

# 多种计算方法确定黄土渗透系数的对比分析

李开超 范寒光 高术孝

(机械工业勘察设计研究院, 陕西西安 710043)

**【摘要】** 渗透系数是工程降水设计重要的水文地质参数之一, 由于水文地质本身的复杂性和计算的多样性, 致使渗透系数计算值往往存在着较大的差异。而对于渗透系数的计算模型较多, 究竟哪种数学计算模型比较接近黄土渗透性的实际情况, 不同的专家有不同的观点。以西安地铁四号线火车站地下车站段抽水试验为例, 运用了完整井稳定流中的单井法、带观测井法考虑井损的单井法数学计算模型, 非完整井稳定流数学计算模型, 水位恢复法数学计算模型 3 种方法综合确定黄土的渗透系数。分析对比了各种数学计算模型优缺点, 给出了计算黄土渗透系数较为合理的数学计算模型。

**【关键词】** 黄土; 渗透系数; 稳定流; 抽水试验

**【中图分类号】** P 641.73

**【文献标识码】** B

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2012.03.009

## Variety of Calculation Methods on Determining the Comparative Analysis of the Permeability Coefficient

Li Kaichao Fan Hanguang Gao Shuxiao

(China JK Institute of Engineering Investigation and Design, Xi'an 710043, Shaanxi, China)

**【Abstract】** Permeability coefficient is an important engineering design precipitation of hydro-geological parameters, Due to the complexity of the hydrogeological and their diversity, resulting in the calculation of permeability coefficient values often lead to big differences. In this paper, Xi'an Metro Line 4 train station pumping test, the related using complete steady stream of well single well method with observation wells mathematical model, also considering the single-well well the complete loss of mathematical model of steady flow non-complete mathematical model of steady flow wells, water level recovery method mathematical model of an integrated three methods to determine the permeability of loess. Analyzing and comparing the advantages and disadvantages of various mathematical models, equations for calculating the permeability coefficient of loess more reasonable mathematical model.

**【Key words】** loess; permeability coefficient; steady flow; pumping test

### 0 引言

在地下水埋藏较浅地段, 地下车站、区间隧道施工受地下水影响非常大, 若工程降水不当, 极易造成边坡和围岩失稳, 引起工程安全事故, 而合理的工程降水设计, 是以准确的水文地质参数为基础的。对西安地铁四号线车站稳定流抽水试验结果进行全过程、多方法分析计算, 剔除异常计算值, 对含水层渗透系数进行综合性评价。

### 1 试验场地工程地质概况

试验场地位于西安市太华南路和自强东路交叉口西北角, 场地地貌属于洪积二级台地, 场地地形平坦、开阔。主要含水层为黄土、粉质黏土层, 试验场地附近没有施工降水及地表水的影响。根

据钻探结果, 抽水井在试验深度范围内主要地层有 4 层, 观测井地层与抽水井地层类似, 地层结构见图 1。

### 2 抽水试验方案设计

本次试验共布设钻孔(井)7 个, 其中抽水井 1 个, 观测井 6 个, 观测井沿平行水流方向及垂直水流方向各布置 3 个, 孔间距为 10 m, 根据“孔深超过拟建线路底板深度不小于 5 m, 最大落程满足基底下 1.0~1.5 m 降深要求”的原则, 抽水井和观测井深度均定为 40 m。抽水井井径为 800 mm, 成井后下入外径 600 mm 的混凝土滤水管, 井壁与管壁的环形间隙投入优质砾石, 投砾石时实际砾面测量和计量同时进行, 投砾石至静止水位面以上 1 m 左右, 其上

至井口段的环状间隙填充黏土以封堵止水。观测井孔径为 600 mm,成井后下入外径 500 mm 的混凝土滤水管,井壁与管壁的环形间隙投入优质砾石,投砾

石时实际砾面测量和计量同时进行,投砾石至静止水面以上 1 m 左右,其上至井口段的环状间隙填充黏土以封堵止水。

地层编号	层底深度/m	分层厚度/m	井管结构示意图	岩土名称及其特征	井管结构
①	1.80	1.80		填土: 以粉质黏土为主, 混有少量砖瓦碎块及灰渣等	套管
②	10.20	8.40		黄土: 棕黄色, 可塑, 针状虫孔发育, 底部见钙质条纹, 偶见姜石	
③	14.00	3.80		古土壤: 棕红色, 硬塑, 块状构造, 大量钙质条纹及姜石	
④	40.00	26.00		粉质黏土: 黄褐色, 可塑-硬塑, 可见铁锈条纹和锰质斑点, 偶见蜗牛碎片	过滤器
					沉淀管

图1 抽水井地层结构

抽水试验设计为 3 个落程,大落程为抽水试验的最大降深(约 24 m)中落程和小落程分别为最大降深的 2/3 和 1/3<sup>[1-6]</sup>。

试验前首先测定抽水井和观测井的静止水位,稳定时间不小于 8 h,从小落程到大落程逐次进行抽水试验,做下一落程试验前须等静水位恢复到试验前静止水位。试验时对抽水井、观测井水位同步

进行观测,试验开始和结束均按照在第 1~6、8、10、15、20、25、30 min 观测水位和流量的要求进行。抽水试验稳定时间的长短,直接关系到抽水试验质量和资料的可用性。根据现场实际情况,大、中、小落程抽水试验稳定时间分别定为 24、16、8 h<sup>[5]</sup>。

本次试验完成了三次降深,每次抽水降深 S 对应的数值见表 1。

表1 抽水井与观测井稳定降深 S

降深	抽水井	观测井 1	观测井 2	观测井 3	观测井 4	观测井 5	观测井 6
第一次	3.77	0.75	0.58	0.40	0.88	0.71	0.46
第二次	16.36	1.57	1.00	0.75	1.49	0.95	0.68
第三次	24.44	1.63	1.06	0.76	1.54	1.05	0.78

### 3 多种计算模型确定黄土渗透系数

根据地下水埋藏条件可知,本次试验场地为潜水,结合场地已有试验资料,利用雷若数初步判定场地水流动为稳定流,所以,本次抽水试验渗透系数求取将采用潜水稳定流数学计算模型。需要说明的是此处所说的渗透系数是指水平渗透系数,而对于垂直渗透系数忽略不计。

#### 3.1 潜水稳定流完整井计算模型

根据场地地下水水位埋深及地层分布情况,水位以下地层主要为黄土和粉质黏土层,对于粉质黏土的渗透性和黄土相比,粉质黏土的渗透性比黄土的渗透性小,计算时可以将粉质黏土层当作隔水层对待,因此,渗透系数求取采用完整井数学计算模型。

#### 3.1.1 单井法计算渗透系数

各种规范、手册所推荐的单孔(抽水井)计算渗透系数公式虽表达形式不同,但最终计算结果相差较小。采用单孔法计算渗透系数,补给半径的预测对计算精度的影响最为关键。本文渗透系数求取采用《抽水试验规程》(YS5215-2000) 5.3.8 推荐的公式<sup>[4]</sup>:

$$k = \frac{0.732Qlg \frac{R}{r}}{(2H-S)S} \quad (1)$$

式中:  $k$  —— 渗透系数, m/d;

$Q$  —— 抽水井涌水量,  $m^3/d$ ;

$H$  —— 含水层厚度, m;

$S$ ——抽水井水位下降值, m;

$R$ ——影响半径, m;

$r$ ——抽水井半径, m。

根据场地周边抽水试验资料及表 1, 分别取第一、二、三次降深引用补给半径为 60 m、70 m、80 m, 则分别计算的等效渗透系数分别为: 1.98 m/d、1.19 m/d、1.17 m/d。

### 3.1.2 利用观测井计算渗透系数

利用观测井计算渗透系数主要分为利用一个观测井和利用两个观测井。普遍认为该方法计算简单, 精度较高, 是一种比较可靠的方法, 笔者在此处只列举利用两个观测井计算其渗透系数<sup>[1]</sup>。

利用两个观测井计算渗透系数公式如下:

$$k = \frac{0.732Qlg \frac{r_2}{r_1}}{(2H - S_1 - S_2)(S_1 - S_2)} \quad (2)$$

式中:  $S_1$ 、 $S_2$ ——观测井水位下降值, m;

$r_1$ 、 $r_2$ ——观测井距抽水孔距离, m。

若利用一个抽水孔和一个观测井计算时, 只需将  $r_1$  取为过滤器半径。计算时观测井的选取分垂直水流方向和平行水流方向, 分别选取垂直水流方向观测井两两组合和平行水流方向观测井两两组合进行计算, 计算结果见表 2。

表 2 利用观测井计算值

抽水降深	流量 ( $m^3 \cdot d^{-1}$ )	计算孔组合	渗透系数 ( $m \cdot d^{-1}$ )
第一次	293	观测井 1-2	5.87
		观测井 1-3	4.51
		观测井 2-3	3.21
		观测井 4-5	5.89
		观测井 4-6	3.77
		观测井 5-6	2.33
第二次	590	观测井 1-2	3.59
		观测井 1-3	3.95
		观测井 2-3	4.73
		观测井 4-5	3.79
		观测井 4-6	3.98
		观测井 5-6	4.38
第三次	616	观测井 1-2	3.76
		观测井 1-3	3.89
		观测井 2-3	4.12
		观测井 4-5	4.37
		观测井 4-6	4.45
		观测井 5-6	4.58

### 3.1.3 考虑井损计算渗透系数

在抽水试验过程中, 经常会发现主井的降深超过 20 m, 而在距主井附近的观测井的降深有时很小, 从绘制的  $Q = f(S)$  曲线看, 曲线为一抛物线, 随着降

深的增大, 抛物线陡降的更为明显, 这就是我们常说的井损, 在没有砂层的黄土区试验场地, 这种现象更为明显, 对于小降深抽水试验井损还不明显, 而大降深抽水试验, 井损是相当明显的。所以, 笔者在抽水试验时, 在距离抽水井外径 10 cm 边上布置了井损孔, 同时测量了井损孔的降深, 根据井损孔的降深对抽水井降深进行修正。下表渗透系数求取过程中考虑了井损的影响, 对抽水井降深进行修正后。再采用式(1)计算渗透系数。分别取第一、二、三次降深引用补给半径为 60 m、70 m、80 m, 则计算的等效渗透系数分别为 3.45m/d、2.84m/d、2.27m/d。

### 3.2 潜水稳定流非完整井数学计算模型

实际在抽水过程中, 粉质黏土也有一定的渗透性, 并非是完全的隔水层, 因此, 将其考虑为非完整井, 采用非完整井数学计算模型。本文在此处只列举大家普遍认为计算简单、精度较高带两个观测井的稳定流非完整井计算公式<sup>[2]</sup>。

利用两个观测井计算渗透系数公式:

$$k = \frac{0.366Q(\lg r_2 - \lg r_1)}{(S_1 - S_2)(2S - S_1 - S_2 + L)} \quad (3)$$

式中:  $S$ ——抽水井水位下降值, m;

$S_1$ 、 $S_2$ ——观测井水位下降值, m;

$r_1$ 、 $r_2$ ——观测井距抽水井距离, m;

$L$ ——过滤器长度, m。

计算时分垂直水流方向和平行水流方向, 分别选取垂直水流方向观测井两两组合和平行水流方向观测井两两组合进行计算, 计算结果见表 3。

表 3 利用观测井计算值

抽水降深	流量 ( $m^3 \cdot d^{-1}$ )	计算孔组合	渗透系数 ( $m \cdot d^{-1}$ )
第一次	293	观测井 1-2	4.97
		观测井 1-3	3.81
		观测井 2-3	2.72
		观测井 4-5	5.00
		观测井 4-6	3.19
		观测井 5-6	1.97
第二次	590	观测井 1-2	1.83
		观测井 1-3	2.01
		观测井 2-3	2.42
		观测井 4-5	1.93
		观测井 4-6	2.03
		观测井 5-6	2.23
第三次	616	观测井 1-2	1.52
		观测井 1-3	1.57
		观测井 2-3	1.67
		观测井 4-5	1.77
		观测井 4-6	1.81
		观测井 5-6	1.86

### 3.3 水位恢复法计算模型

当利用水位恢复速度计算渗透系数时,可在停止抽水后,降落漏斗逐渐恢复,从 $t$ 表示开始抽水到选定某一时刻为止的延续时间, $t'$ 表示停止抽水后到选定时间的的时间间隔,则渗透系数宜按式(4)计算,求出一系列与水位恢复时间有关的数值 $k$ 后,则可作 $k=f(t)$ 曲线,根据此曲线,可确定近于常数的渗透系数数值,见图2。

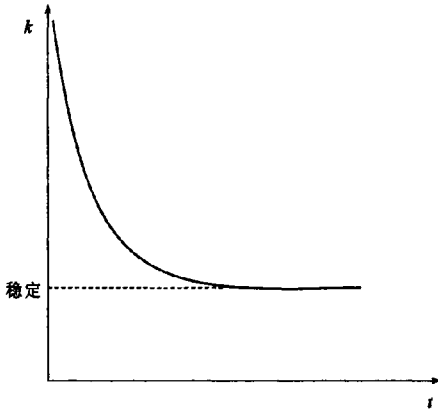


图2 水位恢复 $t-k$ 曲线图

$$k = \frac{0.138Q}{SH} \ln \frac{t}{t'} \quad (4)$$

采用式(4),分别计算出第一、二、三次降深对应的等效平均渗透系数分别为2.54、3.17、3.82 m/d。

通过运用上述方法计算得到的渗透系数进行对比分析可知,采用稳定流完整井单孔法计算出得渗透系数偏小,主要是因为抽水井中实际降深比运用裘布依公式计算时的降深要大,即我们通常所说的井损造成的。采用带观测井的稳定流完整井计算出得渗透系数偏大,主要是因为粉质黏土层不是绝对的隔水,在抽水过程中也是一个给水层。采用带观测井的稳定流非完整井计算出得渗透系数比较符合实际情况。对于采用单孔法计算渗透系数,误差较大,但工程耗资较小,需要的时间较短,对于只需初步了解含水层的性质可以采用。对于采用带观测井的数学计算模型,计算出的渗透系数比较接近实际情况,但工程耗资大,需要的时间长,对于需要详细了解含水层的性质可以采用。对于资料整理过程中,究竟选用哪种数学计算模型,应该结合场地含水层埋藏条件和地层岩性特征等综合确定。

### 4 结论及建议

运用了完整井稳定流中的单井法、带观测井法、考虑井损的单井法数学计算模型,非完整井稳定流数学计算模型,水位恢复法数学计算模型对地铁地下车站段抽水试验结果进行分析计算,通过上述几种方法的计算比较,可以得出如下结论:

1)采用多种计算方法,基本可以确定该段黄土等效渗透系数范围在1.5~5.0 m/d。

2)单孔抽水试验计算出的渗透系数偏小,与实际情况偏差较大。运用带观测井的稳定流完整井数学模型计算出的渗透系数较带观测井的稳定流非完整井数学模型大。

3)利用观测井的稳定流非完整井计算方法得到的渗透系数与实际情况较为符合,观测井的稳定流完整井计算方法得到的渗透系数偏于安全,生产中应该采用稳定流完整井数学计算模型。

4)黄土层中较大落程抽水井损是比较明显的,在水文地质参数求取时应该考虑井损对参数的影响。

5)由于水文地质本身的复杂性和计算的多样性,选择计算模型时应该充分考虑模型的边界条件和场地含水层水文地质条件。

6)在求取岩土渗透系数时,应对各个抽水试验的过程进行分析计算,综合确定水文地质参数,以免单个计算公式造成较大的误差。因此,在进行渗透系数等水文地质参数计算中,采取多种方法综合分析,可有效提高测试结果的准确度。

### 参考文献

- [1] GB50307-1999 地下铁道、轻轨交通岩土工程勘察规范[S].
- [2] TB10049-2004, J339-2004 铁路工程水文地质勘察规程[S].
- [3] GB50027-2001 供水水文地质试验规范[S].
- [4] YS5215-2000 抽水试验规程[S].
- [5] 余学鹏, 门妮. 完整井稳定流抽水试验渗透系数的确定分析[J]. 铁道勘察, 2010(6): 34-36.
- [6] DLJ203-81 水利水电工程钻孔抽水试验规程[S].

收稿日期:2012-02-06