

# 轻型井点系统法基础研究

李 克 波

(土木工程系)

## 摘 要

本文为对建筑施工中采用井点系统降低地下水位方法进行了理论分析研究,并阐明实际施工结果与理论上差异的原因,以及减缩误差的途径,以完善和提高轻型井点系统的设计和施工水平。

## 一、前 言

现代重型工业厂房或摩天楼,因作用在地基上的压力较大或因对地基强度稳定性要求较高,多用深基础,当深基础建于地下水位以下时,基坑往往被地下水所浸没,使基础工程无法施工,采用轻型井点系统法可降低基坑内的地下水位以疏干基坑内的土层。

研究轻型井点系统理论基础的目的是为了开发水源,而是为了降落地下水位。但地下水的取水理论与降落理论相互依存不可分割,都统一在水井理论体系内,因此,轻型井点系统法的理论仍以研究水井理论为基础。

应用水井理论进行降水计算与设计,简捷易行,适合纸笔计算,很受国内外工程技术界的欢迎。但在工程实际中却常发现:按水井理论计算所得的结果常与实际不符,理论计算上又校核不出错误,使设计者费解。

笔者认为:在轻型井点系统设计中已被广为应用的理论公式所描述的降水规律与地下水运动的实际情况是有差别的。本文旨在通过理论分析阐明产生差别的原因和缩减差别的途径,使轻型井点系统工程设计技术进一步完善。

## 二、井点设计常用理论公式

1852年法国水力学家达西(Darcy)在研究地下水在土层中的运动规律时,首先提出了土的渗透系数的概念,确定了达西线性渗透定律: $V=KI$ ,当水力坡度 $I=1$ 时,地下水的渗透速度 $V$ 即等于渗透系数 $K$ , $K$ 具有速度的量纲,常用米/日,米/时,米/秒表示。

本文1986年6月21日收到。

1857年另一位法国水力学家裘布依 (Dupuit, J.) 运用达西定律研究地下水在土中的运动规律, 并在若干假定的基础上导出了水井理论公式。

达西定律和裘布依方程既是水力学中的地下水运动学说发展的基础, 又是井点系统设计中常用计算公式的理论基础。

### (一) 裘布依方程的基本假定

1. 抽水前地下水是静止的, 即天然水力坡度为零, 地下水处于稳定流, 层流、均匀缓慢的渗流状态。

2. 抽水后, 水位下降漏斗的供水边界是圆形的, 在半径为  $R$  的圆柱面上, 保持固定不变的常水头。

3. 抽水井内的水头上一致, 即沿井管进水的水头分布是均匀的。

4. 对于承压水, 土层中的顶板和底板是隔水的; 对于潜水 (无压水), 适用于井边水力坡度不得大于  $1/4$ , 底板是隔水的。

如果现场抽水试验满足上述条件, 则地下水的运动规律, 将完全象裘布依方程所描述的一样, 采用该公式计算出的涌水量或降深也一定与实际情况一致。反之, 如不满足上述条件, 则理论计算值将与实际不符。

### (二) 单井理论计算公式

裘布依在上述约束条件下第一个导出了单井涌水量 (或降深) 的计算公式, 他的公式直到现在不论在理论上和生产实践中都应用得很广泛。单井有潜水井 (无压的) 和自流井 (承压的) 两种类型, 而潜水井和自流水井均可再分为完整井和非完整井。裘布依假定整个水井动力场内的地下水都呈辐射状向水井汇集, 形成向井点中心倾斜的降落漏斗, 通过建立降落漏斗方程式, 导出各种类型水井的理论公式。其中以完整潜水井 (即无压完整井) 的理论阐述最为完善。在此基础上, 又导出了不完整潜水井 (即无压不完整井)、完整自流井 (即承压完整井)、不完整自流井 (即承压不完整井) 等的理论公式。裘布依对完整潜水井的描述用下列公式。

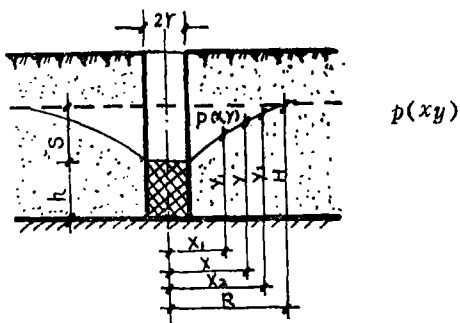


图 1

$$Q = 1.366K \frac{(2H - S)S}{\lg \frac{R}{r}} \quad (1)$$

和

$$S = H - \sqrt{H^2 - 0.73 \frac{Q}{K} \lg \frac{R}{r}} \quad (2)$$

式中

$Q$ ——井的涌水量;

$S$ ——井中水位的降深;

$K$ ——渗透系数;

$R$ ——影响半径;

$H$ ——含水层厚度;

$r$ ——井的半径。

(三) 井点系统内相互作用的理论计算

布置在同一蓄水层中的井点系统是一组群井，当其相互间距小于单井抽水影响半径时，各井会相互产生影响，表现在以下两个方面。

- 1. 在水位下降值不变的条件下，群井工作时各井出水量小于各井单独工作时的出水量。
- 2. 在出水量不变的条件下，系统共同工作时各井的水位下降值大于各井单独工作时的水位下降值。

设A井与B井彼此间的距离小于影响半径(图2)，首先在A井内抽水，B井不抽水，水

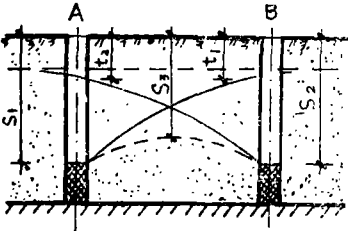


图 2

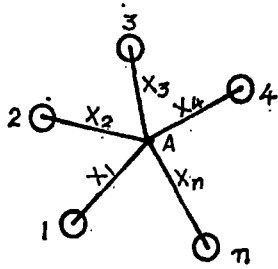


图 3

位降低值为  $S_1$ ，相当于该井的涌水量为  $q_1$ ；由于A井抽水使B井水位也降低，设降低值为  $l_1$ 。同样，若A井不抽水而B井内抽水，井内水位降低值为  $S_2$ ，涌水量为  $q_2$ ，B井使A井水位降低  $l_2$ 。

若两井同时抽水，则两井降落漏斗交叉在一起，在两井间形成一个总水位降落值  $S_3$ ， $S_3$  大于两井单独抽水的下降值，但两井同时抽水时每井的涌水量比每井单独抽水的涌水量要小。

若有  $n$  个井点形成系统，置于基坑内任意点A的周围，A在井点系统的影响范围内(图3)。

运用裘布依降落漏斗方程式，即可导出完整潜水井点系统的理论公式

$$Q = 1.366K \frac{(2H - S) S}{\lg \frac{R}{x_0}} \tag{3}$$

和

$$S = H - \sqrt{H^2 - 0.73 \frac{Q}{K} \lg \frac{R}{x_0}} \tag{4}$$

式中，为  $x_0$  井点系统的假想半径；其它符号同式(1)。

对完整自流井系统的理论阐述，同样要借助于裘布依方程、式(5)和式(6)是单井抽水时的涌水量和降深的计算公式

$$Q = 2.73 \frac{KMS}{\lg R - \lg r} \quad (5)$$

$$S = 0.37 \frac{Q}{KM} \lg \frac{R}{r} \quad (6)$$

利用群井系统内部的相互影响,依次求得每个单井的降落值,藉助这些数值,将它们叠加起来,就是完整自流井系统总的降落值

$$S_{\text{总}} = S_{0-v} + S_{1-v} + S_{2-v} + \dots + S_{n-v}$$

式中

$S_{1-v}, S_{2-v}, \dots, S_{n-v}$ ——编号为 1, 2, ...,  $n$  号水井时,使  $v$  号井的水位降低值;

$S_{0-v}$ —— $v$  号井抽水时自身水位降低值;

$n$ ——对  $v$  号井产生相互作用的井的总数量。

按公式(6)得

$$S_{\text{总}} = \frac{0.37}{KM} \sum_{i=1}^n Q_i \lg \frac{R}{r_i}$$

例如:对四个相互作用的井群系统(图 4),

1 号井中总的水位降落值是

$$S_{\text{总}1} = \frac{0.37}{KM} \left( Q_1 \lg \frac{R}{r_0} + Q_2 \lg \frac{R}{r_{2-1}} + Q_3 \lg \frac{R}{r_{3-1}} + Q_4 \lg \frac{R}{r_{4-1}} \right)$$

式中

$Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$ ——相互作用的井的流量;

$R$ ——井群假想的影响半径;

$r_0$ ——1 号井的半径;

$r_{2-1}, r_{3-1}, r_{4-1}$ ——从确定总降落  $S_{\text{总}1}$  的 1 号井到其它各井间的距离。

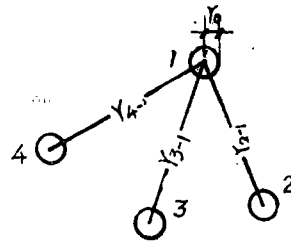


图 4

### 三、对裘布依计算理论的分析 and 探讨

裘布依通过上述假定导出了  $Q = f(S)$  或  $S = \varphi(Q)$  等重要理论公式,在生产实践中得到广泛的应用,但是自然条件和生产实践都有本身固有的运动规律,一旦超脱假定的约束,裘布依公式就要失控。例如,当抽水井出水量达到一定数量时(一般为大降深时),井壁及其地下水将产生下述问题。

1. 裘布依假定,在抽水前地下水是静止的,实际上地下水在天然水力坡度下是运动的。在天然水力坡度影响下,等降深曲线并不是以井轴为中心的同心圆,而是下游半径较

上游半径为长的“似椭圆”。因此,若在圆周上布置观测孔所得的降深是角度 $\theta$ 的函数,即上游得偏小值,在下游得偏大值,只有与天然水流垂直的方向上(即 $\theta=90^\circ$ 或 $270^\circ$ )降深值无变化。这种影响在潜水层中较为显著。因此在布置观测孔测定降深时,应考虑裘布依公式的适用方向性。

2. 裘布依假定抽水后在以“影响半径”为 $R$ 的圆柱面上,保持固定不变的常水头。事实上井的“影响半径” $R$ 所控制的影响区,是一个较广的区域,在这个区域内由于井的影响而产生水位降低,井的涌水量愈大,水位降得愈低,则“影响半径” $R$ 值也就愈大。因此,裘布依公式中的“影响半径” $R$ ,实质是含水层的补给边界, $R$ 值代表含水层对单井的补给能力。在补给能力不变时,它是一个常数,但实际的含水层很少具有这种圆柱面的常水头边界。

抽水后实际下降漏斗,在距井孔很近的范围内(即抽水井至观测孔的距离 $r \leq 0.178R$ ),属对数关系,当抽水井至观测孔的距离 $r > 0.178R$ 后就变为贝塞尔函数关系。贝塞尔函数的斜率较对数函数为小,因此当观测孔越远,计算的 $K$ 值越大。

3. 裘布依假定:抽水井过滤器进水分布是均匀的,其水头上一致。而实践证明:

①当抽水量较大时,由于过滤器管壁的摩阻,水流进入过滤器必然产生水头损失,从而使过滤器周围的水流处于三维流的运动状态。即沿过滤器周围各点的水头,既是 $X$ 、 $Y$ 的函数,又是 $Z$ (距含水层底板的高度)的函数。由于井周的地下水由二维平面流,变为具有 $Z$ 方向分速的三维空间流,致使抽水井内在同一半径 $r$ 处,不同深度 $Z$ 的水头不同。因此,在三维流区(即 $r \leq 1.6$ 倍含水层厚度范围),裘布依假定就不能成立。

②当抽水量较大时,在粒状含水层中当水力坡度增大到一定数值时,流速 $V$ 和水力坡度 $I$ 不再保持线性关系(简称层流),此时达西定律不再有效,从而在该基础上推导的裘布依公式也就失效。事实上,在粗颗粒地层,流速和水力坡度一开始就呈非线性关系而符合抛物线或指数关系(简称紊流)。因此在粗颗粒地层,裘布依公式也不能使用。

③由于井的非完整性,在井壁边界上也无法保持相等的水头。因为不完整井的含水层很厚,滤水管的长度小于含水层的厚度,井壁边界与完整井不同,因而裘布依公式也不适用。

4. 裘布依假定对于自流水(承压水),土层中的顶板和底板是隔水的;对于潜水(无压水),适用于水力坡度不得大于 $1/4$ 。根据抽水试验时常可见到表层粘性土中潜水位下降甚至疏干,可证明上覆“隔水层”中的潜水已向下卧含水层进行补给。说明下卧含水层通过越流渗透补给是抽水得以稳定的重要因素之一。也说明即使是粘性土层也并非绝对隔水。在潜水中目前通用的裘布依公式,均是在流线倾角的正弦用正切代替的基础上推导的,在降落曲线倾斜角很小时可以近似认为 $\sin \theta = \tan \theta$ ,此时裘布依公式会得出足够精确的结果,但是当降落曲线下降角度较大时,特别在井旁, $\theta$ 角可能达到很大数值——近于 $90^\circ$ ,此时实际最大的水头梯度 $I_{\max} \approx \sin 90^\circ \approx 1$ ,而按裘布依公式, $I_{\max} \approx \tan 90^\circ = \infty$ 。因此,当水位降落很大,在井旁形成很大曲率的降落曲线时,用裘布依公式会发生很大误差,也就是说,当潜水的水力坡度大于 $1/4$ 时,该假定就要失效,此时渗流场内的势分布与裘布依所描述的完全不同。

5. 综合上述分析:

(1) 裘布依对承压水、潜水, 完整井与非完整井出水量的理论推导是遵循达西直线渗透定律的, 属于稳定流的理论体系, 当地下水呈非稳定流状态时, 裘布依公式就会产生很大误差。

(2) 当地下水含水层的厚度, 补给能力, 土层颗粒的粗细及其渗透性, 滤水管的长度, 半径和抽水量等各种因素都配合得当, 或采用小降深抽水, 此时在渗流场内可以找到不受井壁边界条件也不随含水层补给条件影响的一个区域, 用此区域内测得的降深值代入裘布依公式, 是可以算得符合实际的  $K$  值, 这个区域称为裘布依公式适用区, 即从三维流区边界到  $0.178R$  之间的一个区域。 $0.178R$  是指抽水后的降落漏斗在距主井孔很近的范围内(即  $r \leq 0.178R$ ) 属对数关系。因此, 裘布依公式适用区可用下式表示

$$1.6M \leq r \leq 0.178R$$

式中

$M$ ——含水层厚度;

$r$ ——抽水井至任意一点(观测孔)距离;

$R$ ——影响半径或引用补给半径。

因此裘布依公式的全面写法应该是

$$\left\{ \begin{array}{l} Q = 2.73 \frac{KMS}{\lg \frac{R}{r}} \quad (\text{承压完整井计算公式}) \\ 1.6M \leq r \leq 0.178R \end{array} \right.$$

#### 四、稳定流理论的使用价值

1. 裘布依水井理论是用稳定流的概念建立的, 而自然界的地下水运动过程中并不存在稳定流状态, 所谓稳定流也只是在有限的时间区段内一种暂时的平衡现象。但是由于地下水运动十分缓慢, 尤其是当地下水的开发规模与天然补给相比很小时, 地下水流则可以近似地视为稳定流。轻型井点系统工程是一般的降水设计, 降水地点并非是选定的水源开发区, 而是在已被定位的施工现场, 旨在有限度地降低地下水位, 抽水规模不大, 不受抽水量生产指标的约束等等, 也可以把地下水流近似地视为稳定流, 借助裘布依的降水理论, 进行轻型井点系统的计算, 设计和施工。故稳定流理论迄今仍有广泛的使用价值。

2. 在井点降水设计中, 可根据水文地质初步勘察资料, 运用裘布依稳定流理论进行宏观的初步计算, 用于降水方案的编制或作初步设计。如对重要参数  $K$ ,  $x_0$ ,  $R$ ,  $H_0$  等值, 配合抽水试验或现场观测以及运用某些经验公式等方法, 予以准确的测定, 并尽量满足理论假定中的约束条件, 也可作如下计算和设计: 根据设计要求的水位降落值计算井点系的出水量或根据井点系统的出水量计算井点系统的水位降落值。从而用于确定井型, 井数和井群系统的布置方案。

3. 近代国内外已普遍采用泰斯(Theis, C. V.)的非稳定流理论来解释地下水的动态变化,但用普通代数方法解泰斯公式较为困难,用图解法可取得满意的结果。稳定流理论公式适用于一般代数运算,但精确度较差,若用现场实测资料配合代数运算,可提高精确度。在工程实验中也常用经验公式计算涌水量和降深,经验公式来源于生产实践的总结,根据现场水文地质详细勘察资料进行计算,能够全面概括井的各种复杂因素,计算结果比较符合实际,但需提供现场勘察或试验所必需的设备和资金。

### 参 考 文 献

- (1) 郭连科等,供水管井设计与施工,中国建筑工业出版社,(1976)。
- (2) И.Н.Абрамов, Водоснабжение, Москва Стойиздат, (1982)。
- (3) И.Г.Галкина, Технология и Организация Строительного Производства, Москва Высшая Школа, (1981)。
- (4) 卡明斯基著,北京地质学院水文地质教研组译,地下水动力学原理,北京地质出版社,(1956)。

## A Study on a Light-Duty Type Well Point System

Li Kebo

### Abstract

This paper describes a light-duty type well point system in lowering the underground water level during engineering construction.

In the study of the basic principle of underground water flow, a discussion on the causes of deviation of field practice results from theoretical deduction has been made, and the means to minimize the error has been proposed so as to improve the construction techniques of the well point system.