

承压水降压引起的上覆土层沉降分析

龚晓南, 张杰

(浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058)

摘要: 如何评估承压水降压引起的地面沉降是工程界十分关心的问题。深基坑开挖前及过程中, 所进行的降压导致深层承压水头下降, 使地层应力重新分布产生地面沉降。针对顶板完全隔水的承压水层, 运用完整井理论提出了反映承压水降压作用的附加分布力公式, 在 Mindlin 解的基础上, 推导出了承压水降压附加分布力作用下的地面沉降公式。讨论了上覆土层厚度、上覆土层弹性模量、承压水水头降深和承压层导水系数对沉降的影响。工程实例表明, 根据本文方法得到的承压水降压引起的地面沉降较小, 与工程基坑开挖后的实际表现一致。

关键词: 承压水; 降压; 上覆土层; 沉降; Mindlin 位移解

中图分类号: TU473.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2010)01-0145-05

作者简介: 龚晓南(1944-), 男, 浙江金华人, 从事地基处理方向的研究。E-mail: xngong@hzcnec.com。

Settlement of overlaying soil caused by decompression of confined water

GONG Xiao-nan, ZHANG Jie

(Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering of Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: How to estimate the settlement caused by pressure-relief of confined water has been a research focus in the academic and engineering fields. During the process of pumping confined water, the drop of hydraulic head leads to the decrease of uplift force, and produces extra stress on overlaying soil, resulting in the settlement of the ground. As the permeability coefficient is very small, the roof of the confined aquifer is supposed to be impermeable. By calculating steady flow of fully penetrated well of confined water, the additional force acting on the overlaying soil, which is caused by pressure-relief of confined water, is studied. Above all, the effects of some parameters on the settlement are studied, such as the thickness, modulus of the overlaying soil, head difference and transmissibility of the confined aquifer. Through an example, the settlement of the ground caused by decompression of confined water is small and agrees with the actual one.

Key words: confined water; decompression; overlaying soil; settlement; Minlin displacement solution

0 引言

随着超深基坑的出现, 基坑底板逼近承压含水层, 承压水对基坑工程的影响凸显。为了预防承压水引起的坑底隆起、底板突涌等问题, 往往对承压水采用降压措施。降压会导致承压水水头降低, 使得承压层和上覆土层发生变形, 导致地面发生沉降。承压含水层一般为砂砾层, 具有良好的透水性, 变形可在短时间完成, 不需要考虑滞后效应, 可采用一维固结公式计算沉降量^[1]。上覆非抽水层一般由潜水含水层和隔水层组成, 目前已有许多学者深入研究了潜水降水引起的潜水含水层沉降变形^[2], 仅骆冠勇等^[3]进行了承压水降压引起的上覆土层沉降研究。

本文则根据工程中遇到的具体问题, 分析了当承压层顶板为相对不透水层时, 降压使得承压水对上覆土层的顶托力减小引起的上覆土层沉降。结合承压含

水层完整井的稳定渗流计算, 引入 Mindlin 位移解, 借助于 Mathematic 积分, 求解上覆土层因承压水降压而产生的附加作用力导致的沉降量, 同时借助算例分析了土层各参数对上覆土层沉降量的影响。

1 工程背景

杭州市庆春路钱塘江隧道是钱塘江下的首个过江隧道, 工程由过江隧道、隧道工作井、暗埋段、引道段等组成。其盾构工作井基坑位于钱江两岸, 江南工作井基坑开挖深度 25~30 m。基坑下承压层为钱塘江古河道承压含水层, 水头标高为 -3.80 m 左右, 承压层由⑧-1 圆砾层及⑧-2 卵石层构成, 顶板为相对隔水的黏土构成, 如图 1 所示。

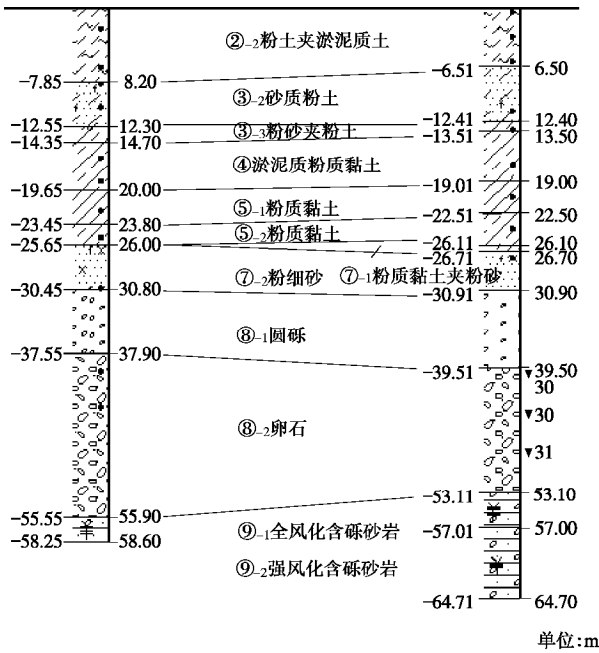


图1 地质剖面图

Fig. 1 Geological profile

根据地质勘察资料，承压顶板黏土层渗透系数为 $7 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 。根据现场抽水实验如图2所示，抽取下层承压水时，上层潜水位变化不明显，两者没有直接水力联系。

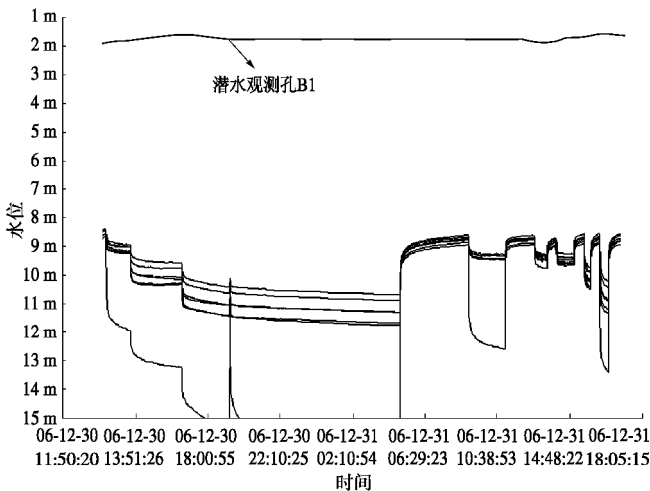


图2 抽水实验水位变化图

Fig. 2 Variation of water level in pumping tests

文献[3]分析了承压层顶板弱透水时，减压使弱透水层和承压层存在水头差，因此上覆土层产生了向承压层的渗流，引起上覆土层固结；并推导了渗流引起的上覆土层沉降公式，推导结果与常规双向排水固结公式相同。本工程中承压层顶板渗透系数很小，可视为隔水层，此时承压水降压引起的沉降尚无文献研究。

2 承压水降压引起的附加力

2.1 承压含水层完整井的稳定渗流计算

承压水是充满在两个隔水层之间的重力水，当承

压含水层的顶底板均为严格的隔水层，工程降压过程不受边界影响时，单个完整降压井适用经典的 Dupuit 公式。根据地下水均衡原理，一个原先稳定的含水层在抽水后如能达到稳定，前提条件是抽水后能得到稳定的、等量的补给^[4]。

对承压水降压做如下假定：①承压含水层均质各向同性，水平等厚，侧向无限延伸；②含水层抽水时地下水流服从 Darcy 定律；承压含水层的顶底板均为严格的隔水层，不考虑越流和竖向补给；③抽水井为完整井，流量恒定，井径无限小。

设有一圆形岛状含水层，在边界($r = R$)上地下水位高度保持不变，抽水井位于含水层中心，抽水后含水层能达到稳定，采用极坐标时有如下数学模型：

$$\frac{\partial^2 H}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H}{\partial \theta^2} = 0 \quad (r_w \leq r \leq R) \quad (1)$$

$$H(R) = H_0 \quad (2)$$

$$H(r_w) = h_w \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial H}{\partial r} \right|_{r=r_w} = \frac{Q}{2\pi T r_w} \quad (4)$$

式中， H 为承压含水层水头， Q 为抽水井流量， R 为影响半径， r 为计算点至抽水井轴线的径向距离， r_w 为井径， T 为承压含水层导水系数，等于渗透系数和含水层厚度的乘积， $T = kM$ 。

根据对称性解得

$$s_s = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{R}{r} \quad (r_w \leq r \leq R) \quad (5)$$

式中， s_s 为承压含水层中水头降深。

抽水井处的承压水水头降深为

$$s_w = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{R}{r_w} \quad (6)$$

2.2 降压对上覆土层产生的附加力

采用完整井对承压含水层降压时，由于将隔水顶底板视为完全隔水，承压水和潜水之间不存在水力联系，因此潜水含水层水头无变化；承压水水头降低，抽水稳定后的水头曲线如图3所示。

承压层降压前充满承压水，水头高度如图3(b)所示。此时承压水对上覆土层存在顶托力，大小与承压水头高度成正比。降压后承压层水头降低，但承压层内依然充满承压水，此时水头高度以抽水井为中心呈漏斗状降落。承压水对上覆土层的顶托力大幅下降，下降值与水头降落高度成正比。对于上覆土层，降压前上覆土层处于平衡状态，而抽水降压打破了这个平衡，使得地层应力重新分布。此时承压水减压相当于在上覆土层和承压层的界面处产生了一个向下的附加作用力，作用力的分布和承压层水头下降分布相同，

呈轴对称漏斗状, 如图 4 所示,

$$f = g_w \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{R}{r} \quad (r_w \leq r \leq R) \quad (7)$$

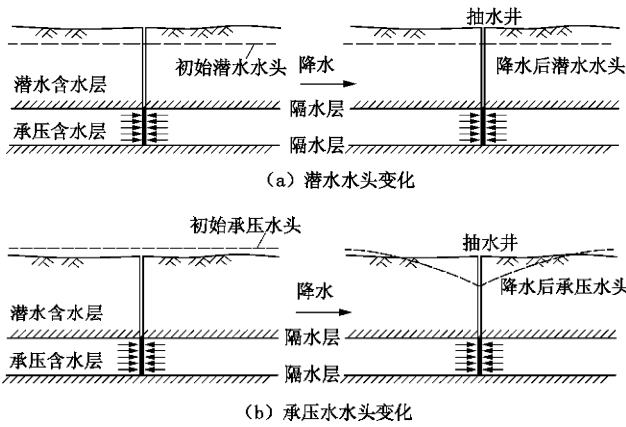


图 3 降压对含水层水头的影响
Fig. 3 Change of water level

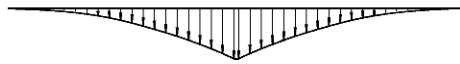


图 4 降压在上覆土层中产生的作用力
Fig. 4 Additional force acting on overlying soil

3 上覆土层沉降计算

由前可知, 降压前后上覆土层潜水水位无变化, 因此不考虑潜水渗流引起的上覆土层固结沉降, 只考虑上覆土层底面处分布的附加作用力 f 引起的地面沉降。Mindlin 位移解针对均质半无限空间, 本文引入 Mindlin 位移解对上述作用力产生的位移进行求解是一种近似。图 5 为半无限体内某一深度 h 处受一集中竖向力 F 作用, Mindlin^[5]给出任一点 $M(x, y, z)$ 处的竖向位移为

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

式中, ν 为土的泊松比, h 为集中力作用点的深度, $R_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z-h)^2}$, $R_2 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z+h)^2}$ 。

降压对上覆土层产生的附加作用力 f 作用深度为 h , 轴对称分布在半径为 R 的圆内。由对称性可知, 在中心点 $(0,0,0)$ 处产生的地面沉降量最大。中心点沉降 S_0 由对 f 在中心点产生的位移积分求得, 采用极坐标时, 中心点沉降为

$$S_0 = \iint_D w' r dr dq = \int_0^{2\pi} dq \int_0^R w' r dr \quad (9)$$

式中, w' 为 f 在中心点 $(0,0,0)$ 处产生的位移。

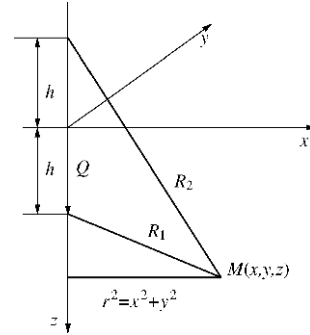


图 5 Mindlin 问题

Fig. 5 Mindlin problem

式 (8) 给出了集中力 $F(0,0,h)$ 在半空间任一点产生的位移公式, 为求解集中力 $F(a,b,h)$ 在 $(0,0,0)$ 处产生的位移, 做移轴变换如图 6 (a), 变成求解集中力 $F(0,0,h)$ 在点 $D(r,0,0)$ 产生的竖向位移。如图 6 (b) 所示, 此时 $R_1 = R_2 = \sqrt{r^2 + h^2}$, 根据式 (8) 可求得位移为

$$w' = \frac{F(1+\nu)}{2\pi E} \left[\frac{2(1-\nu)}{(r^2 + h^2)^{1/2}} + \frac{h^2}{(r^2 + h^2)^{3/2}} \right] \quad (10)$$

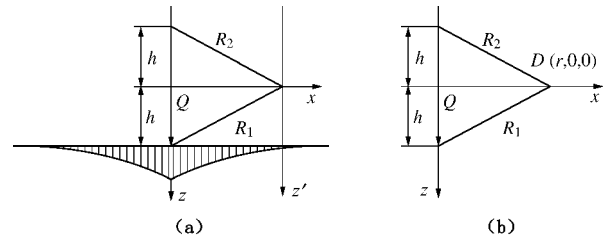


图 6 移轴计算

Fig. 6 Parallel axis theorem

将式 (7)、(10) 代入式 (9), 由于作用力 f 轴对称并且产生的位移轴对称, 因此对径向距离 r 进行积分, 可解得附加力 f 作用下地面处中心点的沉降量为

$$S_0 = g_w \frac{(1+\nu)Q}{2\pi ET} \int_0^R \ln \frac{R}{r} \left[\frac{2(1-\nu)}{(r^2 + h^2)^{1/2}} + \frac{h^2}{(r^2 + h^2)^{3/2}} \right] r dr \quad (11)$$

式 (11) 无法直接积分为表达式, 因此借助 Mathematic 软件进行积分。由式可见, 中心点位移与上覆土层的厚度、上覆土层弹性模量和承压含水层的导水系数等因素有关。

本文对江南工作井降压进行计算, 采用土层参数: 上覆土层厚度 $h=30$ m, 上覆土层模量 $E=1$ MPa, 上覆土层泊松比 $\nu=0.4$; 承压含水层厚度 $M=20$ m, 渗透系数 $k=20$ m/d, 导水系数 $T=1600$ m²/d, 单井抽水量 $Q=3600$ m³/d; 承压水初始水头高度与地面齐平, 承压水水位降深 $s_w=15$ m。将上述参数代入式 (11), 用 Mathematic 编程计算得 $S_0=0.015$ m, 现场踏勘也表明抽水期沉降甚微。

4 参数影响分析

本文以南工作井为算例进行参数影响分析，基本参数如上所示。影响半径 R 按 Dupuit 公式假定为圆形定水头边界。当 Dupuit 公式用到其它含水层中时，影响半径 R 值是代表抽水的实际影响范围，即在距离抽水井 R 处有一个实际的定水头补给； R 处水位下降值为零。影响半径采用 Siechartd 公式确定：

$$R = 10s_w \sqrt{k} \quad (12)$$

图 7 给出了上覆土层模量 $E=1\sim 5$ MPa 时，固定其他参数，中心点位移 S_0 随上覆土层厚度 h 的变化曲线。由图中可以看出，弹性模量一定， S_0 随 h 的增大而减小。说明承压水埋藏越深，减压时产生的附加力越深，其在地面产生的位移越小。 E 对 S_0 有很大的影响， h 一定时， E 越大，中心点位移 S_0 迅速减小。

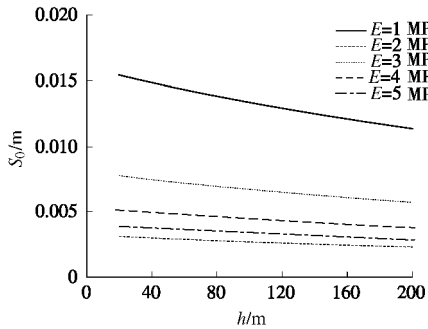


图 7 S_0 随上覆土层厚度的变化

Fig. 7 Variation of S_0 with h

图 8 为上覆土层弹性模量 E 从 1 MPa 变化至 5 MPa 时，中心点位移 S_0 的变化曲线，考虑了 $h=30$ m、50 m 两种情况。由图中可以看出，中心点位移 S_0 随着 E 的增大迅速减小， E 从 1 MPa 变化至 2 MPa， S_0 减小了 50% 左右， E 继续增大时，随 E 的增加而曲线趋于平缓。由式(11)也可知，上覆土层弹性模量独立于积分变量，当其他参数固定时，上覆土层刚度越大，减压时产生的沉降量越小。

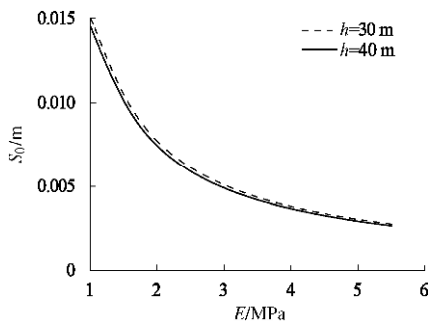


图 8 S_0 随弹性模量的变化

Fig. 8 Variation of S_0 with E

图 9 给出了抽水井处的水位降深 s_w 从 5 m 变化至 25 m 时，中心点位移 S_0 的变化曲线。由图可以看出，

中心点位移 S_0 与 s_w 基本呈线性增加关系，且增加的速率与泊松比 n 相关。 n 越小， S_0 随 s_w 增长速度也越快。由图中还可以看出， s_w 一定时，泊松比越小， S_0 值也越大。水位降深越大，中心点沉降越大。

图 10, 11 给出了导水系数 T 从 320 m^2/d 变化至 4000 m^2/d 时，中心点位移的变化曲线图。导水系数 T 的大小同时受承压含水层渗透系数 k 和含水层厚度 M 的影响。图 10 为含水层厚度 $M=20$ m 时，渗透系数 k 从 16 m/d 变化至 200 m/d 时，中心点位移 S_0 的变化曲线。图 11 为渗透系数 $k=80$ m/d 时，含水层厚度从 4 m 变化至 50 m 时，中心点位移 S_0 的变化曲线。由图可见， S_0 随着 k 和 M 的增大而减小，即导水系数 T 越大 S_0 越小；当 T 继续增大， S_0 降幅减缓。 M 的变化对 S_0 的影响更大， T 同样从 320 m^2/d 变化至 4000 m^2/d 时， M 的变化引起 S_0 的变幅为 0.02 m，远大于 k 变化引起的 S_0 变化幅度。

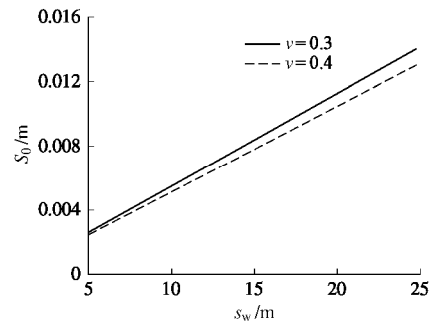


图 9 S_0 随水位降深的变化

Fig. 9 Variation of S_0 with s_w

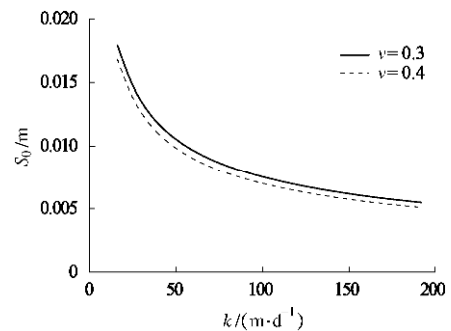


图 10 S_0 随渗透系数的变化

Fig. 10 Variation of S_0 with k

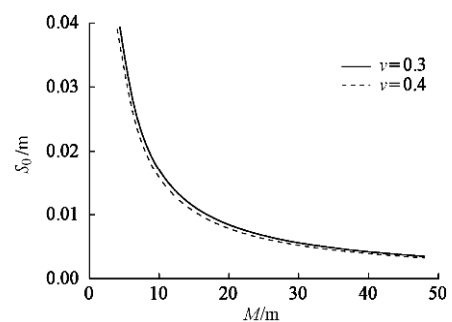


图 11 S_0 随含水层厚度的变化

Fig. 11 Variation of S_0 with M

