

# 基坑降水的非完整井流计算

卢德生

王炳龙

(同济大学,上海 200092) (上海铁道大学,上海 200111)

**【摘要】** 用三维边界单元法解决基坑施工中非完整井降水的渗流计算问题,为降水方案设计提供依据,并对降水过程作出预测。

**【关键词】** 基坑降水 基坑施工 非完整井流计算

**【Abstract】** The seepage calculation for partly penetrated well dewatering is solved in foundation pit construction by the three dimensional boundary elements method. This provides the basis for the scheme design of dewatering, and can make a prediction for dewatering process.

**【key words】** foundation dewatering foundation pit construction calculation for partially penetrated well flow.

## 0 前言

在建筑工程的深基坑施工过程中,往往要求将地下水位降到一定的深度之下,目的是使基坑的坑底面不积水,便于施工。另一方面,降低水位是为了减小基坑的水压力,防止坑底土层破坏或防止发生流砂、管涌等现象。同时基坑降水还能减小基坑侧壁的渗透压力,有助增加基坑侧壁的稳定。因此基坑降水在深基坑工程中占有重要位置。在南方软土地区,由于地下水位浅,土质软弱,基坑降水的作用更加突出。

基坑降水的方案设计必须既科学又经济。降水方案首先要确保降水效果能够达到预期的目的,降水过程能够按预定计划有控制地实行;其次,应考虑降水工程的经济性,做到以尽量少的工程费用实现降水的目的。

节约降水费用的关键是设计最经济的井数、井深及降水井的合理布置。降水井的个数主要取决于单井的降水深度和单井的有效降水范围。由于上海地区浅部土层的渗透性较小,因此降水井附近的降落曲线较陡,使得降

水影响范围较小。由于渗透缓慢,一味地增加井的深度并不能明显地增大降水影响范围。因此实际工程中的降水井往往是浅井,没有打穿含水层,使得降水井变成了非完整井。非完整井的渗流情况相当复杂,给计算增加了困难。

在经典理论中,对于非完整井的稳定流,通过作出简化假设,得出了一些近似解,如半无限承压含水层中非完整井的 В. П. Бабушкин 巴布什金公式、含水层厚度有限时承压含水层中的非完整井的 Muskat 马斯克特公式。而对潜水非完整井,则通过将渗流区分为上下两区,将上段看作潜水完整井,将下段看作承压非完整井的方法来解决。经典理论的非完整井的稳定流近似解,不能适应渗流介质的非均质性问题,也不能用于不规则边界问题,更不能描述渗流的非稳定流过程。

基坑降水的渗流过程实际上是一个三维的非稳定流问题。本文将应用三维边界单元法解决此问题。

### 1 三维边界单元法

地下水运动控制方程为

$$\nabla\Phi = - \sum_{j=1}^{N_w} \int_{z_j^B}^{z_j^T} \frac{Q_j}{(z_j^T - z_j^B)K} \times \delta(x - x_j)\delta(y - y_j)\delta(z - z_j)dz_j \quad (1)$$

式中: $\Phi$ ——测压水头; $K$ ——渗透系数;

$N_w$ ——井的数目;

$Q_j$ ——第  $j$  个井的流量;

$z_j^B, z_j^T$ ——为第  $j$  井过滤器的底和顶位置的垂向坐标,第  $j$  井的滤水管位于  $(x_j, y_j, z_j; z_j^B < z_j < z_j^T)$ 。

据场论的格林积分定理有

$$\int_b (U\nabla^2 v - v\nabla^2 U)dr = \int_{\Omega} (U \frac{\partial v}{\partial n} - v \frac{\partial U}{\partial n})dA \quad (2)$$

式中: $D$ ——积分域; $\Omega$ —— $D$ 的边界;

$U, v$ —— $D$ 上任意二次可微函数。

在三维流地下水问题中,取  $U$  为渗透速度势  $\Phi; v$  为三维自由空间格林函数,  $v = \frac{1}{g}$ 。

其中  $g$ ——为点  $Q(x)$  至奇点  $P(x_0)$  的距离。

将  $U = \Phi, v = \frac{1}{g}$  代入式(2),且将点  $Q(x)$  放在边界  $\Omega$  上,把奇点  $P(x_0)$  放在  $D$  域内或界上,经数学处理后得

$$-\alpha\Phi(p) + \sum_{j=1}^{N_w} 2\pi \frac{Q_j}{(z_j^T - z_j^B)k} g = \iint_{\Omega} (\Phi \frac{\partial g}{\partial n} - g \frac{\partial \Phi}{\partial n})dA \quad (3)$$

式中: $\Phi(p)$ ——基本点  $p$  的势; $\alpha$ ——立体角。若  $p$  在域内,则  $\alpha = 4\pi$ 。如  $p$  在边界上,且边界光滑,则  $\alpha = 2\pi$ 。

式(3)用数值法求解。将渗流区的边界  $\Omega$  剖分成  $M$  个三角单元,  $N$  个结点。单元内的  $\Phi$  和  $\frac{\partial \Phi}{\partial n}$  通过插值函数  $\{N\}$  进行插值,即

$$\begin{cases} \Phi = \{N\}^T \{\Phi\}_e \\ \frac{\partial \Phi}{\partial n} = \{N\}^T \{\frac{\partial \Phi}{\partial n}\}_e \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\{\Phi\}_e, \{\frac{\partial \Phi}{\partial n}\}_e$ ——分别为单元上三个结

点的  $\Phi$  向量和  $\frac{\partial \Phi}{\partial n}$  向量。

对于第  $i$  个节点  $p_i$ ,可将式(3)化为离散形式

$$\alpha_i \Phi_i + \sum_{e=1}^M \{a\}_e^T \{\Phi\}_e = \sum_{e=1}^M \{b\}_e^T \{\frac{\partial \Phi}{\partial n}\}_e + \sum_{j=1}^{N_w} \frac{Q_j}{(z_j^T - z_j^B)K} 2\pi g \quad (5)$$

式中: $\{a\}_e, \{b\}_e$ ——依赖于边界单元局部几何量的向量。

对边界上  $N$  个结点轮流使用式(5)就形成含有  $N$  个未知量的  $N$  维线性方程组,经整理得

$$[H]\{u\} = \{\gamma\} + \{h\} \quad (6)$$

式中: $[H]$ ——已知系数矩阵;

$\{u\}$ ——每一结点未知量组成的向量;

$\{\gamma\}$ ——已知量的向量;

$\{h\}$ ——抽水井的影响值向量。

解此方程组即可得到未知边界值。

### 2 降水场地的水文地质条件

上海某大厦 28 层,基坑开挖深度 10m。该场地四周平坦,就近无楼房,拟采用二级放坡开挖,基坑底部尺寸为 58m×40m。场地南面 50m 有一河浜通过。场地浅部地层的分布情况如下:

①层填土:厚 0.6~1.4m,土质疏松,上部为杂填土,下部为耕植土;

②层褐黄色粉质粘土:厚 1.8~2.2m,层底埋深 2.8~3.2m;

③层灰色粉土夹砂质粉土:厚 12.0~12.8m,层底埋深 15.2~16.4m;

④层灰色粉土:厚 4.8~5.1m,层底埋深 20.0~21.5m。

⑤层灰色粘土:厚 3.2~3.3m,层底埋深 23.2~24.8m。

地质剖面图见图 1。场地地下水的天然埋深为 0.7m。

### 3 条件概化和模型建立

由于基坑开挖深度范围内有较厚的粉土、砂质粉土层,易发生流砂等现象,因此基

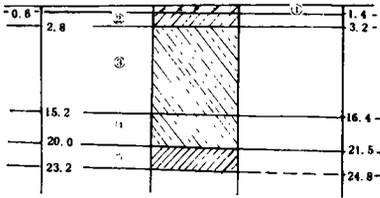


图1 场地地层剖面图

坑施工过程中必须降低地下水位。此外由于透水层厚度较大,附近有河浜通过,因此拟采用管井降水。

基坑底面位于第③层土中,降水的渗流区为②、③、④层土,第⑤层土为隔水层。由于③、④层土是主要的降水渗流区,该二层土质差别不大,因此将③、④层看作基本均匀。第②层由于较浅,降水初期水位就可降到该层之下,不是主要的渗流计算区,因此该层渗透性的差异性可不考虑。从而将②、③、④层构成的渗流区近似看作均匀渗流区。

三维渗流计算区的下边界为第⑤层粘土的顶部,为隔水边界;上边界为潜水面;东、西、北三面没有明显的地质边界,以基坑边线外500m人为画一边界,作为未知边界处理。

对于东、西、北三面未知边界的处理如下:首先将边界看作水位已知的边界,计算出边界上的水力梯度,然后再以计算出的梯度作已知的边界条件计算出水头,如此迭代几次,直至结果收敛为止。

将渗流区的六面边界剖分成三角网格,共682单元,296个节点。对每一节点使用公式(5)就可建立含有296个未知量的296维的线性代数方程组。解此方程组就可得到每一节点上未知的水头 $\Phi$ 或水力梯度 $\frac{\partial \Phi}{\partial n}$ 。

计算出 $t$ 时刻潜水面上各节点的 $\Phi$ 和 $\frac{\partial \Phi}{\partial n}$ 后就可由下式计算出 $t+1$ 时刻潜水面的新位置 $\Phi^{t+1}$ 。

$$\Phi^{t+1} = \Phi - \frac{K}{\mu} \cdot \Delta t \cdot \gamma' \times \left[ \theta \left( \frac{\partial \Phi}{\partial n} \right)^{t-1} + (1-\theta) \left( \frac{\partial \Phi}{\partial n} \right)^t \right] \quad (7)$$

$$\text{式中: } \gamma' = \left\{ 1 + \left[ \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^t \right]^2 + \left[ \left( \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^t \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$\theta$ ——权函数。

对非完整井的处理:式(5)中右边第二项为抽水井的贡献,计算中将滤水管上、下端部的坐标 $(x_T, y_T, z_T)$ 和 $(x_B, y_B, z_B)$ 直接输入程序,计算出的渗流状态变量反映的即是非完整井的井流状态。在降水过程中,随着地下水面的下降,水面可能会下降至滤水管顶部之下,使得实际进水段小于滤水管的长度,此时只需要将潜水面的垂向位置 $\Phi^{t+1}$ 值代替滤水管顶部的纵标 $Z_T$ ,即可反映降水过程中过水断面的变化。

#### 4 模型参数确定

上面由地下水运动的控制方程出发,导出了离散型方程式(5),进而建立方程组(6),该方程组确定了非完整井渗流模型的结构形式。下面将确定模型的参数,渗透系数 $K$ 和给水度 $\mu$ 。

为求得渗透土层的准确参数,打一口降水井和三个观测井进行抽水试验。降水井深16m,井管直径250mm,滤管位置位于地下5~15m。观测井深12m。降水井和观测井的位置见图2。

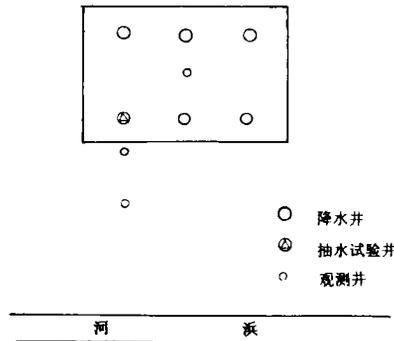


图2 降水井布置图

抽水试验持续六天,以抽水井和观测井的流量和水位动态资料为基础,用上述模型通过正演计算,进行参数调试,最终确定 $K=0.12\text{m/d}$ , $\mu=0.14$ 。

## 5 基坑的降水计算

由于土层的渗透性较差,井深达到一定深度后再加大井深在一定时间内,并不能明显地增大降水影响范围,因此经综合考虑确定水井的深度为16m,井径250mm,滤水管放在5~15m深度范围内。

在基坑土方开挖前先进行降水,在挖至设计坑底位置前必须将坑内任一点的水位降至基坑底面之下。以此作为对降水的要求条件。用以上模型进行计算,确定出最小降水井数和井的平面布置,以及降水需要的时间。

由于土层的导水性较小,而抽水井水泵的抽水能力较大,因此实际抽水流量不是取决于水泵的抽水能力,而是取决于含水层的供水能力。降水过程中过水断面和水力梯度在不断的变化,因此含水层的供水量也在变化,从而实际抽水量也是变量。由计算出的每一时段各节点位置处的 $\Phi$ 和 $\frac{\partial \Phi}{\partial n}$ ,可以确定出井周各时段过水断面的大小和水力梯度值及其分布,由此进一步计算出该时段的供水量,再以此供水量作为抽水量进行下一时段的计算,这样就可算出每一时刻水位的降深情况和抽水量的大小。

由于降水区与含水层没有隔离,降水区域实际上是含水层的一小部分,因此降水过程不是疏干排水,而是通过补排达到动平衡

(上接第34页)

石灰桩与深层搅拌桩施工完毕后,桩身质量检测表明桩身完整性好,桩身强度较高,静载荷试验表明,复合地基承载力达到189kPa,满足设计要求。

竣工两年,最大沉降量62mm,最大不均匀沉降为1.3%,由此可见加固效果较好。

## 4 结语

(1)采用石灰桩和深层搅拌桩联合加固深厚软土能使复合地基承载力得到较大的提高,沉降量也相应减小。

来实现局部排水的目的。

经过正演试算,确定降水井以6眼为佳,井的布置见图2。以图2的降水井布置,用以上模型进行预测,计算了降水1~20d基坑内地下水位的分布情况,从计算结果看出,降水12d后基坑内的地下水位就可降到10m深度之下,满足基坑施工和安全的要求。

该工程的实际降水过程中单井最大流量达到10m<sup>3</sup>/h,维持降水井连续抽水的单井流量为4~6m<sup>3</sup>/h。实际降水10d开始基坑开挖,基坑施工过程中,降水效果达到要求。

## 6 结语

在基坑降水中降水井常常为非完整井,用经典理论求解较困难。三维边界单元法则比较容易处理这类问题。该方法还能随降水过程中水面的下降不断地修正滤水管的有效进水长度,使得对非完整井流的描述更加真实和准确。对三维问题,边界单元法能够将对立体单元的体积分转化为对边界面上单元的面积分,即将三维计算转变成二维计算,使计算工作量大为减小。所以三维边界单元处理此类问题非常有效。

## 参 考 文 献

- 1 JA Liggett and PL-Liu. The Boundary integral equation method for Porus media. London Allen and Unwin, 1983

收稿日期:1997-09-28

(2)复合地基设计应根据场地工程地质特点选择合理的地基处理方案。本文中石灰桩深层搅拌桩复合地基的设计方法可推广到其它三元及多元复合地基的设计中去。

## 参 考 文 献

- 1 Zheng Junjie. Study on Composite foundation formed by lime-flyash piles and deep mixing piles, Proceedings of second international conference on soft soil engineering. Hohai University Press, 1996

收稿日期:1997-07-20