

承压含水层降水引起地层沉降计算与验证

符乔松¹ 刘盼² 丁春福² 姚爱军¹ 李立云¹

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 2. 中交路桥建设有限公司, 北京 100027)

【摘要】 北京地铁 13 号线天通苑站暗挖施工中, 因地下水丰富且隧道底板位于承压含水层内, 采用止水帷幕效果不佳、成本高昂, 故改为开挖前对承压含水层进行预降水减压以控制地下水。为预测降水引发的地表沉降, 基于三维地下水动力学理论, 建立了一个区域划分数学模型, 综合考虑了承压含水层降水压力分布曲线与隔水层顶板的空间位置, 并将承压含水层上覆隔水顶板受力区域划分为无压区与承压区。依据能量守恒方程构建了单井降水的孔隙水压力分布公式, 并引入 Mindlin 解计算地表沉降。经实测数据验证, 最终沉降值与解析解所求值误差平均值为 15%。研究表明, 该模型可为短期内深层承压含水层降水引起的地表沉降提供理论依据。

【关键词】 降水减压; 承压含水层; 孔隙水压力; 隔水层变形; 地层沉降

【中图分类号】 TU46+3

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0299

Calculation and verification of ground settlement due to precipitation in a confined aquifer

FU Qiaosong¹ LIU Pan² DING Chunfu² YAO Aijun¹ LI Liyun¹

(1. School of Architectural Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Road & Bridge International Co., Ltd., Beijing 100027, China)

【Abstract】 In the underground excavation construction of Tiantongyuan Station of Beijing Metro Line 13, due to the rich groundwater and the tunnel floor located in the confined aquifer, the effect of the waterproof curtain is not good and the cost is high. Therefore, the confined aquifer is pre-dewatered and decompressed before excavation to control groundwater. In order to predict the surface subsidence caused by precipitation, this study established a mathematical model of regional division based on the three-dimensional groundwater dynamics theory, which comprehensively considered the distribution curve of precipitation pressure in confined aquifer and the spatial position of aquiclude roof. After dividing the stress area of confined aquifer into non-pressure area and pressure area, the pore water pressure distribution formula of single well precipitation was constructed according to the energy conservation equation, and the Mindlin solution was introduced to calculate the surface settlement. Verified by the measured data, the average error between the final settlement value and the analytical solution is 15%. The research shows that the model can provide a theoretical basis for surface subsidence caused by precipitation in deep confined aquifer.

【Key words】 dewatering and pressure relief; confined aquifer; pore water pressure; confined aquifer deformation; ground settlement

0 引言

在富水地层地下工程施工过程中, 地下水是制约工程质量和安全的重要因素, 不合理的降水控制可能会造成周边区域出现严重的灾害^[1-2], 因此需要在降水前进行地表沉降预测, 并据此优化降水方案。

在对承压含水层进行降水减压时, 控制不当将

对周边建筑物产生危害^[3]。郑刚等^[4]、彭晨鑫等^[5]针对承压含水层降水开展数值模拟, 结果表明承压含水层降水引起的地表沉降绝大部分源自含水层上覆隔水顶板变形。Liu 等^[6]采用扫描电子显微镜(SEM)对长江三角洲地区的上覆隔水顶板变形进行观测分析, 结果显示隔水顶板发生的较大幅度变形是由“负

基金项目: 国家重点研发计划资助(2023YFC3009300; 2023YFC3009302)

作者简介: 符乔松, 男, 2001 年生, 在读博士研究生, 研究方向为岩土工程。E-mail: fqssqf1226@emails.bjut.edu.cn

通信作者: 李立云, 男, 1973 年生, 博士, 教授, 研究方向为岩土工程。E-mail: lly@bjut.edu.cn

孔压”引发的向下的压力所致。现有研究一致表明,隔水顶板变形是引发承压含水层变形的主控因素。

当前主要围绕承压含水层固结计算地表沉降。Jayeoba 等^[7]通过对土层进行微分并构建解析解,揭示了水位下降是导致有效应力非线性增加的关键因素,同时验证了 Tseng 等^[8]基于三维固结模型所取得的研究成果。李玉选等^[9]将有效应力作用于隔水顶板上,通过分层总和法计算承压含水层压缩变形。事实上由于渗透系数存在差异,隔水顶板的变形显著滞后于含水层压缩,因此仅计算含水层压缩显然会造成较大的误差。周守强^[10]对隔水顶板所受的有效应力变化做出了系统性的研究,考虑了隔水顶板变形对沉降的影响,但隔水顶板的受力具有非连续性^[8],需要对隔水顶板的受力做出更细致的区域划分。

本文结合工程实例,研究隔水顶板的不均匀变形对地表沉降的影响。根据承压含水层降水压力分布曲线,对隔水层顶板受力区域进行划分。通过模拟

软件验证区域划分的准确性,并利用 Boussinesq 解推导隔水层顶板处孔压分布公式,引入 Mindlin 解进一步计算地表沉降值,并与模拟值和实测值对比,验证了该公式的可行性,为地表沉降的预测提供思路。

1 工程实例水文地质与降水方案

北京地铁 13A 线东三路站—天通苑站暗挖区间结构底板标高最低约 4.43 m,结构底板位于砂质粉土层及圆砾、卵石层。结构分布深度范围内有两层地下水,分别为潜水(二)和承压水(四)。暗挖结构施工需要将结构分布深度范围内的潜水疏干,并将承压水水位降至结构底板下 2 m 位置。

本工程降水采用大口径管井围降方案,降水井间距 6 m,降水井孔径 600 mm,下入 400/50 mm 无砂水泥管或钢管,井深 32 m,共计布置降水井 65 眼。降水井布置及土层条件见图 1。

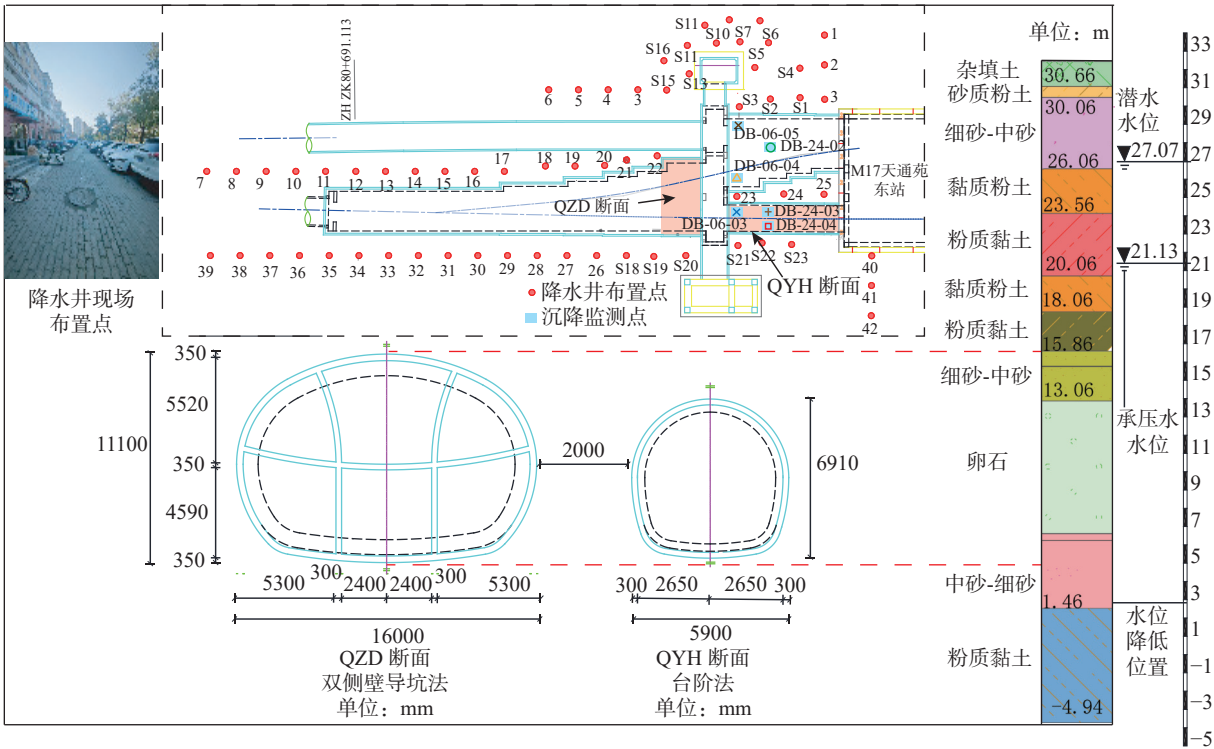


图 1 降水井布置图

Fig. 1 Dewatering well arrangement

2 承压含水层顶板承压分区及模拟

承压含水层降水和潜水含水层降水之间的主要区别在于,承压含水层具有弱透水的上覆隔水层,如图 2(a)所示。承压含水层中的上覆隔水层在降水过程中可能会因负孔压的产生,使得隔水顶板逆回

弹^[11]而发生变形。因此,上覆隔水层可分为两个不同的受力区域(见图 2(b))。此外,这些区域之间的差异将导致不同程度的地面沉降。本文首先根据承压含水层降水压力分布曲线^[12],提出一种基于渗流区域的上覆隔水层变形的区域分类方法。

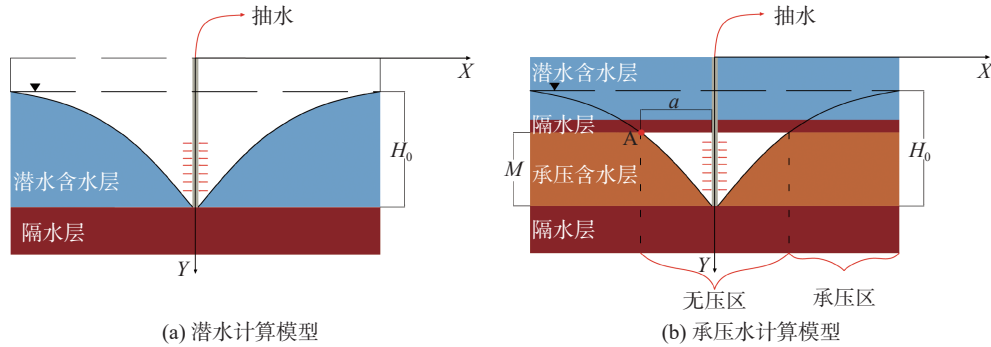


图2 承压含水层顶板承压分区
Fig. 2 Confined aquifer roof pressure partition

2.1 无压区分界点确定

如图2(b)所示,承压含水层降水压力分布曲线与上覆隔水层底板之间的交点A被定义为无压区分界点,A点到降水井的水平距离为 a , a 范围内的区域为无压区。在这个无压区内,水头与水面齐平,承压含水层失去了其高水头特性,而上覆的隔水层失去了向上的浮力。隔水层所受上浮力减小相当于其上覆压力增大^[6],进而导致隔水层的沉降变形增加。此外,在 a 范围内的承压含水层中,孔隙压力的骤降将产生渗流^[13]。

a 以外区域称为承压区。上覆隔水层始终承受向上的浮力,该范围的上覆隔水层保持承压状态。承压区始终保持较高的水头,保留了承压含水层的特性。

由于无压区内含水层水头和水位齐平,因此在 a 以内范围可由潜水分 Dupuit 公式^[14]得到计算式:

$$M^2 - h_w^2 = \frac{Q}{\pi k} \ln \frac{a}{r_w} \quad (1)$$

在 a 以外,可由承压井 Dupuit 公式得到计算式:

$$H_0 - M = \frac{Q}{2\pi k M} \ln \frac{R}{a} \quad (2)$$

式中: M 为承压含水层厚,m; h_w 为承压含水层降水压力分布曲线至含水底板距离,m; Q 为降水井流量,m/d; k 为含水层渗透系数,m/d; a 为A点到降水井的距离,m; r_w 为降水井半径,m; H_0 为初始水头高度,m; R 为降水有效半径,m。

从式(2)中化简即可得到 a 点表达式:

$$\frac{R}{e^{\frac{(H_0-M)2\pi k M}{Q}}} \quad (3)$$

2.2 分界点验证

利用 PLAXIS 软件建立三维单井降水模型,建立尺寸为120 m×120 m×31 m的砂性土地层模型,降

水半径 R 根据吉哈尔特公式: $R = 10s\sqrt{k}$, k 为渗透系数; s 为降深,计算得到降水影响半径 $R=40$ m^[15]。

水力边界条件为:模型四周不断有水源补充;模型中隔水层设置为“干”,表示不透水层。水位设置:潜水位埋深设置为5 m,承压含水层顶板埋深设置为10 m,承压水水头高9 m,含水层厚度为3 m。设置抽水量为200 m³/d的单井降水井位于地层中心位置,行为设置为“提取”,所得计算结果由模型中“流固耦合”模型计算。

力学边界条件设置模型顶部土体可以自由移动,模型底部土体受到三向约束($u_x = u_y = u_z = 0$),计算模型如图3所示。

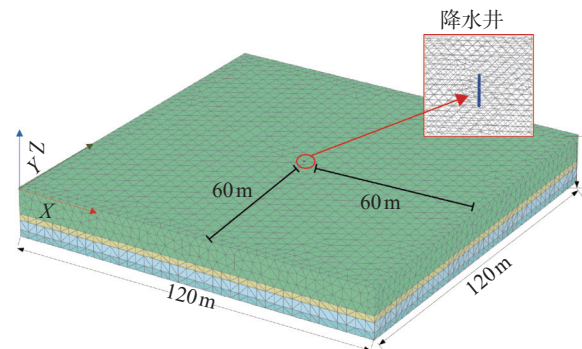


图3 三维有限元模型
Fig. 3 Three-dimensional finite element model

采用修正莫尔-库仑本构,该本构考虑土体剪胀和卸荷再加载过程,能够更好地体现密实土层剪胀特性,较好地反映上软下硬地层地表沉降。具体土层参数参照北京地铁13号线地质勘查报告,对于动弹性模量与静弹性模量和压缩模量之间的关系参考文献[16-17],其他土层水文参数可以参考文献[18]选取,参数选取如表1所示。

图4展示了承压含水层降水影响半径内模拟所得的总水头变化规律。在降水井附近范围内,水头显

表 1 数值模拟土层参数
Tab. 1 Numerical simulation of soil parameters

土层	初始水头 H/m	土层重度 $\gamma_s/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	孔隙率 n	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	土压缩模量 E_s/MPa	动弹性模量 E_d/MPa	静弹性模量 E_0/MPa	渗透系数 $k/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$
杂填土	8	20.4	0.22	0	25	60	50	80	1.86
粉质黏土	8	20.3	0.376	33	12.5	20	160	100	0.008
承压含水层 (细砂-中砂)	13	20.5	0.3	0	23.1	120	660	150	1.55
粉质黏土	2	20.3	0.25	33	11.7	20	160	100	0.008

著降低,水位下降。图中水力梯度曲线为零的点(15.5 m)定义为水力梯度零点。该点以内,水力梯度急剧增大,水流沿水头降低方向发生逐渐增强的渗流;该点以外,水力梯度变化平缓,水流流动缓慢。水力梯度的这种变化表明承压含水层中存在强渗流区域与渗流缓慢区域。

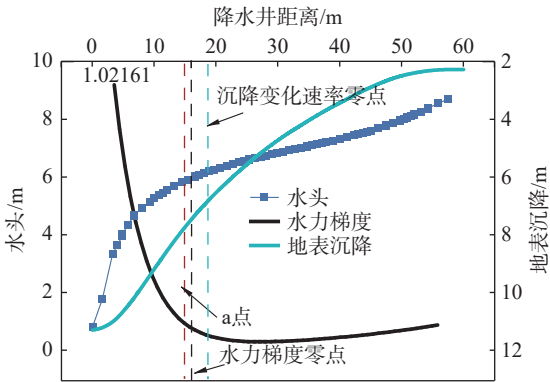


图 4 承压含水层降水引起水头与地表沉降随 x 方向距离的变化

Fig. 4 Simulation of precipitation head, surface subsidence and x -direction distance change of confined aquifer

为反映渗流对地表沉降的影响,同时计算地表沉降变化速率的零点(18.5 m)。在沉降曲线的零点以内,单位距离上沉降值增加的速率持续增大。这表明强渗流区域导致地表沉降加剧。对比可见,式(3)中 a 点计算值(15 m)与上述两个零点位置相近,说明降水曲线的位置影响地表沉降。隔水层区域划分规则的合理性得到验证。

3 承压含水层顶板孔压分布

3.1 承压含水层降水引起孔压分布计算模型

现假设地层存在单层均质各向同性承压含水层,如图 2 所示,其满足如下假设条件:

- (1)含水层上下均存在不透水层;
- (2)承压含水层不发生层间越流,且只考虑竖向压缩;
- (3)抽水时含水层满足达西定律;

- (4)地下水边界条件属于第一类边界条件;
- (5)在抽水过程中渗透系数 k , 贮水系数 s_s 等系数不随压力改变而改变。

取降水漏斗附近一段区间土体,分析其受力状况,如图 5(a)所示,其土体在降水作用下受到动水压力 W_1 , 方向与水流方向相同;动水压力 W_2 , 方向与水流方向相反;降水作用产生的水头差使水流从高水头流向低水头,期间流动过程受到岩土颗粒阻碍,产生与水流方向相反的渗流力 P , 该过程中所有作用在运动中的水的力在运动轴线上投影之和应等于零。

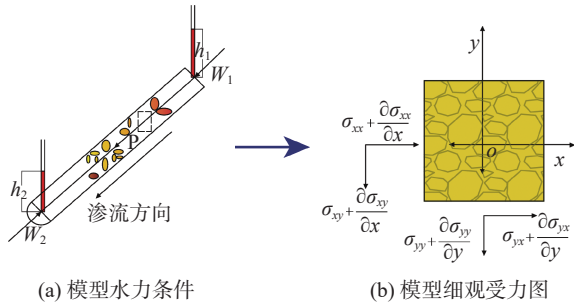


图 5 孔压计算模型
Fig. 5 Pore pressure calculation model

饱和土体中存在固相和液相两种多孔介质,将其看作连续介质且认为每一种都充满整个空间。取该空间中微单元面,如图 5(b)所示,建立二维平面模型,假设将整个体系看作固体和液体两部分^[19]。根据太沙基有效应力原理:

$$\sigma = \sigma_g + \sigma_w \tag{4}$$

$$\sigma_w = np \tag{5}$$

$$\sigma_g = \sigma' + (1 - n)p \tag{6}$$

式中: σ 为总应力; σ' 为有效应力; p 为含水层孔隙水压力; σ_g, σ_w 分别为固体的粒间应力、液体分担的应力; 单元体孔隙率为 n 。

3.2 承压含水层降水引起孔压分布计算公式

分别对固相液相进行力学分析,受到降水引起

的动水压力 σ_{xx} , σ_{yy} 和渗流力 P_x , P_y 。将作用在单元面上的力分解为沿着 x 方向和沿着 y 方向的应力分量, 如图 5(b) 所示。

则固相液相在 x 方向受力分别表示为:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + P_x \quad (7)$$

$$\frac{\partial \sigma_w}{\partial x} - P_x \quad (8)$$

对于承压水, 引入 Boussinesq 微分方程, 认为单元面流入量和流出量的差应等于单位时间内单元体内被阻碍的水量, 进而可得单元体内被阻碍水流的加速度 a_w :

$$a_w = \frac{\left(\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial H}{\partial y} \right) \right) \Delta x \Delta y}{\Delta x \Delta y \Delta t \Delta t} = \frac{k}{2A} \frac{\partial H}{\partial t} \quad (9)$$

式中: H 为抽水过程中的承压水水头; k 为承压含水层渗透系数; S_s 为贮水率; 导水系数 $A = k/S_s$ 。

对于承压水中的固体土骨架受力增量为:

$$\Delta F = \frac{\partial (\gamma \cdot s)}{\partial t} \quad (10)$$

式中: s 为水头的降深; γ 为水的重度。

利用式(7)一式(10)列出二相受力平衡方程, 并代入式(5)、式(6)进行有效应力变换可得到:

$$\frac{\partial^2 \sigma'_{xx}}{\partial x \partial t} + \frac{\partial^2 \sigma'_{yx}}{\partial y \partial t} + (1-n) \frac{\partial^2 p}{\partial x \partial t} + \gamma \frac{\partial^2 H}{\partial x \partial t} = \frac{\partial^2 (\gamma \cdot s)}{\partial t \partial x} \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 \sigma_w}{\partial x \partial t} - \frac{\partial P_x}{\partial t} = n\rho \frac{k}{2A} \frac{\partial^2 H}{\partial t \partial x} = -n\rho \frac{k}{2A} \frac{\partial^2 s}{\partial t \partial x} \quad (12)$$

式中: n 为孔隙率; ρ 为液体密度; k 为含水层渗透系数; A 为导压系数; H 为抽水过程中的承压水水头。

由于土骨架为线弹性体, 服从广义胡克定律, 并假设土骨架在渗流条件下不发生移动。将式(11)、式(12)化简为:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x \partial t} = \left(\gamma - \frac{n\rho k}{2A} \right) \frac{\partial^2 s}{\partial t \partial x} \quad (13)$$

s 根据潜水完整井 Thiem 公式可简化为:

$$s = H_0 - \sqrt{\frac{x}{a}} M \quad (14)$$

a 可根据承压-潜水井流量计算得出:

$$a = \frac{R}{e^{\frac{(H_0-M)2nkM}{Q}}} \quad (15)$$

将式(14)、式(15)代入式(13), 两边同时对 x 积分整理得:

$$p_1 = \frac{2}{3} \left(\gamma - \frac{n\rho k}{2A} \right) \left[\frac{M}{2} \frac{1}{a^{\frac{3}{2}}} \left(\frac{1}{e^{\frac{2(H_0-M)nkM}{Q}}} \right) \times 1.5 \frac{\sqrt{T}}{\sqrt{w}} \right] x^{\frac{3}{2}} \quad (x < a) \quad (16)$$

式(16)是承压含水层降水渗流作用下无压区内孔压分布公式。承压区采用相似的方法:

$$p_2 = \left(\gamma - \frac{n\rho k}{2A} \right) \left[\frac{QH_0}{2k\pi M} \left(\frac{1}{ae^{\frac{2mkM}{Q}}} \right) \times 0.25 \frac{\sqrt{T}}{\sqrt{w}} \right] \ln x \quad (x \geq a) \quad (17)$$

式中: γ 为水重度; n 为含水层孔隙率; ρ 为水密度; k 为含水层渗透系数; $A = k/S_s$ 为导水系数; M 为含水层厚度; a 为承压减压分界点; H_0 为初始承压水头高度; Q 为抽水量; $T = kM$ 为导水系数; $w = S_s M$ 为贮水系数。

3.3 孔压模拟验证

将计算结果与模拟结果对比, 见图 6。

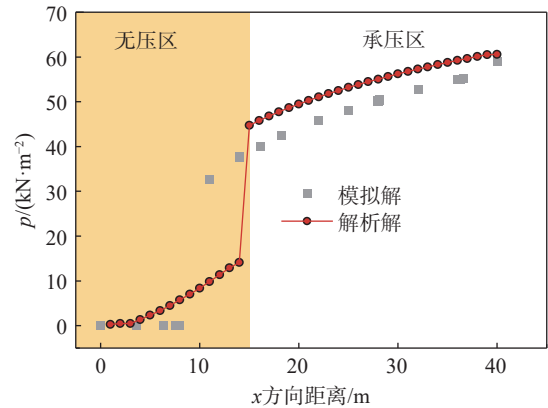


图 6 承压含水层隔水顶板处孔压随 x 方向距离变化分布对比图

Fig. 6 Comparison of distribution of pore pressure at aquiclude roof of confined aquifer with distance in x direction

从图 6 中可以看出公式计算结果与模拟趋势基本吻合。在无压区内孔压值较低, 上升速度较快; 在承压区中孔压值较高但增长速度缓慢, 说明式(16)、式(17)能够较好地描述隔水顶板处承压含水层降水孔压分布。

4 地层沉降计算

运用有效应力原理将 p_1 , p_2 转换为施作在隔水顶板的压力 $F^{[10]}$, 将产生的竖向位移可表达为:

$$W = \frac{F(1+\nu)}{8\pi E(1-\nu)} \left[\frac{3-4\nu}{R_1} + \frac{8(1-\nu)^2 - (3-4\nu)}{R_2} + \frac{(z-h)^2}{R_1^3} \right] + \frac{F(1+\nu)}{8\pi E(1-\nu)} \left[\frac{(3-4\nu)(z+h)^2 - 2hz}{R_1^3} + \frac{6hz(z+h)^2}{R_2^5} \right] \quad (18)$$

式中: F 为顶板所受集中压力; E 为承压水上层土的弹性模量; ν 为上层土的泊松比; h 为集中力作用深度, 即承压含水层距离地表深度; R_1 为作用力距离求解沉降点的距离; R_2 为作用点上方 $2h$ 处距离求解沉降点的距离。

本研究引入 Mindlin 解, 将土层视为弹性半无限空间, 并将直接隔水顶板的变形传递至地表沉降。然而, 该理论框架未充分考虑实际地层的非弹性特性, 即隔水层变形传递至地表存在折减。引入地层沉降传递系数^[20]:

$$G(x, y) = \frac{1}{8400} \left(-163 + 420e^{\left(\frac{-x}{35}\right)} + 245e^{\left(\frac{-x}{1087}\right)} \right) \left(15 + 447e^{\left(\frac{-y}{30}\right)} + 120e^{\left(\frac{-y}{138}\right)} \right) \quad (19)$$

最终隔水顶板引起的地表沉降表达为: $S = G \cdot W$ 。

为了掌握开挖前降水对地表及周边建筑物的变形影响, 对降水井周边均进行实时监测, 监测点布置平面图见图 1, 监测结果如图 7 所示。将本文解析公式计算所得结果与数值模拟解进行对比, 如图 8 所示, 数值模拟值为 11.3 mm, 本文提出的解析解为 11.939 mm, 误差为 3.9%。根据图 7, 地表最终沉降实测值为 13.04 ~ 16.18 mm, 与解析解所求值误差平均值为 15%。误差产生的原因在于, 本模型假设变形在短期内完成^[21], 未考虑长期开采承压水导致的变形滞后效应。

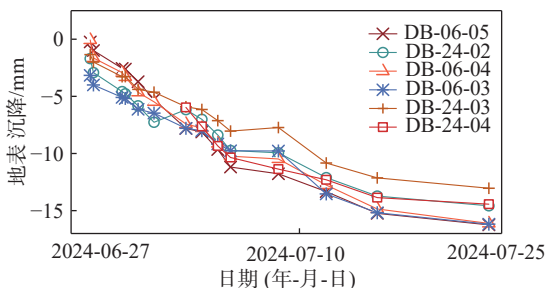


图 7 地表沉降监测值

Fig. 7 Surface subsidence monitoring value

5 群井降水

在实际工程中群井降水情况较为普遍, 群井降

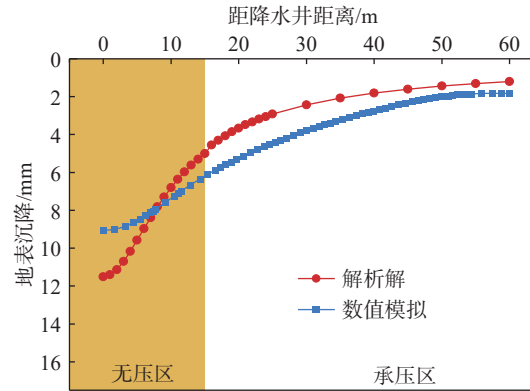


图 8 地表沉降对比

Fig. 8 Comparison of surface subsidence

水时, 彼此间的降深和流量将会发生干扰, 即式(3)中分界点 a 的值将会改变。目前普遍采用叠加原理解决该问题^[12]。若存在 j 口井同时进行降水, 式(3)就应变换为:

$$H_0 - M = \sum_{j=1}^n \frac{Q_j}{2\pi k M} \ln \frac{R}{a_j} \quad (20)$$

式中: Q_j 为第 j 口井的流量; a_j 为分界点到第 j 口井的距离。

若 j 口井抽水量保持不变, 式(20)可简化为:

$$a = \frac{R}{e^{\frac{(H_0-M)2\pi k M}{Q \times j}}} \quad (21)$$

将式(21)代入式(16)、式(17)、式(19), 并对每口井造成的地表沉降进行线性叠加, 即为群井降水导致的地表沉降值。

6 结论

工程降水中承压水减压引发的地表沉降计算问题较为复杂, 对此, 本研究结合实际工程案例, 提出隔水层顶板孔压分布计算方法, 根据隔水顶板卸荷变形原理计算地表沉降, 推导了不同沉降区域的计算模型并加以验证。得到以下结论:

(1) 基于承压含水层降水压力分布曲线与隔水顶板的空间关系, 将承压含水层上覆隔水顶板受力区域分为失去承压能力的无压区与仍保持承压能力的承压区, 并通过数值模拟验证了该方法的合理性。

(2) 提出了考虑上述区域划分影响下的承压水降水引起地表沉降的计算方法, 模型能较好地描述地表沉降规律, 与模拟结果和实测值进行验证, 误差平均值为 15%。该方法能较准确地对短期承压水降水引起的地表沉降进行预测。

参考文献

[1] 翟天琦. 深基坑开挖过程中的地连墙水土压力监测与

- 分析[J]. 岩土工程技术, 2025, 39(2): 311-316. (ZHAI T Q. Monitoring and analysis of water and soil pressure on diaphragm wall during excavation of deep foundation pit[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2025, 39(2): 311-316. (in Chinese))
- [2] 张小辉, 王勇华, 杨丽娜, 等. 敞开式降水对富含饱和软黄土地层深基坑变形影响分析[J]. 岩土工程技术, 2023, 37(4): 481-485. (ZHANG X H, WANG Y H, YANG L N, et al. Influence of open dewatering on the deformation of deep foundation pit in saturated soft loess area[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2023, 37(4): 481-485. (in Chinese))
- [3] PUJADES E, DE SIMONE S, CARRERA J, et al. Settlements around pumping wells: analysis of influential factors and a simple calculation procedure[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 548: 225-236.
- [4] 郑刚, 曾超峰, 薛秀丽. 承压含水层局部降压引起土体沉降机理及参数分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(5): 802-817. (ZHENG G, ZENG C F, XUE X L. Settlement mechanism of soils induced by local pressure-relief of confined aquifer and parameter analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(5): 802-817. (in Chinese))
- [5] 彭晨鑫, 李明广, 甄亮, 等. 上海地区多含水层系统深部承压层降水诱发地层响应规律[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(2): 138-147. (PENG C X, LI M G, ZHEN L, et al. Strata responses due to pumping from deep confined aquifers of multi-aquifer-aquitard system in Shanghai[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2023, 57(2): 138-147. (in Chinese))
- [6] LIU C, SHI B, GU K, et al. Negative pore water pressure in aquitard enhances land subsidence: field, laboratory, and numerical evidence[J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(1): e2021WR030085.
- [7] JAYEOBA A, MATHIAS S A, NIELSEN S, et al. Closed-form equation for subsidence due to fluid production from a cylindrical confined aquifer[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 573: 964-969.
- [8] TSENG C M, TSAI T L, HUANG L H. Effects of body force on transient poroelastic consolidation due to groundwater pumping[J]. *Environmental Geology*, 2008, 54(7): 1507-1516.
- [9] 李玉选, 杨双锁. 基坑潜水及承压水降水引起的地表沉降计算方法研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(23): 9574-9579. (LI Y X, YANG S S. Research on calculation method of ground settlement caused by dewater of foundation pit unconfined and confined water[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(23): 9574-9579. (in Chinese))
- [10] 周守强. 承压含水层降水引起地表沉降及其影响分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021. (ZHOU S Q. Analysis of surface subsidence and influence caused by Dewatering of confined water[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021, doi: [10.27101/d.cnki.ghfgu.2021.000635](https://doi.org/10.27101/d.cnki.ghfgu.2021.000635). (in Chinese))
- [11] 王建秀, 吴林高, 朱雁飞, 等. 地铁车站深基坑降水诱发沉降机制及计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 1010-1019. (WANG J X, WU L G, ZHU Y F, et al. Mechanism of dewatering-induced ground subsidence in deep subway station pit and calculation method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5): 1010-1019. (in Chinese))
- [12] 薛禹群, 吴吉春. 地下水动力学[M]. 北京: 地质出版社, 2010. (XUE Y Q, WU J C. Groundwater dynamics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010. (in Chinese))
- [13] LIU X T, WANG J X, YANG T L, et al. Dewatering-induced stratified settlement around deep excavation: physical model study[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(18): 8929.
- [14] 王晓明, 王秀辉, 文望, 等. Dupuit 稳定井流公式的模型分析[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(6): 73-75, 81. (WANG X M, WANG X H, WEN W, et al. Model analysis of Dupuit's steady well flow formula[J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(6): 73-75, 81. (in Chinese))
- [15] 胡月, 刘国东, 暴伟越, 等. 地下水环境影响评价中的“影响半径”及其确定[J]. 山西科技, 2015, 30(6): 59-62. (HU Y, LIU G D, BAO W Y, et al. The impact radius and its determination in environment impact assessment (EIA) for groundwater[J]. Shanxi Science and Technology, 2015, 30(6): 59-62. (in Chinese))
- [16] 王怡. 土的动弹性模量与静变形模量关系的初探[J]. 广东土木与建筑, 2002(5): 25-27. (WANG Y. Discussion on the relation of earth elasticity modulus and deformation modulus[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2002(5): 25-27. ((in Chinese))
- [17] 安光明, 杨球玉, 杨立建, 等. 某核电厂岩体动静弹性模量的对比研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(S1): 565-569. (AN G M, YANG Q Y, YANG L J, et al. Comparison between static and dynamic elastic moduli of rock mass in a nuclear power plant[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 565-569. (in Chinese))
- [18] 王军辉, 陶连金, 韩焯, 等. 北京地区多层含水层中施工降水诱发地面沉降的实时预测[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(2): 251-260. (WANG J H, TAO L J, HAN X, et al. Real time prediction of subsidence induced by groundwater lowering in construction through multi-

- layered aquifer in Beijing Area[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(2): 251-260. (in Chinese))
- [19] 杜修力, 张 佩, 许成顺, 等. 论有效应力原理与有效应力 [J]. 岩土工程学报, 2018, 40(3): 486-494. (DU X L, ZHANG P, XU C S, et al. On principle of effective stress and effective stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(3): 486-494. (in Chinese))
- [20] 狄胜同. 地下水开采导致地面沉降全过程宏观演化机理及趋势预测研究 [D]. 济南: 山东大学, 2020. (DI S T. Research on macro-mesoscopic evolution mechanism of whole process and trend prediction of land subsidence caused by groundwater[D]. Ji'nan: Shandong University, 2020, doi: [10.27272/d.cnki.gshdu.2020.003997](https://doi.org/10.27272/d.cnki.gshdu.2020.003997). (in Chinese))
- [21] 龚晓南, 张 杰. 承压水降压引起的上覆土层沉降分析 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 145-149. (GONG X N, ZHANG J. Settlement of overlaying soil caused by decompression of confined water[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(1): 145-149. (in Chinese))

收稿日期: 2025-07-09