线作出如图3所示的简化。在图3中，水面曲线被简化为由3条直线段($L_1 \sim L_3$)，组成的折线。为了保证计算的精度，水面曲线的简化必须满足以下要求：

- (1) 折线必须通过水面曲线与基坑侧壁的交点1和水面曲线与原水位线交点2。
- (2) 中间折点的选择应该尽量使得简化的水面曲线与原水面曲线贴合
- (3) 如果计算精度要求较高，可以选用4条或者更多的直线段组成的折线来简化水面曲线。

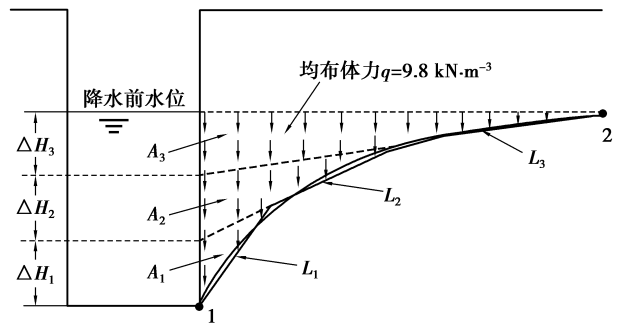


图 3 水面曲线简化方法

Fig.3 Simplified method for saturation curve

由式(11)可知，水面曲线以上的均布体力荷载集度 $q = 9.8 \text{ kN/m}^3$ 。为确定地基中的附加应力，利用图3中的直线段($L_1 \sim L_3$)及其延长线将均布体力作用区域划分为3个部分($A_1 \sim A_3$)，使得每部分都为三角形。

把 $A_1 \sim A_3$ 范围的均布体力简化为作用在平面上的带状三角形分布荷载。为保证计算精度，荷载简化原则如下：

- (1) 简化荷载的作用范围为相应均布体力作用区域在水平面上的投影。
- (2) 简化荷载作用面深度为相应均布体力作用区域的形心深度。
- (3) 为使简化荷载的合力大小与原均布体力一致，简化荷载的最大荷载集度按下式计算得到：

$$q_i = \Delta H_i \cdot q \tag{12}$$

式中： q 和 ΔH_i 参照图3确定。荷载简化结果如图4所示。

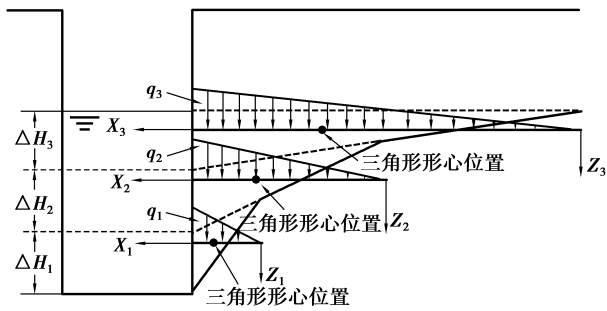


图4 附加荷载的简化方法

Fig.4 Simplified method for additional load

在图4中, $A_1\sim A_3$ 范围内的均布荷载被分别简化为作用于平面的带状三角形分布荷载 $q_1\sim q_3$ 。根据文献[6],在带状三角形分布荷载作用下,弹性半无限体内的应力分布可按如下公式计算:

$$\sigma_z = \frac{q}{\pi} \left[\frac{x}{b} \left[\arctan \frac{x}{z} - \arctan \frac{x-b}{z} \right] - \frac{z(x-b)}{(x-b)^2 + z^2} \right] \quad (13)$$

式中: x,z 为图5所示坐标系(X_1-Z_1)~(X_3-Z_3)中的坐标值; b 为荷载分布宽度; q 为带状三角形分布荷载最大荷载集度。

由此,得到地基中任一点(x,z)的附加应力计算步骤为:

- (1)确定计算点在相应荷载 q_i 所对应坐标系下的坐标值(x_i,z_i)。
- (2)把(x_i,z_i)代入式(13)中,计算得到由 q_i 产生的附加应力 σ_{zi} 。
- (3)把所有由分荷载产生的附加应力相加即得到地基中该点的实际附加应力 $\sum \sigma_{zi}$ 。

1.4 计算地基沉降

地基沉降可以通过计算每一个分荷载 q_i 作用下地基产生的沉降值 S_i ,再叠加得到最终的地基沉降 $\sum S_i$ 。

由分荷载 q_i 引起的地基沉降计算方法,可以参照《铁路桥涵地基基础设计规范》^[11]中推荐的分层总法和。地面以下第 i 层土的压缩量计算公式为:

$$S_i = \varphi_s \cdot \frac{\Delta \sigma_{zi}}{E_{si}} \cdot \Delta z_i \quad (14)$$

式中: Δz_i 为第 i 层土的厚度,可根据 q_i 的荷载分布宽度,参照规范选取,m; E_{si} 为第 i 层土的压缩模量,MPa; $\Delta \sigma_{zi}$ 为第 i 层土的平均附加应力,kPa; φ_s 为地基沉降经验系数,根据地区降水沉降计算经验确定。

2 计算实例

下面将根据以上方法对某基坑降水的工程实例进行计算,并对比分析 Abaqus 数值模拟结果和现场实测值,以验证本文计算方法的有效性。

2.1 工程概况

某基坑开挖深度为15 m,围护结构为直径800 mm的钻孔灌注桩加三道内支撑,由于基坑周边无敏感性建筑且无承压地下水,基坑不设止水帷幕。地下水位于地面以下2 m,不透水层(黏土)位于基坑底以下25 m,采用坑内管井降水,以保持坑内水位位于基坑底以下0.5 m。各层土的物理力学性质及分布如表1所示。

表1 地基土计算参数

Table 1 Calculation parameters for foundation soil					
土层名称	厚度 /m	压缩模量 /MPa	重度 /(kN·m ⁻³)	渗透系数 /(cm·s ⁻¹)	孔隙比
杂填土	2	5	17	3×10 ⁻⁶	0.7
粉土	5	10	19	4×10 ⁻⁵	0.7
黏质粉土	33	14	20	3×10 ⁻⁵	0.6
黏土	13	17	20	1.5×10 ⁻⁷	0.6

开挖降水过程中,在基坑外设置水位和地表沉降观测点。计算断面选取及断面附近测点布置如图5所示。

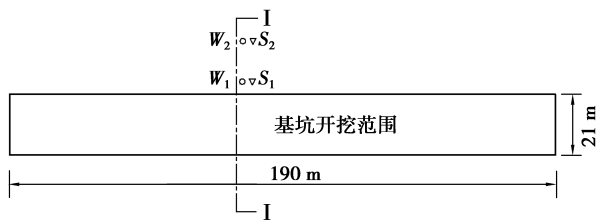


图5 基坑平面图

Fig.5 Plan of foundation pit

施工3个月,测得测点1水位降深约10.5 m,测点2水位降深约7.5 m。

2.2 水面曲线计算结果

根据以上工程概况,得到计算参数 $h_{0,0}=38$ m, $h_{0,i}=25$ m;根据式(6)得到等效渗透系数为 2.71×10^{-3} m/d;根据式(3)得到给水度 $\mu=0.364$;根据式(5)求得含水层平均厚度为 $h_m=33.7$ m,地下水位以下施工工期为3个月,即 $t=90$ d。根据以上参数,利用式(1)即可得到水面曲线。

为对比验证计算结果,利用 Abaqus 有限元分

析软件对基坑降水过程进行数值建模,模型高度为 50 m、长度为 100 m,土体采用摩尔-库伦本构模型。为模拟孔隙水,单元类型采用“孔隙流体-应力耦合单元”。

为排除基坑开挖对地表沉降的叠加效应,分析过程中约束基坑侧壁的水平位移。通过设定基坑壁及坑底的孔隙水压来模拟基坑内水位在 90 d 内匀速降至坑底的边界条件。

开挖完成后,通过孔压反算水头高度,得到水面曲线。Abaqus 模拟得到的孔压分布如图 6 所示。

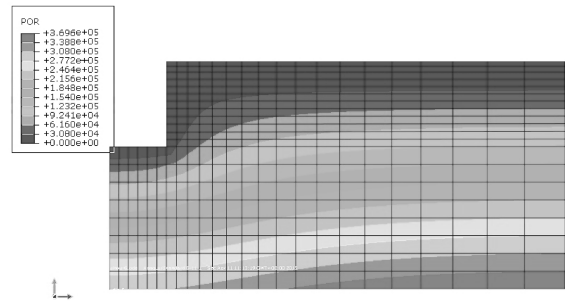


图 6 Abaqus 模拟施工 90 d 后的孔压分布图

Fig.6 Pore-pressure distribution calculated by Abaqus

对式(1)计算结果、数值模拟得到的水面曲线以及观测点的实测水面降深进行对比,结果如图 7 所示。

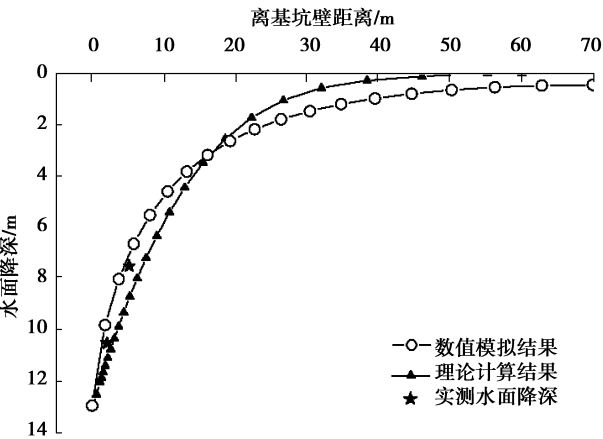


图 7 降水后的水面曲线

Fig.7 Phreatic surface after dewatering

从图 7 可看出,两种计算方法得到的水面曲线基本吻合,水位差大约在 1 m 以内,实测结果更偏向数值模拟。对于工程应用,误差在可接受范围内。

2.3 附加应力计算结果

对理论计算得到的水面曲线按第 1.3 节的方法进行简化处理,把水面曲线简化为 4 段直线,结果如图 8 所示。

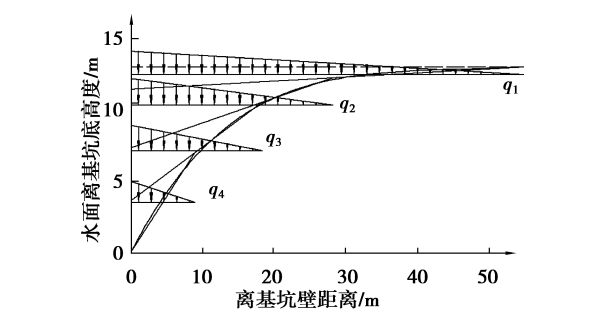


图 8 附加应力计算简图

Fig.8 Calculation sketch of additional stress

在图 8 中,简化水面曲线与计算水面曲线基本重合。简化后,降水范围内的均布体力荷载被简化为作用于平面的带状三角形分布荷载 $q_1 \sim q_4$,各荷载参数如表 3 所示。

表 3 简化荷载计算参数			
Table 3 Simplified load calculation parameters			
荷载	分布宽度/m	最大集度/kPa	作用面深度/m
q_1	55	15.6	2.5
q_2	28.5	40.8	4.6
q_3	18.5	37.5	7.8
q_4	9	36.1	11.5

根据式(13)计算得到各分荷载($q_1 \sim q_4$)在离基坑距离为 5 m 处产生的附加应力,把各附加应力叠加得到总的附加应力,结果如图 9 所示。

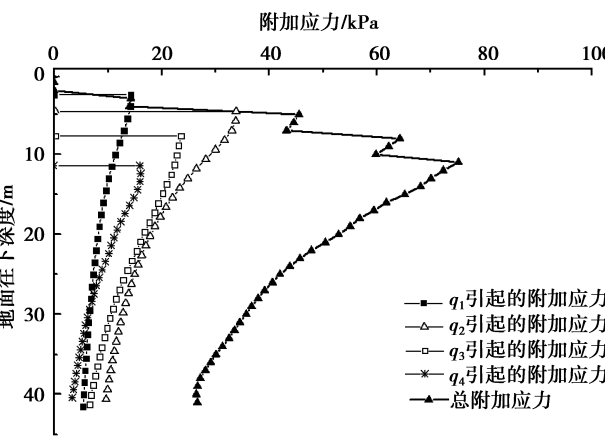


图 9 距基坑壁 5 m 处的附加应力分布

Fig.9 Additional stress distribution 5 m away from pit

把以上附加应力计算结果与数值模拟计算得到的附加应力作对比,结果如图 10 所示。

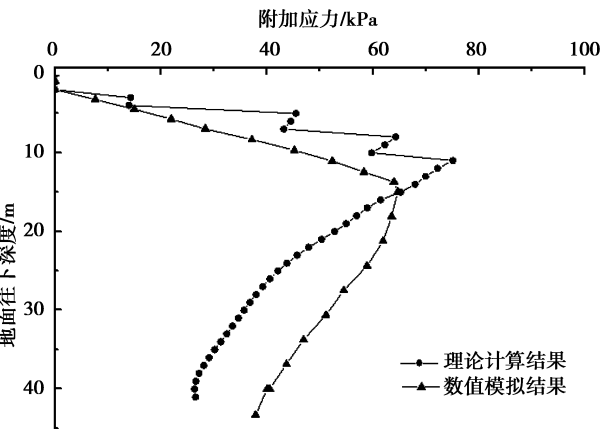


图 10 附加应力计算结果对比

Fig.10 Comparison of calculated additional stress

从图 10 可以看到：

- (1) 数值模拟得到的附加应力分布曲线与理论计算结果规律一致。理论计算得到的应力面积相对数值模拟结果小 12.4%。
- (2) 由于理论计算过程中把水面曲线以上的均布体力荷载分割为为 4 个作用于平面的带状三角形分布荷载,因此,在水位下降范围内附加应力出现 4 个锯齿状跳跃。此现象可以通过进一步细分降水范围内的附加体力荷载得到改善。
- (3) 理论计算得到的水面线以上附加应力相对数值模拟偏大,可能的原因包括式 (11) 中把降水后土体的天然重度等效为饱和重度。
- (4) 由于数值模拟得到的水面降深影响范围相对于理论计算偏大,因此,在水面线以下应力衰减比理论计算结果更慢,其结果是合理的。

2.4 沉降计算结果

利用式(14)计算得到离基坑壁 5 m 处地基沉降随深度的分布如图 11 所示(沉降经验系数取值 0.4)。

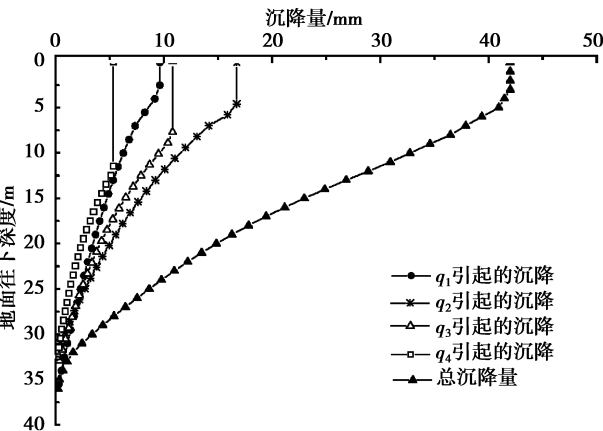


图 11 离基坑壁 5 m 处地基沉降随深度分布

Fig.11 Settlement along the depth 5 m away from pit side

从图 11 可看出,离基坑壁 5 m 处的地面沉降量约为 42 mm,压缩层厚度约为 38 m。

通过以上方法,计算得到离基坑 2 m、5 m、10 m……60 m、70 m 等地的地面沉降值,并与实测值结果进行对比,结果如图 12 所示。

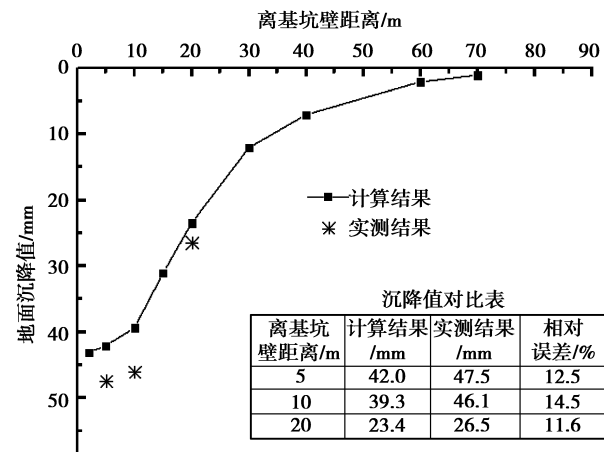


图 12 地面沉降计算结果对比

Fig.12 Results of calculated ground settlement

从图 12 可以看出：

- (1) 理论计算的地面沉降分布规律与实测结果规律一致,3 个测点的相对误差分别为 12.5%、14.5%、11.6%。
- (2) 理论计算得到的地表沉降相对实测结果均偏小,由于实测地面沉降为降水和围护结构变形共同作用的结果,因此,排除围护结构变形因素后的实际误差将更小。

3 结论

本文研究了基坑降水导致地基沉降的机理,建立了一套基坑降水导致地面沉降的简化计算方法。利用该方法对某基坑工程实例进行了计算,并对比数值模拟和实测结果,得出以下结论：

- (1) 通过本方法计算由降水引起的附加应力,可以综合考虑水位降深和水面曲线形状等因素的影响,计算结果能反映出水面曲线以下附加应力的衰减效应,相比传统计算方法更具合理性。
- (2) 通过将本方法计算得到的附加应力和地表沉降值分别与数值模拟结果及地表沉降实测值对比,结果发现,误差均在 15% 以内,一定程度上证明了本计算方法的可靠性。
- (3) 计算结果表明,水面曲线对地表沉降的分布影响显著。在地下水丰富的地层进行基坑降水时,借鉴水库水位下降形成的水面曲线公式具有一

定的合理性,但实际工程中应根据抽水试验进一步修正水面曲线。

(4)本理论计算方法需进一步研究的方向如下:①由于地下水渗流方向以水平为主,以上理论计算方法未考虑地下水渗流作用导致的应力叠加效应。②公式(14)中的沉降计算经验系数具有一定的随机性,后续可在大量实测结果基础上参照地区经验进一步深化确定。③由于降水引起的附加荷载被分解为带状三角形分布荷载,因此,本方法仅适用于离基坑端头距离较远的断面(要求离基坑端头距离大于1倍基坑深度)。后续可通过分解附加荷载为矩形面积上的线性分布荷载,以扩大本方法的适用范围。

参考文献(References)

- [1] 张云,薛禹群.抽水地面沉降数学模型的研究现状与展望[J].中国地质灾害与防治学报,2002,13(2):1-6.(Zhang Yun, Xue Yuqun. Present situation and prospect on the mathematical model of land subsidence due to pumping[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2002,13(2):1-6.(in Chinese))
- [2] 田志强,陈锐,王子哲,等.深基坑开挖及降水引起的邻近浅基础沉降分析[J].地下空间与工程学报,2012,8(增1):1483-1490.(Tian Zhiqiang, Chen Rui, Wang Zizhe, et al. Settlement of Shallow Foundation Induced by Adjacent Deep Excavation and Dewatering[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012,8(Supp.1):1483-1490.(in Chinese))
- [3] 周念清,魏诚寅,娄荣祥,等.上海地铁M4线修复的深基坑降水应急预案体系[J].湖南大学学报(自然科学版),2012,39(12):25-31.(Zhou Nianqing, Wei Chengyan, Lou Rongxiang, et al. Emergency warning system of deep foundation pit dewatering for Shanghai Metro Line No. 4 reconstruction project[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2012, 39(12): 25-31.(in Chinese))
- [4] 郑颖人,时卫民,孔位学.库水位下降时渗透力及地下水水面线的计算[J].岩石力学与工程学报,2004,23(18):3203-3210.(Zheng Yingren, Shi Weimin, Kong Weixue. Calculation of seepage forces and phreatic surface under drawdown conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(18): 3203-3210.(in Chinese))
- [5] 谢新宇,杨相如,刘开富,等.坡前水位骤变情况下边坡水面线的求解[A]//第三届全国岩土与工程学术大会论文集[C].成都,2009:323-327.(Xie Xinyu, Yang Xiangru, Liu Kaifu. Solution of the seepage line incase of water level sudden change before slope[A]//Proceedings of the Third National Geotechnical and Engineering Symposium[C]. China, 2009: 323-327.(in Chinese))
- [6] 刘宇成.土力学[M].北京:中国铁道出版社,2005.(Liu Yucheng. Soil mechanics [M]. Beijing: China Railway Press, 2005.(in Chinese))
- [7] 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(JGJ 120—2012.2012)[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations (JGJ 120—2012) [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.(in Chinese))
- [8] 阳军生,刘宝琛.抽水地面沉降预计的随机介质模型[J].水文地质工程地质,1999(5):11-13.(Yang Junsheng, Liu Baochen. Stochastic medium model in settlement expect in case of pumping[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1999 (5): 11-13. (in Chinese))
- [9] 施小清,薛禹群.常州地区含水层系统土层压缩变形特征研究[J].水文地质工程地质,2006,33(3):1-6.(Shi Xiaoqing, Xue Yuqun. Research on compressive deformation properties of Changzhou aquifer [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33(3): 1-6. (in Chinese))
- [10] 于祺.降水引起成层土附加应力及地表沉降的研究[J].地下空间与工程学报,2013,9(1):166-172.(Yu Qi. Research on additional stress and ground settlement caused by dewatering in layered soils [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(1): 166-172.(in Chinese))
- [11] 中华人民共和国铁道部.铁路桥涵地基和基础设计规范(TB 10002.5—2005)[S].(Ministry of Railways of the People's Republic of China. Code for design on subsoil and foundation of railway bridge and culvert (TB 10002.5—2005) [S].(in Chinese))