

# 非稳定承压水降水引起土层沉降分布规律分析

王春波<sup>1,2</sup>, 丁文其<sup>1,2</sup>, 刘文军<sup>3</sup>, 乔亚飞<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

3. 无锡市轨道交通发展有限公司, 江苏 无锡 214013)

**摘要:** 承压含水层减压降水实质上是一个卸荷过程, 其上覆土层沉降可用基于弹性半无限空间 Mindlin 位移解的推导公式进行计算. 分析表明: 无限承压含水层非稳定渗流降水时间对土层沉降影响显著; 由承压水减压降水引起的土层分层沉降随距地表距离的增加而增大, 最大值位于承压含水层顶板处; 影响上覆土层沉降的 7 个参数中, 泊松比和承压含水层渗透系数的变化对土层沉降影响很小; 上覆土层厚度、承压含水层厚度越大地表沉降值越小; 上覆土层弹性模量较小时对地表沉降影响较大, 随着弹性模量的增加, 其对地表沉降的影响逐渐减弱; 地表沉降随单井出水量、承压水水头降深的增大而增加且近似成线性关系; 单井出水量、承压含水层厚度、承压水水头降深、上覆土层弹性模量不仅影响地表沉降值的大小, 还会影响地表沉降的空间分布.

**关键词:** 承压含水层; 非稳定流; Mindlin 位移解; 土层沉降; 降水时间; 土层参数

**中图分类号:** TU463

**文献标志码:** A

## Distribution Law of Soil Settlement Caused by Unsteady Dewatering of Confined Water

WANG Chunbo<sup>1,2</sup>, DING Wenqi<sup>1,2</sup>, LIU Wenjun<sup>3</sup>, QIAO Yafei<sup>1,2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Rail Transit Development Co. Ltd., Wuxi 214013, China)

**Abstract:** Decompression and dewatering in confined aquifer is essentially an unloading process, and the overlaying soil settlement of confined aquifer can be calculated with the derive formulas based on the elastic half-space of Mindlin displacement solution. Analysis shows that influence of dewatering time of unsteady seepage in infinite confined aquifer on soil settlement is significant in comparison with the steady seepage. Soil settlement caused by decompression and

dewatering of confined water increases with the increase of the distance to the ground and the maximum value emerges on the roof of the confined aquifer. Of the seven parameters affecting the ground settlement, Poisson ratio and the confined aquifer permeability coefficient affect the ground settlement little. Ground settlement decreases gradually with the increase of overlaying soil thickness and the confined aquifer thickness. The influence of elastic modulus on ground settlement, which is great when its value is small, gradually weakens with the increase of elastic modulus. Ground settlement increases with the increase of out-water volume of single well and water head drawdown, furthermore, a quasi linear relationship exists between them. The out-water volume of single well, the confined aquifer thickness, the water head drawdown and the elastic modulus of overlaying soil affect not only the value of ground settlement, but also the spatial distribution of ground settlement.

**Key words:** confined aquifer; unsteady seepage; Mindlin displacement solution; soil settlement; dewatering time; soil parameters

基坑工程中, 如承压含水层顶板以上的土层重量不足以抵抗承压水压力时基坑将发生突涌破坏, 承压水减压降水是保证深基坑工程安全施工的一个必要措施<sup>[1-2]</sup>, 然而, 承压水减压降水必然会引起基坑周围土层产生沉降, 目前, 承压水减压降水引起土层沉降的理论分析多基于有效应力原理<sup>[3-5]</sup>, 事实上, 承压水减压降水引起的土层沉降与潜水降水引起的土层沉降存在着本质的区别, 一方面, 潜水含水层的水位线是真实存在的, 而承压含水层不存在真实的水位线; 另一方面, 潜水含水层降水是一个加载过程, 而承压含水层减压降水是一个卸载过程, 所以, 由承压水减压降水引起土层沉降的大小、空间分布不仅与渗流类型、承压含水层性质有关, 还与隔水

层、降水方式、上覆土层参数等有关<sup>[6-7]</sup>. 文献[8]基于太沙基一维固结理论, 推导了深厚弱透水层下卧承压层时, 减压降水引起的沉降固结度计算公式; 文献[9]对顶板完全隔水的承压含水层运用完全井理论, 推导了无限承压含水层完全井稳定渗流降水引起的地面沉降公式; 文献[10]用高、低渗透压缩性地层组合、深源减压上覆土层逆回弹、深源固结变形协调、渐进边界机制解释了上海软土地区承压水减压降水引起的土层分层沉降之和与地表沉降量不等的现象; 文献[11]利用二维有限元法分析了土层参数对基坑周围土体沉降形状的影响. 然而, 实际工程中由于围护结构的隔断或水源补给不及时真正的稳定流很少, 其次, 上述研究都没有从土层沉降的空间分布进行分析.

本文针对无限承压含水层非稳定降水渗流, 对承压水减压降水引起土层沉降的机理进行分析, 以弹性半无限空间 Mindlin 位移解为基础, 推导无限承压含水层非稳定渗流引起土层沉降的解析解, 以无锡三阳广场车站基坑为例, 分析承压含水层降水引起土层沉降的时空分布规律, 并对影响土层沉降的7个参数进行敏感性分析.

## 1 无限承压含水层完全井非稳定渗流

如果将承压含水层顶、底板视为严格的隔水层, 则承压含水层不会产生越流补给而且上部浅土层水位保持不变, 井点降水只会影响承压含水层水头, 在承压水降水过程中可以认为承压含水层对井周围的地下水位分布不产生实质性影响. 图1为无限承压含水层非稳定降水渗流示意图, 图中,  $H$  为地下水位;  $H_0$  为含水层初始地下水位;  $Q$  为抽水井流量;  $M$  为承压含水层厚度;  $r$  为任一点到井中心的距离;  $r_w$  为降水井直径;  $s$  为任意一点在任一时刻的水位降深. 如果承压含水层满足如下假设条件: ①含土层均质各向同性、水平等厚, 侧向无限延伸; ②含水层抽水前天然水力梯度为零; ③含水层抽水时, 地下水流服从 Darcy 定律; ④抽水井为完全井、流量恒定、井径无限小; ⑤在抽水过程中反映含水层性质的物理参数如含水层渗透系数  $K$ , 贮水系数  $S$  等保持恒定. 则单个完全井的井流适用 Theis 公式<sup>[12]</sup>, 其表达式见式(1):

$$\begin{cases} \Delta H = \frac{S}{T} \cdot \frac{\partial H}{\partial t}, & t > 0 \\ H_{(x,y,t)}|_{t=0} = H_0 \end{cases} \quad (1a)$$

$$(1b)$$

$$\begin{cases} H_{(x,y,t)}|_{x \rightarrow \infty} = H_{(x,y,t)}|_{y \rightarrow \infty} = H_0 & (1c) \\ \frac{\partial H}{\partial x}|_{x \rightarrow \infty} = \frac{\partial H}{\partial y}|_{y \rightarrow \infty} = 0, & t > 0 & (1d) \\ 2\pi r MK \cdot \frac{\partial H}{\partial r}|_{r \rightarrow 0} = Q, & t > 0 & (1e) \end{cases}$$

式中:  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$  为二维 Laplace 算子;  $t$  为降水时间;  $K$  为渗透系数;  $T$  为导水系数,  $T = KM$ ;  $S$  为含水层贮水系数,  $S = \rho g(\alpha + n\beta)M$ , 其中,  $\rho$  为水的密度,  $g$  为重力加速度,  $n$  为孔隙率,  $\alpha$  为多孔介质骨架的压缩系数,  $\beta$  为水的压缩系数.

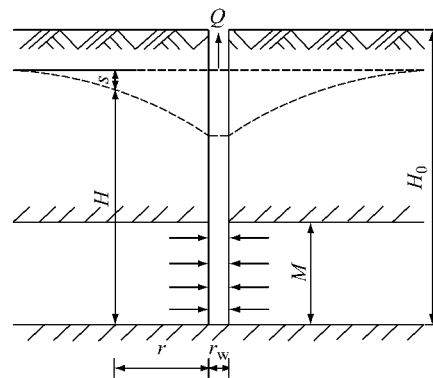


图1 无限承压含水层非稳定降水渗流示意图

Fig.1 Sketch of unsteady dewatering seepage of infinite confined aquifer

为便于分析, 式(1a)~(1e)可用极坐标表示为

$$\left( \Delta - \frac{S}{T} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \right) s = 0, \quad t > 0, \quad r > 0 \quad (2)$$

$$s(r, t)|_{t=0} = 0, \quad r > 0 \quad (3)$$

$$\begin{cases} s(r, t)|_{r \rightarrow \infty} = 0, & \frac{\partial s}{\partial r}|_{r \rightarrow \infty} = 0, \\ t > 0, \quad r > 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$r \frac{\partial s}{\partial r}|_{r \rightarrow 0} = -\frac{Q}{2\pi T}, \quad t > 0, \quad r > 0 \quad (5)$$

Theis 于 1935 年求得此数学模型的解为<sup>[12]</sup>

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} W(u) = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-y}}{y} dy \quad (6)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (7)$$

式(6)中,  $W(u)$  是一个非初等函数, 将  $e^{-y}$  项用泰勒级数展开, 一般地, 当  $u \leq 0.01$  时, 有

$$W(u) \approx -0.577216 - \ln u \approx \ln \frac{2.25Tt}{r^2 S} \quad (8)$$

将式(8)代入式(6)得:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \approx \frac{0.183Q}{T} \cdot \lg \frac{2.25Tt}{r^2 S} \quad (9)$$

## 2 承压含水层非稳定渗流降水引起上覆土层沉降分析

### 2.1 减压降水引起的附加应力

假设承压含水层顶底板为完全隔水层时,顶底板受到承压水的作用力,其中顶板受到向上的作用力,底板受到向下的作用力,受力示意图如图2所示.为便于分析,可假设一虚拟的承压含水层水位线,在降水井减压的作用下,虚拟水位线下降,表现为承压水压力减小,即相当于产生一个作用在承压含水层顶板上的等效附加荷载,如图3所示,其大小可由虚拟的水位线降深式(9)求解,表达式如下:

$$f(r,t) = r_w \cdot s(r,t) \approx \frac{1.83 \times 10^3}{T} Q \cdot \lg \frac{2.25 T t}{r^2 S} \quad (10)$$

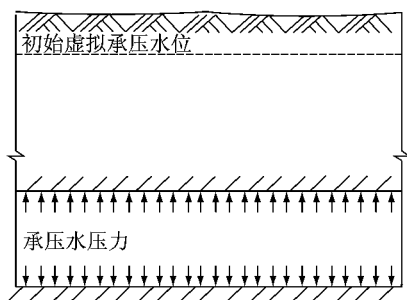


图2 初始承压含水层受力状态

Fig.2 Initial stress state of the confined aquifer

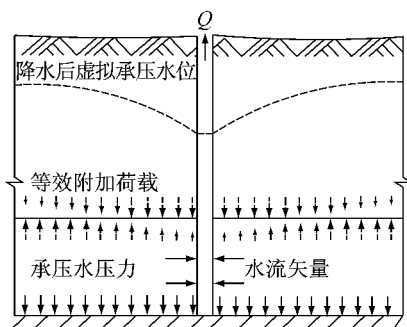


图3 降压后承压含水层受力状态

Fig.3 Stress state of the confined aquifer after decompression

### 2.2 非稳定渗流引起的土层沉降计算公式推导

弹性半无限空间 Mindlin 位移解(图4)来求解均质半无限空间内,在地表以下某一深度处作用一非均匀荷载引起土层的位移.图4中,点 $m$ 的坐标为 $m(R, \theta, z)$ ;  $h$ 为竖向集中力 $F$ 作用点距地表面的距离;  $R$ 为 $m$ 点到竖向集中力作用线的水平距离;  $R_1$ 为 $m$ 点到集中力 $F$ 作用点的距离;  $R_2$ 为 $m$ 点到点

$(0, 0, -h)$ 的距离;  $r$ 为 $R$ 投影到地表面上的水平距离; 则半无限空间某一深度 $h$ 处的集中力 $F$ 在 $m(R, \theta, z)$ 处引起的竖向位移为

$$w = \frac{F(1+\nu)}{8\pi E(1-\nu)} \left[ \frac{3-4\nu}{R_1} + \frac{8(1-\nu)^2 - (3-4\nu)}{R_2} + \frac{(z-h)^2}{R_1^3} + \frac{(3-4\nu)(z+h)^2 - 2hz}{R_2^3} + \frac{6hz(z+h)^2}{R_2^5} \right] \quad (11)$$

式中:  $\nu$  为泊松比,  $R_1 = \sqrt{R^2 + (z-h)^2}$ ;  $R_2 = \sqrt{R^2 + (z+h)^2}$ .

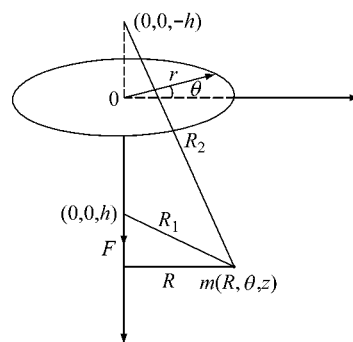


图4 半无限空间 Mindlin 位移解图示

Fig.4 Sketch of semi-infinite Mindlin displacement solution

在附加荷载 $f(r,t)$ 作用下,地表以下任意一点的竖向位移为

$$w = \int dw = \frac{72.8(1+\nu)}{TE(1-\nu)} Q \int_0^t \lg \frac{2.25 T t}{r^2 S} r dr \cdot \left( \frac{3-4\nu}{\sqrt{R^2 + (z-h)^2}} + \frac{8(1-\nu)^2 - (3-4\nu)}{\sqrt{R^2 + (z+h)^2}} + \frac{(z-h)^2}{[R^2 + (z-h)^2]^{3/2}} + \frac{(3-4\nu)(z+h)^2}{[R^2 + (z+h)^2]^{3/2}} + \frac{6hz(z+h)^2}{[R^2 + (z+h)^2]^{5/2}} \right) \quad (12)$$

式中,  $E$  为上覆土层弹性模量, MPa.

如降水影响半径按 Siechardt 公式<sup>[1]</sup>:

$$l = 10s \cdot \sqrt{K} \quad (13)$$

则由非稳定渗流降水引起的土层沉降公式表示如下:

$$w = \frac{72.8(1+\nu)}{TE(1-\nu)} Q \cdot \left( 49.74s \cdot K \cdot \lg \frac{1}{s \cdot K} - 77.76s \cdot K + 50 \lg \frac{2.25 T t}{S} \cdot s \cdot K \right) \cdot \left( \frac{3-4\nu}{\sqrt{R^2 + (z-h)^2}} + \frac{8(1-\nu)^2 - (3-4\nu)}{\sqrt{R^2 + (z+h)^2}} + \frac{(z-h)^2}{[R^2 + (z-h)^2]^{3/2}} + \frac{(3-4\nu)(z+h)^2}{[R^2 + (z+h)^2]^{3/2}} + \frac{6hz(z+h)^2}{[R^2 + (z+h)^2]^{5/2}} \right)$$

$$\frac{6hz(z+h)^2}{[R^2+(z+h)^2]^{5/2}} \quad (14)$$

### 3 算例分析

#### 3.1 承压含水层非稳定降水引起上覆土层沉降

无锡市轨道交通三阳广场站为无锡地铁 1、2 号线换乘车站,根据勘察资料:⑥<sub>3</sub> 承压含水层顶板标高为-20.8 m,层厚 6.0 m,稳定水位标高为-4.1 m,渗透系数  $K=0.12 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,与外界无水力联系,上隔水层为⑥<sub>1</sub> 层粘土,下隔水层为⑦<sub>1</sub> 粉质粘土,两隔水层渗透系数很小,可作为不透水层.简化后的计算模型如图 5 所示,图中  $h$  为上覆土层厚度.采用的土层参数及流量参数见表 1.由式(14)可计算不同深度处距离降水中心不同距离不同降水时间的土层

沉降值,主要计算步骤为:①确定土层沉降不同计算深度  $z$ ;②确定同一土层计算深度上距降水中心距离  $R$ ;③设定不同的降水时间  $t$ ;

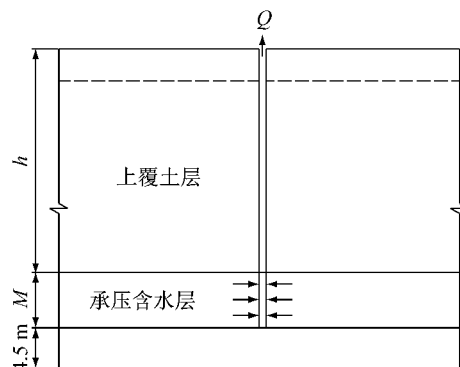


图 5 简化数学计算模型

Fig.5 Simplified mathematical calculation model

表 1 土层及流量参数

Tab.1 Soil and flow parameters

上覆土层 厚度 $h/\text{m}$	承压含水层 厚度 $M/\text{m}$	单井抽水量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	上覆土层 弹性模量 $E/\text{MPa}$	承压含水层 导水系数 $T/$ $(\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1})$	承压含水层 渗透系数 $K/$ $(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	上覆土层平均 泊松比 $\nu$	承压含水层 贮水系数 $S$	水位降深 $s/\text{m}$
24.5	6.0	60	19.0	62.4	10.4	0.32	$8.46 \times 10^{-3}$	8.0

土层沉降随降水时间的变化关系如图 6 所示.由图 6 可知,无限承压含水层非稳定降水引起的土层沉降随时间、空间的分布具有以下特点:①上覆土层同一深度上降水中心处的沉降值最大,随着距降水中心距离的增加沉降值减小;②无限承压含水层非稳定渗流降水时间对土层沉降影响显著,随着降水时间的增加土层沉降增大;③上覆土层不同深度土层的沉降值随着距地表距离的增加土层最大沉降值增大,其最大值位于承压含水层顶板处.图 7 为不同埋深处土层最大沉降值随降水时间的变化曲线,如降水 30 d 时,地表处的最大沉降为 1.99 mm,而承压含水层顶板处的最大沉降值为 7.6 mm,增加了 5.61 mm.

#### 3.2 土层参数敏感性分析

由式(14)可知,无限承压含水层非稳定降水渗流引起的土层沉降  $w=w(h, E, \nu, M, T, S, K, Q, s)$ ,其  $T$  和  $S$  均为  $K$ 、 $M$  的函数,因此影响土层沉降大小、空间分布的只有 7 个参数.以无锡地铁三阳广场站土层参数为基础,变化单一参数,分析降水 30 d 时地表沉降的大小及空间分布规律.各参数变化见表 2.

##### (1) 上覆土层厚度变化对地表沉降的影响

上覆土层厚度  $h$  由 24.5 m 变化到 44.5 m,降水 30 d 时的地表沉降如图 8 所示,当上覆土层厚度

表 2 各土层参数变化表

Tab.2 Changes of various soil parameters

参数	变化范围
上覆土层厚度 $h/\text{m}$	24.5, 29.5, 34.5, 39.5, 44.5
上覆土层平均弹性模量 $E/\text{MPa}$	1.0, 9.0, 19.0, 29.0, 39.0
上覆平均泊松比 $\nu$	0.28, 0.30, 0.32, 0.34, 0.36
承压含水层厚度 $M/\text{m}$	6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0
承压含水层渗透系数 $K/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	10.4, 15.0, 20.0, 25.0, 30.0
单井出水量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	60, 70, 80, 90, 100
水位降深 $s/\text{m}$	8.0, 10.0, 12.0, 14.0, 16.0

为 24.5 m 时,地表最大沉降为 1.99 mm,当上覆土层厚度增加到 44.5 m 时,地表最大沉降为 1.09 mm,减小了 45%,附图表示地表最大沉降值与土体参数的关系变化(下同).如图 8 的附图所示,随着上覆土层厚度的增加,地表最大沉降逐渐较小,两者近似成线性关系.由此可知,当承压含水层埋深大于一定值时,承压水降水引起的地表沉降值可忽略.

##### (2) 上覆土层弹性模量变化对地表沉降的影响

图 9 显示了降水 30 d 时上覆土层弹性模量变化对地表沉降的影响,上覆土层弹性模量由 1 MPa 变化到 39 MPa 时,地表最大沉降由 38.37 mm 减小到 0.972 mm.当上覆土层弹性模量较小时,地表沉降减小的幅度较大,随着弹性模量的增加地表沉降减小的幅度变小,而且弹性模量的变化不仅影响地表沉降的大小,还影响地表沉降的空间分布范围,如弹性模量为 1 MPa 时,距降水中心 500 m 处的地表沉

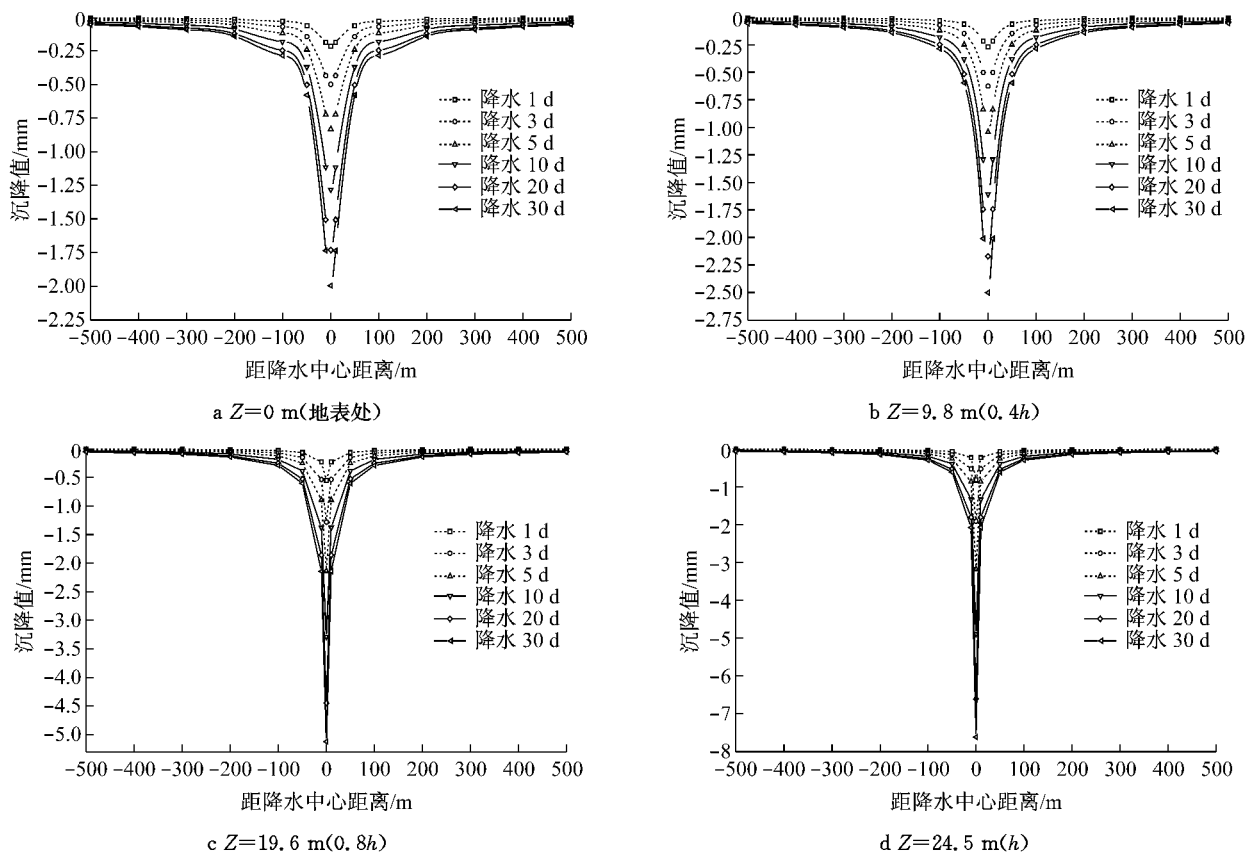


图6 上覆土层不同深度土层沉降随降水时间的变化曲线

Fig.6 Soil settlement curves of different depths of overlying soil with dewatering time

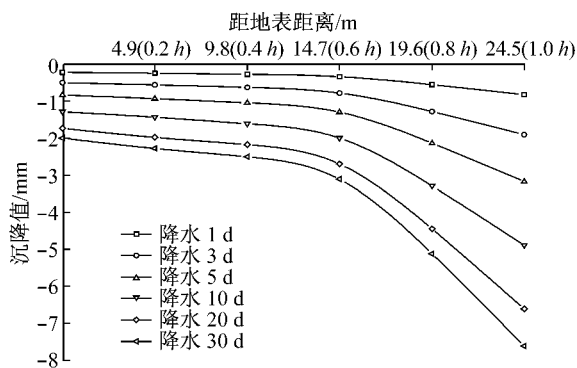


图7 上覆土层不同埋深处最大沉降随降水时间的变化曲线

Fig.7 Maximum settlement curve of different depth of overlying soil with dewatering time

降为 1.08 mm, 而弹性模量为 39 MPa 时, 地表最大沉降才为 0.9 mm.

### (3) 上覆土层泊松比变化对地表沉降的影响

土体泊松比一般在 0.3 左右, 通过改变上覆土层泊松比的大小, 分析对地表沉降的影响, 由图 10 所示, 泊松比取不同值时, 地表最大沉降及地表沉降分布模式基本相同.

### (4) 承压含水层厚度变化对地表沉降的影响

承压含水层厚度由 6 m 增加到 10 m 时地表沉

降的变化规律, 由图 11 所示. 承压含水层厚度为 6 m 时, 地表最大沉降为 1.99 mm, 距离降水中心 100 m 处的地表沉降为 0.28 mm, 当承压含水层厚度增加到 10 m 时, 地表最大沉降为 1.19 mm, 距降水中心 100 m 处的地表沉降为 0.17 mm, 因此, 承压含水层厚度的变化不仅影响地表的沉降, 还会影响地表沉降的分布, 由图 11 的附图可知, 地表最大沉降与承压含水层厚度基本呈线性关系.

### (5) 承压含水层渗透系数变化对地表沉降影响

承压含水层渗透系数的变化对地表沉降的影响如图 12 所示, 当渗透系数由  $10.4 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$  增加到  $30 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$  时, 地表最大沉降由 1.995 mm 增加到 1.999 mm, 变化很小, 可见只有当渗透系数变化很大时, 才会引起地表沉降的变化.

### (6) 单井出水量变化对地表沉降的影响

随着单井出水量的增加, 地表沉降值增大, 如图 13 所示. 单井出水量为  $60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , 地表最大沉降量为 1.99 mm, 当单井出水量增加到  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , 地表最大沉降值增大到 3.38 mm, 增加了 69.8%. 并且随着出水量的增加, 地表沉降分布范围也有所增大, 但距离降水中心 500 m 处的地表沉降值没有发生变化.

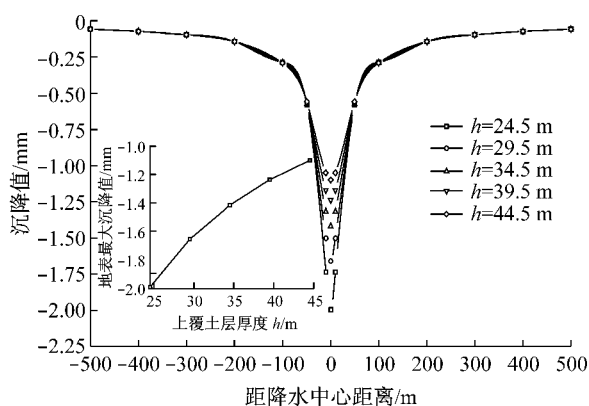


图 8 上覆土层厚度变化对地表沉降的影响

Fig.8 The impact of overlaying soil thickness variation on the surface settlement

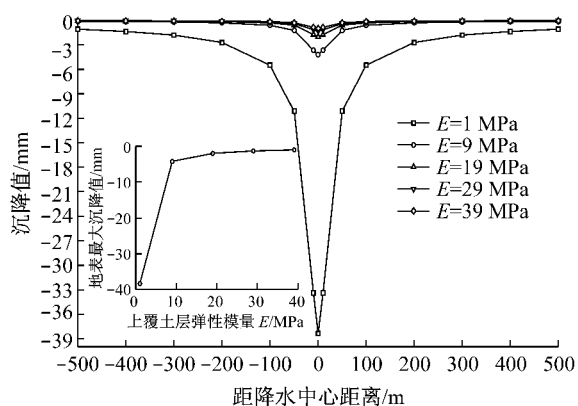


图 9 上覆土层弹性模量变化对地表沉降的影响

Fig.9 The impact of overlaying soil elastic modulus variation on the surface settlement

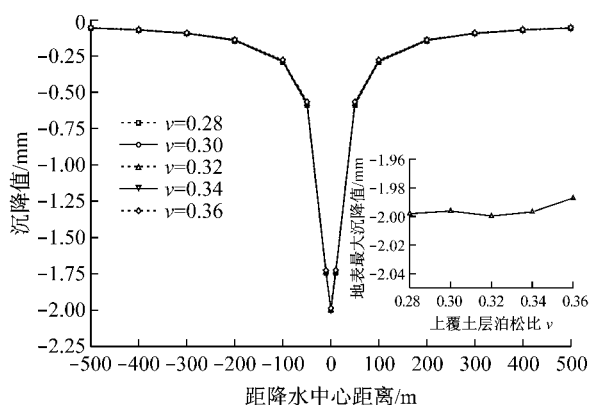


图 10 上覆土层泊松比变化对地表沉降的影响

Fig.10 The impact of overlaying soil Poisson ratio variation on the surface settlement

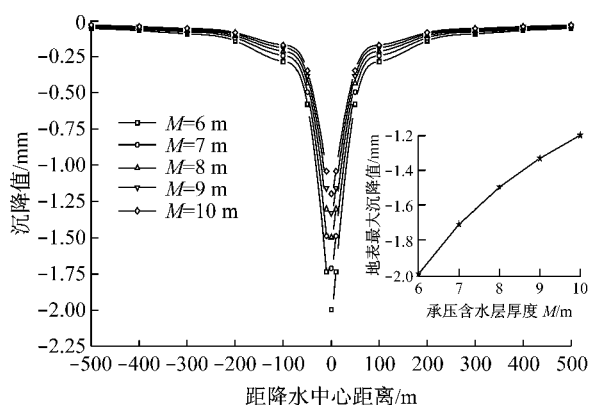


图 11 承压含水层厚度变化对地表沉降的影响

Fig.11 The impact of confined aquifer thickness variation on the surface settlement

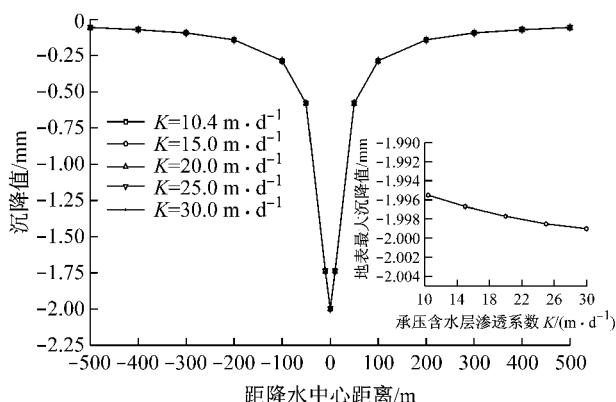


图 12 承压含水层渗透系数变化对地表沉降的影响

Fig.12 The impact of confined aquifer permeability coefficients variation on the surface settlement

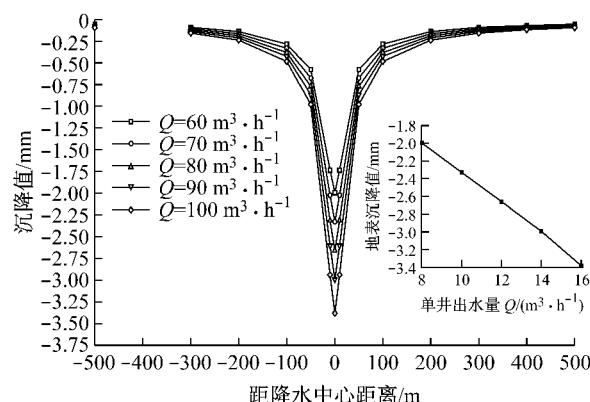


图 13 单井出水量变化对地表沉降的影响

Fig.13 The impact of out-water volumes variation of single well on the surface settlement

(7) 承压含水层水头降深变化对地表沉降影响

承压含水层水头降深变化对地表沉降的影响如图 14 所示,随着承压水头降深的增加,地表最大沉降值增加,而且地表沉降范围增大,当承压水头降深

为 8.0 m 时,距离降水中心 100 m 处地表沉降为 0.28 mm;当承压水头降深为 16.0 m 时,距离降水中心 100 m 处的地表沉降为 0.63 mm.

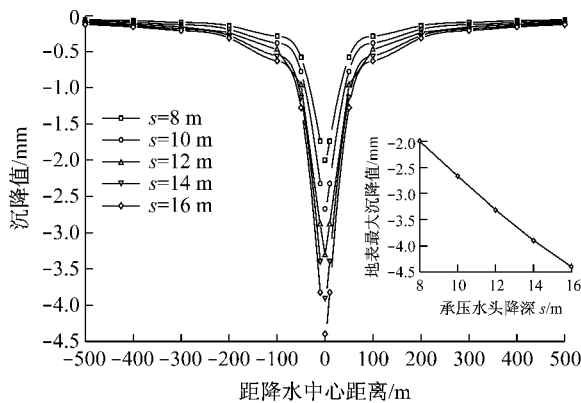


图14 承压水头降深变化对地表沉降的影响图

Fig. 14 The impact of confined aquifer water head drawdown variation on the surface settlement

## 4 结语

(1)基于弹性半无限空间 Mindlin 位移解,推导了无限承压含水层非稳定渗流引起土层沉降的解析公式,利用此公式可以计算任意降水时间上覆土层内任意一点的沉降值。

(2)无限承压含水层非稳定降水渗流引起的地表沉降随时间变化显著,随着降水时间的增加土层沉降增大。

(3)承压含水层减压降水引起的土层沉降最大值出现在承压含水层顶板处,并且越接近地表,土层沉降值越小,当承压含水层埋深大于一定值时,降承压水引起的地表沉降可以忽略不计。

(4)无限承压含水层非稳定降水渗流引起的地表沉降的土层参数中,泊松比和承压含水层渗透系数的变化对地表沉降几乎没有影响,其余参数的变化对土层沉降影响显著,其中上覆土层厚度的变化只会影响地表沉降值大小,而上覆土层弹性模量、单井出水量、水头降深和承压含水层厚度的变化还会影响地表沉降的空间分布。

## 参考文献:

[1] 张永波,孙新忠. 基坑降水工程[M]. 北京:地震出版社,2000.  
ZHANG Yongbo, SUN Xinzong. Dewatering project of foundation pit[M]. Beijing: Seismological Press, 2000.

[2] 李涛,王超. 高承压水地层开挖基坑地板隆起稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1236.

LI Tao, WANG Chao. Bottom heave stability during foundation pit excavation in soil layer with high artesian water pressure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(8): 1236.

[3] Mindlin R D. On the equation of elastic materials with micro-structure [J]. International Journal of Solids and Structure, 1965, 2(1): 73.

[4] 骆祖江,李会中,付延玲. 第四纪松散沉积层地下水渗流与地面沉降控制数值模拟[M]. 北京:科学出版社,2009.  
LUO Zujang, LI Huizhong, FU Yanling. The numerical simulation of groundwater seepage and ground settlement of Quaternary loose sediment layer[M]. Beijing: Science Press, 2009.

[5] 周志芳,朱宏高,陈静,等. 深基坑降水与沉降的非线性耦合计算[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1984.  
ZHOU Zhifang, ZHU Honggao, CHEN Jing, et al. Nonlinear coupling calculation between dewatering and settlement of deep foundation pits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(12): 1984.

[6] WANG J X, HU L S, WU L G, et al. Hydraulic barrier function of the underground continuous concrete wall in the pit of subway station and its optimization [J]. Environmental Geology, 2009, 57(2): 447.

[7] CHAI Jingchun, SHEN Shuilong, ZHU Hehua, et al. Land subsidence due to groundwater drawdowning Shanghai [J]. Geotechnique, 2004, 54(3): 143.

[8] 骆冠勇,潘泓,曹洪,等. 承压水减压降水引起的沉降分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 196.  
LUO Guanyong, PAN Hong, CAO Hong, et al. Analysis of settlements caused by decompression of confined water [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(2): 196.

[9] 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.  
GONG Xiaonan, ZHANG Jie. Settlement of overlaying soil caused by decompression of confined water [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(1): 145.

[10] 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.  
WANG Jianxiu, WU Lingao, ZHU Yanfei, 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.

[11] 金小荣,俞建霖,祝哨晨,等. 基坑降水引起周围土体沉降形状分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(10): 1575.  
JIN Xiaorong, YU Jianlin, ZHU Shaochen, et al. Analysis of behaviors of settlement of pit's surrounding soils by dewatering [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(10): 1575.

[12] 吴林高. 工程降水设计施工与基坑渗流理论[M]. 北京:人民交通出版社,2003.  
WU Lingao. Engineering dewatering design and construction and foundation pit's seepage theory [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.